

Évaluation des processus hydro-sédimentaires d'une retenue de forme allongée: application à la retenue de Génissiat sur le Haut-Rhône

Lucie Guertault

► To cite this version:

Lucie Guertault. Évaluation des processus hydro-sédimentaires d'une retenue de forme allongée : application à la retenue de Génissiat sur le Haut-Rhône. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Université Claude Bernard - Lyon I, 2015. Français. NNT : 2015LYO10143 . tel-01273431

HAL Id: tel-01273431 https://theses.hal.science/tel-01273431

Submitted on 12 Feb 2016 $\,$

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^{o} d'ordre : 143-2015

THÈSE DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

délivrée par

L'UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON 1

École doctorale Mécanique, Énergétique, Génie civil, Acoustique

Spécialité Mécanique des fluides

DIPLÔME DE DOCTORAT

(arrêté du 7 août 2006)

Évaluation des processus hydro-sédimentaires d'une retenue de forme allongée : application à la retenue de Génissiat sur le Haut-Rhône

Préparée dans l'Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique, Irstea Lyon par

Lucie Guertault

Soutenue publiquement le 9 octobre 2015 à Villeurbanne devant le Jury composé de :

M. Michel Estèves	Directeur de Recherche, IRD LTHE	Rapporteur
M. Anton Schleiss	Professeur, EPFL	Rapporteur
Mme Ivana Vinkovic	Professeur des Universités, UCBL	Examinateur
M. Giampaolo DI SILVIO	Professeur Émérite, Université de Padoue	Examinateur
M. André PAQUIER	Chercheur ICPEF, Irstea Lyon Villeurbanne	Directeur de thèse
M. Benoît Camenen	Chargé de Recherche HDR, Irstea Lyon Villeurbanne	Encadrant
M. Christophe Peteuil	Ingénieur Chercheur, CNR	Encadrant

Année 2015

Remerciements

Toute petite déjà je collectionnais les cailloux, cela explique sûrement pourquoi j'ai fait une thèse sur le transport de sédiments. En plus, ces trois ans m'ont permis de compléter ma collection, avec notamment des spécimens rares du Haut-Rhône!

Je tiens d'abord à remercier les membres du jury de thèse : Ivana Vinkovic qui a accepté de présider le jury, Anton Schleiss et Michel Estèves pour la relecture de la thèse et leurs remarques constructives sur ce travail et Giampaolo Di Silvio, qui a également suivi ma thèse avec intérêt dès le début.

Je remercie mon directeur de thèse André Paquier pour son encadrement et ses conseils, notamment pour la modélisation. Je remercie mes encadrants de thèse : Christophe Peteuil pour son rôle important de relais entre le monde de la recherche et l'opérationnel, et Benoit Camenen, pour sa disponibilité dans l'encadrement au quotidien, les réunions hebdomadaires, et pour les multiples relectures de la thèse et des articles. Travailler sur une thèse à visée opérationnelle n'a pas toujours été facile, et je vous remercie tous les trois de m'avoir orientée dans la bonne direction. Merci de m'avoir permis de communiquer sur mes travaux à travers les nombreux séminaires et conférences auxquels j'ai participé.

Je souhaite remercier sincèrement toutes les personnes qui ont suivi et contribué à ce travail,

- à Irstea : Jérôme Le Coz pour les conseils, Jean-Baptiste Faure pour le développement des codes de calcul, la super équipe Métro : Guillaume Dramais, Fabien Thollet, Mickael Lagouy et Chloé le Bescond pour les mesures, Marina Launay pour la partie sur les flux sédimentaires, Violaine Dugué et Carla Walter pour leurs retours sur le modèle, et Luc Duron pour son excellent stage sur la modélisation 2D-3D. Un grand merci à Hélène, Anne puis Béatrice et Carole pour le suivi administratif.
- à la CNR : Françoise Ababie, Sylvain Reynaud et Didier Roult pour le suivi de la thèse, Thierry Frétaud et Aurélie Jouve pour leurs retours sur les modèles (merci aussi Thierry pour ta réactivité concernant mes demandes de données ou autre), les équipes de la DRB, DI-CEN et CACOH pour les nombreuses mesures réalisées.
- Merci aussi à Thomas Geay pour son aide dans la mise en place et l'exploitation des données de l'hydrophone.

J'ai beaucoup apprécié ces trois ans de thèse, et pas seulement à cause de l'eau et des cailloux, la bonne ambiance qui règne à Irstea y est clairement pour quelquechose. Merci à mon super collègue de bureau, Martin (alias Coboubou, Fouinito, Tiny-Tim, ...) pour son soutien, son aide sur Arc-Gis. Merci aussi pour le chocolat, les Dstress booster, ces trajets du retour vers la Croix-Rousse et tous les moments de craquage partagés. Merci à mes collègues de HH et Poldif : Martin, le trio infernal Eric, Anne-Laure et Ben, les anciens : Marko, Momo, Germain, Raph, Marina, Pierre-Henri, Thomas, Chloé, Nico, Jessica, ceux qui restent encore un moment : Céline, Isabelle G., Christine B., François, Albert, Greg, Emeline, Victor, Laurie, Delphine, Cécile, Laura et Ivan pour les pauses au coin café (avec et sans gâteaux), les repas en salle repas ou à la cantine, les matchs d'ultimate et de volley, la course à pied et les soirées!

Je tiens à remercier mes parents de m'avoir permis d'accomplir toutes ces études de Paris à Lyon en passant par Toulouse et Montréal. Merci à ma famille, mes parents, mon frère et mes grand-mères pour leur soutien et leurs encouragements depuis le début de mon parcours.

Enfin, merci à toi Basile, pour ta patience, ton soutien, les innombrables aller-retour entre Paris et Lyon, les vacances, et surtout merci d'avoir accepté de continuer l'aventure avec moi là où il y a toujours de l'eau!

Résumé

Cette thèse a pour objectif de caractériser les processus dominants dans l'évolution morphologique d'une retenue de forme allongée. Ces retenues sont caractérisées par une dimension longitudinale prédominante par rapport à la dimension transversale. La thèse s'est appuyé sur le cas de la retenue de Génissiat, située au coeur d'une série d'aménagements hydro-électriques sur le Haut-Rhône et soumise à des opérations régulières de chasses hydrauliques. Une analyse hydro-morphologique basée sur l'interprétation des évolutions morphologiques et des conditions d'écoulement a été réalisée. A partir de cette analyse, un découpage de la retenue en tronçons a permis de mettre en évidence la dynamique spatiale des sédiments au sein de la retenue. Une analyse de la dynamique spatio-temporelle du transport des sédiments a permis de quantifier et de caractériser les flux de transportés et leurs incertitudes. La contribution des processus associés au transport des différentes classes granulométriques (sables et sédiments fins) a alors été évaluée.

Enfin, deux modèles numériques unidimensionnels ont été développés afin de simuler les processus dominants pour le transport des sédiments fins et des sédiments grossiers. Les résultats de modélisation ont montré la capacité des modèles à reproduire les évolutions morphologiques et les flux transportés, avec des valeurs simulées comprises dans les plages d'incertitude de mesure. La partie amont de la retenue apparaît ainsi nettement dominée par le transport de sable alors que la partie aval est dominée par le transport de fines. Finalement, les modèles ont été appliqués pour tester différents protocoles de gestion de la retenue dans le but d'établir des règles d'exploitation permettant de limiter le comblement de la retenue et les impacts environnementaux à l'échelle d'événements de chasse et sur le long terme.

Mots clés :

Comblement des retenues, Retenues de forme allongée, Retenue de Génissiat, Chasses de barrage, Modélisation numérique, Sédiments fins, Sables.

Laboratoire de rattachement : Irstea - Centre de Lyon-Villeurbanne Unité de recherches Hydrologie-Hydraulique 5 rue de la Doua CS70077 69626 Villeurbanne Cedex

Abstract

Evaluation of the hydro-sedimentary processes of an elongated dam reservoir : Application to the Génissiat reservoir located on the Upper Rhône River

This PhD thesis aimed to characterize the main processes responsible for the morphological evolution of an elongated reservoir, characterized by predominant longitudinal dimensions. It was based on the case study of the Génissiat reservoir, located in a series of hydropower plants on the French Upper Rhône River and regularly subjected to flushing operations. A fluvial geomorphological analysis based on morphological evolutions and hydraulic conditions was performed. A longitudinal delineation of the reservoir allowed to highlight the spatial dynamics of the reservoir. Sediment fluxes in the reservoir and their uncertainties were quantified and qualified and evidenced the contribution of transport processes associated to sand and fine sediments.

Two one-dimensional numerical models were developed to simulate the main processes for fine sediment and coarse sediment transport, respectively. Numerical results showed that these models were able to reproduce morphological evolutions and sediment fluxes, with differences between simulated and measured values lower than the measurement uncertainties. It appeared that the upstream part of the reservoir is dominated by sand transport while the downstream part of the reservoir is dominant by silt and clay sediment transport. Finally, the models were used to simulate predictive scenarios and to evaluate the impact of the operating rules on sediment dynamics. Some enhancements to current operating rules were proposed to limit reservoir sedimentation and downstream ecological impacts related to flushing events and long-term management.

Keywords :

Reservoir sedimentation, Elongated reservoirs, Génissiat dam reservoir, Dam flushing, Numerical modelling, Fine sediments, Sand.

Symboles

Lettres romaines

a	paramètre d'une régression	
a_{PD}	paramètre de calage du code Adis-TS	
A_{BV}	Aire du bassin versant	m^2
A	Section mouillée	m^2
A_s	section solide	
b	paramètre d'une régression	
c	paramètre d'une régression	
C	concentration en matières en suspension dans l'eau	g/l
C_D	coefficient de traînée	
C_{eq}	concentration en matières en suspension dans l'eau à l'équilibre	g/l
C_0	paramètre de calage du code Adis-TS	g/l
C_m	Concentration moyenne dans une section transversale	g/l
C_{z_a}	concentration à l'altitude z_a au dessus du fond	g/l
C_R	concentration de référence pour le profil exponentiel	g/l
d	diamètre d'une particule	m
d_{50}	diamètre médian des sédiments	m
d_x	diamètre pour lequel x $\%$ des sédiments en masse sont plus fins	m
d_*	diamètre adimensionnel du sédiment	
D	Taux de dépôt simulé par le code ADIS-TS	$\rm kg/m^2 s$
D_a	Distance d'application d'une section en travers	m
D_{char}	Distance de chargement	m
$D_{chard_{50}}$	Distance de chargement pour le diamètre médian	m
$D_{char\sigma}$	Distance de chargement pour l'étendue granulométrique	m
D_f	coefficient de diffusion	m^2/s
D_x	distance entre deux points	
E	Taux de reprise simulé par le code ADIS-TS	$\rm kg/m^2 s$
f	fréquence	Hz
F_C	paramètre de forme du profil de concentration	
F_r	nombre de Froude	
F_s	fréquence d'échantillonnage du signal acoustique	2
g	constante d'accélération de la pesanteur	$\rm m/s^2$
h	tirant d'eau	m
H_t	profondeur d'immersion du densimètre	m
J	la perte de charge par frottement	
J_s	la perte de charge singulière	
k	facteur d'élargissement pour le calcul de l'incertitude élargie	
k_P	efficacité du préleveur de charriage	1 /0
K	coefficient de Strickler	$m^{1/3}/s$
K_p	coefficient de Strickler de peau	${\rm m}^{1/3}/{\rm s}$
L	distance entre deux sections transversales	m
L_X	pas d'espace pour le calcul de la sinuosité	m
L_v	longueur de la fenêtre d'échantillonage acoustique	

m	exposant appliqué à la contrainte dans la formule de transport	
M	masse de sédiments	kg
M_t	masse apparente d'un dépôt sédimentaire	kg
M_s	masse solide d'un dépôt sédimentaire	kg
M_d	masse solide sèche d'un dépôt sédimentaire	kg
N	nombre de points décrivant une section en travers	
N_h	nombre de points d'une ligne d'eau	
N_S	critère de Nash Sutcliffe	
N_T	nombre de transects	
p	porosité des sédiments en place	
p_d	proportion de sédiments de diamètre inférieur à d	2
P	puissance du signal acoustique	$\mu Pa^2/Hz$
PSD	densité spectrale de puissance du signal acoustique	$\mu Pa^2/Hz$
q	apports latéraux de débit	m^2/s
q_s^{cap}	capacité solide unitaire	m^2/s
Q	débit liquide	m^3/s
Q_s	débit solide	m^3/s
Q_s^{cap}	capacité de transport	m^3/s
R	nombre de Rouse	
R'	nombre de Rouse corrigé	
R_*	nombre de Reynolds turbulent	
Re_P	nombre de Reynolds particulaire	
R_h	rayon hydraulique	m
s	signal acoustique	
S	aire occupée par les sédiments dans une section	m^2
t	temps	
T_F	Taux de transfert d'une retenue	
T_P	Taux de piégeage d'une retenue	
T	Turbidité de l'eau	NTU
T_*	la contrainte réduite	
u	incertitude type	
u_P	incertitude type liée à l'imprécision des mesures	
u_R	incertitude type liée à la représentativité des mesures	
u_*	vitesse de cisaillement	m/s
U	vitesse moyenne de l'écoulement	m/s
U_E	incertitude élargie	
U_P	Vitesse de propagation des sédiments en suspension	m/s
v	vitesse de décantation des particules	m/s
V	Volume de sédiments	m^{3}
V_{ann}	apport moyen annuel	m^3
V_{ret}	Capacité de la retenue	m^3
V_s	Volume d'une suspension de sédiments	m^3
w	fenêtre d'échantillonage du signal acoustique	
w_e	teneur en eau massique d'un échantillon de sédiments	
w_s	vitesse de chute d'une particule	m/s
W	largeur au miroir	m
W_a	largeur active	
W_d	largeur déversante d'un ouvrage	m
W_P	largeur du préleveur de charriage	m
x	abscisse longitudinale	
X	latitude	

- y abscisse latérale
- Y longitude m
- Z altitude m

Lettres grecques

paramètre pour le calcul de l'incertitude liée à la représentativité	
paramètre de la loi de Han	m
paramètre de calage pour le modèle de l'évacuateur de surface	
coefficient de quantité de mouvement des équations de Saint Venant	
paramètre de calage du modèle de Brown	
densité réduite du sédiment	
pas d'interpolation d'une section en travers	m
variation de l'altitude d'un point d'une section en travers	m
variation de l'aire occupée par les sédiments dans une section	m
temps de prélèvement des sédiments	\mathbf{S}
temps de propagation des sédiments en suspension	\mathbf{S}
coefficient de diffusion verticale du sédiment	m^2/s
paramètre utilisé pour le dépôt dans RUBARBE	
paramètre de Shields	
paramètre de Shields critique	
constante de Von Kàrmàn	
proportion d'une population de sédiments	
coefficient de débit d'un ouvrage	
espérance d'une distribution statistique	
viscosité cinématique de l'eau	m^2/s
masse volumique de l'eau	kg/m^3
masse volumique absolue du sédiment	kg/m^3
masse volumique sèche du sédiment	$\rm kg/m^3$
masse volumique d'un mélange de sédiments estimé par calcul	kg/m^3
masse volumique humide du sédiment	$\rm kg/m^3$
masse volumique d'une suspension de sédiments	kg/m^3
écart type d'une distribution statistique	
nombre de Schmidt pour le profil exponentiel	
nombre de Schmidt pour le profil puissance	
contrainte de cisaillement hydrodynamique	Pa
contrainte de cisaillement hydrodynamique efficace	Pa
contrainte critique de mise en mouvement	Pa
angle de stabilité des sédiments	
facteur de correction du paramètre de Rouse	
flux massique de sédiments	$\rm kg/s$
	paramètre pour le calcul de l'incertitude liée à la représentativité paramètre de la loi de Han paramètre de calage pour le modèle de l'évacuateur de surface coefficient de quantité de mouvement des équations de Saint Venant paramètre de calage du modèle de Brown densité réduite du sédiment pas d'interpolation d'une section en travers variation de l'altitude d'un point d'une section en travers variation de l'altitude d'un point d'une section en travers variation de l'aire occupée par les sédiments dans une section temps de propagation des sédiments en suspension coefficient de diffusion verticale du sédiment paramètre de Shields paramètre de Shields paramètre de Shields critique constante de Von Kàrmàn proportion d'une population de sédiments coefficient de débit d'un ouvrage espérance d'une distribution statistique viscosité cinématique de l'eau masse volumique de l'eau masse volumique absolue du sédiment masse volumique de l'eau masse volumique d'un mélange de sédiments sécart type d'une distribution statistique nombre de Schmidt pour le profil exponentiel nombre de Schmidt pour le profil puissance contrainte de cisaillement hydrodynamique efficace contrainte de cisaillement hydrodynamique efficace fux massique de sédiments

Indices et exposants

am	amont
ar	argile
av	aval
A	Arve
bg	berges
BDM	Bout du Monde
CA	couche active
eq	équilibre
ERD	évacuateur de surface
f	fin
fd	fond
g	grossier
GE	Génissiat
JON	Jonction
li	limon
m	lit mineur
max	maximal
mes	mesuré
mod	modélisé
M	lit moyen
pyc	pycnomètre
PO	Pougny
PY	Pyrimont
rd	rive droite
rg	rive gauche
sa	sable
SE	Seyssel
th	théorique
tot	total
us	Usses
val	Valserine
VF	vanne de fond
VDF	vanne de demi-fond

Acronymes

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
BD topo	Base de Données topographiques
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique
CNR	Compagnie Nationale du Rhône
EDF	Électricité de France
ERD	Évacuateur Rive Droite
GPS	Global Positioning System
GUM	Guide to the expression of Uncertainty in Measurement
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
	(anciennement institut géographique national)
Irstea	Institut national de Recherches en Sciences et Technologiques
	pour l'Environnement et l'Agriculture
LNHE	Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement
MES	Matières En Suspension
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NGF	Nivellement Géographique Français
OFEV	Office Fédéral de l'Environnement (Suisse)
OSR	Observatoire des Sédiments du Rhône
PK	Point Kilométrique
SFMPC	Société des Forces motrices de Chancy-Pougny
SIG	Services Industriels Genevois
VDF	Vanne de demi-fond
VF	Vanne de fond

Table des matières

R	ésum	é	iv
\mathbf{A}	bstra	\mathbf{ct}	vi
Li	ste d	es symboles	xi
Li	ste d	es acronymes	xii
1	Intr	roduction	1
	1.1	Le transport des sédiments en rivière	1
		1.1.1 Classification des sédiments	1
		1.1.2 Modes de transport des sédiments en rivière	2
		1.1.3 Morphologie des rivières	5
	1.2	Le transport des sédiments dans les retenues	6
		1.2.1 Les retenues de barrage	6
		1.2.2 Les processus de transport dans les retenues	7
		1.2.3 Le comblement des retenues	8
		1.2.4 L'estimation du comblement des retenues	9
	1.3	Le contrôle de la sédimentation dans les retenues	10
		1.3.1 Retour d'expérience sur quelques cas problématiques	10
		1.3.2 Présentation des différentes techniques de contrôle de la sédimentation	11
	1.4	La gestion des impacts environnementaux des barrages	12
		1.4.1 Les impacts liés à la régulation des écoulements et du transport des sédiments	12
		1.4.2 Les impacts liés aux chasses de barrage	13
	1.5	Modélisation des processus sédimentaires dans les retenues	13
		1.5.1 La modélisation physique	13
		1.5.2 Les modèles mathématiques	14
		1.5.3 La modélisation numérique	14
	1.6	Problématiques scientifiques liées à la gestion sédimentaire des retenues de forme	1
		allongée	16
	1.7	Démarche scientifique	17
2	Prés	sentation du cas d'application	19
	2.1	Présentation du Haut-Rhône	19
		2.1.1 Aperçu géographique du Haut-Rhône	19
		2.1.2 Conditions d'apport solide	20
	2.2	Historique et exploitation des aménagements hydro-électriques du Haut-Rhône	20
		2.2.1 Les aménagements hydro-électriques du Haut-Rhône	20
		2.2.2 Description et fonctionnement des aménagements de Verbois et de Chancy-	
		Pougny	21
		2.2.3 Description et fonctionnement des aménagements de Génissiat et de Seyssel	21
		2.2.4 La sédimentation dans les retenues du Haut-Rhône	22
	2.3	L'aménagement de Génissiat	23
		2.3.1 La géologie du site	23

	2.3.2	Hydrologie du bief de Génissiat
	2.3.3	Le barrage de Génissiat
	2.3.4	La retenue de Génissiat
2.4	Les cha	asses du Haut-Rhône
	2.4.1	Objectifs de l'opération
	2.4.2	Impacts des opérations de chasse en amont de Génissiat 27
	2.4.3	Enjeux actuels à préserver en aval de la retenue de Génissiat 27
	2.4.4	Description de l'évolution historique du protocole
2.5	Observ	rations sur le comblement de la retenue de Génissiat
	2.5.1	Ampleur actuelle des dépôts dans la retenue de Génissiat
9.6	2.5.2	Granulométrie des dépôts sédimentaires de la retenue de Génissiat 33
2.0	Besoin	s operationnels de la CNR 33
Ana	alyse hy	ydro-morphologique de la retenue de Génissiat 35
3.1	Introdu	uction $\ldots \ldots 35$
3.2	Donné	es hydro-morphologiques
	3.2.1	Données bathymétriques
	3.2.2	Protocole de traitement des bathymétries
	3.2.3	Photographies
	3.2.4	Données hydrauliques
	3.2.5	Données sédimentaires
3.3	Descrip	ption morphologique de la retenue de Génissiat
	3.3.1	Sinuosité de la retenue
	3.3.2	Typologie des sections
~ .	3.3.3	Propriétés des sédiments en place
3.4	Evolut	ions morphologiques de la retenue de Génissiat
	3.4.1	Evolution du profil en long
	3.4.2	Evolution des sections en travers
9 5	3.4.3	Evolution en plan de la zone de l'Etournel
3.5	Bilans	bathymetriques
	3.5.1	Methode de calcul du bilan bathymetrique
	3.5.2	Incertitudes sur le calcul des cubatures
	3.5.3	Analyse du bilan bathymetrique
	3.5.4	Dynamique sedimentaire spatiale de la retenue entre 1954 et 2012 62
26	3.5.5	Premieres conclusions sur la dynamique de la retenue
3.0	Analys	Objectife de la madéligation
	0.0.1 2.6.0	Defection des codes de calculs hydrauliques 66
	3.0.2	Construction des modèles
	3.6.4	Calage des modèles 67
	365	Paramètres hydro-sédimentaires pour l'analyse des conditions d'écoulement 72
	0.0.0	1 arametres hydro-sedimentaries pour 1 analyse des conditions d'écoulement 12
	366	Analyse an conditions d'interchasse 74
	3.6.6 3.6.7	Analyse en conditions d'interchasse 74 Analyse en conditions de chasse 70
	3.6.6 3.6.7 3.6.8	Analyse en conditions d'interchasse 74 Analyse en conditions de chasse 79 Conclusions sur les processus 83
37	3.6.6 3.6.7 3.6.8 Décourse	Analyse en conditions d'interchasse 74 Analyse en conditions de chasse 79 Conclusions sur les processus 83 page hydro-morphologique de la retenue de Génissiat 83
3.7	3.6.6 3.6.7 3.6.8 Découp 3.7 1	Analyse en conditions d'interchasse 74 Analyse en conditions de chasse 79 Conclusions sur les processus 83 page hydro-morphologique de la retenue de Génissiat 83 Classification des cours d'eau 83
3.7	3.6.6 3.6.7 3.6.8 Découp 3.7.1 3.7.2	Analyse en conditions d'interchasse 74 Analyse en conditions de chasse 79 Conclusions sur les processus 83 page hydro-morphologique de la retenue de Génissiat 83 Classification des cours d'eau 83 Méthode de découpage 83
3.7	3.6.6 3.6.7 3.6.8 Découp 3.7.1 3.7.2 3.7.3	Analyse en conditions d'interchasse74Analyse en conditions de chasse79Conclusions sur les processus83page hydro-morphologique de la retenue de Génissiat83Classification des cours d'eau83Méthode de découpage83Découpage visuel85
3.7	3.6.6 3.6.7 3.6.8 Découp 3.7.1 3.7.2 3.7.3 3.7.4	Analyse en conditions d'interchasse74Analyse en conditions de chasse79Conclusions sur les processus83page hydro-morphologique de la retenue de Génissiat83Classification des cours d'eau83Méthode de découpage83Découpage visuel85Découpage statistique86
3.7	3.6.6 3.6.7 3.6.8 Découp 3.7.1 3.7.2 3.7.3 3.7.4 3.7.5	Analyse en conditions d'interchasse74Analyse en conditions de chasse79Conclusions sur les processus83page hydro-morphologique de la retenue de Génissiat83Classification des cours d'eau83Méthode de découpage83Découpage visuel85Découpage statistique86Choix du découpage final88
3.7	3.6.6 3.6.7 3.6.8 Découp 3.7.1 3.7.2 3.7.3 3.7.4 3.7.5 3.7.6	Analyse en conditions d'interchasse74Analyse en conditions de chasse79Conclusions sur les processus83page hydro-morphologique de la retenue de Génissiat83Classification des cours d'eau83Méthode de découpage83Découpage visuel85Découpage statistique86Choix du découpage final88Caractérisation hydro-morphologique des tronçons89
	 2.4 2.5 2.6 Ana 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 	$\begin{array}{c} 2.3.2\\ 2.3.3\\ 2.3.4\\ 2.3.3\\ 2.3.4\\ 2.4\\ \text{Les cha}\\ 2.4.1\\ 2.4.2\\ 2.4.3\\ 2.4.4\\ 2.5\\ \text{Observ}\\ 2.5.1\\ 2.5.2\\ 2.6\\ \text{Besoins}\\ \textbf{Analyse hy}\\ 3.1\\ \text{Introdus}\\ 3.2\\ \text{Donnée}\\ 3.2.1\\ 3.2.2\\ 3.2.3\\ 3.2.4\\ 3.2.5\\ 3.3\\ \text{Descrip}\\ 3.3.1\\ 3.2.5\\ 3.3\\ 3.4\\ \text{Évolut}\\ 3.4.1\\ 3.4.2\\ 3.3.3\\ 3.5\\ \text{Bilans}\\ 3.5.1\\ 3.5.2\\ 3.5.3\\ 3.5.4\\ 3.5.5\\ 3.6\\ \text{Analys}\\ 3.6.1\\ 3.6.2\\ 3.6.3\\ 3.6.4\\ 2.6\\ 5\\ \end{array}$

4	Dyr	namique spatio-temporelle du transport de sédiments 95
	4.1	Introduction
	4.2	Présentation du réseau et des méthodes de mesure hydro-sédimentaires sur le Haut-
		Rhône du Léman à Seyssel
		4.2.1 Débits
		4.2.2 Concentrations en Matières en Suspension (MES)
		4.2.3 Calcul des flux de matières en suspension
		4.2.4 Charriage
		4.2.5 Granulométrie des sédiments transportés
	4.3	Dynamique du transport des matières en suspension en période d'interchasse 115
		4.3.1 Concentrations en matières en suspension
		4.3.2 Granulométrie des matières en suspension
		4.3.3 Propagation des matières en suspension entre Pougny et Pyrimont en période
		d'interchasse $\ldots \ldots \ldots$
	4.4	Dynamique du transport des matières en suspension en périodes de chasse 119
		4.4.1 Transport par suspension lors de la phase de remobilisation
		4.4.2 Transport par suspension durant la phase régulation des chasses suisses . 122
		4.4.3 Transport par suspension dans la retenue de Seyssel
		4.4.4 Processus hydro-sédimentaires près du barrage de Génissiat
	4.5	Transport des sédiments grossiers
		4.5.1 Transport par charriage en amont de la retenue en période d'interchasse . 131
		4.5.2 Transport par charriage au Pont Carnot lors de la chasse de 2012 132
		4.5.3 Transport par charriage à Bognes lors de la chasse de 2012
4.6 Apport de la modélisation hydraulique		Apport de la modélisation hydraulique 2D à la compréhension de la dynamique proche
		du barrage
		4.6.1 Présentation du modèle
		4.6.2 Caractéristiques hydrodynamiques
		4.6.3 Dynamique locale au cours de la chasse de 2012
	4.7	Masses de sédiments entrant et sortant de la retenue de Génissiat
		4.7.1 Masses de matieres en suspension en periode d'interchasse
		4.7.2 Reconstruction des concentrations en matieres en suspension entrant et sor-
		4.7.2 Magaag de metières en guerengien transportées en chagae
	10	4.7.5 Masses de matieres en suspension transportees en chasse
	4.0	4.8.1 Objectife
		4.8.1 Objectilis
		4.8.2 Application and retenues de Verbeis et Chancy Pougny 150
		4.8.4 Application à la retenue de Cénissiet
	4.0	4.6.4 Application à la retenue de Genissiat
	т.0	Conclusions sur la dynamique spatio-temporene du transport de seuments 194
5	Mo	délisation des processus hydro-sédimentaires de la retenue de Génissiat 157
	5.1	Introduction
	5.2	Présentation des codes de calcul
		5.2.1 Adis-TS
		5.2.2 RubarBE
	5.3	Modèle Adis-TS des retenues de Génissiat et Seyssel
		5.3.1 Problématique
		5.3.2 Description du modèle numérique
		5.3.3 Module additionnel « barrage »
	5.4	Calage et validation du modèle Adis-TS 168
		5.4.1 Calage des paramètres a_{PD} et $C_0 \ldots \ldots$
		5.4.2 Test du module « barrage »

		5.4.3	Validation des paramètres a_{PD} et $C_0 \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	178
		5.4.4	Validation du modèle complet sur la chasse de 2003	179
		5.4.5	Validation du modèle en période d'exploitation normale	182
	5.5	Modèl	e RubarBE de la retenue de Génissiat	182
		5.5.1	Problématique	182
		5.5.2	Description du modèle numérique	182
		5.5.3	Calage du modèle RubarBE	184
	5.6	Valida	tion du modèle RubarBE de la retenue de Génissiat	200
		5.6.1	Simulation de la chasse de 1984	200
		5.6.2	Simulation de la chasse de 2012	201
	5.7	Discus	sion sur la modélisation des processus hydro-sédimentaires	202
		5.7.1	Comparaison des modèles Adis-TS et RubarBE : cas test d'une opération	de
			chasse simplifiée	202
		5.7.2	Modélisation du tri granulométrique	206
		5.7.3	Modélisation de la propagation des sables	207
		5.7.4	Modélisation de périodes d'interchasse	208
	5.8 Applications prédictives		209	
		5.8.1	Modélisation prédictive pour la chasse de 2016	209
		5.8.2	Modélisation prédictive pour la gestion lors de crues	213
	5.9	Conclu	isions sur la modélisation hydro-sédimentaire	215
6	Con	clusio	n générale et perspectives	2 18
_				
Bi	bliog	raphie		224
A	nnex	es		240
	А	Liste d	les sections en travers mesurées dans la retenue de Génissiat	241

6

Liste des tableaux

$\begin{array}{c} 1.1 \\ 1.2 \end{array}$	Nombre de Rouse et mode de transport associé d'après Van Rijn [2007] Coefficients A, B et m pour les principaux types de particules	$\frac{4}{5}$
2.1	Hydrologie du Haut-Rhône aux stations de Pougny et Bognes (T est la période de retour de la crue).	24
3.1	Lignes d'eau de la retenue de Génissiat sélectionnées pour le calage	40
3.2	Lignes d'eau de la retenue de Seyssel sélectionnées pour le calage	40
3.3	Caractéristiques des prélèvements réalisés dans la retenue	41
3.4	Granulométrie des prélèvements verticaux dans les dépôts près du barrage.	47
3.5	Granulométrie des prélèvements verticaux dans les dépôts sur les berges.	47
3.6	Evolution temporelle de la pente moyenne par tronçon	49 40
<u>১</u> .(১০	Evolution temporelle des variations d'altitude du iond	49 50
0.0 2.0	Bilan bathymétrique volumique des périodes de chasse et d'interchasse entre 1994 et 1964	90
0.0	2012	59
3.10	Comparaison des bilans en périodes de chasse (le bilan de la retenue de Verbois est	50
	issu de [Diouf, 2013]).	60
3.11	Comparaison des bilans en périodes d'interchasse (le bilan de la retenue de Verbois	
	est issu de [Diouf, 2013])	61
3.12	Tendance des évolutions morphologiques observées pour différents tronçons de la	
	retenue de Génissiat.	62
3.13	Tronçons définis pour le calage hydraulique de la retenue de Génissiat	68
3.14	Jeux de paramètres de calage testés avec le modèle (les valeurs en gras sont celles qui	70
2 15	Analyse de sensibilité du modèle au calage hydraulique sur la ligne d'eau de 2008 (les	10
0.10	cellules jaunes mettent en évidence les hauteurs d'eau correctement reproduites au	
	regard des incertitudes (±5 cm)).	70
3.16	Tronçons définis pour le calage hydraulique de la retenue de Seyssel.	71
3.17	Paramètres hydro-morphologiques sélectionnés pour le découpage (↔ signifie que les	
	paramètres sont identiques pour les deux méthodes, \approx signifie que les paramètres	
	sont différents entre les méthodes mais considérés comme équivalents) 8	85
3.18	Discontinuités observées par la méthode visuelle	86
3.19	Nombre de sections présentant des discontinuités	37
3.20	Jeux de discontinuités obtenus par les méthodes visuelle et statistiques, jeu retenu. 8	39
3.22	Caracteristiques geometriques des tronçons issus du decoupage (G : gauche, D :	00
2 92	Benrésentativité de la dynamique movenne par tronçon par rapport à la dynamique	90
0.40	locale (O signifie que la valeur movenne est représentative c'est à dire que l'écart	
	type est inférieur à la moitié de la moyenne. N signifie qu'elle ne l'est pas) 9	92
4.1	Caractéristiques de débits mesurés	97
4.2	Caractéristiques des concentrations mesurées	JÜ

4.3	Coefficients des relations $C=f(Q)$ pondérées par la racine du flux obtenues pour la	
	Valserine et les Usses	05
4.4	Caractéristiques des mesures de charriage	07
4.5	Caractéristiques des granulométries réalisées	13
4.6	Populations de sédiments permettant de décrire la distribution granulométrique. 1	15
4.7	Débits et concentrations moyens au barrage pendant le palier à cote basse 1	31
4.8	Incertitudes associées au calcul des masses de MES transportées au niveau de diffé-	
	rentes stations et pour différentes chasses (Les valeurs données pour les sources sont	
	les valeurs de l'intervalle)	40
4.9	Masses de MES mesurées aux stations de Bout du Monde, Pougny, et Pyrimont (en Mt).	41
4.10	Évaluation des méthodes de reconstruction de la concentration à Pougny 1	43
4.11	Évaluation des méthodes de reconstruction de la concentration à Pyrimont 1	45
4.12	Incertitudes associées au calcul des masses de MES transportées au niveau de diffé-	
	rentes stations et pour différentes chasses (Les valeurs données pour les sources sont	
	les valeurs de l'intervalle)	46
4.13	Masse de MES transportées mesurées aux stations de Pougny, Génissiat et Pyrimont	
	au cours des chasses (en Mt).	48
4.14	Propriétés des sédiments en place dans les différentes zones d'échantillonnage 1	49
4.15	Bilans sédimentaires de la retenue de Verbois en chasse (en Mt)	51
4.16	Bilans sédimentaires de la retenue de Génissiat en chasse (en Mt)	52
4.17	Masses de matières en suspensions reconstituées à Pougny et Pyrimont pour diffé-	
	rentes périodes d'interchasse (en Mt).	53
4.18	Bilans sédimentaires de la retenue de Génissiat en période d'interchasse (en Mt). 1	54
5.1	Propriétés physiques des classes de sédiment du modèle	65
5.2	Caractéristiques sédimentaires des tronçons du modèle	66
5.3	Description du protocole de calage et validation	68
5.4	Masses de sédiments transportés mesurées et calculées en fonction du calage des	
	paramètres a_{PD} and C_0 (Lorsqu'il n'y a qu'une seule valeur du paramètre, celle-ci	
	est utilisée pour toutes les classes. Lorsqu'il y a six valeurs, elles correspondent aux	
	valeurs attribuées par taille croissante, des argiles aux sables moyens, cf. tableau	
	5.3.3.2).	69
5.5	Masses de sédiments transportés mesurées et calculées en fonction du calage du pa-	
	ramètres a_{PD} et de l'apport amont en sable (même présentation que tableau 5.4).	
		71
5.6	Analyse de sensibilité du modèle aux apports en sable : comparaison des bilans ba-	
	thymétriques	73
5.7	Calage du paramètre C_0	74
5.8	Bilans de la retenue estimés en fonction de l'apport en sable pour la chasse de 2012	
	et comparaison avec la mesure	75
5.9	Masses simulés et mesurés transportées dans les vannes du barrage de Génissiat	
	durant la chasse de 2012	78
5.10	Bilans de la retenue estimés en fonction de l'apport en sable pour la chasse de 2003	
	et comparaison avec la mesure	79
5.11	Masses transportées simulées et mesurées dans les vannes du barrage de Génissiat et	
	dans la retenue de Seyssel durant la chasse de 2003	81
5.12	Granulométrie des dépôts de sédiments dans les tronçons du modèle 1	84
5.13	Épaisseurs des couches de sédiments en place dans les tronçons du modèle RUBARBE	
	de la chasse de 2003	86
5.14	Caractéristiques des simulations réalisées pour la chasse de 2003	86
5.15	Caractéristiques sédimentaires corrigées pour certains tronçons du modèle 1	95

5.17	Bilan volumique pour les tronçons T1 à T14, global et par tronçon. Pour chaque test
	et chaque tronçon, la cellule est colorée si l'écart entre les valeurs simulée et mesurée
	est inférieur à l'incertitude de mesure (avec une tolérance de 1000 m ³) 198
5.19	Performance du modèle par simulation pour les tronçons T1 à T14, globale et par
	tronçon. Pour chaque tronçon, la cellule colorée correspond au meilleur indice de
	performance obtenu parmi les différents tests
5.20	Épaisseurs des couches de sédiments en place dans les tronçons du modèle RUBARBE
	de la chasse de 1984
5.21	Caractéristiques des simulations réalisées pour le cas-test
5.22	Définition de la condition limite amont sédimentaire pour le modèle ADIS-TS en
	fonction des résultats du modèle des retenues de Verbois et Chancy-Pougny 210
5.23	Masses de sédiments transportées au barrage de Génissiat et à Seyssel estimées pour
	les différents scénarios envisagés pour la chasse de 2016
5.24	Estimation des masses évacuées par le barrage de Génissiat en fonction du mode de
	gestion à partir du scénario de la crue de 2015

Table des figures

1.1	Schéma des processus de transport par charriage et par suspension dans un cours d'eau	2
$1.2 \\ 1.3$	Diagramme de Shields pour la mise en mouvement d'après Vanoni [1977].	$\frac{2}{3}$
1.4	Types de dépôt observés dans une retenue, d'après Morris et Fan [1998]	6
1.5	Évolution du profil en long de la retenue de Tarbela, Pakistan, d'après Lowe et Fox	_
16	[1995]	1
1.0	des retenues d'après Kondolf <i>et al.</i> [2014]	10
2.1	Aperçu géographique du Haut-Rhône et de ses aménagements	19
2.2	Confluence entre le Rhône (à droite) et l'Arve en crue (à gauche) (photo SIG).	20 20
2.3 2.4	Contes d'exploration des retenues de : a) Gemissiat et b) Seyssei	22 23
2.5	Le barrage de Génissiat : a) Photographie du barrage au cours de la chasse de juin 2012 (photo CNR), b) Schéma du barrage et localisation des prises d'eau (schéma	
	CNR)	25
2.6	Photographies de la retenue : a) plaine alluviale de l'Étournel en 2012 (la grande île	
	aval et le chenal secondaire sont visibles en bas, le pont Carnot est situee en haut à droite photo (CNR) b) la Perte du Rhône (Carte postale datée du 23 août 1945	
	Eric Toiseux), c) Les gorges d'Arlod avant la mise en eau de la retenue (Carte postale	
	non datee, Eric Toiseux), d) partie aval de la retenue situee dans des gorges en 2012 (on apprecit le barrage en haut à droite, photo CNR), a) Lieu dit le Paradis (Carta	
	postale non datée, Eric Toiseux), f) Lieu dit le Paradis (novembre 2012)	26
2.7	Historiques des protocoles de chasse à Génissiat (bleu) et Verbois (marron) 2	28
2.8	Mesures de concentration dans les vannes de fond et de demi-fond au cours de la	
2.0	chasse de 1984.	30 21
2.9	Évolution du profil en long de la retenue de Génissiat.)1 32
2.11	Photographies du barrage de Génissiat : a) au cours du chantier (années 1940), b)	
	au cours de la chasse de 1978, c) au cours de la chasse de 2012	32
2.12	Répartition longitudinale du diamètre médian des sédiments en surface au centre	
	Thizy [2013].	33
3.1	Données bathymétriques corrigées pour le profil en travers au PK 179,07	37
3.2	Méthodes de traitement pour les profils en travers au PK 162,57	38
$\begin{array}{c} 3.3\\ 3.4 \end{array}$	Méthodes de traitement pour les profils en travers au PK 181,9	39
	inontre un zoom sur les prelevements de 1999 et la localisation de depots sableux en jaune)	11
3.5	Sinuosité de la retenue de Génissiat.	12

3.6	Typologie des sections de la retenue de Génissiat : a) section trapézoïdale, b) chenal principal en rive droite, c) chenal principal en rive gauche, d) chenaux multiples	
	avec bancs immergés, e) chenaux multiples avec île centrale émergée, f) canyon. Les	
	typologies a à e sont observées dans la zone alluviale, la typologie i correspond à la	
9.7	Zone rocheuse	5
3.7	Photographies fors de la chasse de juin 2012 : a) Connuence Rhone-valserine le Rhone	1
20	Pérartition des trabaises de section dans la retenue en 2011	ł 1
0.0 2.0	Répartition des typologies de section dans la rétenue en 2011	Ł
5.9	du chanal b) sur los bords du chanal	
9 10	Structure verticele des corottes + a) DK 162 5 b) DK 162 75 c) DK 165 1 d) DK 170 45)
3.10	Structure verticale des carottes : a) $\Gamma K 102, 5 D$ $\Gamma K 105, 75 C$ $\Gamma K 105, 1 d$ $\Gamma K 170, 45,$	2
2 11	Profile on long of lignos d'onu du biof de Cónissiat entre 1018 et 2012 (* Profil)
0.11	incomplet en amont du PK 182.5, remplaçó par la profil datant de contembra 1007).	2
3 1 9	Profil en long de la zone en amont du barrage (décembre 2011) 50	,)
3.12	Évolution des profils en travers : a) PK 186 18 h) PK 183 04 c) PK 182 35 d) PK	,
0.10	173 55 e) PK 166 46 f) PK 164 27	1
3 1/	Prises de vue aériennes de l'Étournel \cdot a) 1034 b) 1052 c) 1067 d) 1071 e) 1084 f)	-
0.14	1992 g) 2004 (source : Géoportail) 55)
3 15	Paramètres calculés pour l'estimation du bilan bathymétrique	3
3 16	Choix de la limite chenal-berge	í
3.17	Bilan bathymétrique cumulé volumique de la retenue entre 1984 et 2012.)
3.18	Volumes nets cumulés le long de la retenue sur les périodes : a) 1954-1984, b) 1984-	
	2012 (les cercles localisent le point de la partie aval où l'intensité du dépôt varie). 65	3
3.19	Volumes nets cumulés issus des berges le long de la retenue sur les périodes : a)	
	1954-1984, b) 1984-2012	1
3.20	Comparaison des lignes d'eau de la retenue de Génissiat mesurées et simulées pour le	
	régime d'exploitation normale : a) 2008 $Q=475 \text{ m}^3/\text{s}$, b) 2006 $Q=577 \text{ m}^3/\text{s}$, c) 2007	
	$Q = 891 \text{ m}^3/\text{s.}$)
3.21	Débits reconstitué et modélisés entre le $08/06/2012$ et le $09/06/2012$	L
3.22	Comparaison des lignes d'eau de la retenue de Seyssel mesurées et simulées pour le	
	régime d'exploitation normale : a) 1992 $Q=630 \text{ m}^3/\text{s}$, b) 1994 $Q=420 \text{ m}^3/\text{s}$ 72	2
3.23	Largeurs calculées pour différents scénarios d'interchasse	ł
3.24	Rapports W/R_h calculés pour différents scénarios d'interchasse	j
3.25	Contraintes efficaces calculées pour différents scénarios d'interchasse et contraintes	
	critiques	;
3.26	Contraintes efficaces calculées pour un scénario $(Q_{am}=600 \text{ m}^3/\text{s}, Z_{av}=330 \text{ m})$ par	
	deux modèles construits à partir de relevés bathymétriques datés de 1984 et 2011	_
~ ~ ~	respectivement	7
3.27	Nombres de Rouse calculés pour différents scénarios d'exploitation normale et diffé-	
	rentes tailles de grains : a) 50 μ m, b) 100 μ m, c) 400 μ m	3
3.28	Largeurs au miroir calculées pour différentes conditions en chasse)
3.29	Rapports W/R_h calculees pour differentes conditions en chasse 80)
3.30	Nombres de Froude calcules pour differentes conditions en chasse 80)
3.31	Contraintes emcaces calculees pour differentes conditions en chasse et contraintes	1
2 29	Vambrez de Deuze coloulés noum différentes conditions en chasse et différentes teilles	L
ə.32	Nombres de Rouse calcules pour différentes conditions en chasse et différentes tailles de grains : a) 100 µm b) 400 µm c) 1 mm)
2 22	Bilan bathymótrique moyen par troncon sur la pórioda $1024, 2012$. a) charge b)	ù.
J.JJ	interchasse (Les intervalles représentent les bilans minimum et maximum du troncon	
	observés respectivement en chasse ou en période d'interchasse entre 1084 et 2012) 01	
	cosserves respectivement of chaspe of on periode d interchaspe entite 1904 et 2012). 31	-

4.1	Localisation et types de mesures hydro-sédimentaires réalisées du Léman à Seyssel. 96
4.2	Courbes d'etalonnage turbidite-concentration : a) Pougny, b) Pyrimont 101
4.0	ments
4.4	Concentration en MES horaire en fonction du débit horaire à la station de Bout du
	Monde de 1974 à 2013 et relations puissances, d'après Launay [2014] 104
4.5	Préleveurs de charriage utilisés sur le Rhône : a) Préleveur Helley-Smith, b) Préleveur
4 C	Ehrenberger (photos B. Camenen)
4.0	Schema du paysage acoustique des rivieres, d'après Geay [2014] 108
4.1	leur correspondant à la densité spectrale de puissance d'après Geav [2013]
4.8	Corrélation entre les bandes d'octaves, la couleur correspond au coefficient de corré-
	lation d'après Geay [2013] 111
4.9	Chroniques mesurées entre le 28 août le 25 septembre 2013 : a) débit à Pougny, b)
	puissance acoustique
4.10	Chroniques mesurées entre le 29 avril août le 8 mai 2015 : a) débit à Pougny, b)
4 1 1	puissance acoustique
4.11	Distributions granulometriques obtenues par granulometrie laser et sedimentome- trie/tamisage, prélèvement du 27/00/2012 au centre de la section située au PK
	164 27
4.12	Distribution granulométrique du prélèvement de sédiments en place du 27/09/2012 au
	PK 170,45 obtenue par granulométrie laser et reconstituée à partir de 6 populations
	sédimentaires identifiées sur le Haut-Rhône
4.13	Chroniques mesurées entre le 15 juillet et le 15 août 2014 : a) Concentrations à Bout
	du Monde, Pougny et Pyrimont, b) Débit à Bout du Monde, Pougny et Pyrimont, c)
1 1 1	cote au barrage de Genissiat
4.14	de surface prélevés en période d'interchasse : a) Pougny b) Seyssel 117
4.15	Chroniques mesurées entre le 20 juillet et le 5 août 2014 : a) concentrations à Pougny
	et Pyrimont, b) débits à Pougny et Pyrimont, c) cote au barrage de Génissiat 118
4.16	Temps de propagation des sédiments fins en suspension (en heures) simulé entre
	Pougny et Pyrimont pour un régime permanent en fonction du débit entrant et de
	la cote au barrage (isolignes), comparaison avec les mesures en période d'interchasse
4 17	(points)
4.17	de 2000 aux stations de : a) Grésin (PK 173) b) Bellegarde (PK 169) c) Malpertuis
	(PK 164.8)
4.18	Description granulométrique (densité de fréquence et démodulation) d'échantillons
	prélevés pendant la phase de régulation de la chasse de 2012 à Pougny : a) prélèvement
	de surface, b) piège à sédiments
4.19	Matières en suspension mesurées le long de la retenue et cote au barrage : a) chasse
4.90	de 1954, b) chasse de 1984
4.20	Pougny et Pyrimont pour un régime permanent en fonction du débit entrant et de la
	cote au barrage (isolignes), comparaison avec les mesures en chasse (points), 124
4.21	Concentrations mesurées en sortie du barrage de Génissiat, à Pyrimont et à Seyssel
	au cours des chasses de : a) 2003, b) 2012
4.22	Concentration mesurée dans les vannes au cours de la chasse de 2012 126
4.23	Granulométrie mesurée dans les vannes au cours de la chasse de 2012 127

4.24	Débits, Concentrations, Cote mesurées au barrage durant la première phase de la
	chasse de 2000 : a) vanne de fond, b) vanne de demi-fond (Les débits passant par les
	différentes vannes ne sont pas disponibles pour la phase de régulation)
4.25	Débits, Concentrations, Cote mesurées au barrage durant la chasse de 2003 : a) vanne
	de fond, b) vanne de demi-fond
4.26	Débits, Concentrations, Cote mesurées au barrage durant la chasse de 2012 : a) vanne
	de fond, b) vanne de demi-fond
4.27	Mesures de charriage à la station des Ripes et courbe de tarage sédimentaire 132
4.28	Modèle et mesures de charriage au Pont Carnot durant la chasse de 2012 133
4.29	Modèle et mesures de charriage à Bognes durant la chasse de 2012
4.30	Maillage et frontières du domaine, d'après [Duron, 2014]
4.31	Configuration hydrodynamique de la zone
4.32	a) Contraintes simulées par les modèles 1D et 2D de la chasse de 2012, b) Concen-
	tration mesurée dans la vanne de fond, c) position des nœuds du modèle 2D 136
4.33	a) Contraintes simulées par les modèles 1D et 2D de la chasse de 2012, b) Concen-
	tration mesurée dans la vanne de fond, c) position des nœuds du modèle 2D. $$ 137
4.34	a) Contraintes simulées par les modèles 1D et 2D de la chasse de 2012, b) Concen-
	tration mesurée dans la vanne de demi-fond, c) position des nœuds du modèle 2D. 138
4.35	a) Contraintes simulées par les modèles 1D et 2D de la chasse de 2012, b) Concen-
	tration mesurée dans l'évacuateur, c) position des nœuds du modèle 2D 139
4.36	Cumul des masses de matières en suspension transitant dans le Haut-Rhône du 15
	juin 2014 au 30 septembre 2014
4.37	Temps de propagation (en heures) estimés à partir de régimes permanents : a) de
	Bout du Monde à la Jonction en fonction du débit de l'Arve, b) de la Jonction à
	Pougny en fonction du débit du Rhône (en m^3/s)
4.38	Concentrations à Pougny du 15 juillet au 15 août 2014 mesurée et reconstruites à
	partir des différentes régressions, et d'un temps de propagation fixe
4.39	Concentrations à Pyrimont du 15 juillet au 15 août 2014 mesurée et reconstruites à
	partir des différentes régressions, et d'un temps de propagation fixe 145
4.40	Masse de MES transportées mesurées à Pougny, Génissiat et Pyrimont : a) chasse de
	1984, b) chasse de 2000, c) chasse de 2003, d) chasse de 2012. \ldots
4.41	Zones d'échantillonnage des propriétés des sédiments dans les retenues de Verbois,
	Chancy-Pougny et Génissiat
4.42	Bilans sédimentaires de la retenue de Verbois lors des chasses de 1984, 2000, 2003 et
	2012
4.43	Bilans sédimentaires de la retenue de Génissiat lors des chasses de 1984, 2003 et
	2012
4.44	Bilans sédimentaires de la retenue de Génissiat lors des périodes d'interchasse de 1984
	à 1987, 2000 à 2003 et 2003 à 2011
4.45	Récapitulatif des processus hydro-sédimentaires de la retenue et des données sédi-
	mentaires disponibles
۳.1	
5.1	Processus d'échanges entre compartiments, d'après Beraud [2012] 101
5.2	Concentrations simulees et mesurees dans la retenue de Genissiat au cours de la phase
	de remobilisation de la chasse de 2000 : a) Gresin (PK 173), b) Bellegarde (PK 169)
۳.9	C = 100 Malpertuis (PK 104,8)
5.3	Concentrations simulees et mesurees à Bellegarde au cours de la chasse de 1984 en
	ionction de la valeur du coencient a_{PD} , avec un apport amont de 30% : a) $a_{PD}=0.5$,
5.4	U) up_{D-1} , U) up_{D-2}
0.4	la chassa da 1084 an fonction da la condition limita amont : a) apport nul b) apport
	a chasse de 1964 en fonction de la condition finite amont : a) apport nul, b) apport 60%
	00/0

5.5	Bilans volumiques simulés et mesuré dans la retenue de Génissiat au cours de la
	chasse de 1984 en fonction de la condition limite amont en sable : a) Mesures, b) 174
E C	apport nul, c) apport 60%
0.6	Bhan volumique simule et mesure dans la retenue de Genissiat au cours de la chasse
	de 2012 en fonction de la condition limite amont en sable : a) Mesures, b) apport 176
57	nui, c) apport 50%, d) apport 60%
0.7	Comparaison entre les concentrations sinulees et mesurees au barrage de Gemissiat au
	de aurfese
50	Concentrations simulás et mesurás dans la retenue de Several au cours de la chasse
0.0	2000 : a) Sortia Cónicciat (Condition amont) b) Purimont a) Source 178
5.0	Bilan volumique simulé et mesuré dans la retenue de Cénissiat au cours de la chasse
0.9	de 2003 en fonction de la condition limite amont en sable : a) Mesures b) apport
	rul c) apport $60%$ 180
5 10	Concentrations simulées et mesurées au cours de la chasse de 2003 : a) Vanne de fond
0.10	Génissiat b) Vanne de demi-fond Génissiat c) Pyrimont d) Seyssel 181
5 11	Concentrations simulée et mesurée à Pyrimont entre juillet et août 2014 182
5.12	Bilan volumique de la retenue de Génissiat au cours de la chasse de 2003
5.13	Bilan volumique de la retenue de Génissiat au cours de la chasse de 2003 en fonction
0.20	de la formule de transport : a) mesure, b) loi d'Engelund et Hansen, c) loi de Van
	Rijn
5.14	Bilan volumique de la retenue de Génissiat au cours de la chasse de 2003 en fonction
	de la distance de chargement : a) mesure, b) $D_{char}=50$ m, c) $D_{char}=500$ m, d) loi de
	Han $\alpha_H = 100$, e) loi de Han $\alpha_H = 200$
5.15	Bilan volumique des tronçons amont de la retenue de Génissiat au cours de la chasse
	de 2003 en fonction de la distance de chargement : a) mesure, b) $D_{char}=50$ m, c) loi
	de Han $\alpha_H = 100.$
5.16	Bilan volumique de la retenue de Génissiat au cours de la chasse de 2003 en fonction
	de la méthode de dépôt : a) mesure, b) dépôt fonction de τ_j , c) dépôt fonction de
	$(\tau_{c,j} - \zeta \tau_j)^m$, d) dépôt uniforme
5.17	Déformation des sections observées et simulées par le modèle : a) PK 181,2 (dépôt),
	b) PK 176,9 (érosion)
5.18	Bilan volumique des tronçons amont de la retenue de Génissiat au cours de la chasse
	de 2003 en fonction des apports amonts : a) mesure, b) apport Q_s^{cap} , $d_{50}=0,4$ mm, c)
	apport nul, d) apport Q_s^{cap} , $d_{50}=1$ mm, e) apport Q_s^{cap} , $d_{50}=0,2$ mm
5.19	Bilan volumique des tronçons amont de la retenue de Génissiat au cours de la
	chasse de 2003 en fonction des apports amonts : a) mesure, b) granulomètrie cor-
	rigee $Q_s^{cup,VR} \times 0.7$, c) granulometrie corrigee $Q_s^{cup,VR} \times 0.7$ c) granulometrie corrigee
F 90	$Q_s^{(1)}$
5.20	Bhan volumique de la retenue de Gemissiat au cours de la chasse de 1984 : a) mesure,
F 91	D) Simulation
0.21	ransport par charriage au Pont-Carnot au cours de la chasse de 2012 : a) nux sinules
5 99	Description des conditions aux limites hydro sédimentaires du cas test
5.22	Concentrations simulées par les modèles : a) Pont Carnot PK 180 b) Grésin PK
0.20	173.5 c) Amont du barrage PK 162.4
5.24	Bilans volumiques simulés par les modèles : a) BUBARBE total avec évolution b)
5. 2-1	RUBARBE total sans évolution, c) RUBARBE charriage avec évolution d) RUBARBE
	suspension avec évolution, e) RUBARBE suspension sans évolution f) ADIS-TS 205
5.25	Granulométrie des dépôts sédimentaires simulés pour différents événements (Les sym-
	boles ponctuels correspondent aux mesures de surface)

5.26	Évolution longitudinale et temporelle de la masse de sable par maille de calcul :
	a)Adis-ts, b)Rubarbe
5.27	Concentrations à Pyrimont mesurée et simulée à partir de la concentration recons-
	truite à Pougny entre juillet et août 2014
5.28	Bilan volumique de la retenue de Génissiat au cours de la période d'interchasse 2000-
	2003 : a) mesure, b) simulation avec ADIS-TS
5.29	Description des conditions aux limites envisagées pour la retenue de Génissiat pen-
	dant la chasse de 2016
5.30	Concentration simulées 1) en aval du barrage de Génissiat, 2) à Seyssel, en fonction
	de l'abaissement de la retenue : a) cote 308 m, b) cote 312 m et de la répartition du
	débit dans les vannes du barrage
5.31	Évolutions morphologiques de la retenue de Génissiat simulées pour la chasse de
	2016 avec une évacuation par la vanne de demi-fond : a) abaissement à 308 m, b)
	abaissement à 312 m
5.32	Description des conditions aux limites pour la retenue de Génissiat pendant la crue
	de mai 2015 : a) cote au barrage, b) débit et concentration amont 213
5.33	Concentration simulées au niveau des différents ouvrages du barrage et mesure en
	aval en fonction de la cote de la retenue : a) cote maintenue à 331 m (protocole réel)
	, b) cote maintenue à 328 m
1	Localisation des sections en travers décrivant la retenue de Génissiat



Les barrages sont construits en travers des cours d'eau pour permettre le stockage de l'eau à des fins de contrôle des crues, d'irrigation, d'alimentation en eau potable ou de production hydro-électrique. Ils forment ainsi des obstacles aux échanges longitudinaux dans les cours d'eau [McCartney, 2009] et les retenues créées en amont sont des éléments du système fluvial à part entière qui affectent sensiblement le transit sédimentaire [Annandale, 1987]. Avant même de discuter les impacts des barrages sur le transport solide, il est important de comprendre ce qu'est le transport solide en rivière.

1.1 Le transport des sédiments en rivière

1.1.1 Classification des sédiments

Une large gamme de tailles de sédiments est rencontrée en rivière. Des classes de matériaux peuvent être définies à partir de leur taille, représentée par un diamètre équivalent. En effet, les particules naturelles ne sont pas de forme sphérique, mais plutôt ellipsoïdale. Le diamètre équivalent correspond au diamètre de la sphère qui se comporterait de la même manière que le grain lors de l'analyse granulométrique. La classification de Wentworth [1922] distingue :

- les galets : 64 mm < d < 256 mm
- les cailloux : 4 mm < d < 64 mm
- les graviers : 2 mm < d < 4 mm
- les sables : 62 $\mu\mathrm{m} < d < 2~\mathrm{mm}$
- les limons : 4 µm < d < 62 µm
- les argiles : d <4 $\mu{\rm m}$

Les sables et particules plus grossières sont des particules pour lesquelles les effets de gravité sont dominants.

Les limons et argiles sont souvent appelés « sédiments fins ». Du fait de leur propriétés cohésives, les particules fines ont la capacité de s'agréger en flocs [Migniot, 1968]. La limite entre les sédiments cohésifs et non cohésifs n'est pas clairement définie, et varie en fonction des matériaux. De nombreux auteurs associent cette limite à la limite entre les limons et les sables (autour de 60 μ m). Néanmoins, les propriétés cohésives d'un mélange d'argile et de limon sont principalement liées à la présence d'argile et les limons grossiers sont plus proches des sables que des argiles [Mehta *et al.*, 1989]. Ce caractère cohésif des particules confère aux dépôts des propriétés de consolidation. Les dépôts se compactent sous l'effet du poids de la matière. La consolidation contrôle les variations de niveau du lit et le début de transport des sédiments [Berlamont *et al.*, 1993].

1.1.2 Modes de transport des sédiments en rivière

Dans les cours d'eau on distingue trois modes de transport des sédiments, dépendant de la taille des particules, des conditions hydrauliques et des apports provenant de l'amont (Figure 1.1).

- Le charriage est le mode de transport sur le fond des particules grossières du lit (cailloux, graviers, sables). Les forces hydrodynamiques font bouger les particules par roulement, glissement ou petits sauts. La capacité de transport de l'écoulement correspond à la quantité de sédiments maximale qu'il peut transporter et dépend des conditions hydrodynamiques locales [Van Rijn, 1984a]. Lorsque des sédiments sont disponibles au fond du lit, le taux de transport par charriage est généralement égal à la capacité de transport,
- La suspension graduée concerne les particules du lit qui sont maintenues en suspension dans la colonne d'eau sous l'effet des fluctuations turbulentes, sans contacts répétés avec le lit. La distribution verticale de la concentration en sédiments en suspension montre généralement une concentration plus forte près du fond, qui décroit en se rapprochant de la surface [Van Rijn, 2007]. Ce gradient vertical de concentration résulte de l'action contradictoire des effets de gravité associés à la chute des particules et des effets de flottabilité associés à la turbulence de l'écoulement,
- La suspension de lessivage (« washload ») correspond au transport dans la colonne d'eau de particules fines n'appartenant pas au lit mais provenant de l'amont. Leur concentration ne peut donc être estimée à partir des conditions hydrauliques locales. Leur répartition peut être considérée homogène dans la colonne d'eau [Woo et al., 1986].

Le terme de charge de fond associe généralement charriage et suspension graduée. A contrario, lorsque l'on parle de matières en suspension (MES), on devrait inclure la suspension de lessivage et la suspension graduée même si cette dernière est souvent négligée.



 $\ensuremath{\mathsf{FIGURE}}$ 1.1 – Schéma des processus de transport par charriage et par suspension dans un cours d'eau.

1.1.2.1 Conditions d'observation des différents modes de transport

En milieu naturel, les modes de transport par charriage et par suspension coexistent généralement du fait de la variabilité des conditions hydrauliques et des différentes classes de sédiments transportés. Le phénomène prédominant pour une classe de sédiment donnée peut être déterminé à partir des conditions hydrauliques et de la granulométrie.

Mise en mouvement des sédiments non cohésifs

Un aspect fondamental de l'étude du transport de sédiments réside dans la définition de conditions critiques qui mènent à la mise en mouvement des sédiments. La mobilité des grains est gouvernée par l'écoulement et est le plus souvent caractérisée à partir de la contrainte hydraulique et de la granulométrie [Hunziker et Jaeggi, 2002]. La mise en mouvement des sédiments a lieu lorsque la contrainte hydraulique τ exercée par l'écoulement sur le fond dépasse une valeur critique τ_c . La contrainte peut être décomposée en contraintes d'origines différentes : une contrainte de peau liée à la taille des grains du fond, une contrainte liée à la présence de formes de fond, une autre liée à la géométrie de la rivière. La contrainte efficace τ_{eff} est définie par Meyer Peter et Müller [1948] comme la partie de la contrainte responsable de la mise en mouvement des grains. Il s'agit de la contrainte liée à la rugosité du fond. Lorsque la contrainte efficace est supérieure à la contrainte critique de mise en mouvement, les sédiments peuvent être érodés. Néanmoins, pour les cas d'application, il est difficile d'estimer la contrainte liée aux formes de fond, de sorte que seule la contrainte de peau est prise en compte, ce qui revient probablement à sous-estimer la contrainte efficace en présence de formes de fond.

La contrainte de cisaillement au fond critique τ_c est souvent discutée sous sa forme adimensionnée, correspondant au nombre de Shields [1936] :

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gd} \tag{1.1}$$

où d est le diamètre du sédiment, g est l'accélération de la pesanteur, et ρ et ρ_s sont respectivement les masses volumiques de l'eau et du sédiment. Le nombre de Shields dépend principalement de la taille et des propriétés cohésives du sédiment. Le diagramme de Shields (Figure 1.2) établit une relation entre le nombre de Shields critique et le nombre de Reynolds turbulent $R_* = du_*/\nu$, où $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$ est la vitesse de cisaillement et ν est la viscosité cinématique du fluide.



FIGURE 1.2 – Diagramme de Shields pour la mise en mouvement d'après Vanoni [1977].

Caractérisation des modes de transport

Le nombre de [Rouse, 1937] est un autre paramètre adimensionnel qui compare les effets de gravité aux effets turbulents :

$$R = \frac{w_s}{\kappa u_*} \tag{1.2}$$

où w_s est la vitesse de chute du sédiment et $\kappa=0,4$ est la constante de Von Kármán.

Le nombre de Rouse permet de déterminer le mode de transport dominant des sédiments (Tableau 1.1).

Mode de transport	Nombre de Rouse
Charriage	R > 5
Suspension proche du fond	2 < R < 5
Suspension graduée	0,1 < R < 2
Suspension homogène	0,1>R

TABLEAU 1.1 – Nombre de Rouse et mode de transport associé d'après Van Rijn [2007].

Pour calculer le paramètre de Rouse, il est important de connaitre la contrainte qui s'exerce sur le fond $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$ mais aussi la vitesse de chute w_s des particules. La vitesse de chute w_s d'une particule isolée dans un fluide au repos dépend principalement de sa taille mais aussi de sa forme, de sa densité et du fluide [Dietrich, 1982]. Elle peut être estimée à partir de l'équilibre entre la gravité et les forces de traînée. En supposant une particule sphérique, on obtient la relation :

$$w_s = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{C_D} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d} \tag{1.3}$$

où C_D est le coefficient de trainée, ρ_s et ρ sont les masses volumiques respectives du sédiment et de l'eau, g est l'accélération de la pesanteur (m/s²) et d est le diamètre de la particule.

L'inconnue principale est la valeur du coefficient de traînée C_D , dont l'expression analytique varie en fonction du nombre de Reynolds particulaire $Re_P = w_s d/\nu$, où ν est la viscosité cinématique de l'eau. Deux comportements asymptotiques sont observés :

- le régime de Stokes ($Re_P < 1$), pour lequel l'écoulement autour de la particule est laminaire et le coefficient de traînée est inversement proportionnel au nombre de Reynolds particulaire $C_D = 24/Re_P$,
- Pour $Re_P > 10^5$, le régime turbulent est parfaitement établi autour de la particule, et le coefficient de traînée est constant $C_D \approx 0, 9$.

Pour les nombres de Reynolds intermédiaires, le coefficient de traînée dépend de la forme des particules et s'exprime souvent à partir d'une loi associant ces deux comportement asymptotiques [Soulsby, 1997; Cheng, 1997; Camenen, 2007].

La forme des particules affecte aussi ces valeurs [Dietrich, 1982; Camenen, 2007]. La formule de Camenen [2007] valable quelque-soit le régime et qui permet de prendre en compte la nature de la particule est utilisée dans la thèse :

$$w_s = \frac{\nu}{d_*} \left[\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{A}{B}\right)^{2/3} + \left(\frac{4}{3} d_*^3\right)^{1/m}} - \frac{1}{2} \left(\frac{A}{B}\right)^{1/m} \right]^m$$
(1.4)

où $d_* = d_{50} (g\delta/\nu^2)^{1/3}$ est le diamètre adimensionnel, $\delta = (\rho_s - \rho)/\rho$ est la densité réduite du sédiment et les coefficients A, B et m dépendent des caractéristiques de la particule comme sa forme ou sa rugosité (Tableau 1.2).

- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	. I.	I	- J I
Matériaux	A	В	m
Particules sphériques	24,0	0,39	1,92
Galets lisses	24,5	0,62	1,71
Sable naturel	24,6	0,96	$1,\!53$
Sable concassé	24,7	1,36	$1,\!36$
Cylindres longs	36,0	1,51	1,40
Limon, particules cohésives	38,0	$3,\!55$	$1,\!12$
Flocs	26,8	2,11	1,19

TABLEAU 1.2 – Coefficients A, B et m pour les principaux types de particules.

1.1.3 Morphologie des rivières

Dans des conditions naturelles, le transport des sédiments et les processus de dépôt et d'érosion permettent au cours d'eau d'ajuster sa morphologie par rapport aux variables de contrôle comme le débit liquide Q et le débit solide Q_s . La charge de fond est généralement responsable de l'évolution morphologique du chenal alors que le transport par suspension de lessivage est responsable de l'évolution du lit moyen et des zones moins dynamiques du cours d'eau.

L'équilibre entre la morphologie de la rivière et les débits liquides et solides peut être représenté schématiquement par la balance de Lane [1955] (Figure 1.3). L'écoulement, via son débit liquide et la pente du cours d'eau dispose d'une puissance permettant de transporter un certain débit solide. Si le débit liquide augmente, l'équilibre sera retrouvé via une augmentation du débit solide et/ou de la pente suite à de l'érosion. Inversement, si on réduit le débit solide, comme par exemple à l'aval d'un barrage, la pente du fond est réduite.



FIGURE 1.3 – Balance de Lane [1955].

1.2 Le transport des sédiments dans les retenues

1.2.1 Les retenues de barrage

Les retenues de barrage sont caractérisées par une augmentation artificielle de la profondeur d'eau de l'amont vers l'aval. La présence du barrage permet de moduler le débit sortant et la cote de la retenue, conduisant à une large gamme de conditions hydrauliques dans la retenue.

La forme d'une retenue est fonction de la topographie de la vallée et de la hauteur du barrage. Borland et Miller [1960] distinguent trois types de retenues :

- Les retenues de type lac comme le Lac Waco au Texas qui sont caractérisées par un faible relief et des eaux relativement peu profondes et qui ont nécessité la construction d'un barrage large,
- Les retenues de type gorge sont situées dans des vallées étroites et profondes et qui ont nécessité la construction d'un barrage haut. Elles présentent une forme allongée et sont caractérisées par une dimension longitudinale prépondérante par rapport aux dimensions transversales. De forts gradients longitudinaux sont observés au sein de ces retenues, liés notamment à l'augmentation de la profondeur d'eau en direction du barrage. La retenue de 600 km formée par le barrage des Trois Gorges situé sur le fleuve Yangzi Jiang en Chine est une retenue de ce type,
- Les retenues de type intermédiaire, situées entre des collines ou avec le lit majeur en collines.

La taille, la forme et la profondeur de la retenue jouent un rôle important sur l'hydraulique et le transport de sédiments et notamment sur la répartition des dépôts [Kantoush, 2008]. Dans les retenues de type lac, la majorité des dépôts de sédiments ont lieu dans la partie amont de la retenue. Dans les retenues de type gorge, les dépôts sont situés dans la zone de la retenue la plus profonde.

Un découpage longitudinal des retenues allongées en trois zones est proposé par Thornton $et \ al. \ [1981]$ (Figure 1.4) :

- le tronçon fluvial est situé à l'amont de la retenue. Le bief est étroit et peu profond. Les vitesses sont importantes et permettent de transporter les sédiments fins sans interaction avec le fond,
- la retenue amont est situé dans la zone influencée par la retenue la plus en amont. Les hauteurs d'eau y sont plus importantes que dans le tronçon fluvial et les vitesses plus faibles. C'est une zone de transition où un dépôt important peut avoir lieu,
- la retenue aval est le bief le plus proche du barrage. Les hauteurs d'eau sont généralement importantes et favorisent le dépôt. Le fond est généralement composé de sédiments fins.





1.2.2 Les processus de transport dans les retenues

En se rapprochant du barrage, l'augmentation des hauteurs d'eau et la diminution des vitesses d'écoulement entraine des variations longitudinales des processus de transport des sédiments apportés par la rivière ou par les affluents. Une large gamme de tailles de sédiments est généralement présente dans les retenues. Le transport des sédiments dans les retenues est associé à la dynamique de différentes classes de sédiments et produit une distribution spatiale caractéristique des dépôts et de la granulométrie. Les sédiments transportés par charriage sont généralement bloqués en amont de la retenue, alors que le piégeage des sédiments en suspension peut varier selon les sites mais se réalise souvent sur la partie aval de la retenue [Brune, 1953]. Comme discuté précédemment, les processus de transport sont principalement contrôlés par différents paramètres hydro-sédimentaires comme la hauteur d'eau, la vitesse de l'écoulement ou encore la vitesse de chute des particules [Abraham *et al.*, 1999]. Les conditions hydrauliques peuvent ainsi produire un dépôt sélectif [Paola *et al.*, 1992; Petts, 1984], aboutissant à un affinement des dépôts d'amont en aval de la retenue.

Fan et Morris [1992a] distinguent trois processus principaux à l'origine de la sédimentation dans les retenues :

- le dépôt d'un delta de sédiments grossiers au niveau de la retenue amont,
- le dépôt de sédiments fins à partir d'un écoulement non stratifié au niveau de la retenue aval,
- le dépôt de sédiments fins par un courant de densité.

Les sédiments grossiers déposés à l'amont de la retenue forment des deltas qui peuvent se propager vers l'amont et vers l'aval de la retenue (Figure 1.4). Le delta est composé de deux entités principales : la plaine du delta, à l'amont, correspond aux sédiments plus grossiers. Sa limite aval correspond à la limite du transport par charriage dans la retenue. Le front est la partie du delta qui se propage dans la retenue, sa pente est généralement plus élevée et il est composé de sédiments plus fins. La retenue de Tarbela au Pakistan est un exemple de retenue affectée par un dépôt deltaïque de sédiments grossiers. Au fil du temps, le delta s'est propagée vers le barrage et a aujourd'hui atteint le barrage (Figure 1.5).



FIGURE 1.5 – Évolution du profil en long de la retenue de Tarbela, Pakistan, d'après Lowe et Fox [1995].

Les sédiments les plus fins sont transportés par suspension et s'accumulent en aval du delta [Kostic et Parker, 2003a]. Les sédiments fins sont généralement déposés dans la zone la plus profonde de la section, puis par couches horizontales. Un tri longitudinal des sédiments transportés par suspension est observé en fonction des vitesses de chute. Les sédiments fins transportés jusqu'au barrage et situés sous le niveau des prises d'eau sont systématiquement déposés. Des
épaisseurs de dépôt importantes près du barrage sont caractéristiques des petites retenues présentant des apports importants de sédiments fins ou des retenues longues gérées à côte basse pendant les périodes d'apport sédimentaire [Di Silvio, 2001].

Des phénomènes de stratification dus à des différences de densité (ayant pour origine des différences de température, salinité ou turbidité) sont souvent observés en retenue où les effets de mélange sont limités. Les courants de turbidité sont des courants de densité régis par la différence de densité entre un écoulement chargé en sédiments et l'eau peu chargée de la retenue [De Cesare, 1998]. L'écoulement chargé, plus lourd, plonge et se propage près du fond le long de la retenue. Les courants de turbidité peuvent éroder ou déposer des sédiments. Lorsque l'entrainement l'emporte sur la sédimentation, le courant de turbidité peut s'auto-accélérer, sinon il est atténué. Des courants de turbidité sont généralement observés dans le Lac Mead, la retenue formée par le barrage Hoover aux États-Unis. Gould [1951] a estimé que les courants de turbidité étaient responsables de la moitié du comblement de la retenue observé au cours des 14 années suivant sa mise en service.

L'érosion des berges peut contribuer de manière importante sur le transport des sédiments en retenue. L'érosion des berges peut être causée par de nombreux processus et influencée par de nombreux facteurs [Gatto et Doe III, 1987]. L'érosion des berges formées dans des matériaux meubles peut se manifester sous l'effet des vagues, du vent ou des eaux souterraines. L'érosion peut aussi être causée par des glissements de terrain. Lorsque des dépôts de sédiments fins sont présents sur les bords, l'abaissement du niveau des retenues peut compromettre leur stabilité et entraîner l'effondrement de ces murs de vase. L'importance de ces différents processus varie selon les sites.

1.2.3 Le comblement des retenues

Les barrages et leurs retenues modifient les écoulements et forment des obstacles au transit des sédiments, aboutissant au comblement de la retenue. Le taux de piégeage T_P d'une retenue est le rapport entre la part du transport solide piégé et le transport solide entrant dans la retenue. Il dépend de plusieurs paramètres [Graf, 1984; Verstraeten et Poesen, 2000] :

- Les caractéristiques du bassin versant (production de sédiments),
- Les apports liquides et solides dans la retenue, et les caractéristiques des sédiments entrants,
- Les caractéristiques de la retenue (dimension, forme, mode d'exploitation) et du barrage (position et taille des vannes).

Les sédiments s'accumulent dans la retenue au fil du temps jusqu'à ce qu'elle ait atteint un nouvel état d'équilibre. De fait, les barrages sont conçus avec des durées de vie finies, et le comblement des retenues à plus ou moins long terme est inévitable [Morris et Fan, 1998]. La durée de vie utile d'une retenue correspond au nombre d'années nécessaires à la sédimentation du volume mort de la retenue (situé sous les prises d'eau). Après cette période, la sédimentation réduit le volume de la retenue utilisé pour le stockage. Sumi et Hirose [2009] estiment le comblement des retenues à l'échelle mondiale à 567 km³ sur un volume total de 5976 km³, soit 11,8 %, avec un comblement annuel de 30,9 km³. D'après Oehy et Schleiss [2007], la perte de stockage liée à la sédimentation dans les retenues est supérieure au gain de stockage fourni par la construction de nouveaux barrages. Par conséquent, il devient de plus en plus important de gérer la perte de capacité des retenues et de concevoir de nouveaux aménagements assurant le plus possible la continuité sédimentaire sur le long terme [Podolak et Doyle, 2015].

Le comblement des retenues peut avoir de fortes répercussions dans les domaines environnementaux, économiques et du point de vue de la sécurité. La réduction de la capacité de la retenue due aux dépôts de sédiments entraine une diminution du volume de stockage, préjudiciable lorsque l'eau est utilisée pour des usages agricoles [Haregeweyn *et al.*, 2003]. Dans le cadre de l'exploitation hydroélectrique du barrage, la diminution de la capacité de stockage entraîne des pertes de production [Ledec et Quintero, 2003]. Plusieurs enjeux de sûreté liés au comblement des retenues sont rencontrés et dépendent de la localisation des dépôts de sédiments. Le dépôt des sédiments dans la partie amont de la retenue peut entrainer un exhaussement des lignes d'eau et augmenter les risques d'inondation en cas de crue [Annandale, 1987]. L'accumulation de dépôts de sédiments au pied du barrage, présentant une densité supérieure à celle de l'eau, entraîne une augmentation de la pression exercée sur le barrage et peut provoquer des problèmes de stabilité [Bougacha et Tassoulas, 1991]. Le dépôt des sédiments près du barrage peut aussi entraîner le comblement des vannes situées près du fond, et poser des problèmes d'évacuation lors de crues. Si les dépôts atteignent le seuil des prises d'eau, le passage de sédiments grossiers peut provoquer une usure accrue des turbines [Morris et Fan, 1998].

1.2.4 L'estimation du comblement des retenues

L'accumulation des sédiments dans une retenue peut être estimée à partir de mesures bathymétriques répétées. La différence entre deux campagnes permet d'obtenir le volume déposé [Vanoni, 1977; Morris et Fan, 1998] et de localiser les zones de dépôt. La bathymétrie peut être décrite soit par des profils en travers, localisés le long de la retenue et plus ou moins espacés, soit à partir de courbes de niveaux obtenues à partir de l'interpolation de mesures ponctuelles. Il existe plusieurs méthodes de calcul des volumes à partir de profils en travers décrites par Heinemann et Dvorak [1963]; Morris et Fan [1998] et Yang [2006]. Lorsque la densité des données bathymétriques est suffisante, la création d'un modèle numérique de terrain permet le calcul numérique des différences bathymétriques et leur cartographie [Brasington *et al.*, 2000; Wheaton *et al.*, 2010]. Cette méthode d'estimation du comblement des retenues est très répandue [Fuller *et al.*, 2003; Snyder *et al.*, 2004], mais son application est difficile à mettre en oeuvre pour les retenues de très grande taille car elle nécessite une importante quantité de données.

La quantité de sédiments piégée dans une retenue peut aussi être estimée à partir de la différence entre la masse de sédiments entrant dans la retenue et la masse sortant, sur des périodes courtes ou longues. Cette méthode permet en outre d'estimer le taux de piégeage de la retenue [Brune, 1953] et d'évaluer l'efficacité de différentes techniques de gestion [Morris et Fan, 1998]. Son application est aussi répandue [Hu *et al.*, 2009; Lewis *et al.*, 2013], mais des résultats fiables sur le long terme sont difficiles à obtenir car elle nécessite une estimation en continu des masses entrant et sortant et comprend de nombreuses incertitudes.

Des méthodes empiriques ont été développées à partir d'observations sur différentes retenues pour estimer le taux de piégeage des retenues à partir des caractéristiques du bassin versant et de la retenue. Brown [1944] a développé un modèle qui relie le taux de piégeage T_P au rapport entre la capacité de la retenue et la surface du bassin versant :

$$T_P = 100 \left(1 - \frac{1}{1 + 0,0021\gamma V_{ret}/A_{BV}} \right)$$
(1.5)

où V_{ret} est la capacité de la retenue en m³, A_{BV} est l'aire du bassin versant en km² et γ est un paramètre compris entre 0,046 et 1.

Brune [1953] a proposé de relier le taux de piégeage au temps de résidence de l'eau :

$$T_P = 100 \left(1 - \frac{V_{ret}/V_{ann}}{0,012 + 1,02} \right)$$
(1.6)

où V_{ann} est l'apport moyen annuel en m³.

Néanmoins, ces méthodes restent très incertaines car elles considèrent un taux de piégeage invariable dans le temps et ne prennent pas en compte la production sédimentaire du bassin versant, ni la présence de retenues en amont. Plus récemment, Minear et Kondolf [2009] ont proposé une méthode basée sur les systèmes d'information géographiques, qui permet d'estimer les apports sédimentaires pour un bassin non jaugé par analogie avec d'autres bassins. Cette méthode permet aussi d'inclure des paramètres supplémentaires comme le piégeage des sédiments par des retenues en amont et la diminution du taux de piégeage avec l'augmentation du comblement de la retenue.

1.3 Le contrôle de la sédimentation dans les retenues

Afin de limiter les risques associés au comblement des retenues et d'assurer leur longévité, il est nécessaire de mettre en place des mesures de gestion des sédiments dans la retenue et à l'aval.

Plusieurs techniques peuvent être utilisées par les gestionnaires pour limiter le comblement des retenues. Brown [1944]; Morris et Fan [1998] et Kondolf *et al.* [2014] ont proposé une description détaillée de ces techniques. Elles peuvent être réparties en plusieurs catégories selon l'objectif recherché (Figure 1.6).



FIGURE 1.6 – Classification des stratégies de gestion des sédiments pour le maintien de la capacité des retenues d'après Kondolf *et al.* [2014].

1.3.1 Retour d'expérience sur quelques cas problématiques

La retenue de Sanmenxia sur le Fleuve Jaune en Chine a été mise en opération en 1960. De mauvaises estimations des apports sédimentaires, qui envisageaient notamment une réduction de l'érosion du bassin versant par des mesures de conservation, et du transport dans la retenue comme la possibilité de faire transiter 35% des apports sédimentaires par des courants de turbidité ont été projetées au cours de la phase de construction du barrage. Par conséquent, la retenue a perdu 17% de sa capacité maximale au cours des 18 mois suivant sa mise en opération [Morris et Fan, 1998]. Pour limiter le comblement, une nouvelle procédure de gestion, consistant à gérer la retenue à un niveau plus bas durant la saison des crues a été mise en place mais s'est avérée inefficace [Wang *et al.*, 2005]. La solution lourde et couteuse à ce problème a été la modification du barrage et l'installation de vannes supplémentaires pour limiter le stockage des eaux chargées lors des crues.

Chanson [1998] rapporte des cas de comblement extrêmes de retenues en Australie, plus de 20 retenues ayant été complètement comblées entre 1890 et 1960. Il attribue ces processus à une mauvaise estimation des apports sédimentaires, notamment de la production de sédiments par les bassins versants et aussi des processus de transport dans les retenues, aboutissant à un sous-dimensionnement des vannes de fond empêchant une évacuation efficace des sédiments.

En France, le lac du Motty formé par le barrage du Pont du Loup sur le Drac, mis en eau fin 1927 a été complètement comblé fin 1932 consécutivement à des apports importants en crue [Walther, 1936].

La plupart des échecs dans le contrôle du comblement des retenues rencontrés par les gestionnaires sont liés à une connaissance insuffisante des processus d'apports sédimentaires et de transport dans les retenues [Morris et Fan, 1998] et à un design inapproprié des ouvrages d'évacuation des sédiments. En effet, la plupart des techniques de contrôle comme les chasses ou le transfert des eaux chargées sont appliquées par les gestionnaires en se basant sur les retours d'expérience plutôt que sur une connaissance des processus physiques [Sloff, 1991].

1.3.2 Présentation des différentes techniques de contrôle de la sédimentation

1.3.2.1 L'utilisation de tunnels « by pass »

Les tunnels « bypass » sont utilisés pour faire transiter les eaux chargées de l'amont de la retenue à l'aval du barrage sans qu'elles n'aient à parcourir la retenue. La retenue de Asahi au Japon a été mise en opération en 1978. Un comblement important a motivé la construction d'un tunnel de déviation de 2350 m de long en 1998 [Sumi *et al.*, 2004]. Le tunnel a permis de réduire le taux de piégeage dans la retenue à 10-20%. Entre 1998 et 2006, le tunnel a permis d'éviter le dépôt de 0,75 million de m³ de sédiments dans la retenue [Kondolf *et al.*, 2014]. Cette méthode est néanmoins très onéreuse et n'est pas adaptée à tous les sites.

1.3.2.2 La gestion en crue

L'objectif de cette technique est de limiter le dépôt des sédiments et de favoriser leur transfert à l'aval lors des périodes d'apports, notamment lors des crues. Un abaissement de la retenue est généralement réalisé pour produire des conditions hydrauliques favorables au transport des sédiments dans la retenue [Fan et Morris, 1992b]. Pour obtenir un transfert efficace des sédiments, Ackers et Thompson [1987] ajoutent que la capacité d'évacuation doit être supérieure à la crue annuelle et doit s'accompagner d'un abaissement de la retenue. Si l'abaissement de la retenue est suffisant, l'érosion des matériaux en place peut aussi avoir lieu. Cette technique est aussi appliquée pour faire transiter à l'aval d'éventuels courants de densité et prévenir leur dépôt près du barrage.

1.3.2.3 Les chasses de barrages

L'objectif des chasses est d'éroder une partie des sédiments déposés dans la retenue afin de rétablir une plus grande capacité de stockage. Les chasses reposent sur l'ouverture des vannes du barrage pour évacuer les sédiments à l'aval [Di Silvio, 1990]. Les chasses peuvent être réalisées avec une cote relativement haute, c'est la pression créée par la colonne d'eau lors de l'ouverture de la vanne qui permet l'érosion des sédiments autour de la vanne et le rejet des sédiments à l'aval. Dans ce cas l'érosion est limitée aux alentours de la vanne [Di Silvio, 2001]. Afin d'augmenter la quantité de sédiments évacuée à l'aval, le niveau de la retenue est abaissé pour établir des conditions hydrauliques favorables à l'érosion plus en amont [Brandt, 1999]. Cette technique permet de créer un chenal d'érosion dans les dépôts de sédiments au fond, mais n'a pas d'effet sur les dépôts en lit majeur. D'un point de vue général, l'efficacité des chasses est améliorée lorsque :

- la cote de la retenue est basse,
- le débit de chasse est fort,
- les dimensions des vannes sont importantes,
- les vannes sont situées près du fond,
- la retenue est rectiligne et étroite,
- les dépôts sont proches du barrage,
- les particules sont fines et non consolidées,
- la durée de la chasse est longue.

Opérations de chasses réussies

De nombreux cas d'opérations de chasses réalisées avec succès sont rapportés par Atkinson [1996]. La retenue de Gebidem est située sur la rivière Massa en Suisse dans un canyon étroit présentant des berges pentues. Les sédiments piégés dans la retenue sont des sédiments non cohésifs, allant des sables aux graviers. Sa capacité est de 9 millions de m^3 , et elle piège en moyenne 0,4 million de m^3 chaque année, soit une durée de vie sans gestion d'environ 20 ans [Morris et Fan, 1998]. Depuis qu'elles ont été mises en place, les chasses de la retenue de Gebidem permettent d'évacuer annuellement une masse de sédiments supérieure à la masse déposée. Ce bilan positif permettra de rétablir puis maintenir la capacité de stockage de la retenue.

Facteurs susceptibles de limiter l'efficacité des chasses

Des chasses de la retenue de Heisonglin en Chine sont régulièrement organisées. Néanmoins, elles ne permettent pas de maintenir la capacité de la retenue. En effet, le chenal créé dans les dépôts lors de la chasse est très étroit comparé à la largeur de la retenue. De fait, les chasses permettent de rétablir l'altitude des fonds dans une zone très restreinte et ne permettent pas de contrer le dépôt important ayant lieu sur la majorité de la section [Atkinson, 1996].

1.3.2.4 Les dragages

Les dragages consistent en une extraction mécanique des matériaux. Ils sont généralement très couteux, ce qui ne permet leur utilisation que de façon très locale. De plus, en France, les sédiments dragués en un point du cours d'eau doivent être restitués à la rivière, impliquant des difficultés environnementales supplémentaires.

Les chasses et la gestion en crue sont les deux techniques les plus utilisées par les gestionnaires car elles présentent le meilleur rapport efficacité/coût [Morris et Fan, 1998].

1.4 La gestion des impacts environnementaux des barrages

Une description des impacts des barrages sur le cours d'eau en aval est proposée par Brandt [1999] et McCartney [2009].

1.4.1 Les impacts liés à la régulation des écoulements et du transport des sédiments

La régulation des écoulements par les barrages induit une modification de la distribution des débits liquides. Les barrages produisent généralement une réduction des débits et de la distribution des crues [Petts, 1979]. Le mode d'exploitation par éclusées provoque de soudaines augmentations et réductions des débits en aval des barrages qui peuvent impacter les écosystèmes fluviaux.

La stagnation des eaux dans les retenues favorise la présence en grandes quantités d'éléments nutritifs qui produisent généralement une eutrophisation des cours d'eau. Ces nutriments permettent l'accroissement de la production d'algues et de macrophytes et la dégradation de la qualité de l'eau [De Ceballos *et al.*, 1998]. La qualité de l'eau (concentration en matières en suspension, température, oxygène dissous) varie notamment en fonction de la profondeur et la construction d'évacuateurs à différentes altitudes peut permettre le contrôle de la qualité de l'eau rejetée [Morris et Fan, 1998].

A l'aval du barrage, des évolutions géomorphologiques liées à la rupture de la continuité sédimentaire peuvent être observées. Les écoulements peu chargés en sédiments sont qualifiés d'« hungry waters » [Kondolf, 1997]. Ils produisent une érosion du fond et des berges pouvant aller jusqu'à l'incision du lit. Les matériaux au fond deviennent de plus en plus grossiers, avec

généralement une couche armurée voire pavée en surface. En présence de grandes retenues modifiant fortement l'hydrologie, le lit en aval du barrage peut aussi s'exhausser sous l'effet de dépôts issus d'affluents car leur reprise par la rivière principale n'est plus possible faute de débits suffisants. Ces modifications géomorphologiques impactent les populations piscicoles en dégradant notamment leurs habitats. Plus en aval, la pénurie de sédiment peut entraîner le retrait de plages ou de deltas.

1.4.2 Les impacts liés aux chasses de barrage

Durant les chasses, de grandes quantités de sédiments sont généralement rejetées à l'aval du barrage, avec de fortes concentrations en sédiments en suspension. Scheuerlein [1995] estime que les impacts à l'aval sont d'autant plus importants que la quantité de sédiments rejetés est grande. Les sédiments en suspension piégés dans les retenues peuvent également être contaminés par des métaux lourds et des contaminants organiques qui sont transportés en aval lors des chasses [Walling et Webb, 1985; Chung *et al.*, 2008; Horowitz, 2008]. Les retenues ou tronçons du cours d'eau situées en aval interceptent une part importante des sédiments rejetés. L'exhaussement du cours d'eau en aval peut augmenter le risque d'inondation lors des crues. Les dépôts importants et les fortes concentrations en sédiments issus des chasses peuvent affecter les habitats et la survie de la faune et la flore benthique et des espèces piscicoles [Wood et Armitage, 1997; Owens *et al.*, 2005; Crosa *et al.*, 2010]. Le rejet de quantités importantes de sédiments peut aussi impacter les prélèvements d'eau dans la rivière pour l'alimentation en eau potable et le refroidissement de centrales électriques.

La protection de l'environnement constitue un nouvel enjeu pour les gestionnaires de retenues [McCartney, 2009]. De nouvelles législations, comme la directive européenne cadre sur l'eau imposent des mesures de protection environnementale. Même si des aides financières provenant d'institutions publique ou privées (Banque Mondiale, Union Européenne, USAID) sont proposées pour incorporer des mesures de protection de l'environnement, l'élimination totale des impacts environnementaux liés aux barrages est impossible. Cependant, des mesures d'atténuation des impacts sont envisageables par exemple en modifiant la structure du barrage ou le mode d'exploitation. Enfin, la commission internationale des grands barrages et d'autres agences ont développé des guides fournissant des recommandations pour la projection et réalisation de nouvelles installations.

1.5 Modélisation des processus sédimentaires dans les retenues

Il existe différentes techniques permettant de modéliser les processus hydro-sédimentaires dans les retenues :

- la modélisation physique,
- la modélisation numérique du transport sédimentaire,
- le calcul à partir de modèles mathématiques simples.

Ils peuvent permettre de prédire les évolutions de la morphologie de la retenue et des flux de sédiments rejetés par le barrage en fonction de la gestion de la retenue. Ces modèles peuvent aussi être utilisés pour sélectionner un mode de gestion permettant de concilier au mieux les enjeux liés à la présence du barrage et de sa retenue sur le cours d'eau.

1.5.1 La modélisation physique

Les modèles physiques sont des modèles réduits du système permettant de reproduire le comportement de l'eau et des sédiments. Pour être représentatifs du système réel, les modèles physiques doivent reproduire correctement les relations entre les différentes forces qui impactent le transport de l'eau et des sédiments. En pratique, il est impossible de reproduire le système à l'identique en laboratoire, et seules les échelles des forces les plus importantes sont préservées [Morris et Fan, 1998].

Ces modèles permettent d'analyser les problèmes caractérisés par des géométries complexes, impliquant des processus multidimensionnels. Ils se révèlent utiles pour la conception des vannes d'évacuation, ou l'observation de processus proches des barrages. Ils permettent une représentation et une visualisation immédiate des processus. Néanmoins, les modèles physiques sont très couteux et nécessitent des temps d'essai longs et le passage du modèle au prototype n'est généralement pas trivial. Par ailleurs, il est difficile de conserver ces modèles sur de longues périodes.

1.5.2 Les modèles mathématiques

Des modèles théoriques ont été développés pour estimer le taux de piégeage ou la durée de vie d'une retenue [Verstraeten et Poesen, 2000]. Le modèle 1D de Di Silvio [2001] permet par exemple d'estimer la durée nécessaire au comblement d'une retenue à partir de considérations théoriques. Il est basé sur une linéarisation des équations de l'hydraulique à surface libre et permet de simuler la propagation dans la retenue de deux vagues de sédiments de tailles différentes. Ces méthodes sont assez simples à mettre en oeuvre mais ne permettent pas de donner des estimations très précises.

1.5.3 La modélisation numérique

1.5.3.1 Modélisation hydrodynamique

La modélisation du transport de sédiments est le plus souvent basée sur la modélisation des écoulements. Les modèles numériques permettent de simuler les écoulements dans une, deux ou trois dimensions. Leur utilisation en hydraulique est répandue depuis les années 1980 [Papanicolaou *et al.*, 2008].

Les modèles unidimensionnels (1D) sont adaptés pour simuler des écoulements dans les cours d'eau relativement étroits et reproduire des paramètres moyennés dans les sections comme la vitesse moyenne, ou l'élévation de la surface libre. La quantité de données nécessaire pour mettre en place un modèle 1D est relativement légère et les temps de calcul des modèles 1D sont courts, ce qui permet de multiplier le nombre de simulations et favorise leur utilisation en ingénierie. De fait, la plupart des modèles utilisés pour l'étude de long tronçons de rivière et de longues périodes de simulation sont des modèles 1D. En pratique, de nombreux modèles 1D ont été développés pour simuler les écoulements en rivière, comme Fluvial [Chang, 1984], GSTAR [Molinas et Yang, 1986], ou HEC-RAS [Brunner, 1995].

Plus récemment, les modèles bidimensionnels (2D) ont été largement utilisés pour simuler des cas plus complexes où une vitesse moyenne sur le section mouillée n'est plus représentative de l'écoulement réel. Il existe deux types de modèles bidimensionnels : les modèles 2D horizontaux, et les modèles 2D verticaux. Les modèles 2DH comme Telemac 2D [Hervouet, 2000], Mike21 [Warren et Bach, 1992] ou CCHE2D [Wu, 2001] sont des modèles moyennés sur la profondeur, qui permettent d'estimer la hauteur d'eau et la cote du fond localement, ainsi que les vitesses moyennées sur la verticale dans les directions longitudinale et transverse . Ils ont été développés pour simuler les écoulements présentant des variations longitudinales et latérales, comme les débordements en rivière, ou la dynamique des estuaires ou zones côtières. Les modèles 2DV comme CE-QUAL-W2 [Cole et Wells, 2003] sont des modèles moyennés latéralement, qui prennent en compte la dimension verticale. Ils ont été développés pour simuler les écoulements présentant uniquement des variations longitudinales et verticales ou les milieux côtiers en négligeant les variations transversales.

Enfin, les modèles tridimensionnels (3D) permettent de prendre en compte les trois dimensions. Les modèles 3D comme Telemac 3D [Villaret *et al.*, 2013], Delft3D [Lesser *et al.*, 2004] ou Fluent [Fluent, 2006] permettent de reproduire les processus pour des géométries complexes, comme les écoulements secondaires ou les écoulements à proximité de structures hydrauliques.

Dès qu'il existe une forte variabilité des vitesses transversalement et/ou verticalement, les modèles 2D et 3D deviennent nécessaires si l'on recherche une compréhension plus locale de la dynamique de la rivière. Les modèles 2D et 3D nécessitent cependant une quantité importante de données pour leur construction, calage et validation. Les temps de calcul sont relativement longs, en particulier comparé aux modèles 1D [Molinas et Yang, 1986].

1.5.3.2 Modélisation du transport sédimentaire

Outre le choix du nombre de dimensions pour lesquelles l'écoulement est résolu, il existe différentes stratégies de modélisation du transport sédimentaire. En effet, les formulations mathématiques utilisées pour modéliser le transport des sédiments diffèrent selon les processus. Le transport par suspension de lessivage des sédiments fins ne dépendant pas uniquement des conditions hydrodynamiques locales, mais aussi des apports amont, il est généralement simulé à l'aide d'une équation d'advection-dispersion qui intègre des termes sources pour le dépôt ou l'érosion [Yang, 2006]. En fonction du nombre de dimensions, la concentration en sédiments simulée correspond respectivement à la moyenne dans la section, la moyenne sur la verticale pour chaque maille de calcul transversale, ou la moyenne locale.

Le transport de la charge de fond dépend quand à lui uniquement des conditions hydrodynamiques locales. La formulation mathématique pour simuler ce transport est basée sur une loi de conservation de la masse de sédiments, ou loi d'Exner qui permet de prendre en compte les échanges sédimentaires entre la colonne d'eau et le lit. Ces échanges sont déterminés en fonction de la capacité de transport de l'écoulement et du taux de transport. Ces modèles nécessitent de connaitre la capacité de transport de l'écoulement, qui est généralement estimée à partir de lois empiriques.

L'estimation de l'évolution de la géométrie d'une section due au transport solide dépend du nombre de dimensions du modèle. Pour les modèles 2D et 3D, elle est calculée à l'échelle d'une maille. Pour les modèles 1D, il faut généralement choisir une méthode de répartition des évolutions dans la section par exemple une répartition homogène sur le périmètre mouillé ou un dépôt localisé dans les zones les plus profondes.

Des avancées dans la compréhension et la formulation mathématique des processus de transport ont permis d'améliorer les capacités de reproduction des modèles. Des modèles permettent de simuler le transport non uniforme et non stationnaire lié à l'inertie du transport solide par rapport à l'écoulement [Armanini et Di Silvio, 1988; Holly Jr et Rahuel, 1990; Wu *et al.*, 2004]. La prise en compte de plusieurs classes granulométriques et de leurs interactions est aussi possible [Hirano, 1972; Profitt et Sutherland, 1983; Armanini, 1995]. Des modèles peuvent aussi simuler le couplage entre l'hydraulique et le transport de sédiments. Les modèles semi-couplés simulent la mise à jour régulière de la géométrie des fonds liée au transport des sédiments et son impact sur l'hydrodynamique [Kassem et Chaudhry, 1998]. Les modèles entièrement couplés intègrent en plus l'impact de la présence de sédiments en suspension sur la turbulence de l'écoulement [Holly Jr et Rahuel, 1990; Lai, 1991]. Des formulations additionnelles permettant de simuler les processus liés au caractère cohésif des sédiments fins comme la floculation, la consolidation ou le tassement ont été développées. Des modèles et formulations adaptés aux processus observés dans les retenues ont aussi vu le jour, notamment pour la modélisation des courants de turbidité [Kostic et Parker, 2003a; Toniolo et Parker, 2003].

1.5.3.3 Application des modèles numériques aux retenues de barrage

Les modèles 1D ont souvent été utilisés pour la prédiction du comblement de retenues sur le long terme [Okabe *et al.*, 1993; Ziegler et Nisbet, 1995; Singh, 1999; Albayati, 2014; Gibson

et Boyd, 2014]. Ils ont aussi été utilisés pour modéliser des opérations de gestion sédimentaire à grande échelle, comme les chasses de barrage de l'Arc en Maurienne [Antoine *et al.*, 2014].

Pour la modélisation des processus dans les retenues, l'utilisation des modèles 2DH est également assez répandue [Bessenasse *et al.*, 2004; Harb *et al.*, 2012; Moussa, 2013]. Quelques études ont aussi été réalisées à partir de modèles 2DV [Sullivan *et al.*, 2007].

Les modèles 3D ont principalement été utilisés pour vérifier leur capacité à reproduire des observations à de petites échelles spatiales et temporelles, comme les observations issues de modèles réduits de retenues [Olsen, 1999; Kostic et Parker, 2003b]. Ils commencent à être appliqués à des géométries réelles de retenues, principalement pour des projets de grande ampleur, comme le barrage des Trois Gorges [Fang et Rodi, 2003; Haun *et al.*, 2012].

1.6 Problématiques scientifiques liées à la gestion sédimentaire des retenues de forme allongée

Une meilleure gestion sédimentaire des retenues allongées repose sur la compréhension des processus hydro-sédimentaires de ces retenues et la mise en place de protocoles d'exploitation et d'opérations de gestion sédimentaire adaptés.

L'évaluation des processus hydro-sédimentaires des retenues de forme allongées nécessite de connaitre la dynamique du transport des sédiments dans ces retenues. En particulier, il est important de déterminer la dynamique spatiale des évolutions morphologiques en localisant les zones sujettes au dépôt et à l'érosion de sédiments et de quantifier et qualifier les flux de sédiments transportés, notamment les flux entrant et sortant. En outre, la présence de différentes classes de sédiments dans les retenues nécessite de distinguer les processus associés au transport de chacune des classes et leur importance dans la dynamique sédimentaire. L'existence d'interactions entre les différentes classes de sédiments et leur importance vis à vis de la dynamique doit aussi être déterminée. Enfin une interprétation réaliste des processus nécessite d'estimer la représentativité de la dynamique mise en évidence par rapport à la qualité des observations.

La modélisation numérique permet d'améliorer la description des processus hydro-sédimentaires des retenues et fournit une meilleure compréhension de la dynamique. La configuration des retenues de forme allongée justifie l'utilisation des modèles unidimensionnels sur leur quasiintégralité. L'utilisation de modèles permet d'identifier les processus sédimentaires que l'on peut reproduire numériquement. La mise en place d'un modèle numérique nécessite donc de déterminer les objectifs de la modélisation et de choisir de(s) modèle(s) mathématique(s). Les modèles doivent permettre de mieux comprendre les processus dominants dans la retenue. C'est pourquoi la représentativité des résultats doit être évaluée. Pour cela, il est primordial de déterminer les limites du modèle développé, qui peuvent concerner la formulation utilisée ou la description des données du modèle.

D'un point de vue opérationnel, il est nécessaire de déterminer dans quelle mesure une meilleure compréhension de la dynamique sédimentaire des retenues de forme allongée et la disponibilité d'outils de modélisation permettant de simuler les processus permet d'améliorer la gestion de la retenue. Il est nécessaire de déterminer les conditions de gestion de la retenue lors de périodes d'exploitation normale qui permettent de limiter le comblement et aussi de proposer une amélioration des protocoles des opérations de gestion sédimentaire permettant d'assurer le désenvasement de la retenue et de contrôler les impacts à l'aval.

1.7 Démarche scientifique

L'objectif de la thèse est de faire progresser la connaissance scientifique sur les processus hydro-sédimentaires des retenues de forme allongée. Le travail de thèse s'appuie sur le cas de la retenue de Génissiat, située sur le Haut-Rhône. Cette retenue de forme allongée présente un comblement assez prononcé, estimé à environ 25% de sa capacité initiale et est régulièrement soumise à des opérations de gestion sédimentaire. La retenue a fait l'objet de nombreuses campagnes de reconnaissance bathymétriques et granulométriques depuis sa mise en opération. Récemment, elle a été instrumentée afin de mesurer les flux de matières en suspension entrant et sortant.

La démarche proposée pour l'évaluation des processus hydro-sédimentaires de la retenue repose sur l'analyse et l'interprétation des observations de terrain, associée à la modélisation numérique, et se décompose en quatre étapes :

- 1. une présentation de la retenue et des enjeux sédimentaires associés,
- 2. une analyse hydromorphologique de la retenue,
- 3. une analyse de la dynamique spatio-temporelle du transport des sédiments dans la retenue,
- 4. une modélisation numérique des processus hydro-sédimentaires de la retenue.

La connaissance des contextes géographiques, sociaux et politiques du site d'étude permet de comprendre les problématiques et les enjeux particuliers associées au comblement de la retenue servant de cas d'application.

L'analyse hydro-morphologique est utilisée afin de décrire la dynamique longitudinale du transport sédimentaire. Les évolutions morphologiques de la retenue vont être déterminées à partir des mesures, ce qui nécessite le développement de méthodes de traitement et d'analyse des données, qui doivent être accompagnées d'une estimation des incertitudes afin d'apprécier la significativité des résultats obtenus. Afin de comprendre l'impact de la gestion de la retenue sur les évolutions morphologiques, la gamme d'écoulements pouvant être observés dans la retenue va être simulée à partir d'un modèle hydraulique. Une méthode de découpage hydromorphologique, basée sur des paramètres morphologiques et hydrodynamiques va être proposée afin de déterminer une échelle spatiale représentative permettant de rencontre compte de la dynamique observée.

L'analyse du transport sédimentaire va permettre de compléter les connaissances acquises sur la dynamique de la retenue, à travers la quantification et la caractérisation des flux transportés le long de la retenue. L'estimation des incertitudes va permettre d'évaluer la qualité des observations et la représentativité des valeurs. L'analyse étant limitée par la longueur des chroniques de concentrations en MES, une méthode de reconstruction des flux entrant et sortant de la retenue va être proposée pour les périodes antérieures aux mesures.

Deux codes de calculs ont été sélectionnés pour reproduire respectivement le transport de sédiments fins par suspension et le transport de sédiments grossiers. Le calage et la validation sont réalisés à partir de la simulation d'événements passés. La comparaison des résultats du modèle et des mesures permet d'évaluer la justesse des modèles et de mettre en évidence leurs limites. Ces modèles devront permettre de mettre en évidence les processus clé dominants tout au long d'une retenue allongée. Des solutions alternatives vont être proposées afin de solutionner les limites principales des modèles et obtenir des résultats plus proches des mesures. Les modèles vont ensuite être utilisés à des fins prédictives afin de tester différents protocoles de gestion de la retenue pour des opérations de chasse ou des périodes d'interchasse.

Présentation du cas d'application

Le cas d'application sélectionné pour la thèse est la retenue de Génissiat, située en France sur le Haut-Rhône. Elle est gérée par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) et est exploitée depuis 1948.

2.1 Présentation du Haut-Rhône

2.1.1 Aperçu géographique du Haut-Rhône

Avec un débit moyen de 1700 m^3 /s et un bassin versant de 95500 km², le Rhône est l'un des principaux fleuves européens. Il prend sa source en Suisse, dans le massif du Saint Gothard, et parcourt 810 km, dont 522 km en France avant de se jeter dans la mer Méditerranée [Bravard, 1987]. Le cours du Rhône est divisé en cinq entités hydrographiques : le Rhône Alpestre est le tronçon de la source au Lac Léman ; le Haut-Rhône est situé de l'embouchure du Lac Léman au confluent de la Saône à Lyon et en aval le Rhône moyen, aval et le Delta.



FIGURE 2.1 – Aperçu géographique du Haut-Rhône et de ses aménagements.

Le Haut-Rhône traverse le Jura, les Préalpes et la plaine de l'Ain sur plus de 200 km et couvre un bassin versant de 12 300 km². Dans sa partie suisse, 1,2 km après sa sortie du lac Léman le Haut-Rhône reçoit les eaux de l'Arve en rive gauche sur le site de « la Jonction », puis pénètre une vingtaine de kilomètres plus en aval, en France au niveau des communes de Chancy

(Suisse) et Pougny (France) (Figure 2.1). De Collonges à Seyssel, le Rhône s'écoule dans une vallée encaissée entre des falaises calcaires. Il gagne ensuite les plaines laissées par les glaciers [Pardé, 1925].

2.1.2 Conditions d'apport solide

Le lac Léman fait office de décanteur pour le tronçon du Rhône Alpestre et à son exutoire le Rhône est peu chargé en sédiments. L'Arve est le principal affluent du Haut-Rhône du Léman à Seyssel. C'est une rivière alpine dont le régime est rythmé par l'accumulation et la fonte des neiges [Pardé, 1925; Bravard, 1987]. La période de fonte s'étend de mars à août et présente un débit moyen élevé (96 m³/s) avec un maximum de débit mensuel en juin-juillet [Launay, 2014]. La période de septembre à février est caractérisée par un débit moyen plus faible (55 m³/s) et est marquée par des épisodes de crue associés à des fortes pluies ou des orages. L'Arve transporte une quantité importante de fines particules détritiques, et le flux de matières en suspension homogène de l'Arve est compris 0,2 et 1,4 10⁶ t par an, avec une moyenne autour de 0,7.10⁶ t [Launay, 2014] (Figure 2.2). Des extractions intensives de matériaux ont longtemps eu lieu sur l'Arve, provoquant une diminution importante des apports de sédiments grossiers. Le gravier charrié par l'Arve est actuellement déposé en grande partie dans le cours d'eau en amont de Genève, dans une zone en déficit sédimentaire [Loizeau et Wildi, 2007].



FIGURE 2.2 – Confluence entre le Rhône (à droite) et l'Arve en crue (à gauche) (photo SIG).

2.2 Historique et exploitation des aménagements hydro-électriques du Haut-Rhône

2.2.1 Les aménagements hydro-électriques du Haut-Rhône

L'aménagement hydro-électrique du Haut-Rhône a débuté dès la fin du XIX^e siècle avec la mise en opération en 1871 du barrage de Bellegarde en France, puis du barrage de Chèvres, en 1896 [Grenier, 1897]. En 1921 la « Loi Rhône » approuve en France un programme d'aménagement du fleuve, de la frontière suisse à la mer, selon trois axes : les forces motrices, la navigation et les utilisations agricoles. En 1934, la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) reçoit de l'État Français la concession du Rhône français pour l'aménager et l'exploiter.

Aujourd'hui, d'amont en aval, on dénombre (Figure 2.1) :

le barrage du Seujet, mis en service en 1995 et situé à l'exutoire du Lac Léman. Il est géré par les Services Industriels Genevois (SIG). Il permet de réguler le niveau du lac Léman et de moduler le débit du Rhône,

- le barrage-usine de Verbois, remplaçant le barrage de Chèvres, situé dans la partie suisse du Haut-Rhône, mis en service en 1943, et géré par les SIG
- l'usine hydroélectrique franco-suisse de Chancy-Pougny, mise en service en 1925 suite à une convention franco-suisse du 4 octobre 1913 et gérée par la Société des Forces Motrices de Chancy-Pougny (SFMCP),
- le barrage-usine de Génissiat, géré par la CNR, seul grand barrage de haute chute de l'ensemble de la chaîne des ouvrages français, mis en service en 1948,
- le barrage-usine de Seyssel, géré par la CNR, conçu pour amortir les fluctuations de débit induites en aval par le barrage de Génissiat, mis en service en 1951,
- les aménagements au fil de l'eau de Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon et Sault-Brénaz gérés par la CNR. Ce sont des aménagements caractéristiques du Rhône, présentant un barrage mobile (à hauteur ajustable) qui crée une retenue sur le cours naturel du fleuve. Un canal de dérivation à faible pente sur lequel est installée une centrale hydroélectrique est construit en parallèle du cours naturel du fleuve,

- le barrage de Jons et la centrale de Cusset, mis en service en 1899 et gérés par EDF.

L'objet de l'étude se limite à la partie du Haut-Rhône du Lac Léman à Seyssel.

2.2.2 Description et fonctionnement des aménagements de Verbois et de Chancy-Pougny

Le barrage-usine de Verbois situé au PK 195,31 forme une retenue de 13 millions de m³ longue de 11 km. Le barrage présente quatre pertuis équipés chacun d'une vanne de fond et d'une vanne supérieure, dont la cote minimale est de 364,65 m [Ginocchio et Viollet, 2012]. Le débit maximal turbinable est de 630 m³/s. Au delà de ce débit, les vannes du barrage sont ouvertes. L'usine fonctionne par éclusées énergétiques pour répondre aux besoins en électricité du canton de Genève. L'exploitation présente un cycle journalier, avec une production importante en journée et le remplissage la nuit et le week-end.

Le barrage-usine de Chancy Pougny situé au PK 188,16 ne forme pas de retenue et est exploité au fil de l'eau. Le barrage est équipé de quatre vannes de fond. Le débit maximal turbinable est de 625 m³/s [Département Fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication, 2003]. Au delà de ce débit, les vannes du barrage sont ouvertes. Les règlements des barrages de Verbois et de Chancy-Pougny fixent des contraintes concernant leur exploitation. Le débit réservé est de 60 m³/s de mai à septembre et de 110 m³/s d'octobre à avril [Conseil d'État de la République et canton de Genéve, 1999].

2.2.3 Description et fonctionnement des aménagements de Génissiat et de Seyssel

Le barrage de Génissiat est situé au PK 162,2 du Rhône. Il a été mis en opération en 1948. C'est un barrage de type poids d'une hauteur de 104 m. Il s'agit d'un ouvrage de moyenne chute, avec une chute maximale de 67 m. La centrale hydro-électrique est établie au pied du barrage et est équipée de six groupes de production principaux et de deux groupes auxiliaires permettant de turbiner un débit maximal de 750 m³/s. Le débit du fleuve est amené aux turbines par six conduites forcées. L'exploitation de la retenue présente un cycle hebdomadaire à journalier, avec une production en journée et le remplissage de la retenue pendant la nuit. En régime d'exploitation, la cote au barrage varie entre 325 et 330,70 m. Le volume utilisable de la retenue est de 12 millions de m³. Le débit réservé du barrage, historiquement de 5 m³/s a été relevé à 18 m³/s en 2013 [Préfectures de l'Ain et de la Haute Savoie, 2013]. Lors de crues, le niveau de la retenue peut être remonté jusqu'à 331,7 m (Figure 2.3 a). Le protocole de gestion actuel du barrage consiste à remonter le niveau de la retenue afin de favoriser la production électrique et d'amortir la crue en aval.

L'aménagement de Seyssel a été conçu pour compenser les éclusées du barrage de Génissiat. Le barrage-usine de Seyssel situé au PK 157,6 a une hauteur de 19,3 m. La retenue formée par le barrage est longue de 10 km et présente un volume de 7,6 millions de m³. L'usine est établie en rive gauche et est équipée de trois groupes permettant de turbiner un débit maximal de 750 m³/s. Le barrage, situé en rive droite présente deux passes équipées de hausses et une passe plus étroite et plus profonde équipée de vannes superposées [Établissement Neyrpic *et al.*, 1951]. A ce titre, il supporte lui aussi des variations importantes de 2 à 3 m/jour [CNR, 2010]. Par contre, il permet de fortement réduire les fluctuations de niveau en aval, avec des variations habituelles de 30 à 60 cm en aval immédiat de l'usine de Seyssel. En régime d'exploitation, la cote au barrage varie entre 257 et 260,6 m (Figure 2.3 b). Le débit réservé du barrage est de 19 m³/s [Préfectures de l'Ain et de la Haute Savoie, 2013]. Pour un débit supérieur au débit maximum turbinable, le niveau de la retenue ne peut pas être inférieur à 260,4 m.



FIGURE 2.3 – Courbes d'exploitation des retenues de : a) Génissiat et b) Seyssel.

2.2.4 La sédimentation dans les retenues du Haut-Rhône

Suite à la construction du barrage de Chèvres puis du barrage de Verbois, de grandes quantités de matériaux apportés par l'Arve ont été déposées dans le Rhône genevois [Diouf *et al.*, 2010]. Depuis les extractions de graviers dans l'Arve, la majorité des sédiments accumulés dans la retenue de Verbois sont des particules fines déposées dans les méandres et autres zones de faible vitesse lorsque la cote de la retenue est élevée. Le comblement moyen annuel de la retenue de Verbois est estimé entre 0,35 et $0,4.10^6$ m³ par les SIG [2003]. Le comblement de la partie amont de la retenue de Verbois provoque un rehaussement du lit et augmente le risque d'inondation dans les quartiers riverains du fleuve à Genève.

Une partie du flux apporté par l'Arve est transportée en aval du barrage de Verbois et déposée dans les retenues de Chancy-Pougny et de Génissiat.

2.3 L'aménagement de Génissiat

2.3.1 La géologie du site

Une étude géologique de la région comprise entre la frontière suisse et Seyssel a été réalisée par Gignoux et Mathian [1952] dans le cadre du projet de construction du barrage de Génissiat et décrit la disposition des différentes couches géologiques le long du Haut-Rhône (Figure 2.4).



FIGURE 2.4 – Carte géologique d'ensemble de la région (d'après Gignoux et Mathian [1952]).

De la confluence avec l'Arve jusqu'à la frontière française, le Rhône s'écoule au travers d'un terrain composé d'alluvions et de moraines quaternaires. Les sols de l'Étournel sont constitués de plusieurs couches : des moraines argileuses glaciaires et fluvio-glaciaires, recouvertes d'alluvions anciennes (sables et graviers), et enfin d'alluvions récentes du Rhône [Parc Naturel Régional du Haut-Jura, 2001]. En aval du Pont-Carnot, le défilé de l'Écluse est formé dans les calcaires du chaînon jurassien du Reculet-Vuache. Dans les gorges de Léaz les couches supérieures sont composées de terrains quaternaires particulièrement instables, comme en témoignent l'effondrement de la ligne de chemin de fer Lyon-Genève en 1883, et le glissement de Léaz qui fait l'objet d'une surveillance accrue par la CNR [Selmi et Fruchart, 1990]. Après le viaduc de Longeray, les plateaux encadrant le fleuve sont de plus en plus élevés. Vers Arcine, le socle géologique

est constitué de grès et marnes molassiques. Près de Bellegarde sur Valserine, le Rhône pénètre dans des calcaires de l'Urgonien et se contracte. Le canyon d'Arlod est situé dans les calcaires qui forment les berges et le lit, présentant des parois plus hautes et plus abruptes. A partir de Pyrimont, le lit du fleuve est taillé dans la molasse et le défilé se termine.

2.3.2 Hydrologie du bief de Génissiat

A Pougny, la retenue de Génissiat reçoit les eaux d'un bassin versant de 10320 km². Le régime du Haut-Rhône est nivo-pluvial. Il est caractérisé par deux périodes d'étiage, l'une estivale (août-septembre) et l'autre hivernale (janvier-février). Le module inter-annuel est de de 355 m³/s. Les débits maxima sont observés de mai à juillet et correspondent à la fonte des neiges sur le versant alpin [CNR, 2010] (Tableau 2.1). La Valserine est un affluent jurassien du Rhône, qui pénètre dans la retenue de Génissiat au PK 169,3. Son régime est nivo-pluvial, avec des périodes de hautes eaux au printemps et en automne, liées respectivement à la fonte des neiges et aux pluies automnales. Son module est de 17 m³/s. A l'aval de la retenue (Bognes), le bassin versant est augmenté d'environ 600 km².

Station	Surface BV	Module	Débit instantané (m^3/s)				
	(km^2)	(m^3/s)	T=1	T=2	T=5	T = 10	T = 100
Pougny	10320	335	700	1000	1200	1300	1500
Bognes	10900	375	740	1100	1400	1500	1915

TABLEAU 2.1 – Hydrologie du Haut-Rhône aux stations de Pougny et Bognes (T est la période de retour de la crue).

2.3.3 Le barrage de Génissiat

Le barrage de Génissiat comprend différents orifices placés dans une configuration tridimensionnelle (Figure 2.5 b) :

- Une vanne de fond localisée en rive droite environ 200 m à l'amont du barrage. Son radier est situé à la cote 262,6 m, qui constitue le point bas de la retenue. Sa surface d'entrée est d'environ 90 m²,
- Une vanne de demi fond localisée en rive gauche environ 50 m en amont du barrage. Son radier est situé à la cote 285,9 m. Sa surface d'entrée est d'environ 150 m². Comme la vanne de fond, elle canalise les eaux dans une conduite souterraine vannée en son milieu, et qui débouche dans le Rhône 100 m à l'aval du barrage,
- Un évacuateur de surface, localisé dans le parement du barrage en rive droite. Il peut fonctionner soit en mode seuil, soit en mode vanne. Son radier est à la cote 316,80 m. Il comporte un canal de 500 m de long débouchant sur un saut à ski.



FIGURE 2.5 – Le barrage de Génissiat : a) Photographie du barrage au cours de la chasse de juin 2012 (photo CNR), b) Schéma du barrage et localisation des prises d'eau (schéma CNR).

L'ensemble des évacuateurs a été conçu pour débiter 3000 m^3 /s sans que le plan d'eau ne se situe plus d'un mètre au dessus de la cote maximale en exploitation [CNR, 1934]. Ainsi, la vanne de fond a été mise en place dans le but d'abaisser au maximum le plan d'eau pour l'inspection des ouvrages ou pour opérer des chasses de fond et favoriser le transit des sédiments. L'évacuateur de surface déverse de l'eau moins chargée. Son utilisation permet la dilution des flux évacués par la vanne de fond.

2.3.4 La retenue de Génissiat

La retenue formée par le barrage est longue de 23 km et présente un volume de 56 millions de m³. La retenue est composée de deux unités géographiques distinctes, séparées par le Pont Carnot. A l'amont du Pont Carnot se situe la zone alluviale de l'Étournel (Figure 2.6 a). De nombreuses îles et bancs, parfois immergés, sont formés. Une grande île est présente dans la partie aval de l'Étournel, avec la présence d'un chenal secondaire. Cette zone est un ssite protégé Natura 2000 qui abrite une faune et une flore particulières [Parc Naturel Régional du Haut-Jura, 2001]. Le Pont Carnot, situé au niveau d'un seuil rocheux et d'une courbe importante marque l'entrée dans un canyon étroit découpé dans le calcaire. Les trois quarts de la retenue sont situés dans ces gorges. Près de Bellegarde sur Valserine, la retenue est marquée par la confluence avec la Valserine et une courbe assez prononcée. Avant la mise en eau de la retenue, le fleuve n'avait que quelques mètres de largeur et une profondeur d'une dizaine de mètres près de Bellegarde sur Valserine (Figure 2.6 b). Dans les gorges en aval, les parois sont plus hautes et plus abruptes (Figure 2.6 c) et le tracé de la retenue est assez rectiligne avec une succession de deux courbes situées environ 700 m en amont du barrage (Figure 2.6 d). La variation de la cote de la retenue avant et après la mise en eau du barrage est mise en évidence par les photographies du lieu dit le Paradis (Figures 2.6 d et 2.6 e)



FIGURE 2.6 – Photographies de la retenue : a) plaine alluviale de l'Étournel en 2012 (la grande île aval et le chenal secondaire sont visibles en bas, le pont Carnot est située en haut à droite, photo CNR), b) la Perte du Rhône (Carte postale datée du 23 août 1945, Eric Toiseux), c) Les gorges d'Arlod avant la mise en eau de la retenue (Carte postale non datée, Eric Toiseux), d) partie aval de la retenue située dans des gorges en 2012 (on aperçoit le barrage en haut à droite, photo CNR), e) Lieu dit le Paradis (Carte postale non datée, Eric Toiseux), f) Lieu dit le Paradis (novembre 2012).

2.4 Les chasses du Haut-Rhône

2.4.1 Objectifs de l'opération

Des chasses régulières ont été organisées à l'initiative des exploitants suisses peu de temps après la construction des premiers aménagements afin de remobiliser les sédiments déposés et de rétablir des fonds permettant d'enrayer le risque d'inondation du quartier de la Jonction à Genève.

2.4.2 Impacts des opérations de chasse en amont de Génissiat

2.4.3 Enjeux actuels à préserver en aval de la retenue de Génissiat

L'aménagement hydroélectrique du Haut-Rhône en aval des retenues suisses a nécessité la mise en place de mesures d'accompagnement des opérations de chasses. La mise en opération des barrages de Chautagne et Belley en 1981 a constitué un enjeu supplémentaire pour la Compagnie Nationale du Rhône. Lors des chasses, tout le débit du Rhône doit être turbiné par ces ouvrages, et ne doit pas excéder 700 m³/s en aval du Fier pour ne pas déverser de l'eau chargée en MES dans les tronçons court-circuités des Vieux Rhône.

En outre, le Rhône et sa nappe d'accompagnement font l'objet de nombreux prélèvements sur le tronçon compris entre la frontière suisse et Lyon, que ce soit pour l'alimentation en eau potable, le champ captant de Crépieux-Charmy fournit notamment de l'eau potable à plus d'un million de personnes chaque jour, l'irrigation ou les besoins de l'industrie, comme le refroidissement de la centrale nucléaire du Bugey [CNR, 2014].

Les opérations d'accompagnement reposent essentiellement sur la retenue de Génissiat, qui est la seule retenue permettant la régulation du débit grâce à sa capacité de stockage importante et permettant le contrôle de la qualité des eaux rejetés en aval grâce à la capacité de dilution des flux par l'utilisation des différentes vannes. L'évolution des protocoles de gestion de la retenue de Génissiat au cours de ces opérations d'accompagnement résulte d'essais de gestion basés sur le retour d'expérience des gestionnaires [Peteuil, 2014].

- Le protocole de chasse peut être résumé en deux phases principales :
- Une première phase, dite de remobilisation au cours de laquelle le barrage de Génissiat n'est plus en phase d'exploitation alors que les barrages suisses sont gérés normalement. Elle consiste en un abaissement de la retenue sous le niveau minimal d'exploitation, suivie depuis 1997 d'une période de gestion à cote basse permettant de remobiliser une partie des dépôts anciens,
- Une deuxième phase, dite de régulation qui commence avec l'abaissement de la retenue de Verbois et qui marque le début des chasses suisses. Au cours de cette phase, il y a un apport important de sédiments qui sont en partie déposés dans la retenue de Génissiat. La gestion de la cote de la retenue de Génissiat est très variable selon les épisodes de chasse et influe sur les processus de transport et de dépôt au sein de la retenue.

2.4.4 Description de l'évolution historique du protocole

Les chasses avant la mise en opération du barrage de Génissiat

De 1900 à 1943 des opérations de chasse de la retenue de Chèvres étaient déjà réalisées. A partir de 1943, le barrage de Verbois a remplacé le barrage de Chèvres. La première chasse de la retenue de Verbois a eu lieu en 1945 : la retenue de Verbois a été abaissée à une cote de 354 m et l'eau chargée a été évacuée par les vannes de fond uniquement, les vannes supérieures étant situées au dessus de la surface. La chasse de 1945 a provoqué une importante pollution mécanique et organique liée au rejet de matières en suspension et d'effluents stockés dans la retenue de Verbois et ses effets ont été ressentis jusqu'à Lyon [CNR, 2014].



Dix-neuf opérations de chasse ont été menées entre 1948 et 2012. Le protocole schématique des chasses et de leurs accompagnements de 1949 à 2012 est décrit figure 2.7.

FIGURE 2.7 – Historiques des protocoles de chasse à Génissiat (bleu) et Verbois (marron).

Depuis la mise en service du barrage de Génissiat en 1948, dix-neuf opérations de chasse ont été organisées à la demande des autorités suisses.

Les chasses de 1949 à 1956

La mise en service du barrage de Génissiat en 1948 a apporté à la CNR la problématique de la gestion du flux de matières en suspension rejetées pendant les chasses de la retenue de Verbois. Entre 1949 et 1956, les mesures d'accompagnement au niveau du barrage de Génissiat étaient limitées. La retenue de Génissiat était abaissée à la cote 324 m avant l'arrivée des matériaux rejetés par les barrages suisses et maintenue à cette cote pendant la chasse (Figure 2.7). Les débits supports étaient compris entre 300 et 600 m³/s et évacués par la vanne de demi-fond, l'évacuateur de surface et l'usine. Au cours des opérations de 1954 et 1956, une ouverture brève de la vanne de fond a été réalisée afin de tester son fonctionnement et d'éviter son colmatage. Lors de l'ouverture de la vanne de fond, des pics de concentrations ont été observés à l'aval liés à l'érosion des matériaux situés près de l'ouvrage [EDF, 1954]. Le taux de transfert des sédiments à l'aval du barrage de Génissiat était inférieur à 10%. La rétention des matériaux dans les retenues de Génissiat et Seyssel a limité la pollution aval.

Les chasses de 1960 à 1975

Les chasses de 1960 à 1975 ont fait l'objet des premiers accompagnements au niveau du barrage de Génissiat avec un abaissement à la cote 315 m et l'utilisation de la vanne de fond, notamment en 1965 [Vial *et al.*, 1965] (Figure 2.7). Les débits supports étaient compris entre 400 et 600 m³/s. Ces mesures ont permis une amélioration des taux de transferts, compris entre 50 et 80%. Cette période est aussi marquée par la négociation en 1967 d'accords franco-suisses sur les chasses qui permettent d'améliorer la coopération entre les différents exploitants. Une

partie du débit du Lac Léman était aussi réservée pour soutenir les besoins hydrauliques liés à l'opération de chasse.

La vidange de 1978

En 1978, la chasse était accompagnée d'une visite décennale du barrage de Génissiat qui permettait l'observation visuelle du parement du barrage. Cette opération nécessitait un abaissement inhabituellement bas du niveau de la retenue à la cote 285 m. Un scénario de gestion combinée des retenues de Verbois, Chancy-Pougny et Génissiat a été mis en place, et nécessitait une gestion précise des débits. Une rétention de débit au barrage de Chancy-Pougny a provoqué un abaissement exagéré de la retenue de Génissiat à 278 m (Figure 2.7). L'effondrement des murs de vase de la retenue de Génissiat a provoqué une forte hausse des concentrations en MES, qui ont atteint 110 g/l pendant une heure à Seyssel. Le taux de transfert de cet épisode a été estimé à environ 400%. La mortalité piscicole observée a été très forte jusqu'à Lyon, avec notamment la disparition quasi-complète des salmonidés [Comité technique de l'eau, 1978].

La chasse de 1981

En 1981, un nouvel accord franco-suisse a été signé et a fixé à trois ans la fréquence usuelle de ces opérations et a précisé la période d'organisation la plus favorable pour ces opérations (de fin mai à début juin). Pour la chasse de 1981, des modalités de chasse très prudentes ont été fixées en aval de Génissiat. La retenue a été abaissée seulement au niveau 320 m, et 90 % des matériaux provenant des retenues suisses ont été stockés dans la retenue [Ricard et Bardet, 1986].

Les chasses de 1984 à 1993

L'envasement massif de la retenue de Génissiat en 1981, a conduit à la mise en place d'un protocole de gestion des retenues permettant de limiter le dépôt dans la retenue de Génissiat, tout en maintenant à l'aval des concentrations acceptables pour le milieu aquatique. Afin de garantir le respect de ces enjeux, des consignes de concentration maximales, à respecter à Seyssel ont été établies par le Comité Technique de l'Eau pour la chasse de 1984 et les suivantes :

- -5 g/l en moyenne sur la durée des opérations,
- 10 g/l plus de 6 heures consécutives,
- 15 g/l plus de 30 minutes consécutives.

Un abaissement préalable à une cote inférieure à 315 m a été préconisé afin de mobiliser les sédiments avant l'arrivée des apports des retenues suisses (Figure 2.7). La retenue devait être remontée à 315 m pendant les chasses suisses. Un nouvel abaissement de la retenue devait être réalisé en fin de chasse pour favoriser la remise en mouvement des sédiments déposés ou en cours de dépôt. Afin d'éviter une trop forte pollution à l'aval, les vannes de fond et de demi-fond devaient être utilisées en variant leurs débits pour permettre l'évacuation des MES et la dilution des eaux chargées.

Au cours de l'opération de 1984, la retenue a été abaissée à un niveau variant entre 312 et 316 m durant 4,5 jours. Néanmoins l'abaissement final a vraisemblablement eu lieu trop tard et n'est pas apparu efficace. Le débit moyen à la frontière était de 480 m³/s et la vanne de fond a permis d'évacuer environ 70% du débit durant toute la période d'abaissement [CNR, 1984]. L'opération a permis de confirmer l'efficacité de la dilution des eaux chargées passant par la vanne de fond par les eaux de la vanne de demi-fond (Figure 2.8).



FIGURE 2.8 – Mesures de concentration dans les vannes de fond et de demi-fond au cours de la chasse de 1984.

La chasse de 1987 a été marquée par un abaissement bref à un niveau de 308 m et un débit aux alentours de 700 m³/s. L'occurrence de crues sur le Léman, l'Arve et le Fier concomitantes avec l'arrivée au barrage des MES provenant des retenues suisses ont donné lieu à l'interruption des chasses et à la remonté rapide du plan d'eau [CNR, 1987]. Au cours de la chasse de 1990, des crues ont aussi touché les affluents lors de l'abaissement de la retenue de Génissiat. Le stockage de l'eau dans la retenue a limité l'abaissement de la retenue à 312 m. La vanne de fond a fonctionné environ deux jours pour un niveau de 320 m [CNR, 1990]. La chasse de 1993 a été caractérisée par un abaissement à 313 m et un débit proche de 500 m³/s. La vanne de fond est restée ouverte toute la durée de la chasse, et l'évacuateur de surface a fonctionné dès que le niveau de la retenue dépassait 316,8 m, permettant de diluer les eaux du Rhône à l'aval de Génissiat [CNR, 1993].

Les chasses de 1997 à 2012

A partir de 1997, le protocole de chasse prévoyait un abaissement de la retenue de Génissiat à un niveau de 305 m durant quelques jours préalablement aux chasses suisses afin d'éroder les dépôts sédimentaires, dite phase de remobilisation, puis une remontée de la retenue à une cote de 315 m lors du transit des matériaux provenant de Verbois, dite phase de régulation. En 1997, le protocole a été respecté, avec une ouverture de la vanne de fond sur quasiment toute la chasse [CNR, 1998], ce qui a permis de limiter l'envasement de la retenue. Pour les quatre opérations réalisées selon ce nouveau protocole, des pics de concentration pouvant atteindre plus de 100 g/l ont été mesurés dans la vanne de fond lors de la gestion à cote basse. Pendant la chasse de 2000, la retenue a été très rapidement remontée à un niveau de 317 m suite à l'abaissement préalable de deux jours à 305 m à cause des fortes concentrations mesurées en aval [CNR, 2000] et a abouti à d'importants dépôts (Figure 2.9). En 2003, l'abaissement a pu être maintenu durant 4 jours à un niveau de 304 m à cause d'une bonne gestion des concentrations à l'aval et a permis le désenvasement préalable de la retenue [CNR, 2003]. Ensuite, les apports amont provenant des retenues suisses ont été parmi les plus faibles enregistrés. La retenue a enregistré un bilan négatif pour cet épisode. En 2012, après une période de 9 ans sans chasses, l'abaissement de la retenue de Verbois durant 10 jours (au lieu de 4 habituellement) pour permettre des travaux sur le barrage a donné lieu à l'évacuation d'un volume très important [Diouf, 2013]. De plus, des crues sur les affluents ont conduit à la remontée de la retenue de Génissiat à une cote de 320 puis 325 m lors du transit des sédiments provenant des chasses suisses, donnant lieu à un très fort dépôt dans la retenue de Génissiat.



FIGURE 2.9 – Mesures de concentration dans la vanne de fond au cours de la chasse de 2003.

2.5 Observations sur le comblement de la retenue de Génissiat

Le comblement de la retenue de Génissiat est lié aux apports sédimentaires entrant dans la retenue mais aussi aux conditions hydrauliques dans la retenue associées au protocole de gestion, notamment aux cours des chasses et des périodes d'interchasse.

Deux situations types sont identifiées :

- les périodes d'exploitation normale, au cours desquelles la retenue est gérée à cote haute.
 Les apports sédimentaires sont réduits par la présence des barrages amont mais les sédiments se déposent plus facilement et sur de longues périodes,
- les opérations de chasse de la retenue de Verbois, au cours desquelles les apports sédimentaires sont importants et la gestion de la retenue de Génissiat est variable selon les événements.

2.5.1 Ampleur actuelle des dépôts dans la retenue de Génissiat

L'évolution du profil en long entre 1954, soit 6 ans après la mise en opération de la retenue et 2012 permet de distinguer un tronçon amont, entre les PK 187 et 178 peu sujet à l'envasement, un tronçon intermédiaire entre les PK 178 et 172 où des dépôts modérés sont observés et un tronçon aval entre les PK 172 et 162, où d'importants dépôts sont localisés, dont l'épaisseur augmente en se rapprochant du barrage, et pouvant atteindre près de 40 m d'épaisseur (Figure 2.10).

Les photographies historiques du chantier du barrage et de la vidange de 1978 montrent le comblement de la retenue près du barrage (Figures 2.11 a, 2.11 b). En 1978, les sédiments avaient atteint le seuil de la vanne située en rive gauche. En prévision des opérations de chasse, la CNR a généralement recours à des dragages, permettant de dégager les vannes et de créer une fosse. Les photographies mettent aussi en évidence la terrasse en amont de l'évacuateur en rive droite, qui est le siège de dépôts de sédiments fins (Figure 2.11 c).



FIGURE 2.10 – Évolution du profil en long de la retenue de Génissiat.





FIGURE 2.11 – Photographies du barrage de Génissiat : a) au cours du chantier (années 1940), b) au cours de la chasse de 1978, c) au cours de la chasse de 2012.

2.5.2 Granulométrie des dépôts sédimentaires de la retenue de Génissiat

Un tri granulométrique avec un affinement des sédiments d'amont en aval est observé dans la retenue (Figure 2.12). A l'amont du Pont de Pougny (PK 187), le lit est composé d'un mélange de graviers et de galets qui forment un fond armuré voire pavé. La zone de l'Étournel est principalement constituée de graviers. Entre les PK 178 et 172, le fond du lit est composé de sables grossiers. Entre les PK 172,05 et 170,5, le diamètre médian diminue brutalement et le fond est principalement composé de limons et de sables fins. Dans les retenues longues et étroites, cette chute marquant la limite aval des dépôts de sédiments grossiers correspond à la limite du delta [Morris et Fan, 1998]. Dans le kilomètre à l'amont du barrage, les sédiments sont plus fins et le diamètre médian tend vers une valeur de 8 µm au pied du barrage.



FIGURE 2.12 – Répartition longitudinale du diamètre médian des sédiments en surface au centre du chenal de la retenue de Génissiat, d'après Bouchard et Dumond [2000]; Lerch et Thizy [2013].

2.6 Besoins opérationnels de la CNR

Afin que la Compagnie Nationale du Rhône qui exploite le barrage de Génissiat progresse dans sa capacité à prédire les évolutions morphologiques de la retenue et les flux sédimentaires rejetés, ainsi que dans sa capacité à obtenir en pratique les résultats souhaités, il est nécessaire d'améliorer la compréhension des processus hydro-sédimentaires de la retenue de Génissiat et de développer un modèle numérique opérationnel qui permette de simuler les processus sédimentaires dominants de la retenue. Le modèle numérique doit permettre de déterminer des modalités opérationnelles à mettre en oeuvre pour limiter le comblement de la retenue et les dommages en aval lors des opérations de chasse et aussi pour améliorer la gestion sédimentaire sur le long-terme.

Analyse hydro-morphologique de la retenue de Génissiat

3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de déterminer la dynamique spatiale du transport de sédiments le long de la retenue et les processus hydro-sédimentaires à l'origine de cette dynamique. L'analyse des évolutions morphologiques a déjà fait l'objet de plusieurs études qui ont abouti à un premier découpage de la retenue [Bouchard *et al.*, 1999; Wolf, 2011; Boussafeur, 2012].

Afin de mettre en évidence les processus physiques impliqués dans les évolutions de la retenue, l'approche choisie est basée sur une analyse hydro-morphologique adaptée aux retenues, prenant en compte les évolutions morphologiques et les conditions hydrauliques caractéristiques de l'exploitation la retenue.

Les évolutions morphologiques de la retenue vont être décrites qualitativement à travers l'évolution du profil en long, des sections en travers et du tracé en plan [Goudie, 2003] (partie 3.3). La quantification des évolutions morphologiques sera réalisé à partir du calcul des bilans bathymétriques de la retenue. Une estimation des incertitudes associées au bilan bathymétrique sera proposée pour permettre d'apprécier la représentativité du bilan mesuré (partie 3.5).

Contrairement aux cours d'eau naturels, une variété de conditions hydrauliques sont observées dans les retenues. En particulier, la distinction entre les opérations de chasse et les périodes d'interchasse est primordiale pour mettre en relation les conditions hydrauliques et la dynamique spatiale de la retenue. La modélisation numérique va être utilisée pour décrire plus précisément les conditions hydrauliques dans la retenue de Génissiat pour différents scénarios d'exploitation (partie 3.6).

Une méthode de découpage hydro-morphologique adaptée aux retenues allongées va être proposée. Elle est basée sur l'évolution spatiale des évolutions morphologiques et des paramètres hydrodynamiques (partie 3.7.6). Le découpage va permettre de définir une échelle spatiale appropriée pour mettre en évidence la dynamique hydro-sédimentaire de la retenue.

3.2 Données hydro-morphologiques

L'analyse hydro-morphologique de la retenue repose sur de nombreuses données et observations de terrain.

3.2.1 Données bathymétriques

La mesure bathymétrique permet la description de la géométrie et du relief du fond de la retenue. Des campagnes bathymétriques de la retenue de Génissiat, et plus généralement des retenues CNR sur le Haut-Rhône sont effectuées régulièrement depuis 1954. En particulier, des relevés ont lieu dans la retenue de Génissiat avant et après les opérations d'accompagnement des chasses suisses, qui ont généralement des forts impacts sur la bathymétrie de la retenue. Des relevés complémentaires localisés sont aussi effectués pour le suivi des zones de dépôt ou pour calculer le bilan volumique suite à des opérations de dragage. La retenue est décrite par un nombre variable de sections en travers perpendiculaires à l'écoulement dont la géométrie est mesurée à chaque campagne. Un regroupement de données issues de documents anciens et de données répertoriées dans la base de données bathymétriques interne de la CNR, Bathy, a permis d'obtenir une description bathymétrique de la retenue assez détaillée :

- 26 profils en long de la retenue de 1954 à 2012
- -7 bathymétries décrites par 32 sections en travers de 1954 à 1969
- 17 bathymétries décrites par une centaine de sections en travers de 1984 à 2012

La liste et la position des profils est présentée dans l'annexe A. Il faut néanmoins souligner la grande disparité concernant la qualité des données bathymétriques. Au cours des décennies 1950 et 1960, le nombre de sections en travers mesurées est relativement faible et ce, principalement dans la partie aval de la retenue qui est la plus sujette aux dépôts. Aucune donnée n'est disponible dans les années 1970. L'évolution des conditions de mesure est enfin à souligner. Initialement, la mesure bathymétrique était effectuée par sondage à main qui permettait de déterminer la profondeur de l'eau à l'aide d'un plomb, et d'en déduire l'élévation du fond à partir de la cote du plan d'eau. Cette méthode a été remplacée par une mesure avec un sondeur bathymétrique électro-acoustique, qui permet de réaliser des mesures à haute fréquence. Les profils en travers sont mesurés en bateau par les équipes de la CNR, en utilisant un écho-sondeur mono-faisceau couplé à un GPS différentiel qui permet d'estimer la position géographique (latitude et longitude) en coordonnées Lambert II et l'altitude du fond en NGF. Pour les zones hors d'eau où pour les pour les l'utilisation du sondeur est impossible, comme les berges ou les îles, des relevés topographiques sont utilisés en complément. Plus récemment, une campagne aérienne de levés à grande échelle a été réalisée entre 2007 et 2010 (BD TOPO Rhône) et a permis de mieux décrire la topographie du lit moyen. En 2012 la retenue de Génissiat est décrite par environ 130 profils en travers disposés le long de la retenue entre le seuil de Chancy-Pougny (PK Rhône 186,610) et le barrage (PK Rhône 162,200). La distance entre les profils varie de 10 à 500 m avec une densité de point par profil variable. Les mêmes protocoles sont employés par la CNR pour relever les bathymétries des autres retenues présentes sur le Haut-Rhône. De plus, la densité de points décrivant chaque profil en travers a considérablement augmenté depuis les années 1980, passant d'une moyenne de 15 points par profil en 1984 à 40 en 2012.

3.2.2 Protocole de traitement des bathymétries

Les données des relevés bathymétriques sont classées par sections transversales. Il est ainsi possible de visualiser les données dans le plan, ou projetées sur la section et de comparer la géométrie du profil pour différentes dates. Cette étape permet de repérer des problèmes au niveau des données brutes :

- des profils sont incomplets,
- les coordonnées de certaines sections transversales sont translatées entre deux relevés,

– en présence de chenaux multiples, les bathymétries relevées à une section donnée peuvent être partielles et ne représentent pas toujours le même chenal. Par exemple au PK 183,77, avant 2003 c'est la bathymétrie du chenal en rive droite qui est relevée, alors qu'après 2003 il s'agit de celle du chenal en rive gauche.

3.2.2.1 Mise en place de points invariants sur les rives et gestion des bathymétries incomplètes

Pour pouvoir comparer les bathymétries, il est nécessaire d'identifier des points communs entre les profils relevés au même PK à des dates différentes. Les profils relevés au même endroit ont été complétés de façon à avoir leurs points extrêmes en rive gauche et en rive droite invariants dans le temps. Ainsi, lors de l'étape de conversion des coordonnées XYZ en coordonnées Abscisse-Cote, l'axe de projection sera invariant pour tous les profils relevés au même point kilométrique, quelque soit la date du relevé. Plusieurs cas de figure peuvent se présenter :

Cas général

Lorsque tous les profils en travers relevés dans le temps sur la même section sont complets, qu'ils présentent des berges immobiles, les points extrêmes invariants gauche et droit sont définis à partir des données de la BD TOPO Rhône. Les points sont choisis de façon à ce que leur altitude soit supérieure à la cote de l'eau (Figure 3.1).



FIGURE 3.1 – Données bathymétriques corrigées pour le profil en travers au PK 179,07.

Cas de profils incomplets pour certaines dates de relevés

Dans ce cas, il faut d'abord compléter la partie manquante du profil en faisant l'hypothèse que la berge manquante est immobile. Cette hypothèse peut être validée en s'appuyant sur la nature de la berge. Par exemple, les profils mesurés au PK 162,57 sont incomplets en rive droite à partir de mai 1990. Il manque même une partie du fond pour certains profils. On distingue trois méthodes possibles de traitement des profils :

- 1. Seuls les points mesurés sont utilisés. Les deux profils étant incomplets en rive droite, la source principale d'erreur de cette méthode est l'omission d'une partie de la section (Figure 3.2 a).
- 2. Les profils sont complétés (en rive droite pour ce cas particulier) par les points hauts du profil complet datant d'avril 1984. Cette méthode crée une surface artificielle. Dans ce cas, le dernier point mesuré du côté de la rive droite est proche pour les deux profils. La surface artificielle est donc presque identique, l'erreur apportée par cette méthode est ici faible. Dans le cas où les derniers points mesurés pour chaque profil sont éloignés, l'erreur commise peut être beaucoup plus importante (Figure 3.2 b).
- 3. Les profils sont complétés (en rive droite pour ce cas particulier) par les points hauts du profil complet datant d'avril 1984. On suppose que la berge est fixe et que le dépôt ou l'érosion sont limités à la base de la berge. Les derniers points mesurés en rive droite des profils incomplets sont projetés horizontalement sur la berge d'avril 1984 supposée immobile (Figure 3.2 c).



FIGURE 3.2 – Méthodes de traitement pour les profils en travers au PK 162,57.

La troisième méthode est choisie pour le traitement des bathymétries car elle permet de compléter le profil de façon a priori cohérente avec l'évolution du fond.

Cas de berges n'ayant pas de point commun

Lorsque la berge est érodée sur toute la hauteur qui a été relevée, il est nécessaire de reconstruire son tracé. Pour les profils relevés au PK 181,9, une érosion de la berge gauche a lieu entre septembre 1997 et avril 2000. Aucun point appartenant à cette berge n'est commun aux relevés de 1997 et 2000.

Les différentes méthodes permettant de compléter les profils mettent en jeu des points fictifs et considèrent les cas d'érosion minimale et maximale de la berge :

- 1. On fait l'hypothèse que la partie de la section érodée se limite à celle qui a été mesurée. Un point fictif est créé afin de prolonger verticalement le profil le plus bas jusqu'à l'altitude du profil le plus haut et les deux profils sont rejoints horizontalement (Figure 3.3 a).
- 2. On relève sur la topographie un point commun à tous les profils plus haut sur la berge et plus éloigné de la rive. Tous les profils sont complétés par ce point réel, cependant rien ne garantit qu'il soit le point commun à tous les profils ayant l'altitude la plus faible (Figure 3.3 b).
- 3. On suppose que le point ajouté précédemment à partir de la topographie appartient aux deux profils. On crée un point fictif permettant de prolonger verticalement le profil avant érosion jusqu'à l'altitude du point de la topographie et l'autre profil est prolongé par ce point. Ils sont ensuite rejoints horizontalement (Figure 3.3 c).



FIGURE 3.3 – Méthodes de traitement pour les profils en travers au PK 181,9.

La deuxième méthode est celle qui met en jeu le moins d'hypothèses non vérifiées, elle est donc choisie pour traiter ce cas particulier.

3.2.2.2 Conversion en coordonnées Abscisse-Cote

Les points relevés pour une section transversale n'étant pas toujours sur le même axe, et celuici n'étant pas rigoureusement rectiligne, une projection sur un plan est nécessaire. Le logiciel PAMHYR [Faure, 2012] est utilisé pour projeter les points de chaque profil sur le plan vertical passant par l'axe invariant définit par les points extrêmes en rive gauche et en rive droite. On obtient les coordonnées (y,Z) Abscisse-Cote correspondant à la projection sur le plan du point de coordonnées (X,Y,Z).

3.2.2.3 Interpolation des coordonnées abscisse cote

Dans l'optique de calculer l'aire des sections, les coordonnées abscisse cote sont interpolées avec un pas d'espace Δy inférieur au pas des coordonnées projetées Δy , afin de ne pas introduire d'erreur supplémentaire lors du calcul de l'aire. Un pas $\Delta y=1$ m est choisi car cette valeur est inférieure au pas des mesures, ce qui permet de ne pas ajouter de biais supplémentaire liée à l'interpolation. On obtient alors de nouvelles coordonnées.

3.2.2.4 Observation en plan

La position des profils en travers présents sur le linéaire du Haut-Rhône est repérée par un point kilométrique. Cependant, les valeurs des repères kilométriques ne sont pas suffisamment exactes pour servir de base au calcul de la distance entre les sections. A l'aide d'un Système d'Information Géographique, la position exacte des plans invariants définis pour chaque section en travers est marquée. Il est alors possible de calculer la distance entre ces profils. La distance entre deux sections transversales L est la longueur de l'arc curviligne joignant le milieu de chaque section.

3.2.3 Photographies

Des prises de vue aériennes de la retenue prises à différentes dates entre 1934 et 2004 sont disponibles via le site du géoportail¹. Elles permettent notamment d'observer l'évolution de la zone de l'Étournel.

3.2.4 Données hydrauliques

Des lignes d'eau de la retenue de Génissiat sont relevées par les services hydrométriques de la CNR pour différents débits et différents niveaux au barrage. Parmi ces lignes d'eau, les plus récentes et celles couvrant une gamme étendue de débits ont été sélectionnées afin de servir de données pour le calage du modèle hydraulique, construit à partir de la bathymétrie de 2011 (Tableaux 3.1 et 3.2). Afin d'obtenir des lignes représentatives, il est préférable que la mesure des points ait été réalisée en régime permanent. Pour la retenue de Seyssel, les lignes correspondant à ce critère sont assez anciennes. Les mesures en exploitation normale sont réalisées à partir de la lecture d'échelles limnimétriques, dont l'erreur est estimée à ± 5 cm.

TABLEAU 3.1 – Lignes d'eau de la retenue de	Génissiat sélectionnées pour le calage.
---	---

18 Septembre 2006	régime permanent	$Q_{PO}=577 \text{ m}^3/\text{s}$	$Z_{GE} = 329,92 \text{ m}$	$Q_{val}=12 \text{ m}^3/\text{s}$
05 Juillet 2007	régime permanent	$Q_{PO}=891 \text{ m}^3/\text{s}$	$\rm Z_{GE}{=}330{,}7~m$	$Q_{val}=97 m^3/s$
16 Janvier 2008	régime permanent	$Q_{PO}=475 \text{ m}^3/\text{s}$	$\rm Z_{GE}{=}328{,}66~m$	$Q_{val}=23 m^3/s$

TABLEAU 3.2 – Lignes d'eau de la retenue de Seyssel sélectionnées pour le calage.

12 Novembre 1992	régime permanent	$Q_{GE}=630 \text{ m}^3/\text{s}$	$\rm Z_{SE}{=}259{,}82~m$	$Q_{us}=0 \text{ m}^3/\text{s}$
21 Avril 1994	régime permanent	$Q_{GE}=420 \text{ m}^3/\text{s}$	$\rm Z_{SE}{=}257{,}64~m$	$Q_{us}=6 m^3/s$

^{1.} http://www.geoportail.gouv.fr/accueil

3.2.5 Données sédimentaires

Plusieurs campagnes granulométriques ont été menées afin d'estimer les propriétés des sédiments de la retenue de Génissiat [Giuliani, 1992; Tisot et Merketa, 1994a; Introïni, 2000; Bouchard et Dumond, 2000; Lerch et Thizy, 2013], avec différents types de prélèvements. Les prélèvements de surface sont réalisés à la benne à partir d'un bateau. Les carottages sont réalisés à l'aide de carottiers à partir de barges (Tableau 3.3).

Prélèvement	Position longitudinale	Position transversale	Type de prélèvement
B. Merketa, 1992	Fosse amont	chenal	carottes
EDF, septembre 1999	Retenue	chenal	surface, carottes
CNR, 2009	Retenue	dépôts rive droite	carottes
CNR, avril 2012	Retenue	chenal, rives	surface
CNR, septembre 2012	Retenue	chenal, bords	surface
CNR, février 2014	Proche barrage	chenal, bords	dragage
CNR, mars 2014	Pougny	chenal, bords	surface
CNR, novembre 2014	Retenue	chenal, bords	surface

TABLEAU 3.3 – Caractéristiques des prélèvements réalisés dans la retenue.

La figure 3.4 présente la position des différents prélèvements de sédiments en place dans la retenue.



FIGURE 3.4 – Position des différents prélèvements réalisés dans la retenue (l'encadré en bas à droite montre un zoom sur les prélèvements de 1999 et la localisation de dépôts sableux en jaune).

Les analyses granulométriques ont été réalisées par tamisage pour la partie supérieure à 80 µm [NF P 94-056, 1996] et par sédimentométrie pour la partie inférieure à 80 µm [NF P 94-057, 1992], sauf pour les échantillons de février 2014 pour lesquelles l'analyse a été réalisée par un granulomètre laser [ISO-13320, 2009]. Une description des différentes méthodes est présentée au paragraphe 4.2.5.1. Des analyses mécaniques et physico-chimiques ont aussi été réalisées.

3.3 Description morphologique de la retenue de Génissiat

Les caractéristiques géométriques et granulométriques de la retenue de Génissiat sont présentées.

3.3.1 Sinuosité de la retenue

La sinuosité du cours d'eau est un paramètre morphologique important qui modifie les écoulements et impacte la géométrie du cours d'eau comme la pente locale, la typologie des sections. La sinuosité de la retenue a été calculée en découpant la retenue en tronçons et en calculant le rapport entre la longueur curviligne du tronçon de rivière et la distance entre les deux extrémités du tronçon.

L'utilisation de différentes longueurs de tronçons permet de mettre en évidence la sinuosité à des échelles spatiales différentes (Figure 3.5). Un pas d'espace $L_X=200$ m permet de localiser précisément les changements de direction brusques du cours d'eau, par exemple aux PK 184 et 165,5. Un pas d'espace $L_X=1000$ m met en évidence les courbes du cours d'eau s'établissant sur de plus grandes échelles, par exemple la succession de virages dans les gorges de Léaz et Grésin. Un pas d'espace $L_X=500$ m est une taille intermédiaire. Toutes les métriques permettent de mettre en évidence la forte courbure au niveau de Bellegarde sur Valserine (PK 169).



FIGURE 3.5 – Sinuosité de la retenue de Génissiat.

3.3.2 Typologie des sections

A partir des relevés bathymétriques réalisés en 2011, différentes géométries de sections ont été mises en évidence dans la retenue de Génissiat (Figure 3.8). Deux types de substrat sont rencontrés au niveau du lit : sur la partie amont, la rivière coule dans ses alluvions, alors qu'en aval le lit est incisé dans un substratum rocheux. Les sections trapézoïdales sont observées dans la partie amont de la retenue, sur des tronçons rectilignes (Figure 3.6.a). Dans la partie amont, les convergences de flux et les courants secondaires dans les concavités des coudes provoquent le développement d'une asymétrie de la section avec un chenal principal vers l'extrados et/ou une mouille [Malavoi, 1989]. Les sections sont plus profondes à l'extérieur de la courbe (Figure 3.6.b pour une courbe à gauche et Figure 3.6.c pour une courbe à droite). Dans l'Étournel, deux types de sections sont observées. Des bancs immergés ou émergés sont observés et séparent le chenal en deux (Figure 3.6.d). Au niveau de la grande île, le chenal principal est situé en rive gauche et l'ile est végétalisée. Un chenal secondaire est formé en rive droite (Figure 3.6.e). Dans la zone de transition et de rétrécissement entre l'Étournel et le canyon du Rhône, entre les PK 181,7 et 180,2, la typologie des sections est liée à l'influence du barrage sur le niveau d'eau : un chenal principal, plus profond est situé en rive droite à l'emplacement du lit mineur du Rhône non aménagé et un radier est situé en rive droite et correspond à l'ancienne pleine d'inondation (Figure 3.6.b). Enfin, dans le canyon, les sections sont trapézoïdales avec des berges rocheuses à fortes pentes (Figure 3.6.f). Certaines sections présentent des terrasses planes qui dominent le chenal, comme par exemple au niveau de la confluence entre le Rhône et la Valserine ou dans la Canyon d'Arlod (Figures 3.7.a et 3.7.b).



FIGURE 3.6 – Typologie des sections de la retenue de Génissiat : a) section trapézoïdale, b) chenal principal en rive droite, c) chenal principal en rive gauche, d) chenaux multiples avec bancs immergés, e) chenaux multiples avec île centrale émergée, f) canyon. Les typologies a à e sont observées dans la zone alluviale, la typologie f correspond à la zone rocheuse.


FIGURE 3.7 – Photographies lors de la chasse de juin 2012 : a) Confluence Rhône-Valserine le Rhône est en haut, la Valserine en bas, b) Canyon d'Arlod (photos CNR).



FIGURE 3.8 – Répartition des typologies de section dans la retenue en 2011.

3.3.3 Propriétés des sédiments en place

3.3.3.1 Répartition longitudinale et transversale de la granulométrie

Les campagnes réalisées en 1999, 2012 (avant et après la chasse) et 2014 permettent une description granulométrique des sédiments présents en surface. La figure 3.9 présente l'évolution moyenne du diamètre médian de surface dans le chenal. La distinction entre les différentes classes granulométriques est basée sur la classification de Wentworth [1922]. La position transversale exacte des prélèvements n'est pas connue, mais on suppose que les prélèvements sur les bords ont été effectués à la base des berges mais toujours au niveau du chenal.



FIGURE 3.9 – Répartition longitudinale du diamètre médian des sédiments en surface : a) au centre du chenal, b) sur les bords du chenal.

Les plaquages formés par les dépôts sur les berges sont constitués de sédiments très fins avec un diamètre médian d'environ 10 μ m [Wolf, 2011] qui varie peu le long de la retenue. Des dépôts sont observés dans la zone de l'Étournel, au niveau de la grande île aval. En amont du PK 173, les sédiments fins se retrouvent seulement en plaquages sur les bords [Bouchard et Dumond, 2000].

3.3.3.2 Répartition verticale de la granulométrie

Plusieurs séries de carottages ont été réalisées dans la retenue afin de caractériser la répartition granulométrique sur la profondeur. On dispose de données issues de carottes de 1 à 6,45 m de long, localisées près du barrage [Tisot et Merketa, 1994a], dans le chenal sur le tiers aval de la retenue [Bouchard et Dumond, 2000], et dans des dépôts de sédiments fins [Wolf, 2011], ainsi que de données issues des sédiments dragués près du barrage en février 2014. Néanmoins, il s'agit plutôt d'une description qualitative de la structure verticale des sédiments.

La figure 3.10 représente la structure verticale des dépôts sédimentaires issus des carottes prélevées dans le tiers aval de la retenue. Dans le tiers aval de la retenue, au niveau du chenal les carottes présentent une structure assez hétérogène sur la verticale. Aux PK 170,45; 165,1 et 163,75 une couche supérieure d'une épaisseur de 30 cm à 1 m composée en majorité de sédiments fins surplombe un substrat plus grossier présent sur toute la profondeur de la carotte (Figure 3.10 b, c, d). Ces relevés suggèrent que des dépôts de sédiments fins ont lieu en période d'interchasse et recouvrent des couches de sédiments plus grossiers sans doute transportés lors d'événements hydrologiques. Près du barrage, (Figure 3.10 a) les dépôts sont constitués de limons sur toute la profondeur, avec quelques inclusions plus grossières. Les carottes plus profondes réalisées dans la zone [Tisot et Merketa, 1994a] montrent que les sédiments ont des caractéristiques identiques sur la profondeur.



FIGURE 3.10 – Structure verticale des carottes : a) PK 162,5 b) PK 163,75 c) PK 165,1 d) PK 170,45, d'après Bouchard et Dumond [2000].

Le tableau 3.4 montre l'évolution verticale de la granulométrie des sédiments dans les dépôts près du barrage. Les dépôts au pied du barrage ont une granulométrie homogène sur la verticale au centre du chenal. Sur les bords, les sédiments sont plus fins, avec des passages plus grossiers en profondeur (-2 m à droite et -4 m à gauche).

Drofondour	diamàtra um	position					
1 Ioioiideui	$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Bord gauche	Centre	Bord droit			
	d_{10}	2	5	3			
surface	d_{50}	10	39	14			
	d_{90}	30	115	50			
	d_{10}	2	6	5			
-2 m	d_{50}	13	46	33			
	d_{90}	42	122	94			
	d_{10}	4	5	3			
-4 m	d_{50}	22	39	13			
	d_{90}	72	106	38			

TABLEAU 3.4 – Granulométrie des prélèvements verticaux dans les dépôts près du barrage.

Le tableau 3.5 montre l'évolution verticale de la granulométrie des sédiments formant les dépôts de fines le long des berges [Wolf, 2011]. Dans la zone de l'Étournel (PK 181,9), l'évolution verticale de la granulométrie est typique d'une zone de dépôt de l'amont de la retenue avec un échantillon très limoneux en surface et plus sableux en profondeur. Plus à l'aval, au garage à bateaux d'Arlod (prélèvement réalisé au PK 167,5) une structure plus grossière en profondeur se dégage. Les dépôts de fines prélevés sur le bord dans les biefs aval montrent une zone composée essentiellement de limons et d'argiles. Leur granulométrie ne varie pas sur la profondeur.

	tes preieveniene	0 1010100	iun aum	and and		
Profondour	diamàtra um	PK				
1 Ioioiideui		165,4	167,5	181,9		
	d_{16}	1,7	1,9	2		
[0;-0,5] m	d_{50}	8	7	10		
	d_{84}	34	29	45		
	d_{16}	1,4	2	1,8		
[-0,5 ;-1] m	d_{50}	7	9	9		
	d_{84}	34	35	39		
	d_{16}	1,4	2,5	1,9		
[-1;-3] m	d_{50}	8	19	7		
	d_{84}	36	70	30		

TABLEAU 3.5 – Granulométrie des prélèvements verticaux dans les dépôts sur les berges.

3.3.3.3 Propriétés mécaniques des sédiments

Les différents tests réalisés sur les sédiments prélevés au cours des campagnes permettent d'estimer les propriétés des sédiments [Tisot et Merketa, 1994b; Bouchard et Dumond, 2000; Lerch et Thizy, 2013].

L'angle de stabilité des sédiments fins a été estimé à partir de mesures de cohésion non drainée. Il diminue en fonction de l'épaisseur de sédiments. Pour les talus immergés, l'angle de stabilité est compris entre 46° pour une épaisseur de dépôt de 0,5 cm et 8° pour des épaisseurs de 2 m. Ces valeurs suggèrent que les talus formés par une faible épaisseur de sédiments fins sont plutôt stables. Pour les sables, les modèles de rupture sont différents de ceux des sédiments fins, la pente limite de stabilité correspond à l'angle de frottement interne du sédiment, soit environ 35°.

La valeur au bleu est comprise entre 0,24 et 1,3, ce qui classe les matériaux parmi les limons peu plastiques et silts alluvionnaires [NF P11 -300, 1992]. La proportion d'argile dans ces échantillons est donc assez faible. Les phénomènes liés aux propriétés de cohésion sont limités.

La teneur en matière organique dans les sédiments fins varie entre 2,8 et 6,4%. Les dépôts en place sont peu organiques.

3.4 Évolutions morphologiques de la retenue de Génissiat

Les données bathymétriques ainsi que les photographies aériennes relevées régulièrement depuis la mise en eau de la retenue permettent de mettre en évidence les évolutions morphologiques de la retenue.

3.4.1 Évolution du profil en long

La comparaison des profils en long renseigne sur l'évolution du comblement de la retenue (Figure 3.11). Le profil de 1918 correspond à une ligne d'eau relevée en avril/juin 1918 par le Service du Nivellement Général de la France (futur IGN) pour le Service des Grandes Forces Hydrauliques. Le débit n'est pas connu, mais les documents indiquent que la ligne d'eau a été relevée à l'étiage. Pour comparaison, une ligne d'eau modélisée avec la géométrie de 2012 avec un débit de 150 m³/s et un niveau au barrage de 325 m est aussi tracée. Les profils en long sont construits à partir du point le plus bas sections en travers, soit pour une trentaine de sections de 1954 à 1965 et une centaine de sections de 1984 à 2012. Les relevés bathymétriques sont peu denses à l'aval de la retenue jusqu'en 1969. Ces observations posent la question de la représentativité des profils en long construits à partir de données antérieures à 1984. Aussi, les irrégularités de pente (mouilles et seuils) des profils en long depuis 1984 sont visibles, contrairement aux profils antérieurs. En particulier, d'importantes mouilles sont observées aux PK 176,6, 173,02 et 167,43.



FIGURE 3.11 – Profils en long et lignes d'eau du bief de Génissiat entre 1918 et 2012 (* Profil incomplet en amont du PK 182,5, remplacé par le profil datant de septembre 1997).

Quatre tronçons ont été délimités afin d'évaluer l'évolution de l'envasement au cours du temps : un premier tronçon du PK 187 au PK 178, correspondant à la partie amont de la retenue, un second tronçon du PK 178 au PK 172, un troisième du PK 172 au PK 163 et un dernier du PK 163 au barrage. Entre 1954 et 2012, la pente de la retenue a diminué dû au comblement par les sédiments (Tableaux 3.6 et 3.7). Entre le PK 163 et le barrage, une fosse de

plus en plus profonde et pentue a été créée par des dragages près du barrage ou l'entrainement des sédiments par la vanne de fond alors que les sédiments s'accumulaient dans la retenue (Figure 3.12).

	Per	Pente moyenne par tronçon (m/km)								
	PK 187-178	PK 178-172	PK 172-163	PK 163-162,2						
1918	1,89	2,18	4,14	1,38						
1954	1,90	1,94	4,02							
1984	2,3	1,82	2,38	9,62						
2012	1,19	1,17	1,06	14,4						

TABLEAU 3.6 – Évolution temporelle de la pente moyenne par tronçon.

TABLEAU 3.7 – Évolution temporelle des variations d'altitude du fond.

	Variation ma	Variation maximale d'altitude du fond par rapport à 1954 (m)									
	PK 187-178	PK 178-172	PK 172-163	PK 163-162,2							
1984	-5	6	22	15							
2012	2	10	43	25							

En 1918, la ligne d'eau présentait localement de fortes pentes : environ 4,7 m/km dans le défilé de l'Écluse, 12,7 m/km près du PK 165 et une chute de 12 m au niveau de l'usine de Bellegarde au PK 171. A la suite de la mise en eau de la retenue, la ligne d'eau au niveau du barrage a été relevée de près de 60 m.

Entre 1954 et 1969, les dépôts ont eu lieu en aval du PK 175, avec une hauteur atteignant 20 m près du barrage. Entre 1969 et 1984, une incision de près de 5 m a eu lieu dans l'Étournel, liée à l'activité d'extraction de granulats pour laquelle la CNR a accordé une concession à des entreprises locales en 1970. Entre 1970 et 1995, le volume extrait a été estimé à 500000 m³. L'agrandissement des sections d'écoulement a engendré une érosion régressive [Girel et Doche, 1983; Cohen et Briod, 1989] qui a atteint la station hydrométrique du Pont de Pougny au début 1977 [CNR, 1981]. Cette érosion explique la diminution de la pente entre les PK 187 et 180 entre 1954 et 1984. Une érosion des dépôts anciens est observée entre les PK 174 et 171 et les PK 170 et 167. Elle est attribuée à l'épisode de chasse de 1978, au cours de laquelle le niveau au barrage a été abaissé à 278 m, créant un écoulement qui a permis d'éroder les dépôts anciens.

Entre 1984 et 1997, le profil en long s'est stabilisé en sortie de l'Étournel jusqu'au PK 174. L'aval a été le siège de dépôts d'une épaisseur variable ne dépassant pas 10 m.

Entre 1997 et 2012 le profil en long est resté assez stable sur la majorité de la retenue. Certaines mouilles (PK 169,05 et 167,03) ont été comblées. Les faibles évolutions morphologiques de la retenue amont observées depuis 1997 et l'absence de variations au niveau de la granulométrie de surface entre 1999 et 2012 (Figure 3.9) suggèrent que les dépôts de sédiments grossiers ne se sont pas propagés de façon significative au cours de la dernière décennie. Les dépôts d'une hauteur maximale de 5 m sont observés dans les 3 km aval. Des dépôts sont aussi localisés dans les gorges de Léaz et Grésin (entre les PK 179 et 174) et sont dus à la chasse de 2012.



FIGURE 3.12 – Profil en long de la zone en amont du barrage (décembre 2011).

3.4.2 Évolution des sections en travers

Les évolutions de sections au niveau du tronçon entre Pougny et l'amont de l'Étournel sont marquées par les extractions de matériaux. L'évolution dans le temps de deux profils en travers est présentée : le PK 186,18 qui correspond au tronçon situé en amont de la zone d'extraction et le PK 183,94 situé juste au niveau de la zone d'extraction. Avant les extractions dans les années 1970, les sections présentaient une géométrie stable. Les extractions de matériaux ont créé une fosse et provoqué une incision des sections (Figure 3.13 b). En amont, une érosion régressive a provoqué une érosion d'environ un mètre au niveau du chenal (Figure 3.13 a). Les extractions se sont arrêtées en 1995 et la fosse a fait office de piège à sédiments. Depuis, du dépôt est observé à l'issu des opérations de chasse et de l'érosion en période d'interchasse.

L'évolution de la zone de l'Étournel est présentée plus en détail à partir de photographies historiques (cf paragraphe 3.4.3). Les profils au PK 182,35 mettent en évidence les étapes de la formation de la grande île aval (Figure 3.13 c). Au cours du temps, il y a eu un exhaussement de l'île et l'apparition de végétation qui a contribué à stabiliser sa géométrie, alors que la pente latérale a augmenté sur chaque bord de l'île. Un chenal secondaire bien distinct s'est formé en rive droite et s'est approfondi avec le temps.

Dans la zone de transition et de rétrécissement entre l'Étournel et le canyon du Rhône et dans le défilé de l'Écluse, entre les PK 181,5 et 178,3, les sections évoluent peu.

Les profils au PK 173,55 permettent d'illustrer l'évolution de la morphologie dans les gorges à dominante sableuse (Figure 3.13 d). En cas de dépôt, les sédiments sont déposés au niveau du chenal, comme lors de la période d'interchasse 1984-1987. il n'y a pas de dépôt sur les berges qui sont trop pentues. Lorsqu'il y a de l'érosion, comme au cours de la chasse de 2003, l'érosion est aussi répartie sur toute la largeur du chenal.

Les profils aux PK 166,46 et 164,27 permettent d'illustrer l'évolution de la morphologie dans les gorges à dominante limoneuse (Figures 3.13 e et 3.13 f). La section au PK 166,46 présente un chenal et une terrasse plane en rive droite. Le dépôt a lieu principalement au niveau du chenal et est effectué de façon horizontale, comme lors de la période d'interchasse 1984-1987 mais il est aussi observé au niveau des terrasses. Lors des épisodes de chasse, les dépôts présents sur les terrasses peuvent être remobilisés. La section au PK 164,27 présente des berges à fortes pentes. En cas de dépôt, les sédiments sont déposés au niveau du chenal, de façon horizontale, comme lors de la période d'interchasse 2003-2011. Il n'y a pas de dépôt sur les berges qui sont trop pentues. Lorsqu'il y a de l'érosion, comme au cours de la chasse de 2003, le chenal créé occupe toute la largeur de la section.



FIGURE 3.13 – Évolution des profils en travers : a) PK 186,18, b) PK 183,94, c) PK 182,35, d) PK 173,55, e) PK 166,46, f) PK 164,27.

Des observations des berges au cours de la chasse de 2000 [Perrier, 2000] ont montré que les dépôts compacts observés sur les berges entre les PK 174 et 170 n'ont pas évolué au cours de l'abaissement de la retenue. En aval de Bellegarde sur Valserine, les dépôts sur les bords ont été érodés par les venues d'eau au début de l'abaissement, puis les berges ont cessé d'évoluer quand la roche a été révélée. Autour du PK 166, des ruptures brutales du pied de talus en contact avec l'eau ont été observées. Près du barrage, peu de dépôts ont été observés du à la configuration rocheuse des berges.

3.4.3 Évolution en plan de la zone de l'Étournel

La plaine alluviale de l'Étournel est le lieu de nombreux changements morphologiques au cours du temps. Ces changements peuvent être observés à partir de photographies aériennes (Figure 3.14). En 1934, avant la mise en eau du barrage, le chenal s'élargissait en entrant dans la zone de l'Étournel, et des îles sont présentes. Un bras secondaire était présent en rive droite au niveau du rétrécissement (Figure 3.14.a) et le cours du Rhône formait un « S ». Suite à la mise en eau de la retenue de Génissiat en 1948, la partie aval a été noyée et le lit en eau s'est élargi, provoquant la disparition du « S » et du canal en rive droite (Figure 3.14.b). Entre 1954 et 1971, les îles localisées dans la partie amont se sont végétalisées (Figure 3.14.c) et des dépôts ont commencé à former la grande île aval. Entre 1971 et 1984, les extractions de

granulats ont donné lieu à la création d'étangs (Figure 3.14.e) en rive droite, dont certains sont alimentés par le Rhône [Parc Naturel Régional du Haut-Jura, 2001]. L'île aval s'est végétalisée et sa géométrie se stabilise. Un chenal secondaire bien distinct s'est formé en rive droite. Entre 1984 et 1992, la petite île au centre en rive gauche a été progressivement rattachée au bord. (Figure 3.14.f) Au cours du temps, la queue de l'île aval se comble et s'est agrandie jusque dans le virage à gauche en sortie de l'Étournel (Figure 3.14.g).



FIGURE 3.14 – Prises de vue aériennes de l'Étournel : a) 1934, b) 1952, c) 1967, d) 1971, e) 1984, f) 1992, g) 2004 (source : Géoportail).

3.5 Bilans bathymétriques

Les relevés réguliers de bathymétrie dans la retenue sont utilisés pour déterminer l'envasement de la retenue et pour mettre en évidence les processus de sédimentation et leur localisation dans la retenue en mesurant la différence entre deux campagnes [Morris et Fan, 1998; Vanoni, 1977].

3.5.1 Méthode de calcul du bilan bathymétrique

Le calcul du volume déposé ou érodé entre les dates t_1 et t_2 est basé sur la différences des bathymétries relevées à ces deux dates. La figure 3.15 illustre les différents paramètres calculés.



FIGURE 3.15 – Paramètres calculés pour l'estimation du bilan bathymétrique.

3.5.1.1 Volume total

Le volume total sur la retenue est la somme des volumes associés aux N_T sections transversales relevés.

$$V_{tot} = \sum_{i=1}^{N_T} V_i = D_{a,i} \Delta S_i \tag{3.1}$$

- $D_{a,i}$ est la distance d'application de la section i
- $-\Delta S_i$ est la variation de l'aire occupée par les sédiments dans la section i entre t_1 et t_2
- $-N_T$ est le nombre de sections transversales

Cette méthode d'estimation du volume associé à une section comme le produit de la variation de l'aire occupée par les sédiments dans la section et de la distance d'application est la méthode la plus simple de calcul du volume.

3.5.1.2 Distance d'application d'une section transversale

L'estimation de la distance d'application d'une section transversale dépend du cas de figure.

Cas général

Lorsque la variation de la largeur du cours d'eau entre deux sections consécutives est faible, la distance d'application de chacune de ces sections sur le bief entre ces sections est assimilée à

la demi-longueur du bief. Ainsi, lorsque la largeur varie peu à l'amont et à l'aval de la section considérée, la distance d'application est la somme des deux demi-distances curvilignes avec la section amont et la section avale.

$$D_a = \frac{L_{av} + L_{am}}{2} \tag{3.2}$$

Cas de fortes variations de largeur

Lorsque la variation de la largeur du cours d'eau entre deux sections consécutives est importante, la longueur d'application de chacune des sections sur le bief est estimée en fonction de l'évolution de la largeur. On considère que la limite d'application des sections transversales formant le bief se situe à l'endroit où la variation est la plus forte. Dans le cas d'une variation linéaire de la largeur, la distance d'application définie par la demi distance est utilisée (Équation (3.2)).

Sections amont et aval

Le bilan de volume sur la retenue s'effectue du seuil de Chancy-Pougny jusqu'à l'amont du barrage.

Pour la section aval, $D_a = L_{av} + L_{am}/2$, où L_{av} est la distance entre la section et le barrage. Pour la section amont, $D_a = L_{am} + L_{av}/2$, où L_{am} est la distance entre la section et le seuil de Chancy-Pougny.

3.5.1.3 Estimation de l'aire entre les profils à comparer

 ΔS_i est estimé à partir des aires occupées par les sédiments $S_{(i,t_1)}$ et $S_{(i,t_2)}$ à t_1 et t_2 .

$$\Delta S_i = S_{i,t_2} - S_{i,t_1} \tag{3.3}$$

La méthode des trapèzes est utilisée pour calculer l'aire de la section transversale $S_{i,t}$ occupée par les sédiments à la date t

$$S_{i,t} = \sum_{k=1}^{N(t)-1} \left[\frac{Z_{k,t} + Z_{k+1,t}}{2} \right] \Delta y$$
(3.4)

où

-
 $Z_{k,t}$ est l'altitude du lit au niveau du
 $k^{\grave{\mathrm{e}}me}$ point du profil interpolé au temps t

- $-\Delta y$ est le pas d'interpolation du profil
- $-\ N$ est le nombre de points décrivant le profil

Comme les processus mis en jeu peuvent être différents pour les berges et le fond, il est utile de calculer séparément l'aire correspondant aux berges $({}_{b}g)$ et celle correspondant au fond $({}_{f}d)$ $S_i = S_{i,bg} + S_{i,fd}$. La limite fond-berge est définie aux endroits où les variations de la pente des profil sont les plus importantes (Figure 3.16).



FIGURE 3.16 – Choix de la limite chenal-berge.

Les surfaces de déblai et de remblai peuvent être obtenues en séparant la partie négative et la partie positive de l'aire calculée.

3.5.2 Incertitudes sur le calcul des cubatures

L'estimation du bilan bathymétrique d'une retenue comprend des incertitudes liées à la mesure et à la méthode de calcul utilisée. Heinemann et Dvorak [1963] ont montré que les volumes estimés à partir des profils en travers peuvent varier d'environ 10% dans des petites retenues, en fonction de la méthode de calcul appliquée, et de la qualité des sections en travers (densité, orientation...). De plus, des incertitudes peuvent apparaître si les évolutions des sections en travers choisies ne sont pas représentatives des évolutions à l'échelle du bief, comme mis en évidence par Fuller *et al.* [2003]. Ainsi le calcul bathymétrique doit s'accompagner d'une estimation des incertitudes associées afin d'éviter des erreurs d'interprétation du bilan.

3.5.2.1 Méthode d'estimation des incertitudes

Les incertitudes sont estimées en suivant le cadre du GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement) [Joint Committee For Guides in Metrology, 1995]. La première étape du processus est la détermination de la mesurande du calcul pour laquelle on doit donner une expression quantitative. Cette étape était l'objet de la partie 3.5.1. Ensuite, les sources d'incertitude liées au calcul de la mesurande sont listées et analysées, en particulier, les sources quantifiables à partir des données disponibles sont identifiées et une liste de données complémentaires nécessaires à la quantification des autres sources est établie. Cette étape permet aussi d'écarter les sources négligeables ou de regrouper plusieurs sources entre elles. Les composantes individuelles de l'incertitude peuvent être quantifiées à partir de la formulation mathématique établie, de données d'études préalables, d'une estimation expérimentale de l'incertitude, ou encore à partir de principes théoriques.

Toutes les contributions sont exprimées sous forme d'incertitudes types (écarts-types). Si l'incertitude a été évaluée à partir de mesures répétées, l'incertitude type correspond à l'écart type des mesures. Si l'incertitude est donnée sous la forme d'un intervalle avec un niveau de confiance ($\pm a$ à p%), l'écart type s'obtient en divisant a par la valeur du pourcentage de la distribution normale selon le niveau de confiance. Si aucun niveau de confiance n'est donné, et que les limites de ($\pm a$) sont probables, on suppose que la distribution est rectangulaire et l'écart type est $a/\sqrt{3}$. Si les limites de $(\pm a)$ paraissent improbables, on suppose que la distribution est triangulaire et l'écart type est $a/\sqrt{6}$.

Pour composer les composantes de l'incertitude, il existe une relation entre l'incertitude type composée et l'incertitude des paramètres dont elle dépend. Dans le cas de sommes et de produits, on obtient des expressions assez simples : si y = q + p, alors $u_c(y(q, p)) = \sqrt{u(p)^2 + u(q)^2}$ et si $y = q \times p$, alors $u_c(y(q, p)) = y\sqrt{(u(p)/p)^2 + (u(q)/q)^2}$. En pratique il faut décomposer le modèle mathématique en sommes et produits et composer les incertitudes types selon les formules précédentes. La dernière étape est l'estimation de l'incertitude élargie U_E en multipliant l'incertitude type composée par un facteur d'élargissement k, la valeur couramment utilisée est k = 2 qui donne un intervalle de confiance à 95%...

3.5.2.2 Sources d'incertitudes

Deux contributions à l'incertitude sont listées : la précision des mesures u_P et la représentativité des données u_R . La précision est liée aux mesures et à leur traitement, notamment à l'incertitude des appareils de mesure et au protocole de traitement des données. La représentativité est liée à la description discrète de la bathymétrie de la retenue à partir de sections transversales. En effet, les évolutions d'une section ne sont pas toujours représentatives de l'évolution du fond autour de cette section.

3.5.2.3 Propagation des incertitudes

On suppose que les incertitudes locales associées à chaque section sont indépendantes. L'incertitude sur la retenue entière est :

$$u(V) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_T} u^2(V_i)}$$
(3.5)

Pour reconstruite l'incertitude locale, on suppose que les deux sources d'incertitude (représentativité et précision) sont indépendantes. L'incertitude type composée pour chaque section est alors :

$$u(V_i) = \sqrt{u_P^2(V_i) + u_R^2(V_i)}$$
(3.6)

3.5.2.4 Précision

L'incertitude $u_P(V_i)$ sur le volume calculé pour la section *i* provient de l'imprécision sur l'évolution de la surface $u_P(\Delta S_i)$ et l'imprécision sur la distance d'application $u_P(D_{a,i})$.

$$u_P(V_i) = V_i \sqrt{\left[\frac{u_P(\Delta S_i)}{\Delta S_i}\right]^2 + \left[\frac{u_P(D_{a,i})}{D_{a,i}}\right]^2}$$
(3.7)

On estime la précision de la mesure de distances à partir d'un système d'informations géographiques à ± 5 m, l'incertitude type individuelle est donc $u_P(D_{a,i}) = 5/\sqrt{3} = 2.9$ m.

L'imprécision $u_P(\Delta S_i)$ sur l'aire est liée aux imprécisions sur la mesure bathymétrique. L'imprécision liée à la projection, l'interpolation des données et la méthode d'intégration est négligée. L'imprécision $u_P(y)$ de l'abscisse dans la section est négligée par rapport à l'altitude des points $u_P(Z)$. On estime l'imprécision du sondeur à ±10 cm, d'où une incertitude type $u_P(Z) = 0, 1/\sqrt{3}=0,06$ m. De plus on fait l'hypothèse que l'erreur de mesure bathymétrique est répartie sur toute la largeur de la section W.

$$u_P(\Delta S_i) = W\sqrt{2}u_P(z) \tag{3.8}$$

3.5.2.5 Représentativité

L'erreur de représentativité $u_R(V_i)$ du volume associée à la section i est liée au caractère discret des données, à deux échelles. D'une part, on retrouve cette incertitude à l'échelle de la section, à travers la densité de points utilisée pour décrire la section. D'autre part, cette incertitude apparait à l'échelle d'un tronçon entre deux sections, à cause de l'absence d'informations entre les sections. Lorsque les évolutions géométriques de deux sections consécutives sont très différentes, l'hypothèse d'une évolution constante ΔS_i sur la distance d'application peut être remise en cause. De plus, les berges sont sujettes à des phénomènes locaux comme des érosions ou des effondrements qui ne peuvent pas toujours être représentés par les sections en travers.

Une formule est proposée pour estimer cette incertitude :

$$u_R(V_i, l) = \alpha_{i,l} \left[(|S_{i,l} - S_{i-1,l}|) L_{i-1} + (|S_{i+1,l} - S_{i,l}|) L_i \right]$$
(3.9)

où $\alpha_{(i,l)}$ est un coefficient dépendant de l'espace et l = [bg, fd], avec bg pour berge et fd pour fond.

Pour le fond, on suppose que les variations de dynamique entre deux sections consécutives sont d'autant plus importantes que les pentes au niveau des tronçons sont différentes. α_{fd} est défini comme l'écart entre les pentes des tronçons en amont et aval de la section. α_{fd} varie de 0,001 à 0,25.

Pour les berges, le coefficient est assimilé à une probabilité d'érosion ou d'effondrement des talus. Les essais géotechniques ont estimé l'angle de frottement des sédiments formant les dépôts sur les bords de la retenue à $\phi=35^{\circ}$ [Tisot et Merketa, 1994a]. Cette valeur illustre la possibilité de trouver des talus de pente relativement forte dans la retenue. Pour estimer la probabilité d'érosion, la formule suivante est proposée : $\alpha_{bq} = \tan \phi = 0, 7$.

On suppose que les sources de biais pour les berges et le fond sont indépendantes, le biais pour la section entière est :

$$u_P(V_i) = \sqrt{\sum_{l=[fd,bg]} u_P^2(V_{i,l})}$$
(3.10)

3.5.3 Analyse du bilan bathymétrique

La méthodologie de calcul du bilan a été appliquée aux bathymétries disponibles et exploitables pour déterminer les volumes de déblai et de remblai pour les périodes de chasse et d'interchasse entre 1954 et 1984 (Tableau 3.8) et 1984-2012.

3.5.3.1 Bilan bathymétrique de la retenue pour la période 1954-1984

Les données bathymétriques datant des années 1950-1960 ont pu être exploitées. Au contraire, il n'a pas été possible de retrouver les données bathymétriques des années 1970 ayant servi dans une étude réalisée par EDF [Bouchard *et al.*, 1999]. Ainsi on dispose de deux bilans différents pour la période. De plus, il est important de remarquer que les bathymétries de 1954 à 1969 utilisées pour le calcul comportent seulement quelques sections au niveau de la partie aval, remettant en cause la représentativité du calcul dans cette zone. Une comparaison des volumes calculés par les deux méthodes montre que le bilan réalisé pendant la thèse donne un envasement de 10,2 millions de m³ entre 1954 et 1984, alors que le bilan réalisé par Bouchard *et al.* [1999] donne un envasement de 9,4 millions de m³(Tableau 3.8). L'écart de 8% obtenu entre les deux bilans est faible.

Le début de l'exploitation de la retenue de Génissiat (1954-1969) est marqué par un fort envasement présentant une moyenne annuelle (chasses et interchasses confondues) de 0,64 million de m³ (Tableau 3.8). La période 1969-1984 montre un faible envasement, consécutif à la chasse de 1978 qui a évacué de la retenue un volume de 2,8 millions de m³, qui équivaut presque aux apports en chasse et interchasse sur la période.

Période	Bilan (L. Guertault) (10^6 m^3)	Période	Bilan Bouchard <i>et al.</i> [1999] (10^6 m^3)	
1954-1961 ^a	4,8			
1961-1965	0,1			
Chasse 1965	0,01	$1054 \ 1075 \ b$	10.5	
1965-1969	3,1	1904-1970	10,5	
Chasse 1969	1,6			
		1975 - 1979	-2,8	
1969-1984 ^c	0,5	1979-1981	0.3	
		Chasse 1981	1 ^d	
		1981-1984	0,4	

TABLEAU 3.8 – Bilan volumique des périodes de chasse et d'interchasse entre 1954 et 1984.

a. Cette période contient deux chasses

b. Cette période contient six chasses

c. Cette période contient quatre chasses

d. Estimation d'après les flux sédimentaires

3.5.3.2 Bilan bathymétrique de la retenue pour la période 1984-2012

Le bilan bathymétrique de la retenue pour les périodes d'interchasse et les événements de chasse depuis 1984, ainsi que les incertitudes associées ont été calculés (Tableau 3.9, Figure 3.17). Depuis 1984, les opérations de chasse contribuent à la moitié du bilan en volume de la retenue de Génissiat. La variabilité des bilans sédimentaires liés aux chasses peut être attribuée à la variabilité de gestion des retenues suisses et de la retenue de Génissiat. Généralement, les chasses provoquent un remblai de la retenue de Génissiat, mais le volume déposé semble diminuer dans le temps grâce à une optimisation des protocoles, notamment depuis 1997 avec l'abaissement préalable de la retenue de Génissiat qui permet de remobiliser une partie des sédiments préalablement déposés dans la retenue avant de réguler les sédiments provenant des chasses des retenues suisses. Cette première phase a été particulièrement efficace en 2003 puisque le bilan de la retenue pour cet épisode est négatif. Au cours de la chasse de 2012, alors qu'une quantité importante de sédiments est évacuée des retenues de Verbois et Chancy-Pougny, une gestion défavorable été appliqué dans la retenue de Génissiat, donnant lieu au dépôt de 1,5 million de m³ de sédiments. Durant les périodes d'interchasse, le bilan volumique de la retenue est positif. Le volume des dépôts dépend des apports liquides et solides qui peuvent être assez variables. Le bilan correspondant à la période d'interchasse de 1993-1997, ne commence qu'à partir du PK 182.35 car la bathymétrie d'avril 1997 n'a été mesurée qu'en aval de ce point. De plus, des opérations de dragage ont eu lieu près du barrage, pouvant expliquer en partie le bilan négatif. Depuis 1993, le bilan volumique annuel de la retenue en période d'interchasse est en nette diminution. Cela pourrait être expliqué par l'atteinte d'un profil d'équilibre pour les sédiments fins du fait de l'exhaussement du fond induit par le comblement de la retenue.

Période	Bilan (10^6 m^3)	moyenne annuelle interchasse (10^6 m^3)	dragage (10^6 m^3)
Chasse 1984	$0,86 \pm 0,09$		()
1984-1987	$1,51 \pm 0,09$	0,5	
Chasse 1987	$0,67{\pm}0,07$		
1987-1990	$0,29 \pm 0,07$	0,1	
Chasse 1990	$0,43 \pm 0,06$		
1990-1993	$0,74 \pm 0,07$	$0,\!27$	-0,4
Chasse 1993	$0,8\pm0,07$		
1993-1997 ^a	-0.14 ± 0.06	-0,05	-0,008
Chasse 1997 b	$0,\!37\pm0,\!10$		
1997-2000	$0,15 \pm 0,14$	0,02	-0,12
Chasse 2000	$0,67 \pm 0,11$		
2000-2003	$0,006 \pm 0,09$	0,002	
Chasse 2003	$-0,36 \pm 0,11$		
2003-2011	$0,41 \pm 0,12$	0,06	-0,14
Chasse 2012	$1,47 \pm 0,12$		

TABLEAU 3.9 – Bilan bathymétrique volumique des périodes de chasse et d'interchasse entre 1984 et 2012.

a. le bilan n'est réalisé qu'en aval du PK 182,35

b.le bilan n'est réalisé qu'en aval du PK 182,35



FIGURE 3.17 – Bilan bathymétrique cumulé volumique de la retenue entre 1984 et 2012.

Discussion sur les incertitudes calculées

Les incertitudes obtenues sur le bilan bathymétrique de la retenue pour les événements de chasse et périodes d'interchasse entre 1984 et 2012 sont situées aux alentours de 0.1×10^6 m³. Pour certains événements comme les périodes d'interchasse 1997-2000 et 2000-2003, le bilan de la retenue n'est pas significatif au regard des incertitudes élargies estimées.

L'analyse des incertitudes sur le volume associée à chaque section en travers a montré que sur la centaine de sections en travers utilisées pour représenter la retenue, environ 30 ont présenté une incertitude type supérieure à la valeur du volume calculée pour au moins 20% des périodes. En particulier, au niveau des sections aux PK 176,30, 172,8 et 171,25 l'incertitude est supérieure au volume dans 30% des cas. Au niveau du PK 176,30, les sections sont écartées de 300 m et la densité des sections est peut être trop faible. La section au PK 172,8 est située au niveau d'une

mouille profonde. De telles singularités sont importantes à prendre en compte pour comprendre la dynamique locale de la retenue, mais les évolutions observées sur ces singularités ne sont généralement pas très représentatives des évolutions à plus grande échelle. Enfin autour du PK 171,25, les sections sont écartées de 300 m environ et cette section est située dans une zone de changement de dynamique, où l'on observe la brusque transition de granulométrie de surface entre le sable et le limon (cf. Figure 3.9). Autour de ces trois sections en particulier, il serait intéressant de densifier la mesure de profils en travers.

3.5.3.3 Discussion sur le bilan de la retenue en chasse

La position de la retenue de Génissiat à l'aval des retenues de Verbois et Chancy-Pougny rend nécessaire la prise en compte de ces retenues pour l'interprétation du bilan sédimentaire. En période de chasse, ces retenues fournissent un apport sédimentaire important, alors qu'en période d'interchasse, elles contribuent à piéger une partie du flux sédimentaire apporté par l'Arve.

Les bilans des retenues de Verbois et de Génissiat sont comparés pour des épisodes de chasses (Tableau 3.10). Le taux de transfert T_F est estimé par :

$$T_F = 1 - V_{GE} / - V_{VE} \tag{3.11}$$

où V_{GE} est le bilan volumique de la retenue de Génissiat et V_{VE} est le bilan volumique de la retenue de Verbois.

La comparaison des valeurs est délicate pour plusieurs raisons. Les résultats proviennent de sources différentes et les méthodes permettant d'obtenir le bilan bathymétrique sont a priori différentes sur les deux retenues. De plus, les dates des bathymétries avant/après chasse et par conséquent la période sur laquelle le bilan est estimé peuvent être différentes pour les deux retenues. Seuls les épisodes pour lesquels les bilans des deux retenues sont disponibles sont rapportés. Les volumes évacués de la retenue de Verbois ne varient pas fortement d'une chasse à une autre, sauf pour les chasses 1965 et 2012 pour lesquelles ils ont été plus importants. A contrario, on a déjà souligné la variabilité importante du bilan volumique de la retenue de Génissiat lors des chasses. Cette variabilité est donc à rapprocher des protocoles de chasse mis en oeuvre à Génissiat.

	Bilan Verbois	Bilan Génissiat	taux de
Periode	$(10^6 \mathrm{m}^3)$	$(10^6 \mathrm{m}^3)$	transfert
Chasse 1965	-2,14	0,01	>99%
Chasse 1969	-1,4	1,6	-14%
Chasse 1984	-1,24	$0,\!86\pm0,\!09$	30%
Chasse 1987	-1,14	$0,\!67{\pm}0,\!07$	40%
Chasse 1990	-1,05	$0,43 \pm 0,06$	60%
Chasse 1993	-1,4	0.8 ± 0.07	45%
Chasse 1997	-1,3	$0,\!37\pm0,\!10$	70%
Chasse 2000	-1,14	$0,\!67\pm0,\!11$	40%
Chasse 2003	-1,1	$-0,36 \pm 0,11$	130%
Chasse 2012	-2,69	$1,47 \pm 0,12$	45%

TABLEAU 3.10 – Comparaison des bilans en périodes de chasse (le bilan de la retenue de Verbois est issu de [Diouf, 2013]).

Pour les événements antérieurs à 1984, le taux de transfert des sédiments établi à partir des bilans bathymétriques semble discutable, notamment si l'on considère l'incertitude du bilan de la retenue de Génissiat due à la densité des profils en travers (voir 3.2.1).

Pour la chasse de 1965, le bilan de la retenue de Génissiat suggère qu'il y a eu peu de dépôts dans la retenue. Le protocole de chasse a été favorable au transfert avec une cote au barrage aux environs de 315 m, un débit assez fort complété par l'ouverture de la vanne de fond en fin d'événement [Vial *et al.*, 1965].

Le bilan obtenu pour la chasse de 1969 met en évidence un envasement de la retenue de Génissiat légèrement supérieur aux apports provenant de Verbois. Néanmoins, la différence entre les deux bilans n'est pas significative.

Les chasses de 1984 à 1993 sont marquées par la mise en application d'un nouveau protocole de gestion avec abaissement de la retenue de Génissiat en dessous de 315 m, et l'utilisation de la vanne de fond. Les taux de transfert varient de 30% à 60% selon les événements.

Pour les chasses de 1997 à 2012, l'abaissement préalable de la retenue de Génissiat à un niveau de 305 m permet la reprise des dépôts sédimentaires. Puis la retenue est remontée à une cote de 315 m lors du transit des matériaux provenant de Verbois. En 1997, le protocole a permis d'atteindre un taux de transfert de 70% d'après les bilans bathymétriques. Pendant la chasse de 2000, la remontée anticipée de la retenue a provoqué des dépôts et a limité le transfert des sédiments à 40%. En 2003, un scénario d'abaissement idéal couplé à un faible volume évacué de la retenue de Verbois a permis un taux de transfert de 130%, le volume évacué de la retenue de Génissiat au cours de la première phase n'ayant pas été complètement comblé par les apports suisses au cours de la seconde phase. En 2012, les conditions hydrologiques défavorables obligeant le remplissage de la retenue de Génissiat combinées à de forts apports sédimentaires provenant de la retenue de Verbois ont provoqué un dépôt important dans la retenue de Génissiat. Malgré ces conditions défavorables pour les chasses de 2000 et 2012, la première phase a permis d'évacuer un volume préalable de sédiments, plaçant l'efficacité de ces chasses au niveau de la moyenne des chasses réalisées avant 1997.

3.5.3.4 Discussion sur le bilan de la retenue en période d'interchasse

Le tableau 3.11 compare les bilans de la retenue de Verbois et de la retenue de Génissiat en périodes d'interchasse. Les volumes dragués dans la retenue de Génissiat sont ajoutés au bilan. Le nombre de jours moyen par an pour lequel le débit journalier dépasse le débit de crue annuelle (Q_F) est aussi rapporté. Ce débit est estimé à 700 m³ pour le Rhône à Pougny et à 300 m³ pour l'Arve. On remarque tout d'abord que le bilan d'envasement annuel de la retenue de Verbois a des variations beaucoup plus faibles que le bilan de la retenue de Génissiat. On remarque une corrélation significative entre le bilan d'envasement de la retenue de Verbois et le nombre de jours pour lesquels le débit de l'Arve est supérieur au débit de crue annuelle. En effet, il semblerait que le volume annuel déposé dans la retenue de Verbois varie linéairement avec le nombre de jours de crue sur l'Arve (un coefficient de détermination $\mathbb{R}^2=0,73$). Inversement, on remarque que plus le nombre de jours pour lesquels le débit du Rhône est supérieur au débit de crue annuelle, plus le bilan d'envasement annuel de la retenue de Sénissiat est faible.

Période	Bilan mo	oyen annuel (10^6 m^3)	Nombre moyen de jours par an $Q>Q_F$					
	Verbois	Génissiat	Arve (Arthaz)	Rhône (Pougny)				
1984-1987	0,36	$0,\!5$	1,3	0				
1987-1990	0,42	0,1	3,7	3,3				
1990-1993	0,46	0,38	4	$0,\!67$				
1993-1997	0,38	-0,03	1,25	$1,\!25$				
1997-2000	0,37	0,09	1	1,6				
2000-2003	0,3	0,002	1	$2,\!67$				
2003-2012	0,36	0,06	0,78	1				

TABLEAU 3.11 – Comparaison des bilans en périodes d'interchasse (le bilan de la retenue de Verbois est issu de [Diouf, 2013]).

La baisse des dépôts annuels dans la retenue en interchasse depuis 1993 peut aussi être expliquée par la modification des conditions d'écoulements dans la retenue consécutive à l'envasement (Figure 3.11). En effet, l'envasement diminue la taille des sections d'écoulement dans la zone influencée par le remous du barrage et donne lieu à de plus fortes vitesses qui limitent le dépôt des sédiments.

3.5.4 Dynamique sédimentaire spatiale de la retenue entre 1954 et 2012

Les bilans bathymétriques pour chaque période peuvent être interprétés spatialement en considérant l'évolution des volumes cumulés de l'amont vers l'aval de la retenue. Les bilans bathymétriques permettent de mettre en évidence une division de la retenue en biefs présentant des dynamiques homogènes.

3.5.4.1 Volumes nets cumulées

Le volume net cumulé permet de mettre en évidence la dynamique spatiale de la retenue à l'échelle d'un événement de chasse ou une période d'interchasse (Figure 3.18).

Le bilan spatial fait apparaitre des tronçons présentant des tendances d'évolution assez marquées pour les opérations de chasse et les périodes d'interchasse (Tableau 3.12). Globalement, la dynamique des tronçons entre les PK 187 et 185 est faible avec du dépôt en chasse et de l'érosion en période d'interchasse. Les évolutions entre les PK 185 et 180 sont marquées par du dépôt lors des chasses. Depuis les extractions de matériaux dans les années 1970, de l'érosion est observée en période d'interchasse. Le Défilé de l'Écluse situé entre les PK 180 et 178 ne connait pratiquement pas d'évolutions morphologiques liées au transport solide, sauf pour les chasses 2000 et 2012 pour lesquelles, un dépôt se forme en sortie. Les gorges de Léaz et de Grésin (PK 178-170) sont le siège d'un dépôt en période d'interchasse. Le comportement de cette zone diffère selon les opérations de chasse : les périodes marquées par un bilan négatif de la zone sont la période 1969-1984, qui inclut la chasse 1978, et les chasses de 1984, 1990, 1997, 2003. Pour les chasses de 1965, 1987 et 1993, le bilan est quasiment nul sur le tronçon. Pour les chasses de 2000 et 2012, le dépôt domine. En période d'interchasse, l'intensité des dépôts est généralement plus importante à l'aval de Bellegarde sur Valserine que sur le reste de la retenue. Pour la période 1969-1984 des dépôts importants de l'ordre de 2,5 millions de m³ sont observés dans le Canyon d'Arlod entre le PK 168 et le barrage. Cette période inclut des périodes d'interchasse et la chasse de 1981, pour lesquelles un bilan positif est calculé. La dynamique de cette zone diffère selon les opérations de chasse. Pendant les chasses de 2012 et 2000, elle présente une faible évolution globale. Pour les autres périodes de chasses, un dépôt important se forme à l'aval, à partir des points repérés sur la figure 3.18 b). Pour les chasses, le dépôt correspondant à la phase de régulation, part du barrage et s'étendant plus ou moins vers l'amont selon les apports des retenues suisses et la gestion de la retenue de Génissiat.

TABLEAU 3.12 – Tendance des évolutions morphologiques observées pour différents tronçons de la retenue de Génissiat.

Période	Tendance des évolutions morphologiques observées							
	PK 187-185	PK 185-180	PK 180-178	PK 178-169,5	PK 169,5-162,2			
chasse	Dépôt	Dépôt	Ø, Dépôt 2000, 2012	Variable	Dépôt			
interchasse	Érosion	1954-1961	Ø	Dépôt	Dépôt			



FIGURE 3.18 – Volumes nets cumulés le long de la retenue sur les périodes : a) 1954-1984, b) 1984-2012 (les cercles localisent le point de la partie aval où l'intensité du dépôt varie).

3.5.4.2 Volumes nets cumulées issus du chenal

Le fond de la retenue présente des volumes cumulés avec une évolution qualitative très proche des volumes nets cumulés. Quantitativement, les volumes mis en jeu au niveau du fond représentent environ 80% des volumes totaux. Le fond est de loin le contributeur principal de la retenue en terme de dynamique sédimentaire. Le lit du Rhône dans la retenue de Génissiat est en effet principalement localisé dans un canyon étroit encadré par des berges à fortes pentes (Figure 3.8). Du fait de cette configuration, les dépôts se produisent soit au fond du chenal, soit sur les terrasses planes qui dominent parfois le thalweg (Figure 3.7.a).

3.5.4.3 Volumes nets cumulées issus des berges

On peut aussi distinguer la contribution des berges (Figure 3.19). A l'amont de la retenue, l'apport des berges est négligeable, sauf localement, avec l'envasement et la végétalisation d'un banc en rive gauche au PK 183,05 entre 1954 et 1961, ou bien l'érosion en rive gauche au PK 184,38 au cours de la période 1969-1984 et l'effondrement de la berge gauche au PK 181,9 pendant la période d'interchasse 1997-2000. En sortie des gorges de Léaz, au PK 173 environ, la contribution des berges est plus importante. On observe un phénomène de compensation entre les chasses et les périodes d'interchasse. Globalement, les chasses sont favorables à une érosion des sédiments déposés le long des berges et les périodes d'interchasse sont favorables au dépôt. Le phénomène contraire est observé pour les chasses de 2000 et 2012, avec du dépôt sur les berges. De même, les berges sont plutôt érodées durant les périodes d'interchasse 1993-1997 et 2000-2003. Pour la période 2000-2003, la dynamique est proche de la dynamique des dépôts observés au cours de la chasse 2000. Près du barrage, peu d'évolutions ont lieu à cause de la configuration rocheuse et pentue des berges.



FIGURE 3.19 – Volumes nets cumulés issus des berges le long de la retenue sur les périodes : a) 1954-1984, b) 1984-2012.

3.5.5 Premières conclusions sur la dynamique de la retenue

L'analyse granulométrique a mis en évidence le fait qu'une large gamme de tailles de sédiments est présente dans la retenue. Ce résultat suggère que les modes de transport de sédiments dans la retenue sont variés, incluant une suspension des sédiments les plus fins et un charriage des plus grossiers. A la lumière des caractéristiques morphologiques de la retenue, une interprétation des bilans bathymétriques est proposée.

3.5.5.1 Périodes d'interchasse

La retenue de Génissiat faisant suite à une série de deux barrages sur le Rhône suisse, l'apport de sédiment grossiers provenant de l'amont est limité en période d'interchasse. Les sédiments en place dans le bief amont et l'Étournel sont grossiers et sont transportés plutôt par charriage.

La zone amont est généralement assez stable avec une légère tendance à l'érosion observée qui suggère l'occurrence de conditions permettant la remobilisation des sédiments. La granulométrie des sédiments du fond et leur organisation (armurage voire pavage) indiquent que le seuil de mise en mouvement des sédiments du fond est relativement élevée et que le tronçon a atteint un équilibre statique [Ramez et Paquier, 2004]. Dans ces conditions, seuls des débits élevés permettent de mobiliser la structure du lit [Carling, 1988].

L'évolution du bilan sédimentaire dans l'Étournel ainsi que les photographies aériennes montrent que la zone est plus dynamique, et qu'elle a été fortement influencée par la mise en eau de la retenue ainsi que par les extractions de granulats. La zone de transition Étournel/canyon ainsi que le défilé de l'Écluse ont une géométrie stable en interchasse et leur bilan sédimentaire est nul. Les sédiments en place forment un armurage et sont trop grossiers pour être érodés. Cet armurage semble résulter de l'érosion sélective des sédiments les plus fins par un écoulement peu chargé [Parker et Sutherland, 1990].

A partir des gorges de Léaz, un exhaussement est observé en période d'interchasse au niveau du chenal et les dépôts sur les berges deviennent importants en aval de Grésin. La zone de dépôt s'étend jusqu'au barrage. Néanmoins, la granulométrie et l'évolution des sections en travers suggèrent que des processus différents sont en jeu à l'amont et à l'aval. Ainsi, jusqu'au PK 170,2, les dépôts au fond contiennent une part importante de sable. L'évolution de la géométrie n'est pas homogène sur toute la section, traduisant l'influence des structures d'écoulement sur la morphodynamique. Dans cette zone, le transport des sables semble donc s'effectuer proche du fond, par charriage ou suspension graduée.

Au contraire, en aval de Bellegarde, les sédiments sont déposés par couches horizontales et sont des argiles et limons. Cette observation suggère que c'est la décantation de sédiments fins qui est à l'origine des évolutions morphologiques et du bilan bathymétrique à l'aval.

3.5.5.2 Chasses

Le bilan sédimentaire issu des chasses traduit la dynamique résultante de la conjonction de la phase d'abaissement de la retenue à un niveau plus ou moins bas, suivie depuis 1997 d'un palier à cote basse, et de la phase de régulation des flux sédimentaires provenant des retenues suisses. On observe un léger dépôt au niveau du tronçon amont, que l'on peut attribuer à la seconde partie de la chasse qui correspond au transit des sédiments les plus grossiers issus des retenues suisses. Le même phénomène est observé dans l'Étournel. Ainsi, la relative stabilité à long terme des tronçons amont s'explique par la dynamique inverse observée entre les périodes de chasse et les périodes d'interchasse. La zone de transition Étournel/canyon ainsi que le défilé de l'Écluse ont un comportement similaire en chasse et en interchasse. Dans les gorges de Léaz et Grésin, la dynamique est très variable selon les événements, avec du dépôt ou de l'érosion observés. Le bilan final est dépendant de la gestion de la retenue au cours des deux étapes des chasses. Dans le tronçon aval, le dépôt est prédominant, et correspond à la décantation de sédiments fins. L'abaissement de la retenue diminue la stabilité des berges qui montrent une tendance à l'érosion.

3.6 Analyse des conditions d'écoulement dans la retenue

3.6.1 Objectifs de la modélisation

Le modèle hydraulique 1D est utilisé dans un premier temps pour décrire les écoulements dans la retenue de Génissiat et compléter l'analyse morphologique. Un modèle de la retenue de Seyssel est aussi développé. Ces modèles s'inscrivent dans le modèle du Rhône du Léman à la mer mis en place dans le cadre de l'OSR (Observatoire des sédiments du Rhône).

Une approche unidimensionnelle pour la modélisation a été retenue à cause de la configuration de la retenue, des données disponibles et des objectifs de la modélisation. De plus, des modèles 1D de la retenue ont déjà été développés [Bouchard *et al.*, 1999; Dumond, 2001; Wolf, 2011; Boussafeur, 2012] et ont montré des résultats satisfaisants.

3.6.2 Présentation des codes de calculs hydrauliques

Deux codes de calculs hydrauliques développés a Irstea sont utilisés, les modèles MAGE [Faure, 2012] et RUBAR3 [Paquier, 2013].

MAGE et RUBAR3 sont des codes de calcul mono-dimensionnels d'écoulements en rivière en régime transitoire. Ils résolvent les équations de Barré de Saint-Venant [1871] en formulation section-débit : Équation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q - \frac{\partial A_M}{\partial t}$$
(3.12)

Équation de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} = -gA(J + J_s) + kqU$$
(3.13)

où t est le temps (s), x est l'abscisse en long (m), A est la section mouillée (m²), Q est le débit (m³/s), Z (m) est la cote de la surface libre, U (m/s) la vitesse moyenne : U = Q/S, β est le coefficient de quantité de mouvement, g est l'accélération de la pesanteur (m/s²), J est la perte de charge par frottement, J_s est la perte de charge singulière, q représente les pertes ou apports latéraux (m²/s) (ruissellement, pluie, déversements, échanges avec le lit majeur) et k = 1 si q < 0, k = 0 sinon.

La géométrie de la rivière est définie par des profils en travers et le lit est divisé en un lit mineur et un lit moyen, voire éventuellement un lit majeur (casier). La différence des vitesses entre lit mineur et lit moyen est simulée à partir de la formule Debord [Nicollet et Uan, 1979]. Le frottement est calculé à partir de la formule de Manning-Strickler. Les élargissements brusques sont repérés par les codes sur des critères géométriques et sont simulés par une perte de charge dite singulière.

La principale différence entre les deux codes de calcul réside dans le schéma numérique de résolution des équations. Dans MAGE, les équations de Barré de Saint-Venant sont discrétisées selon un schéma aux différences finies semi-implicite (Preissman), qui ne permet de traiter que les écoulements sous-critiques. Pour les écoulements localement supercritiques, le modèle d'onde diffusive est utilisé. Dans RUBAR3, les équations sont résolues par une méthode explicite. Cette dernière utilise un schéma de type Godunov du second ordre. A chaque pas, le problème de Riemann est résolu de façon approchée grâce à une linéarisation de Roe. Le code RUBAR3 est adapté pour calculer des écoulements incluant des passages en régime torrentiel ou des variations brutales des conditions hydrauliques. De fait, l'utilisation du modèle MAGE peut être éventuel-lement remise en cause en cas de simulation d'événements de chasse hydraulique avec passage

local en régime torrentiel. La comparaison des résultats avec le modèle RUBAR3 permet d'assurer la validité du calcul.

Ces codes servent aussi de base aux modèles sédimentaires (ADIS-TS, RUBARBE) utilisés dans la suite de la thèse.

3.6.3 Construction des modèles

Le modèle hydraulique de la retenue de Génissiat s'étend de l'aval du seuil de Pougny (PK 186,42) à l'amont du barrage de Génissiat (PK 162,2) et le modèle du tronçon Génissiat-Seyssel s'étend du PK 161,9 au PK 151,74. Pour chaque événement simulé, la géométrie des modèles a été établie à partir des relevés bathymétriques antérieurs les plus proches de l'événement, corrigés d'après la méthode décrite au paragraphe 3.2.2.1.

Pour le calage basé sur les lignes d'eau de 2006 à 2008 (Tableau 3.1), les profils relevés en décembre 2011 ont été utilisés. Des profils supplémentaires mesurés au cours de la campagne de septembre 2003 ont été ajoutés. Les modèles sont construits à partir d'environ 120 profils en travers mesurés, répartis entre Pougny et le barrage de Génissiat et 45 profils en travers répartis du barrage de Génissiat au barrage de Seyssel.

Le logiciel Fudaa Modeleur [Lacombe et Pasteur, 2008] est ensuite utilisé pour corriger les sections en travers en ajoutant des points au dessus de l'eau, ou en interpolant les points mesurés dans la section. Des lignes directrices sont aussi définies : une ligne reliant les thalwegs, et une ligne reliant les limites berge/chenal de la rive gauche et une pour la rive droite (cf Figure 3.16). Des lignes supplémentaires ont aussi été définies localement afin de de conserver certaines formes du lit, comme les îles ou les bancs avec des chenaux secondaires. Le maillage est obtenu par l'interpolation des sections en travers avec un pas d'espace de 100 m. La géométrie des sections est séparée en lit mineur et lit moyen.

3.6.4 Calage des modèles

Le calage du modèle se base sur le calage des coefficients de frottement des lits mineurs et moyens et de perte de charge du modèle afin de reproduire des lignes d'eau mesurées. Les lignes d'eau n'étant pas relevées simultanément sur les deux retenues, le calage hydraulique est réalisé séparément sur les sous-modèles.

3.6.4.1 Calage du modèle de la retenue de Génissiat

Stratégie de calage

La retenue est d'abord découpée en tronçons présentant des caractéristiques homogènes : morphologie, largeur, substrat sédimentaire.

La valeur du coefficient de Strickler de peau, qui correspond à la part du frottement causée par la rugosité du fond peut être estimée par la formule de Meyer Peter et Müller [1948] :

$$K_p = 26/d_{90}^{1/6} \tag{3.14}$$

Le coefficient de Strickler de peau donne une indication sur la valeur du coefficient total. Arcement et Schneider [1989] ont aussi proposé une méthode permettant d'estimer le coefficient de Strickler total en prenant en compte la nature du fond, la géométrie du cours d'eau ou encore la présence de végétation. Un premier jeu de paramètres est créé à partir de ces valeurs.

Les valeurs des coefficients sont affinées à partir de la ligne d'eau relevée en exploitation normale en janvier 2008 (Tableau 3.1). Parmi les lignes d'eau sélectionnées, cette ligne d'eau présente la cote au barrage la plus faible, c'est la moins sensible au coefficient frottement du lit moyen. Le calage est ensuite affiné, en particulier pour les valeurs de frottement dans le lit moyen avec le scénario de juillet 2007, qui est caractérisé par une cote plus élevée. Le calage est ensuite validé sur le scénario de septembre 2006.

Les lignes d'eau en régime permanent sont décrites par de nombreux points entre Pougny et l'Étournel sur cette zone et permettent un calage précis. A l'aval, l'écoulement est influencé par le remous et ne permet pas un calage précis des coefficients.

Calage du modèle

Le calage retenu est présenté tableau 3.13. Globalement, les valeurs des coefficients de frottement appliquées dans de modèle au niveau du lit mineur $K_{m,mod}$ sont proches des valeurs prédites par la théorie $K_{m,th}$, sauf dans la zone de transition entre la plaine alluviale et le canyon et l'amont des gorges entre les PK 181,95 et 174,05. Une perte de charge locale est observée au niveau de l'entrée de Bellegarde sur Valserine, et qui peut être attribuée à la géométrie particulière de la confluence, ou encore à la présence de vestiges d'aménagements anciens, notamment l'usine de Bellegarde. Elle est codée dans le modèle avec une perte de charge linéaire de 5 m^{1/3}/s en lit mineur et moyen. Dans le lit moyen, une valeur plus élevée $K_{M,mod}=30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ est appliquée dans la zone où la rivière s'écoule dans ses alluvions que dans la partie rocheuse $K_{M,mod}=20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Tronçon	Géométrie	Granulométrie	Type de	$K_{m,th}$	$K_{m,mod}$	$K_{M,mod}$
		du lit mineur	lit moyen	$(m^{1/3}/s)$	$(m^{1/3}/s)$	$(m^{1/3}/s)$
186,42-185,6	tronçon étroit	graviers	lit alluvial	29-36	30	30
	courbé					
185,6-183,94	tronçon étroit	graviers	lit alluvial	29-36	33	30
	rectiligne					
183,94-181,95	îles, bancs	graviers	lit alluvial	29-36	35	30
	chenaux sec.	sables				
181,95-178,05	transition	graviers	transition	28-38	20	20
	canyon		canyon			
178,05-174,05	canyon	sables	roche	31-50	25	20
174,05-169,45	canyon	sables, limons	roche	31-50	40	20
169,45-169,25	Confluence	limons, sables	roche	31-50	5	5
169,25-162,2	canyon	limons	roche	31-50	40	20

TABLEAU 3.13 – Tronçons définis pour le calage hydraulique de la retenue de Génissiat.

Les lignes d'eau simulées sont généralement proches des lignes d'eau mesurées. Il n'y a pas de différence significative entre les résultats des modèles MAGE et RUBAR3. Pour les trois scénarios, on observe cependant des différences entre la simulation et la mesure au niveau des PK 183,35 et 182,98. Ces sections sont situées dans la zone de l'Étournel, qui présente une géométrie assez complexe et très variable dans l'espace, avec la présence de bancs et de chenaux secondaires (cf paragraphe 3.4.3). En particulier, la géométrie de ces sections n'a pas été relevée et ces sections ne sont pas représentées dans le modèle. La valeur simulée correspond à l'interpolation entre les deux sections de calcul entourant ce point.



FIGURE 3.20 – Comparaison des lignes d'eau de la retenue de Génissiat mesurées et simulées pour le régime d'exploitation normale : a) 2008 $Q=475 \text{ m}^3/\text{s}$, b) 2006 $Q=577 \text{ m}^3/\text{s}$, c) 2007 $Q=891 \text{ m}^3/\text{s}$.

Sensibilité du modèle au calage

Une analyse de sensibilité du modèle au calage hydraulique a été réalisée à partir du modèle MAGE pour la ligne d'eau de janvier 2008. Différents jeux de paramètres de calage sont testés, de façon à mettre en évidence l'impact du calage des coefficients dans les lits mineurs et moyens sur les lignes d'eau (Tableau 3.14). En particulier, le test de référence correspondant au calage présenté tableau 3.13 (test 2008-1) est comparé au test correspondant au calage basé sur des considérations théoriques (test 2008-2), aux tests avec des calages correspondant au calage de référence \pm 10% sur toute la retenue (tests 2008-3 et 2008-4), à des tests correspondant à un calage présentant des variations locales des coefficients du lit moyen (tests 2008-5 et 2008-6) et du lit mineur dans la partie aval (tests 2008-7 et 2008-8) et de la perte de charge en amont de Bellegarde (test 2008-9).

Les résultats des tests sont évalués en comparant la hauteur d'eau modélisée à la hauteur d'eau mesurée. L'erreur quadratique moyenne RMSE représente l'écart type entre le modèle et

la mesure, elle est évaluée par :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_h} (h_{i,mod} - h_{i,mes})^2}{N_h}}$$
(3.15)

où $h_{i,mod}$ et $h_{i,mes}$ sont les hauteurs d'eau modélisée et mesurée au point i, N_h est le nombre de mesures.

TABLEAU 3.14 – Jeux de paramètres de calage testés avec le modèle (les valeurs en gras sont celles qui différent des valeurs du jeu de référence).

Tronçon		K_m - $K_M \; ({ m m}^{1/3}/{ m s})$							
	2008-1	2008-2	2008-3	2008-4	2008-5	2008-6	2008-7	2008-8	2008-9
186,42-185,6	30-30	33-33	27 -30	33 -30	30- 20	30-30	30-30	30-30	30-30
185,6-183,94	33-30	33- 33	30- 30	36- 30	33- 20	33-30	33-30	33-30	33-30
183,94-181,95	35-30	33-33	31 -30	39 -30	35- 20	35-30	35-30	35-30	35-30
181,95-178,05	20-20	33-33	18- 20	22 -20	20-20	20- 30	20-20	20-20	20-20
178,05-174,05	25-20	40-40	22 -20	28 -20	25-20	25- 30	25-20	25-20	25-20
174,05-169,45	40-20	40-40	44- 20	36- 20	40-20	40 -30	30 -20	70 -20	40-20
169,45-169,25	5-5	40-40	4-4	6-6	5-5	5-5	5-5	5-5	10-10
169,25-162,2	40-20	40-40	44- 20	36 -20	40-20	40- 30	30 -20	70 -20	40-20

Le test de référence 2008-1 et le test 2008-7 ($K_m=30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ dans la partie aval) présentent les meilleurs résultats, avec le plus faible RMSE, et le plus grand nombre de hauteur d'eau reproduites (Tableau 3.15). Ces deux calages diffèrent peu. En particulier, le coefficient de Strickler du lit mineur dans la partie aval n'a pas beaucoup d'influence sur les lignes d'eau. Aucun des calages testés ne permet de reproduire correctement les hauteurs d'eau aux PK 183,35 et 182,98.

TABLEAU 3.15 – Analyse de sensibilité du modèle au calage hydraulique sur la ligne d'eau de 2008 (les cellules jaunes mettent en évidence les hauteurs d'eau correctement reproduites au regard des incertitudes (± 5 cm)).

Section]	Hauteur o	l'eau (m)				
	mesure	2008-1	2008-2	2008-3	2008-4	2008-5	2008-6	2008-7	2008-8	2008-9
186,15	4,58	4,69	$4,\!57$	$4,\!58$	4,83	4,93	4,69	4,69	4,69	4,69
185,75	4,58	4,52	4,45	4,42	4,64	4,74	4,52	4,52	4,52	4,52
185,54	$3,\!51$	$3,\!51$	$3,\!46$	3,36	3,67	3,71	$3,\!51$	$3,\!51$	3,51	$3,\!51$
185,31	$5,\!69$	$5,\!56$	5,52	5,45	5,7	5,73	$5,\!55$	5,56	5,56	$5,\!56$
184,99	4,43	4,33	4,29	4,24	4,44	4,49	4,32	4,33	4,33	4,33
184,71	3,5	$3,\!45$	3,41	3,39	$3,\!54$	$3,\!62$	$3,\!45$	$3,\!45$	$_{3,45}$	$3,\!45$
183,93	3,3	$3,\!34$	$3,\!28$	$3,\!26$	3,49	3,46	3,31	$3,\!34$	$3,\!34$	$3,\!33$
183,35	4,07	3,77	3,51	$3,\!68$	3,9	$3,\!85$	$3,\!68$	3,78	3,76	3,74
182,98	4,52	4,72	4,38	4,63	4,83	4,78	4,6	4,73	4,71	4,69
181,29	$5,\!98$	6	$5,\!55$	$5,\!93$	6,1	6	$5,\!86$	6,02	$5,\!99$	$5,\!96$
180,43	8,09	8,15	7,76	8,08	8,23	8,15	8,02	8,17	8,13	8,1
180,1	8,91	$8,\!92$	8,57	$8,\!86$	9	$8,\!92$	8,81	8,94	8,91	8,87
179,59	12,05	$12,\!05$	11,76	12	12,11	$12,\!05$	11,95	12,06	$12,\!03$	11,99
178,56	11,98	11,92	11,7	11,88	$11,\!97$	$11,\!92$	11,86	11,94	11,9	11,86
177,86	12,59	$12,\!57$	$12,\!39$	$12,\!54$	$12,\!61$	$12,\!57$	$12,\!52$	$12,\!59$	$12,\!55$	12,51
169,45	24,08	24,01	23,93	$23,\!99$	$24,\!04$	24,01	24,01	24,02	24	23,96
162,57	38,01	38,01	38,01	38,01	38,01	38,01	38,01	38,01	38,01	38,01
RMSE		0,106	0,248	0,143	0,132	0,145	0,127	0,106	0,108	0,115

L'impact des coefficients en lit moyen a aussi été évalué pour le scénario de juillet 2007, présentant un débit et une cote plus élevés. Le calage de référence donne un RMSE de 0,07. L'utilisation d'un coefficient de Strickler pour le lit moyen $K_M=30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ partout dégrade les résultats (RMSE=0,12) et sous-estime les hauteurs d'eau dans la partie aval. Inversement, l'utilisation d'un coefficient de Strickler pour le lit moyen $K_M=20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ partout dégrade les résultats (RMSE=0,12) et sous-estime les hauteurs d'eau dans la partie aval. Inversement, l'utilisation d'un coefficient de Strickler pour le lit moyen $K_M=20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ partout dégrade les résultats (RMSE=0,194) et sur-estime les hauteurs d'eau dans la partie amont.

L'impact du calage du coefficient de Strickler pour la partie aval n'ayant pas d'influence sur les lignes d'eau en régime permanent, son impact est analysé pour un régime non permanent, à partir de la propagation d'un pic de débit lors d'un épisode de chasse. Le débit modélisé au niveau du barrage est comparé au débit reconstitué à partir des ouvertures des vannes (Figure 3.21). La propagation est bien reproduite par les différents calages. Néanmoins, le calage utilisant un coefficient $K_m=70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ produit des instabilités dans la chronique de débit sortant.



FIGURE 3.21 – Débits reconstitué et modélisés entre le 08/06/2012 et le 09/06/2012.

3.6.4.2 Calage du modèle de la retenue de Seyssel

Le découpage en tronçons a été réalisé en fonction de la géométrie de la retenue. Un seuil naturel est observé au PK 158,295, il est modélisé dans le modèle par un ouvrage de type « seuil » :

$$Q = \mu W_d \sqrt{2}g h_{am}^{3/2} \text{ en régime dénoyé, soit } h_{av} < \frac{2}{3} h_{am}$$
(3.16)

$$Q = \mu \frac{3\sqrt{3}}{2} W_d \sqrt{2} g W_d h_{av} \sqrt{h_{am} - h_{av}} \text{ en régime noyé, soit } \mathbf{h}_{av} \ge \frac{2}{3} \mathbf{h}_{am}$$
(3.17)

où Q est le débit, $\mu=0,4$ est le coefficient de débit, $W_d=177$ m est la largeur déversante, g est l'accélération de la pesanteur, h_{am} est la hauteur d'eau amont et h_{av} est la hauteur d'eau aval. La cote de déversement a été fixée à 259,8 m.

Les valeurs calées des coefficients de Strickler par tronçon sont présentées tableau 3.16.

PK Rhône	Granulométrie	Géométrie	K_m	K_M
			$(m^{1/3}/s)$	$(m^{1/3}/s)$
$162 \text{-} 161,\!51$	graviers	fosse aval barrage	15	10
161, 51-159, 3	graviers	tronçon étroit, rectiligne	30	20
159, 3-151, 7	graviers et sables	tronçon plus large	30	20

TABLEAU 3.16 – Tronçons définis pour le calage hydraulique de la retenue de Seyssel.

Le calage de la retenue de Seyssel est basé sur des lignes d'eau assez anciennes mesurées en régime permanent alors que la géométrie utilisée est récente. Un bon accord est obtenu entre le modèle MAGE et les mesures (Figure 3.22). Pour la ligne datant de 1992, la ligne d'eau modélisée dans la partie amont est en dessous de la mesure, mais il s'agit du tronçon situé au niveau de la fosse en aval du barrage de Génissiat. Les données disponibles pour la géométrie de cette fosse datent de 2003, et la géométrie du modèle est peut-être assez éloignée de la géométrie correspondant à la ligne d'eau, pouvant expliquer cette différence.



FIGURE 3.22 – Comparaison des lignes d'eau de la retenue de Seyssel mesurées et simulées pour le régime d'exploitation normale : a) 1992 $Q=630 \text{ m}^3/\text{s}$, b) 1994 $Q=420 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.6.5 Paramètres hydro-sédimentaires pour l'analyse des conditions d'écoulement

L'analyse des conditions d'écoulement permet d'identifier les processus sédimentaires susceptibles d'être observés dans la retenue. Le modèle hydraulique 1D fournit des paramètres qui servent à l'interprétation de ces processus.

3.6.5.1 Largeur au miroir et rapport de forme

La largeur au miroir W est la largeur du cours d'eau au niveau de la surface libre. Le rapport de forme W/R_h , où R_h est le rayon hydraulique donne une idée de la capacité d'expansion latérale de l'écoulement. En augmentant progressivement la hauteur d'eau, si le paramètre diminue, c'est que la largeur ne varie pas de façon significative par rapport à la hauteur, et alors les berges sont plutôt verticales et l'écoulement confiné. Si le paramètre augmente, c'est que la largeur a évolué de manière significative. Les berges alors sont peu pentues ou l'écoulement passe d'un lit mineur à un lit moyen.

3.6.5.2 Nombre de Froude

Le nombre de Froude $F_r = U/\sqrt{gR_h}$, où U est la vitesse moyenne de l'écoulement, g est l'accélération de la pesanteur et R_h est le rayon hydraulique compare la vitesse moyenne de l'écoulement à la célérité des ondes de surface dans l'eau. Dans un écoulement, l'onde est propagée aux vitesses $U \pm \sqrt{gR_h}$.

Lorsque $F_r < 1$, l'écoulement est fluvial. $U + \sqrt{gR_h} > 0$ et $U - \sqrt{gR_h} < 0$, l'onde est donc propagée vers l'amont et vers l'aval. La masse d'eau aval influence l'écoulement en amont. Lorsque $F_r > 1$, l'écoulement est torrentiel. $U \pm \sqrt{gR_h} > 0$ et aucune information ne peut remonter le courant. En particulier, la cote de la ligne d'eau en aval d'un passage en écoulement torrentiel est sans effet sur l'écoulement situé en amont du passage.

Dans le cas de la retenue de Génissiat, lorsqu'une partie de l'écoulement est en régime torrentiel, l'hydrodynamique en amont n'est donc plus influencé par la cote au barrage, mais seulement par le débit venant de l'amont.

3.6.5.3 Contrainte de cisaillement

Le modèle hydraulique calcule la contrainte de cisaillement moyenne dans la section par la relation :

$$\tau = \rho g R_h J \tag{3.18}$$

où ρ est la masse volumique de l'eau, R_h est le rayon hydraulique et J est la perte de charge par frottement. La formule utilisée pour déduire la contrainte efficace est la formule de Meyer Peter et Müller [1948] :

$$\tau_{eff} = \tau \left(\frac{K}{K_p}\right)^{3/2} \tag{3.19}$$

où K est le coefficient de Strickler appliqué dans le modèle hydraulique et K_p est le coefficient de Strickler de peau, estimé par la formule de Meyer Peter et Müller [1948] (Équation 3.14).

Le calcul de la contrainte efficace repose sur de nombreuses approximations, puisque le coefficient de Strickler de peau utilisé ne prend en compte que la granulométrie du fond. La qualité de la description de la granulométrie peut être critiquée. De plus, le modèle hydraulique 1D ne fournit qu'une vision moyennée dans la section des paramètres calculés. Selon la forme de la section, les contraintes locales peuvent être assez différentes de la contrainte moyenne [Khodashenas et Paquier, 1999].

3.6.5.4 Contrainte critique de mise en mouvement

La contrainte critique τ_c est estimée à partir de la formule de Soulsby [1997] pour le paramètre de Shields critique :

$$\tau_c = (\rho_s - \rho)gd\frac{0, 24}{d_*} + 0,055(1 - \exp(-0, 02d_*))$$
(3.20)

où $d_* = d(g\Delta/\nu^2)^{1/3}$ est le diamètre adimensionnel du sédiment.

Pour les sédiments de diamètre inférieur à 100 μ m, cette formule donne une valeur quasiment constante pour la contrainte critique $\tau_c=0.15$ Pa.

3.6.5.5 Nombre de Rouse

Dans le but de déterminer le mode de transport des sédiments, le paramètre de Rouse est calculé à partir de la formule de Camenen [2007] pour la vitesse de chute des grains et de la contrainte de cisaillement moyenne en utilisant la relation $u^* = \sqrt{\tau/\rho}$. Dans le cas du nombre de Rouse, c'est la contrainte totale qui est représentative car il caractérise le transport à l'échelle de toute la colonne d'eau et pas seulement du fond.

3.6.6 Analyse en conditions d'interchasse

En condition d'exploitation normale, le niveau au barrage de Génissiat peut varier de 325 m à 330,7 m. Les débits entrants à Pougny peuvent varier d'environ 100 à 600 m³/s. En sortie du barrage de Génissiat, les débits peuvent varier de 18 m³/s pour le débit réservé à 750 m³/s pour le débit maximal turbinable. Ainsi un scénario avec un débit de 100 m³/s et un niveau aval de 330 m a été choisi pour reproduire un scénario d'interchasse correspondant à une faible production hydroélectrique. Ensuite, parmi la gamme de débits turbinés par le barrage, des débits de 300 et 600 m³/s ont été choisis et sont simulés avec des niveaux au barrage de 325 et 330 m. Un scénario de crue, avec un débit de 1200 m³/s, correspondant à une période de retour de 5 ans et un niveau au barrage correspondant à la consigne en crue est aussi modélisé. Les conditions hydrauliques sont calculées à partir du modèle basé sur la géométrie de décembre 2011. Un calcul supplémentaire a été réalisé à partir du modèle basé sur la géométrie d'avril 1984 pour analyser l'impact de l'envasement de la retenue. Dans le méandre de Bellegarde sur Valserine autour du PK 169,2, le faible coefficient de Strickler utilisé localement pour représenter une perte de charge singulière induit des valeurs non physiques de la contrainte et du nombre de Rouse calculés (Figures 3.25 et 3.27).

3.6.6.1 Largeur au miroir en conditions d'interchasse

Jusqu'au PK 184, la cote au barrage a peu d'influence sur l'écoulement et la largeur augmente avec le débit (Figure 3.23). Dans l'Étournel (PK 184 à 180), la largeur varie fortement en fonction du débit et aussi de la cote au barrage. L'écoulement est plus large pour des débits entrant et des cotes au barrage élevés (Q_{am} =1200 m³/s et Z_{av} =331,7 m), à cause de l'inondation des îles et bancs. A partir du PK 180, la largeur est seulement impactée par le niveau au barrage. Dans le canyon, les élargissements correspondent à la présence de petites vallées formées par des affluents. Au niveau du méandre de Bellegarde sur Valserine (PK 169), l'augmentation de la largeur avec la hauteur d'eau est peu notable, l'écoulement est confiné entre des parois presque verticales.



FIGURE 3.23 – Largeurs calculées pour différents scénarios d'interchasse.

3.6.6.2 W/R_h en conditions d'interchasse

Dans la zone de l'Étournel (PK 184 à 180), les évolutions du rapport W/R_h en fonction du le niveau au barrage ou du débit entrant sont très variables spatialement et mettent en évidence la complexité de la géométrie de la rivière (Figure 3.24). A partir du PK 180, le paramètre varie peu en fonction des conditions hydrauliques.



FIGURE 3.24 – Rapports W/R_h calculés pour différents scénarios d'interchasse.

3.6.6.3 Contrainte efficace en conditions d'interchasse

Parmi les gammes de débits et les niveaux au barrage correspondants à une exploitation normale du barrage, les scénarios ($Q_{am}=600 \text{ m}^3/\text{s}$, $Z_{av}=325 \text{ m}$) et ($Q_{am}=100 \text{ m}^3/\text{s}$, $Z_{av}=330 \text{ m}$) représentent respectivement le scénario le plus favorable et le moins favorable en termes de contraintes (Figure 3.25). Certains scénarios donnent lieu à des contraintes équivalentes sur des tronçons de la retenue influencés par le débit entrant et la cote au barrage, comme les scénarios ($Q_{am}=600 \text{ m}^3/\text{s}$, $Z_{av}=330 \text{ m}$) et ($Q_{am}=300 \text{ m}^3/\text{s}$, $Z_{av}=325 \text{ m}$) entre les PK 179 et 175 et les scénarios ($Q_{am}=600 \text{ m}^3/\text{s}$, $Z_{av}=325 \text{ m}$) et ($Q_{am}=1200 \text{ m}^3/\text{s}$, $Z_{av}=331,7 \text{ m}$) du PK 169 au barrage. En aval du PK 174, les contraintes correspondant à la gestion actuelle en crue ne sont pas très différentes de celles observées pour le scénario le plus favorable. A l'amont, le tronçon entre les PK 186 et 184 n'est pas sous influence du remous et la contrainte ne dépend que du débit. Entre les PK 184 et 181, dans la zone de l'Étournel les scénarios avec des niveaux au barrage de 325 m présentent des contraintes équivalentes.

Dans le bief amont jusqu'au PK 184, tous les scénarios testés sauf le scénario à faible débit $(Q_{am}=100 \text{ m}^3/\text{s}, Z_{av}=330 \text{ m})$ permettraient de mobiliser des graviers de diamètre inférieur au centimètre. Seul le scénario le plus favorable permettrait ce transport en aval du PK 184. Au PK 181,9, on observe une chute des contraintes qui coïncide avec le dépôt observé dans la section. Au niveau du défilé de l'Écluse, entre les PK 180 et 178, la mise en mouvement des sables moyens (d=400 µm) serait possible sauf dans le scénario à faible débit. Des sables grossiers (d=2 mm) pourraient même être mobilisés dans le cas le plus favorable. Dans cette zone, l'alternance de périodes à bas débits et à hauts débits semble fournir des conditions permettant d'éventuels dépôts puis reprises des sédiments, qui pourraient expliquer en partie la stabilité du bief. D'après les calculs, aucun sédiment ne pourrait être remobilisé en aval du PK 177, ce qui en fait une zone de dépôt privilégiée en cas d'apports sédimentaires.



FIGURE 3.25 – Contraintes efficaces calculées pour différents scénarios d'interchasse et contraintes critiques.

L'impact de l'envasement de la retenue sur les conditions hydrauliques a été analysé en modélisant le scénario (Q_{am} =600 m³/s, Z_{av} =330 m) avec des modèles numériques dont la géométrie correspond à deux dates différentes : avril 1984 et décembre 2011 (Figure 3.26). Dans la partie amont, jusqu'au PK 184 la contrainte simulée est plus forte pour la géométrie de 1984. La présence de la fosse d'extraction en 1984 entre les PK 184 et 183 est notable avec une diminution des contraintes causée par l'augmentation du tirant d'eau. Les deux modèles donnent des résultats équivalents jusqu'au PK 174. En aval, la contrainte est systématiquement plus faible avec la géométrie de 1984, pour laquelle les sections d'écoulement sont plus grandes. Le rapport des contraintes peut atteindre un facteur 5. Ce résultat qui se traduit par une augmentation de la capacité d'arrachement et de transport avec le comblement de la retenue, peut expliquer la diminution du volume annuel déposé en période d'interchasse entre 1984 et 2011 (cf paragraphe 3.5.3.4). En outre, de plus fortes contraintes permettent le transport de sédiments plus grossiers dans la partie aval qui se traduit sur le long terme par une augmentation de la granulométrie des dépôts.



FIGURE 3.26 – Contraintes efficaces calculées pour un scénario (Q_{am} =600 m³/s, Z_{av} =330 m) par deux modèles construits à partir de relevés bathymétriques datés de 1984 et 2011 respectivement.

3.6.6.4 Paramètre de Rouse en conditions d'interchasse

En période d'exploitation normale, le transport des sédiments de taille inférieure à 50 µm s'effectuerait par suspension homogène dans la partie amont de la retenue, jusqu'au PK 171 pour le cas le plus favorable mais seulement jusqu'au PK 184 (entrée de l'Étournel) dans le cas le plus défavorable (Figure 3.27).

A l'aval, les sédiments seraient transportés par suspension plus ou moins graduée, avec un risque de dépôt près du barrage. Néanmoins, si on se réfère à la figure 3.25, les contraintes efficaces montrent que la mise en mouvement n'est pas possible en aval du PK 183 dans le scénario à faible débit et aux environs du PK 177 pour les autres protocoles de gestion. Dans le scénario à faible débit, la transition vers des modes de transport proches du fond associé aux contraintes bien inférieures aux contraintes critiques suggèrent que les sédiments transportés seraient progressivement déposés vers l'aval. Pour un diamètre de 100 μ m, un débit de 600 m³/s permettrait le transport par suspension homogène jusqu'au PK 181, et un transport par suspension jusqu'à la vanne de fond. Pour un débit de 300 m³/s, le transport s'effectuerait par suspension graduée jusqu'au PK 164, puis par charriage. Dans le scénario à faible débit, les sédiments pourraient être transportés par suspension jusqu'en sortie de l'Étournel puis seraient progressivement déposés vers l'aval. Les sédiments de 400 µm seraient plutôt transportés par suspension jusqu'au PK 174 dans les cas les plus favorables, puis par charriage. A la lumière de la valeur assez faible des contraintes et de la taille de la zone concernée par le transport près du fond, on peut penser que les sédiments de 400 µm ont peu de chances d'atteindre le barrage lors d'une exploitation normale, mais qu'il peuvent être transportés jusque dans les gorges de Léaz au PK 176 environ, ce qui est cohérent avec la composition du lit observée (Figure 3.9).



FIGURE 3.27 – Nombres de Rouse calculés pour différents scénarios d'exploitation normale et différentes tailles de grains : a) 50 μ m, b) 100 μ m, c) 400 μ m.

3.6.7 Analyse en conditions de chasse

Les débits en chasse sont généralement compris entre $300 \text{ et } 600 \text{ m}^3/\text{s}$ et le niveau du barrage peut varier de 305 m à 320 m. Les conditions hydrauliques sont calculées à partir du modèle basé sur la géométrie de décembre 2011.

3.6.7.1 Largeur au miroir en conditions de chasse

Pour des cotes au barrage inférieures à 320 m, l'écoulement n'est pas influencé et la largeur ne dépend que du débit en amont du PK 177 (Figure 3.28). En aval, la largeur augmente avec le niveau d'exploitation. Pour un faible niveau d'eau (Z_{av} =305 m), l'écoulement est chenalisé. Lorsque le niveau augmente, la largeur peut augmenter localement, à cause de terrasses au niveau des berges ou d'affluents (Figure 3.7). A l'aval, la largeur augmente fortement. De faibles variations de la largeur sont observées autour des PK 173 et 169, l'écoulement est confiné entre des parois presque verticales.



FIGURE 3.28 – Largeurs au miroir calculées pour différentes conditions en chasse.

3.6.7.2 W/R_h en conditions de chasse

Les zones où le rapport W/R_h diminue significativement avec l'augmentation de hauteur d'eau sont les zones où les berges sont hautes et quasiment verticales et empêchent l'expansion latérale (Figure 3.29). Le rapport W/R_h met en évidence les zones très étroites comme les gorges de Grésin, le méandre de Bellegarde et le canyon d'Arlod.


FIGURE 3.29 – Rapports W/R_h calculées pour différentes conditions en chasse.

3.6.7.3 Nombre de Froude en conditions de chasse

Pour un niveau au barrage supérieur à 315 m, le régime d'écoulement est fluvial sur l'ensemble de la retenue (Figure 3.30). Pour un niveau à 305 m, le nombre de Froude augmente fortement. L'écoulement devient localement torrentiel autour du PK 163,5. Des valeurs assez élevées sont aussi observées au niveau des PK 170,5, 166 et 165,5.



FIGURE 3.30 – Nombres de Froude calculés pour différentes conditions en chasse.

3.6.7.4 Contrainte efficace en conditions de chasse

Pour des cotes au barrage inférieures à 320 m, la zone amont et l'Étournel se situent en dehors de l'influence du remous (Figure 3.31). La mise en mouvement de graviers serait possible. On

observe une chute importante de la contrainte au niveau du PK 181,9 où se situe la fin de la grande île aval de l'Étournel. En cas d'apport solide amont, cette diminution des contraintes peut expliquer le dépôt mis en évidence par l'analyse bathymétrique (cf Figure 3.18). La zone en écoulement libre se prolonge jusqu'au PK 177 et la mise en mouvement des graviers serait toujours possible. En sortie du défilé de l'Écluse (PK 178), les sables d'une taille inférieure à 2 mm pourraient être mis en mouvement, sauf dans le cas d'un scénario à cote haute ($Q_{am}=300 \text{ m}^3/\text{s}$ et $Z_{av}=320 \text{ m}$). Une cote de retenue à 310 m permettrait la mise en mouvement des limons et sables fins jusqu'à l'entrée du méandre de Bellegarde. Si l'on fait exception des contraintes calculées à Bellegarde, une cote de retenue à 305 m permettrait la mise en mouvement des limons et sables fins jusqu'à la fosse en amont du barrage, ce qui est cohérent avec les observations près du barrage (cf paragraphe 3.3.3.2).



FIGURE 3.31 – Contraintes efficaces calculées pour différentes conditions en chasse et contraintes critiques.

3.6.7.5 Paramètre de Rouse en conditions de chasse

La figure 3.32 met en évidence la grande variabilité des modes de transport et de la granulométrie transportés au cours d'une chasse. Pour des niveaux inférieurs à 320 m, les grains de taille inférieure à 100 µm sont transportés par suspension presque homogène jusqu'au PK 174, puis par suspension plus ou moins graduée localement et selon le scénario sur le reste de la retenue. Dans la fosse à l'amont immédiat du barrage où se situe la vanne de fond, les contraintes diminuent fortement et le transport se fait plutôt par suspension graduée, voire charriage.

Les grains de 400 µm ne sont pas transportés par suspension homogène. Pour un abaissement à 305 m, le transport s'effectuerait par suspension graduée sur toute la retenue sauf près du barrage. Pour des niveaux plus élevés, les sédiments seraient transportés par charriage à l'aval du PK 168. Néanmoins, an aval du PK 174, les contraintes calculées pour le cas d'un débit de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ et un niveau de 320 m sont inférieures à la contrainte critique, suggérant que cette zone serait sujette au dépôt de sables transitant de l'amont pour des débits inférieurs à 300 m³/s et un niveau de 320 m.

Le paramètre de Rouse indique que les sédiments de 1 mm seraient transportés par suspension graduée jusqu'au PK 174, puis par charriage ensuite. Dans la zone située à l'aval du PK 170, la mise en mouvement de sédiments de taille supérieure à 1 mm ne serait pas possible, cette zone

constitue donc une zone de dépôt potentielle pour les sédiments de taille supérieure à 1 mm. A priori, peu de sédiments de 1 mm pourraient atteindre le barrage pour les conditions actuelles de chasse.



FIGURE 3.32 – Nombres de Rouse calculés pour différentes conditions en chasse et différentes tailles de grains : a) 100 µm, b) 400 µm, c) 1 mm.

3.6.8 Conclusions sur les processus

Les conditions d'écoulement et les évolutions morphologiques permettent de localiser les trois entités hydromorphologiques qui composent les retenues de forme allongée et de mettre en évidence les processus de ces entités [Thornton *et al.*, 1981] :

- le tronçon fluvial est situé de l'amont jusqu'au Pont Carnot. Le tronçon fluvial est caractérisé par une granulométrie du fond grossière. Jusqu'au PK 184, n'est pas très influencé par le remous du barrage et les processus sont principalement gouvernés par le débit. Les contraintes permettent de transporter des graviers par charriage et des sédiments plus fins par suspension. En période d'interchasse, les apports sont limités et de faibles évolutions bathymétriques sont observées depuis l'arrêt des extractions de granulats, ce qui suggère qu'un tri sélectif a lieu et forme un armurage, voire un pavage;
- la retenue amont est située entre les PK 180 et 172. Les sédiments en place sont des sables moyens. A cote haute, les hauteurs d'eau y sont plus importantes que dans le tronçon fluvial et les vitesses plus faibles. Les contraintes diminuent et le transport des sables par suspension est limité. Lors de l'abaissement de la retenue, les contraintes deviennent suffisantes pour éroder et transporter les sédiments en place;
- la retenue aval est située entre les PK 172 et le barrage. Le fond est composé de sédiments fins et de sables fins. A cote haute, les hauteurs d'eau sont importantes La remobilisation des fonds ne semble pas possible et les faibles vitesses et fortes hauteurs d'eau donnent lieu à une décantation d'une partie des sédiments arrivant de l'amont. Lorsque la retenue est abaissée, les contraintes permettent de mobiliser les sédiments en place et de transporter des sables fins et moyens issus de l'érosion des biefs amont.

3.7 Découpage hydro-morphologique de la retenue de Génissiat

3.7.1 Classification des cours d'eau

La classification consiste à découper un cours d'eau en entités sur la base de similarités [Bailey, 1994] et est généralement utilisée pour l'établissement de diagnostics géomorphologiques afin d'évaluer la qualité des milieux aquatiques ou dans le cadre de projets de restauration de cours d'eau. La classification permet en effet de mettre en évidence les fonctionnements physiques des entités. La définition d'entités homogènes s'effectue par détection de discontinuités longitudinales locales de variables hydro-morphologiques caractéristiques. Les rivières étant organisées de façon hiérarchique, les discontinuités sont observables à différentes échelles spatiales, du tronçon (échelle de la dizaine de kilomètres) au micro-habitat (échelle du décimètre) [Malavoi, 1989]. On trouve dans la littérature de nombreuses méthodes permettant la classification des cours d'eau non anthropisés. Une description des principales classifications est proposée par Malavoi et Bravard [2010] ou Latapie [2011].

3.7.2 Méthode de découpage

3.7.2.1 Principe de la méthode développée

La retenue de Génissiat étant caractérisée par une dimension longitudinale prédominante, un découpage longitudinal permet de définir une sectorisation représentative des variations spatiales de la retenue. L'application des méthodes de découpage traditionnelles à la retenue de Génissiat est néanmoins peu satisfaisante. En effet, un découpage basé sur le style fluvial uniquement, comme proposé par Melton [1936] ne permet pas de comprendre la morphodynamique car des formes fluviales identiques peuvent être causées par des processus différents. De même les classifications faisant appel à la notion de débit de plein bord ou débit morphogène [Rosgen, 1994; Schmitt *et al.*, 2004] n'ont pas de signification particulière pour une retenue où les écoulements sont influencés par le niveau au barrage et dont la morphologie est façonnée à la fois par des épisodes de chasse et des périodes d'interchasse qui sont caractérisés par des conditions hydrauliques très différentes. Afin d'obtenir un découpage de la retenue qui permette de mettre en évidence l'importance et l'activité des processus, la méthode proposée s'appuie sur plusieurs familles de paramètres :

- le style fluvial, correspondant à un découpage classique,
- des paramètres hydrodynamiques, estimés pour des scénarios hydrauliques représentatifs des écoulements dans la retenue en chasse (niveau bas) et en période d'interchasse (niveau haut),
- les évolutions morphologiques consécutives aux épisodes de chasse et d'interchasse.

3.7.2.2 Détection des discontinuités

Deux méthodes de détection des discontinuités sont proposées. La méthode visuelle est couramment utilisée par les géomorphologues. Néanmoins, elle peut sembler subjective puisqu'elle est basée sur l'appréciation humaine. Une solution plus objective est l'utilisation d'algorithmes statistiques pour repérer les discontinuités et définir les tronçons homogènes d'un cours d'eau [Leviandier *et al.*, 2012]. Alors que la méthode visuelle permet de repérer des discontinuités pour une variable décrite à partir de différents supports (photographies, graphiques), la méthode statistique nécessite que la variable soit quantifiée et décrite de façon quasi-continue le long de la retenue.

3.7.2.3 Sélection des paramètres hydro-morphologiques

Sept types de paramètres hydro-morphologiques sont sélectionnés pour réaliser le découpage (Tableau 3.17). Les profils en long, la sinuosité et les bilans sédimentaires ont été estimés à partir des données bathymétriques (cf paragraphes 3.4.1, 3.3.1, 3.5). La largeur W, le rapport W/R_h et la contrainte τ sont calculées à partir du modèle hydraulique basé sur la géométrie de décembre 2011 pour un scénario jugé représentatif d'une période d'exploitation normale ($Q_{am}=600 \text{ m}^3/\text{s}$ et $Z_{av}=330 \text{ m}$) et pour un scénario d'abaissement de la retenue ($Q_{am}=300 \text{ m}^3/\text{s}$ et $Z_{av}=305 \text{ m}$) (cf paragraphes 3.6.6 et 3.6.7). Les deux méthodes ont en commun cinq paramètres, alors que la typologie des sections utilisée dans la méthode visuelle est remplacée par le rapport W/R_h dans la méthode statistique et que le tracé en plan utilisé dans la méthode visuelle est remplacé par la sinuosité dans la méthode statistique (Tableau 3.17).

TABLEAU 3.17 – Paramètres hydro-morphologiques sélectionnés pour le découpage (\leftrightarrow signifie que les paramètres sont identiques pour les deux méthodes, \approx signifie que les paramètres sont différents entre les méthodes mais considérés comme équivalents).

	méthode visuelle		méthode statistique	Illustration
P1	Tracé en plan	\approx	Sinuosité	Figures
	(formes fluviales, sinuosité)			3.14, 3.8, 3.5
P2	Profils en long 1984 et 2012	\leftrightarrow	Profils en long 1984 et 2012	Figure 3.11
P3	Largeur	\leftrightarrow	Largeur	Figures 3.28, 3.23
	$(Q_{am}=300 \text{ m}^3/\text{s}, Z_{av}=305 \text{ m})$		$(Q_{am}=300 \text{ m}^3/\text{s}, Z_{av}=305 \text{ m})$	
	$(Q_{am}=600 \text{ m}^3/\text{s}, Z_{av}=330 \text{ m})$		$(Q_{am}=600 \text{ m}^3/\text{s}, Z_{av}=330 \text{ m})$	
P4	Typologie des sections	\approx	Rapport W/R_h	Figures
			$(Q_{am}=300 \text{ m}^3/\text{s}, Z_{av}=305 \text{ m})$	3.8, 3.29,
			$(Q_{am}=600 \text{ m}^3/\text{s}, Z_{av}=330 \text{ m})$	3.24
P5	8 Bilans sédimentaires	\leftrightarrow	8 Bilans sédimentaires	Figure 3.18 b
	chasses 1984-2012		chasses 1984-2012	
P6	7 Bilans sédimentaires	\leftrightarrow	7 Bilans sédimentaires	Figure 3.18 b
	interchasses 1984-2012	\leftrightarrow	interchasses 1984-2012	
P7	Contraintes	\leftrightarrow	Contraintes	Figures
	$(Q_{am}=300 \text{ m}^3/\text{s}, Z_{av}=305 \text{ m})$		$(Q_{am}=300 \text{ m}^3/\text{s}, Z_{av}=305 \text{ m})$	3.31
	$(Q_{am}=600 \text{ m}^3/\text{s}, Z_{av}=330 \text{ m})$		$(Q_{am}=600 \text{ m}^3/\text{s}, Z_{av}=330 \text{ m})$	3.25

Alors que les paramètres issus des calculs bathymétriques sont exprimés au droit des sections en travers du Rhône, les paramètres issus du modèle numérique sont calculés aux points du maillage numérique. Afin que tous les paramètres soient exprimés sur la même base spatiale, les discontinuités observées sur les paramètres du modèle numérique sont attribuées à la section en travers du Rhône la plus proche. Lorsqu'un paramètre hydro-morphologique est décliné en plusieurs variables correspondant aux différents scénarios hydrauliques ou aux différentes périodes, on attribue aux sections représentant des discontinuités une pondération en fonction du nombre de variables qui ont révélé cette discontinuité. Ainsi chaque paramètre (P1,...,P7) a le même poids dans le découpage.

3.7.3 Découpage visuel

Les discontinuités ont été relevées visuellement sur les 7 paramètres choisis. Le bilan est présenté tableau 3.18. Étant donné que la bathymétrie d'avril 1997 ne prend pas en compte l'amont de la retenue, les discontinuités dans cette zone ne sont comptées que parmi 7 et 6 bilans bathymétriques, respectivement en chasse (P5) et en interchasse (P6). Au total 30 sections présentent des discontinuités. Certaines discontinuités sont mises en évidence par de nombreux paramètres, comme le PK 184,16 qui correspond à l'entrée dans la zone de l'Étournel, le PK 182,15 qui marque la transition entre la grande île aval et le chenal unique, le PK 180,2 proche duquel est situé le Pont Carnot et l'entrée dans le canyon du Rhône, ou encore le PK 169,5 qui correspond à la confluence avec la Valserine. D'autres discontinuités sont moins marquées et ne sont observables que sur le bilan bathymétrique ou le profil en long. Parmi les sections mises en évidence, il y a des sections qui se succèdent. Il s'agit de zones de transition sur lesquelles les discontinuités sont réparties sur plusieurs sections. Les sections successives sont regroupées au niveau de la section qui présente le plus grand nombre de discontinuités. Finalement, 17 discontinuités sont conservées et permettent de définir un découpage en 18 tronçons.

DV			Nomb	re de	discor	ntinuit	és		Sections retenues				
ΓΛ	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	total	Sections retenues				
185,76	1				4/7	2/6		1,9	185,76				
184,56		1/2						0,5	184,56				
184,16				1	6/7	5/6	1	3,7	184 16				
183,94	1	1/2						1,5	104,10				
183,57			1/2					0,5					
183,22	1	1/2						1,5	183,22				
182,85				1				1					
182,35		1/2						0,5					
182,15	1				7/7	6/7	1	$_{3,9}$	$182,\!15$				
181,9	1			1				1					
180,45		1						1	180.2				
180,2	1		1	1	7/8	7/7	1	5,9	100,2				
179,35		1						1	170.25				
179,07						2/8		0,25	179,55				
178,07					1/8	6/7		1	178,07				
177,2			1		1/8	5/7	1	1,8	177,2				
174,35		1			4/8	4/7		2,1	174,35				
172,05		1/2						0,5					
171,75			1/2			3/7		0,9	171,5				
171,5			1/2		4/8			1					
169,85		1/2						0,5	160 5				
169,5	1	1/2	1		5/8	5/7	1/2	4,4	109,5				
167,75	1		1/2		3/8	2/7	1/2	2,2	167,75				
166,46		1						1	165 02				
165,93					6/8	5/7	1/2	1,5	105,93				
165,1					1/8			0,13	165,1				
164						3/7		0,4	164				
162,97		1/2	1/2				1	2	162,97				

TABLEAU 3.18 – Discontinuités observées par la méthode visuelle.

3.7.4 Découpage statistique

3.7.4.1 Détection des discontinuités

L'objectif est le développement d'une méthode la plus objective possible, basée sur la recherche des discontinuités par des méthodes statistiques. D'après Alber et Piégay [2011] et Latapie et al. [2014], le test paramétrique de Pettitt [1979] permet de détecter des discontinuités d'une série de façon cohérente avec les méthodes classiques. Une série résultante dépendant des signes des différences entre les valeurs de la série est élaborée. Au maximum observé sur la série résultant correspond vraisemblablement la discontinuité. La discontinuité est jugée significative si la probabilité de dépassement de ce maximum est inférieure au seuil de signification α_P . La valeur $\alpha_P=0.05$ (5%), couramment utilisée est choisie pour ce test et sera discutée. Plus le seuil de signification est faible, plus il y a de chances que la probabilité ne soit pas significative.

Dans sa version originelle, le test ne permet de repérer qu'une seule discontinuité dans une série. Il a donc été programmé afin de fonctionner de manière itérative : une première discontinuité est repérée, puis à chaque étape le test est lancé sur les tronçons définis par les discontinuités détectées auparavant.

Un premier obstacle réside dans le choix du nombre d'itérations sur lesquelles le test doit être lancé. En effet, si le test est lancé sur trop peu d'itérations, il y a un risque de ne pas repérer des discontinuités importantes. Inversement, pour un grand nombre d'itérations lancées, les dernières discontinuités mises en évidence peuvent sembler peu significatives comparées aux premières. Afin d'analyser l'effet du nombre d'itérations et de la méthode (et donc du nombre de discontinuités relevées) sur le découpage, plusieurs méthodes sont testées :

- M1 : 3 itérations du test sont lancées, ce qui donne un nombre maximum de discontinuités par paramètre égal à 7. On suppose qu'il n'y a pas de hiérarchisation parmi ces discontinuités, elles ont toutes le même poids dans le découpage. 7 points sont donc attribués par paramètre,
- M2 : 4 itérations du test sont lancées, ce qui donne un nombre maximum de discontinuités par paramètre égal à 15. On suppose qu'il n'y a pas de hiérarchisation parmi ces discontinuités, elles ont toutes le même poids dans le découpage. Afin que 7 points soient toujours attribués par paramètre, le poids de chaque discontinuité est ramené à 7/15,
- M3 : 4 itérations du test sont lancées. Mais on suppose à présent qu'il existe une hiérarchisation parmi ces discontinuités, en fonction de l'itération du test à laquelle elles ont été identifiées. On propose la formule suivante pour le poids d'une discontinuité, en fonction du rang i de l'itération : p(i) = 7/4i, ce qui permet de garder un poids total par paramètre identique aux cas précédents ($\sum_{i=1}^{4} p(i) = 7$).

Pour chaque paramètre, le nombre de discontinuités trouvées est toujours égal au nombre maximum permis par le nombre d'itérations du test, respectivement 7 ou 15. Cela signifie que toutes ces discontinuités sont significatives au seuil $\alpha_P=0.05$.

Une analyse de sensibilité à la valeur du seuil de signification α_P a été menée. Un seuil plus faible, correspondant à $\alpha_P=0.01$ a aussi été testé et a donné des résultats identiques à ceux obtenus avec $\alpha_P=0.05$. Par conséquent, le facteur limitant le nombre de discontinuités repérées n'est pas la valeur du seuil de signification mais bien le nombre d'itérations du test.

3.7.4.2Sélection des sections

Parmi les sections présentant des discontinuités, il est nécessaire de sélectionner les sections les plus représentatives. Une valeur minimale du nombre de discontinuités détectées par section doit être fixée afin d'écarter les sections les moins significatives. Plusieurs valeurs sont testées pour apprécier l'effet de ce paramètre sur le découpage.

- V1 : seules les sections avec un nombre de discontinuités strictement supérieur à 1 sont conservées,
- V2 : seules les sections avec un nombre de discontinuités strictement supérieur à 0,75 sont conservées,
- V3 : seules les sections avec un nombre de discontinuités strictement supérieur à 0,5 sont conservées.

Neufs jeux de sections sont obtenus. Une analyse est réalisée concernant la valeur du seuil. Le nombre de sections obtenues dans les différents cas est présenté tableau 3.19.

TABLEAU 3.19 – Nombre de sections présentant des discontinuités.

seuil	M1	M2	M3
1	11	9	10
0,75	13	12	15
0,5	14	22	19

Un seuil égal à 1 peut être écarté car il fournit un nombre de sections trop faible par rapport au nombre de sections obtenues par la méthode visuelle. La différence entre les deux autres seuils est analysée plus précisément. Pour la méthode M1, la modification du seuil de 0,5 à 0,75 donne notamment lieu à l'élimination de la section correspondant à l'élargissement au niveau de Grésin

(PK 171,75), dans une zone où un brusque changement de granulométrie est observé. Pour la méthode M2, cette même section est éliminée, ainsi que la section correspondant à l'extrémité de la grande île aval de l'Étournel. Pour la méthode M3, ce sont les sections marquant la fin du défilé de l'Écluse et la confluence avec la Valserine qui sont éliminées. L'augmentation du seuil de 0,5 à 0,75 conduit à l'élimination de sections qui semblent jouer un rôle hydro-morphologique important. Un seuil de 0,5 est donc conservé.

3.7.5 Choix du découpage final

Les discontinuités définies par la méthode visuelle et les méthodes statistiques sont quelquefois décalées d'une section en travers, par exemple, la méthode visuelle met en évidence le PK 182,15, alors que la méthode statistique place les discontinuités au PK 182,35. Ce décalage s'explique facilement par la faible précision de la méthode visuelle. Afin de comparer les deux méthodes de découpage, ces sections ont été identifiées et le PK de la méthode visuelle a été corrigé. Le tableau 3.20 compare les jeux de tronçons obtenus par les différentes méthodes. Il y a 13 sections qui sont repérées par toutes les méthodes. Les sections mises en évidence par la méthode visuelle sont toujours repérées par la méthode M2. Il existe 2 sections aux PK 180,9 et 166,78 pour lesquelles tous les tests statistiques mettent en évidence des discontinuités, alors qu'elles n'apparaissent pas dans les sections retenues par la méthode visuelle. Finalement, les sections sélectionnées sont :

- les sections mises en évidence par la méthode visuelle et au moins une méthode statistique sont conservées;
- les sections non mises en évidence par la méthode visuelle mais repérées par toutes les méthodes statistiques.

Cette comparaison et les résultats qui en découlent sur le choix du découpage final soulignent l'utilité de la méthode statistique dans l'étape de repérage des discontinuités. Elle permet de localiser la position des changements de dynamique plus précisément qu'avec la méthode visuelle. Elle fait aussi ressortir des discontinuités plus difficiles à observer mais significatives en termes hydro-morphologiques.

PK	Visuel	M1	M2	M3	Final
185,76	Х		Х	Х	Х
184,71	Х	Х	Х	Х	Х
$184,\!16$	Х	Х	Х	Х	Х
$183,\!22$	Х	Х	Х	Х	X
$182,\!35$	Х	Х	Х	Х	X
180,9		Х	Х	Х	X
180,2	Х	Х	Х	Х	X
$179,\!58$	Х	Х	Х	Х	Х
$178,\!07$	Х	Х	Х	Х	Х
$177,\!35$	Х		Х		Х
$175,\!55$			Х	Х	
$175,\!07$		Х		Х	
$174,\!05$	Х		Х	Х	Х
171,75	Х	Х	Х	Х	Х
$169,\!25$	Х	Х	Х	Х	Х
$168,\! 6$			Х	Х	
167,75	Х	Х	Х	Х	Х
166,78		Х	Х	Х	Х
$165,\!93$	Х	Х	Х	Х	Х
165,4	Х		Х		Х
$164,\!27$			Х		
163,75	Х	X	Х	Х	X
$162,\!97$	Х	Х	Х	Х	X

TABLEAU 3.20 – Jeux de discontinuités obtenus par les méthodes visuelle et statistiques, jeu retenu.

3.7.6 Caractérisation hydro-morphologique des tronçons

Le découpage a permis la division de la retenue en tronçons présentant des caractéristiques hydro-morphologiques homogènes. Cette partie résume les caractéristiques principales de chaque tronçon. Les paramètres obtenus par section sont moyennés pour obtenir une valeur représentative sur le tronçon.

3.7.6.1 Caractéristiques géométriques

Le tableau 3.22 résume les caractéristiques géométriques des tronçons définis. La largeur correspond à la largeur calculée pour le scénario ($Q_{am}=600 \text{ m}^3/\text{s}$, $Z_{av}=330 \text{ m}$). Le découpage semble bien adapté à la géométrie de la retenue. En effet, deux tronçons successifs montrent des différences au niveau du profil en long, du tracé en plan, de la typologie des sections, de la largeur ou de la pente.

$d_{50} (\mathrm{mm})$	$\operatorname{surface}$	02				38		100				0,43	0,38	0,03				0,04	0,02		0,04
pente	fond (m/km)	0,96	0,78	1,53	1,23	1,23	1,1	1,68	3,0	0,67	1,94	1,38	0,21	1,37	1,08	0,08	0,37	1,11	1,38	3,48	1,13
largeur		80 m	90 m	140 m	150 m	300 m	400 m	220 m	110 m	80 m	110 m	100 m	90 m	140 m	70 m	180 m	150 m	120 m	140 m	150 m	$170 \mathrm{m}$
typologie	$\operatorname{section}$	chenal D	trap èze	trap èze	bancs	2 chenaux	radier G	radier G	canyon	canyon	canyon	canyon	canyon	canyon	canyon	canyon	canyon	canyon	canyon	canyon	canyon
tracé en	plan	courbe D	rectiligne	rectiligne	îles	grande île	rectiligne	rectiligne	rectiligne	rectiligne	courbe G	courbe D	rectiligne	rectiligne	courbes	rectiligne	rectiligne	courbes D-G	rectiligne	courbe G	courbe D
profil	en long	seuil,mouille	seuil, mouille	régulier	seuil, mouille	régulier	régulier	régulier	rupture	régulier	seuils, mouilles	seuils, mouilles	forte mouille	seuil	rupture	mouille	régulier	régulier	régulier	régulier	fosse
longueur		$720 \mathrm{~m}$	1030 m	560 m	920 m	870 m	1470 m	$720 \mathrm{~m}$	$330 \mathrm{~m}$	1780 m	$720 \mathrm{~m}$	$3300 \mathrm{m}$	2310 m	2490 m	$1500 \mathrm{m}$	$970 \mathrm{m}$	850 m	$530 \mathrm{~m}$	1640 m	780 m	$520 \mathrm{~m}$
PK		186,42-185,76	185, 76-184, 71	184, 71-184, 16	184, 16-183, 22	183, 22 - 182, 35	182, 35-180, 9	180,9-180,2	180, 2-179, 58	179,58-178,07	178,07-177,35	177, 35-174, 05	174,05-171,75	171, 75-169, 25	169, 25 - 167, 75	167, 75-166, 78	166, 78-165, 93	165,93-165,4	165, 4-163, 75	163, 75-162, 97	162,97-162,41
		$\mathbf{T1}$	T2	$\mathbf{T3}$	T4	$\mathbf{T5}$	16	$^{\rm L2}$	$\mathrm{T8}$	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20

÷
roite
dı
gauche.
75
$\underline{\Im}$
découpage
lu
issus o
tronçons
les
géométriques c
Caractéristiques
I.
ABLEAU 3.22
Ĥ

3.7.6.2 Tendance des évolutions morphologiques

L'évolution de chaque tronçon a été calculée en moyenne pour les périodes de chasse ou d'interchasse depuis 1984 (Figure 3.33). Cette évolution est définie comme une épaisseur « moyenne » de dépôt ou d'érosion répartie sur le tronçon, calculée à partir du volume des évolutions sur le tronçon, divisé par la largeur moyenne du tronçon et la longueur du tronçon.



FIGURE 3.33 – Bilan bathymétrique moyen par tronçon sur la période 1984-2012 : a) chasse, b) interchasse (Les intervalles représentent les bilans minimum et maximum du tronçon observés respectivement en chasse ou en période d'interchasse entre 1984 et 2012).

La sectorisation met en évidence des tronçons qui présentent des dynamiques différentes entre eux, en chasse et en période d'interchasse. Dans les tronçons amont (T1-T5), où l'influence du remous est faible, les évolutions moyennes sont peu significatives, avec des variations d'altitude de l'ordre du centimètre, sauf dans le T1 en interchasse. La variabilité en période d'interchasse est attribuée à l'évolution de la zone avec une période dans les années 70 et 80, marquée par les extractions de granulats, et une période moins dynamique suite à l'arrêt des extractions. En chasse, la variabilité dépend de l'apport en sédiments. Dans le tronçon T6 la dynamique est plus marquée, avec des évolutions de l'ordre du décimètre et en moyenne du dépôt en chasse et de l'érosion en période d'interchasse. Au niveau tronçons T7 à T9, le bilan est quasiment nul pour les deux périodes. Entre les tronçons T10 et T13, peu d'évolutions ont lieu en moyenne en chasses et des dépôts de l'ordre de plusieurs décimètres sont observés en moyenne en période d'interchasse. La dynamique est plus marquée dans les deux cas au tronçon T10. En chasse, la variabilité entre épisodes est importante puisque la zone peut être en dépôt ou en érosion selon l'épisode. Au niveau de Bellegarde (T14-T15), on observe en moyenne du dépôt en chasse, et en période d'interchasse, le bilan est quasiment nul, mais avec une forte variabilité spatiale et temporelle. Dans les tronçons aval (T16-T20), la dynamique moyenne est le dépôt avec une évolution moyenne peu variable entre tronçons. En chasse, l'épaisseur des dépôts est presque de l'ordre du mètre mais il y a une forte variabilité entre événements.

3.7.6.3 Discussion sur la représentativité de l'analyse par tronçons

Les tronçons ont été définis sur la base de caractéristiques hydro-morphologiques homogènes. L'interprétation de la dynamique à l'échelle des tronçons nécessite de savoir si la valeur moyenne d'un paramètre hydro-morphologique sur le tronçon est représentative de la dynamique du tronçon. Pour cela, des statistiques par tronçon ont été réalisées sur plusieurs paramètres, à savoir la largeur au miroir W pour un scénario $Q_{PO} = 600 \text{ m}^3/\text{s-}Z_{GE} = 330 \text{ m}$, la contrainte τ pour un scénario à cote basse $Q_{PO} = 300 \text{ m}^3/\text{s-}Z_{GE} = 305 \text{ m}$ et pour un scénario à cote haute $Q_{PO} = 600 \text{ m}^3/\text{s-}Z_{GE} = 330 \text{ m}$. Pour chaque paramètre, la valeur moyenne et l'écart type ont été calculés par tronçon. On considère que la dynamique du tronçon est homogène et que la valeur moyenne est représentative de cette dynamique si l'écart type est inférieur à la moitié de la moyenne. Pour le calcul à partir des contraintes, les valeurs obtenues sur le tronçon entre les PK 169,5 et 169,25, où la perte de charge locale a été appliquée (cf paragraphe 3.6.4.1) ont été écartées.

La représentativité du découpage est aussi analysée pour les évolutions morphologiques. La proportion de sections par tronçon qui une dynamique (dépôt ou érosion) identique au bilan moyen est calculée pour chaque événement de chasse et chaque période d'interchasse entre 1984 et 2012. Ces valeurs sont moyennées pour les événements de chasse et les périodes d'interchasse.

	W	τ	au	% sections	% sections
		cote basse	cote haute	chasse	interchasse
T1	0	0	0	71	78
T2	Ο	0	О	71	74
T3	Ο	0	О	86	78
T4	Ο	N	Ν	89	64
T5	Ο	0	О	73	79
T6	Ο	0	О	82	89
Τ7	Ο	0	О	86	89
T8	Ο	0	О	79	75
T9	Ο	Ο	Ο	80	78
T10	Ο	Ο	Ο	89	83
T11	Ο	Ο	Ο	79	82
T12	Ο	0	Ο	72	77
T13	Ο	N	Ν	62	85
T14	0	Ν	О	78	74
T15	Ο	Ο	Ο	86	78
T16	Ο	Ν	Ο	81	100
T17	Ο	N	О	93	100
T18	Ο	0	О	88	81
T19	0	0	Ο	83	81
T20	Ο	N	N	88	86

TABLEAU 3.23 – Représentativité de la dynamique moyenne par tronçon par rapport à la dynamique locale (O signifie que la valeur moyenne est représentative, c'est à dire que l'écart type est inférieur à la moitié de la moyenne, N signifie qu'elle ne l'est pas).

Tous les tronçons sont homogènes en terme de largeur d'écoulement.

La contrainte hydraulique moyenne n'est pas représentative pour plusieurs tronçons, notamment à cote basse. Le tronçon T4 inclut la mouille importante localisée au PK 184,16 qui provoque localement une forte diminution de la contrainte. Au niveau du tronçon T13, on observe une diminution des contraintes de l'amont vers l'aval du tronçon et c'est plutôt la variation spatiale de la contrainte qui est homogène. Il en est de même pour le tronçon T17 et le tronçon T20 où la présence de la fosse entraîne une forte diminution des contraintes. Inversement, pour les tronçons T14 et T16, la contrainte diminue le long du tronçon.

Une majorité de sections par tronçon montre une dynamique identique à la dynamique moyenne du tronçon. Les scores les plus faibles, inférieures à 75% sont plutôt localisés au niveau des tronçons amont, où des alternances de dépôt/érosion causées par le transport par charriage sont généralement observées. Les scores les plus faibles sont aussi observés dans les tronçons T12 et T13 lors des chasses, où la dynamique est respectivement impactée par la présence de la mouille au PK 172,8 et la géométrie de la confluence avec la Valserine. Le score faible obtenu au tronçon T14 lors des périodes d'interchasse peut être lié à l'alternance de virages au niveau du tracé en plan, qui peut impacter les écoulements et le transport des sédiments en suspension.

3.8 Conclusions sur l'analyse hydro-morphologique

Dans ce chapitre, l'analyse hydro-morphologique de la retenue de Génissiat qui a été proposée reprend et adapte les principales étapes de l'analyse hydro-morphologique des cours d'eau.

L'analyse qualitative des évolutions morphologiques de la retenue en lien avec la granulométrie des sédiments en place a permis de mettre en évidence les processus sédimentaires dominants qui impactent la morphologie de la retenue. En particulier, le comblement de la retenue se manifeste principalement au niveau de la retenue aval et peut être attribué principalement aux sédiments fins. Le calcul des bilans bathymétriques historiques permet la quantification de ces évolutions. Une évolution du rythme de comblement de la retenue a été observée depuis sa mise en eau. Entre 1954 et 1996, le volume moyen déposé annuellement dans la retenue est estimé à environ 350000 m³. Entre 1997 et 2012, ce volume annuel s'est réduit à 130000 m³. Cette évolution est attribuée d'une part à l'atteinte d'un profil d'équilibre qui permet d'améliorer le transfert des sédiments en aval de la retenue. D'autre part, l'amélioration des protocoles de chasse a permis de diminuer les dépôts occasionnés dans la retenue au cours de ces opérations. Les bilans montrent que les opérations de chasse sont responsables d'environ la moitié de l'envasement de la retenue.

L'analyse de la capacité de remobilisation des sédiments au fond et du mode de transport dominant de différentes classes de sédiments pour différents scénarios obtenus à partir de simulations numériques a permis une interprétation des évolutions observées lors de différents événements en lien avec les conditions hydro-sédimentaires le long la retenue. Ainsi, au niveau du tronçon fluvial, la capacité de remobilisation des sédiments en place parait très limitée du fait de la granulométrie très grossière rencontrée. Dans les retenues amont et aval, les conditions d'interchasse sont propices au dépôt des sédiments et un abaissement à 305 m, comme au cours des chasses de 2000 à 2012 permet de remobiliser les sédiments en place quasiment partout.

L'obtention d'un découpage hydro-morphologique de la retenue de Génissiat objectif et représentatif a nécessité la mise en place d'une méthode spécifique. La prise en compte de plusieurs variables pour représenter un paramètre, comme pour le bilan bathymétrique a nécessité la pondération des discontinuités obtenues par le nombre de variables. En outre, l'utilisation du test statistique de [Pettitt, 1979] pour le repérage des discontinuités a permis une localisation précise des discontinuités. L'utilisation de ce test de manière itérative a nécessité d'analyser l'impact du nombre d'itérations du test sur la représentativité du découpage obtenu. Le découpage de la retenue de Génissiat en tronçons a permis une analyse des évolutions morphologiques à une échelle spatiale représentative de la dynamique globale de la retenue. En particulier, quatre biefs principaux caractérisés par leur dynamique sédimentaire ont été mis en évidence :

- l'amont (T1-T6) est un bief qui n'est pas ou peu influencé par le niveau au barrage. Les sédiments en place sont grossiers et les contraintes hydrauliques sont élevées. Les évolutions des sections sont liées aux apports de sédiments grossiers. La dynamique de la zone a été affectée par des extractions de matériaux entre 1970 et 1995 et a donné lieu à une érosion régressive importante. Les sédiments transportés par suspension homogène ne participent pas à l'évolution du fond. Le principal facteur expliquant la variation de la dynamique sédimentaire est la géométrie (distinction chenal unique/chenaux multiples, courbure).
- le Défilé de l'Écluse (T7-T8) est une zone de transition entre l'Étournel et le canyon, caractérisé par de fortes pentes et un fond grossier où peu d'évolutions sont observées,
- la retenue amont (T9-T12) est influencée par le remous du barrage. Les sédiments en place sont des sables moyens. A cote haute, des conditions de dépôt sélectif sont observées, et produisent un tri granulométrique. A cote basse, les sédiments du fond peuvent être mobilisés et transportés. La variation de la dynamique sédimentaire à l'intérieur de ce bief est liée à des variations géométriques (mouilles, seuils, variations de largeur et de pente), et hydrauliques (augmentation de la hauteur d'eau vers l'aval, diminution des contraintes en interchasse) qui impactent le transport des sédiments,
- la retenue aval (T13-T20) est largement influencée par le remous. C'est le bief qui a connu le comblement le plus important depuis la mise en opération du barrage, avec d'importantes épaisseurs de dépôt. Le fond est composé de sédiments fins (argiles et limons). A cote haute, une partie des sédiments transportées par suspension homogène sont déposés. A cote basse, l'érosion des sédiments en place est possible et une partie des sables venant de l'amont est déposée, formant une alternance de strates sédimentaires plus ou moins grossières. La variation de la dynamique sédimentaire est liée aux variations de la géométrie (variations de largeur et de pente).

Dans la perspective d'une modélisation hydro-sédimentaire de la retenue de Génissiat, le découpage en tronçons homogènes s'avérera utile pour la construction des modèles, en servant de base à la description des sédiments contenus dans la retenue (taille, épaisseurs de sédiments). L'échelle du tronçon est aussi représentative pour la comparaison des évolutions morphologiques mesurées et simulées par le modèle. L'estimation des incertitudes sur les bilans bathymétriques à l'échelle des tronçons fournit un cadre quantitatif permettant de juger les capacités du modèle.

Dynamique spatio-temporelle du transport de sédiments

4.1 Introduction

L'analyse hydro-morphologique a permis une meilleure compréhension de la dynamique spatiale du transport de sédiments dans la retenue. Cette compréhension reste cependant limitée par le caractère intégrateur du bilan bathymétrique à l'échelle d'une période entière de chasse ou d'interchasse. En effet, le bilan bathymétrique ne permet pas de relier précisément les conditions hydrauliques et le transport de sédiments observées au cours d'une période avec les évolutions morphologiques. Une description spatio-temporelle des conditions hydrauliques et du transport de sédiments dans la retenue est proposée pour mettre en évidence les processus à l'origine des évolutions morphologiques de la retenue observées au cours des épisodes de chasse ou périodes d'interchasse à partir de l'étude d'événements passés.

Un réseau de mesures hydro-sédimentaires est déployé le long du Haut-Rhône depuis plusieurs décennies. De précédentes études ont porté sur l'analyse des événements de chasse passés [EDF, 1954; Dumond, 2001; CNR, 2010; Peteuil, 2014]. On y trouve des estimations des flux transportés en amont et en aval de la retenue. Ces études mettent en évidence la complexité de l'interprétation du bilan sédimentaire de la retenue et des temps de propagation des flux dans la retenue et la nécessité de la mesure hydro-sédimentaire sur le terrain. En particulier, l'analyse des périodes d'interchasse était limitée par l'absence de mesures de flux sédimentaires.

Un premier aspect de l'étude repose sur l'intégration de nouvelles mesures hydro-sédimentaires permettant d'améliorer la résolution spatio-temporelle du réseau et de tenir compte de la variabilité des modes de transport le long du Haut-Rhône (cf. partie 4.2).

Les processus de transport des sédiments dans la retenue au cours d'épisodes de chasses et d'interchasse vont être mis en évidence à partir des mesures du transport sédimentaire et des résultats de modélisation hydraulique afin de compléter l'analyse présentée au chapitre précédent (cf. parties 4.3, 4.4).

L'estimation des flux entrant et sortant de la retenue pour différentes classes de sédiments et l'estimation des incertitudes associées est proposée pour quantifier l'impact de la gestion de la retenue sur les flux sédimentaires évacués. La chronique de données recueillies en périodes d'interchasse étant très courte et récente, une reconstruction des flux historiques est aussi proposée (cf. partie 4.7).

Enfin, la contribution des sédiments fins et des sédiments plus grossiers au bilan sédimentaire de la retenue est évaluée en comparant le bilan des flux entrants et sortants et le bilan bathymétrique pour différents épisodes de chasse et périodes d'interchasse (cf. partie 4.8.1).

4.2 Présentation du réseau et des méthodes de mesure hydrosédimentaires sur le Haut-Rhône du Léman à Seyssel

Un réseau de mesure relativement dense est déployé entre le lac Léman et le barrage de Seyssel et permet de mesurer localement les composantes du flux sédimentaire, de manière ponctuelle ou continue (Figure 4.1).



FIGURE 4.1 – Localisation et types de mesures hydro-sédimentaires réalisées du Léman à Seyssel.

4.2.1 Débits

4.2.1.1 Méthodes de mesure du débit en continu

Courbe de tarage

La méthode de la courbe de tarage consiste à mesurer une hauteur d'eau en continu, mesure plus aisée, et de la convertir en débit à partir d'une relation hauteur/débit ou courbe de tarage. Sous l'hypothèse d'un régime d'écoulement non uniforme, permanent (graduellement varié) et d'un fond stable, la relation hauteur/débit est univoque, c'est-à-dire qu'à une hauteur d'eau donnée correspond toujours le même débit. Le niveau est mesuré à partir d'une lecture sur une échelle limnimétrique, ou à partir de sondes de niveau. Le débit est généralement estimé à partir de la mesure du champ de vitesse, intégré sur la section mouillée. Le champ de vitesse peut être estimé à l'aide de courantomètres mécaniques, électro-magnétiques ou acoustiques (aDcp) [Le Coz et al., 2011]. Des mesures in situ simultanées de la hauteur et du débit sont réalisées, les couples hauteur/débits mesurés pour différents débits permettent de construire une courbe de tarage. Au niveau d'une station, la mesure en continu du niveau d'eau par une sonde permet après conversion, d'obtenir une mesure en continu du débit. Les sources principales d'erreur dans

ce type de mesure du débit sont les variations des dimensions de la section, pouvant être causées par des évolutions morphologiques du fond ou des berges, ou le développement de végétation par exemple. Pour les débits calculés à partir des hauteurs d'eau sur fond fixe, une incertitude relative $u(Q)/Q = \pm 10\%$ est préconisée [ISO EN 748, 1997; Harmel *et al.*, 2006],

Mesure au niveau d'un ouvrage

Au niveau du barrage de Génissiat, un système d'ultrasons à temps de transit est installé dans les conduites de l'usine et permet d'estimer le débit dans chaque groupe. De plus, lors des épisodes de chasse, le débit passant dans les différents ouvrages d'évacuation du barrage de Génissiat peut être reconstitué à partir de lois d'ouvrages. Les orifices fonctionnant comme des vannes en régime dénoyé, le débit peut être calculé à partir des caractéristiques de la vanne et de la hauteur d'eau amont. En supposant que le fond à l'amont est plan et horizontal, on a :

$$Q = \mu \sqrt{2g} W_d \left[h_{am}^{3/2} - (h_{am} - w)^{3/2} \right]$$
(4.1)

où μ est le coefficient de débit (en théorie $\mu = 0, 4$), W_d est la largeur de la vanne vanne, w est la hauteur de l'ouverture de la vanne, h_{am} est la hauteur d'eau à l'amont de la vanne mesurée à partir du radier de la vanne.

A partir des hauteurs d'eau mesurées au point de réglage de la retenue de Génissiat (PK 162,57), le débit dans chaque vanne peut être reconstitué. Lorsque les usines ne fonctionnent pas, les coefficients de débit sont calés afin que le débit total calculé en sortie de Génissiat soit égal au débit mesuré à la station de Bognes. Lorsqu'un seul des ouvrages est ouvert, il est possible de caler finement les coefficients pour cet ouvrage. Les débits obtenus à partir de lois d'ouvrages (vannes) ont une incertitude relative estimée à $u(Q)/Q = \pm 20\%$ [Le Coz *et al.*, 2011].

4.2.1.2 La mesure du débit du Léman à Seyssel

Un réseau dense de stations hydrométriques permet de mesurer le débit du Rhône et de ses principaux affluents. Du Léman à Seyssel, on dispose de mesures du débit en six positions le long du Rhône et sur les principaux affluents : l'Arve, la Valserine et les Usses (Figure 4.1). Les caractéristiques des débits mesurés sont présentées dans le tableau 4.1.

		····· · · · · · · · · · · · · · · · ·		
Cours d'eau	Station	Gestionnaire	Type de mesure	Début des chroniques
		0.777.7		1
Rhône	Halle de l'île	OFEV	courbe de tarage	1997
Rhône	Ripes	OFEV	courbe de tarage	1974
Rhône	Pougny	CNR	courbe de tarage	1985
Rhône	$G\acute{e}nissiat$	CNR	capteurs usines	2010
			loi de vannes	2012
Rhône	Bognes	CNR	courbe de tarage	1969
Rhône	Seyssel Corbonod	CNR	courbe de tarage	1984
Arve	Bout du Monde	OFEV	courbe de tarage	1974
Valserine	Lancrans	CNR	courbe de tarage	1961
Usses	Pont Rouge	CNR	courbe de tarage	1993

TABLEAU 4.1 – Caractéristiques de débits mesurés.

4.2.2 Concentrations en Matières en Suspension (MES)

4.2.2.1 Méthodes de mesure de la concentration

La mesure des concentrations en MES est assimilée à la mesure de la suspension homogène, sauf indication contraire. La mesure des concentrations est en général réalisée dans une section à proximité d'une station de mesure du débit [Morris et Fan, 1998]. On distingue notamment les mesures par prélèvement direct d'échantillons des autres techniques (acoustique, laser, optique). Les méthodes de mesure diffèrent aussi par leur résolution temporelle (ponctuelle ou quasicontinue).

Prélèvements

Les prélèvements manuels sont réalisés soit par pompage environ un mètre sous la surface à l'aide de préleveurs, soit à partir de méthodes manuelles par un système lesté en bout de corde ou de câble qui prélève en surface à une cote non définie [Perrier, 2000]. A partir du prélèvement réalisé, l'estimation de la concentration en matières en suspension peut être effectuée par différentes méthodes.

La méthode de filtration-pesée définit les matières en suspension comme étant les résidus retenus sur une membrane filtrante. L'échantillon d'eau chargée est filtré en laboratoire sur un filtre en fibres de verre, puis séché à l'étuve selon la norme NF EN 872 [2005]. La concentration massique en MES est déterminée par l'équation :

$$C = \frac{M_1 - M_0}{V}$$
(4.2)

où M_0 est la masse initiale du filtre, M_1 est la masse du filtre après filtration et séchage et V est le volume d'échantillon filtré. Cette méthode est longue à mettre en oeuvre et n'est donc pas utilisée pour obtenir un suivi en temps réel des concentrations en MES. Lorsque du sable est présent dans les échantillons prélevés, il est nécessaire de s'assurer que l'échantillon est correctement mélangé avant d'être filtré, dans le cas où il n'est pas filtré dans sa totalité. L'incertitude de mesure sur cette méthode est estimée de 1 à 2% et peut atteindre 10% si des sables sont présents dans les échantillons [Launay, 2014].

La méthode de la crêpe, mise au point par le Cemagref (Irstea) est une adaptation de la méthode par filtration-pesée qui permet de réaliser quasiment en temps réel des mesures sur le terrain [Niel *et al.*, 1985]. L'échantillon prélevé est filtré sur site, séché sur une plaque chauffante et pesé sur le terrain, le tout en une quinzaine de minutes. Cette méthode nécessite du matériel et l'installation d'un local fermé et alimenté en électricité à proximité des prélèvements [Wolf, 2011]. L'incertitude est estimée à environ 10% mais la méthode n'est pas applicable pour des concentrations supérieures à 15 g/L.

La méthode du pycnomètre a été développée par la CNR pour obtenir rapidement et précisément des mesures de concentration en MES pendant les opérations de chasse [Niel *et al.*, 1985]. Elle s'inspire d'une méthode proposée par le Cemagref en 1981. Le pycnomètre est un récipient en verre de faible dilatation, d'une contenance d'un litre. Il est d'abord rempli d'eau claire et pesé, puis ce même récipient est rempli d'un échantillon d'eau chargée dont la concentration est à déterminer et pesé de nouveau. La concentration peut alors être déduite de la différence de masse, par la formule :

$$C = \frac{\rho_s}{V_{pyc}} \frac{M_{tot} - M_{pyc} - \rho V_{pyc}}{\rho_s - \rho}$$
(4.3)

où $\rho_s \approx 2650 \,\mathrm{km/m^3}$, $\rho \approx 1000 \,\mathrm{km/m^3}$ sont respectivement les masses volumiques des sédiments et de l'eau, V_{pyc} est le volume du pycnomètre et M_{pyc} , M_{tot} sont respectivement les masses du pycnomètre et de l'ensemble pycnomètre+eau+sédiments. La masse volumique est estimée à partir de mesures de laboratoires issues de quelques échantillons représentatifs.

La mesure par cette méthode est instantanée; il faut environ 30 secondes pour la réaliser. Les limites de cette méthode résident dans la précision liée aux appareils utilisés et la manipulation en laboratoire ou sur le terrain. La méthode est estimée suffisamment précise pour des concentrations supérieures à 0,4 g/L avec une erreur relative moyenne de 2,4% [Niel et al., 1985].

La méthode de mesure par prélèvement nécessite un déploiement relativement important de personnel et de matériel et est assez couteuse en temps. Ainsi, le suivi quasi-continu des flux à partir de cette méthode est lourd à mettre en oeuvre. Au cours des événements de chasse, un important dispositif logistique est mis en place afin de suivre l'évolution des concentrations le long du Rhône à très haute fréquence à partir de cette méthode.

Turbidimétrie

La mesure de la turbidité de l'eau est une technique permettant une mesure indirecte et continue de la concentration en matières fines en suspension (argiles et limons). Le turbidimètre est un appareil muni de capteurs optiques qui émettent un rayonnement d'intensité connue dans l'eau et mesurent l'intensité du rayonnement transmis ou diffusé. La mesure est basée sur le principe que l'atténuation ou à la diffusion d'un rayonnement incident est proportionnelle à la masse de sédiments présente dans un volume d'eau [Gippel, 1995]. Les turbidimètres sont calibrés en laboratoire à partir de matériaux standards. Néanmoins, en rivière, la relation entre la turbidité et la concentration est influencée par les variations de taille et de composition des particules et de couleur de l'eau [Gippel, 1995]. En particulier, la réponse du capteur est proportionnelle à la surface de réflexion des particules soit au diamètre au carré. L'utilisation du turbidimètre en rivière nécessite la mise en place d'une courbe d'étalonnage adaptée reliant la turbidité à la concentration, qui prend généralement la forme d'une relation linéaire :

$$C = aT + b \tag{4.4}$$

où T est la turbidité, C est la concentration (g/l) et a et b sont des paramètres caractéristiques du capteur et des sédiments. En conditions naturelles, notamment lorsque l'eau non chargée n'est pas colorée, b=0.

La relation turbidité/concentration est obtenue à partir de mesures simultanées de turbidité et de concentration réalisées à l'aide de prélèvements sur le site [Minella *et al.*, 2008]. Afin d'obtenir un calage robuste des coefficients, il est nécessaire d'échantillonner une large gamme de concentrations [Morris et Fan, 1998]. En général, le turbidimètre est associé à un préleveur automatique, et il est possible d'asservir le déclenchement du préleveur à une consigne de dépassement de seuil de turbidité, ou même de débit s'il est raccordé à une station hydrométrique permettant d'échantillonner les événements présentant de fortes turbidités. Les prélèvements recueillis pendant les événements qui contribuent de façon importante aux flux sédimentaires permettent d'obtenir des données de concentration plus fiables pour le calcul des flux [Lewis, 1996]. La sensibilité du capteur étant dépendante de la granulométrie des échantillons, il est possible de créer plusieurs courbes d'étalonnage en fonction de la taille des sédiments ou plus particulièrement selon les événements [Thollet *et al.*, 2013].

L'incertitude sur la mesure de la concentration par turbidimétrie peut provenir de différentes sources, plus particulièrement, des erreurs liées au capteur, des erreurs systématiques introduites par l'utilisation de la relation turbidité/concentration et des erreurs méthodologiques liées à la mesure indirecte (influence de la taille et de la minéralogie des particules) [Minella *et al.*, 2008]. D'après Teixeira et Caliari [2005], les erreurs associées à l'utilisation d'une relation turbidité/concentration sont de l'ordre de 10% pour une gamme de concentration adaptée.

Pièges à sédiments

Les pièges à sédiments sont des collecteurs placés dans le cours d'eau et qui capturent les sédiments en suspension en continu par décantation. Le design du piège permet de favoriser la décantation des particules contenues dans l'eau et de les retenir. Les pièges permettent de collecter une grande quantité de sédiments en suspension, et la collecte est intégratrice de la période pendant laquelle le piège est installé dans le cours d'eau. L'efficacité de piégeage n'est pas précisément connue, c'est pourquoi les données obtenues à partir de ces pièges sont plutôt qualitatives.

4.2.2.2 La mesure des concentrations en MES du Léman à Seyssel

Plusieurs méthodes sont utilisées pour mesurer les concentrations en matières en suspension le long du Haut-Rhône. Les caractéristiques des concentrations mesurées sont présentées dans le tableau 4.2. Historiquement, les mesures de concentration en MES étaient réalisées uniquement au cours des épisodes de chasse, par prélèvements au niveau du pont de Pougny et de la traversée de Seyssel. D'autres stations de mesures ont ensuite été mises en place au niveau du barrage de Génissiat et du pont de Pyrimont pour le suivi des chasses. Au barrage de Génissiat, les prélèvements sont réalisées en sortie de chacun des évacuateurs (vanne de fond, vanne de demifond, évacuateur de surface) mais pas au niveau de l'usine. Lorsque les usines ne fonctionnent pas, les mesures réalisées permettent de mesurer le transport total à travers le barrage. Plus récemment, des mesures indirectes de concentrations sont réalisées en continu sur l'Arve à la station Bout du Monde depuis 2012, et à Pougny et Pyrimont depuis 2014 (Figure 4.1). Elles sont réalisées à partir de mesures de turbidité de l'eau converties en concentration à partir d'une courbe de calibration.

Cours d'eau	Station	Gestionnaire	Type de mesure	Position	Période
Rhône	Pougny	CNR	prélèvement surf.	rive droite	chasse
			turbidimétrie	rive droite	depuis 2014
Rhône	$G\acute{e}nissiat$	CNR	prélèvement	vannes	chasse
Rhône	Pyrimont	CNR	prélèvement surf.	rive droite	chasse
			turbidimétrie	rive droite	depuis 2014
Rhône	Seyssel	CNR	prélèvement surf.	rive droite	chasse
Arve	Bout du Monde	SIG, Irstea	turbidimétrie	rive droite	depuis 2012

TABLEAU 4.2 – Caractéristiques des concentrations mesurées.

D'autres mesures de concentration occasionnelles, comme par exemple des mesures en surface à des stations éphémères intermédiaires dans la retenue de Génissiat au cours de la chasse de 2000 [Perrier, 2000] sont aussi disponibles, ou des mesures de turbidité dans la colonne d'eau réalisées à l'amont du barrage de Génissiat en mars 2014. Des mesures au niveau des vannes de fond et de demi fond et de Pyrimont ont aussi été réalisées par le CEA à partir d'une sonde gamma-densimétrique pour les chasses de 2000 à 2012.

Application de la méthode par turbidimétrie aux stations du Haut-Rhône

Une relation d'étalonnage a été établie pour les stations de Pougny et Pyrimont à partir des mesures simultanées de concentration et de turbidité réalisées pendant respectivement 7 et 5 mois (Figure 4.2). Les chroniques de données sont relativement courtes et incluent peu d'événements à fortes et faibles concentrations. Par exemple, toutes les concentrations supérieures à 1 g/l mesurées à Pougny datent du même événement (crue de l'Arve du 27/08/2014). La mesure de chroniques plus longues de couples turbidité/concentration, incluant à la fois des fortes et faibles concentrations permettra d'améliorer la robustesse des courbes d'étalonnage.



FIGURE 4.2 – Courbes d'étalonnage turbidité-concentration : a) Pougny, b) Pyrimont.

4.2.2.3 Représentativité spatiale de la mesure

Les mesures de concentration, qu'elles soient issues d'un prélèvement ou d'une mesure de turbidité sont effectués en un point au sein d'une section de rivière. Néanmoins, les concentrations en MES et les caractéristiques des particules, notamment leur granulométrie, sont susceptibles de varier de façon importante au sein de la section. De nombreux auteurs se sont interrogés sur la représentativité de la mesure ponctuelle par rapport à la moyenne dans la section. Martin et al. [1992] ont comparé les valeurs de concentration issues de prélèvements de surface avec des valeurs issues de prélèvements répartis dans la section réalisés sur cinq sites de la rivière Kentucky. Pour les sédiments de diamètre inférieur à 63 µm (argiles et limons), la mesure de la concentration en surface impliquait une sous-estimation de la concentration moyenne de 17%. Pour les sédiments de diamètre supérieur à 63 µm (sables), du fait des concentrations nettement plus faibles observées en surface, la sous-estimation montait à 51%. Horowitz [2008] a travaillé sur des données issues de plusieurs rivières américaines. Il montre que dans le cas d'un mélange de limons et de sables, les concentrations de surface sont plus fortes au centre de l'écoulement où les vitesses sont plus fortes du notamment à un transport de sable plus important [Vanoni, 1977]. Pour des MES composées uniquement de particules inférieures à 63 µm, des variations de concentration en MES au sein de la section ont été constatées, mais dans une moindre mesure et pas de façon systématique. Mano [2008] a analysé les variations horizontales en surface sur l'Isère et a mis en évidence des écarts moyens de l'ordre de 8%. Sur une verticale, il obtient des écarts moyens de l'ordre de 7%.

Dans le cas des mesures réalisées sur le Haut-Rhône, on propose une analyse qualitative de la représentativité des échantillons.

Pougny

Les mesures de concentration à la station de Pougny sont réalisées en rive droite du pont de Pougny (Ponton). Au cours de la chasse de 1997, des prélèvements ont été réalisés à plusieurs endroits de la section (Figure 4.3). Les mesures montrent que les concentrations mesurées en surface (Ponton, 1, 2, 4, 5) sont proches, avec un écart inférieur à 10%. Les granulométries réalisées sur les échantillons prélevés en surface au cours de la chasse de 2012, montrent que le diamètre maximal observé en surface est proche de 50 µm. Ces mesures de surface semblent représentatives des flux de sédiments fins. Cependant, les concentrations mesurées au fond (point de prélèvement 3) sont systématiquement plus élevées. Les écarts mesurés avec la surface varient de 17 à 45%. Des pièges à sédiments ont aussi été disposés sur les marches des quais ou des

stations limnimétriques pour les maintenir à une vingtaine de centimètres sous la surface de l'eau pour le suivi des contaminants contenus dans les particules fines [Launay, 2014]. Au cours de la chasse, le diamètre maximal des particules capturées dans les pièges est de l'ordre de 100 μ m (cf. paragraphe 4.4.2.1). Ces mesures ont confirmé que des sédiments plus grossiers que ceux mesurés en surface sont transportés dans la section du Pont de Pougny.



FIGURE 4.3 – Profil en travers schématique au pont de Pougny, localisation des points de prélèvements.

Barrage de Génissiat

On suppose qu'il n'y a pas d'hétérogénéité spatiale pour les mesures réalisées au barrage de Génissiat car les prélèvements sont réalisés en sortie des vannes et que la turbulence y est suffisante pour mélanger correctement les sédiments.

Pyrimont

Aucune mesure comparative n'est disponible à Pyrimont.

Seyssel

A Seyssel, plusieurs campagnes de prélèvements distribués dans la section ont été réalisés au cours des chasses (1993, 1997, 2000, 2003). 3 à 4 verticales de prélèvement ont été réalisées avec un point en surface et un vers le fond en plus de la mesure au point de référence. L'écart mesuré entre les mesures au niveau du point de référence et la moyenne des mesures dans la section indiquent que les mesures au niveau du point de référence sont représentatives de la section, avec un écart maximal observé de 12%.

4.2.3 Calcul des flux de matières en suspension

La masse de sédiments $M(t_i, t_j)$ transportée en travers de la section de mesure entre les temps t_i et t_j s'obtient à partir du flux massique $\Phi(t)$ à travers la section :

$$M(t_i, t_j) = \int_{t_i}^{t_j} \Phi(t) dt$$
(4.5)

où $\Phi(t)$ est le flux passant à travers la section d'écoulement $S \Phi(t) = \iint_S C\vec{U}(\vec{x}, t) dS, \vec{U}(\vec{x}, t)$ est le vecteur vitesse de l'écoulement qui transporte les sédiments.

Si on fait l'hypothèse que la concentration mesurée est représentative de la concentration moyenne dans la section de mesure, c'est à dire que C(t) est égale à la concentration moyenne $\overline{C(t)}$ dans la section :

$$\Phi(t) = \overline{C(t)} \iint_{S} \vec{U}(\vec{x}, t) \cdot \vec{n} dS = \overline{C(t)} Q(t)$$
(4.6)

où Q est le débit s'écoulant à travers la section.

Pour une mesure discrète des débits et des concentrations à un pas de temps Δt , l'équation 4.5 devient :

$$M(t_i, t_j) = \sum_{k=1}^n \Delta t C_k Q_k \tag{4.7}$$

où $t_j - t_i = n\Delta t$

Méthodes d'interpolation et de régression

Les mesures du débit et de la concentration disponibles pour le calcul des flux sont généralement inégales. La mesure du débit obtenue à partir d'une relation hauteur débit est en général continue et est disponible sous la forme de valeurs instantanées ou moyennées sur une heure. Les données de concentration sont en général de nature discrète, avec un pas de temps supérieur à la mesure du débit [Launay, 2014]. De plus, les mesures de débit sont souvent disponibles sur de plus longues périodes que la concentration. On distingue deux types des méthodes couramment utilisées pour estimer le flux sédimentaire à partir des mesures [Quilbe *et al.*, 2006] :

- les méthodes d'interpolation
- les méthodes de régression

Une description des méthodes est proposée par Quilbe *et al.* [2006] et Launay [2014]. Les méthodes d'interpolation permettent d'estimer les flux à partir des mesures discrètes de concentration en MES, en moyennant ou interpolant les débits et les concentrations sur une période Δt . Ces méthodes nécessitent une fréquence d'échantillonnage du débit et de la concentration assez élevée qui permette de représenter les évolutions significatives du débit et de la concentration. En fonction de ce pas de temps et de la résolution temporelle des mesures de concentration, il est nécessaire soit d'interpoler les mesures dans le cas d'une résolution inférieure au pas de temps d'intégration, soit de moyenner les mesures dans le cas contraire. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour le calcul de la moyenne sur la période choisie (utilisation des débits mesurés simultanément aux prélèvements seulement, utilisation de tous les débits) et sont décrites par Walling et Webb [1985]. Lang [1995] propose d'interpoler linéairement les concentrations aux mêmes pas de temps que les débits afin de prendre en compte la variabilité du débit.

Les méthodes de régression sont basées sur la reconstitution d'une chronique de concentration en MES au pas de temps de la chronique de débit. La reconstitution s'appuie sur une relation de régression entre le débit et la concentration, ou courbe de tarage sédimentaire. La relation de régression est estimée à partir de couples débit/concentration mesurés simultanément. La loi utilisée est généralement une loi puissance, qui peut s'écrire sous la forme d'une régression linéaire entre les logarithmes du débit et de la concentration :

$$\log(C) = a + b \, \log(Q) \tag{4.8}$$

où a et b sont des paramètres de calage. Asselman [2000] décrit le paramètre a comme un paramètre traduisant l'intensité de l'érosion sur le bassin versant. Mano [2008] interprète le paramètre b comme la capacité de remobilisation des sédiments dans la rivière.

Des facteurs autres que le débit peuvent influer sur la valeur de la concentration, notamment la disponibilité en sédiment ou des variations saisonnières des apports [Asselman, 2000]. C'est pourquoi il existe en général une forte dispersion des valeurs autour de la relation de régression. Cette méthode permet une estimation correcte des flux sur de longues périodes mais n'est pas recommandée pour reproduire les concentrations instantanées. La qualité de la régression dépend du nombre de couples utilisés et de sa capacité à reproduire les différentes gammes de débit et de concentration observées dans le cours d'eau [Horowitz, 2003]. Quilbe *et al.* [2006] préconisent d'utiliser la régression seulement pour de l'interpolation de données sur la gamme de mesures disponibles. En cas d'extrapolation en dehors de la gamme de données, Harmel *et al.* [2006] proposent une erreur de 20%. En pratique, la méthode choisie pour le calcul des flux de MES dépend de la disponibilité ou non de la mesure de concentration en MES. Lorsque cette donnée n'est pas disponible sur une période, la méthode de régression est appliquée pour reconstituer une chronique de concentration en MES au pas de temps de la chronique de débit.

Application de la régression à la station Bout du Monde

A partir des mesures historiques réalisées depuis 1974 et des mesures turbidimétriques entre mars 2012 et mars 2013, Launay [2014] a proposé une reconstruction des flux en MES de l'Arve et une ré-évaluation des flux anciens apportés au Rhône par l'Arve. Plusieurs types de régressions reliant le débit Q à la concentration C ont été testées. En particulier, différents poids ont été donnés à chaque couple Q, C pour l'établissement de la régression :

- régression simple : tous les couples Q, C ont le même poids,
- régression pondérée par le flux : les couples Q, C sont pondérés par le flux $Q \times C$, ce qui permet de mieux reproduire les fortes valeurs de concentration,
- régression pondérée par la racine du flux : les couples Q, C sont pondérés par la racine carrée du flux $\sqrt{Q \times C}$, ce qui permet de mieux reproduire les fortes valeurs de concentration, mais de façon plus modérée qu'avec la méthode précédente.

La méthode de régression basée sur une pondération par la racine carrée du flux horaire a permis d'obtenir un flux estimé proche (94%) du flux calculé réellement sur la période mars 2012 - mars 2013. Néanmoins, les concentrations obtenues par cette méthode sont surestimées en régime de base et sous-estimées en crue.



FIGURE 4.4 – Concentration en MES horaire en fonction du débit horaire à la station de Bout du Monde de 1974 à 2013 et relations puissances, d'après Launay [2014].

Autres affluents

Seules des mesures ponctuelles de la concentration en MES dans la Valserine à Lancrans et dans les Usses à Pont-Rouge sont disponibles. A partir de ces mesures, Launay [2014] a proposé une reconstruction d'une chronique de concentration horaire à partir d'une relation puissance établie avec le débit, pondérée par la racine carrée du flux horaire pour ces stations (Tableau 4.3).

TABLEAU 4.3 – Coefficients des relations C=f(Q) pondérées par la racine du flux obtenues pour la Valserine et les Usses.

Cours d'eau	Station	a	b
Valserine	Lancrans	$7,18 \ 10^{-3}$	0,65
Usses	Pont-Rouge	$4,63 \ 10^{-2}$	0,80

Estimation des incertitudes

De nombreux auteurs se sont intéressés à l'estimation des incertitudes associées au calcul des flux de MES [Horowitz, 2003; Harmel *et al.*, 2006; Navratil *et al.*, 2011; Antoine *et al.*, 2013]. Les incertitudes sur le débit ont été présentées dans le paragraphe 4.2.1. L'incertitude liée à la concentration peut être divisée en trois sources [Antoine *et al.*, 2013] : la méthode de mesure utilisée (prélèvement et type d'analyse ou turbidimètre) présentée au paragraphe 4.2.2, l'hété-rogénéité spatiale de la concentration dans la section, présentée au paragraphe 4.2.2.3 et du caractère discret des mesures dans le temps. Pour le caractère discret des mesures, l'incertitude dépend du rythme de variation du débit et de la concentration. King et Harmel [2003] ont proposée une approche statistique pour estimer cette incertitude. L'approche est basée sur l'analyse de 300 hydrogrammes de crue relevés aux États Unis, et suppose que les concentrations présentent les mêmes variations temporelles que le débit. Ils estiment que l'erreur est nulle pour des fréquences d'échantillonnage supérieures à 15 minutes, et proposent une incertitude de 2% pour une fréquence de 30 minutes, et une incertitude de 15% pour une fréquence d'échantillonnage de 2 heures.

L'estimation des incertitudes est menée en suivant le cadre du GUM [Joint Committee For Guides in Metrology, 1995]. Les incertitudes sont d'abord présentées sous la forme d'incertitudes types individuelles. On fait l'hypothèse que les incertitudes relatives u(Q)/Q et u(C)/C restent constantes dans le temps, et l'on peut assimiler l'incertitude relative du flux instantané $u(\Phi)/\Phi$ à l'incertitude relative sur la masse u(M)/M. L'estimation de l'incertitude type composée pour la concentration s'effectue par propagation des sources d'incertitudes types individuelles dont les valeurs ont été présentées précédemment :

$$\frac{u(M)}{M} = \sqrt{\left[\frac{u(C)}{C}\right]^2 + \left[\frac{u(Q)}{Q}\right]^2} \tag{4.9}$$

L'incertitude élargie est ensuite obtenue à partir d'un facteur d'élargissement k = 2.

4.2.4 Charriage

La mesure du charriage dans un cours d'eau permet la détection des conditions hydrauliques favorables à la mise en mouvement, la caractérisation de la granulométrie des sédiments transportées, la quantification des flux transportés et la caractérisation des fluctuations spatiotemporelles du transport par charriage. Elle permet aussi de calculer des bilans sédimentaires sur le cours d'eau et est nécessaire pour le calage et la validation de modèles numériques de transport.

4.2.4.1 Mesure du charriage par prélèvement

Le flux de charriage peut être mesuré en prélevant directement les sédiments transportés au fond. Le débit solide (m^2/s) s'exprime :

$$q_s = k_P \frac{M}{\rho_s W_P \Delta t} \tag{4.10}$$

où k_P est l'efficacité du préleveur, M est la masse de sédiments prélevée (kg), ρ_s est la masse volumique du sédiment (kg/m³), W_P est la largeur du préleveur (m) et Δt est le temps de prélèvement (s).

Les préleveurs sont des appareils présentant une ouverture, placée face au courant et un sac ou panier permettant de récupérer les échantillons. Ils peuvent présenter ou non un divergent afin d'atténuer les pertes de charge [Camenen, 2012]. Ils permettent de mesurer à la fois le taux de transport et la granulométrie des sédiments. L'efficacité du préleveur est définie comme le ratio entre la masse collectée et la masse réelle transportée [Morris et Fan, 1998]. Elle peut être déterminée expérimentalement dans un canal hydraulique. Le préleveur Helley-Smith [Helley et Smith, 1971] développé par l'USGS est un préleveur à différence de pression (Figure 4.5 a). Il est composé d'une buse d'entrée en forme de divergent et d'un sac ou panier qui sont reliés à une structure métallique. Il existe deux modèles avec des tailles d'ouverture différentes (76 mm et 152 mm). Selon Emmett [1980], le préleveur Helley-Smith collecte 100% des particules entre 0,5 et 16 mm ($k_P=1$). Pour des particules plus fines (entre 0,25 et 0,5 mm), l'efficacité est de 175% correspondant à une sous-estimation du prélèvement, soit $k_P=0,5$, alors que pour des particules plus grossières (entre 16 et 32 mm), l'efficacité est de 70%, soit $k_P=1,5$, correspondant à une sur-estimation du prélèvement.

Le préleveur Ehrenberger [Ehrenberger, 1931] est un préleveur avec une ouverture de 70 cm et sans divergent (Figure 4.5 b). La taille des mailles du panier est souvent grossière. Cet échantillonneur est peu stable dans les écoulements très turbulents, mais a donné des résultats satisfaisants sur le Danube [Camenen *et al.*, 2011].



FIGURE 4.5 – Préleveurs de charriage utilisés sur le Rhône : a) Préleveur Helley-Smith, b) Préleveur Ehrenberger (photos B. Camenen).

Un des obstacles liés à la mesure ponctuelle du charriage réside dans la forte variabilité spatiale et temporelle des mouvements au fond. D'après Hubbell [1987], les taux de transport

mesurés à partir de prélèvements rapprochés dans le temps et l'espace varient de 0 à 4 fois la valeur moyenne. Des expérimentations menées par De Vries [1973] ont montré que sous l'hypothèse d'un échantillonnage idéal, il faut répéter au moins 20 prélèvements par verticale pour obtenir une incertitude de 20% sur la mesure du charriage. En pratique on réalise 3 à 5 prélèvements par verticale et les incertitudes peuvent dépasser 50%.

Le charriage a été mesuré par prélèvement en trois stations au niveau du Haut-Rhône, aux Ripes, Pont Carnot et Bognes (Figure 4.1). Les caractéristiques de ces mesures sont présentées tableau 4.4. La station des Ripes est située environ 500 m en amont du Pont de Pougny, au niveau d'un tronçon rectiligne. Elle est équipée d'une traille mécanique qui permet de faire aisément des mesures. Les prélèvements ont aussi été réalisés à partir d'un bateau. Au niveau du Pont Carnot, la mesure a été plus délicate. Elle a été réalisée à partir du Pont, et a nécessité d'utiliser une grue et de bloquer une voie de la route départementale 1206. A Bognes, l'utilisation de la traille manuelle a rendu la mesure très physique.

IADLE	TABLIA 4.4 Caracteristiques des mesures de enarrage.								
Cours d'eau	Station	Type de mesure	période						
Rhône	Ripes	Helley-Smith	26/03/2014						
			24/06/2015						
Rhône	Pont Carnot	Helley-Smith, Ehrenberger	chasse 2012						
Rhône	Bognes	Helley-Smith	chasse 2012						

TABLEAU 4.4 – Caractéristiques des mesures de charriage.

4.2.4.2 Mesure acoustique

La mesure par acoustique passive consiste à écouter les bruits produits dans la rivière. Le paysage acoustique d'une rivière est composé par les bruits produits par processus hydrodynamiques, : la turbulence et l'agitation de surface et par le transport de sédiments par charriage (Figure 4.6) [Tonolla *et al.*, 2011; Vračar et Mijić, 2011]. Les sédiments transportés par charriage s'entrechoquent ou impactent le fond, générant du bruit dans des fréquences variant de quelques kHz à quelques centaines de kHz. Le signal reçu par l'hydrophone est composé des différents bruits produits dans la rivière, qui peuvent être caractérisés par des fréquences proches. Néanmoins, pour les grandes rivières à faibles pentes, pour lesquelles le rapport rugosité du fond hauteur d'eau est petit, l'agitation de surface est considérée comme négligeable. Des études en laboratoire et en rivière ont montré que les caractéristiques du signal acoustique produit par les particules transportées par charriage dépendaient du flux et de la granulométrie des grains transportés [Johnson et Muir, 1969; Barton *et al.*, 2010]. Notamment, la fréquence du signal produit par le charriage diminue quand le diamètre augmente, et la puissance acoustique produite augmente lorsque le débit solide augmente.



FIGURE 4.6 – Schéma du paysage acoustique des rivières, d'après Geay [2014].

L'hydrophone est un microphone positionné dans l'eau qui permet de capter les ondes acoustiques produites dans la rivière. La chaine d'acquisition est composée d'un capteur et d'un enregistreur numérique. Le signal est modifié par la chaîne d'acquisition (sensibilité de l'hydrophone, gain appliqué au signal lors de l'enregistrement). Pour revenir aux caractéristiques réelles du signal, il est nécessaire de le corriger. Les puissances obtenues peuvent être exprimés en unités de pression (μ Pa²). Le traitement et l'analyse du signal sont réalisés à partir de programmes développés par Geay [2014] avec le logiciel Octave.

Le signal s est d'abord découpé en plusieurs segments s_k à l'aide d'une fenêtre d'échantillonnage w de longueur L_s . Les fenêtres utilisées sont de type gaussien. Les segments doivent se recouper pour ne pas perdre d'information du au fenêtrage. Le taux de recouvrement R est le ratio entre la longueur de la partie commune à deux fenêtres successives et la longueur totale de la fenêtre. Pour chaque segment de signal s_k , la transformée de Fourier S_k est calculée :

$$S_k(n) = \frac{1}{L_s} \sum_{j=1}^{L_s} s_k(j) w(j) \exp\left(\frac{-2i\pi k j n}{L_s}\right), \ 1 < n < L_s$$
(4.11)

La densité spectrale de puissance PSD_k (en $\mu Pa^2/Hz$) de chaque segment s_k est :

$$PSD_k(f_n) = \frac{L_s}{F_s} \frac{1}{L_s^2 U_s} |S_k(f_n)|^2, f_n = \frac{n}{/L_s}, \ 1 < n < L_s$$
(4.12)

où

$$U_s = \frac{1}{L_s} \sum_{j=1}^{L_s} |w(j)|^2$$
(4.13)

 ${\cal F}_s$ est la fréquence d'échantillonnage du signal.

La puissance P_k (en μPa^2) de chaque segment est :

$$P_{k} = 2\frac{F_{s}}{L_{s}} \sum_{n=1}^{L_{s}/2} PSD_{k}(f_{n})$$
(4.14)

La densité spectrale de puissance et la puissance du signal entier sont les moyennes des densités et des puissances sur tous les segments. En acoustique, les puissances sont plutôt exprimées en dB re 1μ Pa² :

$$P_{dB} = 10\log_{10}\left(\frac{P}{P_{ref}}\right) \tag{4.15}$$

où $P_{ref} = 1 \ \mu \text{Pa}^2$ est une puissance de référence.

Les densités spectrales de puissance sont exprimées par en dB re 1μ Pa/Hz^{0.5} :

$$PSD_{dB} = 10\log_{10}\left(\frac{PSD}{PSD_{ref}}\right) \tag{4.16}$$

Pour analyser les enregistrements sur le long-terme, une analyse en bandes d'octaves peut être réalisée. Elle permet de regrouper les fréquences et de simplifier le signal. Les bandes d'octave ont été définies à partir de la fréquence 11 Hz, la limite supérieure étant le double de la limite inférieure.

L'interprétation du signal en termes de transport par charriage reste difficile. En effet le signal reçu par l'hydrophone résulte de la propagation d'ondes acoustiques générées dans la rivière qui ont pu être réfléchies sur le fond et à la surface, diffractées, atténuées. Les caractéristiques du signal reçu dépendent aussi de la position du capteur, de la hauteur d'eau et de la granulométrie du fond. La mesure acoustique est intégratrice sur le plan spatial d'une zone de la rivière. Pour être correctement interprétée, la mesure acoustique doit être confrontée à des mesures complémentaires de l'environnement (hauteur d'eau, géométrie de la rivière, granulométrie des sédiments). L'estimation du flux de charriage à partir de la mesure acoustique nécessite d'établir une calibration avec des mesures réalisées in situ (par exemple des prélèvements Helley-Smith).

4.2.4.3 Application de la mesure acoustique à Pougny

A Pougny, un hydrophone a été installé en rive droite. Le capteur utilisé est un micro HTI-99HF installé au bout d'une perche métallique et descendu le long de la berge. Il est relié à une station de mesure autonome Wildlife Acoustics¹ SM2BAT+. La station a d'abord été alimentée par une batterie puis a été reliée au secteur. La sensibilité de l'hydrophone est de -164,3 dB re $1V/\mu$ Pa. Des tests et analyses du signal préliminaires réalisés au cours de l'installation (le 27/08/2013) ont permis les observations suivantes (Figure 4.7) :

- 1. Il existe un bruit à 50 Hz, avec des harmoniques jusqu'à 200 Hz environ, qui est un bruit électronique du à l'alimentation,
- 2. Des impulsions sont mesurées entre 700 Hz et 10 kHz, et peuvent correspondre à du charriage grossier,
- 3. Un bruit « blanc » (c'est à dire dont la puissance est constante) haute fréquence est mesuré entre 2 kHz et 30 kHz, correspondant à du charriage de petites particules (diamètre proche du millimètre)
- 4. Une fréquence porteuse à 47,5 kHz et des harmoniques au dessus est observée. Il s'agit d'un bruit électronique correspondant sans doute à une fréquence utilisée par d'autres systèmes de mesure installés dans la station,
- 5. Des impulsions large bandes (coupures liées à l'électronique) sont mesurées.

1. http://www.wildlifeacoustics.com/



FIGURE 4.7 – Spectrogramme du signal enregistré par la chaîne wildlife acoustics, l'échelle de couleur correspondant à la densité spectrale de puissance, d'après Geay [2013].

Compte-tenu de ces observations, les paramètres des mesures acoustiques ont été fixées avec le paramétrage suivant :

- Fréquence d'échantillonage $F_s=96$ kHz
- Utilisation d'un filtre passe-haut analogique coupant à 180 Hz, qui permet d'atténuer le bruit électronique à 50 Hz et les harmoniques

Depuis l'installation, des enregistrements de une minute sont réalisés toutes les heures.

Afin de sélectionner la gamme de fréquences représentative du charriage et non polluée par une autre source de bruit, une analyse par bandes d'octaves a été réalisée sur les données mesurées du 27/08/2013 au 24/09/2013. Pour chaque enregistrement, l'énergie acoustique contenue dans chaque bande d'octave a été calculée. Une corrélation de Pearson est appliquée pour corréler entre elles les 12 bandes et permet de construire une carte de corrélation (Figure 4.8). La carte met en évidence quatre familles de bandes d'octaves :

- Les bandes 1 à 7 (11< f <1400 Hz) sont corrélées entre elles. Ce sont les bandes influencées par le bruit électronique à 50 Hz,
- Les bandes 8 et 9 (1400 < f < 5600 Hz) sont influencées par les deux phénomènes précédents,
- La bande 12 (22627 < f < 45255 Hz) semble influencée par le mode d'alimentation de la station (batterie ou secteur). Par précaution elle est écartée de l'analyse pour le charriage.



FIGURE 4.8 – Corrélation entre les bandes d'octaves, la couleur correspond au coefficient de corrélation d'après Geay [2013].

L'analyse acoustique a permis de mettre en évidence une corrélation entre le débit à Pougny et la puissance acoustique des bandes d'octave 10 et 11 (Figure 4.9). Pour des débits supérieurs à 700 m³/s, le débit et la puissance acoustique sont moins corrélés. La puissance de la bande d'octaves 10 reste proche de 120 dB, alors que des variations sont observées pour la bande 11 (Figure 4.10).



FIGURE 4.9 – Chroniques mesurées entre le 28 août le 25 septembre 2013 : a) débit à Pougny, b) puissance acoustique.



FIGURE 4.10 – Chroniques mesurées entre le 29 avril août le 8 mai 2015 : a) débit à Pougny, b) puissance acoustique.

4.2.5 Granulométrie des sédiments transportés

4.2.5.1 Méthodes de mesure de la granulométrie

Pour la fraction grossière (80 μ m< d < 80 mm), la méthode de mesure par tamisage est généralement utilisée [NF P 94-056, 1996]. L'analyse consiste à fractionner l'échantillon au moyen d'une série de tamis et à peser le refus pour chaque tamis. La masse est rapportée à la masse totale de l'échantillon. Sur la gamme de diamètres considérée, la distribution est discrétisée en 19 diamètres.

La sédimentométrie est une méthode utilisée pour la fraction fine ($d < 80 \ \mu m$) [NF P 94-057, 1992]. Cette méthode est basée sur le principe de la décantation et permet d'estimer le diamètre équivalent des particules à partir de la mesure de la vitesse de chute. Les sédiments sont contenus dans une suspension homogène défloculée et mise à décanter dans une colonne. Un densimètre plongé dans la suspension permet de lire l'évolution au cours du temps de la masse volumique de la suspension. La profondeur d'immersion H_t de l'appareil est aussi mesurée. Le diamètre équivalent d des plus grosses particules non sédimentées à l'instant t est calculé à partir de la mesure de la vitesse de décantation $v(t) = H_t/t$ et de la loi de Stokes :

$$d = \left[\frac{1}{g}\frac{18\nu}{\delta}\frac{H_t}{t}\right]^{0.5} \tag{4.17}$$

où $g \approx 9,81 \text{m/s}^2$ est l'accélération de la pesanteur, δ est la densité réduite du sédiment, masse volumique du sédiment, ν est la viscosité cinématique de l'eau.

La proportion d'éléments de diamètre inférieur ou égal à d contenus dans la suspension au temps t est :

$$p = \frac{V_s}{M} \frac{\rho_s}{\delta} \left[\frac{\rho_t}{\rho} - 1 \right] \tag{4.18}$$

où V_s est le volume de la suspension, M est la masse initiale de sédiment et ρ_t est la masse volumique de la suspension. La méthode permet de mesurer 10 diamètres équivalents dans la gamme [1 µm, 63 µm]. Elle fait intervenir de nombreuses mesures et corrections intermédiaires. Les résultats sont particulièrement dépendants des conditions de mesure ainsi que de la nature, la forme et la densité des sédiments. De plus l'hypothèse de sphéricité utilisée pour l'application de la loi de Stokes donne une tendance à la minoration du diamètre.

Pour les échantillons présentant une large distribution de diamètres, les méthodes de tamisage et de sédimentométrie sont successivement appliquées. La proportion de sédiments ayant un diamètre compris entre 63 µm et 80 µm n'est pas mesurée, elle est déduite de la masse totale de l'échantillon et des masses mesurées attribuées à chaque gamme.

La mesure par granulométrie laser est une mesure alternative pour des diamètres compris entre 0,02 µm et 2 mm [Syvitski, 2007]. Le granulomètre laser utilisé à Irstea pour les analyses est un CILAS 1190. Pendant la mesure, il est possible ou non d'utiliser des ultrasons qui permettent d'éviter la floculation des particules. L'utilisation des ultrasons donne une mesure plus représentative des particules élémentaires. Cette technique s'appuie sur la diffraction de la lumière. L'échantillon étudiée circule dans une cellule de mesure, et un rayon laser est envoyé. Les particules en suspension diffractent et atténuent le faisceau incident. Des capteurs reçoivent le rayonnement diffracté permettant la mesure de la distribution angulaire de l'intensité lumineuse diffractée. Un modèle théorique est utilisé pour convertir le spectre de répartition en distribution de fréquence de taille des particules. D'après la norme ISO-13320 [2009], la théorie de Fraunhofer est utilisée pour des particules ayant un diamètre au moins 40 fois supérieur à la longueur d'onde incidente, la théorie de Mie est appliquée pour des particules de taille inférieure à 100 µm. La mesure par granulométrie laser est une mesure surfacique, et la conversion en volume s'effectue en supposant des particules sphériques.

4.2.5.2 La mesure de la granulométrie des sédiments transportés du Léman à Seyssel

Des analyses granulométriques des sédiments transportés sont réalisées de façon ponctuelle le long du Haut-Rhône (Figure 4.1). La diversité de taille des sédiments transportés dans la retenue implique une diversité des modes de transport et des modes de prélèvements des échantillons, et aussi une diversité dans les protocoles d'analyse granulométrique (Tableau 4.5).

	INDEENC III	Caracteribuique	s des grandio	incorres realise	
Cours	Station	Position	Transport	Période	Analyse
d'eau					
Rhône	Ripes	fond	charriage	26/03/2014	tamisage
		fond	charriage	24/06/2015	tamisage
Rhône	Pougny	surface RD	suspension	chasse 2012	granulomètre laser
		surface RD	suspension	juin 2012	granulomètre laser
		profondeur RD	trappe	juin 2012	granulomètre laser
		surface RD	suspension	mai 2014	granulomètre laser
Le Rhône	Pont Carnot	fond	charriage	chasse 2012	tamisage
Le Rhône	$G\acute{e}nissiat$	vannes	total	chasse 2012	tamisage
					sédimentométrie
		colonne d'eau	suspension	mars 2014	granulomètre laser
Le Rhône	Bognes	fond	charriage	chasse 2012	tamisage
Le Rhône	Seyssel	surface RD	suspension	chasse 2012	granulomètre laser
L'Arve	Bout du Monde	surface RD	suspension	déc. 2012	granulomètre laser

TABLEAU 4.5 – Caractéristiques des granulométries réalisées.

Au cours de la chasse de 2012, les protocoles d'analyses granulométriques des sédiments transportés ont montré une forte hétérogénéité. Alors que les granulométries des sédiments transportés à Pougny et Seyssel sont réalisées au granulomètre laser, l'analyse a été réalisée par tamisage et sédimentométrie pour les sédiments prélevés au niveau des vannes. Nous disposons actuellement d'un jeu de 7 échantillons prélevés dans la retenue de Génissiat dont la granulométrie a été déterminé à la fois par granulométrie laser et par sédimentométrie/tamisage. Pour la granulométrie laser, un essai a été réalisé en utilisant des ultrasons, et un autre sans. Une différences entre les méthodes est observée sur les 7 échantillons (Figure 4.11). Il existe des différences entre la méthode de granulométrie laser avec ou sans ultrasons. La mesure avec ultrasons produit toujours des diamètres plus faibles que sans ultrasons. L'écart entre la mesure par granulométrie et la mesure par sédimentométrie/tamisage semble d'autant plus important que l'échantillon est grossier. Le diamètre médian obtenu par granulométrie laser avec ultrasons est toujours inférieur à celui obtenu par sédimentométrie/tamisage. De manière générale, les diamètres obtenus avec le laser sans ultrason sont plus proches de ceux obtenus par sédimentométrie/tamisage. Ce point souligne la question de l'efficacité du défloculant utilisé dans la méthode par sédimentométrie.



FIGURE 4.11 – Distributions granulométriques obtenues par granulométrie laser et sédimentométrie/tamisage, prélèvement du 27/09/2012 au centre de la section située au PK 164,27.

4.2.5.3 Description de la distribution granulométrique d'échantillons multimodaux

Les représentations classiques des distributions granulométriques, exprimées en pourcentage de volume ou de masse inférieur à un diamètre (typiquement d_{10} , d_{50} , d_{90}) ne permettent pas de mettre en évidence le caractère multimodal des distributions granulométriques. De nombreux auteurs ont proposé des outils afin de décomposer un échantillon multimodal en plusieurs souspopulations [Mäkelä *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2012; Launay, 2014]. L'hypothèse de base est de considérer que les sous populations ont une distribution granulométrique décrite par une loi log-normale :

$$f(d) = \frac{1}{d\ln 10\sigma\sqrt{2\pi}} \exp(\frac{-(\log_{10}d - \mu_d)^2}{2\sigma^2})$$
(4.19)

où μ_d est l'espérance et σ est l'écart type. Le diamètre médian est $d_{50} = 10^{\mu_d}$. Un programme basé sur le package Mixtools de R et développé par Launay [2014] permet, après que l'utilisateur ait indiqué le nombre de populations à identifier, de caractériser les différentes sous-populations dans la distribution en renseignant μ_d , σ et un paramètre λ qui est la proportion de la souspopulation dans la distribution. Cette décomposition statistique nécessite une représentation quasi-continue de la distribution granulométrique afin de déceler les inflexions dans la distribution. Des tests ont montré que l'outil n'est pas applicable aux distributions obtenues par sédimentométrie/tamisage du fait du nombre de points réduit servant à décrire la granulométrie qui produit des discontinuités dans la distribution.

A partir des résultats des tests appliqués aux échantillons analysés par granulométrie laser disponibles, 6 sous-populations granulométriques ont été identifiées (Tableau 4.6). Ces populations permettent de décrire les distributions granulométriques pour des diamètres allant jusqu'à 400 μ m (Figure 4.12). Dans l'exemple, seules les quatre premières classes sont présentes.

TABLEAU 4.6 – Populations de	sédiments permettant de décrir	e la distribution granulométrique
------------------------------	--------------------------------	-----------------------------------

nom	$d_{50} \; (\mu { m m})$	σ
argile	4	0,32
limon fin	15	0,24
limon gros	45	0,17
sable très fin	90	0,17
sable fin	200	0,2
sable moyen	400	0,2



FIGURE 4.12 – Distribution granulométrique du prélèvement de sédiments en place du 27/09/2012 au PK 170,45 obtenue par granulométrie laser et reconstituée à partir de 6 populations sédimentaires identifiées sur le Haut-Rhône.

4.3 Dynamique du transport des matières en suspension en période d'interchasse

4.3.1 Concentrations en matières en suspension

Grâce au réseau de turbidimètres installé, il est possible de suivre l'évolution des concentrations le long du Rhône (Figure 4.13). Entre le 20/07/2014 et le 05/08/2014, les retenues de Verbois, Chancy-Pougny et Génissiat n'ont pas été exploitées selon un mode journalier, à cause d'apports importants du Lac Léman, et le débit est resté proche de $600 \text{ m}^3/\text{s}$.

En amont, la concentration de l'Arve à Bout du Monde est fortement corrélée au débit. Les concentrations sont assez élevées et dépassent régulièrement 1 g/l.

A Pougny, la concentration est corrélée à celle de l'Arve, avec une dynamique similaire. Les concentrations sont plus faibles, dues à la dilution du flux de l'Arve par les eaux du Rhône. Une partie du flux est aussi déposée dans les retenues de Verbois et Chancy-Pougny. La concentration à Pougny est influencée par le débit à Pougny, avec une atténuation de la concentration entre
Bout du Monde et Pougny variable selon le débit du Rhône (par exemple les pics du 20 au 24 juillet sont moins atténués que ceux du 08 au 11 août). Pour des apports normaux de l'Arve, la concentration à Pougny montre des créneaux simultanés aux créneaux de débit, les débits faibles du Rhône ayant une plus forte tendance à favoriser le dépôt dans les retenues de Verbois et Chancy-Pougny.

A Pyrimont, la concentration est très proche de la concentration à Pougny en régime normal, ce qui laisse supposer que peu de dépôt a lieu dans la retenue de Génissiat dans ce cas. En période d'interchasse, la capacité de remobilisation des sédiments dans la retenue de Génissiat étant faible (cf. figure 3.25), la propagation dans la retenue de Génissiat des sédiments en suspension à Pougny semble être le processus principal expliquant la présence de matières en suspension à Pyrimont, avec peu d'échanges des matières en suspension avec le fond. Pour des concentrations plus fortes, les pics sont atténués entre Pougny et Pyrimont. Ainsi, il semblerait qu'il existe, en fonction des contraintes hydrauliques dans la retenue, une concentration en matières en suspension limite au delà de laquelle du dépôt a lieu.

Ainsi, les matières en suspension transitent le long de la retenue de Génissiat et leur dynamique varie très peu d'un site à l'autre, suggérant qu'il existe très peu d'échanges avec le fond, hormis le dépôt dans les retenues.



FIGURE 4.13 – Chroniques mesurées entre le 15 juillet et le 15 août 2014 : a) Concentrations à Bout du Monde, Pougny et Pyrimont, b) Débit à Bout du Monde, Pougny et Pyrimont, c) cote au barrage de Génissiat.

4.3.2 Granulométrie des matières en suspension

La démodulation de la distribution granulométrique des prélèvements réalisés en surface à Pougny et Pyrimont en période d'interchasse a été réalisée à partir des populations présentées dans le tableau 4.6. Les sédiments présents en surface sont des argiles et des limons fins et la composition des échantillons diffère peu entre les deux sites malgré leur éloignement, ce qui confirme que les échanges avec le fond sont limités (Figure 4.14).



FIGURE 4.14 – Description granulométrique (densité de fréquence et démodulation) d'échantillons de surface prélevés en période d'interchasse : a) Pougny, b) Seyssel.

4.3.3 Propagation des matières en suspension entre Pougny et Pyrimont en période d'interchasse

Les matières en suspension mesurés à Pyrimont sont issues de la propagation dans la retenue de Génissiat des matières en suspension à Pougny. Des conditions d'exploitation de la retenue de Génissiat variées sont observées en période d'interchasse, avec des règles d'exploitation permettant d'associer des débits entre 0 et 750 m³/s à des cotes entre 325 et 330,7 m NGFO. Des vitesses d'écoulement très variées peuvent être observées dans la retenue. Le temps de propagation entre Pougny et Pyrimont a été estimé à partir des mesures pour différents épisodes entre juillet 2014 et avril 2015, en se référant aux pics de concentration. Le temps de propagation des matières en suspension entre Pougny et Pyrimont varie en fonction des conditions hydrauliques (Figure 4.15). Globalement, le temps de propagation est d'autant plus court que le débit entrant est fort et que le niveau au barrage est bas.



FIGURE 4.15 – Chroniques mesurées entre le 20 juillet et le 5 août 2014 : a) concentrations à Pougny et Pyrimont, b) débits à Pougny et Pyrimont, c) cote au barrage de Génissiat.

Dans le but d'établir une relation entre ces paramètres, le modèle hydraulique de la retenue de Génissiat a été utilisé. Plusieurs régimes permanents représentatifs d'une période interchasse ont été simulés et ont permis d'établir une relation :

$$\Delta T = aQ_{PO}^b H_{GE}^c \tag{4.20}$$

avec T en heures, $a = 3,94 \times 10^{-7}$, b = -0,93 et c = 5,56, où $H_{GE} = Z_{GE} - 262,6$ est la hauteur d'eau maximale au barrage, définie à partir de la cote mesurée et de l'altitude du seuil de la vanne de fond. Un coefficient de détermination $R^2=0,998$ est obtenu. Un abaque reliant la temps de propagation au débit et à la cote est obtenu à partir de cette relation (Figure 4.16). Les temps de propagation obtenus à partir des mesures sont reportés sur le graphe (cf. paragraphe 4.3.3). Il existe globalement un bon accord entre les résultats du modèle et les mesures. Dans le cas des mesures, la propagation du pic ne s'effectue pas toujours en régime permanent, avec des variations temporelles du débit amont et de la cote aval qui rendent difficile le choix d'un débit et d'une cote représentatifs et aussi une éventuelle influence de la cote aval.



FIGURE 4.16 – Temps de propagation des sédiments fins en suspension (en heures) simulé entre Pougny et Pyrimont pour un régime permanent en fonction du débit entrant et de la cote au barrage (isolignes), comparaison avec les mesures en période d'interchasse (points).

4.4 Dynamique du transport des matières en suspension en périodes de chasse

L'analyse de la dynamique du transport de sédiments en chasse est réalisée à partir des mesures historiques, combinées à la modélisation hydraulique des événements. Cinq événements de chasse présentant un vaste jeu de données hydro-sédimentaires mesurées été sélectionnés : les chasses de 1954, 1984, 2000, 2003 et 2012.

Concentrations en entrée

Durant la phase de remobilisation, les retenues suisses fonctionnent en exploitation normale. Les apports en matières en suspension dans la retenue de Génissiat correspondent à des apports de période interchasse et dépendent des débits du Rhône et de l'Arve et de la concentration en MES apportée par l'Arve (cf. paragraphe 4.7.2). Durant la phase de transport des sédiments issus des chasses suisses, les concentrations en MES entrant dans la retenue sont mesurées à partir de prélèvements de surface au niveau du Pont de Pougny (cf. paragraphe 4.2.2) et sont considérées représentatives du transport des sédiments fins de diamètre inférieur à 63 µm. On ne dispose pas de données concernant le transport de sédiments plus grossiers.

Concentrations en sortie

Au cours de la première phase, les sédiments observés en aval du barrage proviennent de la remobilisation de sédiments au sein de la retenue. Pour la phase de régulation, il s'agit de sédiments érodés dans les retenues suisses et ayant transité dans la retenue de Génissiat. Au niveau du barrage, la mesure est réalisée en sortie des conduites des vannes, où la turbulence permet de mettre en suspension quasi homogène toutes les classes de sédiments ayant transité par la vanne. Ainsi, les prélèvements issus de la vanne de fond intègrent à la fois le charriage et la suspension. En aval, des prélèvements de surface sont aussi réalisés à Pyrimont et à Seyssel.

4.4.1 Transport par suspension lors de la phase de remobilisation

L'analyse de la dynamique du transport par suspension lors de la phase de remobilisation s'appuie sur les mesures de concentrations en matières en suspension et de granulométrie réalisées au cours de la chasse de 2000 ainsi que sur la modélisation hydraulique de cet événement (Figure 4.17).



FIGURE 4.17 – Concentrations mesurées et conditions hydrauliques modélisées au cours de la chasse de 2000, aux stations de : a) Grésin (PK 173), b) Bellegarde (PK 169), c) Malpertuis (PK 164,8).

4.4.1.1 Mobilisation des matériaux entre Pont Carnot (PK 180) et Grésin (PK 173)

L'abaissement du niveau de la retenue en dessous de 325 m produit une augmentation de la concentration en matières en suspension à Grésin (Figure 4.17 a). Le modèle montre une augmentation conjointe des contraintes dans la section. Au début de l'abaissement un mélange de sédiments fins et de sables (53% de fins et 47% de sables, d_{50} =60 µm) est observé en surface à Grésin. Les sédiments en place sont donc mobilisés entre les deux stations, ce qui est en accord avec les contraintes efficaces modélisées dans ce tronçon qui montrent que les sédiments de 400 µm peuvent être érodés dès que le niveau de la retenue est inférieur à 320 m (cf. figure 3.31). Pour une cote au barrage inférieure à 312,5 m, l'écoulement est libre et la contrainte simulée ne dépend plus que du débit entrant. Les sédiments transportés présents en surface sont uniquement des sables (d_{50} =250 µm), ce qui suggère que la couche supérieure constituée de dépôts récents de sédiments fins a été érodée. Des pics de concentration sont mesurés en surface, mais leur interprétation est difficile puisqu'une seule mesure a servi à les déterminer. De plus, le diamètre des prélèvements correspondant à ces pics est proche du diamètre du fond (d_{50} =400 µm), pouvant laisser croire à une erreur de manipulation ou à une forte érosion locale de sédiments.

A Bellegarde, l'abaissement du niveau de la retenue en dessous de 321 m produit une augmentation de la concentration en matières en suspension (Figure 4.17 b). Le modèle montre une augmentation conjointe des contraintes dans la section. Au début de la chasse, les concentrations mesurées sont plus fortes à Bellegarde et la granulométrie des sédiments transportées est identique à celle des dépôts locaux (d_{50} =80 µm), ce qui est en accord avec les contraintes efficaces modélisées qui montrent que les sédiments autour de 100 µm pour des niveaux inférieurs à 315 m (cf. figure 3.31). Les sédiments en place sont donc remobilisés entre les deux stations (Figures 4.17 a,b). Pour une cote au barrage inférieure à 310 m, l'écoulement est libre. A cote basse, alors que la concentration en MES ne varie pas, on observe une décroissance du diamètre entre les deux stations (100% de sable et d_{50} =250 µm à Grésin, 35% de fins et 65% de sables avec d_{50} =150 µm à Bellegarde). Un dépôt ou un changement de mode de transport des sédiments les plus grossiers a donc lieu entre Grésin et Bellegarde conjointement à une érosion des sédiments modélisée pour des conditions de chasse soutient cette théorie puisqu'elle montre une diminution des contraintes entre les PK 171 et 170 (cf. figure 3.31).

4.4.1.3 Mobilisation et dépôt sélectif des matériaux entre Bellegarde (PK 169) et Malpertuis (PK 164,8)

A Malpertuis, la chronique de concentration mesurée est corrélée à la chronique de contrainte calculée. Du transport est observé à Malpertuis au début de l'abaissement, avant même l'ouverture des vannes (Figure 4.17 c). Le diamètre transporté diminue entre Bellegarde et Malpertuis. Il semble donc exister un dépôt ou un changement de mode de transport des sédiments les plus grossiers à l'aval de Bellegarde. Une érosion des sédiments en place a aussi lieu car la concentration en MES varie peu entre les deux stations (Figures 4.17 b, c). Lorsque le niveau est inférieur à 309 m, l'écoulement est libre, les contraintes simulées augmentent, ainsi que la concentration et la granulométrie transportée. Lorsque l'abaissement est suffisant, une plus forte remobilisation a lieu dans le bief, qui pourrait être localisée entre les PK 166 et 165, où une augmentation des contraintes est observée pour une cote au barrage de 305 m (cf. figure 3.31). La concentration et le diamètre médian mesurés à Malpertuis augmentent.

4.4.2 Transport par suspension durant la phase régulation des chasses suisses

4.4.2.1 Transit des sédiments issus des chasses suisses

Au cours de la phase de chasses suisses, les apports sédimentaires à Pougny sont importants. Les sédiments présents en surface sont des argiles et des limons fins et grossiers (Figure 4.18). Les chasses des barrages suisses font apparaître une population plus grossière en surface que lors des périodes interchasses (Figure 4.14). Les prélèvements obtenus à partir de trappes à sédiments font apparaître un mode supplémentaire à 90 µm. Des sables sont donc aussi transportés, mais par suspension graduée.



FIGURE 4.18 – Description granulométrique (densité de fréquence et démodulation) d'échantillons prélevés pendant la phase de régulation de la chasse de 2012 à Pougny : a) prélèvement de surface, b) piège à sédiments.

Différents protocoles de gestion du niveau de la retenue de Génissiat ont été mis en oeuvre au cours des chasses. L'analyse du transit des sédiments au cours des chasses de 1954 et 1984 permet de mettre en évidence l'influence des conditions hydrauliques sur le transport (Figures 4.19 a, b). D'après l'analyse géomorphologique, la principale condition pour favoriser le transit des sédiments le long de la retenue est le maintien de la retenue à cote basse. Pour une cote donnée, le transit est aussi amélioré si le débit est plus fort (cf. Figures 3.27, 3.32). Pour des conditions de débit similaires (Q=450-500 m³/s), le transit est en effet plus efficace au cours de la chasse de 1984, où la retenue est maintenue à une cote Z=317 m qu'en 1954 où la retenue est à la cote Z=324 m. Néanmoins, ces deux événements sont séparés de 30 ans, avec un envasement de la retenue estimé à environ 10 millions de m³ (Tableau 3.8) et un comblement pouvant atteindre 20 m (Figure 3.11). La modification importante de la géométrie incite donc à relativiser les conclusions déduites de cette comparaison.



FIGURE 4.19 – Matières en suspension mesurées le long de la retenue et cote au barrage : a) chasse de 1954, b) chasse de 1984.

Au cours des différentes campagnes de mesures, aucun courant de densité n'a été mesuré dans la retenue.

4.4.2.2 Temps de propagation des sédiments entre Pougny et le barrage

A partir des mesures de concentration réalisées à la station du Pont de Pougny et au barrage, il est possible d'évaluer le temps de propagation des sédiments au cours de la phase de régulation. En fonction de la cote de la retenue, du débit, ainsi que des manœuvres de vannes et de la granulométrie des sédiments, le signal entre Pougny et le barrage est plus ou moins atténué et déformé. L'analyse des événements passés met en évidence des temps de propagation entre le Pont de Pougny et le barrage compris entre 7 heures et 13 heures.

Comme au 4.3.3, le modèle hydraulique de la retenue de Génissiat a été utilisé pour simuler plusieurs régimes permanents représentatifs de la phase de régulation avec des couples débit/cote au barrage. La relation obtenue est :

$$\Delta T = a Q_{PO}^b H_{GE}^c \tag{4.21}$$

avec T en heures, $a = 2,32 \times 10^{-5}$, b = -0,89 et c = 4,52, où $H_{GE} = Z_{GE} - 262,6$ est la hauteur d'eau maximale au barrage, définie à partir de la cote mesurée et de l'altitude du seuil de la vanne de fond.

Un coefficient de détermination $R^2=0.994$ est obtenu. Un abaque reliant le temps de propagation au débit et à la cote est obtenu à partir de cette relation (Figure 4.20). Les temps de propagation obtenus à partir des mesures en chasse sont reportés sur le graphe. Contrairement aux périodes d'interchasse, les temps de propagation obtenus à partir de régimes permanents sont assez différents des mesures obtenues pendant les chasses. Lors de chasses, les variations de l'hydrodynamique sont plus rapides et l'hypothèse d'un régime permanent n'est plus valide. Les calculs en régime permanent donnent généralement une propagation plus rapide qu'en réalité. En effet, pendant la phase de régulation, la retenue est plutôt en cours de remplissage, ce qui produit un ralentissement de l'écoulement dans la retenue non représenté en régime permanent. De plus, les temps de propagation simulés sont obtenus à partir du modèle numérique construit avec la géométrie de décembre 2011, alors que les temps de propagation mesurés en chasse remontent à 1987. L'utilisation de ce modèle pour des chasses anciennes correspondant à un état d'envasement moins avancé de la retenue, devrait aboutir à une sur-estimation du temps de propagation, en accord avec les observations. Pour estimer les temps de propagation des sédiments en suspension au cours d'une chasse, l'utilisation d'un modèle hydraulique en régime non-stationnaire et bâti sur une géométrie représentative semble nécessaire.



FIGURE 4.20 – Temps de propagation des sédiments fins en suspension (en heures) simulé entre Pougny et Pyrimont pour un régime permanent en fonction du débit entrant et de la cote au barrage (isolignes), comparaison avec les mesures en chasse (points).

4.4.3 Transport par suspension dans la retenue de Seyssel

Le transport dans la retenue de Seyssel est illustré à partir des données des chasses de 2003 et 2012. Au cours des deux phases de la chasse, les matériaux sortant de la retenue de Génissiat transitent dans la retenue de Seyssel. Les matériaux prélevés en surface à Seyssel sont des argiles et limons.



FIGURE 4.21 – Concentrations mesurées en sortie du barrage de Génissiat, à Pyrimont et à Seyssel au cours des chasses de : a) 2003, b) 2012.

La concentration mesurée en sortie du barrage de Génissiat est obtenue à partir des concentrations mesurées en sortie des vannes pondérées par le débit des vannes. Les mesures à Pyrimont et Seyssel sont des mesures de surface (Figure 4.21). La chute de la concentration entre la sortie du barrage de Génissiat et Pyrimont peut être attribuée soit à un dépôt soit au fait que les sédiments les plus grossiers sont transportés vers le fond, soit par charriage, soit par suspension graduée. Entre Pyrimont et Seyssel, la concentration en surface varie peu, ce qui suggère que les sédiments en suspension sont transportés entre les deux stations sans interagir avec le fond.

4.4.4 Processus hydro-sédimentaires près du barrage de Génissiat

Les mesures de concentration et de granulométrie dans les vannes du barrage réalisées au cours des chasses de 2000, 2003 et 2012, associées aux conditions hydrauliques à proximité (débit dans les vannes, niveau de la retenue), mettent en évidence des processus hydro-sédimentaires liés à la présence du barrage de Génissiat.

4.4.4.1 Gradient vertical

Concentration dans les vannes

Il existe un gradient vertical de concentration dans les vannes du barrage. La concentration dans la vanne de fond est plus forte que dans la vanne de demi-fond et des pics de concentration sont observés pendant la première phase (Figure 4.22). Au cours de la phase de remobilisation, les concentrations mesurées dans la vanne de fond et dans la vanne de demi-fond ont des dynamiques similaires. Lors de la phase de régulation, les signaux semblent moins corrélés.



FIGURE 4.22 – Concentration mesurée dans les vannes au cours de la chasse de 2012.

Granulométrie dans les vannes

Les prélèvements granulométriques réalisés au cours de la chasse de 2012 montrent que les sédiments sont plus grossiers dans la vanne de fond [Lerch et Thizy, 2013] (Figure 4.23). Il ne semble pas exister de corrélation entre la concentration et le diamètre dans les vannes. Au cours de la phase de remobilisation, les diamètres maximaux mesurés dans la vanne de fond sont assez importants ($d_{max}=8$ mm), et traduisent la possibilité de reprise de sables grossiers et graviers près de la vanne de fond. Les analyses granulométriques révèlent une quantité importante de sables $(d>62 \mu m)$ dans la vanne de fond (entre 45 et 65%), alors que les sables sont moins présents dans la vanne de demi-fond (entre 5 et 15 %). Au cours de la phase de régulation, les premiers échantillons prélevés dans la vanne de fond (jusqu'au 11/06/2012 à 4:30), sont plus grossiers que le reste des échantillons issus de cette phase. Les premiers sédiments arrivant au barrage sont a priori les sédiments issus de la retenue de Chancy-Pougny, qui sont plus grossiers que les sédiments de la retenue de Verbois [Wildi et Loizeau, 2009; Loizeau, 2014]. Cette forte proportion d'éléments grossiers peut expliquer la différence entre les concentrations observées dans la vanne de fond et dans la vanne de demi-fond (Figure 4.22). Par la suite, les sédiments prélevés dans la vanne de fond et dans la vanne de demi-fond ont les mêmes caractéristiques, avec une part de sables d'environ 10%.



FIGURE 4.23 – Granulométrie mesurée dans les vannes au cours de la chasse de 2012.

4.4.4.2 Variations du gradient de contrainte

Accélération de l'écoulement

Lorsque la cote est basse, les pics de concentration observés en vanne de demi-fond et en vanne de fond sont généralement corrélés à des augmentations brusques du débit sortant qui provoque en réaction une diminution brusque de la cote de la retenue. Lorsque la cote est basse et que la vitesse d'abaissement dépasse 25 cm/h, on observe presque systématiquement des pics dans la vanne de fond (Figures 4.24 a-b, 4.25 a-b, 4.25 a-b), [Peteuil, 2014].

Au cours de la chasse de 2000, des pics de concentrations ont aussi été observés le 23/05/2000à 21:40 et le 24/05/2000 à 4:00 en sortie de la vanne de demi-fond, et faisaient suite à une brusque augmentation du débit sortant et à une diminution de la cote. Des pics similaires observés au niveau de la station installée au PK 164,81 (Figure 4.17 c) permettent de déduire que les pics de concentrations observés au barrage sont au moins partiellement issus de sédiments remobilisés en amont du PK 164,81.

Il semblerait que ces pics brutaux et intenses liés à la manipulation rapide des vannes soient produits par un processus d'érosion par dépassement d'un seuil de gradient de contrainte, lié à une accélération de l'écoulement.

Décélération de l'écoulement

Dès la remontée du plan d'eau à l'issue de la phase d'érosion, on observe une diminution rapide des concentrations mesurées dans les vannes (Figures 4.24, 4.25, 4.26). La décélération de l'écoulement semble donc impacter le transport des sédiments. En particulier, lors de l'abaissement de la retenue, des conditions hydrauliques similaires entraînent des concentrations plus élevées.



FIGURE 4.24 – Débits, Concentrations, Cote mesurées au barrage durant la première phase de la chasse de 2000 : a) vanne de fond, b) vanne de demi-fond (Les débits passant par les différentes vannes ne sont pas disponibles pour la phase de régulation).



FIGURE 4.25 – Débits, Concentrations, Cote mesurées au barrage durant la chasse de 2003 : a) vanne de fond, b) vanne de demi-fond.



FIGURE 4.26 – Débits, Concentrations, Cote mesurées au barrage durant la chasse de 2012 : a) vanne de fond, b) vanne de demi-fond.

4.4.4.3 La gestion de l'ouverture des vannes

Première ouverture de la vanne de fond

A la première ouverture de la vanne de fond, on observe une brève augmentation de la concentration dans la vanne. De même lorsque la vanne est fermée puis réouverte au cours de l'opération, comme le 26/05/2000 à 3:40, les premières concentrations ont été mesurées à des valeurs comprises entre 180 et 300 g/l [CNR, 2000]. Ce phénomène peut être attribué à l'érosion autour de l'entrée de la vanne, plus efficace au cours de la chasse car les conditions hydrauliques sont plus favorables et les dépôts frais sont plus facilement mobilisables.

Rôle de la vanne de fond durant l'abaissement

Il apparait que la concentration sortant de la vanne de fond est d'autant plus importante que le débit dans la vanne est élevé au cours de l'abaissement du plan d'eau. En outre, lorsque le débit passe complètement par la vanne de fond, il n'y a plus de capacité de dilution par la vanne de demi-fond. En effet, en 2000, jusqu'à l'abaissement à une cote de 309 m tout le débit a été évacué par la vanne de fond, et la concentration a atteint 24 g/l dans la vanne [CNR, 2000], obligeant les exploitants à fermer cette vanne et utiliser la vanne de demi-fond (Figure 4.24 a b). Pour les chasses de 2003 et 2012, le débit est réparti plus tôt entre les deux vannes, avec des concentrations résultantes plus faibles.

Répartition des débits pendant le palier à cote basse

Les chasses de 2003 et 2012 présentent des conditions hydrauliques assez similaires en terme de débit total et de cote au barrage au cours de la phase de remobilisation, avec une répartition des débits différente entre les vannes. La comparaison des deux événements est discutable mais semble montrer que pour un même débit total au barrage, plus le débit évacué par un ouvrage est important, plus les concentrations passant dans l'ouvrage sont importantes (Tableau 4.7).

TABLEAU 4.	TABLEAU 4.7 – Debits et concentrations moyens au barrage pendant le paner à cote basse.									
	$\overline{Q_{VF}}$ (m ³ /s)	$\overline{C_{VF}}(g/l)$	$\overline{Q_{VDF}}$ (m ³ /s)	$\overline{C_{VDF}}$ (g/l)	$\overline{Q_{tot}}$ (m ³ /s)	$\overline{C_{tot}}$ (g/l)				
chasse 2003	225	33,5	113	8,55	338	25,16				
chasse 2012	157	25.59	171	11.7	328	18.34				

Répartition des débits pendant la phase de régulation

Au cours de la phase de chasses suisses, la quantité de sédiments transférée à l'aval dépend de la quantité entrant mais aussi de la cote et de la gestion de l'ouverture des vannes. En 2003, tout le débit a été évacué par les vannes (principalement par la vanne de fond) pendant la phase de régulation, environ 50% du flux mesuré à Pougny a été transféré à l'aval. A contrario, en 2012, le débit a été principalement évacué par l'évacuateur de surface et les usines afin de rester scrupuleusement en dessous des valeurs maximum autorisées, et on estime que moins de 20% des sédiments ont transité par le barrage.

4.5Transport des sédiments grossiers

4.5.1Transport par charriage en amont de la retenue en période d'interchasse

Deux campagnes de mesure de charriage avec le préleveur Helley-Smith ont été réalisées au niveau de la station des Ripes en mars 2014 et juin 2015. Pour ces deux campagnes, les barrages amont étaient fermés et les débits étaient inférieurs au débit de crue. Les prélèvements ont été réalisés sur 3 verticales, avec trois prélèvements par verticale. La mesure est assez incertaine.

Les prélèvements réalisés au cours des deux campagnes ont montré que le transport par charriage dans la section était faible, avec des débits solides compris entre 10^{-6} et 10^{-4} m³/s pour des débits liquides entre 300 et 500 m³/s (Figure 4.27). Le diamètre médian des sédiments transportés est compris entre 2 et 5 mm, cette valeur étant sensiblement différente du diamètre au fond ($d_{50}=70$ mm, cf. Figure 3.9). Ces éléments suggèrent que le transport par charriage à l'amont de la retenue en période d'exploitation normale est un transport résiduel.

A partir de ces mesures, une courbe de tarage sédimentaire $Q_s = f(Q)$ a été établie pour la station des Ripes. Elle est basée sur le calcul de la capacité de transport pour un diamètre de 2 mm à partir de la formule de charriage de Camenen et Larson [2007], estimée avec la contrainte moyenne dans la section et multipliée par un coefficient $1,5.10^{-4}$ afin que la courbe de tarage passe par les points de mesure.

La masse moyenne transitant annuellement à la station des Ripes a été estimée à partir de cette courbe de tarage et de la courbe des débits classés basée sur le débit horaire de 1974 à 2012. L'apport moyen annuel de sables dans la retenue en conditions d'interchasse est estimé à 2700 t.



FIGURE 4.27 – Mesures de charriage à la station des Ripes et courbe de tarage sédimentaire.

En conditions d'exploitation normale, le transport de sédiments grossiers à l'amont de la retenue est très faible. La contribution des sédiments grossiers aux évolutions morphologiques de la retenue est donc limitée.

4.5.2 Transport par charriage au Pont Carnot lors de la chasse de 2012

La présence de transport par charriage au Pont Carnot indique une mobilisation de matériaux dans les biefs amonts. Au cours de la chasse de 2012, le charriage de matériaux grossiers $(d_{50}=28 \text{ mm} \text{ en moyenne} \text{ le } 08/06/2012 \text{ et } d_{50}=18 \text{ mm} \text{ le } 11/06/2012)$ a été mesuré (Figure 4.28). Le diamètre médian et le taux de transport ont respectivement varié d'un facteur 2 et 9 au cours des mesures réalisées le 08/06/2012. A partir du modèle hydraulique, la capacité de transport a été calculée par la formule de Meyer Peter et Müller [1948], pour un $d_{50}=28 \text{ mm}$. Les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur que les taux les plus faibles mesurés. Le pont Carnot est situé dans la zone d'influence du remous du barrage pour des cotes assez hautes, la contrainte et donc le taux de transport dépendent à la fois du débit et de la cote au barrage. Sur la période de la chasse de 2012, soit du 03/06/2012 au 15/06/2012, le flux de sédiments transportés par charriage au Pont Carnot est estimé à 40000 T, soit environ 1,4 % du flux de matières en suspension mesuré à Pougny (cf. Tableau 4.13). Le transport des sédiments grossiers à l'amont semble donc avoir une faible contribution au bilan sédimentaire de la retenue au cours d'une chasse.



FIGURE 4.28 – Modèle et mesures de charriage au Pont Carnot durant la chasse de 2012.

4.5.3 Transport par charriage à Bognes lors de la chasse de 2012

Un transport par charriage a été mesuré à la station hydrométrique de Bognes au cours de la chasse de 2012, avec un diamètre transporté significativement différent du diamètre du fond (30 mm) mesuré dans la partie amont de la retenue de Seyssel. Entre le 08/06/2012 et le 11/06/2012, les sédiments charriés sont des sables fins et moyens ($d_{50}=400 \ \mu m$). Le 13/06/2012, alors que la vanne de fond est fermée les sédiments charriés sont plus grossiers ($d_{50}=3 \ mm$), avec la présence de coquillages et le flux de charriage est plus faible (Figure 4.29). Cela suggère que les sédiments transportés proviennent de l'ouverture des vannes de la retenue de Génissiat. La capacité de transport estimée à partir du modèle hydraulique de la retenue de Seyssel (cf. paragraphe 3.6.4.2) et de la formule de Meyer Peter et Müller [1948] est très supérieure au flux mesuré (Figure 4.29). Le transport de sédiments par charriage est donc un transport résiduel contrôlé par les apports amont sortant du barrage de Génissiat.



FIGURE 4.29 – Modèle et mesures de charriage à Bognes durant la chasse de 2012.

4.6 Apport de la modélisation hydraulique 2D à la compréhension de la dynamique proche du barrage

4.6.1 Présentation du modèle

La configuration des ouvrages de vidange et les profondeurs élevées près du barrage donnent lieu à des processus hydro-sédimentaires particuliers. Dans cette zone, la modélisation 1D n'est pas adéquate pour représenter correctement l'hydrodynamique à proximité des vannes. Un modèle 2D du tronçon proche du barrage a été développé à l'aide du logiciel TELEMAC² au cours d'un stage réalisé à Irstea [Duron, 2014], visant à améliorer la connaissance des processus hydro-sédimentaires près du barrage. Le modèle s'étend du PK 162,97 jusqu'au parement du barrage au PK 162,2. Il englobe le ruisseau de Cally, affluent en rive gauche vers le PK 162,51 mais sa contribution au débit est négligée. Le modèle 2D a été construit à partir d'un assemblage de profils issus de profils datant de décembre 2011 et de janvier et mars 2014. Localement, au niveau des vannes de fond, demi-fond et de l'évacuateur de crue, les altitudes ont été corrigées pour les ramener aux cotes des radiers des ouvrages. Un maillage 2D a été généré à l'aide du logiciel BlueKenue³ à partir de ces données. Des mailles d'environ 10 m ont été choisies pour la retenue, et le maillage est raffiné au niveau de tous les évacuateurs et des singularités. Le modèle est composé de 10 frontières qui intègrent la section amont, l'évacuateur de fond, l'évacuateur de demi-fond, l'évacuateur de surface, ainsi que les six prises d'eau des usines (Figure 4.30).



FIGURE 4.30 – Maillage et frontières du domaine, d'après [Duron, 2014].

^{2.} http://www.opentelemac.org/

 $^{3. \} http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/solutions/consultatifs/blue_kenue_index.html$

Le modèle a été calé à partir des mesures réalisées lors d'une campagne de mesures hydrosédimentaires réalisée en mars 2014. Les principaux paramètres hydrauliques et numériques sélectionnés sont [Duron, 2014] :

– version non hydrostatique

- profil transversal de vitesse amont proportionnel à la racine carrée de la profondeur d'eau
- loi de frottement de Strickler, coefficient égal à 60 m^{1/3}/s sur l'ensemble du domaine
- modèle de turbulence de Smagorinski sur l'horizontale

A partir du modèle, la chasse de 2012 a été simulée dans sa totalité en 2D [Duron, 2014; Artelia, 2014].

4.6.2 Caractéristiques hydrodynamiques

L'analyse des contraintes obtenues pour des simulations à différentes cotes avec plusieurs répartitions de débits entre la vanne de fond et la vanne de demi-fond fait apparaitre des motifs particuliers dans la zone (Figure 4.31) [Duron, 2014]. On observe toujours un chenal d'écoulement principal au niveau du thalweg, concentré en rive droite à l'amont de la zone, puis suivant la courbe. Il se dirige ensuite vers la vanne de fond, et à l'aval de celle-ci prend un virage à gauche en direction de la vanne de demi-fond. Plus le niveau de la retenue est bas, plus le chenal est étroit avec des contraintes fortes. Pour un niveau de 306 m, on observe un chenal secondaire tracé directement entre la courbe amont et la vanne de fond. Il disparait pour des niveaux plus élevés et est remplacé par une zone moins dynamique. On observe aussi deux zones moins dynamiques à gauche et à droite du chenal allant vers la vanne de demi-fond, particulièrement présentes lorsque le débit transitant dans cette vanne est faible.



FIGURE 4.31 – Configuration hydrodynamique de la zone.

4.6.3 Dynamique locale au cours de la chasse de 2012

Les contraintes locales sont calculées à partir des résultats du modèle 2D de la chasse de 2012 et fournissent des informations complémentaires pour l'interprétation des mesures de concentration réalisées en sortie des ouvrages.

4.6.3.1 Tronçon à l'amont du barrage

Dans le tronçon à l'amont du barrage, l'altitude du fond décroît rapidement à l'approche de la vanne de fond (environ 40 m en 400 m). Les contraintes diminuent fortement de l'amont à l'aval de la zone. La diminution atteint deux ordres de grandeur lorsque le niveau de la retenue est à 305 m (entre le 07/06/2012 et le 09/06/2012). A l'amont du tronçon, les faibles hauteurs d'eau provoquent de fortes vitesses, alors que dans la fosse, la hauteur d'eau est importante et les vitesses sont faibles (Figure 4.32). Les contraintes simulées dans le chenal (courbes rouge, bleue, verte) et par le modèle 1D (courbe grise) ont une dynamique proche de celle de la concentration mesurée dans la vanne de fond. Des pics de contrainte simultanés aux pics observés au niveau de la concentration dans la vanne de fond sont simulés par les modèles. Il existe des différences importantes entre le modèle 1D et le modèle 2D. Lorsque la cote au barrage est haute, la contrainte moyenne 1D intègre la part de l'écoulement situé à l'extérieur du chenal et les contraintes moyennes sur la section simulées par le modèle 1D sont inférieures aux contraintes locales dans le chenal. De fait, pour une cote haute, une contrainte moyennée dans la section ne permet pas de reproduire d'éventuels processus locaux de remobilisation et de transport dans le chenal.



FIGURE 4.32 - a) Contraintes simulées par les modèles 1D et 2D de la chasse de 2012, b) Concentration mesurée dans la vanne de fond, c) position des nœuds du modèle 2D.

4.6.3.2 Vanne de fond

La vanne de fond est située en rive droite de la retenue, à l'aval d'une fosse (Figure 3.12). A l'approche de la vanne de fond, le modèle 2D simule des contraintes locales très différentes selon la position (Figure 4.33). Les contraintes à l'entrée de la vanne (courbes rouge et bleue) sont fortement corrélées au débit passant par l'ouvrage et à la hauteur d'eau en amont. La contrainte au centre du PK 162,41 (courbe rose), est corrélée au débit des ouvrages en aval de la vanne de fond. La contrainte dans le chenal en amont de la vanne (courbe verte) et la contrainte moyenne dans la section ont une dynamique assez similaire mais des valeurs différentes. La concentration dans la vanne de fond a une dynamique similaire à la contrainte dans le chenal en amont et à la contrainte 1D dans la section, en particulier pour la phase de remobilisation.



FIGURE 4.33 – a) Contraintes simulées par les modèles 1D et 2D de la chasse de 2012, b) Concentration mesurée dans la vanne de fond, c) position des nœuds du modèle 2D.

4.6.3.3 Vanne de demi-fond

A l'approche de la vanne demi-fond, les contraintes simulées par les modèles 1D et 2D ont une dynamique assez similaire, mais des valeurs plus élevées sont simulées à proximité de la vanne. Les concentrations mesurées au cours de la phase de remobilisation sont corrélées à la contrainte. Au cours de la phase de régulation, le pic de concentration est simultané à un pic de contrainte, du à une augmentation du débit.



FIGURE 4.34 – a) Contraintes simulées par les modèles 1D et 2D de la chasse de 2012, b) Concentration mesurée dans la vanne de demi-fond, c) position des nœuds du modèle 2D.

4.6.3.4 Évacuateur de surface

L'évacuateur est situé en rive droite du barrage, au niveau d'un talus rocheux (Figure 2.11). Dans le modèle 1D, l'évacuateur est situé dans la même maille que la vanne de demi-fond. En s'éloignant de l'évacuateur, on observe une forte diminution des contraintes simulées par le modèle 2D, que l'on peut attribuer aux variations de géométrie, puisque les points les plus éloignés ne se situent plus au niveau du talus rocheux et les hauteurs d'eau sont plus fortes. Les contraintes locales simulées par le modèle 2D proche de l'évacuateur sont fortement corrélées à la concentration mesurée dans l'ouvrage. La concentration observée semble donc être influencée par des processus locaux qui ne peuvent pas être reproduits par le modèle 1D.



FIGURE 4.35 – a) Contraintes simulées par les modèles 1D et 2D de la chasse de 2012, b) Concentration mesurée dans l'évacuateur, c) position des nœuds du modèle 2D.

Un modèle 3D de la zone a aussi été développé. Le maillage 2D a été discrétisé sur la verticale à l'aide d'une vingtaine de plans répartis de manière homogène sur la verticale [Duron, 2014]. Le modèle a été validé pour un régime d'exploitation normale à partir de mesures aDcp réalisées sur la verticale. Les paramètres de calage du modèle 2D ont été conservés, et un modèle de turbulence de longueur de mélange a été ajouté pour la verticale. Le modèle a permis la simulation hydraulique de régimes permanents, décrits par différentes combinaisons de couples débit dans les ouvrages, cote au barrage. Il a permis de décrire la forme des profils verticaux de vitesse près des ouvrages. Néanmoins, le modèle hydraulique n'a pas fonctionné pour la simulation de la chasse de 2012. Quelques tests sédimentaires en régime permanent ont été réalisés pour décrire la forme des profils verticaux de concentration mais des problèmes de stabilité numérique liés à l'introduction de sédiments ont limité la gamme des scénarios simulés [Duron, 2014].

Le modèle a aussi été repris par Artelia [2014] pour la réalisation d'une étude courantologique de la zone proche du barrage afin d'étudier l'effet des dragages préventifs sur la concentration transitant par la vanne de fond.

4.7 Masses de sédiments entrant et sortant de la retenue de Génissiat

4.7.1 Masses de matières en suspension en période d'interchasse

La mise en place de mesures continues de turbidité à Pougny et Pyrimont depuis mars 2014 et juin 2014 respectivement, permet une estimation des masses entrant et sortant de la retenue de Génissiat. Les masses sont calculées pour la période du 15 juin 2014 au 30 septembre 2014, qui inclut une crue de l'Arve le 27/08/2014. Elles ont été calculées en interpolant les débits aux temps des concentrations. Pour chaque station et chaque source d'incertitude, l'intervalle d'incertitude est choisie d'après les caractéristiques de la mesure (voir paragraphe 4.2.1 pour le débit et paragraphe 4.2.2 pour la concentration), puis transformé en incertitude type. Les incertitudes sont composées puis l'incertitude est élargie. Pour chaque station l'incertitude élargie estimée est identique pour les stations de Bout du Monde, Pougny et Pyrimont (Tableau 4.8).

TABLEAU 4.8 – Incertitudes associées au calcul des masses de MES transportées au niveau de différentes stations et pour différentes chasses (Les valeurs données pour les sources sont les valeurs de l'intervalle).

Q	Mesure C	Hétérogénéité spatiale C	Hétérogénéité temporelle C	Incertitude élargie
10%	10%	10%	2%	22%

La différence entre la masse en entrée et en sortie de la retenue est le résultat des processus de transport à l'échelle de la retenue. Les masses transitant à Pougny et Pyrimont sont fortement corrélés à la masse de l'Arve à Bout du Monde (Figure 4.36). Entre le 15/06/2014 et le 30/09/2014, la masse mesurée à Pyrimont correspond à 82% de la masse mesurée à Pougny, ce qui traduit un envasement dans la retenue de Génissiat (Tableau). Seulement 23% de la masse mesurée à Bout du Monde est mesurée à Pougny. Le bilan associé à la crue de l'Arve du 27/08/2014 (calculé entre le 25/08/2014 et le 29/08/2014) montre que la gestion des retenues suisses et de la retenue de Génissiat lors de la crue a favorisé l'envasement par rapport à un débit normal. Pour cet événement le taux de transfert chute à 10% entre Bout du Monde et Pougny et à 71% entre Pougny et Pyrimont.



FIGURE 4.36 – Cumul des masses de matières en suspension transitant dans le Haut-Rhône du 15 juin 2014 au 30 septembre 2014.

Station	15/06/2014-30/09/2014	flux 25/08/2014-29/08/2014
Bout du Monde	$1,289 \pm 0,284$	$0,522 \pm 0,115$
Pougny	$0,291{\pm}0,064$	$0,051{\pm}0,011$
Pyrimont	$0,\!240{\pm}0,\!053$	$0,036 \pm 0,008$

TABLEAU 4.9 – Masses de MES mesurées aux stations de Bout du Monde, Pougny, et Pyrimont (en Mt).

4.7.2 Reconstruction des concentrations en matières en suspension entrant et sortant de la retenue en période d'interchasse

Pour les périodes antérieures à la mise en place des mesures de turbidité à Bout du Monde, Pougny et Pyrimont, l'estimation des flux historiques repose sur la reconstruction des chroniques de concentration.

Les stations de Pougny et Pyrimont sont situées à l'aval d'une série de barrages qui affectent le régime hydraulique et sédimentaire du Rhône. Les matières en suspension transportés sont principalement issues des flux apportés par l'Arve et diluées par les eaux claires sortant du Léman et des processus de dépôt et d'érosion dans les retenues. Alors qu'une régression C=f(Q) est satisfaisante à la station de Bout du Monde [Launay, 2014], elle ne parait pas adaptée pour les stations de Pougny ou Pyrimont où la concentration n'est pas seulement influencée par les conditions hydrauliques locales mais aussi par les apports en amont. La reconstruction des chroniques de concentration à Pougny et Pyrimont repose sur la prise en compte des conditions hydrauliques et sédimentaires en amont. L'objectif est donc de construire une relation de régression faisant intervenir des paramètres supplémentaires caractérisant les conditions d'apport.

4.7.2.1 Reconstruction des concentrations de matières en suspension à Pougny

La concentration en matières en suspension observée à Pougny provient de la propagation et de la dilution du flux de l'Arve dans le Rhône et du dépôt dans les retenues de Verbois et Chancy-Pougny. On propose de construire une relation $C_{PO} = f(Q_{PO}, Q_A)$ permettant d'obtenir la concentration à Pougny C_{PO} à partir des données de débit Q_A et Q_{PO} à Bout du Monde et Pougny. Ainsi, Q_{PO} permet de prendre en compte les conditions hydrauliques locales, et Q_A permet de prendre en compte les apports hydrauliques et sédimentaires de l'Arve.

Estimation du temps de propagation du signal entre Bout du Monde et Pougny

Le temps de propagation entre Bout du Monde et Pougny résulte de la propagation le long de l'Arve de Bout du Monde à la Jonction et de la propagation le long du Rhône de la Jonction à Pougny : $\Delta T_{BDM \to PO} = \Delta T_{BDM \to JON} + \Delta T_{JON \to PO}$. Deux méthodes d'estimation du temps de propagation sont testées :

- − temps de propagation constant : la valeur du temps de propagation est choisie de façon à être représentative des conditions hydrauliques responsables des apports de flux, c'est à dire les forts débits de l'Arve. D'après les données (Figure 4.13), le temps de propagation $\Delta T_{BDM \to PO}$ est estimé à 8,5 heures.
- temps de propagation variable : un temps de propagation variable dans le temps est utilisé. Il est exprimé en fonction des débits du Rhône et de l'Arve. Le temps de propagation entre deux stations peut s'écrire : $\Delta T = D_x U_P^{-1}$, où D_x est la distance entre les deux stations et U_P est une vitesse de propagation moyenne, dépendant des conditions hydrauliques. Pour l'Arve, on suppose que les variations de niveau sont liées uniquement aux variations de débit, ce qui permet de relier directement la vitesse de propagation au débit. Pour les retenues suisses en régime d'exploitation normale, on suppose que cette hypothèse est valable et que les variations du niveau d'exploitation influent peu sur la vitesse de propagation. Finalement, on cherche à établir une relation entre le temps de

propagation (en heures) et le débit dans les deux tronçons de type $\Delta T = aQ^{-1} + b$. Movennant l'hypothèse que la propagation des matières en suspension suit la propagation hydraulique, le modèle hydraulique du Rhône développé à Irstea [Andries et al., 2012; Dugué et al., 2015] est utilisé pour calculer les temps de propagation de Bout du Monde à la Jonction et de la Jonction à Pougny. Ils sont calculés à partir du modèle pour des régimes permanents avec différents débits du Rhône et de l'Arve et permettent d'établir la relation $\Delta T = aQ^{-1} + b$ (Figure 4.37).



FIGURE 4.37 – Temps de propagation (en heures) estimés à partir de régimes permanents : a) de Bout du Monde à la Jonction en fonction du débit de l'Arve, b) de la Jonction à Pougny en fonction du débit du Rhône (en m^3/s).

Les chroniques de débit et de concentration mesurées à Bout du Monde sont ensuite décalées de ce temps de propagation pour établir la relation $C_{PO} = f(Q_{PO}, Q_A)$.

Relation $C_{PO} = f(Q_{PO}, Q_A)$

Plusieurs formes de régression sont testées, avec C en g/l, Q en m³/s :

- méthode 1 $C_{PO} = aQ_A^b Q_{PO}^c$, méthode 2 $C_{PO} = aQ_A^b Q_{PO}^c$, régression pondérée par la racine du flux à Pougny méthode 3 $C_{PO} = aQ_A^b Q_{PO}^c$, régression pondérée par le flux à Pougny
- méthode 4 $C_{PO} = a(Q_{PO})^c$.

Pour les méthodes 1 à 3 qui font intervenir le débit de l'Arve, les deux méthodes d'estimation du temps de propagation (constant ou variable) sont testées.

Évaluation des méthodes

Chaque méthode est évaluée en comparant la masse transportée reconstituée à la masse mesurée sur la période de mars 2014 à février 2015, ainsi que sur la plus forte crue de la période (25-29 août 2014), et à partir du coefficient de Nash-Sutcliffe basé sur les concentrations :

$$N_S = 1 - \sum (C_{mes} - C_{mod}) / \sum (C_o - \overline{C_{mes}})$$
(4.22)

où C_{mes} est la concentration mesurée, $\overline{C_{mes}}$ est la moyenne de la chronique et C_{mod} est la concentration reconstruite (Table 4.10). La méthode choisie pour le temps de propagation a peu d'influence sur les résultats. Les exposants obtenus pour chaque terme sont assez variables selon la pondération choisie. Plus l'exposant du flux pour la pondération est grand, plus l'exposant appliqué au débit de l'Arve augmente. La masse sur la période complète est bien estimée par la régression pondérée par la racine du flux (méthode 2), elle est sous-estimée par la régression sans pondération (méthode 1) et surestimée par la régression pondérée par le flux (méthode 3). Toutes les méthodes sous-estiment les fortes concentrations, comme au cours de la crue du 25 au 29 août 2014 (Table 4.10 et Figure 4.38), ce qui fait chuter le coefficient de Nash. La pondération par la racine du flux et le flux permettent d'améliorer légèrement l'estimation des fortes concentrations. La méthode de régression classique (méthode 4) a un coefficient de détermination faible et n'est pas fiable. Les valeurs et variations de la concentration sont très mal reproduites par cette méthode, ce qui est traduit par un coefficient de Nash très faible.

Máthada	Coofficient	Exposant		D2 03/2014-0		2015	25-29 08/2014	
methode		b	С	10	écart masse	N_S	écart masse	N_S
$1 \ \Delta T$ fixe	$7,84 \times 10^{-5}$	1,09	0,22	0,509	-20,5%	0,23	-79,5%	-0,06
$1 \Delta T$ var.	$7,19 \times 10^{-5}$	1,08	$0,\!25$	0,501	-20,7%	0,23	-80,6%	-0,05
$2 \Delta T$ fixe	$1,69 \times 10^{-4}$	$1,\!17$	0,07	0,546	-2,8%	0,28	-73,8%	0,02
$2 \Delta T$ var.	$1,53 \times 10^{-4}$	1,13	0,12	0,532	-2,9%	0,28	-75,6%	0,02
$3 \Delta T$ fixe	$5,31 \times 10^{-4}$	$1,\!57$	-0,39	0,627	26,4%	0,30	-57,9%	0,27
$3 \Delta T$ var.	$4,38 \times 10^{-4}$	1,48	-0,28	0,597	26,7%	0,32	-62,3%	0,26
4	$2,82 \times 10^{-4}$	0	0,78	0,223	-34,4%	0,02	-89,0%	-0,25

TABLEAU 4.10 – Évaluation des méthodes de reconstruction de la concentration à Pougny.



FIGURE 4.38 – Concentrations à Pougny du 15 juillet au 15 août 2014 mesurée et reconstruites à partir des différentes régressions, et d'un temps de propagation fixe.

Pour reconstruire la concentration à Pougny, le choix d'un temps de propagation constant parait satisfaisant. Pour la régression, la régression pondérée par la racine du flux (méthode 2) est préférée car elle permet d'estimer correctement la masse transportée à l'échelle de la période mars 2014-février 2015, même si elle sous-estime la concentration lors des crues et surestime la concentration en régime de base.

4.7.2.2Reconstruction du flux de matières en suspension à Pyrimont

Le concentration en matières en suspension observée à Pyrimont provient principalement de la propagation de la concentration observée à Pougny. On propose de construire une relation $C_{PY} = f(Q_A, Q_{PO}, Q_{PY})$ permettant d'obtenir la concentration à Pyrimont C_{PY} à partir des données de débit Q_A , Q_{PO} et Q_{PY} à Bout du Monde, Pougny et Pyrimont.

Estimation du temps de propagation du signal entre Pougny et Pyrimont

Deux méthodes d'estimation du temps de propagation sont testées :

- temps de propagation constant : un temps de propagation constant est utilisé. La valeur est choisie de façon à être représentative des conditions hydrauliques responsables des apports de flux, c'est à dire pour un débit du Rhône à Pougny autour de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ et une cote assez élevée. D'après les données, pour ces conditions, le temps de propagation $\Delta T_{PO \to PY}$ est estimé à 15 heures (Figure 4.15) et le temps de transfert $\Delta T_{BDM \to PO}$ est estimé à 8,5 heures.
- temps de propagation variable : un temps de propagation variable dans le temps est utilisé pour le tronçon Pougny-Pyrimont. Il est estimé à partir du modèle de propagation proposé au paragraphe 4.3.3.

Relation $C_{PY} = f(Q_A, Q_{PO}, Q_{PY})$

Plusieurs formes de régression sont testées, avec C en g/l, Q en m³/s :

- méthode 1 $C_{PY} = aQ_A^b Q_{PO}^c Q_{PY}^d$, méthode 2 $C_{PY} = aQ_A^b Q_{PO}^c Q_{PY}^d$ régression pondérée par la racine du flux à Pyrimont, méthode 3 $C_{PY} = aQ_A^b Q_{PO}^c Q_{PY}^d$ régression pondérée par le flux à Pyrimont, méthode 4 $C_{PY} = a(Q_{PY})^b$.

Pour les méthodes 1 à 3 qui font intervenir le débit à Pougny et Bout du Monde, les deux méthodes d'estimation du temps de propagation (constant ou variable) sont testées.

Évaluation des méthodes

Les méthodes sont à nouveau évaluées en comparant la masse transportée reconstitué à la masse mesurée sur la période de juin 2014 à février 2015 et sur la crue du 25 au 29 août 2014, et à partir du coefficient de Nash-Sutcliffe basé sur les concentrations (Table 4.11). La méthode choisie pour le temps de propagation a peu d'influence sur les résultats. On observe la même variation de l'exposant appliqué au débit de l'Arve que pour la reconstruction à Pougny. Les différentes méthodes aboutissent aux mêmes observations que pour la station de Pougny.

-									
Méthode	Coefficient a	Exposant			\mathbb{R}^2	06/2014- $02/2015$		25-29 08/2014	
methode	Coefficient a	b	С	d	щ	écart masse	N_S	écart masse	N_S
$1 \ \Delta T$ fixe	$5,34 \times 10^{-4}$	0,65	0,07	0,19	0,549	-13,9%	0,21	-72,4%	-0,12
$1 \ \Delta T$ var.	$6,24 \times 10^{-4}$	0,66	0,01	0,21	0,526	-14,4%	0,21	-72,2%	-0,12
$2 \Delta T$ fixe	$6,64 \times 10^{-4}$	0,77	0,02	0,14	0,523	-1,4%	0,26	-66,6%	-0,04
$2 \Delta T$ var.	$9,48 \times 10^{-4}$	0,81	-0,11	0,17	0,510	-1,7%	0,27	-65,6%	-0,03
$3 \Delta T$ fixe	$3,29 \times 10^{-3}$	1,07	-0,17	-0,13	0,506	20,1%	0,29	-53,8%	0,18
$3 \Delta T$ var.	$7,53 \times 10^{-3}$	1,13	-0,39	-0,09	0,513	19,6%	0,31	-50,0%	0,20
4	$2,58 \times 10^{-3}$	0	0	0,43	0,234	-24,2%	0,03	-81,0%	-0,28

TABLEAU 4.11 – Évaluation des méthodes de reconstruction de la concentration à Pyrimont.



FIGURE 4.39 – Concentrations à Pyrimont du 15 juillet au 15 août 2014 mesurée et reconstruites à partir des différentes régressions, et d'un temps de propagation fixe.

Pour la reconstruction du flux à la station de Pyrimont, le choix d'un temps de propagation constant parait plus adapté que le modèle de propagation. Pour la régression, la régression pondérée par la racine du flux (méthode 2) est préférée car elle permet d'estimer correctement le flux à l'échelle de la période de juin 2014 à février 2015, même si elle sous-estime la concentration lors des crues et la surestime en régime de base. La variabilité temporelle de la concentration n'est pas toujours bien reproduite par ce modèle. Une piste permettant d'améliorer cette relation serait la prise en compte du niveau de la retenue de Génissiat. Néanmoins, cette donnée n'est pas disponible pour des périodes aussi longues que le débit, ce qui limite les possibilités de reconstruction.

4.7.2.3 Discussion sur les méthodes de reconstruction

A la station de Bout du Monde, le flux estimé par la courbe de tarage est comparé au flux calculé sur la période février 2014-février 2015. La méthode de reconstruction est bien adaptée sur cette période et le flux estimé par la courbe de tarage équivaut à 102% du flux mesuré.

La longueur limitée des chroniques de concentrations en matières en suspension mesurées en continu à Pougny et Pyrimont ne permet pas la validation des courbes de tarage sédimentaires proposées par comparaison avec des mesures à l'heure actuelle. La qualité de la reconstruction peut néanmoins être estimée en comparant la différence entre les flux reconstitués à Pougny

et à Pyrimont et le bilan bathymétrique de la retenue de Génissiat à l'échelle d'une période d'interchasse (cf. paragraphe 4.8.4.3).

4.7.3 Masses de matières en suspension transportées en chasse

Les masses de matières en suspension transportées sont calculées pour les chasses de 1984, 2000, 2003 et 2012, et plus précisément sur les périodes suivantes :

– du 12/06/1984 au 19/06/1984

– du 21/05/2000 au 30/05/2000

- du 18/05/2003 au 27/05/2003

- du 04/06/2012 au 18/06/2012

Les mesures de concentration étant disponibles en période de chasse, les masses ont été calculées en interpolant la chronique permettant la fréquence de mesure la plus faible aux temps de la mesure ayant la fréquence la plus élevée. Pour chaque station et chaque source d'incertitude, la valeur de l'incertitude relative est choisie d'après les caractéristiques de la mesure (voir paragraphe 4.2.1 pour le débit et paragraphe 4.2.2 pour la concentration) (Tableau 4.12)). Pour la concentration, les mesures par pycnomètre ont été utilisées. Au niveau du barrage de Génissiat, la concentration n'est pas mesurée en sortie de l'usine lorsque celle-ci fonctionne. Pour le calcul, on suppose que la concentration en sortie de l'usine est similaire à la concentration mesurée à Pyrimont.

TABLEAU 4.12 – Incertitudes associées au calcul des masses de MES transportées au niveau de différentes stations et pour différentes chasses (Les valeurs données pour les sources sont les valeurs de l'intervalle).

Chago	Chasse Station		Moguro C	Hétérogénéité	Hétérogénéité	Incertitude élargie	
Chasse Station		Ŷ	Mesure C	spatiale C	temporelle C		
	Pougny	10%	2,4%	10%	15%	24%	
1984	Génissiat	20%	2,4%	0%	15%	29%	
	Pyrimont	10%	2,4%	10%	15%	24%	
2000	Pougny	10%	2,4%	10%	2%	17%	
2000	Pyrimont	10%	2,4%	10%	2%	17%	
2003	Pougny	10%	2,4%	10%	2%	17%	
et	Génissiat	20%	2,4%	0%	2%	23%	
2012	Pyrimont	10%	2,4%	10%	2%	17%	

Il existe une forte variabilité au niveau des masses entrant et sortant de la retenue de Génissiat pendant les chasses (Tableau 4.13 et Figure 4.40). Les masses calculées à Pougny et Pyrimont correspondent aux masses de matières en suspension obtenues à partir de prélèvements de surface, et concernent les argiles et limons. Les masses au barrage de Génissiat incluent toutes les tailles de sédiments. La mesure à Pyrimont correspond a priori aux sédiments fins sortant du barrage, qui interagissent peu avec le fond entre le barrage et la station.

La phase de remobilisation, mise en place depuis 1997, assure un désenvasement préalable de la retenue avant le début des chasses suisses. En 1984, cette phase correspondait juste à la période d'abaissement de la retenue de Génissiat à 313 m, sans palier à cote basse. Au cours de la phase de remobilisation, les apports en matières en suspension dans la retenue sont faibles, et les apports grossiers sont négligeables (cf. paragraphe 4.5.1). La masse évacuée par le barrage au cours de cette phase est estimée à 2,89 10^6 t en 2003 et à 1,53 10^6 t en 2012. La masse transitant à Pyrimont, correspondant aux sédiments fins est bien inférieure à la masse transitant par le barrage. Un changement de mode de transport ou un dépôt des sédiments les plus grossiers doit avoir eu lieu entre le barrage et la station de Pyrimont comme suggéré au paragraphe 4.4.3. Lors des chasses de 2003 et 2012, les conditions hydrauliques au cours de cette phase ont été

assez semblables, et les masses de sédiments fins mesurées à Pyrimont étaient proches. En 2003 la contribution de la vanne de fond a été plus importante et a donné lieu à l'évacuation d'une plus grosse quantité de sédiments grossiers.

La phase de régulation entraîne un dépôt dans la retenue. Les apports des barrages suisses en sédiments fins sont importants en 1984, 2000 et 2003, avec une masse autour de 1 10^6 t et considérables en 2012, avec une masse de 2,8 10^6 t. Les masses sortant de la retenue sont bien inférieures aux masses entrant, avec des taux de transferts autour de 20%. En 2003 et 2012, les masses transitant au barrage et à Pyrimont sont très proches, les sédiments rejetés étant principalement des sédiments fins (Figure 4.23) car les conditions dans la retenue ne permettent pas le transport de grandes quantités de sable jusqu'au barrage. En 1984, la retenue a été gérée à une cote d'environ 313 m durant cette phase, qui permettrait le transport de sédiments grossiers jusqu'au barrage et la masse mesurée au barrage était plus élevée que celle mesurée à Pyrimont.



FIGURE 4.40 – Masse de MES transportées mesurées à Pougny, Génissiat et Pyrimont : a) chasse de 1984, b) chasse de 2000, c) chasse de 2003, d) chasse de 2012.

Chasse	Station	flux phase	masse phase	masse totale
		remobilisation	régulation	
	Pougny	0,007	$0,787{\pm}0,189$	$0,794{\pm}0,191$
1984	Génissiat	$0,\!132{\pm}0,\!038$	$0,747{\pm}0,217$	$0,879 \pm 0,255$
	Pyrimont	$0,121{\pm}0,029$	$0,\!590{\pm}0,\!142$	$0,711 \pm 0,171$
2000	Pougny	0,009	$1,031{\pm}0,175$	$1,040{\pm}0,177$
	Pyrimont	$0,388{\pm}0,066$	$0,\!450{\pm}0,\!077$	$0,839{\pm}0,143$
	Pougny	0,011	$0,879 \pm 0,149$	$0,890{\pm}0,151$
2003	Génissiat	$2,889{\pm}0,578$	$0,220{\pm}0,051$	$3,\!109{\pm}0,\!715$
	Pyrimont	$0,751{\pm}0,128$	$0,233{\pm}0,040$	$0,983{\pm}0,167$
	Pougny	0,013	$2,777 \pm 0,472$	$2,790{\pm}0,474$
2012	Génissiat	$1,533{\pm}0,353$	$0,565{\pm}0,130$	$2,098{\pm}0,483$
	Pyrimont	$0,717{\pm}0,122$	$0,\!554{\pm}0,\!094$	$1,270{\pm}0,216$

TABLEAU 4.13 – Masse de MES transportées mesurées aux stations de Pougny, Génissiat et Pyrimont au cours des chasses (en Mt).

4.8 Comparaison des bilans sédimentaires

4.8.1 Objectifs

Le bilan bathymétrique de la retenue est intégrateur à l'échelle d'une période des évolutions de la retenue associées à toutes les classes de sédiments. La différence entre les masses de sédiments entrant et sortant de la retenue sur la même période doit permettre de confirmer ce bilan. En particulier, la distinction entre les sédiments fins et les sédiments grossiers permet de mettre en évidence la contribution des différentes classes au bilan de la retenue.

4.8.2 Estimation de la masse volumique des sédiments en place dans la retenue

Les bilans bathymétriques et le bilan des entrées/sorties ne sont pas exprimés dans la même grandeur (respectivement volume et masse). La comparaison de ces deux types de bilan nécessite la conversion de l'un des paramètres. Dans le cas du Haut-Rhône, la description des propriétés physiques des sédiments en place dans les retenues est plus précise que pour les sédiments transportés. C'est pourquoi il apparait plus judicieux de transformer le volume obtenu par bilan bathymétrique en masse. Cette conversion nécessite de connaître la masse volumique sèche des dépôts en place.

Des carottages ont été réalisés dans les retenues de Verbois, Chancy-Pougny et Génissiat et ont permis d'identifier les propriétés des sédiments en place [Wildi et Loizeau, 2009; Bouchard et al., 1999]. La masse volumique humide des sédiments en place ρ_w est obtenue en divisant la masse de la carotte par son volume. La teneur en eau massique de l'échantillon w_e est le rapport de la masse de l'échantillon sec et de l'échantillon humide. La masse volumique sèche ρ_d est estimée par :

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1 - w_e} \tag{4.23}$$

Les propriétés des sédiments en place ont finalement été décrites par zones (Figure 4.41, Tableau 4.14). La masse volumique sèche est plus grande dans les zones à dominante sableuse. Ces valeurs peuvent être rapprochées des valeurs obtenues avec la méthode proposée par Lara et Pemberton [1963] :

$$\rho_d' = \rho_{d,sa}\lambda_{sa} + \rho_{d,li}\lambda_{li} + \rho_{d,ar}\lambda_{ar} \tag{4.24}$$

où ρ'_d est la masse volumique sèche de l'échantillon exprimée en fonction de sa composition granulométrique, avec λ_{sa} , λ_{li} , λ_{ar} les proportions respectives de sable, limon et argile et

 $\rho_{d,sa}$ =1550 kg/m³, $\rho_{d,li}$ =1170 kg/m³ et $\rho_{d,ar}$ =960 kg/m³ les masses volumiques sèches respectives du sable, limon et argile. La méthode proposée par Lara et Pemberton [1963] ne prend pas en compte l'interaction entre les différentes classes granulométriques et notamment l'arrangement des particules qui permet d'obtenir des masses volumiques plus élevées qu'en considérant les classes de façon indépendante. Morris et Fan [1998] soulignent aussi que la masse volumique sèche des sédiments fins peut augmenter au cours du temps par compaction en fonction de l'épaisseur des dépôts. Dans la retenue de Génissiat en amont du PK 174, où les dépôts sont constitués de sables et graviers, Bouchard et Dumond [2000] recommande d'utiliser une masse volumique $\rho_{d,sa}$ =1600 kg/m³.



FIGURE 4.41 – Zones d'échantillonnage des propriétés des sédiments dans les retenues de Verbois, Chancy-Pougny et Génissiat.

Retenue	Zone	λ_{ar} %	λ_{li} %	λ_{sa} %	$\rho_w (\mathrm{kg/m^3})$	w_E	$\rho_d \; (\mathrm{kg/m^3})$	$ ho_d' ({ m kg/m^3})$
	А		8	92	1870	25	1500	1520
	В	4	44	52	1820	28	1420	1360
Verbois	С	7	59	34	1850	26	1470	1280
	D	9	75	16	1750	31	1340	1210
	Е	1	13	86	1930	23	1570	1490
	F			100 ^a			$1600^{\ b}$	1550
Génissiat	G	6	с	94	1920	34	1380	$1530 \ ^{d}$
	Η	1	6	84	1740	49	1140	1480
	Ι	7	0	30	1600	64	975	1280

TABLEAU 4.14 – Propriétés des sédiments en place dans les différentes zones d'échantillonnage.

a. sables ou graviers

b. d'après Bouchard et al. [1999]

c. La distinction des sédiments fins entre argiles et limons n'a pas été faite pour ces échantillons.

d. La masse volumique a été estimée en appliquant la masse volumique du limon aux sédiments fins.

Les mesures de masse volumique disponibles sont limitées dans l'espace et correspondent à une date de mesure particulière. Leur représentativité est discutable car les caractéristiques et notamment la granulométrie des sédiments en place peut varier dans le temps.

4.8.3 Application aux retenues de Verbois et Chancy-Pougny

4.8.3.1 Conversion du bilan bathymétrique

Le bilan bathymétrique de la retenue de Verbois a été estimé par Diouf [2013] (Tableau 3.10). Le bilan de la retenue de Chancy-Pougny est en général négligeable sauf au cours de la chasse de 2012 pour laquelle son envasement est estimé à 0,2 Mm³.

On dispose seulement du bilan bathymétrique global de la retenue, et aucune incertitude n'est associée à ce bilan. Pour la conversion, la moyenne sur les différentes zones des masses volumiques sèches $\rho_d=1450 \text{ kg/m}^3$ a été utilisée et est supposée représentative à l'échelle de la retenue. Les incertitudes sur la conversion sont estimées en considérant la valeur la plus faible et les valeurs minimale et maximale des masses volumiques sèches mesurées dans la retenue.

4.8.3.2 Bilan des chasses de 1984, 2000, 2003 et 2012

A l'échelle d'une opération de chasse, les apports de l'Arve sont supposés négligeables par rapport à la masse évacuée de la retenue, seul la masse des matières en suspension mesurée à Pougny a été pris en compte dans le bilan des flux (Tableau 4.13).

La masse de matières en suspension mesurée à Pougny est toujours déficitaire (en valeur absolue) par rapport au bilan bathymétrique des retenues de Verbois et Chancy-Pougny (Figure 4.42, Tableau 4.15). Une explication raisonnable est qu'une partie de la masse évacuée n'a pas été prise en compte dans le bilan. La différence entre les deux bilans correspond à la masse de sédiments transportés par charriage ou suspension graduée à Pougny et non pris en compte dans la masse estimée à partir des mesures de surface. D'après les conditions hydrauliques à la station de Pougny et le contenu des pièges à sédiment, il s'agirait de sables (cf. paragraphe 3.6.7 et figure 4.18). En fonction des incertitudes, les valeurs extrêmes de cette différence sont calculées et donnent une estimation de la masse de sables transportée. L'ordre de grandeur des extrema estimés diffère peu selon les événements de chasse. Pour les chasses de 1984, 2000 et 2003, la part de sables entrant serait comprise entre 30% et 150% de la masse de matières en suspension. Pour la chasse de 2012, la part de sables serait comprise entre 5% et 50% de la masse de matières en suspension car la masse de matières en suspension mesurée en 2012 correspond au double, voire au triple de la valeur mesurée pour les autres événements.



FIGURE 4.42 – Bilans sédimentaires de la retenue de Verbois lors des chasses de 1984, 2000, 2003 et 2012.

С	hasse	Bilan bathymétrique	Bilan flux MES	Diff. min	Diff. max
1	984	$-1,66\pm0,13$	$-0,79\pm0,19$	0,55	1,19
2	2000	$-1,66\pm0,13$	$-1,03\pm0,18$	0,32	0,94
4	2003	$-1,56\pm0,12$	$-0,89{\pm}0,17$	0,37	0,96
2 2	2012	$-3,62\pm0,27$	$-2,78\pm0,47$	0,09	1,59

TABLEAU 4.15 – Bilans sédimentaires de la retenue de Verbois en chasse (en Mt).

4.8.4 Application à la retenue de Génissiat

4.8.4.1 Conversion du bilan bathymétrique

Le bilan bathymétrique de la retenue de Génissiat et les incertitudes associées a été calculé dans l'analyse hydro-géomorphologique (cf. paragraphe 3.5).

Comme on dispose du bilan bathymétrique spatial de la retenue, il est possible d'utiliser une masse volumique sèche variable dans l'espace pour la conversion des volumes en masse. La conversion est réalisée à l'échelle des tronçons définis par le découpage (cf. paragraphe 3.7.6). Chaque tronçon est caractérisé par des évolutions morphologiques et des conditions hydrauliques homogènes, et il parait raisonnable d'utiliser une masse volumique sèche homogène par tronçon pour la conversion du bilan bathymétrique :

- Pour les tronçons T1 à T12 (PK 186,42 à 171,75), correspondant à la zone F ρ_d =1600 ± 250 (kg/m³),
- Pour les tronçons T13 et T14 (PK 171,75 à 167,75), correspondant à la zone G $\rho_d{=}1380{\pm}250~(\rm kg/m^3),$
- Pour les tronçons T15 à T18 (PK 167,75 à 163,75), correspondant à la zone H $\rho_d{=}1140{\pm}250~(\rm kg/m^3),$
- Pour les tronçons T19 et T20 (PK 163,75 à 162), correspondant à la zone I ρ_d =975± 250 (kg/m³).

La masse volumique est estimée à $\pm 250 \ (\text{kg/m}^3)$, cette valeur permettant d'inclure les masses volumiques sèches des tronçons en amont et en aval du tronçon. L'incertitude type est $u(\rho_d) = 147 \ \text{kg/m}^3$

Pour chaque tronçon, on a $M = \rho_d V$. L'incertitude est :

$$u(M) = M\sqrt{\frac{u(\rho_d)^2}{\rho_d} + \frac{u(V)^2}{V}}$$
(4.25)

L'incertitude élargie U_E est obtenue avec un facteur de recouvrement k = 2.

$4.8.4.2 \quad \text{Bilan des chasses de 1984, 2003 et 2012}$

Plusieurs bilans ont été déterminés à partir des masses de sédiments entrant et sortant de la retenue :

- Un bilan « Masse Pougny-Génissiat », obtenu par la différence entre la masse entrant mesurée à Pougny et la masse sortant mesurée à Génissiat. La masse au niveau du barrage de Génissiat correspond à la masse de toutes les classes de sédiments, alors qu'à Pougny, seules les matières en suspension sont calculées,
- Un bilan « Masse Pougny-Pyrimont », obtenu par la différence entre la masse entrant mesurée à Pougny et la masse sortant mesurée à Pyrimont. Ce bilan correspond au bilan des matières en suspension,
- Un bilan « Masse Verbois-Génissiat », obtenue par la différence entre la masse correspondant au bilan bathymétrique de la retenue de Verbois et la masse sortant à Génissiat. L'utilisation du bilan de la retenue de Verbois permet de prendre en compte toutes les classes granulométriques.
Les incertitudes sur le bilan des entrées/sorties sont très élevés, et parfois supérieures au bilan estimé, car il s'agit d'une différence de masses.

Le bilan Pougny-Génissiat est toujours inférieur au bilan bathymétrique (Figure 4.43, Tableau 4.16), c'est à dire qu'il sous-estime le dépôt. Le bilan Verbois-Génissiat donne des valeurs plus proches du bilan bathymétrique de la retenue de Génissiat. Le bilan Pougny-Pyrimont est toujours plus faible en valeur absolue que le bilan bathymétrique. Ce bilan montre que la contribution des sables au bilan sédimentaire de la retenue en chasse n'est pas négligeable.

La différence entre le bilan bathymétrique de la retenue de Génissiat et le bilan Pougny-Génissiat correspond au flux de sédiments transportés par charriage ou suspension graduée à Pougny et non pris en compte dans le flux de matières en suspension mesuré (Tableau 4.16). A partir des incertitudes, les valeurs extrêmes de cette différence sont calculées et donnent une estimation de la masse de sables transportée. L'ordre de grandeur des extrema estimés diffère peu selon les événements de chasse. La gamme estimée pour la masse de sables à Pougny est généralement plus large que celle estimée à partir du bilan des retenues suisses. Une explication réside dans les incertitudes plus fortes estimées pour la retenue de Génissiat à cause du calcul d'une différence de flux, à la prise en compte de paramètres supplémentaires comme l'incertitude sur le volume et à des valeurs plus élevés de l'incertitude type choisies pour la masse volumique sèche.



FIGURE 4.43 – Bilans sédimentaires de la retenue de Génissiat lors des chasses de 1984, 2003 et 2012.

TABLEAU 4.16 – Bilans sedimentaires de la retenue de Genissiat en chasse (en
--

Chagge	Bilan	Bilan Pougny	Bilan Verbois	Bilan Pougny	Diff. min	Diff. max
Chasse	bathy.	Génissiat	Génissiat	Pyrimont		
1984	$0,92{\pm}0,20$	$-0,09\pm0,584$	$0,78{\pm}0,28$	$0,09{\pm}0,3$	0,22	1,62
2003	$-0,63\pm0,13$	$2,21{\pm}0,94$	$-1,55\pm0,73$	$-0,09\pm0,26$	0,51	2,26
2012	$2,19{\pm}0,20$	$0,69{\pm}0,97$	$1,52{\pm}0,55$	$1,\!62{\pm}0,\!61$	0,327	2,67

4.8.4.3 Bilan en périodes d'interchasse, discussion sur la méthode de reconstruction

Les masses de matières en suspension transportées ont été estimées aux stations de Pougny et Pyrimont à partir de la méthode de reconstruction des concentrations décrite au paragraphe 4.7.2 pour plusieurs périodes d'interchasse anciennes et récentes. Pour chaque événement, la méthode de reconstruction donne une masse de matières en suspension à Pyrimont toujours

supérieure à la masse à Pougny, ce qui n'est pas en accord avec le comblement de la retenue de Génissiat en périodes d'interchasse (Tableau 4.17).

TABLEAU 4.17 – Masses de matières en suspensions reconstituées à Pougny et Pyrimont pour différentes périodes d'interchasse (en Mt).

Période	masse Pougny	Pyrimont
1004.1007	1 00	1 00
1984-1987	1,60	1,68
2000-2003	1,59	1,76
2003-2011	3,49	3,96

Le bilan bathymétrique de la retenue de Génissiat est en désaccord avec le bilan des masses reconstitués pour deux des trois périodes d'interchasse étudiées (Figure 4.44 et tableau 4.18).

Plusieurs raisons peuvent expliquer ces différences. D'une part, les méthodes de reconstruction n'ont pas pu être validées car on ne dispose pas de suffisamment de données. En outre, les chroniques de concentration et de débit utilisées pour la reconstruction des flux (de mars 2014 à février 2015 pour la station de Pougny et de juillet 2014 à février 2015 pour la station de Pyrimont) ne sont peut être pas représentatives du fonctionnement moyen de la retenue lors de périodes d'interchasse plus longues.

Une des limites de la reconstruction de la concentration à Pougny et Pyrimont peut aussi résider dans le fait que les méthodes sont bâties à partir de données récentes. La régression pour la station de Pougny est sensée rendre compte des processus de transfert et de dépôt ou remobilisation dans les retenues de Verbois et Chancy-Pougny, et la régression pour la station de Pyrimont inclut en plus la retenue de Génissiat. La modélisation des processus à partir de ces régressions correspond à la géométrie actuelle des retenues. Or l'analyse hydro-géomorphologique de la retenue de Génissiat a montré que les conditions hydrauliques correspondant à des géométries plus anciennes de la retenue de Génissiat étaient plus favorables au dépôt (cf. paragraphes 3.5.3.4 et 3.6.6, Figure 3.26). La validité de la méthode de reconstruction de la concentration à Pyrimont s'en trouve remise en cause pour des périodes anciennes. L'impact de l'envasement des retenues de Verbois et Chancy-Pougny est plus difficile à prévoir car les variations du comblement entre le début et la fin d'une même période d'interchasse sont généralement plus fortes que les variations de l'envasement sur le long terme qui sont limitées par la remobilisation des sédiments pendant les opérations de chasses.



FIGURE 4.44 – Bilans sédimentaires de la retenue de Génissiat lors des périodes d'interchasse de 1984 à 1987, 2000 à 2003 et 2003 à 2011.

Chasse	Bilan bathymétrique	Bilan Pougny-Pyrimont
1984-1987	$1,84{\pm}0,21$	-0,08
2000-2003	$-0,03\pm0,13$	-0,17
2003-2011	$0,51{\pm}0,18$	-0,47

TABLEAU 4.18 – Bilans sédimentaires de la retenue de Génissiat en période d'interchasse (en Mt).

4.9 Conclusions sur la dynamique spatio-temporelle du transport de sédiments

Cette analyse confirme l'importance de la mesure de terrain pour l'amélioration de la compréhension des processus de transport sédimentaires dans les retenues. Une meilleure description des processus hydro-sédimentaires de la retenue de Génissiat est obtenue.

La description multimodale des distributions granulométriques permet de mettre évidence l'existence de différentes populations de sédiments dans la retenue présentant des dynamiques différentes. Trois populations de sédiments fins ont été obtenues, avec des diamètres médians respectifs de 4 μ m, 15 μ m et 45 μ m. En particulier, la population à 45 μ m n'est pas présente dans les prélèvements d'eau à la surface lors de périodes d'exploitation normale, mais est observée lors des chasses des retenues. Trois populations de sables ont aussi été distinguées, avec des diamètres médians respectifs de 90 μ m, 200 μ m et 400 μ m. En particulier, des sables de 90 μ m sont observés dans les dépôts près du barrage, alors que les sables plus grossiers sont principalement localisés au niveau du tronçon amont.

Les mesures de turbidité en continu en amont et en aval de la retenue ont permis d'améliorer la compréhension des processus de propagation des matières en suspension issues de l'Arve en période d'interchasse, avec une estimation des temps de transfert dans les différentes retenues, et l'impact des conditions hydrodynamiques sur le dépôt dans les retenues. Elle ont permis de proposer une reconstruction de la concentration en matières en suspension à l'amont et à l'aval de la retenue pour palier l'absence de données passées. La reconstruction proposée à ce jour est cependant discutable car le manque de données n'a pas permis sa validation. L'application des méthodes de reconstruction à des périodes d'interchasse n'a pas donné de résultats satisfaisants.

La quantification des différents flux transportés a montré l'importance de disposer d'une mesure fiable ou accompagnée d'une estimation de l'incertitude pour l'interprétation. Les prélèvements de graviers transportés par charriage ont montré qu'ils ont une contribution négligeable au bilan global de la retenue. Les mesures de matières en suspension ont montré la contribution importante des sédiments fins pour les épisodes de chasse et les périodes d'interchasse a été mise en évidence. Les prélèvements de sables transportés par charriage à l'amont de la retenue ont montré que les apports étaient négligeables en période d'interchasse. En l'absence de mesures, l'évaluation de la contribution du sable lors de chasses reste limitée et semble assez variable selon les épisodes de chasse considérés. En particulier, les fortes incertitudes associées à la mesure des flux de sédiments fins et le manque d'information concernant la masse volumique des sédiments ont limité l'interprétation de la comparaison du bilan bathymétrique et des bilans basés sur les masses de sédiments entrant et sortant.

La dynamique sédimentaire de la retenue est récapitulée figure 4.45. Les graviers semblent jouer un rôle mineur dans les évolutions de la retenue. Les sédiments fins arrivant de l'amont ou remobilisés lors d'un abaissement de la retenue sont transportés en aval du barrage, et une partie de ces sédiments se dépose où les vitesses d'écoulement sont faibles. L'abaissement de la retenue permet la remobilisation les sables en place qui sont transportés par suspension graduée. L'augmentation des profondeurs d'eau limite leur transit et aboutit à un dépôt sélectif des sédiments qui est à l'origine de l'affinement des sédiments en place d'amont en aval.

		[s	Tronçon fluvial	Défilé de l'Ecluse	Retenue amont	Retenue aval	Proximité barrage
			Graviers sables grossiers	Graviers	Sables moyens	Argiles, limons sables fins	Argiles, limons sables fins
	apports amont principaux	é	evolutions morpholog node de transport à l'	iques, contribution au origine des évolutions	bilan sédimentaire,	I	Processus particuliers
chasse: phase de remobilisation	argiles limons		évolutions faibles charriage	évolutions faibles charriage	érosion (forte) suspension graduée	érosion (forte) suspension homogène et graduée	gradient de concentration dans
chasse: phase de régulation	argiles limons sables (apports mal		dépôt (faible) charriage	évolutions faibles charriage	évolutions variables suspension homogène et graduée	dépôt (fort) suspension homogène et graduée	impact local de l'ouverture de la vanne de fond (pics)
	connus)				dépôt sélectif: tri	granulométrique	
interchasse	argiles limons (chronique courte +		érosion (faible) charriage	évolutions faibles charriage	dépôt (moyen à fort) suspension homogène et graduée	dépôt (fort) suspension homogène et graduée	
	reconstruction)				dépôt sélectif: tri g	ranulométrique	

 ${\rm Figure}$ 4.45 – Récapitulatif des processus hydro-sédimentaires de la retenue et des données sédimentaires disponibles.

Modélisation des processus hydro-sédimentaires de la retenue de Génissiat

5.1 Introduction

L'analyse des processus hydro-sédimentaires de la retenue a montré une dynamique de transport distincte pour les graviers, sables et sédiments fins, dont les contributions au bilan sédimentaire de la retenue sont plus ou moins significatives en fonction des conditions hydrauliques et selon la position dans la retenue.

L'objectif de la modélisation hydro-sédimentaire est de simuler les processus hydro-sédimentaires dominants mis en évidence afin de reproduire les évolutions morphologiques de la retenue et les flux sédimentaires rejetés par le barrage, au cours d'épisodes de chasse et de périodes d'interchasse. Le modèle numérique doit permettre de simuler la propagation des sédiments fins en suspension le long de la retenue et en aval, ainsi que le dépôt des sédiments fins dans les zones de faibles vitesses et la remise en suspension des dépôts en cas de conditions hydrauliques favorables. D'autre part, il doit permettre de simuler la dynamique des sédiments plus grossiers comme les sables et leur transport par charriage ou suspension graduée ainsi que les échanges avec le fond.

Afin de répondre à ces objectifs de modélisation, deux codes monodimensionnels vont être utilisés. Le code ADIS-TS sera utilisé pour simuler la propagation des sédiments fins par l'écoulement à l'aide d'une équation d'advection-dispersion (cf. partie 5.2.1). Des termes sources basés sur la contrainte hydraulique permettront de prendre en compte la reprise ou le dépôt. Le code RUBARBE sera utilisé pour simuler le transport des sédiments plus grossiers (cf. partie 5.2.2). Il est basé sur l'équation d'Exner et le calcul d'une capacité de transport.

Deux modèles numériques de la retenue vont être construits ainsi à partir de ces codes de calcul. Les modèles vont d'abord être calés afin de reproduire la dynamique sédimentaire des sédiments fins ou grossiers observée sur des événements passés (cf. parties 5.4 et 5.5). Leur capacité à reproduire la dynamique sera vérifiée sur d'autres événements. La modélisation sédimentaire permettra aussi d'obtenir une meilleure compréhension des processus clés de la retenue. Enfin, les modèles seront utilisés dans un but prédictif afin d'analyser différents scénarios de gestion sédimentaire futurs (cf. partie 5.8).

5.2 Présentation des codes de calcul

5.2.1 Adis-TS

ADIS-TS est un code de calcul mono-dimensionnel permettant de simuler le transport de sédiments par suspension. ADIS-TS est faiblement couplé avec le code de calcul hydraulique MAGE. Plus particulièrement, le modèle ADIS-TS s'appuie sur les résultats d'un calcul MAGE qui lui fournit la géométrie et l'évolution spatio-temporelle des paramètres hydrauliques dont il a besoin. Le lit est supposé fixe. Le code est basé sur la résolution d'une équation d'advection dispersion avec termes sources permettant de modéliser la reprise ou le dépôt de sédiments [Faure, 2013; Camenen *et al.*, 2013] :

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_f A \frac{\partial C}{\partial x} \right) = (E - D)W \tag{5.1}$$

où C est la concentration moyenne dans la section mouillée A, Q est le débit, D_f est le coefficient de diffusion, E et D sont les taux de reprise ou de dépôt, W est la largeur de la rivière. L'estimation du coefficient de diffusion est basée sur le choix d'une formule parmi celles implémentés dans le modèle : constante, ou formules de Elder [1959], Fisher *et al.* [1979] ou Iwasa et Aya [1991]. Des mesures réalisées sur le Rhône ont montré que la formule d'Iwasa et Aya [1991] était celle qui permettait de reproduire le mieux la dispersion longitudinale [Launay *et al.*, 2015]. Cette formule sera donc utilisée dans le modèle de la retenue de Génissiat.

Via la résolution en parallèle de plusieurs équations d'advection-dispersion et de leurs termes sources, le transport de plusieurs tailles de grains peut être simulé par le modèle.

Le terme source combine les formules de Partheniades [1965] pour le taux d'érosion et de Krone [1962] pour le taux de dépôt :

$$(E - D) = a_{PD}w_s(C_{eq} - C)$$
(5.2)

où C_{eq} est la concentration d'équilibre, w_s est la vitesse de chute du sédiment estimée à partir de la formule de Camenen [2007], a_{PD} est un paramètre de calage qui contrôle l'intensité des taux de dépôt et d'érosion. Armanini et Di Silvio [1988] le présentent comme un paramètre d'adaptation à l'équilibre. Dans le cas limite d'une concentration $C_{eq}=0$, le flux de dépôt est $D = a_{PD}w_sC$, et l'utilisation d'une valeur $a_{PD}=1$ permet de retrouver le flux de chute observé par Krone [1962]. Cette formulation des termes source s'appuie sur la théorie de Sanford et Halka [1993] selon laquelle le dépôt et l'érosion des sédiments fins peuvent avoir lieu simultanément.

Les taux d'érosion et de dépôt sont estimés pour le lit mineur (m) et le lit moyen (M), en supposant une concentration homogène dans la section et à partir de la répartition de débit estimée par la formule Debord [Nicollet et Uan, 1979] :

$$(E - D)W = a_{PD}w_s(C_{eq,m} - C)W_m + a_{PD}w_s(C_{eq,M} - C)W_M$$
(5.3)

où $W_{m/M}$ est la largeur du lit mineur/moyen. L'érosion d'une population est possible tant que ce sédiment est disponible dans la maille.

La concentration à l'équilibre est calculée pour le lit mineur et le lit moyen (Équation 5.4) :

$$C_{eq,m/M} = \begin{cases} C_0 \left(\frac{\tau_{eff,m/M}}{\tau_c} - 1\right) & \text{si } \frac{\tau_{eff,m/M}}{\tau_c} > 1\\ 0 & \text{si } \frac{\tau_{eff,m/M}}{\tau_c} \le 1 \end{cases}$$
(5.4)

où $\tau_{eff,m/M}$ est la contrainte efficace de cisaillement sur le fond, respectivement dans le lit mineur et le lit moyen, τ_c est la contrainte critique de mise en mouvement. C_0 est un paramètre de calage qui contrôle la capacité de resuspension des sédiments. Si $\tau_{eff,m/M} \leq /\tau_c$, il n'y a pas d'érosion et seul le paramètre a_{PD} a de l'influence. Si $\tau_{eff,m/M} > /\tau_c$, le taux d'érosion dépend du produit $a_{PD}C_0$. La valeur par défaut de la contrainte critique est estimée à partir de la formule de Soulsby [1997] pour la contrainte critique adimensionnelle correspondant à la courbe de Shields (cf. Équation 3.20), mais le modèle permet de choisir une autre valeur pour prendre en compte par exemple des effets de consolidation.

La contrainte efficace est basée sur la rugosité du fond :

$$\tau_{eff,m/M} = \frac{\rho g U_{m/M}^2}{K_{p,m/M}^2 R_{H,m/M}^{1/3}}$$
(5.5)

où $U_{m/M}$, $K_{p,m/M}$, $R_{H,m/M}$ sont les vitesses moyennes dans la section, coefficients de Strickler et rayons hydrauliques dans le lit mineur et le lit moyen respectivement. Cette formulation de la contrainte efficace peut s'écrire $\tau_{eff} = \tau (K/K_p)^2$, et diffère légèrement de la formulation proposée par Meyer Peter et Müller [1948] qui s'écrit $\tau_{eff} = \tau (K/K_p)^{3/2}$.

Le coefficient de Strickler de peau est estimé à partir de la formule :

$$K_{p,m/M} = \frac{26}{d_{max}^{1/6}} \tag{5.6}$$

où d_{max} est la taille du plus gros sédiment déposé au fond dans le modèle.

Le code ADIS-TS permet de décrire les dépôts initiaux au fond avec une seule couche homogène sur la verticale mais dont l'épaisseur et la composition peuvent varier longitudinalement et aussi entre lits mineur/moyen. L'utilisateur définit des tronçons sur lesquels il renseigne une épaisseur de dépôt pour chaque population de sédiments en lit mineur et lit moyen. L'épaisseur est convertie en masse disponible par maille de calcul par le code à partir d'une masse volumique solide et d'une porosité, données par l'utilisateur. Il n'y a pas d'interaction entre classes au fond.

Le bilan de masse du modèle s'écrit pour chaque population de sédiments :

$$\Delta M = \Delta M_{eau, fond} + M_{sortant} - M_{entrant} \tag{5.7}$$

où $\Delta M_{eau, fond}$ est la variation du stock au fond et dans l'eau, $M_{sortant}$ est la masse sortant du modèle, $M_{entrant}$ est la masse entrant dans le modèle.

Un bilan de masse non nul traduit un défaut du modèle en terme de conservation de la masse. Lorsque le bilan est positif, la simulation crée de la matière dans la maille. A l'inverse, si le bilan est négatif, il y a perte de matière.

5.2.2 RubarBE

5.2.2.1 Formulation du transport solide

RUBARBE est une version du code RUBAR3 qui permet de simuler le transport de sédiments et la déformation du lit [Paquier, 2013; El Kadi Abderrezzak et Paquier, 2009].

L'équation d'Exner est une équation de conservation de la masse qui traduit l'évolution du fond liée au transport solide :

$$\frac{dQ_s}{dx} + (1-p)\frac{\partial A_s}{\partial t} = 0$$
(5.8)

où Q_s est le débit solide, p est la porosité des sédiments en place, A_s est la section solide.

Le débit solide Q_s est estimé à partir de la capacité de transport Q_s^{cap} via une loi de chargement qui permet de simuler le transport sédimentaire en dehors de l'équilibre :

$$\frac{dQ_s}{dx} = \frac{Q_s^{cap} - Q_s}{D_{char}} \tag{5.9}$$

où D_{char} est la distance de chargement.

La distance de chargement est un paramètre qui traduit l'inertie spatiale du débit solide par rapport à l'écoulement. En effet, en cas de modification des conditions hydrodynamiques, le débit solide n'atteint pas instantanément la nouvelle capacité de transport [Armanini et Di Silvio, 1988]. De plus, les lois permettant de calculer la capacité de transport ont été établies pour des écoulements permanents et uniformes. En dehors de ces hypothèses, le débit solide peut s'écarter de la capacité de transport. Pour le charriage, la distance de chargement est théoriquement très faible devant la taille de la maille du modèle. Cependant, elle est souvent utilisée comme paramètre de calage, intégrant un terme de diffusion lié à la description discrète du fond. Dans le cas d'une suspension prédominante, elle peut être calculée par la formule de Han [1980] :

$$D_{char} = \alpha_H \frac{u_*}{w_s} \tag{5.10}$$

où α_H est un paramètre de calage, u_* est la vitesse de cisaillement et w_s est la vitesse de chute des sédiments.

5.2.2.2 Représentation du lit, étapes de calcul

Trois compartiments sédimentaires, caractérisés par une masse M, un diamètre d et une étendue granulométrique σ existent au sein d'une maille (Figure 5.1) :

- la couche de transport, où les sédiments sont en mouvement et qui correspond aux sédiments entrant ou sortant de la maille,
- la couche active est une couche intermédiaire qui permet de modéliser les échanges entre la colonne d'eau et le lit,
- la couche correspondant au lit immobile. Elle peut être décrite par différentes sous couches ayant une composition sédimentaire et une épaisseur différentes.

La capacité solide est calculée pour la granulométrie des sédiments de la couche active. La masse de sédiments contenue dans la couche active représente la quantité de sédiments qui peut être transportée à l'équilibre :

$$M_{CA}^{eq} = Q_s^{cap} \frac{\Delta x}{U} \tag{5.11}$$

où Δx est la longueur du maillage et U est la vitesse d'écoulement moyenne dans la section en travers. Les étapes du calcul du transport solide au cours d'un pas de temps Δt dans une maille de taille Δx , situé entre une maille amont $\binom{am}{}$ et une maille aval $\binom{av}{}$ peuvent être décrites de la façon suivante :

- Calcul du débit solide transitant par la maille en prenant en compte la loi de chargement,
- Calcul du débit solide déposé dans le lit actif,
- Calcul du débit solide érodé du lit actif, avec loi de chargement,
- Calcul du débit transitant en aval,

A la fin du pas de temps, la masse de la couche active est comparée avec la masse à l'équilibre de cette couche. Elle est ajustée par les flux sédimentaires avec la couche de transport dans le cas d'un dépôt, et le lit dans le cas d'une érosion. Les processus d'échange entre les différents compartiments, ainsi que les mélanges granulométriques au cours du calcul sont schématisés figure 5.1.



FIGURE 5.1 – Processus d'échanges entre compartiments, d'après Beraud [2012].

5.2.2.3 Calcul de la capacité de transport

La capacité de transport solide dans une section d'écoulement est le produit de la capacité solide unitaire q_s^{cap} par la largeur active W_a . La capacité de transport unitaire est calculée à partir d'une loi empirique et est généralement liée à la contrainte de cisaillement au fond. Il existe des lois à seuil, c'est à dire faisant intervenir une contrainte critique de mise en mouvement en dessous de laquelle le transport est nul, et des lois sans seuil pour lesquels il y a toujours du transport.

Une multitude de lois de capacité solide unitaire sont proposées dans la littérature, donc certaines permettent d'estimer le charriage et d'autres le transport total (charriage et suspension). De nombreuses formules sont implémentées dans RUBARBE. Les lois utilisées dans cette thèse sont les suivantes :

 La formule de Meyer Peter et Müller [1948] est une loi à seuil qui permet de calculer la capacité de transport par charriage, basée sur la contrainte efficace :

$$q_s^{cap} = \frac{8}{g(\rho_s - \rho)\sqrt{\rho}} \left(\tau_{eff} - \tau_c\right)^{3/2}$$
(5.12)

où q_s^{cap} est la capacité solide unitaire en m²/s, τ_{eff} est la contrainte efficace, ρ et ρ_s sont respectivement les masses volumiques de l'eau et du sédiment, g est l'accélération de la pesanteur, d_{50} est le diamètre médian des grains, τ_c est la contrainte critique. Sa gamme d'application s'étend sur des diamètres 0,4 mm<d<30 mm et une étendue granulométrique $\sigma < 1, 5$,

 La formule d'Engelund et Hansen [1967] est une loi de transport total sans seuil, basée sur la contrainte de forme assimilée à la contrainte totale :

$$q_s^{cap} = \frac{0,05U^2 R_h^{3/2} J^{3/2}}{d_{50} \delta^2 \sqrt{g}}$$
(5.13)

où U est la vitesse de l'écoulement, R_h est le rayon hydraulique, J est la pente de frottement et $\delta = (\rho_s - \rho)/\rho$ est la densité réduite du sédiment. Sa gamme d'application s'étend sur des diamètres 0,15 mm<d<5 mm,

- La formule de Bagnold [1966] est une loi de transport total sans seuil, avec un terme pour le charriage et un terme pour la suspension, basée sur la contrainte totale :

$$q_s^{cap} = K\rho_s R_h^{5/3} J^{3/2}(0, 17+0, 01 K R_h^{2/3} J^{1/2} w_s)$$
(5.14)

où K est le coefficient de Strickler, w_s est la vitesse de chute des sédiments. Sa gamme d'application s'étend sur des diamètres 0,02 mm<d<300 mm,

- La formule de Van Rijn, (1984a; 1984b) est une loi de transport total à seuil, avec un terme pour le charriage et un terme pour la suspension, basée sur la contrainte efficace :

$$q_s^{cap} = 0,053\sqrt{\delta g d_{50}^3} \frac{T_*^{2,1}}{d_*^{0,3}} + C_{z_a} F_C h U$$
(5.15)

où $T_* = (\tau_{eff} - \tau_c)/\tau_c$ est la contrainte réduite, $d_* = d_{50}(g\delta/\nu^2)^{1/3}$ est le diamètre adimensionnel, où ν est la viscosité cinématique de l'eau, C_{-} est la concentration de référence :

 C_{z_a} est la concentration de référence :

$$C_{z_a} = 0,015 \frac{T_*^{1,5}}{z_a d_*^{0,5}} d_{50}$$
(5.16)

où $z_a=2d_{50}$ est la hauteur de référence.

 F_C est le paramètre de forme du profil de concentration :

$$F_C = \frac{(z_a/h)^{R'} - (z_a/h)^{1,2}}{(1 - z_a/h)^{R'}(1, 2 - R')}$$
(5.17)

où $R' = R + \phi_R$ est le facteur de suspension corrigé, avec R le paramètre de Rouse et $\phi_R = 2, 5(w_s/u^*)^{0,8}(C_{z_a}/0, 65)^{0,4}$ est le facteur de correction. Sa gamme d'application s'étend sur des diamètres 0,1 mm < d < 2 mm.

5.2.2.4 Calcul des contraintes locales et de la contrainte critique

La contrainte de cisaillement au fond τ peut être calculée à partir des variables hydrauliques moyennées sur la section, c'est à dire issues directement de la résolution des équations monodimensionnelles de Barré de Saint Venant. Cependant, la valeur moyenne n'est pas toujours représentative de la distribution dans la section. Il est préférable d'utiliser une distribution des contraintes τ_j dans la section pour calculer le transport solide localement [Camenen *et al.*, 2011]. Dans le code RUBARBE, la Méthode des Perpendiculaires Confondues (MPC) est utilisée pour répartir la contrainte hydrodynamique de cisaillement dans la section en fonction de sa forme [Khodashenas et Paquier, 1999].

La contrainte critique de mise en mouvement τ_c peut être estimée à partir du diagramme de Shields ou choisie par l'utilisateur. Pour le modèle de la retenue de Génissiat, la contrainte critique est estimée à partir d'une contrainte critique adimensionnelle $\theta_c=0,047$, correspondant à la valeur utilisée dans la formule de Meyer Peter et Müller [1948]. Afin de prendre en compte l'effet de la pente locale dans la section, le code calcule la répartition de la contrainte critique dans la section $\tau_{c,i}$ en fonction de la pente transversale à partir de la formule d'Ikeda [1982].

5.2.2.5 Prise en compte de la granulométrie étendue

Afin de représenter les mélanges de sédiments, la distribution granulométrique est décrite par deux paramètres, le diamètre médian d_{50} et le paramètre d'étendue granulométrique $\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$. Cette description implique de faire l'hypothèse d'une distribution log-normale [Balayn, 2001].

Lorsque deux couches échangent des sédiments, leur composition granulométrique est modifiée. Une mise à jour de la granulométrie est réalisée par des opérations de mixage, extraction ou démixage. Le mixage correspond au mélange de deux populations C_1 et C_2 , par exemple lorsque le contenu d'une couche est intégré à une autre couche :

$$\begin{pmatrix} M_{1} \\ d_{50,1} \\ \sigma_{1} \end{pmatrix} \oplus \begin{pmatrix} M_{2} \\ d_{50,2} \\ \sigma_{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M = M_{1} + M_{2} \\ M_{1} \\ d_{50} = d_{50,1}^{\frac{M_{1}}{M_{1} + M_{2}}} d_{50,2}^{\frac{M_{2}}{M_{1} + M_{2}}} \\ \sigma = \sigma_{1}^{\frac{M_{1}}{M_{1} + M_{2}}} \sigma_{2}^{\frac{M_{2}}{M_{1} + M_{2}}} 2 \end{pmatrix}$$
(5.18)

L'extraction divise la population en deux populations à la granulométrie identique.

Le démixage consiste à diviser une population en deux populations hétérogènes, en différentiant les particules les plus fines des plus grossières. Cela permet de reproduire le transport sélectif des sédiments les plus fins qui interagissent moins avec le fond, les plus grossiers étant déposés. La masse située initialement dans la couche est M. Le calcul du transport solide permet d'estimer la masse M_f de sédiments érodés, c'est à dire les sédiments les plus fins. La masse restante, de sédiments plus grossiers est $M_g = M - M_f$. La formulation mathématique du démixage est basée sur la loi de décroissance exponentielle de la taille des particules en rivière due au transport sélectif. La granulométrie de la population des sédiments fins/grossiers est :

$$\begin{pmatrix} d_{50,f/g} \\ \sigma_{f/g} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{50} \exp\left[-\frac{\Delta x}{D_{chard_{50}}} \times \frac{\sigma - 1}{\sigma} \times \frac{M - M_{f/g}}{M}\right] \\ \sigma \exp\left[-\frac{\Delta x}{D_{char\sigma}} \times \frac{\sigma - 1}{\sigma} \times \frac{M - M_{f/g}}{M}\right] \end{pmatrix}$$
(5.19)

où Δx est la taille de la maille de calcul. La formulation mathématique du démixage fait intervenir deux distances de chargement : $D_{chard_{50}}$ et $D_{char\sigma}$. Ces paramètres reflètent l'effet du tri granulométrique. Dans le code, ils sont considérés indépendants des conditions hydrauliques et doivent être choisis par l'utilisateur [Beraud, 2012].

5.2.2.6 Déformation des sections en travers

Dans le cas d'une érosion, les points j d'une section en travers qui sont situés dans le lit mouillé et à l'intérieur du lit actif et qui respectent l'inégalité $\tau_{c,j} < \tau_j$ sont abaissés. La déformation locale est estimée par :

$$\Delta z_j = \frac{(\tau_j - \tau_{c,j})^m}{\sum (\tau_j - \tau_{c,j})^m \Delta y_j} \Delta S$$
(5.20)

où Δz_j est l'abaissement de la cote du point j, Δy_j est la largeur élémentaire du point j, ΔS est la surface à éroder, estimée d'après le bilan sédimentaire. *m* correspond à l'exposant appliqué à la contrainte dans la formule de transport.

Trois modes de dépôts ont été sélectionnés pour la déformation de la section et peuvent être représentatifs d'un niveau de turbulence variable, notamment du paramètre de Rouse R:

- Dépôt uniforme sur le périmètre mouillé (option 2), qui semble valide si $R \ll 1$,

- Dépôt fonction de $(\tau_{c,j} - \zeta \tau_j)^m$, où ζ = est défini tel que le dépôt soit plus fort aux points de la section où l'écart entre la contrainte et la contrainte critique est plus grand (option 4), valide si R < 1:

$$\Delta z_j = \frac{(\tau_{c,j} - \zeta \tau_j)^m}{\sum (\tau_{c,j} - \zeta \tau_j)^m \Delta y_j} \Delta S$$
(5.21)

– Dépôt fonction de τ_i^m (option 6), valide si $R \approx 1$:

$$\Delta z_j = \frac{(\tau_j)^m}{\sum (\tau_j)^m \Delta y_j} \Delta S \tag{5.22}$$

Cette dernière méthode de dépôt fournit une déformation de la section quasi symétrique à la méthode d'érosion. Latapie [2011] a montré que cette méthode donnait les évolutions de section les plus réalistes sur la Loire Moyenne. Elle est donc choisie pour les premières simulations à partir du modèle de la retenue de Génissiat.

5.3 Modèle Adis-TS des retenues de Génissiat et Seyssel

5.3.1 Problématique

Un modèle ADIS-TS des retenues de Génissiat et Seyssel est construit afin de simuler les processus liés au transport par suspension de sédiments fins incluant les sables. L'objectif de ce modèle est de reproduire les masses de sédiments en suspension transitant par le barrage de Génissiat et au niveau de Seyssel pendant des opérations de gestion sédimentaire mais aussi sur des périodes à plus long terme. Le modèle doit aussi permettre de déterminer les zones d'échange sédimentaire dans la retenue, caractérisées par du dépôt ou de l'érosion.

Le modèle s'étend de l'aval du seuil de Pougny (PK 186,42) jusqu'à l'amont du barrage de Seyssel (PK 151,7). Une des limites du modèle réside dans la représentation du barrage de Génissiat, d'une part car le modèle sédimentaire ne prend pas en compte la présence d'ouvrages et d'autre part car la modélisation 1D n'est pas adaptée pour reproduire le gradient de concentration observé au niveau des vannes. La solution proposée est de diviser le modèle en deux sous-modèles : un pour la retenue de Génissiat et un pour la retenue de Seyssel et d'ajouter un module additionnel permettant de prendre en compte le passage de l'eau et des sédiments dans les vannes du barrage.

5.3.2 Description du modèle numérique

Géométrie de la retenue

La géométrie utilisée est la géométrie construite pour les calculs hydrauliques à l'aide du modèle MAGE (cf. paragraphe 3.6.3).

Sédiments utilisés dans le modèle

L'analyse granulométrique des échantillons de sédiments prélevés dans les dépôts de la retenue et parmi les sédiments transportés a permis de définir 6 populations de sédiments fins et de sables qui sont utilisées dans le modèle (cf. tableau 3.3.3).

Dans le code ADIS-TS, la taille des sédiments est utilisée pour estimer la vitesse de chute, la contrainte critique et la rugosité de fond (cf. équation 5.6). Étant donné que la vitesse de chute est une fonction non linéaire du diamètre et que la distribution (supposée log-normale) de chaque classe est asymétrique, l'utilisation du diamètre médian de la population pour le calcul de la vitesse de chute du sédiment donne lieu à une sous-estimation de cette vitesse, surtout pour les populations de sédiments fins avec un écart type important. Un diamètre caractéristique (d_m) défini comme le diamètre correspondant à la vitesse de chute moyenne de la population est calculé pour chaque population et cette valeur est utilisée dans le modèle. L'utilisation de ce diamètre caractéristique au lieu du diamètre médian a un effet négligeable sur la valeur de la contrainte critique calculée par le modèle.

Les propriétés physiques des sédiments utilisés dans le modèle sont présentés tableau 5.3.3.2. La vitesse de chute et la contrainte critique sont calculées par des formules implémentées dans le code, respectivement la formule de Camenen [2007] (cf. équation 1.4) et la formule de Soulsby [1997] (cf. équation 3.20). La densité et la porosité des sédiments ne sont utilisées dans le modèle que pour convertir la condition initiale définie par une épaisseur de matériaux en place pour chaque classe de sédiment en masse de sédiments disponible. Pour les sables, les valeurs utilisées permettent d'obtenir une masse volumique des dépôts en place de l'ordre de 1600 kg/m³, ce qui est conforme aux valeurs proposées tableau 4.14. Pour les sédiments fins, une valeur légèrement plus faible de la porosité est utilisée, ce qui donne une masse volumique des dépôts en place de l'ordre de 1450 kg/m³. Cette valeur est légèrement supérieure aux valeurs mesurées in situ et agit dans le sens d'une surestimation de la masse de sédiments en place, qui a une influence négligeable sur le calcul au regard de l'épaisseur importante de sédiments présents dans cette partie de la retenue.

Sédiment	$d_m \ (\mu m)$	$w_s (m/s)$	τ_c (Pa)	porosité	$ ho_s ({ m kg/m^3})$
Argile	7	$2,8 \ 10^{-5}$	$0,\!153$	$0,\!45$	2650
Limon fin	20	$2,3 \ 10^{-4}$	0,154	$0,\!45$	2650
Limon grossier	50	$1,4 \ 10^{-3}$	$0,\!155$	$0,\!45$	2650
Sable très fin	100	$7,5 \ 10^{-3}$	$0,\!158$	0,4	2650
Sable fin	220	$2,6 \ 10^{-2}$	0,174	0,4	2650
Sable moyen	460	$5,8 \ 10^{-2}$	0,232	0,4	2650

TABLEAU 5.1 – Propriétés physiques des classes de sédiment du modèle.

Description des dépôts de sédiments en place

La description sédimentaire du fond est réalisée à l'échelle des tronçons définis par le découpage de la retenue de Génissiat (cf. tableau 3.22) et d'un découpage basé sur la granulométrie pour la retenue de Seyssel. Dans le modèle, le stock de sédiments au fond ne peut être décrit que par une seule couche de sédiments. Le mélange utilisé dans le modèle doit donc être représentatif du stock sur la verticale. Sur chaque tronçon, une épaisseur est renseignée pour chaque classe de sédiment. Elle est déduite de l'épaisseur des dépôts observée avant l'événement et de la distribution granulométrique des échantillons prélevés au fond (cf. paragraphe 3.3.3).

A l'amont du PK 178, les mesures montrent qu'il n'y a pas (ou presque) de sédiments fins, aucun sédiment n'est donc disponible initialement dans le modèle (Tableau 5.2). Entre les PK 178 et 174, le fond est composé de sables moyens. Entre les PK 174 et 171,75, un mélange de sables est utilisé dans le modèle. A partir du PK 171,75, les mesures montrent qu'il existe une couche de sédiments fins en surface qui recouvre des couches sableuses. Les propriétés des argiles et limons utilisées dans le modèle suggèrent qu'ils sont érodés plus facilement que les sables. De fait, les sédiments fins du mélange sont théoriquement érodés en premier, ce qui doit permettre de reproduire un processus équivalent à l'érosion d'une couche supérieure plus fine. Entre les PK 167,75 et le barrage, deux tronçons décrits par un mélange de sédiments fins et de sables très fins sont définis. Dans la retenue de Seyssel, les mesures montrent qu'il n'y a pas de sables et de sédiments fins disponibles dans le modèle en amont du PK 153, conformément aux mesures. Pour les berges, des dépôts d'argile et de limon sont décrits dans le modèle entre les PK 174,05 et 162,41.

La description du fond pour la construction du modèle numérique est limitée par les données disponibles. En réalité, l'épaisseur de la couche supérieure de dépôts de sédiments fins dans la

tronçon	argile	limon	limon	Sable	Sable	Sable	épaisseur
		fin	grossier	très fin	fin	moyen	totale
186,42-178,07							0 m
$178,\!07\text{-}174,\!05$						100%	$3 \mathrm{m}$
$174,\!05\text{-}171,\!75$				20%	40%	40%	4 m
$171,\!75-\!167,\!75$	2%	2%	2%	40%	30%	24%	$5 \mathrm{m}$
167,75-163,75	20%	30%	30%	20%			8 m
163,75-162,2	30%	30%	30%	10%			10 m
162, 2 - 152, 95							0 m
$152,\!95\text{-}151,\!95$						100%	1 m
$151,\!95\text{-}151,\!74$						100%	$3 \mathrm{m}$

partie aval varie dans le temps, mais une description plus fine n'est pas possible par manque de données.

TABLEAU 5.2 – Caractéristiques sédimentaires des tronçons du modèle.

Description de la condition à la limite amont

La condition à la limite amont est une chronique de concentration pour chaque population de sédiments. Les chroniques sont déduites de la mesure ou de l'estimation de la concentration totale et de la mesure ou de l'estimation de la distribution granulométrique des sédiments transportés. Les concentrations sont estimées soit à partir de prélèvements de surface lors des chasses (cf. tableau 4.2), soit à partir de mesures de turbidité (cf. tableau 4.2) ou d'une méthode de reconstruction de la concentration (cf. paragraphe 4.7.2).

Seules les analyses granulométriques des sédiments transportés près de la surface sont disponibles. Elles ont montré que la concentration mesurée proche de la surface correspondait à la concentration des argiles et limons (cf. figure 4.18 a). Les mesures de la granulométrie des apports amont n'étant pas disponibles pour tous les événements, deux distributions types des argiles et limons ont été définies à partir des mesures : une pour les périodes où les vannes des barrages amont sont fermés (cf. figure 4.14), soit 30% d'argile et 70% de limon fin, et une autre lorsqu'ils sont ouverts (cf. figure 4.18 a), soit 20% d'argile, 50% de limon fin et 30% de limons grossiers. La difficulté de la définition de la condition amont réside dans l'absence de mesures du flux de sable entrant. Lorsque les vannes des barrages suisses sont fermées, l'apport de sable est négligeable (cf. paragraphe 4.5.1). Néanmoins, lorsque les vannes sont ouvertes, l'apport de sable n'est sans doute plus négligeable, comme le montrent les échantillons issus des trappes à sédiments (cf. figure 4.18 b) et les bilans sédimentaires des retenues de Verbois et Chancy-Pougny (cf. paragraphe 4.8.3.2).

L'hypothèse retenue pour définir la condition amont lorsque les barrages suisses sont ouverts (phase de régulation des chasses) est de considérer que la chronique de concentration en sables est proportionnelle à la concentration en sédiments fins. La part de sable peut être estimée pour chaque événement en se basant sur le bilan sédimentaire des retenues amont de Verbois et Chancy-Pougny. Cette hypothèse reste relativement incertaine. Une analyse de sensibilité des résultats par rapport à la concentration amont en sable sera réalisée.

5.3.3 Module additionnel « barrage »

Le module « barrage » proposé a pour objectif de simuler la répartition des débits et des concentrations dans les différentes vannes du barrage. Il prend en compte à la fois la position longitudinale des vannes d'amont en aval à partir d'un bilan de masse réalisé entre les ouvrages, et aussi leur position verticale, à travers l'estimation du profil vertical de concentration pour chaque population de sédiments à l'approche de l'ouvrage.

5.3.3.1 Profil vertical de concentration

La distribution de la concentration sur la verticale est obtenue à partir de l'équation de conservation de la masse, réduite sous l'hypothèse de stationnarité à une équation de diffusion de la concentration [Rouse, 1937]. La solution de cette équation dépend de la distribution du coefficient de diffusion verticale dans la colonne d'eau [Umeyama, 1992]. Ce coefficient dépend de la rugosité du fond, de la contrainte de cisaillement, de l'agitation et de la vitesse de chute du sédiment. Un profil exponentiel est obtenu lorsque le coefficient de diffusion verticale est supposé constant sur la colonne d'eau :

$$C(z) = C_R \exp\left[-\frac{w_s}{\epsilon_v}z\right]$$
(5.23)

où z est l'altitude au dessus du fond, C_R est la concentration de référence, $\epsilon_v = \sigma_E \kappa u_* h$ est le coefficient de diffusion verticale du sédiment, $\kappa = 0, 41$ est la constante de Von Kàrmàn, u_* est la vitesse de cisaillement, h est la hauteur d'eau. $R = w_s/\kappa u_*$ est le nombre de Rouse. σ_E est le nombre de Schmidt.

En prenant un coefficient de diffusion verticale variant linéairement avec la hauteur d'eau, une loi puissance est obtenue. Pour cette loi [Rouse, 1937] a proposé un nombre de Schmidt $\sigma_P=1$. En supposant que la moyenne sur la colonne d'eau du coefficient de diffusion verticale est identique quelquesoit la forme choisie (constante ou linéaire), on déduit que la valeur par défaut de $\sigma_E=0,5$.

En assimilant la concentration moyennée C_m dans la section à la moyenne du profil vertical, la concentration de référence est estimée à partir des paramètres du modèle 1D :

$$C_R = \frac{C_m R \sigma_E}{1 - \exp(-R \sigma_E)} \tag{5.24}$$

5.3.3.2 Estimation de la concentration dans les ouvrages

Le module estime les concentrations dans les ouvrages de l'amont vers l'aval, en commençant par la vanne de fond, puis pour la vanne de demi-fond et l'évacuateur de surface. Au niveau de la vanne de fond, la concentration de référence est calculée à partir des paramètres hydrauliques dans la section, puis le profil exponentiel est appliqué pour estimer la concentration à l'altitude du seuil de la vanne. Un bilan de masse permet ensuite d'estimer la concentration moyenne dans la section restant à l'aval de la vanne de fond.

Entre la vanne de fond et la vanne de demi-fond, on suppose qu'il n'y a pas de dépôt. La concentration de référence est calculée dans la section de la vanne de demi-fond, puis la concentration à l'altitude du seuil de la vanne est estimée à partir du profil exponentiel.

Étant donné que la vanne de demi-fond et l'évacuateur de surface sont situés sur des berges opposés mais à une abscisse longitudinale proche, on suppose que la concentration moyenne dans la section à l'approche de l'évacuateur est identique à celle à l'approche de la vanne de demi-fond. Autrement dit on suppose que l'évacuateur. Pour l'évacuateur de surface, situé au niveau d'un talus rocheux, une forte corrélation a été mise en évidence entre les contraintes locales et la concentration dans l'ouvrage (cf. paragraphe 4.6.3.4). Il apparait donc que les paramètres moyens dans la section ne sont pas représentatifs de la dynamique à proximité de l'évacuateur.

Ainsi, la concentration dans l'évacuateur dépend des conditions locales. La contrainte locale peut être estimée en considérant le système talus/évacuateur comme un système indépendant. Ensuite, une formule empirique est proposée pour estimer la concentration dans l'évacuateur :

$$C_{ERD} = \alpha_{ERD} \left(\frac{\tau_{ERD}}{\tau_c} - 1 \right) \tag{5.25}$$

où τ_{ERD} est la contrainte locale, τ_c est une contrainte critique fixée à 0,15 Pa, ce qui correspond à la contrainte de mise en mouvement des argiles et limons calculée à partir de la formule de Soulsby [1997] (cf. tableau) et α_{ERD} est un paramètre de calage.

Pour représenter l'usine, la concentration moyenne dans la section est utilisée.

La différence entre le flux moyen et le flux rejeté par les différentes vannes du barrage est :

$$\Delta \Phi = \bar{Q}\bar{C} - \sum_{i=1}^{3} Q_i C_i \tag{5.26}$$

où \bar{Q} et \bar{C} sont le débit total et la concentration moyenne calculés par le modèle 1D à l'amont des vannes du barrage, et *i* représente les vanne de fond, de demi-fond et l'évacuateur de surface. Ce différentiel de flux est déposé ou érodé au niveau de la maille située en amont du barrage.

A l'aval du barrage de Génissiat, le flux total est la somme des flux transitant par les différents ouvrages. Ce flux sert de condition amont pour la retenue de Seyssel.

5.4 Calage et validation du modèle Adis-TS

Le calage du modèle ADIS-TS a été principalement basé sur la simulation d'événements de chasse (tests C1, C2 et C3 du tableau 5.3), qui donnent lieu à des processus plus intenses et pour lesquels on dispose de mesures hydro-sédimentaires permettant la construction du modèle (renseignement des conditions initiales et aux limites) et la comparaison des résultats issus du modèle à des mesures de terrain (concentrations, évolution du fond, granulométrie). Les tests de validation (tests V1, V2 et V3 du tableau 5.3) ont été appliqués à des scénarios différents afin de tester la robustesse du modèle.

Test	Site	Événement	Paramètre	Données
C1	GE	chasse 2000	C_0	Concentration Grésin,
		phase d'érosion		Bellegarde, Malpertuis
C2	GE	chasse 1984	C_0, a_{PD}	Concentration Pont Carnot,
		phase de régulation		Bellegarde
C3	GE	chasse de 2012	module « barrage »	concentration dans les vannes
V1	SE	chasse de 2012	a_{PD}, C_0	Concentration Pyrimont, Seyssel
V2	GE+SE	chasse de 2003	modèle entier	concentration dans les vannes
				à Pyrimont et Seyssel
			apport sable	concentrations dans les vannes
				évolutions morphologiques
V3	GE+SE	Juin-Août 2014	modèle entier	Concentration Pyrimont

TABLEAU 5.3 – Description du protocole de calage et validation.

5.4.1 Calage des paramètres a_{PD} et C_0

Le calage des coefficients a_{PD} et C_0 s'appuie sur la modélisation des chasses 1984 et 2000 au cours desquelles des mesures de concentration ont été réalisées à des stations intermédiaires de la retenue (cf. paragraphe 4.4.1). En 2000, elles n'ont eu lieu qu'au cours de la phase de remobilisation mais sont accompagnées d'analyses granulométriques.

5.4.1.1 Simulation de la chasse de 2000

Dans un premier temps, afin de s'affranchir de la description de la condition limite amont pour le sable, le scénario de la phase d'érosion de la chasse de 2000 a été utilisé. Les différents tests réalisés sont présentés dans le tableau 5.14. Les masses de sédiments transportées à Grésin et Malpertuis correspondant à ces simulations sont présentées dans le tableau 5.4.

tost	0.55	C	Masse Grésin	Masse Malpertuis
lest		\mathbb{C}_0	$(10^6 t)$	$(10^6 t)$
mesure			$0,22{\pm}0,05$	$0,415 \pm 0,1$
2000-1	1	1	0,478	0,801
2000-2	1	0,1	0,121	0,136
2000-3	1	0,2	0,213	0,24
2000-4	1	1;1;0,5;0,2;0,2;0,2	0,213	0,422
2000-5	2	$1;\!1;\!0,\!5;\!0,\!2;\!0,\!2;\!0,\!2$	0,201	0,478
2000-6	0,5	1;1;0,5;0,2;0,2;0,2	0,223	0,362
2000-7	1	0,5;0,5;0,25;0,1;0,1;0,1	0,122	0,203
2000-8	1	2;2;1;0,4;0,4;0,4	0,325	0,673

TABLEAU 5.4 – Masses de sédiments transportés mesurées et calculées en fonction du calage des paramètres a_{PD} and C_0 (Lorsqu'il n'y a qu'une seule valeur du paramètre, celle-ci est utilisée pour toutes les classes. Lorsqu'il y a six valeurs, elles correspondent aux valeurs attribuées par taille croissante, des argiles aux sables moyens, cf. tableau 5.3.3.2).

Une valeur $a_{PD}=1$ correspondant aux expériences de Krone [1962] a d'abord été choisie pour toutes les classes de sédiments. Deux valeurs de C_0 identiques pour toutes les tailles ont été testées $C_0=1$ et $C_0=0,1$ (tests 2000-1 et 2000-2). Un paramètre $C_0=1$ induit une surestimation les flux à Grésin et Malpertuis alors que $C_0=0,1$ induit une sous-estimation (Tableau 5.4). L'étape suivante a consisté à caler C_0 afin de reproduire la concentration au niveau de la station de Grésin où seuls des sables ont été mesurés (cf. paragraphe 4.4.1). Une valeur $C_0=0,2$ a permis de reproduire la masse de sables à Grésin (test 2000-3). Néanmoins, la masse à Malpertuis était sous-estimée.

Un coefficient C_0 variable selon la taille du sédiment a donc été envisagé. C_0 a été calé pour les sédiments fins afin de reproduire les concentrations au niveau des stations de Bellegarde et Malpertuis (test 2000-4). Pour l'argile et les limons fins, le coefficient C_0 obtenu est égal à 1. Puis il décroit pour les limons grossiers.

Une analyse de sensibilité à ces coefficients a été réalisée. Pour chaque test, un paramètre a_{PD} ou C_0 a été fixé à sa valeur calée (correspondant au test 2000-4), et l'autre paramètre a été doublé et divisé par 2. Pour la simulation de la chasse de 2000, doubler ou diminuer de moitié la valeur du coefficient a_{PD} a peu d'influence, l'écart entre la masse mesurée et simulée est inférieur à l'incertitude de mesure (Tableau 5.4). Par contre, doubler ou diminuer de moitié la valeur du coefficient C_0 a plus d'impact puisque l'écart entre la masse mesurée et simulée est supérieur à l'incertitude.

Le calage utilisé dans le test 2000-4 semble satisfaisant. Les concentrations simulées à partir de ce calage sont représentées figure 5.2. Le modèle reproduit assez fidèlement la concentration

aux différentes stations. A Grésin, le modèle reproduit le signal de base mesuré pendant la phase de remobilisation mais ne simule pas de pics de concentration, dont la légitimité a été discutée au paragraphe 4.4.1. Le même type d'écart est observé à Bellegarde et à Malpertuis. L'évolution le long de la retenue de la proportion simulée de sables et de fines en suspension est proche des mesures. Néanmoins, les variations temporelles de la distribution granulométrique des sédiments en suspension au sein d'une station de mesure entre le début et la fin de l'abaissement ne sont pas bien reproduites par le modèle. Cela pourrait être attribué à une limitation du modèle dans lequel le fond est décrit par une seule couche homogène qui ne permet pas de reproduire l'érosion de strates présentant des caractéristiques différentes.



FIGURE 5.2 – Concentrations simulées et mesurées dans la retenue de Génissiat au cours de la phase de remobilisation de la chasse de 2000 : a) Grésin (PK 173), b) Bellegarde (PK 169) c)PK Malpertuis (PK 164,8).

5.4.1.2 Simulation de la chasse de 1984

Durant la chasse de 1984, un abaissement préalable de la retenue a eu lieu entre le 12 et le 14 juin, suivi de la phase de régulation. Pour la simulation de la chasse de 1984, trois types de condition limite amont pour le sable ont été testées durant la phase de remobilisation :

- Apport de sable nul,
- Apport de sable équivalent à 30% des apports de fines, également reparti entre sables très fins, sables fins et sables moyens,
- Apport de sable équivalent à 60% des apports de fines, également reparti entre sables très fins, sables fins et sables moyens.

Suite aux conclusions du calage sur la chasse de 2000, C_0 est fixé à [1;1;0,5;0,2;0,2;0,2] de l'argile au sable moyen. La sensibilité au paramètre a_{PD} est testée. Différentes valeurs $a_{PD}=0,5$; $a_{PD}=1$ et $a_{PD}=2$ ont été testées (Tableau 5.5). La masse transportée à Bellegarde a été estimée pour chaque simulation et comparé à la valeur mesurée.

test	a_{PD}	C_0	Apport en sable	Masse Bellegarde (10^6 t)
mesure				$1,285 \pm 0,31$
1984-1	1	1;1;0,5;0,2;0,2;0,2	0%	1,259
1984-2	1	$1;\!1;\!0,\!5;\!0,\!2;\!0,\!2;\!0,\!2$	30%	1,256
1984-3	1	$1;\!1;\!0,\!5;\!0,\!2;\!0,\!2;\!0,\!2$	60%	1,257
1984-4	2	$1;\!1;\!0,\!5;\!0,\!2;\!0,\!2;\!0,\!2$	0%	1,146
1984-5	2	$1;\!1;\!0,\!5;\!0,\!2;\!0,\!2;\!0,\!2$	30%	1,144
1984-6	2	1;1;0,5;0,2;0,2;0,2	60%	1,143
1984-7	$0,\!5$	$1;\!1;\!0,\!5;\!0,\!2;\!0,\!2;\!0,\!2$	0%	1,358
1984-8	0,5	$1;\!1;\!0,\!5;\!0,\!2;\!0,\!2;\!0,\!2$	30%	1,366
1984-9	0,5	1;1;0,5;0,2;0,2;0,2	60%	1,372

TABLEAU 5.5 – Masses de sédiments transportés mesurées et calculées en fonction du calage du paramètres a_{PD} et de l'apport amont en sable (même présentation que tableau 5.4).

Analyse de sensibilité au calage du coefficient a_{PD}

Au cours de la chasse de 1984, la zone située près de Bellegarde présente des conditions de dépôt. Plus le coefficient a_{PD} est grand, plus le dépôt est important et concentration simulée est faible. Néanmoins, pour les trois valeurs du paramètre a_{PD} testées, l'écart entre le calcul et la mesure est toujours inférieur aux incertitudes de mesure (Tableau 5.5). A Bellegarde, au cours de la phase de remobilisation, la concentration moyenne simulée par le modèle est surestimée par rapport aux mesures de surface (Figure 5.3). D'après les conditions hydrauliques au cours de cette période, les sables moyens et fins sont plutôt transportés par suspension graduée au niveau de cette station (Figure 3.32) et ne seraient donc pas représentés dans les mesures de surface. La concentration moyenne simulée pour les argiles, limons et sables très fins est en effet, plus proche des mesures de surface.



FIGURE 5.3 – Concentrations simulées et mesurées à Bellegarde au cours de la chasse de 1984 en fonction de la valeur du coefficient a_{PD} , avec un apport amont de 30% : a) $a_{PD}=0.5$, b) $a_{PD}=1$, c) $a_{PD}=2$.

Analyse de sensibilité à l'apport en sable

La condition limite amont semble avoir peu d'influence sur la masse simulée à Bellegarde (Tableau 5.5). En effet, lorsque la condition limite amont contient des sables, le modèle simule une atténuation rapide de la concentration de sable en suspension, avec des concentrations inférieures au g/l estimées au niveau du Pont Carnot (Figure 5.4 1 b). La présence de sable en suspension à Bellegarde au cours de la phase de régulation (à partir du 14/06/1984) dans le cas d'un apport nul montre que du sable est remobilisé entre le Pont Carnot et Bellegarde (Figure 5.4 a).



FIGURE 5.4 – Concentrations simulées et mesurées à : 1) Pont Carnot et 2) Bellegarde au cours de la chasse de 1984 en fonction de la condition limite amont : a) apport nul, b) apport 60%.

La sensibilité à l'apport amont est aussi analysée à partir du bilan bathymétrique simulé. Le bilan bathymétrique a été estimé à partir des masses déposées ou érodées par tronçon simulées par le modèle, converties en volume à partir de la masse volumique sèche des matériaux (cf. tableau 4.14). La valeur du bilan augmente logiquement avec l'apport de sable. Le modèle sous-estime les dépôts dans la retenue par rapport aux mesures, ce qui aboutit à un bilan simulé inférieur au bilan calculé (Tableau 5.6). Le bilan de masse du modèle indique qu'un problème de conservation de la matière a lieu pour chaque simulation, en particulier pour les sables fins et moyens et correspond au total à environ 10% du bilan. Le bilan le plus réaliste est obtenu pour un apport en sables équivalent à 60% de l'apport en sédiments fins, si on tient compte des incertitudes et du bilan de masse du modèle.

	Bilan bathymétrique (10^6 m^3)
mesure	$0,86 \pm 0,09$
0% sable	$0,21 \pm 0,24$
30% sable	$0,35 \pm 0,24$
60% sable	$0,50 \pm 0,25$

TABLEAU 5.6 – Analyse de sensibilité du modèle aux apports en sable : comparaison des bilans bathymétriques.

Afin de mieux comprendre les différences entre les bilans bathymétriques modélisés et simulés, le bilan par tronçon a été calculé (Figure 5.5). Il a été obtenu en divisant le masse déposée ou érodée par tronçon estimée par le modèle par la masse volumique des sédiments en place (cf. paragraphe 4.8.4.1). L'incertitude sur la masse volumique est aussi prise en compte. Pour des apports de sable non nuls, de plus forts dépôts sont observés dans la partie amont de la retenue, au niveau de l'Étournel. Entre les PK 178 et 171,75, dans la zone dominée par le transport de sables, la dynamique et les volumes sont bien reproduits, et on n'observe pas de différences significatives entre les trois types d'apport amont simulés. C'est en accord avec l'estimation correcte par le modèle de la masse de sédiments transportés à Bellegarde (PK 169).

C'est en aval du PK 169,25 que le modèle ne reproduit pas suffisamment de dépôt. Quelquesoit l'apport amont en sable, le volume déposé dans les tronçons en aval du PK 169,25 est de 0,34 10^6 m^3 alors que le volume issu des mesures bathymétriques correspond à 0,58 10^6 m^3 . Ces dépôts simulés par le modèle correspondent à des sédiments fins, avec le diamètre médian des dépôts qui décroit de 170 µm au PK 169,25 à 15 µm au PK 162,41. Une partie de ces dépôts de sédiments fins non reproduits par le modèle pourrait être attribuée aux dépôts réalisés au cours des deux mois écoulés entre la mesure bathymétrique pré-chasse et le début de la chasse et des deux mois écoulés entre la fin de la chasse et la mesure bathymétrique post-chasse. Cette hypothèse n'est pas vérifiable car les données nécessaires à ce calcul, comme la cote de la retenue ou les apports sédimentaires dans la retenue ne sont pas disponibles sur ces périodes. De plus, pour cette simulation réalisée à partir du modèle monodimensionnel uniquement, la masse estimée en sortie du modèle est estimée à partir de la concentration moyenne dans la section, et non à partir de la concentration et du débit transitant par chaque vanne. Cela peut entrainer des différences au niveau du bilan du dernier tronçon.



FIGURE 5.5 – Bilans volumiques simulés et mesuré dans la retenue de Génissiat au cours de la chasse de 1984 en fonction de la condition limite amont en sable : a) Mesures, b) apport nul, c) apport 60%.

5.4.1.3 Conclusions sur le calage du modèle Adis-TS

D'après les analyses de sensibilité, le paramètre a_{PD} a finalement été choisi constant pour toutes les classes granulométriques et fixé à $a_{PD}=1$, ce qui correspond à la valeur théorique. Le paramètre C_0 a finalement été choisi variable selon la taille du sédiment (Table 5.7).

Sédiment	Argile	Limon fin	Limon grossier	Sable très fin	Sable fin	Sable moyen
C_0	1	1	0,5	0,2	0,2	0,2

TABLEAU 5.7 – Calage du paramètre C_0 .

L'apport amont est à déterminer pour chaque scénario, c'est pourquoi une analyse de sensibilité à ce paramètre sera effectuée pour chaque calcul.

5.4.2 Test du module « barrage »

Le modèle de transport précédemment calé et le module « barrage » ont été appliqués à la chasse de 2012. Pour cette opération, on dispose uniquement des mesures de concentration dans les vannes du barrage de Génissiat. De fait, les différences observées entre le modèle et la mesure peuvent provenir à la fois de la simulation du transport des sédiments dans la retenue avec le modèle ADIS-TS et du module « barrage », ce qui peut rendre l'interprétation difficile.

Trois conditions d'apport sableux durant la phase de régulation ont été testées.

- Apport de sable nul,
- Apport de sable équivalent à 30% des apports de fines, également reparti entre sables très fins, sables fins et sables moyens,
- Apport de sable équivalent à 60% des apports de fines, également reparti entre sables très fins, sables fins et sables moyens.

Analyse de sensibilité à l'apport en sable

La masse totale simulée transitant par le barrage ne varie pas en fonction de l'apport en sable car tous les sables entrant au cours de la phase de régulation sont déposés dans la retenue (Tableau 5.8). Pour un apport en sable correspondant à 60% des apports de sédiments fins, le bilan bathymétrique global de la retenue est assez satisfaisant. Néanmoins, à l'échelle des tronçons, les évolutions morphologiques associées à ce scénario ne sont pas conformes aux observations (Figure 5.6). Trop de dépôt est simulé au niveau de l'Étournel dans les tronçons T2 et T5. Le dépôt dans les tronçons T11 à T13 sont sous-estimés. Les évolutions morphologiques simulées dans les tronçons T14 à T20 sont assez différentes des évolutions observées. Il est néanmoins possible que les dépôts dans cette zone aient pu être remaniés au cours de la période de cinq mois écoulée entre la fin de la chasse et la mesure bathymétrique post-chasse. Cette explication est difficile à vérifier car on ne dispose pas des données permettant la simulation de cet événement.

	Masse Barrage $(10^6 t)$	Bilan bathymétrique (10^6 m^3)
mesure	$2,1 \pm 0,48$	$1,47 \pm 0,12$
0% sable	2,01	$0,15 \pm 0,18$
30% sable	2,01	$0,62 \pm 0,23$
60% sable	2,01	$1,09 \pm 0,32$

TABLEAU 5.8 – Bilans de la retenue estimés en fonction de l'apport en sable pour la chasse de 2012 et comparaison avec la mesure.



FIGURE 5.6 – Bilan volumique simulé et mesuré dans la retenue de Génissiat au cours de la chasse de 2012 en fonction de la condition limite amont en sable : a) Mesures, b) apport nul, c) apport 30%, d) apport 60%.

Concentrations et masses simulées dans les vannes

La répartition de la concentration dans les différents ouvrages est assez bien reproduite par le module (Figure 5.7). Au début de la phase de remobilisation, la concentration est cependant sous-estimée pour la vanne de fond. De même, la concentration dans la vanne de demi-fond est sous-estimée pendant toute la phase. Les pics observés au niveau des deux vannes ne sont pas très bien reproduits. Ils sont corrélés à des variations de débit dues aux manoeuvres des vannes et peuvent être causés par des érosion locales non prises en compte par le modèle 1D et le module « barrage » (cf. paragraphe 4.4.4.2). A la fin de la phase de remobilisation, la remontée du niveau de la retenue provoque une forte chute des concentrations sur le terrain, mais les concentrations simulées chutent avec un décalage temporel par rapport aux mesures d'environ 4 heures. Cette différence est plutôt attribuée au modèle ADIS-TS qui ne prend pas en compte l'impact de la décélération de l'écoulement sur le transport.

Au cours de la phase de régulation, le premier pic de concentration (le 11/06) est surestimé, le modèle ADIS-TS ne semble pas déposer suffisamment dans la retenue. Au cours de cette phase, le modèle fait déposer tout les sables et les limons grossiers avant les vannes, et seuls les argiles et limons fins atteignent le barrage. Par suite, le gradient vertical estimé par le module est faible. En réalité, des sables ont été échantillonnés dans la vanne de fond au cours de la chasse (Figure 4.23). La présence de sable parmi les dépôts dans la partie aval de la retenue suggère que les sables mesurés dans la vanne de fond pourraient provenir de la reprise locale de dépôts près du barrage qui n'est pas prise en compte par le modèle. Le second pic observé dans la vanne de demi-fond est assez bien reproduit par le modèle. Pour l'évacuateur de surface, un calage a permis d'obtenir une valeur α =0.03 pour la loi empirique (cf. Équation 5.25). Un très bon accord est obtenu entre le modèle et les mesures.



FIGURE 5.7 – Comparaison entre les concentrations simulées et mesurées au barrage de Génissiat au cours de la chasse de 2012 : a) Vanne de fond, b) Vanne de demi-fond, c) Évacuateur de surface.

Afin d'évaluer la contribution du module, les masses passant dans les vannes du barrage ont été calculées en utilisant ou non le module « barrage ». Les deux phases de la chasse ont été distinguées (Tableau 5.9). L'estimation des masses transportées est améliorée par l'utilisation du module « barrage », en particulier pour la vanne de fond et l'évacuateur de surface. Pour la vanne de demi-fond, les résultats sont moins probants car la concentration dans cette vanne est proche de la concentration moyenne estimée par le modèle 1D. A l'échelle des phase de remobilisation et de régulation, le module permet une bonne estimation des masses passant dans chaque vanne. La valeur simulée par le module est proche de la valeur mesurée si on tient compte des incertitudes associées à la mesure.

	Masse phase d'érosion (10^6 t)			Masse phase de régulation $(10^6 t)$			
	Sans module	Avec module	Mesure	Sans module	Avec module	Mesure	
VF	0,46	0,89	$0,87{\pm}0,25$	0,15	0,17	$0,28 \pm 0,08$	
VDF	$0,\!49$	0,34	$0,51{\pm}0,15$	0,08	0,07	$0,05{\pm}0,01$	
ERD	0	0	0	0,62	$0,\!12$	$0{,}13{\pm}\ 0{,}03$	

TABLEAU 5.9 – Masses simulés et mesurés transportées dans les vannes du barrage de Génissiat durant la chasse de 2012.

5.4.3 Validation des paramètres a_{PD} et C_0

Le modèle calé a été appliqué pour simuler la chasse de 2012 dans la retenue de Seyssel uniquement, en utilisant comme condition amont la moyenne des concentrations mesurées dans les vannes du barrage de Génissiat pondérée par le débit des vannes. Il existe un excellent accord entre les mesures et les résultats du modèle (Figure 5.8). Le modèle reproduit bien les dépôts des sédiments les plus grossiers à l'aval du barrage de Génissiat. Entre Pyrimont et Seyssel, peu d'échanges ont lieu avec le fond et le modèle reproduit bien la propagation.



FIGURE 5.8 – Concentrations simulées et mesurées dans la retenue de Seyssel au cours de la chasse 2000 : a) Sortie Génissiat (Condition amont), b) Pyrimont, c) Seyssel.

5.4.4 Validation du modèle complet sur la chasse de 2003

La chasse de 2003 est simulée afin de valider le modèle pour les événements de chasse. Cet événement présente une issue différente des tests précédents puisque le bilan sédimentaire est négatif. Trois conditions d'apport sableux durant la phase de régulation ont été testées :

- Apport de sable nul,
- Apport de sable équivalent à 30% des apports de fines, également reparti entre sables très fins, sables fins et sables moyens,
- Apport de sable équivalent à 60% des apports de fines, également reparti entre sables très fins, sables fins et sables moyens.

Le modèle est évalué en se basant sur les chroniques de concentrations et les masses transportées simulées aux différentes stations, ainsi que par sa capacité à reproduire la tendance des évolutions morphologiques le long de la retenue.

Analyse de sensibilité à l'apport en sable

Pour chaque type d'apport, tous les sables entrant au cours de la phase de régulation sont déposés dans la retenue. La masse totale transitant par le barrage ne varie pas (Tableau 5.10). Pour un apport sableux correspondant à 60% des apports de fines, le bilan volumique global de la retenue est assez satisfaisant.

	Masse Barrage (10^6 t)	Bilan bathymétrique (10^6 m^3)
mesure	$3,11 \pm 0,715$	$-0,36 \pm 0,11$
0% sable	3,24	$-1,02 \pm 0,28$
30% sable	3,24	-0.84 ± 0.27
60% sable	3,24	$-0,66 \pm 0,27$

TABLEAU 5.10 – Bilans de la retenue estimés en fonction de l'apport en sable pour la chasse de 2003 et comparaison avec la mesure.

Néanmoins, à l'échelle des tronçons, les évolutions morphologiques associées à ce scénario ne sont pas très bien reproduites (Figure 5.9). L'érosion simulée au niveau du tronçon T11 n'est pas assez prononcée. Inversement, l'érosion simulée dans les tronçons T12 et T13 et en aval est trop forte. Il peut s'agir de dépôts ayant eu lieu après la chasse ou alors d'une sous-estimation des dépôts au cours de la phase de régulation. Les dépôts simulés correspondent à un diamètre médian d'environ 250 µm jusqu'au PK 166,78, puis diminuent à l'aval.



FIGURE 5.9 – Bilan volumique simulé et mesuré dans la retenue de Génissiat au cours de la chasse de 2003 en fonction de la condition limite amont en sable : a) Mesures, b) apport nul, c) apport 60%.

Concentrations et masses simulées

La dynamique globale des flux de sédiments est bien reproduite par le modèle. De la même manière que pour la chasse de 2012, il ne permet cependant pas de reproduire correctement la diminution des concentrations à l'issue de la phase d'érosion et surestime la concentration à la fin de la phase d'érosion et au début de la phase de régulation dans les vannes de fond et de demifond. Cette surestimation par rapport aux mesures est estimée à 0.2×10^6 t et pourrait expliquer en partie le dépôt trop faible simulé près du barrage. De même, les pics de concentration dans les vannes ne sont pas reproduits. Les différences entre le modèle et la mesure à Seyssel sont très liées aux résultats obtenus dans la retenue de Génissiat En effet, le pic de concentration mesuré le 21/05 est mal reproduit par le modèle au niveau des vannes de fond et de demi-fond et n'est par conséquent pas reproduit à Seyssel.



FIGURE 5.10 – Concentrations simulées et mesurées au cours de la chasse de 2003 : a) Vanne de fond Génissiat, b) Vanne de demi-fond Génissiat, c) Pyrimont, d) Seyssel.

L'utilisation du module « barrage » améliore l'estimation de la masse passant par les vannes durant la première phase de la chasse de 2003 (Tableau 5.11). Au cours de la seconde phase, la contribution du module « barrage » n'est pas vraiment significative pour les masses sortant du barrage. Pour toute la chasse, l'utilisation du module « barrage » a peu d'influence sur les résultats obtenus à Seyssel, puisque des masses similaires sont obtenues avec les deux modèles. En effet, les sédiments en suspension à Seyssel sont principalement des argiles et des limons (cf. paragraphe 4.4.3). Au cours de la chasse de 2003, le niveau relativement bas de la retenue a permis un bon mélange des argiles et limons, dont la concentration était uniforme entre la vanne de fond et la vanne de demi-fond. De fait, pour les argiles et limons, la concentration moyenne dans la section était représentative des concentrations dans les vannes de fond et de demi-fond. Néanmoins, dans le cas d'une ouverture de l'évacuateur de surface, où le gradient est plus marqué (comme au cours de la chasse de 2012), l'utilisation du module permet de mieux estimer la masse à Seyssel.

	Masse p	hase d'éros	sion (10^6 t)	Masse phase de régulation (10^6 t)			
	Sans Avec		Mesure	Sans	Avec	Mesure	
	module	module		module	module		
VF	1,08	2,15	$2,23{\pm}0,62$	0,50	0,6	$0,41 \pm 0,11$	
VDF	$0,\!48$	$0,\!34$	$0,30{\pm}0,08$	0,16	$0,\!14$	$0,03{\pm}0,01$	
Seyssel	0,73	0,71	$0,69{\pm}0,12$	$0,\!89$	1,04	$0{,}54{\pm}\ 0{,}09$	

TABLEAU 5.11 – Masses transportées simulées et mesurées dans les vannes du barrage de Génissiat et dans la retenue de Seyssel durant la chasse de 2003.

5.4.5 Validation du modèle en période d'exploitation normale

Pour valider le modèle sur des périodes interchasses plus longues, une période d'interchasse d'environ trois mois (de juillet à septembre 2014) a été simulée. Le modèle permet de reproduire correctement la propagation et l'atténuation de la concentration entrant dans la retenue (Figure 5.11). Sur toute la période, 285.10^3 tonnes de sédiments sont entrées dans la retenue et 238 ± 47.10^3 tonnes ont été rejetées à l'aval. Le modèle a prédit 218.10^3 tonnes, ce qui est en accord avec les mesures.



FIGURE 5.11 – Concentrations simulée et mesurée à Pyrimont entre juillet et août 2014.

5.5 Modèle RubarBE de la retenue de Génissiat

5.5.1 Problématique

L'estimation de la contribution des sédiments grossiers dans le bilan global de la retenue semble limitée. Les bilans bathymétriques présentés dans l'analyse géomorphologique ne permettent pas de distinguer clairement les différents types de sédiments car la granulométrie n'est pas systématiquement décrite. Les fortes incertitudes associées à la comparaison du bilan bathymétrique et des masses entrant et sortant, limitent aussi l'interprétation des résultats. Cependant, si la dynamique de la partie aval de la retenue semble régie par les sédiments fins, la partie amont est principalement constituée de sédiments grossiers et les évolutions morphologiques indiquent des systèmes d'érosion/dépôt caractéristiques d'un transport par charge de fond. Le modèle RUBARBE est utilisé pour simuler le transport des sédiments grossiers et les évolutions morphologiques de la retenue liées au transport de sables et de graviers, en particulier à l'échelle des tronçons homogènes.

5.5.2 Description du modèle numérique

Géométrie de la retenue

Le modèle s'étend de l'aval du seuil de Pougny, PK 186,42 à la vanne de fond du barrage de Génissiat PK 162,41. La géométrie utilisée est identique à la géométrie construite pour les calculs hydrauliques à l'aide des modèles MAGE et RUBARBE (cf. paragraphe 3.6.3).

Description des dépôts de sédiments en place

Les caractéristiques sédimentaires de chaque tronçon sont décrites par couches, caractérisées par d_{50} , σ et une épaisseur de sédiments (Tableau 5.12). La description s'appuie sur les mesures de terrain mais elle est limitée car il n'y a pas de mesures de granulométrie pour chaque tronçon, notamment dans la partie amont, et aucune donnée précise n'est disponible concernant la répartition verticale de la granulométrie. De fait, une seule couche de sédiments est définie par tronçon à partir des mesures. Le diamètre d_{50} du tronçon est déterminé à partir des mesures lorsque celles-ci sont disponibles.

Pour les tronçons où les mesures sont absentes, comme c'est le cas pour les tronçons amont, la taille des sédiments au fond est estimée à partir d'un calcul. A l'amont, l'équilibre relatif du lit suggère que la granulométrie est assez grossière et que les sédiments ne sont mobilisés que lors d'épisodes de crue morphogènes (cf. paragraphe 3.5.5.1). Pour ces tronçons, on suppose que les sédiments au fond sont de la taille du diamètre maximal mobilisable par un débit de crue morphogène. Le diamètre au fond est défini comme le diamètre pour lequel la valeur de contrainte efficace adimensionnelle calculée pour ce débit atteint la valeur de la contrainte adimensionnelle de mise en mouvement $\theta_c = 0,047$. En géomorphologie, le débit morphogène correspond au débit pour lequel le débit solide transporté est maximal, et qui est à l'origine des remaniement morphologiques du cours d'eau. Pour les rivières naturelles, il correspond à un débit de période de retour de 1 à 3 ans. Les contraintes hydrauliques dans la retenue ont été calculées pour un régime permanent correspondant à une crue quinquennale, avec un débit $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ et une cote au barrage Z = 330 m. Le choix d'une période de retour plus élevée que pour les rivières naturelles réside dans la présence d'un fort pavage à l'amont de la retenue consécutif à l'incision du lit à l'aval du barrage de Chancy-Pougny et aux extractions de graviers dans l'Étournel. L'impact du choix de ce débit est analysée au paragraphe 5.5.3.8.

Un fond inérodable est défini en aval du PK 167,75 (tronçons T15 à T20) car les mesures indiquent que le fond est principalement composé de limons et argiles, pour lesquels la formulation mathématique utilisée dans le modèle n'est pas adaptée. L'écart type est choisi en fonction des mesures et du calcul hydraulique. Jusqu'au PK 182,35; un écart type $\sigma = 2$ est choisi pour le modèle. Cette valeur correspond aux valeurs mesurées. En aval, la variabilité entre les mesures est plus forte et les écarts entre le diamètre mesuré et le diamètre critique estimé par le modèle sont grands. Un écart-type $\sigma = 4$ est choisi. Pour chaque diamètre, la contrainte critique de mise en mouvement est déduite à partir de la contrainte critique adimensionnelle $\theta_c = 0,047$.

tronçon	PK	d_{50}	σ	d_{50}	d_{50}	σ
		mesuré	mesuré	critique	modèle	modèle
T1	186,42-185,76	70 mm^{a}	2	60 mm	60 mm	2
Τ2	185,76-184,71			50 mm	50 mm	2
Τ3	184,71-184,16			35 mm	$35 \mathrm{mm}$	2
	184,16			$15 \mathrm{mm}$	$15 \mathrm{mm}$	2
Τ4	184,16-183,22			25 mm	25 mm	2
Τ5	183,22-182,35	34-38 mm	1,4-1,7	$7 \mathrm{mm}$	30 mm	2
T6	182,35-180,9	12-100 mm	2,5	$3 \mathrm{mm}$	10 mm	4
Τ7	180,9-180,2	100 mm	2,5	$5 \mathrm{mm}$	100 mm	4
Τ8	180,2-179,58			15 mm	100 mm	4
Т9	179,58-178,07			15 mm	$15 \mathrm{mm}$	4
T10	178,07-177,35	$0,5 \mathrm{mm}$	1,7	$3 \mathrm{mm}$	0,5 mm	4
T11	177,35-174,05	0,3-0,6 mm	1,4-3	2 mm	0,5 mm	4
T12	174,05-171,75	0,3-0,6 mm	1,5-3	1 mm	0,5 mm	4
T13	171,75-169,25	$0,35 \text{ mm}^{b}$		0,9 mm	0,35 mm	4
T14	169,25-167,75	$0,35 \text{ mm}^{c}$		0,7 mm	0,35 mm	4
T15-T20	169,25-162,415					

a. mesuré 500 m en amont

b. d'après Bouchard et Dumond [2000]

c. d'après Bouchard et Dumond [2000]

TABLEAU 5.12 – Granulométrie des dépôts de sédiments dans les tronçons du modèle.

Pour chaque épisode que l'on souhaite simuler, l'épaisseur de sédiments disponible doit être déterminée.

Description de la condition à la limite amont

La description de la condition à la limite amont sédimentaire est délicate. Il existe peu de mesures qui permettent une description qualitative et quantitative des flux sédimentaires de sables et graviers à l'amont de la retenue (cf. paragraphe 4.5.1). Le choix proposé est de renseigner un apport amont nul lorsque les vannes des barrages suisses sont fermées, en accord avec les mesures. Lorsque les barrages sont ouverts, l'apport amont est supposé égal à la capacité de transport dans la première section du modèle. La granulométrie des sédiments entrant est supposée identique à la granulométrie des sédiments grossiers contenus dans la retenue de Chancy-Pougny. D'après les analyses de Loizeau [2014], les caractéristiques granulométriques choisies sont d_{50} =400 µm et σ =5, pour tenir compte de l'étendue granulométrique.

5.5.3 Calage du modèle RubarBE

5.5.3.1 Choix du scénario de calage

Le calage du modèle sédimentaire consiste à sélectionner des paramètres numériques du modèle appropriés qui permettent de reproduire le transport des sédiments grossiers et les évolutions morphologiques associées dans la retenue de Génissiat. En l'absence de mesures de flux de transport de sédiments grossiers, l'évaluation du calage repose principalement sur la comparaison entre les évolutions morphologiques mesurées et simulées. Dans cette optique, le choix du scénario utilisé pour le calage du modèle est primordial. En effet, il faut s'assurer que les évolutions morphologiques observées dans la partie amont de la retenue sont liées aux sédiments grossiers. Le scénario de la chasse de 2003 a été sélectionné pour réaliser le calage du modèle. On observe de l'érosion dans les tronçons T1 à T5 où le fond est constitué de graviers, avec un dépôt dans les tronçons T6 et T7, le volume déposé étant proche du volume érodé en amont. Ces évolutions sont principalement localisées au niveau du chenal. Ce dépôt pourrait donc correspondre au dépôt des sédiments érodés en amont. Néanmoins, aucune mesure ne permet de confirmer cette hypothèse. En particulier, le modèle ADIS-TS a montré que le tronçon T6 pouvait être affecté par des dépôts de sables en cas d'apport amont (cf. paragraphe 5.4.4). Il semble donc difficile d'expliquer la dynamique observée dans les tronçons amont. Dans les tronçons T11 à T15 de l'érosion est observée et les sédiments en place sont des sables (Figure 5.12).



FIGURE 5.12 – Bilan volumique de la retenue de Génissiat au cours de la chasse de 2003.

Estimation de l'épaisseur des dépôts de sédiments en place

L'épaisseur des couches de sédiments dans le modèle est déterminée à partir de l'évolution du profil longitudinal. L'épaisseur des dépôts observée depuis la mise en eau de la retenue n'est pas toujours représentative du stock au fond, puisqu'elle ne prend pas en compte l'épaisseur de sédiments présente initialement.

Dans la partie amont, la rivière s'écoule dans ses alluvions et peu d'évolutions du profil en long ont été observées, sauf dans la zone où ont eu lieu les extractions de gravier. La fosse creusée a atteint 5 m de profondeur, ce qui suggère qu'il y a une épaisseur importante de sédiments au fond dans l'Étournel. Une épaisseur aux alentours de 5 m est donc appliquée dans les tronçons T1 à T5 (Tableau 5.13). En aval, de faibles évolutions sont observées, en particulier, pour les tronçons T7 et T8, la granulométrie grossière observée en surface limite fortement la mobilisation des sédiments, et une épaisseur plus faible est appliquée. Dans les tronçons T1 à T8, les évolutions observées sont faibles et on suppose que la description de l'épaisseur des dépôts de sédiments varie peu selon les événements.

Dans les tronçons T9 à T12, correspondant à la partie sableuse, la pente initiale du fleuve était très forte, suggérant que le fond était très grossier. On suppose donc que l'épaisseur des dépôts dans le modèle correspond à l'épaisseur des dépôts observée à partir des profils en long entre 1954 et 2003. Pour les tronçons T13 et T14, les mesures de granulométrie en surface suggèrent que les sables sont mélangés à des sédiments fins. Une épaisseur inférieure à l'épaisseur observée sur le profil en long est appliquée dans le modèle. En aval, les sédiments en place sont majoritairement des argiles et limons. La formulation mathématique utilisée dans le modèle ne permettant pas de simuler le transport des sédiments très fins, aucun sédiment n'est présent initialement au niveau des tronçons T15 à T20 dans le modèle et le fond initial est supposé inérodable.

tronçon	PK	épaisseur des dépôts	épaisseur	
		observée (m)	modèle (m)	
T1	186,42-185,76	3 m	4 m	
T2	185,76-184,71	1 m	4 m	
T3	184,71-184,16	$5 \mathrm{m}$	5 m	
	184,16	5 m	5 m	
Τ4	184,16-183,22	$5 \mathrm{m}$	$5 \mathrm{m}$	
T5	183,22-182,35	2 m	4 m	
T6	182,35-180,9	2 m	2 m	
Τ7	180,9-180,2	1 m	2 m	
T8	180,2-179,58	2 m	2 m	
Т9	179,58-178,07	2 m	2 m	
T10	178,07-177,35	3 m	3 m	
T11	177,35-174,05	4 m	4 m	
T12	174,05-171,75	4 m	4 m	
T13	171,75-169,25	10 m	6 m	
T14	169,25-167,75	10 m	6 m	
T15-T20	169,25-162,41		0 m	

TABLEAU 5.13 – Épaisseurs des couches de sédiments en place dans les tronçons du modèle RUBARBE de la chasse de 2003.

5.5.3.2 Stratégie de calage

Différentes simulations sont réalisées afin de sélectionner dans un premier temps la loi de transport, puis la distance de chargement D_{char} . Des tests de sensibilité à la méthode de distribution des dépôts, à la condition limite amont sédimentaire et à la description des sédiments en place sont aussi réalisés. L'ensemble des simulations réalisées est présenté tableau 5.14.

Test	loi	D_{char}	multipl.	dépôt	CL amont		granulo
			Q_s^{cap}	(cf. 5.2.2.6)	Q_s	$d_{50} ({\rm mm})$	du fond
03-1	Meyer-Peter	fixe 500 m	1	6	Q_s^{cap}	0,4	initiale
	& Muller						(Tab. 5.12)
03-2	Engelund	fixe 500 m	1	6	Q_s^{cap}	0,4	initiale
	& Hansen						
03-3	Bagnold	fixe 500 m	1	6	$Q_s^{cap},$	0,4	initiale
03-10	Van Rijn	fixe 500 m	1	6	Q_s^{cap}	0,4	initiale
03-103	Van Rijn	fixe 50 m	1	6	Q_s^{cap}	0,4	initiale
03-101	Van Rijn	Han, $\alpha_H = 100$	1	6	Q_s^{cap}	0,4	initiale
03-1014	Van Rijn	Han, $\alpha_H = 200$	1	6	Q_s^{cap}	0,4	initiale
03-1010	Van Rijn	Han, $\alpha_H = 100$	0,7	6	Q_s^{cap}	0,4	initiale
03-1015	Van Rijn	Han, $\alpha_H = 100$	0,7	4	Q_s^{cap}	0,4	initiale
03-1017	Van Rijn	Han, $\alpha_H = 100$	0,7	2	Q_s^{cap}	0,4	initiale
03-1016	Van Rijn	Han, $\alpha_H = 100$	0,7	6	nulle		initiale
03-1018	Van Rijn	Han, $\alpha_H = 100$	0,7	6	Q_s^{cap}	1	initiale
03-1019	Van Rijn	Han, $\alpha_H = 100$	0,7	6	Q_s^{cap}	0,2	initiale
03-1010b	Van Rijn	Han, $\alpha_H = 100$	0,7	6	Q_s^{cap}	0,4	corrigée
							(Tab. 5.15)
03-101b	Van Rijn	Han, $\alpha_H = 100$	1	6	Q_s^{cap}	0,4	corrigée

TABLEAU 5.14 – Caractéristiques des simulations réalisées pour la chasse de 2003.

Évaluation des résultats du modèle

Les simulations sont évaluées en comparant les évolutions morphologiques simulées aux observations sur les tronçons T1 à T14 qui correspondent au tronçon fluvial et à la retenue amont, dont la dynamique est principalement affectée par le transport de sédiments grossiers, à l'échelle globale et individuelle. Deux indices de performance sont aussi proposés pour quantifier la capacité du modèle à reproduire les évolutions :

– un indice local par tronçon qui estime l'importance de l'erreur commise par le modèle sur le volume déposé ou érodé dans le tronçon $V_{mod} - V_{mes}$ par rapport au volume mobilisé total :

$$\frac{V_{mod} - V_{mes}}{\sum_{T1}^{T14} |V_{mes}|}$$

- un indice global qui est la somme sur l'ensemble des tronçons de la valeur absolue de l'indice local :

$$\frac{\sum_{T1}^{T14} |V_{mod} - V_{mes}|}{\sum_{T1}^{T14} |V_{mes}|}$$

Un indice local proche de 0 indique que l'écart entre le modèle et la mesure n'est pas significatif par rapport aux évolutions morphologiques totales à l'échelle de la retenue. Une valeur supérieure à 1 indique que le modèle est moins performant que s'il ne prédisait pas d'évolution. Plus l'indice global est faible, plus la simulation reproduit correctement les évolutions par tronçon.

Les volumes et indices globaux et par tronçon sont présentés pour chaque test dans les tableaux 5.17 et 5.19 pages 198 et 199.

5.5.3.3 Sélection de la formule de transport

Quatre formules de transport ont été testées (Tableau 5.14) :

- Meyer Peter et Müller [1948] (test 03-1)
- Engelund et Hansen [1967] (test 03-2)
- Bagnold [1966] (test 03-3)
- Van Rijn, (1984a; 1984b) (test 03-10)

Les simulations ont été réalisées en choisissant des distances de chargement D_{char} , D_{charD} et $D_{char\sigma}$ égales à 500 m. Une telle valeur est supérieure à la taille des mailles, et permet d'inclure une diffusion longitudinale du transport sédimentaire dans le modèle.

Parmi les lois sélectionnées, seules les lois de transport total d'Engelund et Hansen [1967] et de Van Rijn, (1984a; 1984b) produisent des évolutions des fonds significatives pour la chasse de 2003 (Figures 5.13 b et c). Elles simulent de l'érosion dans les tronçons centraux de la retenue, où les sédiments en place sont des sables, en accord avec les mesures. La loi de transport par charriage de Meyer Peter et Müller [1948] et celle de Bagnold [1966] simulent peu d'évolutions, avec des bilans respectifs de 0,048 10⁶ m³ et 0,023 10⁶ m³ (Tableau 5.17). Il semblerait que la suspension graduée soit le mode de transport dominant des sables dans le tronçon fluvial et la retenue amont. En particulier, la formule de Van Rijn, (1984a; 1984b), qui a été développée pour des sables et qui inclut un terme de suspension graduée semble adaptée pour simuler les processus de transport dans la retenue amont et est celle qui reproduit le mieux la dynamique spatiale des tronçons sableux. Elle est donc sélectionnée parmi les quatre formules proposées.

Les formules d'Engelund et Hansen [1967] et de Van Rijn, (1984a; 1984b) estiment une condition limite à l'amont (basée sur la capacité de transport pour $d_{50}=0,4$ mm) non négligeable. Le modèle simule le dépôt des sables entrant dans les biefs amont de la retenue (Figures 5.13 b c). En réalité, les sédiments en place sont bien plus grossiers que les sables déposés par le modèle et les tronçons sont peu impactés par le transport des sables. Il semblerait donc que la distance de chargement choisie soit peu adaptée pour reproduire le transport des sables par suspension.


FIGURE 5.13 – Bilan volumique de la retenue de Génissiat au cours de la chasse de 2003 en fonction de la formule de transport : a) mesure, b) loi d'Engelund et Hansen, c) loi de Van Rijn.

5.5.3.4 Calage de la distance de chargement

Pour se convaincre de l'utilité de la distance de chargement, un premier test avec une distance de chargement fixée à 50 m, c'est à dire inférieure à la taille des mailles a été réalisé (test 03-103, Figure 5.14 b). Un dépôt important est simulé dans le bief amont, en particulier dans le premier tronçon, comme observé avec une distance de chargement fixée à 500 m (test 03-10, Figure 5.14 c). Une distance de chargement importante semble nécessaire pour éviter ces dépôts à l'amont et propager les sables en aval de l'Étournel. La distance de chargement fixée à 500 m semble un peu trop élevée pour les biefs centraux car elle tend à sous-estimer l'érosion dans la partie sableuse notamment entre les PK 178 et 172.

Pour tenir compte à la fois du transport par suspension des sables et du transport par charriage de sédiments plus grossiers, une distance de chargement variable selon la taille des sédiments semble préférable. Pour les sables en suspension, la distance de chargement calculée avec la loi de Han et un coefficient α_H =100 varie de 100 à 800 m environ, avec une moyenne autour de 300 m. Une telle valeur (test 03-101 ,Figure 5.14 d) permet de reproduire assez correctement la dynamique des tronçons centraux, avec cependant une surestimation des volumes érodés entre les PK 178 et 167. Une distance de chargement calculée avec la loi de Han et un coefficient α_H =200 (test 03-1014 ,Figure 5.14 e) est moins satisfaisante et simule des dépôts étalés dans les tronçons amont qui n'ont pas été observés.

Une distance de chargement basée sur la loi de Han avec un coefficient $\alpha_H=100$ est sélectionnée.



FIGURE 5.14 – Bilan volumique de la retenue de Génissiat au cours de la chasse de 2003 en fonction de la distance de chargement : a) mesure, b) $D_{char}=50$ m, c) $D_{char}=500$ m, d) loi de Han $\alpha_H=100$, e) loi de Han $\alpha_H=200$.

Dynamique des tronçons amont

Alors que la dynamique des tronçons centraux correspondant aux sables semble bien reproduite par le modèle, aucun des scénarios testés jusqu'à présent n'a permis de reproduire la dynamique des tronçons amont. En particulier, l'érosion des tronçons T1 à T5 n'est jamais reproduite et une érosion trop forte du tronçon T9 est simulée. Des difficultés de modélisation de cette zone avaient déjà été rencontrées au cours du calage du modèle hydraulique (cf. paragraphe 3.6.4.1), notamment au niveau des tronçons T5 et T6 où les niveaux d'eau mesurés n'ont pas été correctement reproduits.

Le test basé sur la formule de Van Rijn et une distance de chargement calculée avec la loi de Han et un coefficient α_H =100 simule le dépôt des sables entrant dans le tronçon T6 et est celui qui reproduit le mieux la dynamique dans ce tronçon (Figure 5.15).



FIGURE 5.15 – Bilan volumique des tronçons amont de la retenue de Génissiat au cours de la chasse de 2003 en fonction de la distance de chargement : a) mesure, b) $D_{char}=50$ m, c) loi de Han $\alpha_H=100$.

5.5.3.5 Application d'un coefficient multiplicateur de la capacité solide

Avec la loi de Van Rijn, (1984a; 1984b) et une distance de chargement estimée par la formule de Han avec un coefficient α_H =100, les évolutions morphologiques simulées restent trop intenses. L'érosion est surestimée, avec un bilan global de -0,76×10⁶ m³ comparé au bilan mesuré -0,43±0,06×10⁶ m³ (test 03-101, Figure 5.14 c, Tableau 5.17). La multiplication de la capacité de transport solide par 0,7 permet de réduire l'écart entre le modèle et les mesures, notamment pour les tronçons T11 et T12. Le bilan obtenu pour cette simulation est de -0,47×10⁶ m³ et est proche du bilan mesuré (Tableau 5.17). Un coefficient multiplicateur de 0,7 appliqué à la capacité solide est donc sélectionné.

Néanmoins, l'érosion du tronçon T9 est toujours surestimée par le modèle, ce qui pourrait être dû à une description des sédiments en place non représentative. En outre, dans le tronçon T13, l'érosion simulée est plus forte que l'érosion observée. Elle est due en partie à une forte érosion entre les PK 169,5 et 169,25, où les contraintes calculées ne sont pas réalistes à cause de l'utilisation d'un coefficient de Strickler très faible pour modéliser une perte de charge locale (cf. paragraphes 3.6.4.1 et 3.6.7). Un test présentant les résultats avec un fond inérodable entre les PK 169,5 et 169,25 est présenté au paragraphe 5.5.3.8.

5.5.3.6 Sensibilité à la méthode de dépôt

Pour la déformation de la section due au dépôt de sédiments, trois options sont testées :

- Dépôt fonction de τ_i^m (option 6) qui a été sélectionné pour les premiers tests (test 03-1010),
- Dépôt fonction de $(\tau_{c,j} \zeta \tau_j)^m$ (option 4) (test 03-1015),
- Dépôt uniforme sur le périmètre mouillé (option 2) (test 03-1017).

L'effet des différents modes de déformation est observé à l'échelle des évolutions morphologiques des tronçons (Figure 5.16) et aussi de la déformation des sections (Figure 5.17). La méthode de dépôt en fonction de la contrainte reproduit le mieux les évolutions morphologiques à l'échelle du tronçon, (Figure 5.16 b), mais aussi la déformation de la section dans une zone de dépôt (Figure 5.17 a). Pour un dépôt fonction de l'écart entre la contrainte critique et la contrainte, la dynamique du tronçon T12 est mal reproduite (Figure 5.16 c). L'évolution simulée de la section au PK 181,2 est très éloignée de l'évolution réelle (Figure 5.17 a). Pour un dépôt uniforme, les volumes érodés simulés sont trop élevés (Figure 5.16 d).

La méthode de dépôt proportionnelle à la contrainte, donnant des évolutions de sections symétriques entre le dépôt et l'érosion (méthode 6) est sélectionnée.



FIGURE 5.16 – Bilan volumique de la retenue de Génissiat au cours de la chasse de 2003 en fonction de la méthode de dépôt : a) mesure, b) dépôt fonction de τ_j , c) dépôt fonction de $(\tau_{c,j} - \zeta \tau_j)^m$, d) dépôt uniforme.

La validité de la méthode d'érosion en fonction de la contrainte a aussi été vérifiée dans le cas d'une érosion de section et donne des évolutions proches des mesures au centre du lit et un peu moins réalistes au niveau de la frontière entre les lits actifs et non actifs, avec une érosion verticale du point à la frontière (Figure 5.17 b).



FIGURE 5.17 – Déformation des sections observées et simulées par le modèle : a) PK 181,2 (dépôt), b) PK 176,9 (érosion).

5.5.3.7 Sensibilité à la condition limite amont sédimentaire

En l'absence de données renseignant sur les apports en sédiments grossiers au cours de la chasse de 2003, des hypothèses ont été proposées pour l'estimation de la condition limite amont. La sensibilité du modèle à ce paramètre est testée à partir de quatre types de conditions limite amont :

- Apport correspondant à la capacité solide amont pour $d_{50}=0,4$ mm (test 03-1010) lors de l'ouverture des vannes des barrages amont,
- Apport nul (test 03-1016),
- Apport correspondant à la capacité solide amont pour $d_{50}=1$ mm (test 03-1018) lors de l'ouverture des vannes des barrages amont,
- Apport correspondant à la capacité solide amont pour $d_{50}=0,2$ mm (test 03-1019) lors de l'ouverture des vannes des barrages amont.

Seuls les tronçons amont sont impactés par la condition amont pour la simulation de la chasse de 2003 (Figure 5.18). Lorsque l'apport est nul, aucune évolution significative des tronçons est observée en amont du PK 181. Lorsque l'apport est non nul, du dépôt est observé dans les tronçons amont. Les évolutions obtenues sont plus réalistes avec des sédiments de 200 ou 400 µm. Un apport correspondant à la capacité solide amont pour un diamètre médian de 400 µm est sélectionné car ce diamètre est plus représentatif des sables piégés dans les retenues amont.



FIGURE 5.18 – Bilan volumique des tronçons amont de la retenue de Génissiat au cours de la chasse de 2003 en fonction des apports amonts : a) mesure, b) apport Q_s^{cap} , $d_{50}=0,4$ mm, c) apport nul, d) apport Q_s^{cap} , $d_{50}=1$ mm, e) apport Q_s^{cap} , $d_{50}=0,2$ mm.

5.5.3.8 Sensibilité à la description des sédiments en place

Les résultats obtenus pour les premiers tests suggèrent que certaines différences entre les évolutions morphologiques mesurées et simulées pourraient provenir d'une description peu réaliste des sédiments au fond dans certains tronçons. La description des sédiments en place a donc été corrigée.

En particulier, l'absence d'érosion dans les tronçons T1 à T5 pourrait être due à une granulométrie trop grossière des sédiments au fond, qui a été définie pour être mise en mouvement dans des conditions de crue quinquennale (cf. paragraphe 5.5.2). Le diamètre médian dans ces tronçons a été redéfini en se basant sur un débit de 700 m³/s, soit un débit de crue annuel (Tableau 5.15). Au niveau du tronçon T9 l'érosion simulée par le modèle était trop forte alors que ce tronçon connait généralement peu d'évolutions. Le diamètre des sédiments au fond a été augmenté à 30 mm, ce qui correspond au diamètre des sédiments charriés en amont de ce tronçon, mesuré au Pont Carnot lors de la chasse de 2012 (cf. paragraphe 4.5.2). Entre les PK 169,5 et 169,25, un fond inérodable est défini pour s'affranchir de l'impact des contraintes simulées localement qui sont peu réalistes vis à vis du transport solide.

Tronçon	T1	T2	Т3	Τ4	T5	Т9	PK 169,5-169,25
d_{50} initial	60 mm	50 mm	$35 \mathrm{mm}$	25 mm	30 mm	$15 \mathrm{mm}$	inérodable
d_{50} corrigé	40 mm	30 mm	25 mm	10 mm	$15 \mathrm{mm}$	30 mm	inérodable

TABLEAU 5.15 – Caractéristiques sédimentaires corrigées pour certains tronçons du modèle.

- A partir de cette nouvelle description des sédiments en place, deux tests sont réalisés :
- un test reprenant les paramètres de calage sélectionnés précédemment (test 03-1010b),
- un test reprenant les paramètres de calage sélectionnés précédemment mais en supprimant le coefficient multiplicateur de la capacité solide (test 03-101b).

La correction de la granulométrie des sédiments en place ne permet pas d'améliorer les résultats dans les biefs amont T1 à T5 (Figure 5.19 et tableau 5.17). En effet, l'érosion n'est toujours pas reproduite. Ces résultats montrent certainement une limitation de la modélisation monodimensionnelle dans la zone, qui présente une géométrie complexe avec des chenaux multiples. La correction du diamètre dans le tronçon T9 permet de réduire l'érosion produite par rapport à l'ancienne description, mais pas de façon suffisante. Les résultats obtenus pour les tronçon T11 et T12 sont dégradés par rapport à la description initiale si on conserve le calage initial. Le bilan global de la retenue avec la nouvelle description est plus satisfaisant lorsque le paramètre multiplicateur de la capacité solide est égal à 1.



FIGURE 5.19 – Bilan volumique des tronçons amont de la retenue de Génissiat au cours de la chasse de 2003 en fonction des apports amonts : a) mesure, b) granulométrie corrigée $Q_s^{cap,VR} \times 0,7$ c) granulométri

5.5.3.9 Calage final

Les paramètres finalement choisis pour le calage et la description du modèle sont : – Description initiale des sédiments en place avec la correction pour le tronçon T9,

- Capacité de transport estimée par la loi de transport de Van Rijn, avec un coefficient multiplicateur 0,7
- Distance de chargement obtenue par la loi de Han, avec un coefficient $\alpha_H=100$,
- Méthode de dépôt proportionnelle à la contrainte,
- Condition limite amont correspondant à la capacité de transport calculée pour un diamètre $d_{50}=0,4$ mm lorsque les barrages amont sont ouverts, apport nul sinon.

							Bilan v	olumique (]	10^{6} m^{3}						
	T1-T14	T1	T2	T3	T4	T5	T6	$L_{\rm T}$	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
mesure	-0,46	-0,002	-0,008	-0,014	-0,037	-0,035	0,063	0,027	-0,004	-0,005	-0,050	-0,195	-0,070	-0,094	-0,037
	$\pm 0,061$	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$\pm 0,005$	$\pm 0,006$	$\pm 0,009$	$\pm 0,009$	$\pm 0,005$	$\pm 0,002$	$\pm 0,006$	$\pm 0,006$	± 0.035	$\pm 0,018$	$\pm 0,040$	$\pm 0,014$
03-1	0,048	0,009	0,014	0,001	0,002	0,004	0,006	0,007	0,001	0,001	-0,005	-0,002	0,009	-0,004	0,006
03-2	0,38	0,089	0,146	0,091	0,045	0,018	0,004	0,004	-0,001	-0,033	-0,037	-0,041	0,087	-0,064	0,072
03-3	0,023	-0,002	0,002	-0,007	-0,002	0,003	-0,003	0,001	0,002	0,009	-0,006	0,004	0,014	-0,028	0,037
03-10	0,081	0,101	0,081	0,074	0,064	0,043	0,012	0,020	-0,014	-0,046	-0,048	-0,164	0,065	-0,088	-0,020
03 - 103	-0,811	0,087	0,010	0,021	0,008	0,015	0,005	0,016	-0,016	-0,054	-0,045	-0,332	-0,151	-0,232	-0,144
03 - 101	-0,762	0,001	-0,001	0,005	0,029	0,026	0,051	0,012	-0,013	-0,070	-0,042	-0,318	-0,092	-0,218	-0,132
03 - 1014	-0,456	0,002	0,001	0,034	0,030	0,023	0,025	0,014	-0,013	-0,067	-0,042	-0,244	-0,007	-0,144	-0,068
03 - 1010	-0,481	0,001	0	0,008	0,016	0,023	0,037	0,010	-0,010	-0,052	-0,047	-0,193	-0,037	-0,172	-0,068
03 - 1015	-0,505	-0,001	-0,003	0,019	0,019	0,009	0,021	0,010	-0,012	-0,050	-0,048	-0,179	0,018	-0,216	-0,094
03-1017	-1,118	0	0,001	0,004	0,007	0,013	-0,007	-0,014	-0,028	-0,077	-0,044	-0,362	-0,148	-0,283	-0,179
03 - 1016	-0,582	0	0	0	0,001	-0,003	0	0,010	-0,010	-0,051	-0,047	-0,191	-0,053	-0,171	-0,068
03 - 1018	-0,522	0,002	0	0,015	0,018	0,014	0,008	0,010	-0,010	-0,051	-0,047	-0,192	-0,051	-0,172	-0,068
03 - 1019	-0,498	-0,003	-0,002	0,019	0,020	0,017	0,030	0,011	-0,010	-0,051	-0,047	-0,192	-0,050	-0,171	-0,069
03-1010b	-0,262	0,001	-0,003	0,013	0,012	0,018	0,050	0,012	-0,009	-0,021	-0,052	-0,146	0,011	-0,025	-0,122
03-101b	-0,452	0,000	-0,003	0,011	0,015	0,027	0,060	0,014	-0,010	-0,022	-0,050	-0,253	-0,001	-0,090	-0,147
TABLEAU l'écart ent	5.17 - Ere les vale	ilan volu eurs simu	mique po lée et me	ur les tro surée est	nçons T1 inférieur	à T14, g à l'incert	global et itude de	par tronç mesure (a	on. Pour wec une t	chaque te olérance	est et cha de 1000 n	que tronç n ³).	on, la cel	llule est c	olorée si

iique pour les tronçons T1 à T14, global et par tronçon. Pour chaque test et chaque tronçon, la cellule est colorée si	ée et mesurée est inférieur à l'incertitude de mesure (avec une tolérance de 1000 m^3).
iique pour le	ie et mesurée
Bilan volum	⁄aleurs simulé
ABLEAU $5.17 -$	écart entre les v

T14	0,068	0,171	0,116	0,027	-0,166	-0,147	-0,049	-0,048	-0,089	-0,221	-0,048	-0,048	-0,049	-0,132	-0,172
T13	0,140	0,047	0,103	0,010	-0,216	-0,194	-0,078	-0,121	-0,191	-0,295	-0,120	-0,121	-0,120	0,107	0,006
T12	0,123	0,246	0,131	0,211	-0,126	-0,034	0,099	0,053	0,138	-0,122	0,026	0,031	0,031	0,127	0,108
T11	0,302	0,240	0,310	0,049	-0,213	-0,191	-0,076	0,004	0,026	-0,261	0,006	0,005	0,005	0,077	-0,090
T10	0,069	0,020	0,068	0,003	0,007	0,012	0,012	0,005	0,003	0,010	0,005	0,005	0,005	-0,004	-0,001
T9	0,010	-0,043	0,022	-0,063	-0,076	-0,101	-0,096	-0,072	-0,070	-0,112	-0,072	-0,072	-0,072	-0,024	-0,026
T8	0,008	0,005	0,008	-0,016	-0,019	-0,015	-0,015	-0,010	-0,013	-0,039	-0,010	-0,010	-0,010	-0,009	-0,011
T7	-0,032	-0,036	-0,041	-0,011	-0,017	-0,024	-0,020	-0,026	-0,027	-0,063	-0,026	-0,026	-0,025	-0,023	-0,021
16	-0,090	-0,092	-0,103	-0,080	-0,091	-0,020	-0,061	-0,042	-0,066	-0,110	-0,099	-0,086	-0,052	-0,022	-0,005
T5	0,062	0,083	0,060	0,122	0,079	0,097	0,091	0,090	0,070	0,076	0,051	0,077	0,082	0,083	0,097
T4	0,061	0,127	0,054	0,157	0,069	0,102	0,104	0,083	0,086	0,069	0,058	0,086	0,088	0,076	0,080
T3	0,022	0,163	0,011	0,137	0,054	0,029	0,074	0,034	0,051	0,027	0,021	0,045	0,051	0,042	0,039
T2	0,034	0,240	0,016	0,138	0,028	0,010	0,014	0,012	0,008	0,014	0,012	0,013	0,010	0,008	0,008
T1	0,018	0,142	-0,001	0,160	0,138	0,004	0,005	0,005	0,001	0,002	0,002	0,006	-0,002	0,004	0,003
T1-T14	1,037	1,654	1,043	1,185	1,300	0,980	0,793	0,604	0,839	1,422	0,558	0,631	0,602	0,737	0,665
	03-1	03-2	03-3	03-10	03 - 103	03 - 101	03 - 1014	03 - 1010	03 - 1015	03-1017	03 - 1016	03-1018	03 - 1019	03-1010b	03-101b

TABLEAU 5.19 – Performance du modèle par simulation pour les tronçons T1 à T14, globale et par tronçon. Pour chaque tronçon, la cellule colorée correspond au meilleur indice de performance obtenu parmi les différents tests.

5.6 Validation du modèle RubarBE de la retenue de Génissiat

5.6.1 Simulation de la chasse de 1984

Le scénario de la chasse de 1984 a été sélectionné pour la validation du modèle pour les sédiments grossiers. Pour cet événement, les évolutions morphologiques observées de l'amont jusqu'au PK 174 semblent associées aux sédiments grossiers. En particulier, on observe de l'érosion dans les tronçons T7 à T11 où le fond est constitué de graviers ou de sables (cf. figure 3.18). De plus, au cours de la phase de régulation, l'apport en sédiments fins issus des chasses suisses a été plutôt faible, avec un taux de transfert élevé (environ 75% entre Pougny et Pyrimont) (cf. tableau 4.13), ce qui suggère que l'impact des sédiments fins sur la morphologie des tronçons amont de la retenue est modéré. Enfin, la simulation du transport des sédiments fins pour cet épisode a montré que la dynamique des tronçons amont n'était pas affectée par les sédiments fins (cf. paragraphe 5.4.1.2).

Estimation de l'épaisseur des dépôts de sédiments en place

Pour les tronçons T1 à T8, l'épaisseur déterminée au paragraphe 5.5.3.1 est conservée. Dans les tronçons T9 à T12, l'épaisseur des dépôts dans le modèle est déterminée à partir des profils en long entre 1954 et 1984 (Tableau 5.20). Pour les tronçons T13 et T14, l'épaisseur déterminée au paragraphe 5.5.3.1 est aussi conservée.

tronçon	PK	épaisseur des dépôts	épaisseur
		observée (m)	modèle (m)
T9	179,58-178,07	2 m	2 m
T10	178,07-177,35	2 m	2 m
T11	177,35-174,05	2 m	2 m
T12	174,05-171,75	4 m	4 m

TABLEAU 5.20 – Épaisseurs des couches de sédiments en place dans les tronçons du modèle RUBARBE de la chasse de 1984.

Résultats du modèle

A l'amont, le modèle reproduit le dépôt dans les biefs T3 et T4 mais de façon surestimée (Figure 5.20). La dynamique des tronçons T9 à T11 est bien reproduite par le modèle. En aval, les évolutions morphologiques ne sont pas reproduites car elles sont plutôt associées au transport des sédiments fins, comme l'a montré la simulation de cet événement avec le modèle ADIS-TS (cf. paragraphe 5.4.1.2).



FIGURE 5.20 – Bilan volumique de la retenue de Génissiat au cours de la chasse de 1984 : a) mesure, b) simulation.

5.6.2 Simulation de la chasse de 2012

Au cours de la chasse de 2012, le flux de sédiments transportés par charriage a été mesuré au Pont-Carnot (cf. paragraphe 4.5.2). Les tests précédents ont montré que les résultats du modèle sur le tronçon fluvial de la retenue n'étaient pas très réalistes. Des épaisseurs de dépôt identiques à celles de la chasse de 2003 sont utilisées (cf. paragraphe 5.5.3.1).

Le flux de transport à l'aval du tronçon fluvial est assez bien reproduit par le modèle pour les mesures du 8 juin, si on tient compte de la forte variabilité des mesures (Figure 5.21 a). De plus, les diamètres transportés simulés correspondent bien aux mesures (Figure 5.21 b). Pour les mesures effectuées le 11 juin, le modèle surestime le flux et le diamètre transporté.



FIGURE 5.21 – Transport par charriage au Pont-Carnot au cours de la chasse de 2012 : a) flux simulés et mesurés, b) Diamètres médians simulés et mesurés.

5.7 Discussion sur la modélisation des processus hydro-sédimentaires

Les étapes de calage et de validation des modèles hydro-sédimentaires de la retenue ont permis de mettre en évidence les capacités des modèles à reproduire les évolutions du fond ou les flux observés, et ont permis de détecter des limites des modèles. Des tests supplémentaires sont réalisés pour améliorer la compréhension des processus hydro-sédimentaires de la retenue et aussi afin de mieux cerner les limites des modèles.

5.7.1 Comparaison des modèles Adis-TS et RubarBE : cas test d'une opération de chasse simplifiée

Un cas test correspondant à un protocole de chasse est utilisé pour comparer les deux modèles ADIS-TS et RUBARBE sur le transport des sables uniquement, dont la dynamique peut être théoriquement simulée par les deux modèles.

Le scénario comprend une première phase d'abaissement de la retenue, avec un débit support de 300 m^3 /s et un palier à la cote 305 m et des apports amont nuls, puis une phase correspondant à la remontée de la retenue à une cote 315 m, avec un débit support de 600 m^3 /s et un apport de 1 g/l de sable de 400 µm (Figure 5.22). Les sédiments en place dans le modèle sont uniquement des sables : une couche de sédiments de 400 µm de 8 m d'épaisseur entre les PK 178,07 et le PK 171,75, et une couche de sédiments de 200 µm de 10 m d'épaisseur entre les PK 171,75 et 167,75. Sur le reste de la retenue, le fond est inérodable.



FIGURE 5.22 – Description des conditions aux limites hydro-sédimentaires du cas-test.

Le test de référence est le cas-test 1 réalisé avec RUBARBE et prenant en compte le transport total et l'évolution des fonds. D'autres simulations sont réalisées avec le modèle RUBARBE et permettent de tester individuellement l'impact de la prise en compte ou non de certains processus, comme l'évolution des fonds, ou en séparant le transport par charriage et le transport par suspension dans la loi de Van Rijn (Équation 5.15).

Test	Modèlee	Loi	Type de	Évolution
	numérique		transport	des fonds
cas-test-1	RUBARBE	loi de Van Rijn+loi de chargement	Total	oui
cas-test-2	RUBARBE	loi de Van Rijn+loi de chargement	Total	non
cas-test-3	RUBARBE	loi de Van Rijn+loi de chargement	Charriage	oui
cas-test-4	RUBARBE	loi de Van Rijn+loi de chargement	Suspension	oui
cas-test-5	RUBARBE	loi de Van Rijn+loi de chargement	Suspension	non
cas-test-6	ADIS-TS	Advection-dispersion+termes sources	Suspension	non

TABLEAU 5.21 – Caractéristiques des simulations réalisées pour le cas-test.

L'évolution temporelle des concentrations simulées par les différents modèles est présentée à différentes localisations dans la retenue (Figure 5.23). A l'amont, il n'y a pas de sables disponibles dans le modèle, aucun flux n'est donc observé au Pont Carnot lors de la première phase correspondant à des apports nuls (Figure 5.23 a). Durant la seconde phase l'apport amont est non nul. Au Pont Carnot, la prise en compte de l'évolution des fonds dans RUBARBE (cas-test-1 et cas-test-4) reproduit une concentration qui augmente avec le temps, alors que la concentration reste constante sans évolution des fonds (cas-test-2 et cas-test-5). L'évolution des fonds, qui permet de reproduire l'adaptation de la géométrie du modèle aux apports sédimentaires a donc un impact sur les flux transportés. Avec la formule de charriage uniquement (cas-test-3), la capacité de transport est faible et la concentration simulée au Pont-Carnot est faible. Les tests utilisant seulement la formule de suspension donnent des concentrations plus élevées qu'avec le transport total car la part de sédiments entrant transportée par charriage a été déposée dans l'Étournel. La concentration simulée par le test ADIS-TS est quasiment nulle et tous les sédiments ont été déposés.

Entre les PK 178,07 et 173,5 (Grésin), du sable de 400 µm est disponible initialement dans la retenue. Pour chacune des simulations RUBARBE, la concentration à Grésin au cours de la seconde phase est supérieure à la concentration mesurée au Pont Carnot, ce qui montre que de l'érosion a été simulée au cours entre le Pont Carnot et Grésin. La concentration diminue cependant au cours de cette seconde phase. La capacité de transport totale est supérieure à

la capacité de transport par suspension seule, et les concentrations simulées sont donc plus fortes. La concentration calculée par la simulation avec le transport par charriage seulement n'a d'impact qu'au cours de la seconde phase et est assez différente des autres simulations. Avec le test ADIS-TS, dès l'abaissement effectué, la concentration simulée est presque constante sur tout l'événement. Elle correspond à l'érosion des sédiments situés entre le Pont Carnot et Grésin. Au cours de la période d'abaissement à 305 m puis à 315 m, les contraintes varient peu entre les PK 178,07 et 173,5, ce qui explique que la concentration reste constante.

Au niveau du barrage, seul le test ADIS-TS reproduit une concentration non nulle (Figure 5.23 c). En effet, contrairement à RUBARBE, il simule la propagation des sédiments à la même vitesse que l'écoulement et ne prend pas en compte les interactions avec le fond.



FIGURE 5.23 – Concentrations simulées par les modèles : a) Pont Carnot PK 180, b) Grésin PK 173,5, c) Amont du barrage PK 162,4.

Les évolutions morphologiques simulées par les différents tests sont comparées (Figure 5.24). Par rapport au test de référence (Figure 5.24 a), l'utilisation d'un fond fixe impacte principalement le tronçon T11 (Figure 5.24 b) en allant dans le sens d'une diminution du volume des sédiments remobilisés. L'utilisation d'une formule de suspension seule modifie les évolutions sur de nombreux tronçons (Figure 5.24 d), en particulier pour les tronçons T14 à T20. En particulier, les érosions sont plus faibles et les dépôts plus intenses. Il semblerait donc que la prise en compte du transport total limite la possibilité de dépôt par rapport à la suspension seule et le charriage serait donc responsable de la propagation des sédiments dans les tronçons aval. La capacité de transport par charriage est inférieure à la capacité de transport total et ne permet pas de remobiliser les sédiments dans les tronçons T10 à T12. Son impact est seulement visible à partir du tronçon T13 (Figure 5.24 c). Parmi tous les tests RUBARBE, le test à fond fixe et avec la suspension uniquement est en théorie celui qui se rapproche le plus du test ADIS-TS. Les évolutions morphologiques simulées par les deux tests sont assez proches (Figures 5.24 e et 5.24 f).



FIGURE 5.24 – Bilans volumiques simulés par les modèles : a) RUBARBE total avec évolution, b) RUBARBE total sans évolution, c) RUBARBE charriage avec évolution, d) RUBARBE suspension avec évolution, e) RUBARBE suspension sans évolution, f) ADIS-TS.

5.7.2 Modélisation du tri granulométrique

Le diamètre médian des sédiments déposés simulés par le modèle ADIS-TS pour différents épisodes de chasse ou d'interchasse a été estimé. Lorsqu'aucun dépôt n'a eu lieu, la courbe n'est pas tracée. Le diamètre peut être comparé au diamètre médian de surface qui a été mesuré au cours des différentes campagnes (Figure 5.25). Dans le modèle, le sédiment le plus grossier mesure 400 µm, les dépôts simulés ne peuvent donc pas être plus grossiers.

Pour la période d'interchasse, des dépôts de sédiments fins sont simulés entre les PK 182 et 178, où aucun sédiment n'est disponible initialement dans le modèle. Entre les PK 178 et 176,5, les sables en place sont repris puis déposés entre les PK 176,5 et 172. Des dépôts de sédiments plus fins sont observés au niveau de singularités géométriques, comme la mouille au PK 172,8. La simulation reproduit la chute du diamètre observé en surface entre les PK 172 et 170,5. Des dépôts plus grossiers sont simulés entre les PK 168 et 166. Néanmoins aucune mesure de terrain n'est disponible à cet endroit pour comparaison. A partir du PK 166,5, les dépôts sont constitués uniquement de sédiments fins et leur granulométrie est proche de la granulométrie mesurée en surface.

Lors d'un épisode de chasse, la distribution longitudinale de la granulométrie des dépôts simulée dans la retenue en amont du PK 172 est proche de celle obtenue en période d'interchasse. En aval du PK 172, la granulométrie simulée des dépôts est plus grossière qu'en période d'interchasse, en particulier pour les chasses de 2000 et 2012 au cours desquelles l'abaissement de la retenue a permis le transport des sables loin dans la retenue et pour lesquelles le comblement plus avancé de la retenue par rapport à 1984 favorise le transport des sédiments.



FIGURE 5.25 – Granulométrie des dépôts sédimentaires simulés pour différents événements (Les symboles ponctuels correspondent aux mesures de surface).

Le tri granulométrique observé dans la retenue pourrait donc être lié à un dépôt sélectif des sédiments en fonction des conditions hydrauliques, en particulier des faibles contraintes observées sur le tiers aval de la retenue. L'alternance temporelle d'épisodes de chasse et de périodes d'interchasse permet d'expliquer l'alternance de couches de sédiments fins et de couches de sables observées dans les dépôts près du barrage. Néanmoins, la comparaison des modèles ADIS-TS et RUBARBE pour le transport des sables a montré des différences importantes concernant la propagation des sables (cf. paragraphe 5.7.1). Le modèle ADIS-TS pourrait surestimer la propagation des sables à l'aval.

5.7.3 Modélisation de la propagation des sables

Afin de simuler la propagation des sables avec les deux modèles, un scénario correspondant à des conditions de chasse a été utilisé. La géométrie antérieure à la chasse de 1984 a été utilisée. Les conditions hydrauliques sont celles d'un régime permanent avec un débit entrant de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ et une cote au barrage de 308 m. Aucun sédiment fin n'a été utilisé dans le modèle ADIS-TS. Pour chacun des modèles, la description sédimentaire du fond correspond à celle utilisée pour la modélisation de la chasse de 1984 correspondant aux sables (cf. paragraphes 5.4.1.2 et 5.6.1.). Aucun sédiment n'est présent initialement en aval du PK 167,75 et le fond est inérodable. L'apport sédimentaire amont est nul donc les sédiments propagés sont les présents au niveau des biefs centraux.

La propagation du sable simulée par les deux modèles dans ces conditions est présentée figure 5.26. Pour RUBARBE, la masse représentée correspond à la masse de la couche active à l'intérieur des mailles de calcul alors que pour ADIS-TS, il s'agit de la masse déposée au fond des mailles. On suppose que cette masse est significative si elle dépasse 100 kg par maille de calcul. Les formulations du transport des sables différentes utilisées entre les deux tests entraînent des vitesses de propagation très différentes. ADIS-TS transporte les sédiments à la même vitesse que l'écoulement. Il simule une avancée du front de sable de près de 1 km après 15 minutes, 3 km après 30 minutes et 4 km après une heure. Ensuite, le front n'avance plus car il n'y a plus de sédiment disponible dans les zones où l'écoulement est favorable à la remobilisation. Avec RUBARBE, la propagation des sédiments est plus longue. Il faut une journée pour faire avancer le front de sable de 3 km et l'avancée est ensuite très ralentie.



FIGURE 5.26 – Évolution longitudinale et temporelle de la masse de sable par maille de calcul : a)ADIS-TS, b)RUBARBE.

5.7.4 Modélisation de périodes d'interchasse

La simulation du transport des matières en suspension au cours de périodes d'interchasse à l'aide du modèle ADIS-TS permet d'analyser l'impact du transport des sédiments fins sur la dynamique de la retenue. De plus, cette modélisation permet de caractériser l'impact sur les résultats simulés de l'utilisation de chroniques de concentration reconstruites pour la condition limite sédimentaire amont.

5.7.4.1 Discussion sur l'utilisation de la méthode de reconstruction de la concentration à Pougny

Le modèle de la période d'interchasse de juillet à septembre 2014, construit à partir de la concentration mesurée à Pougny pour la condition limite amont a été repris (cf. paragraphe 5.4.5). Pour ce test, c'est la concentration reconstruite à Pougny qui a été utilisée en condition limite amont. La masse entrant dans la retenue au cours de la période estimée d'après la reconstruction est de 305×10^3 t, soit 7% de plus que la masse mesurée, ce qui n'est pas significatif au regard des incertitudes. Néanmoins, la dynamique temporelle du signal de concentration reconstitué est modifiée par rapport à la mesure. On observe une surestimation de la concentration en régime de base et la plupart des pics de concentration sont mal reproduits (Figure 5.27). La masse transportée à Pyrimont simulée est de 240×10^3 t, et est très proche de la mesure. Néanmoins, les défauts observés au niveau de la condition limite amont sont conservés : la concentration en régime de base est surestimée, et certains pics sont mal reproduits. Pour cette période, la masse déposée et les évolutions morphologiques de la retenue sont identiques pour les deux types de condition sédimentaire amont.



FIGURE 5.27 – Concentrations à Pyrimont mesurée et simulée à partir de la concentration reconstruite à Pougny entre juillet et août 2014.

5.7.4.2 Simulation de la période d'interchasse 2000-2003

La période d'interchasse de novembre 2000 à avril 2003 a été sélectionnée, en particulier pour des raisons de disponibilité des données hydrauliques pour la construction du modèle. Cette période est marquée par une crue supérieure à la crue décennale et le bilan de la retenue est quasiment nul. De plus, elle est antérieure aux mesures de concentration en amont et en aval et permet l'application des méthodes de reconstruction des concentrations proposées au paragraphe 4.7.2. La masse de sédiments fins en entrée a été estimée à $1,59 \times 10^6$ t d'après la méthode de reconstruction proposée.

La dynamique de la retenue est assez bien reproduite par le modèle dans la partie aval de la retenue, à partir du PK 178 (Figure 5.28). Le modèle a tendance à surestimer les volumes déposés par tronçon, mais l'écart entre la mesure et la simulation est inférieure aux incertitudes, sauf pour les tronçons T13 et T15.



FIGURE 5.28 – Bilan volumique de la retenue de Génissiat au cours de la période d'interchasse 2000-2003 : a) mesure, b) simulation avec ADIS-TS.

Le bilan à l'échelle de la retenue n'est pas très satisfaisant. Le volume déposé est estimé par le modèle à $0.36 \pm 0.12 \times 10^6 \text{ m}^3$, alors que le volume mesuré par bathymétrie est de $0.006 \pm 0.09 \times 10^6 \text{ m}^3$. De même, la masse sortant simulée est de $1.24 \times 10^6 \text{ t}$, alors que la reconstruction à Pyrimont prévoyait une masse de $1.76 \times 10^6 \text{ t}$.

Pour expliquer les mauvais résultats obtenus, on peut raisonnablement penser que la condition limite amont n'est pas valide. En effet, la méthode de reconstruction de la concentration à Pougny n'a pas été validée par manque de données. De plus, les résultats de la simulation réalisée sur la période utilisée pour le calage de la régression ont montré que les concentrations étaient sous-estimées en crue et sur-estimées en régime de base (cf. paragraphe 5.7.4.1). Le régime de base est assez favorable au dépôt et la surestimation de la concentration entrant dans la retenue pendant le régime de base entraîne une surestimation du dépôt. De plus, les capacités de reproduction du modèle ADIS-TS de la retenue semblent encore non validées sur les longues périodes d'interchasse et sur les crues importantes comme celle rencontrée au cours de la période.

5.8 Applications prédictives

Dans cette partie, le modèle ADIS-TS va être appliqué afin de mettre en évidence l'impact du protocole de gestion de la retenue au cours d'événements de chasse ou de crue sur la dynamique sédimentaire dans la retenue. Ces applications peuvent servir de base pour l'amélioration des protocoles.

5.8.1 Modélisation prédictive pour la chasse de 2016

Une concertation entre les gestionnaires des barrages du Haut-Rhône a abouti à la mise en place d'un protocole pour la chasse de 2016. Les retenues de Génissiat et de Seyssel vont d'abord être abaissées à partir du 18/05/2016, puis lorsque les cotes cibles sont atteintes, environ deux

jours après le début de l'abaissement, les retenues de Verbois et Chancy-Pougny sont à leur tour abaissées.

Les différents protocoles envisagés ont été simulés avec le modèle ADIS-TS des retenues de Génissiat et Seyssel. Les conditions aux limites relatives à la retenue de Génissiat sont présentées figure 5.29). Deux cotes cibles sont envisagées, une cote à 308 m et une cote à 312 m. La retenue de Seyssel sera abaissée à partir de sa cote d'exploitation de 260 m à 255 m.



FIGURE 5.29 – Description des conditions aux limites envisagées pour la retenue de Génissiat pendant la chasse de 2016.

La condition à la limite amont sédimentaire est décrite à partir des concentrations à Pougny estimées par les SIG à partir d'une modélisation hydro-sédimentaire multiclasse de la chasse dans des retenues de Verbois et Chancy-Pougny. La masse entrant dans la retenue au cours de l'épisode a été estimée à $1,86 \times 10^6$ t. Néanmoins, les classes granulométriques utilisées pour le modèle des retenues de Verbois et Chancy-Pougny étaient différentes des classes utilisées dans le modèle ADIS-TS. Les concentrations ont été réparties entre les différentes classes (Tableau 5.22). Un seul diamètre de sédiments fins avait été utilisé pour les retenues de Verbois et Chancy-Pougny. La concentration correspondant a été répartie parmi l'argile et les limons à partir de la distribution observée en surface à Pougny lors de la phase de régulation de la chasse de 2012 (cf. Figure 4.18).

Diamètre SIG (µm)	Répartition par population dans ADIS-TS
	20% argile
35	50% limon fin
	30% limon grossier
100	100% sable très fin
200	100% sable fin
500	100% sable moyen
1700	non utilisé

TABLEAU 5.22 – Définition de la condition limite amont sédimentaire pour le modèle ADIS-TS en fonction des résultats du modèle des retenues de Verbois et Chancy-Pougny.

Pour chacune des cotes cibles envisagées pour la retenue de Génissiat, trois types de répartition du débit dans les vannes sont testés :

- tout le débit transite par la vanne de demi-fond,
- le débit est également réparti entre la vanne de demi-fond et la vanne de fond,
- tout le débit transite par la vanne de fond.

La comparaison des différentes simulations va permettre d'analyser l'impact de la gestion de la cote de la retenue et des débits transitant par les vannes sur les concentrations rejetées par le barrage et au niveau de Seyssel. En particulier, un scénario est jugé acceptable s'il permet de ne pas dépasser une concentration moyenne de 5 g/l à l'échelle de la chasse.

Pour chaque scénario, la masse transportée en aval du barrage de Génissiat est supérieure à la masse entrant à Pougny. L'abaissement de la retenue permet à la fois le transit des sédiments entrant et la remobilisation de sédiments en place (Tableau 5.23). Inversement, la masse à Seyssel est inférieure à la masse en sortie du barrage de Génissiat ce qui indique un dépôt dans la retenue, en particulier dans la fosse située à l'aval du barrage de Génissiat. Cette différence est d'autant plus importante que la masse en sortie du barrage de Génissiat est élevée, et que la proportion de sable est élevée.

L'abaissement à 308 m produit des fortes concentrations en aval du barrage de Génissiat et la concentration à Seyssel est supérieure au seuil réglementaire (Figure 5.30 a). L'abaissement à 312 m permet de limiter la concentration au barrage, et d'assurer une concentration plus proche de la limite réglementaire à Seyssel (Figure 5.30 b). A abaissement identique, les concentrations à l'aval du barrage de Génissiat et à Seyssel sont d'autant plus fortes que le débit passe par la vanne de fond.

Ainsi, un protocole de chasse impliquant une cote à 312 m semble acceptable du point de vue des contraintes de gestion de la CNR car il permet de faire transiter les sédiments provenant des retenues suisses et de remobiliser une partie des dépôts de la retenue de Génissiat, tout en limitant le dépôt dans la retenue de Seyssel. Néanmoins, une attention particulière devra être portée sur l'utilisation de la vanne de fond pour éviter de trop fortes concentrations en sédiments à Seyssel et limiter le dépôt des sables dans la retenue de Seyssel.



FIGURE 5.30 – Concentration simulées 1) en aval du barrage de Génissiat, 2) à Seyssel, en fonction de l'abaissement de la retenue : a) cote 308 m, b) cote 312 m et de la répartition du débit dans les vannes du barrage.

Coto giblo	Répartition de débit	Masse Géni	ssiat (10	0^{6} t)	Masse Seys	ssel $(10^6$	ⁱ t)
Cote cible	rtepartition de debit	argile, limon	sable	total	argile, limon	sable	total
	100% VDF	3,11	0,88	3,99	2,74	0,44	3,18
308 m	50%-50%	3,06	1,67	4,72	2,72	0,53	3,25
	100% VF	3,46	3,34	6,81	2,85	0,56	3,4
	100% VDF	1,83	0,28	2,11	1,75	0,25	1,99
312 m	50%-50%	1,77	0,57	2,34	1,70	0,38	2,07
	100% VF	2,03	1,13	3,16	1,90	0,51	2,41

TABLEAU 5.23 – Masses de sédiments transportées au barrage de Génissiat et à Seyssel estimées pour les différents scénarios envisagés pour la chasse de 2016.

Les évolutions morphologiques de la retenue permettent de mettre en évidence les zones de remobilisation et de dépôt dans la retenue en fonction de l'abaissement (Figure 5.31). En amont du PK 165,5, l'écoulement est libre pour les deux cotes et les deux scénarios donnent des évolutions équivalentes avec de l'érosion des tronçons du milieu de la retenue à dominante sableuse et du dépôt dans le tronçon en aval du PK 168. Dans le cas de l'abaissement le plus fort, les sédiments sont remobilisés jusqu'au PK 163, puis déposés dans le tronçon en amont de la vanne de fond où les profondeurs augmentent (Figure 5.31 a). Dans le cas de l'abaissement plus modéré, le dépôt a lieu à partir du PK 165,5.



FIGURE 5.31 – Évolutions morphologiques de la retenue de Génissiat simulées pour la chasse de 2016 avec une évacuation par la vanne de demi-fond : a) abaissement à 308 m, b) abaissement à 312 m.

5.8.2 Modélisation prédictive pour la gestion lors de crues

Lors de la crue de l'Arve et du Rhône de mai 2015, le protocole habituel a été appliqué pour la gestion de la retenue de Génissiat. La cote de la retenue a été remontée jusqu'à environ 331 m et une partie du débit a été évacué par l'évacuateur de surface (Figure 5.32). Néanmoins, on ne dispose pas des données concernant la répartition exacte des débits. On définit le débit non turbiné, c'est à dire évacué par les vannes comme la différence entre le débit réel et le débit maximal turbinable de 750 m³/s. La concentration en matières en suspension entrant dans la retenue est connue. La distribution granulométrique des matières en suspension est supposée similaire à la concentration mesurée en périodes d'interchasse (cf. Figure 4.14).



FIGURE 5.32 – Description des conditions aux limites pour la retenue de Génissiat pendant la crue de mai 2015 : a) cote au barrage, b) débit et concentration amont.

Plusieurs scénarios alternatifs de gestion de la retenue lors de la crue sont testés et comparés :

- scénario ${\bf 0}$: la cote au barrage est remontée à 331 m (cote mesurée), mais le débit non
- turbiné est évacué par l'évacuateur de surface. Ce scénario correspond a priori au cas réel, – **scénario 1** : la cote au barrage est remontée à 331 m , mais le débit non turbiné est évacué
- par la vanne de demi-fond,
- scénario 2 : la cote au barrage est remontée à 331 m , mais le débit non turbiné est évacué par la vanne de fond,
- scénario 3 : la cote au barrage est remontée à 328 m puis maintenue à cette altitude. Cette cote correspond au niveau minimal d'exploitation associé au débit de pointe de la crue mesuré à 1080 m³/s. Le débit non turbiné est évacué par la vanne de demi-fond,
- scénario 4 : la cote au barrage est remontée à 328 m puis maintenue à cette altitude et le débit non turbiné est évacué par la vanne de fond.

L'impact de ces différents types de gestion est caractérisé en comparant les concentrations dans les vannes et les masses rejetées par le barrage estimées pour les différents tests et ceux mesurés au cours de la crue.

L'application du module « barrage » (cf. paragraphe 5.3.3) donne une très faible concentration au niveau de l'évacuateur de surface. L'utilisation de l'évacuateur en crue permettrait a priori de diluer les eaux transférées par l'usine. En particulier, les scénarios basés sur la cote à 331 m montrent que la concentration dans l'usine et la vanne de demi-fond est supérieure à celle mesurée à Pyrimont, ce qui est en accord avec la probable dilution des eaux rejetées par l'usine par les eaux rejetées par l'évacuateur de surface (Figure 5.33 a). La concentration simulée dans la vanne de fond est légèrement plus élevée que celle simulée dans la vanne de demi-fond ou l'usine. Pour les scénarios 3 et 4 basés sur le maintien de la cote de la retenue à 328 m, les concentrations évacuées sont plus élevées que pour le scénario à cote 331 m et se rapprochent de la concentration en entrée (Figure 5.33 b).



FIGURE 5.33 – Concentration simulées au niveau des différents ouvrages du barrage et mesure en aval en fonction de la cote de la retenue : a) cote maintenue à 331 m (protocole réel) , b) cote maintenue à 328 m.

Le scénario 0 sensé représenter le cas réel donne la masse évacuée par le barrage la plus proche de celle mesurée à Pyrimont. Ce résultat montre que la somme des masses transportées au niveau de l'évacuateur et de l'usine simulée est réaliste par rapport aux mesures.

En ce qui concerne les scénarios alternatifs de gestion, on peut voir que le maintien de la retenue à la cote minimale d'exploitation associée au débit de pointe permet de faire transiter plus de sédiments par rapport à l'exploitation à cote haute (Tableau 5.24). La masse évacuée

est assez proche de la masse entrant à Pougny. Pour une cote donnée, l'utilisation de la vanne de fond ou la vanne de demi-fond ne permet pas d'augmenter de façon significative la masse transitant par le barrage. Ainsi, la gestion de la retenue à une cote plus basse qu'habituellement, tout en respectant la consigne d'exploitation permet de limiter la sédimentation dans la retenue de Génissiat. En particulier, l'impact de la remontée de la retenue à une cote plus haute sur l'amortissement du signal de crue en aval est limité.

Masse entrant			Masse sort	ant $(10^6 t)$		
$(10^6 t)$	mesure	scénario 0	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4
0,38	$0,27{\pm}0,06$	0,282	0,308	0,311	0,364	0,368

TABLEAU 5.24 – Estimation des masses évacuées par le barrage de Génissiat en fonction du mode de gestion à partir du scénario de la crue de 2015.

5.9 Conclusions sur la modélisation hydro-sédimentaire

Deux modèles numériques ont été construits, calés et validés à partir de mesures de terrain pour simuler les processus hydro-sédimentaires de la retenue. Le code ADIS-TS a été utilisé pour modéliser la propagation des sédiments fins en suspension dans les retenues de Génissiat et de Seyssel. Le code RUBARBE a été utilisé pour simuler le transport des sédiments grossiers dans la retenue de Génissiat et les évolutions morphologiques associées. L'application des modèles à de nombreux scénarios a permis de mettre en évidence les avantages et limites de la stratégie de modélisation et des modèles utilisés pour la simulation des processus hydro-sédimentaires de la retenue de Génissiat.

Ce chapitre sur la modélisation hydro-sédimentaire a montré l'importance des mesures de terrain pour la modélisation de la dynamique sédimentaire des retenues [Peteuil *et al.*, 2014]. D'une part, une description précise des conditions initiales et aux limites est importante. De nombreuses difficultés ont été rencontrées pour la construction des modèles à cause du manque de données hydro-sédimentaires, concernant par exemple les apports amont en sable ou la description de la granulométrie en place dans le tronçon fluvial. Ces lacunes ont nécessité la formulation d'hypothèses pour le remplacement des données manquantes qui se sont avérées difficiles à valider. De plus, la mesure détaillée des flux sédimentaires et des évolutions morphologiques dans la retenue, comme les mesures de concentration réalisées au cours des chasses de 1984 et 2000, s'est révélée très utile pour le calage et la validation des modèles.

Le modèle ADIS-TS des retenues de Génissiat et de Seyssel permet de reproduire correctement les masses de sédiments fins et de sables transportées au cours d'épisodes de chasse ou de périodes d'interchasse. L'application d'un modèle simplifié près du barrage basé sur un profil vertical de concentration exponentiel estimé à partir des résultats du modèle 1D permet de reproduire de façon réaliste la répartition des concentrations dans les différentes vannes du barrage. La modélisation multiclasse du transport des sédiments fins et des sables s'est avérée particulièrement adaptée pour reproduire la dynamique des différentes classes. En particulier, la distinction entre le limon fin et le limon grossier a été très utile. D'une part, elle a permis de mieux décrire la condition sédimentaire amont, car les limons grossiers n'ont été observés dans les prélèvements de surface que lors de la phase de régulation des chasses. D'autre part, il existe un facteur 10 environ entre les vitesses de chute de ces deux classes, ce qui affecte fortement leur dynamique. Ainsi, au cours de la phase de régulation de la chasse de 2012, le modèle a simulé le dépôt de tous les limons grossiers avant le barrage. La vitesse de chute impacte aussi le profil vertical de concentration le gradient est plus marqué pour les limons grossiers et la concentration en limon grossier estimée dans la vanne de fond est généralement supérieure à la concentration moyenne dans la section. La formulation multiclasse du modèle a permis de reproduire le dépôt sélectif des sédiments dans la retenue et le tri granulométrique observé.

Néanmoins, le modèle ne reproduit pas toujours correctement l'évolution des fonds associée au transport des sédiments fins et des sables, ce qui pourrait être liée au fait que la géométrie des fonds n'est pas mise à jour dans le modèle. Des problèmes de conservation de la masse ont été observées pour le modèle ADIS-TS lorsque le transport des sables est important. La validité pour les sables de la formulation mathématique utilisée dans le code ADIS-TS peut être remise en cause dans certains cas, d'une part parce qu'il surestime le dépôt des sables dans l'Étournel en cas d'apport et d'autre part parce que la propagation des sables est simulée par le modèle à la même vitesse que l'écoulement.

Le modèle RUBARBE de la retenue de Génissiat permet de reproduire de façon réaliste l'évolution des fonds associée au transport de sables dans la retenue amont de la retenue. Le modèle a confirmé que la suspension graduée était le mode de transport dominant des sables au cours des chasses. En particulier, une distance de chargement variable en fonction de l'hydraulique et du sédiment a du être utilisée. Les valeurs obtenues pour les sables en suspension sont assez élevées, de l'ordre de plusieurs fois la taille de la maille. Des tests comparatifs ont montré l'importance de la mise à jour de la géométrie des fonds ainsi que de la méthode de déformation des sections dans la partie sableuse pour simuler des évolutions réalistes.

La modélisation numérique n'a pas permis de comprendre précisément la dynamique de propagation des sables. En outre, le modèle ne parvient pas à reproduire correctement l'évolution des fonds au niveau du tronçon fluvial. L'hypothèse de la validité d'un modèle monodimensionnel pour simuler le transport des sédiments et les évolutions morphologiques au niveau des chenaux multiples de l'Étournel est remise en cause.

Enfin, le modèle ADIS-TS montre des capacités intéressantes pour la simulation de scénarios prédictifs. En particulier, l'utilisation du modèle pour simuler les protocoles envisagés pour les chasses du Haut-Rhône prévues en 2016 a permis d'émettre des réserves quand au scénario d'abaissement de la retenue à une cote de 308 qui produirait des concentrations trop élevées à Seyssel. Le modèle a aussi permis d'étudier un protocole de gestion alternatif au cours d'une crue. Le maintien de la retenue à la cote minimale autorisée par la courbe d'exploitation permet de favoriser le transit des sédiments et de limiter le dépôt par rapport à un protocole avec une remontée de la retenue. En revanche, l'utilisation de la vanne de fond pour l'évacuation du débit de crue ne semble pas avoir un impact important.

Conclusion générale et perspectives

Comme discuté en introduction, les retenues de forme allongée sont caractérisées par une dimension longitudinale prédominante. De forts gradients longitudinaux sont observés dans ces retenues. Elles peuvent être décomposées en trois biefs principaux dont les caractéristiques sont liées à la hauteur d'eau [Thornton *et al.*, 1981] :

- le tronçon fluvial, situé à l'amont, où le niveau au barrage a peu d'influence sur l'écoulement et les hauteurs d'eau sont faibles,
- la retenue amont, située en aval du tronçon fluvial est une zone de transition où les hauteurs d'eau sont influencées par le niveau au barrage,
- la retenue aval, située près du barrage, où les hauteurs d'eau sont importantes.

Ce travail de thèse consiste à caractériser les processus hydro-sédimentaires dominants des retenues de forme allongées. La retenue de Génissiat, située sur le Haut-Rhône et gérée par la Compagnie Nationale du Rhône a été choisie comme site d'étude. L'analyse s'est portée à la fois sur l'interprétation de données de terrain et sur la modélisation hydro-sédimentaire unidimensionnelle.

Bilan sédimentaire

Le comblement des retenues est une problématique importante pour les gestionnaires. L'accumulation des sédiments dans les retenues évolue généralement au cours du temps, avec un comblement important après la mise en opération et qui diminue au fil du temps. Le comblement de la retenue de Génissiat est estimé actuellement à environ 25% de sa capacité initiale. L'analyse du bilan de la retenue de Génissiat a montré que les événements de chasse étaient responsables de la moitié de son comblement, l'autre moitié étant attribuée à la sédimentation régulière au cours des périodes d'interchasse. Le comblement de la retenue a été fortement ralenti depuis la fin des années, pouvant s'expliquer par l'atteinte d'un état d'équilibre et la mise en place d'une phase préliminaire de remobilisation dans la retenue de Génissiat lors des opérations de chasses réalisées depuis 1997.

Le travail sur la retenue de Génissiat a permis de développer et d'appliquer des méthodes d'estimation du bilan sédimentaire des retenues de forme allongée. Ainsi, une méthode d'estimation des incertitudes associées au bilan bathymétrique calculé à partir de profils en travers a été proposée. La principale source d'incertitude dans l'estimation du bilan bathymétrique à partir de profils en travers est liée à la densité des profils utilisés pour décrire la retenue. Dans le cas de la retenue de Génissiat, la quantification des incertitudes liées au calcul du bilan bathymétrique a permis d'apprécier la représentativité de la description de la retenue par des profils en travers et du bilan calculé à partir de ces profils. En particulier, l'analyse a montré que les sections présentant souvent des incertitudes supérieures au volume calculé sont généralement assez éloignées des sections amont et aval (environ 300 m) et sont localisées au niveau de changements dans la dynamique sédimentaire. L'estimation des incertitudes a permis d'identifier des zones de la retenue où il serait nécessaire de densifier les relevés bathymétriques.

La mesure des flux de sédiments entrant et sortant des retenues est importante pour l'interprétation du bilan sédimentaire de la retenue. Les particularités de chaque mode de transport nécessitent le déploiement de méthodes de mesure différentes, qui permettent ainsi de distinguer le transport de différentes classes de sédiments. Une difficulté de cette thèse résidait dans le manque de données permettant d'interpréter quantitativement et qualitativement les flux sédimentaires. Ainsi, l'estimation du transport de sédiments fins en suspension à partir de la mesure de la turbidité de l'eau combinée à des mesures comparatives de concentration a été mise en place en 2014. La mesure de la turbidité est particulièrement sensible à la granulométrie transportée, qui varie notamment en fonction des conditions hydrologiques [Thollet *et al.*, 2013]. Pour les stations de Pougny et Pyrimont, des mesures simultanées de la granulométrie des sédiments transportés sont à envisager pour améliorer la relation entre la turbidité et la concentration en matières en suspension.

La mesure du transport par charriage nécessite à partir de prélèvements de fond est à l'heure actuelle lourde à mettre en oeuvre et très incertaine. Pour la retenue de Génissiat, les mesures actuelles sont très limitées et d'autres campagnes de mesure ponctuelles des flux de sable entrant doivent être déployées pour compléter les mesures existantes pour des conditions hydrauliques différentes, en particulier en crue ou en période de chasse quand les vannes du barrage de Chancy-Pougny sont ouvertes. Des méthodes alternatives de mesure du charriage, comme les mesures acoustiques sont actuellement en cours de développement. L'application des méthodes acoustiques au terrain nécessite une bonne connaissance de la méthode de mesure, qui passe par des études en laboratoire et aussi du site de mesure [Geay, 2013]. La mesure acoustique par hydrophone mise en place en amont de la retenue de Génissiat offre à l'heure actuelle des possibilités limitées. Une meilleure connaissance des processus de propagation des ondes acoustiques en place ainsi que l'acquisition de mesures comparatives permettrait de mieux définir les avantages et limites de cette méthode et aiderait à son amélioration.

Pour les périodes où la mesure n'est pas disponible, des méthodes de reconstruction des apports peuvent être utilisées. La reconstruction des concentrations en matières en suspension a été proposée pour plusieurs stations du Haut-Rhône. Pour les stations dont la dynamique sédimentaire est influencée par des retenues de barrage, les relations doivent inclure des paramètres supplémentaires pour prendre en compte les processus dans les retenues. La difficulté principale réside dans le choix de paramètres représentatifs. En particulier, l'évolution du comblement des retenues affecte les processus hydro-sédimentaires et la relation de reconstruction pourrait dépendre de leur état de comblement. Les résultats ont montré l'importance de disposer de chroniques longues et variées pour obtenir des relations robustes en terme de flux sédimentaires. De plus, la reconstruction s'est avérée peu satisfaisante pour reproduire les valeurs instantanées.

La comparaison entre le bilan bathymétrique et le bilan des masses entrant et sortant est une solution pour déterminer a posteriori la contribution des différentes classes de sédiments aux évolutions des retenues. Elle nécessite la conversion en masse du bilan bathymétrique exprimé en volume. Une des difficultés du calcul réside dans l'utilisation d'une masse volumique réaliste. En effet, les données concernant la masse volumique sont généralement limités dans le temps et l'espace et sont très incertaines. Dans le cas de la retenue de Génissiat, l'analyse n'a pas été très concluante à cause des fortes incertitudes de calcul. Ils ont tout de même montré que la contribution des sables au bilan bathymétrique est loin d'être négligeable lors des chasses.Verstraeten et Poesen [2000] suggèrent de réaliser régulièrement des mesures de la masse volumique des dépôts en place dans toute la retenue afin de prendre en compte la variation des propriétés des sédiments en place dans le temps et l'espace.

Dynamique sédimentaire

De part leur configuration, la dynamique des retenues de forme allongée est marquée par de fortes variations longitudinales. En se basant sur cette similarité avec les cours d'eau, l'analyse hydro-morphologique d'une retenue de forme allongée peut être réalisée en reprenant et en adaptant les principales étapes de l'analyse hydro-morphologique des cours d'eau.

Le découpage longitudinal en tronçons homogènes permet de mettre en évidence la dynamique spatiale de la retenue. Les découpages existants utilisés pour les cours d'eau n'étant pas très adaptés aux retenues, une méthode de découpage adaptée a été proposée. Cette méthode prend en compte la géométrie de la retenue, la variabilité des conditions hydrauliques observées et les évolutions morphologiques. L'utilisation de méthodes statistiques pour la détection de ruptures dans la dynamique spatiale des paramètres hydro-morphologique a permis de localiser plus précisément les changements de dynamique et d'obtenir une division en tronçons plus objective par rapport à l'analyse visuelle. Des découpages assez similaires ont été obtenus avec les deux méthodes. La retenue de Génissiat a été découpée en vingt tronçons caractérisées par des paramètres hydro-morphologiques qui varient peu ou de façon homogène le long du tronçon, ou correspondant à des unités morphologiques particulières comme des alternances seuils/mouilles.

La dynamique sédimentaire d'une retenue allongée peut être décrite à l'échelle du tronçon fluvial, de la retenue amont et de la retenue aval. Le tronçon fluvial est peu influencé par le remous du barrage. Il est caractérisé par une granulométrie grossière et le transport par charriage est le processus de transport dominant la dynamique sédimentaire. Pour la retenue de Génissiat, le tronçon fluvial est caractérisé par des apports en sédiments grossiers limités par la présence de barrages en amont. En conditions normales d'exploitation, le transport résiduel, l'incision à l'aval du barrage de Chancy-Pougny et les extractions de matériaux dans l'Étournel ont donné lieu à un armurage du fond. Une partie de ce tronçon se situe au niveau d'une zone alluviale qui présente de nombreux chenaux secondaires avec la formation de bancs et d'îles. La compréhension de la dynamique du tronçon fluvial de la retenue de Génissiat est limitée à l'heure actuelle, notamment en ce qui concerne la formation de la couche armurée et les conséquences des extractions de matériaux et des apports limités en sédiments grossiers.

La retenue amont est influencée par le remous du barrage. Le fond est composé de sables qui forment généralement un delta. Dans la retenue de Génissiat, on observe une transition brusque de la granulométrie de surface passant du sable au limon, et la présence de couches de sable en profondeur en aval. Un abaissement du niveau de la retenue suffisant pour rétablir un écoulement libre dans la retenue amont permet de remobiliser les sédiments en place. La modélisation numérique a montré que les sables sont plutôt transportés par suspension graduée, mais que le charriage peut jouer un rôle non négligeable lorsque les conditions hydrauliques sont moins favorables. La diminution de contrainte observée à l'entrée du tronçon donne lieu à un dépôt sélectif des sédiments en fonction de leur vitesse de chute et produit un affinement granulométrique par rapport au tronçon fluvial. La compréhension des processus associés à la propagation des sables dans la retenue et aux transitions gravier/sable et sable/limon est actuellement limitée. Smith et Ferguson [1995] ont suggéré que le contrôle du barrage sur la hauteur d'eau dans la retenue pouvait être à l'origine d'une transition de granulométrie graviers/sables. On peut penser que ce contrôle pourrait aussi expliquer la transition sable/limon observée plus en aval. Wilcock et Kenworthy [2002] estiment que le transport des différentes classes composant un mélange gravier/sable est affectée par la composition du mélange, notamment la proportion des sables, qui peut expliquer l'existence d'une transition granulométrique. De même genre les interactions entre le transport des sables et des limons pourraient aussi expliquer la transition sable/limon observée plus en aval.

La retenue aval est généralement impactée par le dépôt des sédiments fins, en particulier à l'approche du barrage. Dans la retenue de Génissiat, de fines couches de sables alternées avec des couches de sédiments plus fins ont été observées au niveau de la retenue aval. Néanmoins, les données n'ont pas permis de juger de la représentativité de ces dépôts et la compréhension de ce processus est actuellement limitée. Près des barrages, de fortes profondeurs d'eau sont généralement atteintes et un gradient de concentration marqué peut être observé entre le fond

et la surface, causé par le transport d'un courant de densité ou par l'établissement d'un profil vertical de concentration en matières en suspension. Dans la retenue de Génissiat, aucun courant de densité n'a été observé et les dépôts de sédiments fins dans la retenue amont sont attribués au transport par suspension de lessivage. La construction d'évacuateurs à différentes altitudes permet d'opérer une dilution des eaux rejetés par les évacuateurs de fond par les évacuateur situés près de la surface et donc de contrôle la qualité de l'eau rejetée en aval. La conception du barrage de Génissiat avec des évacuateurs situés à trois altitudes différentes : au fond, à mi hauteur et en surface permet un contrôle aisé de la qualité des eaux rejetés et s'inscrit comme un exemple à suivre pour la construction de nouveaux aménagements [Fruchart et Camenen, 2012; Peteuil *et al.*, 2013].

Modélisation des processus-hydro-sédimentaire

La modélisation hydro-sédimentaire de la retenue de Génissiat a montré qu'une approche unidimensionnelle était suffisante pour modéliser les processus dans la partie située dans les gorges. L'utilisation d'un modèle simplifié basé sur un profil de concentration vertical théorique permet de reproduire de façon réaliste le gradient de concentration dans les vannes du barrage. Pour les tronçons présentant une géométrie complexe, des modèles peuvent être développés localement afin d'améliorer la compréhension des processus. La modélisation bi-dimensionelle près du barrage de Génissiat a donné des premiers résultats intéressants [Duron, 2014] et le développement du modèle tri-dimensionnel mérite d'être poursuivi afin de mieux décrire les processus près des vannes. Une modélisation bi-dimensionnelle de la zone de l'Étournel pourrait permettre de mieux reproduire les évolutions morphologiques au niveau des chenaux multiples.

La stratégie choisie pour la modélisation hydro-sédimentaire de la retenue de Génissiat est l'utilisation de deux modèles numériques pour les sédiments fins et les sédiments grossiers respectivement, basées sur des formulations mathématiques du transport différentes.

Le code ADIS-TS a été utilisé pour simuler la propagation de plusieurs classes de sédiments fins et de sables en suspension dans les retenues de Génissiat et de Seyssel. Il a permis de reproduire le dépôt sélectif des sédiments lié à la diminution des contraintes. En outre, la simulation de façon indépendante de la dynamique des différentes classes a donnée des résultats réalistes en terme de flux. Mais ceci pourrait expliquer la difficulté du modèle à décrire les processus à l'origine de la transition sable/limon. Un module additionnel « barrage » basé sur le profil vertical exponentiel de concentration combiné au modèle ADIS-TS utilisé à proximité du barrage a permis de reproduire de façon réaliste le gradient de concentration et de granulométrie observé dans les vannes du barrage de Génissiat et d'améliorer la prédiction des flux sortant.

Le code RUBARBE a été utilisé pour simuler le transport des sédiments grossiers dans la retenue. Il est basé sur une loi de conservation de la masse et le calcul de la capacité de transport des sédiments. Le modèle a permis de reproduire les évolutions des tronçons de la retenue amont qui sont liées au transport de sables lors d'opérations de chasse. La prise en compte de l'évolution des fonds semble importante lorsqu'il s'agit de simuler les évolutions morphologiques liées au transport des sables dans la retenue amont lors d'opérations de chasse. Pour les sables, des dynamiques très différentes sont simulées par les modèles. En particulier, le modèle ADIS-TS propage les sédiments à la vitesse de l'écoulement, ce qui n'est pas réaliste si on considère le transport des sables par suspension graduée pour laquelle il existe de nombreux échanges avec le fond limitant leur vitesse de propagation, ce qui aurait ainsi tendance à surestimer la propagation des sables dans la partie aval. Dans le cas d'une modélisation moyennée sur la verticale du transport par suspension graduée et pour obtenir une propagation des sédiments plus réaliste, Huybrechts *et al.* [2010] ont proposé de corriger la vitesse de propagation par rapport à la vitesse moyenne en fonction de la forme du profil vertical de concentration, en particulier du paramètre de Rouse. Le modèle RUBARBE simule des temps de propagation des

sables beaucoup plus longs, et pourrait avoir tendance à surestimer les échanges avec le fond. Ces comparaisons soulèvent des questions concernant la simulation de la dynamique des sables.

Différents scénarios prédictifs ont été simulés à partir des modèles développés dans ce travail de thèse et permettent, en complément des connaissances expertes des gestionnaires, une quantification des différents scénarios de gestion et une inter-comparaison plus aisée de leurs impacts. Les modèles numériques développés au cours de la thèse vont être transférés à la CNR et seront principalement utilisés pour réaliser d'autres simulations prédictives.

Afin d'obtenir une modélisation réaliste de la dynamique sédimentaire d'une retenue allongée, il est nécessaire de disposer de mesures de terrain pour la construction, le calage et la validation des modèles [Peteuil et al., 2014]. En l'absence de mesures, la modélisation du transport des sables dans la retenue de Génissiat a notamment nécessité de formuler des hypothèses quant aux apports de sables dans la retenue qui n'ont pas pu être vérifiées. En outre, la description de la granulométrie du fond parfois limitée comme au niveau du tronçon fluvial a compliqué la construction du modèle et a nécessité une estimation de la granulométrie en place à partir de considérations hydrodynamiques difficiles à vérifier. L'utilisation de chroniques de concentrations en matières en suspension reconstruites peu réalistes en condition sédimentaire amont impacte les résultats du modèle. Ainsi, il est important de poursuivre les campagnes de reconnaissance granulométrique dans la retenue, notamment dans la zone de l'Étournel qui est peu décrite actuellement et qui présente une dynamique complexe qui pourrait entraîner une répartition spatiale de la granulométrie particulière. Plusieurs types de mesures mériteraient d'être déployées au cours de la prochaine opération de chasse prévue en 2016. La mesure des apports en sable est importante pour la définition des conditions aux limites des modèles. Des mesures de concentration en MES à des stations intermédiaires seraient aussi particulièrement utiles pour décrire la dynamique du transport et pourraient servir au calage des modèles hydrosédimentaires.

De nombreuses perspectives d'évolutions des modèles sont de plus envisagées.

A court terme, il s'agit d'implémenter le module « barrage » dans le code ADIS-TS. Cette amélioration nécessite de pouvoir prendre en compte les ouvrages dans le code ainsi que le bilan sédimentaire résultant de l'évacuation par les vannes de concentrations différentes de la concentration moyenne. L'intégration du modèle ADIS-TS des retenues de Génissiat et Seyssel dans le modèle hydro-sédimentaire du Haut-Rhône développé dans le cadre de l'OSR est aussi en cours [Andries *et al.*, 2012; Dugué *et al.*, 2015]. Le travail de calage des paramètres sédimentaires du modèle pourra servir de base pour le calage du reste du modèle.

La prise en compte de l'évolution des fonds dans le modèle ADIS-TS permettrait aussi d'obtenir des résultats plus réalistes pour des scénarios où les évolutions sont marquées comme les opérations de chasse ou les simulations de longues périodes. Néanmoins, la rapidité de calcul est un des avantages actuels du code ADIS-TS et la mise à jour de la géométrie des fonds est très coûteuse en temps de calculs. Afin de conserver cet avantage, une stratégie concernant la mise à jour de la géométrie doit être définie. La mise à jour pourrait être réalisée à intervalles de temps réguliers choisis par l'utilisateur comme c'est le cas pour le code COURLIS développé par le LNHE [Bertier, 2004], ou lorsque la variation de la masse dans la section dépasse une valeur, considérée comme la limite à partir de laquelle la variation de géométrie a un effet significatif sur l'hydrodynamique. En outre, il peut être envisagé de modifier la structure du code de façon à représenter le stock sédimentaire à partir de plusieurs couches. L'intégration d'une formule permettant de prendre en compte l'évolution de la composition de la couche active à partir par exemple du modèle d'Hirano [1972] pourrait permettre de simuler l'augmentation de la granulométrie des sédiments en place au cours du temps, plus réaliste sur le long terme.

Afin de modéliser l'envasement de la retenue sur le long terme, il serait aussi nécessaire de définir des conditions aux limites simplifiées représentatives des conditions aux limites réelles. En effet, pour la modélisation d'événements passés, les données ne sont pas toujours disponibles,

et pour les modélisations prédictives, il est nécessaire de définir un scénario. Comme pour les autres aménagements du Rhône, un modèle basé sur les règles d'exploitation et simulant de manière automatique le fonctionnement du barrage de Génissiat est en cours de développement [Dugué *et al.*, 2015]. Pour la simulation de longues périodes ou de longs tronçons du Rhône, il pourrait aussi être envisagé de simplifier la géométrie de la retenue comme ce qui a été proposé par Latapie [2011] pour la modélisation de la Loire Moyenne.

Le développement d'un modèle unique permettant de simuler le transport des sédiments fins et des sédiments grossiers est envisagé dans le cadre de l'OSR. Ce modèle serait basé sur un système multiclasse construit par exemple à partir du modèle ADIS-TS permettant de simuler la dynamique de différentes populations, le transport des sédiments plus fins serait simulé par l'advection-dispersion et le transport des sédiments plus grossiers serait simulé par la conservation de la masse de sédiments et une loi de capacité de transport. L'utilisation de deux formulations différentes nécessite de définir un diamètre limite pour le passage d'une formulation à une autre.

Bibliographie

- ABRAHAM, J., ALLEN, P. M., DUNBAR, J. A. et DWORKIN, S. I. (1999). Sediment type distribution in reservoirs : sediment source versus morphometry. *Environmental Geology*, 38(2):101– 110.
- ACKERS, P. et THOMPSON, G. (1987). Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers, chapitre Reservoir Sedimentation and Influence of Flushing, pages 845–868. John Wiley and Sons.
- ALBAYATI, M. M. A. (2014). Modeling Sediment Accumulation at Kenyir Reservoir Using GSTARS3. International Journal of Computational Engineering Research, 4(10):48–58.
- ALBER, A. et PIÉGAY, H. (2011). Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale : Application to the Rhône basin (France). *Geomorphology*, 125(3):343–360.
- ANDRIES, E., CAMENEN, B., FAURE, J., LE COZ, J. et LAUNAY, M. (2012). Modélisation hydrosédimentaire du Rhône à l'aide des modèles numériques Mage et Adis-TS. Rapport OSR. 76 p.
- ANNANDALE, G. W. (1987). Reservoir sedimentation. Elsevier 221 p.
- ANTOINE, G., BESNIER, A. L., JODEAU, M., CAMENEN, B. et ESTÈVES, M. (2014). Numerical modelling of suspended sediment transport during dam flushing : from reservoir dynamic to downstream propagation. In Reservoir Sedimentation, Proceedings of the 7th International Conference on fluvial hydraulics River Flow 2014 3-5 Septembre 2014, Lausanne, Suisse, pages 175–184.
- ANTOINE, G., JODEAU, M., CAMENEN, B., ESTÈVES, M., NÉMERY, J. et LAUTERS, F. (2013). Estimation des flux de matières en suspension lors des chasses hydrauliques de l'Arc de 2006 et 2011. La Houille Blanche, 4:43–49.
- ARCEMENT, G. et SCHNEIDER, V. (1989). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. US Geological Survey, Water-Supply, paper 2339-38 p.
- ARMANINI, A. (1995). Non-uniform sediment transport : dynamics of the active layer. *Journal* of Hydraulic Research, 33(5):611–622.
- ARMANINI, A. et DI SILVIO, G. (1988). A one dimensional model for the transport of a sediment mixture in non equilibrium conditions. *Journal of Hydraulic Research*, 26(3):275–292.
- ARTELIA (2014). Étude courantologique Génissiat : effets des dragages préventifs sur la turbidité transitant par la vanne de demi-fond. Rapport, Artelia 17 p.
- ASSELMAN, N. E. M. (2000). Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*, 234(3):228–248.
- ATKINSON, E. (1996). The feasibility of flushing sediment from reservoirs. Rapport, HR Wallingford 99 p.
- BAGNOLD, R. (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics. US Geological Survey, Professional Paper 422.
- BAILEY, K. D. (1994). Typologies and taxonomies : an introduction to classification techniques. Sage.
- BALAYN, P. (2001). Contribution à la modélisation numérique de l'évolution morphologique des cours d'eau aménagés lors de crues. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon. 137 p.
- Barré de SAINT-VENANT, A. J. C. (1871). Théorie et équations générales du mouvement non permanent des eaux courantes. *Comptes Rendus des séances de l'académie des Sciences*, 73:147–154.
- BARTON, J. S., SLINGERLAND, R. L., PITTMAN, S. et GABRIELSON, T. B. (2010). Monitoring coarse bedload transport with passive acoustic instrumentation. US Geological Survey Sci. Invest. Rep, 5091.
- BERAUD, C. (2012). Modélisation numérique des impacts de recharges sédimentaires en rivière aménagée. Cas du Vieux-Rhin entre Kembs et Breisach. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon. 278 p.
- BERLAMONT, J., OCKENDEN, M., TOORMAN, E. et WINTERWERP, J. (1993). The characterisation of cohesive sediment properties. *Coastal Engineering*, 21(1):105–128.
- BERTIER, C. (2004). COURLIS 4.0 Note de Principe Notice d'utilisation. EDF CETMEF.
- BESSENASSE, M., KETTAB, A. et PAQUIER, A. (2004). Modélisation bidimensionnelle du dépôt de sédiments dans un barrage en Algérie. La Houille Blanche, 1:31–36.
- BORLAND, W. et MILLER, C. (1960). Distribution of sediment in large reservoirs. Transactions-American Society of Civil Engineers, 125(3019):166–180.
- BOUCHARD, J. et DUMOND, L. (2000). Barrage de Génissiat : Exploitation des résultats de la campagne de carottages. Rapport, EDF.
- BOUCHARD, J., DUMOND, L. et POIREL, A. (1999). Étude préliminaire à la vidange du barrage de Génissiat. Rapport EDF.
- BOUGACHA, S. et TASSOULAS, J. L. (1991). Seismic response of gravity dams. II : Effects of sediments. *Journal of Engineering Mechanics*, 117(8):1839–1850.
- BOUSSAFEUR, K. (2012). Contribution à l'analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire de la retenue de Génissiat. Mémoire de D.E.A., Grenoble INP ENSE³.
- BRANDT, S. A. (1999). Reservoir desiltation by means of hydraulic flushing : sedimentological and geomorphological effects in reservoirs and downstream reaches as illustrated by the Cachí Reservoir and the Reventazón River, Costa Rica. Thèse de doctorat, Institut de Géographie, Université de Copenhague, Danemark.
- BRASINGTON, J., RUMSBY, B. T. et MCVEY, R. A. (2000). Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey. *Earth* Surface Processes and Landforms, 25(4):973–990.
- BRAVARD, J. P. (1987). Le Rhône : du Léman à Lyon. La Manufacture.
- BROWN, C. B. (1944). The control of reservoir silting. Washington D.C. : U.S. Dept. of Agriculture.

- BRUNE, G. M. (1953). Trap efficiency of reservoirs. Eos, Transactions American Geophysical Union, 34(3):407–418.
- BRUNNER, G. W. (1995). *HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 1.0.* US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA 143 p.
- CAMENEN, B. (2007). Simple and general formula for the settling velocity of particles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2):229–233.
- CAMENEN, B. (2012). Mesure in Situ de la dynamique sédimentaire des cours d'eau : Outils et méthodes. Rapport, Irstea, Agence de l'eau Rhône Méditérannée Corse 72 p.
- CAMENEN, B., ANDRIES, E., FAURE, J., de LINARES, M., GANDILHON, F. et RACCASI, G. (2013). Experimental and numerical study of long term sedimentation in a secondary channel : example of the Beurre island on the Rhône River, France. In Proceedings of the 12th International Symposium on River Sedimentation (ISRS 2013), 2-5 Septembre, 2013, Kyoto, Japon, 8p.
- CAMENEN, B., HOLUBOVA, K., LUKAČ, M., LE COZ, J. et PAQUIER, A. (2011). Assessment of methods used in 1D models for computing bed-load transport in a large river : the Danube River in Slovakia. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(10):1190–1199.
- CAMENEN, B. et LARSON, M. (2007). A total load formula for the nearshore. In Proceedings Coastal Sediments (Vol. 7), numéro ERDC/CHL-CR-07-1, pages 56–67.
- CARLING, P. (1988). The concept of dominant discharge applied to two gravel-bed streams in relation to channel stability thresholds. *Earth Surface Processes and Landforms*, 13(4):355–367.
- CHANG, H. (1984). Modeling of river channel changes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(2):157–172.
- CHANSON, H. (1998). Extreme reservoir sedimentation in Australia : a review. International Journal of Sediment Research, 13(3):55–63.
- CHENG, N. S. (1997). Simplified settling velocity formula for sediment particle. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(2):149–152.
- CHUNG, S. W., KO, I. H. et KIM, Y. K. (2008). Effect of reservoir flushing on downstream river water quality. *Journal of environmental management*, 86(1):139–147.
- CNR (1934). Dossier C Ouvrages d'évacuation des crues. 6 p.
- CNR (1981). Haut-Rhône : section Pont Carnot Usine de Chancy-Pougny Étude géologique et hydrologique. Rapport technique, CNR 12 p.
- CNR (1984). Rapport chasses 1984 : 12/18 juin 1984. Rapport technique, CNR 56 p.
- CNR (1987). Rapport sur les chasses franco-suisses de juin 1987. Rapport technique, CNR 34 p.
- CNR (1990). Rapport : vidange des retenues de Verbois et Chancy-Pougny juin 1990 Chasses du Haut-Rhône. Rapport technique, CNR 52 p.
- CNR (1993). Vidande des retenues de Verbois et Chancy-Pougny juin 1993 transit des matériaux sur le Rhône français. Rapport technique, CNR 100 p.

- CNR (1998). Chasses franco-suisses du Haut-Rhône, Campagne 1997, dossier de synthèse. Rapport technique, CNR Direction de l'Exploitation 38 p.
- CNR (2000). Opérations d'accompagnement sur les aménagements français du Haut-Rhône des chasses de la retenue de Verbois- Campagne 2000- Rapport de synthèse. Rapport, CNR, Direction de l'Ingénierie Technique 44 p.
- CNR (2003). Opérations d'accompagnement sur les aménagements CNR du Haut-Rhône des chasses des retenues suisse de Verbois et franco-suisse de Chancy-Pougny, Campagne 2003, rapport de synthèse. Rapport, CNR, Direction de l'Ingénierie Technique 51 p.
- CNR (2010). Mesures d'accompagnement des chasses suisses 2012, Étude d'impact environnementale. Rapport, CNR, Direction Régionale de Belley 209 p.
- CNR (2014). Comité technique franco-suisse sur la gestion sédimentaire du Rhône genevois et du Haut-Rhône Français. Rapport DR-B 13-0764d 294 p.
- COHEN, M. et BRIOD, P. (1989). Les apports solides de l'Arve dans le Rhône genevois. La Houille Blanche, 3-4:301–305.
- COLE, T. M. et WELLS, S. A. (2003). *CE-QUAL-W2 : A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 3.1.* Instruction Report EL-03-1, US Army Engineering and Research Development Center, Vicksburg, MS 630 p.
- COMITÉ TECHNIQUE DE L'EAU (1978). Compte-rendu des opérations de chasses de Verbois, de Chancy-Pougny et de Génissiat en juin 1978. Rapport technique, Comité technique de l'eau 7 p.
- CONSEIL D'ÉTAT DE LA RÉPUBLIQUE ET CANTON DE GENÉVE (1999). Règlement d'application de la concession de la force motrice hydraulique du Rhône pour l'exploitation de l'usine hydroélectrique de Verbois, 5 p.
- CROSA, G., CASTELLI, E., GENTILI, G. et ESPA, P. (2010). Effects of suspended sediments from reservoir flushing on fish and macroinvertebrates in an alpine stream. *Aquatic sciences*, 72(1):85–95.
- DE CEBALLOS, B. S. O., KÖNIG, A. et DE OLIVEIRA, J. F. (1998). Dam reservoir eutrophication : a simplified technique for a fast diagnosis of environmental degradation. *Water Research*, 32(11):3477–3483.
- DE CESARE, G. (1998). Alluvionnement des retenues par courants de turbidité. Thèse de doctorat, École polytechnique Fédérale de Lausanne 275 p.
- DE VRIES, M. (1973). On measuring discharge and sediment transport in river flow. In Technical Report 106. Delft Hydraulics Lab., The Netherlands.
- DÉPARTEMENT FÉDÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT, DES TRANSPORTS, DE L'ÉNERGIE ET DE LA COMMUNICATION (2003). Concession pour l'exploitation de la force hydraulique du Rhône à Chancy-Pougny. 22 p.
- DI SILVIO, G. (1990). Modeling desiltation of reservoirs by bottom-outlet flushing. In Movable Bed Physical Models, pages 159–171. Springer Netherlands.
- DI SILVIO, G. (2001). Basic classification of reservoir according to relevant sedimentation processes. In 29th IAHR World Congress, Bejing, Chine, pages 285–293.
- DIETRICH, W. E. (1982). Settling velocity of natural particles. *Water Resources Research*, 18(6):1615–1626.

- DIOUF, S. (2013). Vidange-chasse des retenues de Verbois et de Chancy-Pougny Campagne 2012 Tome 1 : Bilan hydraulique et sédimentaire. Rapport technique, Services Industriels Genevois, Société des Forces Motrices de Chancy-Pougny 45 p.
- DIOUF, S., NAWRATIL DE BONO, C. et SIDLER, D. (2010). Barrage de Verbois Vidange et chasse 2012- Dossier de demande d'autorisation. SIG 184 p.
- DUGUÉ, V., WALTER, C., ANDRIES, E., LAUNAY, M., LE COZ, J., CAMENEN, B. et FAURE, J. B. (2015). Accounting for hydropower schemes operation rules in the 1D hydrodynamic modeling of the Rhône River from Lake Geneva to the Mediterranean Sea. In 36th IAHR World Congress, 28 Juin- 3 Juillet, La Haye, Pays-Bas. 8p.
- DUMOND, L. (2001). Barrage de Génissiat : simulation de la chasse de 2000 et de la vidange de 1978, préparation de la vidange de 2002. Rapport technique, EDF 54 p.
- DURON, L. (2014). Modélisation bidimensionnelle et tridimensionnelle des écoulements à l'amont du barrage de Génissiat. Mémoire de D.E.A., Grenoble INP ENSE³ 60 p.
- EDF (1954). Rapport sur la retenue de Génissiat : mesures effectuées du 21 au 30 juin 1954. Rapport technique, EDF 16 p.
- EHRENBERGER, R. (1931). Direct bedload measurements on the Danube at Vienna, and their results to date [Direkte geschiebemessungen an der Donau bei Wien und deren bisherige ergebnisse] (In German). *Die Wasserwirtschaft*, 34:1–19.
- EL KADI ABDERREZZAK, K. et PAQUIER, A. (2009). One-dimensional numerical modeling of sediment transport and bed deformation in open channels. *Water Resources Research*, 45(5):20p.
- ELDER, J. W. (1959). The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow. Journal of fluid mechanics, 5(4):544–560.
- EMMETT, W. W. (1980). A field calibration of the sediment trapping characteristics of the Helley-Smith bed load sampler, Professional Paper 1139. U.S. Geological Survey, Washington, USA 44 p.
- ENGELUND, F. et HANSEN, E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Forlag Copenhagen, Denmark, 62 p.
- ÉTABLISSEMENT NEYRPIC, BOYER, CUYL et BARANCER (1951). Supplément graphique : Seyssel. La Houille Blanche, 5:783–790.
- FAN, J. et MORRIS, G. L. (1992a). Reservoir sedimentation. I : Delta and density current deposits. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(3):354–369.
- FAN, J. et MORRIS, G. L. (1992b). Reservoir sedimentation. II : reservoir desiltation and long term storage capacity. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(3):370–384.
- FANG, H. W. et RODI, W. (2003). Three-dimensional calculations of flow and suspended sediment transport in the neighborhood of the dam for the Three Gorges Project (TGP) reservoir in the Yangtze River. Journal of Hydraulic Research, 41(4):379–394.
- FAURE, J. B. (2012). MAGE : Documentation théorique et notice d'emploi. Irstea 179 p.
- FAURE, J. B. (2013). Documents de conception et d'utilisation de Adis-TS. Irstea 20 p.
- FISHER, H. B., LIST, E., KOH, R. C. Y., IMBERGER, J. et BROOKS, N. H. (1979). Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic, New York 483 p.

FLUENT, I. N. C. (2006). Fluent 6.3 Users Guide. Fluent documentation.

- FRUCHART, F. et CAMENEN, B. (2012). Reservoir sedimentation : different type of flushing -friendly flushing example of Genissiat dam flushing. In ICOLD International Symposium on Dams for a changing world, Juin 2012, Kyoto, Japon, page 6 p.
- FULLER, I. C., LARGE, A. R. G., CHARLTON, E. M., HERITAGE, G. L. et MILAN, D. J. (2003). Reach-scale sediment transferts : an evaluation of two morphological budgeting approaches. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28:889–903.
- GATTO, L. W. et DOE III, W. W. (1987). Bank conditions and erosion along selected reservoirs. Environmental Geology and Water Sciences, 9(3):143–154.
- GEAY, T. (2013). Rhône à Pougny- Rapport préliminaire. Rapport OSR 11 p.
- GEAY, T. (2014). Mesure acoustique passive du transport par charriage dans les rivières. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble 163 p.
- GIBSON, S. A. et BOYD, P. (2014). Modeling long term alternatives for sustainable sediment management using operational sediment transport rules. In Reservoir Sedimentation, Proceedings of the 7th International Conference on fluvial hydraulics River Flow 2014 3-5 Septembre 2014, Lausanne, Suisse, pages 229–236.
- GIGNOUX, M. et MATHIAN, J. (1952). Les enseignements géologiques du grand barrage de Génissiat sur le Rhône (Ain-Haute-Savoie) : Karstification éocène de l'urgonien, quaternaire rhodanien. Imprimerie Allier.
- GINOCCHIO, R. et VIOLLET, P. L. (2012). L'énergie hydraulique. Lavoisier 636 p.
- GIPPEL, C. J. (1995). Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. *Hydrological Processes*, 9(1):83–97.
- GIREL, J. et DOCHE, B. (1983). Influence des activités humaines sur la genèse, l'évolution et la disparition de groupements végétaux alluviaux. (Exemple du site de l'Étournel, dans la vallée du Haut-Rhône entre Bellegarde et Genève). *Revue de géographie alpine*, 71(4):343–351.
- GIULIANI, Y. (1992). Essais géotechniques sur les sédiments de la retenue de Génissiat. Rapport technique, CNR.
- GOUDIE, A. (2003). *Geomorphological techniques*. Routledge 592 p.
- GOULD, H. R. (1951). Some quantitative aspects of Lake Mead turbidity currents. In Society of Ecomonic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, numéro 2, pages 34–52.
- GRAF, W. H. (1984). Storage losses in reservoirs. International water power & dam construction, 36(4):37–40.
- GRENIER, W. (1897). Les installations hydrauliques de l'usine électrique de Chèvres (Canton de Genève). Bulletin de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes, 3:17–21.
- HAN, Q. (1980). A study on the non-equilibrium transportation of suspended load. In Proceedings of the 1st International Symposium on River Sedimentation, Beijing, Chine, pages 793–802.
- HARB, G., DORFMANN, C., SCHNEIDER, J., HAUN, S. et BADURA, H. (2012). Numerical analysis of sediment transport processes in a reservoir. In Proceedings of the 6th International Conference on fluvial Hydraulics, 5-7 Septembre 2012, San Jose, Costa Rica, pages 859–867.

- HAREGEWEYN, N.and Poesen, J., NYSSEN, J., DE WIT, J., HAILE, M., GOVERS, G. et DECKERS, S. (2003). Reservoirs in Tigray (Northern Ethiopia) : characteristics and sediment deposition problems. Land degradation & development, 17(2):211–230.
- HARMEL, R. D., COOPER, R., SLADE, R., HANEY, R. et ARNOLD, J. (2006). Cumulative uncertainty in measured streamflow and water quality data for small watersheds. *Transactions-American Society of Agricultural Engineers*, 49(3):689–701.
- HAUN, S., OLSEN, N. R. B., RODRÍGUEZ MEZA, C. R. et LIZANO, L. (2012). 3D numerical simulation of the flushing process in the Angostura Reservoir. In Proceedings of the 6th International Conference on fluvial Hydraulics, 5-7 Septembre 2012, San Jose, Costa Rica, pages 867–871.
- HEINEMANN, H. et DVORAK, V. (1963). Improved volumetric survey and computation procedures for small reservoirs. In USDA, M. P., éditeur : Proceedings of the Federal Inter agency Sedimentation Conference, volume 970, pages 845–856.
- HELLEY, E. J. et SMITH, W. (1971). Development and calibration of a pressure difference bed load sampler. Rapport, U. S. Geological Survey 18 p.
- HERVOUET, J. M. (2000). Telemac modelling system : an overview. *Hydrological Processes*, 14(13):2209–2210.
- HIRANO, M. (1972). Studies on variation and equilibrium state of a river bed composed of nonuniform material. *Trans. Jpn. Soc. Civ. Eng*, 4:128–129.
- HOLLY JR, F. M. et RAHUEL, J. L. (1990). New numerical/physical framework for mobile-bed modelling : Part 2 : Test applications. *Journal of Hydraulic Research*, 28(5):545–564.
- HOROWITZ, A. (2003). An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. *Hydrological Processes*, 17(17):3387– 3409.
- HOROWITZ, A. J. (2008). Determining annual suspended sediment and sediment-associated trace element and nutrient fluxes. *Science of the Total Environment*, 400(1):315–343.
- HU, B and Yang, Z., WANG, H., SUN, X., BI, N. et LI, G. (2009). Sedimentation in the Three Gorges Dam and the future trend of Changjiang (Yangtze River) sediment flux to the sea. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(11):2253–2264.
- HUBBELL, D. W. (1987). Bed load sampling and analysis. In Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers, pages 89–118. John Wiley and Sons New York.
- HUNZIKER, R. P. et JAEGGI, M. N. R. (2002). Grain sorting processes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(12):1060–1068.
- HUYBRECHTS, N., VILLARET, C. et HERVOUET, J. M. (2010). Comparison between 2D and 3D modelling of sediment transport : application to the dune evolution. In Proceedings of the 5th International Conference on fluvial Hydraulics, 8-10 Septembre 2010, Braunschweig, Allemagne. 7 p.
- IKEDA, S. (1982). Incipient motion of sand particles on side slopes. Journal of the Hydraulic Division, 108(1):95–114.
- INTROÏNI, S. (2000). Retenue de Génissiat : Campagne de reconnaissance des sédiments effectuée en septembre 1999. Rapport technique, EDF 64 p.

- ISO-13320 (2009). Analyse granulométrique- Méthodes par diffraction laser- Principes généraux.
- ISO EN 748 (1997). Measurement of liquid flow in open channels velocity-area methods.
- IWASA, Y. et AYA, S. (1991). Predicting longitudinal dispersion coefficient in open-channel flows. In Proceedings of International Symposium on Environmental Hydraulics, Hong Kong, pages 505–510.
- JOHNSON, P. et MUIR, T. C. (1969). Acoustic detection of sediment movement. Journal of Hydraulic Research, 7(4):519–540.
- JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (1995). Guide to the expression of uncertainty in measurement-Evaluation of measurement data. BIPM 132 p.
- KANTOUSH, S. A. (2008). Experimental study on the influence of the geometry of shallow reservoirs on flow patterns and sedimentation by suspended sediments. Thèse de doctorat, École Polytechnique fédérale de Lausanne 542 p.
- KASSEM, A. A. et CHAUDHRY, M. H. (1998). Comparison of coupled and semicoupled numerical models for alluvial channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(8):794–802.
- KHODASHENAS, S. R. et PAQUIER, A. (1999). A geometrical method for computing the distribution of boundary shear stress across irregular straight open channels. *Journal of Hydraulic Research*, 37(3):381–388.
- KING, K. W. et HARMEL, R. D. (2003). Considerations in selecting a water quality sampling strategy. *Transactions-American Society of Agricultural Engineers*, 46(1):63–73.
- KONDOLF, G. M. (1997). Hungry water : effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental management*, 21(4):533–551.
- KONDOLF, G. M., GAO, Y., ANNANDALE, G. W., MORRIS, G. L., JIANG, E., ZHANG, J., CAO, Y., CARLING, P., FU, K., GUO, Q., HOTCHKISS, R., PETEUIL, C., SUMI, T., W., W. H., WANG, Z., WEI, Z., WU, B., WU, C. et YANG, C. T. (2014). Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers : Experiences from five continents. *Earth's Future*, 2(5):256– 280.
- KOSTIC, S. et PARKER, G. (2003a). Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs. Part 1. Theory and numerical modeling. *Journal of Hydraulic Research*, 41(2):127–140.
- KOSTIC, S. et PARKER, G. (2003b). Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs. Part 2. Experiment and numerical simulation. *Journal of Hydraulic Research*, 41(2):141–152.
- KRONE, R. (1962). Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes : final report. Rapport technique, Hydraulic Eng. Lab and Sanitary Eng. Res. Lab., University of California, Berkeley, CA 110 p.
- LACOMBE, J.-M. et PASTEUR, O. (2008). FUDAA : An Open-Source Framework for the Integration of Simulation Codes, Pre-Processing, and Post-Processing Tools. In IEEE International Conference on Signal Image Technology and Internet Based Systems, pages 593–596. IEEE.
- LAI, C. (1991). Modeling alluvial channel flow by multimode characteristics method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(1):32–53.
- LANE, E. W. (1955). The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. In Proceedings (American Society of Civil Engineers), volume 745, page 1 :17.

- LANG, M. (1995). Les chroniques en hydrologie. Modélisation comparée par un système de gestion de bases de données relationnel et orienté-objet. Traitements de base et intervalles de confiance des quantiles de crues. Techniques d'échantillonnage par la méthode du renouvellement. Thèse de doctorat, Université de Grenoble 1, Saint-Martin-d'Hères, FRANCE 296 p.
- LARA, J. M. et PEMBERTON, E. L. (1963). Initial unit weight of deposited sediments. In *Proceedings of Federal Interagency Sedimentation Conference*, pages 818–845. USDA-ARS Misc. Publ. 970.
- LATAPIE, A. (2011). Modélisation de l'évolution morphologique d'un lit alluvial : Application à la Loire Moyenne. Thèse de doctorat, Université François Rabelais, Tours 272 p.
- LATAPIE, A., CAMENEN, B., RODRIGUES, S., PAQUIER, A., BOUCHARD, J. P. et MOATAR, F. (2014). Assessing channel response of a long river influenced by human disturbance. *Catena*, 121:1–12.
- LAUNAY, M. (2014). Flux de contaminants particulaires dans un grand cours d'eau anthropisé : dynamique des PCB et du mercure transportés par les matières en suspension du Rhône, du Léman à la Méditerranée. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon 502 p.
- LAUNAY, M., LE COZ, J., CAMENEN, B., WALTER, C., ANGOT, H., DRAMAIS, G., FAURE, J.-B. et COQUERY, M. (2015). Calibrating pollutant dispersion in 1-D hydraulic models of river networks. *Journal of Hydro-environment Research*, 9:120–132.
- LE COZ, J., CAMENEN, B., DRAMAIS, G., RIBOT-BRUNO, J., FERRY, M. et ROSIQUE, J. M. (2011). Guide technique pour le contrôle des débits réglementaires. Rapport technique, ONEMA 132 p.
- LEDEC, G. et QUINTERO, J. D. (2003). Good Dams and Bad Dams : Environmental Criteria for Site Selection of Hydroelectric Projects. World Bank, Washington DC 30 p.
- LEE, B. J., FETTWEIS, M., TOORMAN, E. et MOLZ, F. J. (2012). Multimodality of a particle size distribution of cohesive suspended particulate matters in a coastal zone. *Journal of Geophysical Research*, 117(C3):1–17.
- LERCH, C. et THIZY, R. (2013). Analyses des sédiments : Chasse 2012. Rapport technique, CNR 27 p.
- LESSER, G. R., ROELVINK, J. A., VAN KESTER, J. A. T. M. et STELLING, G. S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal engineering*, 51(8):883–915.
- LEVIANDIER, T., ALBER, A., LE BER, F. et PIÉGAY, H. (2012). Comparison of statistical algorithms for detecting homogeneous river reaches along a longitudinal continuum. *Geomorphology*, 138(1):130–144.
- LEWIS, J. (1996). Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation. Water Resources Research, 32(7):2299–2310.
- LEWIS, S. E., BAINBRIDGE, Z. T., KUHNERT, P. M., SHERMAN, B. S., HENDERSON, B., DOU-GALL, C., COOPER, M. et BRODIE, J. E. (2013). Calculating sediment trapping efficiencies for reservoirs in tropical settings : a case study from the Burdekin Falls Dam, NE Australia. *Water Resources Research*, 49(2):1017–1029.
- LOIZEAU, J. (2014). Rapport : Echantillonnage et analyse granulométrique de sédiments de la retenue de Chancy-Pougny. Rapport technique, Institut Forel 11 p.

- LOIZEAU, J. et WILDI, W. (2007). Aspects sédimentaires de la gestion du barrage de Verbois. Rapport, Institut Forel 40 p.
- LOWE, J. I. et FOX, I. (1995). Sediment management schemes for Tarbela. In Proceedings of the 15th Annual USCOLD Lecture Series, USCOLD, Denver, Colorado, États Unis p 1-15.
- MALAVOI, J. (1989). Typologie des faciès d'écoulement ou unités morphodynamiques des cours d'eau à haute énergie. Bull. Fr. Pèche Piscic, 315:189–210.
- MALAVOI, J.-R. et BRAVARD, J.-P. (2010). Eléments d'hydromorphologie fluviale. Onema 228 p.
- MANO, V. (2008). Processus conditionnant les apports de sédiments fins dans les retenues optimisation des méthodes de mesure et modélisation statistique. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble 343 p.
- MARTIN, G. R., SMOOT, J. L. et WHITE, K. D. (1992). A comparison of surface-grab and cross sectionally integrated stream-water-quality sampling methods. *Water Environment Research*, 64(7):866–876.
- MCCARTNEY, M. (2009). Living with dams : managing the environmental impacts. *Water Policy*, 11(1):121–139.
- MEHTA, A., HAYTER, E., PARKER, W., KRONE, R. et TEETER, A. (1989). Cohesive Sediment Transport. I : Process Description. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(8):1076–1093.
- MELTON, F. A. (1936). An empirical classification of flood-plain streams. *Geographical Review*, 26:593–609.
- MEYER PETER, E. et MÜLLER, R. (1948). Formulas for bedload transport. In 3th Meeting of IAHR, Stockholm, Suède p. 39-64.
- MIGNIOT, C. (1968). étude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques. La Houille Blanche, 7:591–620.
- MINEAR, J. T. et KONDOLF, G. M. (2009). Estimating reservoir sedimentation rates at large spatial and temporal scales : A case study of California. *Water Resources Research*, 45(12).
- MINELLA, J. P. G., MERTEN, G. H., REICHERT, J. M. et CLARKE, R. T. (2008). Estimating suspended sediment concentrations from turbidity measurements and the calibration problem. *Hydrological Processes*, 22(12):1819–1830.
- MÄKELÄ, J. M., KOPONEN, I. K., AALTO, P. et KULMALA, M. (2000). One-year data of submicron size modes of tropospheric background aerosol in southern finland. *Journal of Aerosol Science*, 31(5):595–611.
- MOLINAS, A. et YANG, C. T. (1986). Computer program user's manual for GSTARS. US Bureau of Reclamation Engineering and Research Center, Denver, CO, 80225.
- MORRIS, G. L. et FAN, J. (1998). Reservoir Sedimentation Handbook : Design and Management of Dams, Reservoirs and Watersheds for Sustainable Use. McGraw-Hill, New-York 805 p.
- MOUSSA, A. M. A. (2013). Predicting the deposition in the Aswan High Dam Reservoir using a 2-D model. Ain Shams Engineering Journal, 4(2):143 153.
- NAVRATIL, O., ESTEVES, M., LEGOUT, C., GRATIOT, N., NEMERY, J., WILLMORE, S. et GRAN-GEON, T. (2011). Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment. *Journal of Hydrology*, 398(3):246–259.

- NF EN 872 (2005). Qualité de l'eau dosage des matières en suspension méthode par filtration sur filtre en fibres de verre.
- NF P 94-056 (1996). Sols : reconnaissance et essais analyse granulométrique méthodes par tamisage à sec après lavage.
- $\rm NF$ P 94-057 (1992). Sols : reconnaissance et essais analyse granulométrique méthodes par sédimentation.
- NF P11 -300 (1992). Exécution des terrassements classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.
- NICOLLET, G. et UAN, M. (1979). Écoulements permanents à surface libre en lits composés. La Houille Blanche, 1:21–30.
- NIEL, Y., COLLILIEUX, G. et GIULIANI, Y. (1985). Détermination simple et rapide des MES par la méthode du pycnomètre CNR, application au contrôle des vidanges des retenues. *Revue française des Sciences de l'Eau*, 4:325–340.
- OEHY, C. D. et SCHLEISS, A. J. (2007). Control of turbidity currents in reservoirs by solid and permeable obstacles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6):637–648.
- OKABE, T., AMOU, S. et ISHIGAKI, M. (1993). A simulation model for sedimentation process in gorgetype reservoirs. In Sediment Problems : Strategies lor Monitoring, Prediction and Control (Proceedings of the Yokohama Symposium, Juillet 1993) 8 p.
- OLSEN, N. R. (1999). Two-dimensional numerical modelling of flushing processes in water reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, 37(1):3–16.
- OWENS, P. N., BATALLA, R. J., COLLINS, A. J., GOMEZ, B., HICKS, D. M., HOROWITZ, A. J., KONDOLF, G. M., MARDEN, M., PAGE, M. J., PEACOCK, D. H., PETTICREW, E. L. et TRUS-TRUM, N. A. (2005). Fine-grained sediment in river systems : environmental significance and management issues. *River Research and Applications*, 21(7):693–717.
- PAOLA, C., PARKER, G., SEAL, R., SINHA, S. K., SOUTHARD, J. B. et WILCOCK, P. R. (1992). Downstream fining by selective deposition in a laboratory flume. *Science*, 258(5089):1757–1760.
- PAPANICOLAOU, A. N., ELHAKEEM, M., KRALLIS, G., PRAKASH, S. et EDINGER, J. (2008). Sediment transport modeling review current and future developments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1):1–14.
- PAQUIER, A. (2013). Logiciels Rubar3 RubarBE Notice d'emploi. Irstea 87 p.
- PARC NATUREL RÉGIONAL DU HAUT-JURA (2001). Document d'objectifs Natura 2000 : Forêt alluviale, pelouse sèche de l'Étournel et Défilé de Fort l'Écluse. Rapport technique, Parc Naturel Régional du Haut-Jura 125 p.
- PARDÉ, M. (1925). Le régime du Rhône. Revue de géographie alpine, 13(3):459-547.
- PARKER, G. et SUTHERLAND, A. J. (1990). Fluvial armor. *Journal of Hydraulic Research*, 28(5):529–544.
- PARTHENIADES, E. (1965). Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of the Hydraulic Division*, 91(1):105–139.

- PERRIER, J. (2000). Chute de Génissiat : faisabilité de la vidange de la retenue reconnaissance photos des berges et mesures sur sédiments pendant les chasses 2000. Rapport technique, CNR.
- PETEUIL, C. (2014). Analyse des conditions d'exploitation de Génissiat favorables au transit des flux solides issus du Haut-Rhône. Rapport CNR DI-SFA 2014-223-01 93 p.
- PETEUIL, C., FRÉTAUD, T., WIRZ, C., CAMENEN, B., GUERTAULT, L., LE COZ, J. et DRA-MAIS, G. (2014). Importance of field observation for managing sediment fluxes in hydropower projects design and opeartion. In 19th IAHR-APD Congress 2014, Hanoi, Vietnam, 8p.
- PETEUIL, C., FRUCHART, F., ABADIE, F., REYNAUD, S., CAMENEN, B. et GUERTAULT, L. (2013). Sustainable management of sediment fluxes in reservoir by environmental friendly flushing : the case study of the Génissiat dam on the Upper Rhône River (France). In Proceedings of the 12th International Symposium on River Sedimentation (ISRS2013), 2-5 Septembre 2013, Kyoto, Japon, 8p.
- PETTITT, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics), 28:126–135.
- PETTS, G. E. (1979). Complex response of river channel morphology subsequent to reservoir construction. *Progress in Physical Geography*, 3(3):329–362.
- PETTS, G. E. (1984). Sedimentation within a regulated river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 9(2):125–134.
- PODOLAK, C. J. et DOYLE, M. W. (2015). Reservoir sedimentation and storage capacity in the United States : Management needs for the 21st century. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(4):1 :5.
- PRÉFECTURES DE L'AIN ET DE LA HAUTE SAVOIE (2013). Arreté interpréfectoral autorisant le relévement du débit réservé des prises d'eau des aménagements hydroélectriques de Génissiat d'une part, communes de Pougny, Collonges, Léaz, Coupy, Lancrans, Bellegarde, Vouvray, Arlod, Billiat, Injoux, (Ain), Vulbens, Chevrier, Arcine, Clarafond, Eloise, Saint Germain sur Rhône, Franclens, (Haute-Savoie) et de Seyssel d'autre part, communes de Injoux, Surjoux, l'Hôpital, Chanay, Corbonod et Seyssel, (Ain) Franclens, Challonges, Usinens, Desingy, Bassy et Seyssel dans le département de la Haute-Savoie. 2 p.
- PROFITT, G. T. et SUTHERLAND, A. J. (1983). Transport of non-uniform sediments. *Journal of Hydraulic Research*, 21(1):33–43.
- QUILBE, R., ROUSSEAU, A., DUCHEMIN, M., POULIN, A., GANGBAZO, G. et VILLENEUVE, J.-P. (2006). Selecting a calculation method to estimate sediment and nutrient loads in streams : Application to the Beaurivage River (Québec, Canada. *Journal of Hydrology*, 326(1):295–310.
- RAMEZ, P. et PAQUIER, A. (2004). Morphologie des rivières à gravier pavées avec berges érodables. Partie 1 : valorisation d'expériences de laboratoire. *La Houille Blanche*, 5:101–106.
- RICARD, C. et BARDET, J. L. (1986). Rétention et évacuation des matériaux en transit au fil des retenues du Rhône aménagé. In XIX^e Journée de l'Hydraulique, Paris, France. Société Hydrotechnique de France, 6 p.
- ROSGEN, L. R. (1994). A classification of natural rivers. Catena, 22(3):169–199.
- ROUSE, H. (1937). Modern conception of the mechanics of turbulence. Transactions-American Society of Civil Engineers, 102(1):532–536.

- SANFORD, L. P. et HALKA, J. P. (1993). Assessing the paradigm of mutually exclusive erosion and deposition of mud, with examples from upper Chesapeake Bay. *Marine Geology*, 114(1):37–57.
- SCHEUERLEIN, H. (1995). Downstream effects of dam construction and reservoir operation. In Management of Sediment : Philosophy, Aims and Techniques, Proceedings of the 6th International Symposium on River Sedimentation 7-11 Novembre 1995, New Delhi, Inde p. 1101-1108.
- SCHMITT, L., VALETTE, L., VALIN, K., PIÉGAY, H. et HALLOT, E. (2004). Proposition d'une méthode de typologie hydro-géomorphologique des cours d'eau et test sur un sous-bassin du Rhône (bassin de l'Yzeron). In Spatialisation et cartographie en hydrologie, pages 323–340.
- SELMI, J. et FRUCHART, F. (1990). Étude sur modéle réduit du glissement de Léaz dans la retenue de Génissiat. La Houille Blanche, 1:61–71.
- SHIELDS, A. (1936). Use of dimensional analysis and turbulence research for sediment transport. Preussen Research Laboratory for Water and Marine Constructions, publication 26.
- SIG (2003). Campagne 2003 : rapport de vidange Tome I : partie hydraulique. Rapport SIG, SFMCP 11 p.
- SINGH, S. P. (1999). Mathematical model studies on sedimentation of Bhakra reservoir. In PRESS., C., éditeur : Silting Problems in Hydro Power Plants : Proceedings of the First International Conference, 13 – 15th Octobre 1999, New Delhi, Inde, pages 48–57.
- SLOFF, C. J. (1991). Reservoir sedimentation : a literature survey. Rapport technique, TU Delft 162 p.
- SMITH, G. H. S. et FERGUSON, R. I. (1995). The gravel-sand transition along river channels. Journal of Sedimentary Research, 65(2).
- SNYDER, N. P., RUBIN, D. M., ALPERS, C. N., CHILDS, J. R., CURTIS, J. A., FLINT, L. E. et WRIGHT, S. A. (2004). Estimating accumulation rates and physical properties of sediment behind a dam : Englebright Lake, Yuba River, northern California. *Water Resources Research*, 40(11):1 :19.
- SOULSBY, R. (1997). Dynamics of Marine Sands : A Manual for Practical Applications. Telford 272 p.
- SULLIVAN, A. B., ROUNDS, S. A., SOBIESZCZYK, S. et BRAGG, H. M. (2007). Modeling hydrodynamics, water temperature, and suspended sediment in Detroit Lake, Oregon. US Geological Survey 52 p.
- SUMI, T. et HIROSE, T. (2009). Accumulation of sediment in reservoirs. In Water storage, transport and distribution, pages 224–252. UNESCO-IHE and EOLSS Publishers Co. Ltd., Paris, France.
- SUMI, T., OKANO, M. et TAKATA, Y. (2004). Reservoir sedimentation management with bypass tunnels in Japan. In Proceedings of the 9th International Symposium on River Sedimentation, 18-21 Octobre 2004, Yichang, Chine, volume 2, pages 1036–1043.
- SYVITSKI, J. P. M. (2007). Principles, methods and application of particle size analysis. Cambridge University Press 388 p.
- TEIXEIRA, E. C. et CALIARI, P. C. (2005). Estimation of the concentration of suspended solids in rivers from turbidity measurement : error assessment. In Sediment Budgets 1, Proceedings of the 7th IAHS Scientific Assembly, Avril 2005, Foz Do Iguaçu, Brésil, pages 151–160. Walling, D.E and Horowitz, A.J.

- THOLLET, F., LE COZ, J., ANTOINE, G., FRANÇOIS, P., SAGUINTAAH, L., LAUNAY, M. et CA-MENEN, B. (2013). Influence de la granulométrie des particules sur la mesure par turbidimétrie des flux de matières en suspension dans les cours d'eau. *La Houille Blanche*, 4:50–56.
- THORNTON, K. W., KENNEDY, R. H., CARROLL, J. H., WALKER, W. W., GUNKEL, R. C. et ASHBY, S. (1981). Reservoir sedimentation and water quality—an heuristic model. In Proceedings of the symposium on surface water impoundments, 2-5 Juin 1980, Minneapolis, Minesota, volume 1, pages 654–661. American Society of Civil Engineers, New York, NY.
- TISOT, J. P. et MERKETA, B. (1994a). Etude géotechnique de sondages dans la retenue de Génissiat. Rapport technique, Laboratoire de Géomécanique, Ecole Nationale Supérieure de Géologie 39 p.
- TISOT, J. P. et MERKETA, B. (1994b). Simulation au laboratoire des propriétés géotechniques d'un matériau. Rapport technique, Laboratoire de Géomécanique, Ecole Nationale Supérieure de Géologie 27 p.
- TONIOLO, H. et PARKER, G. (2003). 1D numerical modeling of reservoir sedimentation. In Proceedings of the IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Septembre 2003, Barcelone, Espagne, pages 457–468.
- TONOLLA, D., LORANG, M. S., HEUTSCHI, K., GOTSCHALK, C. C. et TOCKNER, K. (2011). Characterization of spatial heterogeneity in underwater soundscapes at the river segment scale. *Limnology and Oceanography*, 56(6):2319–2333.
- UMEYAMA, M. (1992). Vertical distribution of suspended sediment in uniform open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(6):936–941.
- VAN RIJN, L. C. (1984a). Sediment transport, part I : bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10):1431–1456.
- VAN RIJN, L. C. (1984b). Sediment transport, part II : suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11):1613–1641.
- VAN RIJN, L. C. (2007). Unified view of sediment transport by currents and waves. II : Suspended transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6):668–689.
- VANONI, V. (1977). Sedimentation Engineering. American Society of Civil Engineers 418 p.
- VERSTRAETEN, G. et POESEN, J. (2000). Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds : methods and implications for the assessment of sediment yield. *Progress in Physical Geography*, 24(2):219–251.
- VIAL, J., GEOFFRAY, C. et DREVON, A. (1965). Étude de la pollution chimique et bactériologique du Rhône en amont de Lyon, à la suite de la vidange de la retenue de Verbois en juillet 1965. Rapport technique, Section Technique Pêche et Pisciculture, Cerafer 31 p.
- VILLARET, C., HERVOUET, J. M., KOPMANN, R., MERKEL, U. et DAVIES, A. G. (2013). Morphodynamic modeling using the telemac finite-element system. *Computers & Geosciences*, 53:105–113.
- VRAČAR, M. S. et MIJIĆ, M. (2011). Ambient noise in large rivers (l). The Journal of the Acoustical Society of America, 130(4):1787–1791.
- WALLING, D. E. et WEBB, B. W. (1985). Estimating the discharge of contaminants to coastal waters by rivers : some cautionary comments. *Marine Pollution Bulletin*, 16(12):488–492.

- WALTHER, R. (1936). Note sur l'engravement et le dégravement d'un bassin d'accumulation. Histoire du lac du Motty. *Revue de géographie alpine*, 24(2):315–328.
- WANG, G., WU, B. et WANG, Z. Y. (2005). Sedimentation problems and management strategies of Sanmenxia Reservoir, Yellow River, China. *Water Resources Research*, 41(9):1–17.
- WARREN, I. R. et BACH, H. (1992). MIKE 21 : a modelling system for estuaries, coastal waters and seas. *Environmental Software*, 7(4):229–240.
- WENTWORTH, C. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30:377–392.
- WHEATON, J. M., BRASINGTON, J., DARBY, S. E. et SEAR, D. A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys : improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(2):136–156.
- WILCOCK, P. R. et KENWORTHY, S. T. (2002). A two-fraction model for the transport of sand/gravel mixtures. *Water Resources Research*, 38(10):1–12.
- WILDI, W. et LOIZEAU, J. (2009). Échantillonage et analyse des sédiments du réservoir de Verbois. Institut Forel 44 p.
- WOLF, M. (2011). Évaluation de la modélisation 1D pour rendre compte d'une chasse de la retenue de Génissiat. Mémoire de D.E.A., Polytech Paris-UPMC 54 p.
- WOO, H. S., JULIEN, P. Y. et RICHARDSON, E. V. (1986). Washload and fine sediment load. Journal of Hydraulic Engineering, 112(6):541–545.
- WOOD, P. J. et ARMITAGE, P. D. (1997). Biological effects of fine sediment in the lotic environment. *Environmental management*, 21(2):203–217.
- WU, W. (2001). CCHE2D sediment transport model (version 2.1). Technical Rep. of National Center for Computational Hydroscience and Engineering NCCHE-TR-2001-03, Univ. of Mississippi.
- WU, W., VIEIRA, D. A. et WANG, S. S. (2004). One-dimensional numerical model for nonuniform sediment transport under unsteady flows in channel networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9):914–923.
- YANG, C. T. (2006). *Erosion and Sedimentation manual*. US Dep. of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, CO. 601 p.
- ZIEGLER, C. K. et NISBET, B. S. (1995). Long-term simulation of fine-grained sediment transport in large reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(11):773–781.

Annexes

1954-1969	1984-2012					
186,61	186,61	186,42				
186,18	186,18	186,025				
185,76	185,76	185,545				
185,34	185,34					
185,24	185,24	185,14				
184,98	184,98					
184,88	184,925					
184,71	184,71	184,56				
184,38	184,42					
183,94	183,94	183,77				
183,57	183,57					
183,3	183,22					
183,05	182,85					
$182,\!65$	$182,\!65$					
182,35	182,35	182,15				
181,9	181,9	181,7				
181,5	181,5	181,2				
180,9	180,9	180,7				
180,45	180,45	180,2	179,95			
179,75	179,58	179,35				
179,07	179,07	178,8				
178,55	$178,\!55$	178,3	178,07			
177,9	177,9	177,7	177,55	177,35		
177,2	177,2	176,9	$176,\!6$	176,3	176,3	176,05
175,85	175,85	175,55	175,45	175,3		
175,07	175,07	174,85	174,57			
174,3	174,35	174,05	173,75	173,55		
173,32	173,28	173,02	172,8	172,55	172,3	172,05
171,72	171,75	171,5	171,25	170,95	170,7	170,45
170	170,2	169,85	169,5	169,25	169,05	168,85
	168,6	168,4	168,2	167,95		
167,75	167,75	167,43	167,1	166,78	166,46	165,93
	$165,\!62$	165,4	165,1	164,81		
164,51	164,58	164,27	164	163,75	163,52	162,97
	162,82					164
162,56	162,57	162,56	162,55	162,54	162,53	162,52
	162,51	162,5	162,49	,162,48	162,47	162,45
	162,43	162,41	162,37	162,36	162,35	162,33
	162,31	162,29	162,27	162,25	162,2253	

A Liste des sections en travers mesurées dans la retenue de Génissiat



FIGURE 1 – Localisation des sections en travers décrivant la retenue de Génissiat