



UNIVERSITÉ FRANÇOIS RABELAIS DE TOURS



École Doctorale SST

UMR 6113 ISTO-Tours

THÈSE présentée par :

Audrey LATAPIE

soutenue le : 26 Mai 2011

pour obtenir le grade de : Docteur de l'université François - Rabelais

Discipline/ Spécialité : Sciences de la Terre et de l'Environnement

MODELISATION DE L'EVOLUTION MORPHOLOGIQUE D'UN LIT ALLUVIAL : APPLICATION A LA LOIRE MOYENNE

JURY :

MOSELMAN Erik

PIEGAY Hervé

PETIT François

MOATAR Florentina

PAQUIER André

CAMENEN Benoît

RODRIGUES Stéphane

Senior researcher, Université de Delft, Pays Bas, rapporteur

Directeur de recherche CNRS, ENS de Lyon, rapporteur

Professeur, Université de Liège, Belgique, examinateur

Professeur, Université François - Rabelais, directrice de thèse

I.C.G.R.E.F., Cemagref de Lyon, co-directeur de thèse

Chargé de Recherche, Cemagref de Lyon, encadrant

Maître de conférences, Université François - Rabelais, encadrant

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier les membres du jury (François Petit, Erik Mosselman et Hervé Piégay) pour avoir accepté d'évaluer mon travail et pour leurs remarques pertinentes.

Mes remerciements vont ensuite au « club des cinq » qui ont assuré l'encadrement de cette thèse : André Paquier, Florentina Moatar, Jean Pierre Bouchard et plus particulièrement à Stéphane Rodrigues et Benoit Camenen qui m'ont gérée au quotidien. Un grand merci à André et Jérôme pour m'avoir conseillée et déboguée lors de la phase de modélisation.

Je n'oublie pas Jean-Noël Gautier, Jean-Jacques Peters, Stéphane Braud et Fabien Pasquet qui m'ont transmis des données et surtout leurs connaissances du site et leurs expériences. Je ne pourrai pas citer l'ensemble des personnes sollicitées pour récupérer des données...la liste serait trop longue mais merci à la DREAL Centre (Stéphane et Fabien), au CETE de Blois (en particulier Jean Claude Joanneau et Gwen Glaziou), au GIP (Stéphanie Aumenier), au SMN (Régis Le Quillec) à l'AITL, aux DDE...

Ce travail de thèse a été réalisé dans les locaux du laboratoire de géologie de l'université de Tours puis dans l'équipe de recherche Hydrologie-Hydraulique du Cemagref de Lyon. Merci donc à ces deux équipes avec lesquelles j'ai fortement apprécié de travailler. Merci donc à Jean-Jacques Macaire puis Jean Bréhéret de m'avoir accueillie à Tours et à Michel Lang puis André Paquier à Lyon.

Je remercie également mes codétenus du sous sol en Touraine : Rem, Mimic, Caro, Vince et Nicolette pour avoir partagé les moments de panique ainsi que les foires, les repas au resto chinois....et autres soirées à la guinguette ou à Montjoyeux. Sans oublier Jean Paul, Mme Pene, Eric, Jacques, avec qui nous avons partagé des cafés, des plaisanteries et autres coups de blues, et nos collègues du premier qui nous rejoignaient pour les repas, dégustations ou réunions ! (Jean-Jacques, Jean, Seb Salvador, Florent, Isa, Cécile....).

Après une année tourangelle, j'ai débarqué à Lyon dans le bureau de Biquet et Yanuki. C'était vraiment sympa de partager votre bureau même si je n'ai pas toujours compris les jeux de mots de Biquet ou les énervements de Yanuki après son clavier :) Claire et Marina m'ont ensuite rejointe pour former le « bureau des filles du fond ». Merci de m'avoir supportée sur la fin de ma thèse et d'avoir partagé le chocolat... Je n'oublie bien évidemment pas tout ceux avec qui nous nous sommes retrouvés pour une bière, une randonnée en montagne, une balade à vélo, une partie de badminton, un gateau ou simplement une discussion au coin café...merci donc à Eric, Anne-Laure, Benj, Elodie, Flora, Jérôme, Jean-Phi, Benoit, Lionel, Ignacio, Sonia, Stéphanie, Clotaire, Mick, Guillaume, Fabien et tout ceux qui veulent bien se reconnaître....sans oublier Hélène et Anne qui nous facilitent le côté administratif (merci pour votre patience et votre gentillesse!).

Il y a toujours un paragraphe pour remercier la famille...alors merci la famille ! Même si mes réponses aux questions du type « mais qu'est ce que tu fais au juste » vous laissent toujours sceptiques, merci de m'avoir soutenue. Enfin un grand merci à Bruce pour m'avoir accompagnée et supportée ces dernières années.

Résumé

Modélisation de l'évolution morphologique d'un lit alluvial : application à la Loire moyenne

Le développement urbain, la construction d'infrastructures, l'extraction de graviers dans le lit des cours d'eau puis l'arrêt des dragages, ainsi que le changement climatique contribuent à modifier l'équilibre sédimentaire existant au sein des systèmes fluviaux et donc le fonctionnement des hydrosystèmes. Ainsi la compréhension des processus d'évolution des lits des cours d'eau est un enjeu important pour les scientifiques, les gestionnaires de bassins et les exploitants qui cherchent à mettre en place une gestion durable et pérenne des ouvrages et à anticiper les travaux de restauration environnementale. Ce travail de thèse a pour objectif de proposer des méthodes pour améliorer la compréhension des processus d'évolution d'un long cours d'eau (plusieurs centaines de kilomètres) et la modélisation à long terme (quelques décennies). Ces méthodes sont appliquées et discutées sur la Loire moyenne (soit 450 km entre le bec d'Allier et Montjean-sur-Loire) qui a été fortement influencée par les actions anthropiques. L'analyse des évolutions de la Loire moyenne est réalisée en découpant le secteur d'étude en tronçons géomorphologiquement homogènes. Les tendances générales d'évolution de la Loire moyenne se traduisent par une diminution de la pente et une réduction de la largeur de la bande active entre 1955 et 1996. Suite à l'arrêt des extractions de granulats en lit mineur, les ajustements se poursuivent mais de façon plus modérés, ce qui laisse à penser que la Loire n'a pas tout à fait atteint son profil d'équilibre. Chaque tronçon défini est ensuite caractérisé par une géométrie simplifiée afin de définir un modèle d'évolution du profil en long. Différentes approches de simplification des chroniques de débits sont ensuite dérivées et testées afin de réduire le temps de calcul en se limitant à la modélisation des événements qui influencent le transport de sédiments et façonnent le lit du cours d'eau. Ces simplifications géométriques et hydrologiques sont ensuite introduites dans un modèle de transport solide unidimensionnel (dans notre cas RubarBE) afin d'être comparées aux résultats obtenus avec la géométrie détaillée et la chronique de débit complète. Les simplifications géométriques proposées permettent ainsi une modélisation des évolutions du lit pertinente tout en réduisant le temps de calcul ; la simplification des chroniques de débit illustre la sensibilité des modèles numériques hydro-sédimentaires à l'hydrologie. Enfin, l'application des simplifications sur l'ensemble de la Loire moyenne sur la période 1996-2006 confirme les tendances observées par l'analyse géomorphologique des données. Dans le contexte du changement climatique le modèle pourrait être exploité pour prédire les tendances d'évolutions futures.

Mots-clés

Loire moyenne ; transport solide ; morphologie ; grande échelle ; modélisation hydraulique et sédimentaire.

Table des matières

1	Introduction	29
1.1	Contexte général de l'étude	29
1.2	Quelques notions fondamentales de géomorphologie fluviale et modélisation	30
1.2.1	Les formes fluviales et leurs évolutions	30
1.2.1.1	Les styles fluviaux	30
	Les rivières à lit rectiligne	31
	Les rivières à méandres	31
	Les rivières en tresses	31
	Les rivières à lits anastomosés	32
1.2.1.2	Dynamique morphologique des cours d'eau	32
1.2.1.3	Notion d'équilibre dynamique	34
1.2.1.4	Influence des actions anthropiques	35
1.2.2	Classifications des cours d'eau	36
1.2.2.1	Classifications qualitatives	37
1.2.2.2	Classifications introduisant la notion de débit de plein bord	37
1.2.2.3	Classification basée sur la puissance fluviale	39
1.2.2.4	Classification de Rosgen	40
1.2.3	Modélisation en géomorphologie fluviale	42
1.2.3.1	Modèles d'évolution	42
1.2.3.2	Définition des variables	43
1.2.3.3	Modélisation hydraulique	44
1.2.3.4	Notions de transport solide	45
1.2.3.5	Modélisation sédimentaire	46
1.3	Objectifs et démarche scientifique	47
	Objectifs	47
	Problématique de la Loire moyenne	47
	Démarche scientifique	48
	Plan du mémoire	49

I	Présentation et évolutions morphologiques de la Loire moyenne	51
2	Présentation du site d'étude	53
2.1	Caractéristiques géographiques et géologiques du bassin de la Loire	53
2.1.1	Présentation du bassin versant de la Loire	53
2.1.2	Caractéristiques lithologiques et histoire géologique de la Loire	54
2.1.3	Epaisseur du manteau alluvial	56
2.1.4	Profil en long et affleurements rocheux identifiés sur la Loire moyenne	56
2.1.5	Données topographiques	57
2.2	Caractéristiques sédimentaires	58
2.2.1	Données granulométriques	58
2.2.2	Caractéristiques sédimentaires longitudinales de la Loire moyenne	58
2.2.3	Caractéristiques sédimentaires transversales	59
2.2.4	Variabilité verticale de la granularité en crue	59
2.3	Caractéristiques hydrologiques	61
2.3.1	Données hydrométriques	61
2.3.2	Régime hydrologique	62
2.3.3	Apports des affluents	63
2.3.4	Concomittance des crues	64
2.3.5	Formes des hydrogrammes de crues	65
2.4	Actions anthropiques	67
2.4.1	Ouvrages fluviaux, ouvrages d'art et travaux	67
2.4.2	Extractions de granulats	68
2.4.3	Barrages	69
2.4.4	Centrales nucléaires	69
2.4.5	Conséquences des actions anthropiques	70
3	Sectorisation géomorphologique de la Loire moyenne	73
3.1	Applications des classifications existantes à la Loire moyenne	73
3.1.1	Classification basée sur la puissance fluviale	73
3.1.2	Application de la méthodologie de Rosgen	74
3.1.3	Limites des découpages existants de la Loire moyenne	76
3.2	Méthodologie de découpage en tronçons	77
3.2.1	Identification des unités géologiques	77
3.2.2	Analyse des lignes d'eau d'étiages	77
3.2.3	Prise en compte des points durs affectant la pente	78

3.2.4	Analyse des formes fluviales	78
3.2.5	Variations des largeurs de bande active	79
3.2.6	Récapitulatif de la méthode de découpage	80
3.3	Caractérisation des tronçons	81
3.3.1	Paramètres géométriques	81
3.3.2	Paramètres sédimentaires	82
3.3.3	Paramètres hydrauliques	85
3.3.4	Synthèse des paramètres retenus pour l'étude de la Loire moyenne	87
3.4	Synthèse du chapitre	90
3.4.1	Spécificités du découpage de la Loire moyenne	90
3.4.2	Apport de la modélisation à la classification	90
4	Evolutions morphologiques de la Loire moyenne depuis le début du XX^{ème} siècle	95
4.1	Evolution des tronçons de la Loire moyenne	95
4.1.1	Evolutions des tronçons selon les unités géologiques	95
4.1.2	Evolutions des tronçons selon leurs limites	97
4.1.3	Influence des extractions sur les évolutions	99
4.2	Présentation et évolutions des sites de références	101
4.2.1	Site fortement anthropisé : Belleville	101
4.2.1.1	Présentation du site de Belleville	101
4.2.1.2	Evolutions du site de Belleville	104
4.2.2	Site à méandres : Guilly	111
4.2.2.1	Présentation du site de Guilly	111
4.2.2.2	Evolutions du site de Guilly	112
4.2.3	Site à chenaux multiples : Bréhémont	115
4.2.3.1	Présentation du site de Bréhémont	115
4.2.3.2	Evolutions du site de Bréhémont	116
4.3	Synthèse du chapitre	118
4.3.1	Avantages et limites de l'approche de classification	118
4.3.2	Evolutions observées sur la Loire moyenne	119
II	Modélisation numérique hydro-sédimentaire	123
5	Approches de simplification et modèle d'évolution	125
5.1	Simplifications de la géométrie	125
5.1.1	Simplification de la géométrie en $2 \times n$ points	126

TABLE DES MATIÈRES

5.1.2	Simplification de la géométrie en huit points	127
5.1.3	Optimisation du lissage	128
5.2	Simplifications des chroniques de débit	129
5.2.1	Approche par débits classés	129
5.2.2	Approche descriptive avec seuils	131
5.2.2.1	Simplification d'un hydrogramme de crue en cinq points	131
5.2.2.2	Définition d'un débit seuil d'étiage	132
5.2.2.3	Simplification d'une chronique existante	134
5.2.3	Dérivation de chroniques de débits simplifiées	134
5.2.3.1	Approche 1 : conservation de la forme d'un hydrogramme de crue .	135
5.2.3.2	Approche 2 : conservation des volumes d'un hydrogramme de crue .	136
5.2.3.3	Comparaison des approches de simplification des hydrogrammes . .	137
5.2.3.4	Dérivations de chroniques prédictives	138
5.2.3.5	Estimations des hydrogrammes d'apports des affluents	140
5.2.4	Accélération de l'hydrogramme	141
5.3	Spécificités du modèle d'évolution du lit RubarBE	142
5.3.1	Distance de chargement	142
5.3.2	Calcul des contraintes locales et du seuil de mise en mouvement	143
5.3.3	Calcul de la capacité de transport solide	143
5.3.4	Prise en compte de la granulométrie étendue	144
5.3.5	Déformation des sections en travers	144
5.4	Modèle simplifié et bilan sédimentaire	145
5.5	Temps de calcul et estimation de la performance du modèle d'évolution	146
	Temps de calcul	146
	Estimation de la performance du modèle	147
5.6	Synthèse du chapitre	148
5.6.1	Approches de simplification de la géométrie retenues	148
5.6.2	Approches de simplification des chroniques de débits retenues	149
6	Application aux sites de références	151
6.1	Site anthropisé : Belleville	151
6.1.1	Calage du modèle hydraulique	152
6.1.2	Modèle d'évolution en géométrie réelle	154
6.1.2.1	Test sur la crue de 1996 : choix de la formule de transport	154
6.1.2.2	Test sur la crue de 1996 : choix de la distance de chargement	156
6.1.2.3	Modèle d'évolution « réel » (1996-1998)	157

	Comparaison des profils en long	159
	Evolutions des profils en travers	159
	Comparaison des surfaces déposées ou érodées	161
	Comparaison des volumes	162
	Synthèse des simulations avec la géométrie réelle et la chronique réelle	163
6.1.3	Modèle d'évolution en géométrie simplifiée	164
6.1.3.1	Simplification de la géométrie	164
6.1.3.2	Tests hydrauliques sur les crues de 1996 et 2003	165
6.1.3.3	Modèle d'évolution en géométrie simplifiée (1996 - 1998)	166
	Comparaison des profils en long	167
	Evolution des profils en travers	167
	Comparaison des volumes	168
	Synthèse des simulations en géométrie simplifiée avec la chronique réelle	170
6.1.4	Modèle d'évolution avec les chroniques de débit simplifiées	170
6.1.4.1	Tests avec les débits classés (1996-1998)	170
6.1.4.2	Tests de l'approche de simplification descriptive avec seuils (1996-1998)	171
	Tests sur la géométrie réelle	171
	Tests sur la géométrie simplifiée	174
6.1.4.3	Tests d'une succession d'hydrogrammes synthétiques	176
6.1.4.4	Tests d'accélération de l'hydrogramme	177
6.1.5	Application du modèle simplifié avec les bilans sédimentaires	178
6.1.6	Synthèse des simulations effectuées sur le site de Belleville	180
6.2	Site à chenaux multiples : Bréhémont	181
6.2.1	Calage du modèle hydraulique	181
6.2.2	Modèle d'évolution « réel » (2000 - 2002)	183
	Comparaison des profils en long	183
	Evolutions des profils en travers	184
	Comparaison des volumes	185
6.2.3	Modèle d'évolution en géométrie simplifiée	186
6.2.3.1	Simplification de la géométrie	186
6.2.3.2	Tests hydrauliques sur les crues de 2001 et 2003	188
6.2.3.3	Modèle d'évolution du lit en géométrie simplifiée (2000-2002)	189
6.2.4	Modèle d'évolution du lit avec la chronique de débits simplifiée (2000-2002) .	190
6.2.4.1	Géométrie réelle et chronique simplifiée	190
6.2.4.2	Géométrie simplifiée et chronique simplifiée	191
6.2.5	Synthèse des simulations effectuées sur le site de Bréhémont	192

TABLE DES MATIÈRES

6.3	Site à méandres : Guilly	192
6.3.1	Calage du modèle hydraulique	192
6.3.2	Simplification de la géométrie	193
6.3.3	Modèle d'évolution du lit en géométrie simplifiée (1996-2008)	193
6.4	Synthèse du chapitre	195
6.4.1	Avantages et limites des différentes options de calcul	195
6.4.2	Apports et limites de la géométrie simplifiée	197
6.4.3	Apports et limites des chroniques de débits simplifiées	197
7	Application à la Loire moyenne	199
7.1	Calage du modèle hydraulique sur la géométrie réelle	199
7.2	Simplification de la géométrie	202
	Modèle 1 : du Bec d'Allier à Gien	202
	Modèle 2 : de Gien à Orléans	203
	Modèle 3 : d'Orléans à la confluence avec le Cher	204
	Modèle 4 : de la confluence avec le Cher à Montjean-sur-Loire	206
7.3	Simplification des chroniques de débits	208
7.3.1	Simplification de la chronique 1996-2006 avec l'approche descriptive à seuils	208
7.3.2	Dérivation de chroniques prédictives	209
7.4	Modèle d'évolution du lit de la Loire moyenne	209
7.4.1	Application de la chronique 1996-2006 simplifiée	210
	7.4.1.1 Applications sur les quatre sous-modèles	210
	Evolutions entre le Bec d'Allier et Gien	210
	Evolutions entre Gien et Orléans	211
	Evolutions entre Orléans et la confluence avec le Cher	213
	Evolutions entre la confluence avec le Cher et Montjean-sur-Loire	213
	7.4.1.2 Comparaison du modèle global et des modèles sur Belleville et Guilly	214
	Belleville	215
	Guilly	216
7.4.2	Application des chroniques dérivées	217
7.4.3	Application du modèle simplifié Mobise	218
7.5	Synthèse des résultats du modèle d'évolution de la Loire moyenne	220
8	Conclusion générale et perspectives	221
8.1	Conclusion générale	221
	Sectorisation de la Loire moyenne et description des tronçons homogènes	221

Evolutions morphologiques de la Loire moyenne	222
Approches de simplifications et modélisation hydro-sédimentaire	222
8.2 Perspectives	224
Bases de données	224
Méthodologie de sectorisation des cours d'eau	224
Modélisation hydro-sédimentaire	224
 ANNEXES	 229
A Données collectées	229
B Caractéristiques des tronçons	235
C Sites d'extraction	247
D Liste des seuils	259
E Temps de calcul	261
F Evolutions des tronçons	263
 Bibliographie	 271

Liste des tableaux

1.1	Extrait du tableau d'interprétation de Rosgen (1994).	41
2.1	Données de débit disponibles sur la Banque Hydro	61
2.2	Décalage temporel moyen entre les pics de crues des affluents et de la Loire.	65
3.1	Paramètres discriminants du découpage en tronçons.	80
3.2	Classes définies pour caractériser les tronçons.	89
3.3	Correspondance en pourcentage entre les différentes classes de tronçons	90
4.1	Comparaison entre les volumes extraits et déposés annuellement pour cinq tronçons .	100
4.2	Caractéristiques des 14 tronçons définis sur le secteur de Belleville.	103
4.3	Caractéristiques des 11 tronçons définis sur le secteur de Guilly.	111
4.4	Caractéristiques des quatre tronçons définis sur le secteur de Bréhémont.	115
5.1	Détermination des durées intermédiaires t_e	139
5.2	Caractéristiques des fermes de calcul utilisées.	147
5.3	Valeur du BSS et caractérisation de la performance du modèle.	148
6.1	Belleville : objectifs et description des simulations réalisées.	152
6.2	Belleville : simulations en géométrie réelle avec la chronique de débits réelle.	158
6.3	Belleville : simulations en géométrie simplifiée avec la chronique de débit réelle. . . .	167
6.4	Belleville : simulations en géométrie simplifiée avec les débits classés.	171
6.5	Belleville : simulations en géométrie réelle et chroniques de débits simplifiées.	172
6.6	Belleville : simulations en géométrie simplifiée avec les chroniques de débits simplifiées.	174
6.7	Belleville : simulations en géométrie simplifiée avec la chronique reconstituée.	176
6.8	Belleville : simulations réalisées avec Mobise.	179
6.9	Belleville : synthèse des simulations effectuées.	180
6.10	Bréhémont : simulations en géométrie réelle avec la chronique de débit réelle.	184
6.11	Bréhémont : simulations en géométrie simplifiée avec la chronique de débit réelle. . .	189
6.12	Guilly : simulations avec la géométrie et la chronique de débit simplifiées.	195
6.13	Estimations du BSS pour les différentes simulations.	196

LISTE DES TABLEAUX

7.1	Loire moyenne : récapitulatif des différentes simulations effectuées.	210
A.1	Récapitulatif des données topographiques disponibles	231
A.2	Récapitulatif des cartes et photographies aériennes	231
A.3	Liste des stations hydrométriques	232
A.4	Liste des déversoirs	233
B.1	Caractéristiques des tronçons	246
C.1	Sites d'extractions entre le Bec d'Allier et Saumur.	257
D.1	Liste des seuils intégrés dans le modèle Loire moyenne.	259
E.1	Récapitulatif des différentes simulations.	262
F.1	Caractérisation des vitesses d'évolution des tronçons.	263
F.2	Vitesse d'évolution des tronçons	268

Table des figures

1.1	Exemples de formes de cours d'eau	30
1.2	Détermination de la sinuosité	31
1.3	Schéma des grandeurs caractéristiques des cours d'eau	32
1.4	Schéma des échelles spatiales et temporelles d'ajustement des cours d'eau	33
1.5	Principe de l'équilibre dynamique (d'après Lane, 1955).	34
1.6	Classification de Schumm (1981)	38
1.7	Détails de la classification de Rosgen (adapté de Rosgen (1994))	41
1.8	Schéma définissant les caractéristiques d'un cours d'eau en plan et en coupe.	44
2.1	Relief du bassin versant de la Loire.	54
2.2	Carte lithologique du bassin de la Loire.	55
2.3	Profil en long de la Loire moyenne et principaux styles fluviaux.	57
2.4	Caractéristiques granulométriques longitudinales du chenal principal.	59
2.5	Variations transversales de la granulométrie.	60
2.6	Evolution de la distribution granulométrique sur la verticale.	60
2.7	Caractéristiques hydrologiques à la station de Blois.	62
2.8	Evolution des débits entre Nevers et Montjean-sur-Loire.	63
2.9	Concomittance des crues de 1866 et 2003 sur la Loire.	64
2.10	Exemple de dérivation d'un hydrogramme normé à Gien.	65
2.11	Hydrogrammes normés aux principales stations de la Loire moyenne.	66
2.12	Estimation des extractions de matériaux dans le lit mineur de la Loire	68
2.13	Effondrement du pont Wilson à Tours	71
3.1	Evolution longitudinale de la puissance spécifique.	74
3.2	Localisation des types de chenaux obtenus avec la méthode de Rosgen (1994).	75
3.3	Profil en long de la Loire moyenne.	78
3.4	Exemple de lignes d'eau d'étiage.	79
3.5	Répartition des différents types de tronçons définis.	81
3.6	Largeur de la bande active des tronçons en 1995	82
3.7	Variation longitudinale du diamètre médian du chenal principal.	83

TABLE DES FIGURES

3.8	Variation longitudinale du paramètre d'étendue granulométrique.	84
3.9	Variations longitudinales des paramètres hydrauliques	87
3.10	Répartition des classes définies pour les caractéristiques hydrauliques.	92
3.11	Relation entre le ratio τ_{eff}/τ_{cr} et le ratio W_{Q2}/H_{Q2}	93
4.1	Evolution des classes de largeur de bande active en fonction des unités géologiques. . .	96
4.2	Evolution des classes de pente en fonction des unités géologiques.	97
4.3	Variation annuelle de l'altitude du fond du lit (Δz).	98
4.4	Variation annuelle de l'altitude du fond du lit en fonction des extractions.	100
4.5	Carte de localisation des trois sites de référence.	102
4.6	Belleville : cartes et photographies aériennes au droit de la centrale	105
4.7	Belleville : évolutions de la largeur de la bande active entre 1848 et 2002.	106
4.8	Belleville : évolutions de la ligne d'eau d'étiage entre 1940 et 2006.	106
4.9	Belleville : relations hauteurs-débits pour Myennes, Les Loups.	107
4.10	Belleville : maximum annuel des débits journaliers moyens supérieurs à Q_2	108
4.11	Belleville : surfaces déposées ou érodées par an entre 1977 et 2006.	109
4.12	Belleville : volumes déposés ou érodés par tronçon entre 1996 et 2006.	110
4.13	Belleville : localisation et évolutions du profil P22 entre 1986 et 2006	110
4.14	Belleville : profil en long des points bas (1977-2006)	111
4.15	Guilly : cartes et photographies aériennes des méandres	112
4.16	Guilly : évolutions de la largeur de la bande active entre 1848 et 2002.	113
4.17	Guilly : évolutions de la ligne d'eau entre 1940 et 2006.	113
4.18	Guilly : évolutions des profils en travers entre 1995 et 2008.	114
4.19	Guilly : volumes mesurés déposés ou érodés par tronçon entre 1995 et 2008.	115
4.20	Bréhémont : cartes et photographies aériennes	116
4.21	Bréhémont : évolutions de la largeur de la bande active entre 1848 et 2002.	117
4.22	Bréhémont : évolutions de la ligne d'eau d'étiage entre 1940 et 2006.	117
4.23	Bréhémont : surfaces déposées ou érodées par an entre 2000 et 2002.	118
4.24	Loire moyenne : variations annuelles de l'altitude du lit	121
5.1	Exemple de profil lissé obtenu avec l'approche en $2 \times n$ points.	127
5.2	Exemple de profil lissé obtenu avec la simplification en huit points.	128
5.3	Courbe de débits classés à Gien pour la crue de décembre 2003	130
5.4	Hydrogrammes dérivés avec l'approche des débits classés	131
5.5	Schéma illustrant la simplification des hydrogrammes de crue en cinq points.	132
5.6	Identification et simplification des pics de crue en cinq points.	133
5.7	Définition du débit seuil entre le Bec d'Allier et Gien	133

5.8	Simplification d'une chronique existante avec l'approche descriptive avec seuils. . . .	134
5.9	Détermination des coefficients α_c et β_c	135
5.10	Hydrogrammes Synthétiques avec conservation de la forme	136
5.11	Hydrogrammes Synthétiques Mono-Fréquences	137
5.12	Comparaison des méthodes de dérivation des hydrogrammes de crue.	138
5.13	Application des différentes approches de simplification des chroniques.	139
5.14	Dérivation d'une chronique prédictive.	140
5.15	Détermination des coefficients λ des quatre principaux affluents.	141
5.16	Schéma illustrant les options d'érosion et de dépôt du modèle RubarBE.	146
6.1	Belleville : erreurs du modèle en géométrie réelle sur les crues de 1996 et 2003.	153
6.2	Belleville : évolutions du lit avec les différentes formules de transport solide.	155
6.3	Belleville : comparaison des évolutions des profils en travers durant la crue de 1996. .	156
6.4	Influence de la distance de chargement sur les évolutions du fond.	157
6.5	Hydrogramme de 1996 à 1998 à la station hydrométrique de Gien.	158
6.6	Belleville : comparaison des profils en long mesurés et calculés	160
6.7	Belleville : évolutions types des sections en travers.	161
6.8	Belleville : comparaison des surfaces érodés ou déposés par profil.	162
6.9	Belleville : volumes érodés ou déposés par tronçon.	163
6.10	Belleville : profil en long du modèle simplifié	165
6.11	Belleville : erreurs du modèle en géométrie simplifiée sur les crues de 1996 et 2003. .	166
6.12	Belleville : profils en long simplifiés.	168
6.13	Belleville : évolutions des sections simplifiés.	169
6.14	Belleville : volumes déposés ou érodés.	169
6.15	Belleville : tests de débits classés. Volumes déposés ou érodés.	172
6.16	Belleville : volumes déposés ou érodés des modèles bel-Qsimp	173
6.17	Belleville : volumes déposés ou érodés des modèles bel-Qsimp	174
6.18	Belleville : volumes déposés ou érodés obtenus avec le modèle simplifié.	175
6.19	Belleville : volumes déposés ou érodés obtenus avec le modèle simplifié.	177
6.20	Belleville : test d'accélération de l'hydrogramme	178
6.21	Belleville : résultats des tests Mobise	179
6.22	Bréhémont : exemples de lignes d'eau du calage hydraulique	182
6.23	Hydrogramme de 2000 à 2002 à Langeais	183
6.24	Bréhémont : comparaison des profils en long mesurés et calculés	184
6.25	Bréhémont : évolutions types des sections en travers.	185
6.26	Bréhémont : volumes par tronçon avec la géométrie réelle (2000-2002).	186

TABLE DES FIGURES

6.27 Bréhémont : profils en travers lissés.	187
6.28 Bréhémont : profils en long réel et lissé.	188
6.29 Bréhémont : erreurs du modèle sur les crues de 2001 et 2003.	189
6.30 Bréhémont : volumes déposés ou érodés sur les tronçons.	190
6.31 Bréhémont : volumes déposés ou érodés en géométrie réelle et hydraulique simplifiée.	191
6.32 Bréhémont : volumes obtenus avec la géométrie simplifiée et l'hydraulique simplifiée.	192
6.33 Guilly : erreurs du modèle sur les crues de 1996 et 2003.	193
6.34 Guilly : profils en long simplifié.	194
6.35 Hydrogramme 1996 - 2008 à la station hydrométrique de Gien	194
6.36 Guilly : volumes déposés ou érodés	195
7.1 Bec d'Allier à Orléans : erreurs relatives du modèle hydraulique.	200
7.2 Orléans à Montjean-sur-Loire : erreurs relatives du modèle hydraulique.	201
7.3 Propagation de la crue de décembre 1996.	202
7.4 Bec d'Allier à amont de Gien : profil en long simplifié.	203
7.5 Bec d'Allier à amont de Gien : $\Delta H/H$ sur la crue 1996 en géométrie simplifiée.	204
7.6 Gien à Orléans : profil en long simplifié.	205
7.7 Gien à Orléans : $\Delta H/H$ sur la crue 1996 en géométrie simplifiée.	205
7.8 Orléans à la confluence avec le Cher : profil en long simplifié.	206
7.9 Orléans à la confluence avec le Cher : $\Delta H/H$ sur la crue 1996 en géométrie simplifiée.	207
7.10 Confluence avec le Cher à Montjean-sur-Loire : profil en long simplifié.	207
7.11 Confluence avec le Cher à Montjean-sur-Loire : $\Delta H/H$ sur la crue 1996.	208
7.12 Hydrogramme 1995 - 2006 à Givry.	209
7.13 Loire moyenne : volumes déposés ou érodés par tronçon.	212
7.14 Loire moyenne : volumes déposés ou érodés par tronçon.	214
7.15 Belleville : comparaison des volumes du modèle local et global (1996-1998).	215
7.16 Belleville : comparaison des volumes du modèle Loire moyenne et des mesures.	216
7.17 Guilly : comparaison des volumes du modèle Loire moyenne et des mesures.	217
7.18 Loire moyenne : volumes déposés ou érodés par tronçon (chroniques prédictives).	218
7.19 Loire moyenne : comparaison entre les volumes Mobise et RubarBE.	219
C.1 Localisation des sites d'extractions entre le Bec d'Allier et Saumur.	247

Liste des acronymes

AITL : Arrondissement Interdépartemental des Travaux de la Loire

B : Formule de Bagnold

BSS : Brier Skill Score

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

CETE : Centre d'Etude Technique pour l'Equipement

CNEPE : Centrale Nucléaire de Production Electrique

DDE : Direction Départementale de l'Equipement

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement

EDF : Electricité de France

EH : Formule d'Engelund et Hansen

GIP : Groupement d'Intérêt Public

HSMF : Hydrogrammes Synthétiques Mono-Fréquence

IGN : Institut Géographique National

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

LIDAR : LIght Detection And Ranging

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

LRPC : Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées

MES : Matière En Suspension

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MPC : Méthode de Perpendiculaires Confondues

MPM : formule de Meyer Peter Müller

NGF : Nivellement Général de la France

QdF : Débit-durée-Fréquence

RHS : River Habitat Survey

SIEL : Système d'Information sur l'Evolution du lit de la Loire

SIG : Système d'Information Géographique

SMN : Service Maritime de Navigation

Liste des notations

a_d	coefficient de la loi de Stenberg	(m^{-1})
a_σ	coefficient de la loi exponentielle pour σ	(-)
A^*	critère d'énergie cinétique (selon Yalin et Da Silva (2001))	(-)
b	facteur d'accélération de l'hydrogramme	(-)
B	largeur de la bande active	(m)
B_{LA}	largeur active	(m)
BSS	Brier Skill Score basé sur les cotes du fond	(-)
$BSSbis$	Brier Skill Score basé sur les volumes	(-)
C_h	coefficient de Chézy	($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)
d	diamètre des sédiments	(m)
d_m	diamètre moyen des sédiments	(mm)
d_{50}	diamètre médian des sédiments	(mm)
D_{char}	distance de chargement	(m)
D^*	diamètre adimensionnel ($D^* = d(g\Delta/\mu^2)^{1/3}$)	(-)
F_r	nombre de Froude	(-)
g	accélération de la pesanteur ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$)	(m/s^2)
h	tirant d'eau	(m)
H	hauteur d'eau moyenne sur la section ($H = S/W$)	(m)
H_{bf}	hauteur d'eau moyenne au débit de plein bord ($H_{bf} = H_{Q2}$)	(m)
I	pente longitudinale du fond	(m/m)
J	pente de la ligne d'énergie	(m/m)
J_l	pertes de charge linéaires par frottement	(m/m)
J_s	pertes de charge singulières	(m/m)
K	coefficient de Strickler global	($\text{m}^{1/3}/\text{s}$)
K_g	coefficient de Strickler des grains	($\text{m}^{1/3}/\text{s}$)
K_p	coefficient de Strickler de peau ($K_p = 21/d_{50}^{1/6}$)	($\text{m}^{1/3}/\text{s}$)
L_r	longueur de la rivière	(m)
L_t	longueur d'un tronçon	(m)
L_v	longueur de la vallée	(m)
m	exposant de la contrainte (formule de transport solide)	(-)

n	nombre de ligne d'eau	(-)
p	porosité	(-)
P	périmètre mouillé	(m)
PK	point kilométrique	(km)
q_{lat}	apports latéraux liquide	(m ³ /s)
q_s	débit solide unitaire	(kg/ms)
q_s^{cap}	capacité solide unitaire	(kg/ms)
$q_{s,lat}$	apports latéraux solide	(m ³ /s)
Q	débit total dans la section	(m ³ /s)
Q_{bf}	débit de plein bord	(m ³ /s)
Q_c	débit seuil de crue	(m ³ /s)
Q_d	écart cumulé de la moyenne annuelle par rapport au module	(m ³ /s)
Q_e	débit seuil d'étiage	(m ³ /s)
Q_s	débit solide sur la section	(kg/s)
Q_s^{cap}	capacité solide de la section	(kg/s)
Q_{JM}	débit journalier moyen	(m ³ /s)
Q_{MA}	débit moyen annuel	(m ³ /s)
Q_{MOD}	module ou débit moyen inter-annuel	(m ³ /s)
$QTVAR$	débit à pas de temps variable	(m ³ /s)
r	sinuosité ($r = L_r/L_v$; cf. Fig. 1.2)	(-)
R_h	rayon hydraulique ($R_h = S/P$)	(m)
S	aire de la section mouillée	(m ²)
S_s	aire de la section solide	(m ²)
t	unité de temps	(s)
t_e	pourcentage du temps où $Q_e < Q < Q_c$	(%)
T	période de retour d'une crue	(an)
U	vitesse d'écoulement moyenne ($U = Q/S$)	(m/s)
u_*	vitesse de cisaillement ($u_* = \sqrt{\tau/\rho}$)	(-)
V_{ex}	volume de sédiment extrait	(m ³)
V	volume de sédiment déposé ou érodé	(m ³)
w_{ch}	vitesse de chute des particules en suspension	(m/s)
W	largeur au miroir	(m)
W_{bf}	largeur de plein bord	(m)
x	abscisse curviligne	(m)
X	variable	(-)

y	abscisse transversale	(m)
z	côte de la surface libre	(m)
z_f	cote du fond minimum (point bas)	(m)
Z_f	cote du fond moyenne	(m)
α_c	pentcs des hydrogrammes de crue (montées)	(-)
β	coefficient de quantité de mouvement	(-)
β_c	pentcs des hydrogrammes de crue (descentes)	(-)
δz_f	critère de précision (lissage de la géométrie)	(-)
Δ	densité déjaugée ($\Delta=(\rho_s-\rho_w)/\rho_w = 1.65$)	(-)
ΔS	évolution des surfaces	(m ²)
Δt	décalage temporel entre le pic de crue de la Loire et le pic des affluents	(h)
ΔV	évolution des volumes	(m ³)
Δz	évolution du lit	(m)
λ	coefficient reliant le débit de l’affluent à celui de la Loire	(-)
Ω	puissance brute	(W/m)
ω	puissance spécifique ($\omega = \Omega/W_{bf}$)	(W/m ²)
ω_{cr}	puissance spécifique critique de mise en mouvement des sédiments	(W/m ²)
σ	facteur d’étendue granulométrique ($\sqrt{d_{84}/d_{16}}$)	(m)
σ_{ϕ_i}	indice de classement de Folk et Ward	(-)
σ_{SO}	indice de classement de Trask	(-)
ρ_w	masse volumique de l’eau ($\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$)	(kg/m ³)
ρ_s	masse volumique des sédiments ($\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$)	(kg/m ³)
γ	poids volumique de l’eau ($\gamma = \rho_w g$)	(N/m ³)
μ	viscosité dynamique	(kg/ms)
ν	viscosité cinématique ($\nu = \mu/\rho$)	(m ² /s)
τ	contrainte hydrodynamique au fond	(N/m ²)
τ_{cr}	contrainte critique de mise en mouvement des sédiments	(N/m ²)
τ_{eff}	contrainte efficace	(N/m ²)
τ_{fd}	contrainte due à la rugosité de forme	(N/m ²)
τ_{sd}	contrainte due à la sinuosité	(N/m ²)
τ_{sf}	contrainte due à la rugosité de peau	(N/m ²)
τ^*	contrainte adimensionnelle de Shields	(-)
τ_{cr}^*	contrainte adimensionnelle critique de mise en mouvement des sédiments	(-)

Introduction

1 Introduction

Au cours de ces derniers siècles, les systèmes fluviaux, influencés par les actions anthropiques, se sont considérablement modifiés. La compréhension de ces évolutions est complexe et les approches utilisées pour expliquer les phénomènes observés varient selon les disciplines. La liaison entre une approche géomorphologique et hydraulique semble pertinente pour analyser et modéliser les évolutions des lits fluviaux à grande échelle de temps et d'espace. Après avoir exposé le contexte général de l'étude, quelques notions fondamentales de géomorphologie fluviale et de modélisation sont rappelées. Enfin, les objectifs de ce travail, la problématique du site d'étude et la démarche scientifique sont présentés.

1.1 Contexte général de l'étude

Le développement urbain, la construction d'infrastructures, l'extraction de graviers dans le lit des cours d'eau ou l'arrêt des dragages, ainsi que le changement climatique contribuent à modifier l'équilibre sédimentaire existant au sein du système fluvial et donc à tout le fonctionnement des hydrosystèmes. Ces modifications des apports sédimentaires ont des conséquences au niveau écologique (disparition d'habitat en zones humides...), et économique (endommagement ou ensablement des ouvrages d'art, abaissement de la nappe phréatique, augmentation du risque d'inondation...). La compréhension des évolutions des lits des cours d'eau est un enjeu important pour les scientifiques, les gestionnaires de bassins et les exploitants qui cherchent à mettre en place une gestion durable et pérenne des ouvrages et à anticiper les travaux de restauration environnementale.

Ces dernières années, les progrès technologiques et scientifiques ont permis de faire d'énormes avancées en modélisation hydraulique, en particulier pour calculer l'écoulement dans des géométries de plus en plus complexes. La connaissance et la modélisation numérique des phénomènes de transport solide sont beaucoup moins avancées (Cao et Carling, 2002). De plus, le lit de la rivière se modifiant au cours du temps, peu de données sur l'évolution de sa géométrie et sur le transport solide sont disponibles.

Les besoins d'une approche permettant de modéliser les ajustements du lit à grande échelle de temps (plusieurs décennies) et d'espace (plusieurs centaines de kilomètres) et d'anticiper les ajustements du cours d'eau aux modifications se font ressentir. Cette modélisation des évolutions morphologiques à grande échelle implique plusieurs disciplines ; ainsi la géomorphologie et la sédi-

mentologie fluviale permettent de décrire le fonctionnement passé et présent des cours d'eau de façon exhaustive, l'hydraulique, la quantification du fonctionnement hydraulique et sédimentaire des cours d'eau pendant les crues, et l'hydrologie permet de relier les caractéristiques physiques et climatiques du bassin versant et donc la compréhension de l'évolution du cours d'eau. Ces différentes approches doivent être combinées au mieux afin de définir des outils de modélisation et de prévision pertinents permettant de simuler l'évolution du lit des cours d'eau à grande échelle de temps et d'espace.

1.2 Quelques notions fondamentales de géomorphologie fluviale et modélisation

1.2.1 Les formes fluviales et leurs évolutions

1.2.1.1 Les styles fluviaux

Les cours d'eau se différencient d'abord selon le nombre de chenaux (chenal unique ou chenaux multiples). Quatre styles fluviaux sont ensuite généralement distingués : les rivières à lit rectiligne, les rivières à méandres, les rivières en tresses et les rivières à lits anastomosés (Fig. 1.1).

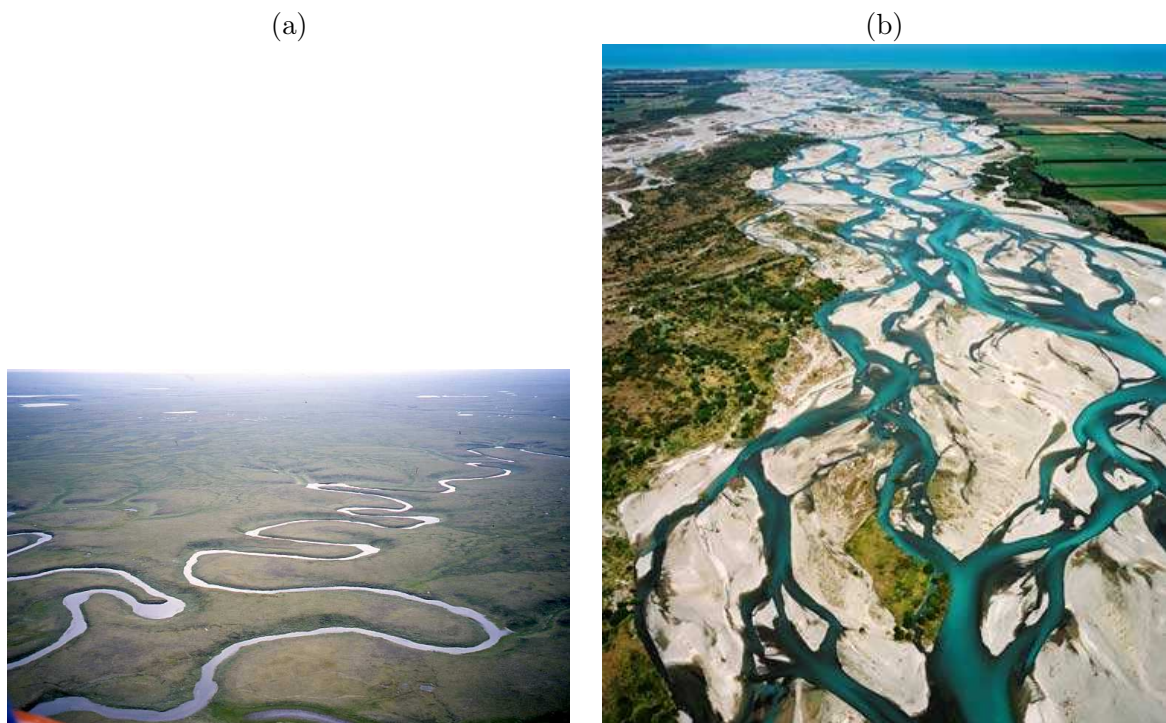


FIGURE 1.1 — Exemples de formes de cours d'eau : (a) méandres sur la rivière Yama en Sibérie (source : Ólafur Ingólfsson, 1997, disponible sur http://www3.hi.is/~oi/siberia_photos.htm), (b) Tresses de la rivière Rakaia en Nouvelle Zélande (source : <http://www.teara.govt.nz/en/water-resources/5/3/2>).

Les rivières à lit rectiligne

Une rivière rectiligne n'existe pas de façon naturelle sauf si le facteur géologique détermine le tracé rectiligne (Bridge, 2005) ; ce style fluvial est souvent associé (ou est une conséquence) de travaux de rectification menés par l'homme.

Les rivières à méandres

Les rivières à méandres sont généralement des cours d'eau de plaine aux pentes moyennes ou faibles présentant un ratio d'aspect (c'est à dire le ratio de la largeur de la rivière sur sa profondeur moyenne) moyen ou petit (Knighton, 1998). Les formes des méandres peuvent être naturelles (dans les stocks alluvionnaires homométriques) ou conditionnées par des causes artificielles (endiguement). La qualification de méandrique est liée à la valeur de sinuosité. L'indice de sinuosité r se calcule en faisant le rapport entre la longueur développée de la rivière L_r et la longueur de la vallée L_v (Fig. 1.2). On distingue ainsi les cours d'eau sinueux pour lesquels $1,05 \leq r < 1,5$ des cours d'eau à méandres pour lesquels $r > 1,5$. La valeur de r caractéristique des méandres varie selon les auteurs. La sinuosité doit être supérieure à 1,5 selon Leopold et Wolman (1957) et Rust (1978) et à 1,3 selon Brice (1975).

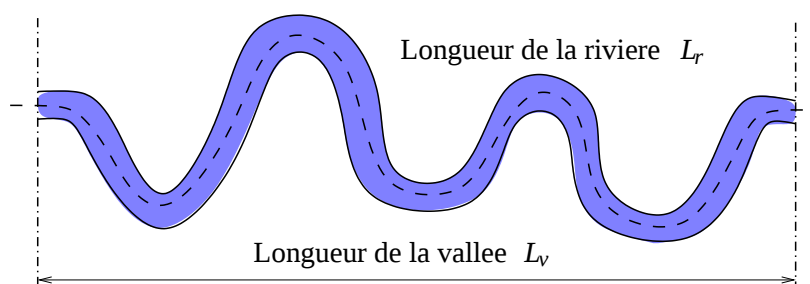


FIGURE 1.2 – Schéma illustrant la définition de la sinuosité.

Les rivières en tresses

Le tracé en tresses est généralement associé à une charge de fond excédentaire. Le lit est très large et présente une pente faible. Les rivières en tresses sont caractérisées par des chenaux multiples divergents et convergents qui sont modifiés à chaque crue importante. Le trait complémentaire caractérisant ces cours d'eau est la présence de nombreux bancs (barres sédimentaires) et îles occupant le lit mineur. Les bancs et îles sont généralement peu végétalisés puisque toute végétation naissante dans le lit mineur est arrachée par la crue annuelle ou biennale suivante ce qui permet un rajeunissement fréquent de la végétation alluviale (Tal et Paola, 2010). Des indices de tressage permettant de caractériser les différents tracés en tresses ont été proposés ces quarante dernières années ; la détermination de ces indices repose généralement sur une mesure du nombre de chenaux actifs le long de transects perpendiculaires à l'axe de l'écoulement (Ashmore, 1991; Bridge, 2005)

ou sur le rapport de la longueur totale des chenaux à la longueur du chenal principal (Mosley, 1981; Richards, 1982). Le problème majeur de ces indices est que leur mesure est fortement dépendante du débit au moment de l'observation.

Les rivières à lits anastomosés

Selon Schumm et Lichty (1965), l'anastomose est le fait de systèmes fluviaux peu énergiques, caractérisés par des chenaux stables où domine le transport en suspension. Il s'agit d'un style à chenaux multiples, étroits et profonds (ratio largeur / profondeur faible) et à pente plutôt faible (Smith, 1986). D'après Knighton et Nanson (1993), les facteurs déterminant de l'anastomose sont une puissance d'écoulement limitée, une faible érodibilité des berges et des apports sédimentaires modérés. Nanson et Knighton (1996) préfèrent adopter le terme anabranch et décliner six types différents, dont l'anastomose, caractérisée par la présence d'îles stables et végétalisées, en est la première catégorie.

1.2.1.2 Dynamique morphologique des cours d'eau

Le premier déterminant de la morphologie du cours d'eau est la nature géologique du bassin versant. La dynamique du cours d'eau peut ensuite se décrire très simplement en considérant que la rivière transmet les apports liquides et solides de l'amont vers l'aval en se déformant. La géologie, la pente, la granularité des sédiments, la végétation, le débit liquide Q et le débit solide Q_s constituent les variables de contrôle du système. En fonction des fluctuations de ces variables de contrôle, le cours d'eau se déforme longitudinalement (adaptation de la pente du fond I et donc de la pente d'énergie J), transversalement (changement de la largeur au miroir W et divagation) et verticalement (changement de la hauteur d'eau moyenne H , où H est défini comme le rapport de la section mouillée S sur la largeur au miroir W) pour permettre un transit des débits et de la charge solide (Richards, 1982). Ces trois variables (I , W et H) représentent les degrés de liberté du système (Fig. 1.3).

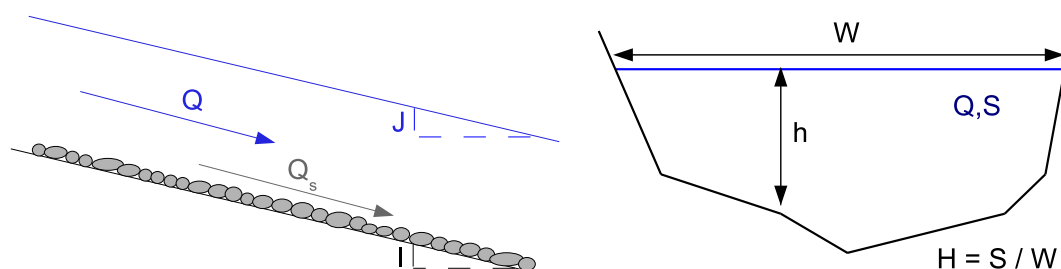


FIGURE 1.3 – Schéma des grandeurs caractéristiques des cours d'eau.

Les différentes variables morphologiques des lits alluviaux à fond mobile s'ajustent à différentes échelles de temps et d'espace (Schumm, 1977; Knighton, 1998). Ainsi le profil en long connaît des ajustements sur de longues périodes de temps (10^3 à 10^4 ans). Les modifications dans le tracé en plan

s'opèrent à moyen terme (10 à 100 ans) alors que les paramètres caractérisant la section transversale s'ajustent à des échelles de temps courtes (< 10 ans). L'ajustement des mésoformes (dunes) du lit se fait à l'échelle de la crue ou de la saison (Jackson, 1976) (Fig. 1.4).

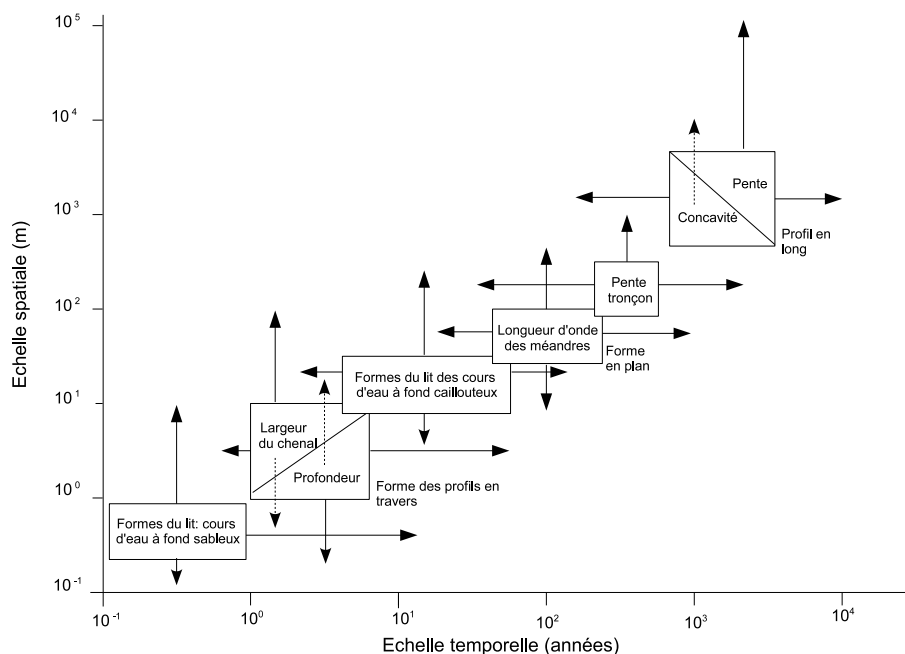


FIGURE 1.4 – Schéma des échelles spatiales et temporelles d'ajustement des cours d'eau (d'après Knighton, 1998)

A l'échelle décennale et séculaire, la dynamique fluviale rend essentiellement compte des évolutions liées aux variations du transport solide en réponse aux modifications climatiques ou anthropiques des bassins versants (Bravard et Peiry, 1993). A l'échelle pluri-annuelle, les ajustements sont les conséquences de la variabilité inter-annuelle du régime de crue (Doering *et al.*, 2007). A l'échelle de la crue, les ajustements du fond résultent d'une mobilisation sédimentaire associée aux hystérésis du transport solide dépendants de la nature de la charge sédimentaire (gravier/sable) et de l'évolution des formes du lit et à leur rétroaction sur l'écoulement (résistance de forme).

La dynamique morphologique d'un cours d'eau dépend du mode de transport des sédiments : la suspension et le charriage sont ainsi distingués. La suspension concerne des particules fines, donc légères, qui sont maintenues dans le corps de l'écoulement, sans contact fréquent avec le lit, sous l'effet des fluctuations turbulentes au sein du liquide. Le charriage désigne le transport sur le fond d'éléments plus grossiers. L'effet des forces hydrodynamiques exercées par l'écoulement se traduit pour les particules par un mouvement de roulement, de glissement, ou de saltation (petits sauts successifs). Le transport solide par charriage concerne les particules grossières, typiquement

de diamètre supérieur à 0,5 mm. Quand les deux modes coexistent, c'est souvent le charriage qui gouverne les évolutions majeures de la morphologie ; les sédiments fins, transportés en suspension, ont moins d'influence sur la morphologie des cours d'eau. Ils peuvent cependant avoir des effets sur la stabilité des berges, sur la consolidation des ensembles de graviers du lit par colmatage et sur la végétalisation du lit.

1.2.1.3 Notion d'équilibre dynamique

En fonction des conditions géologiques, climatiques, anthropiques, de la présence de végétation, le cours d'eau s'adapte et tend vers le développement d'un état d'équilibre, appelé régime, caractérisé par une largeur W , une hauteur d'eau moyenne H et une pente I . Cet équilibre est décrit de manière simplifiée par la balance de Lane (1955) (Fig. 1.5). La dynamique fluviale est ainsi représentée comme l'oscillation permanente de l'aiguille d'une balance dont l'un des plateaux serait rempli de sable et l'autre d'eau. Pour un matériau de diamètre d , un débit solide Q_s et un débit liquide Q , le système fluvial modifie sa pente d'énergie J afin d'égaliser le taux de travail de transport à effectuer, c'est à dire que la pente s'ajuste jusqu'à ce que le débit solide sortant égale le débit solide entrant.

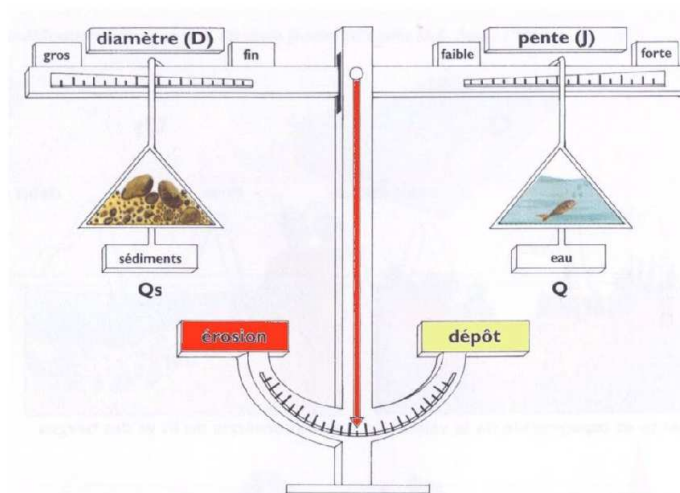


FIGURE 1.5 – Principe de l'équilibre dynamique (d'après Lane, 1955).

Cet équilibre des cours d'eau est traduit par la théorie du régime, débutée avec des études sur des chenaux rectilignes à fond plat. Les travaux de Lacey (1929) définissent ainsi les caractéristiques géométriques de la section d'un canal X selon la formule :

$$X = \alpha Q^n \quad (1.1)$$

avec X les variables morphologiques (avec par exemple $X = P$, $X = H, \dots$), et α et n des constantes empiriques.

Yang *et al.* (1981), White *et al.* (1982) et Davies et Sutherland (1983) assument qu'un chenal alluvial atteint sa géométrie d'équilibre lorsque son critère d'énergie cinétique A^* atteint un minimum. Les caractéristiques géométriques à l'équilibre sont ainsi déterminées en résolvant simultanément les trois équations suivantes, correspondant respectivement à la résistance à l'écoulement, au transport de sédiment et à la minimisation de l'énergie :

$$Q = f_Q(W, H, I, K) \quad (1.2)$$

$$Q_s = f_{Q_s}(W, H, I, K) \quad (1.3)$$

$$dA^* = 0 \quad (1.4)$$

Cette approche, qualifiée de méthode rationnelle, est complexe à appliquer hors des chenaux expérimentaux. En effet, la résolution des équations nécessite la connaissance de Q_s et une définition physique de A^* . Yalin et Da Silva (2001) proposent une résolution de ces équations en remplaçant l'équation de transport par une relation donnant W et une définition de la nature physique de A^* selon les principes de la thermodynamique. Les auteurs démontrent que le cours d'eau tend à ajuster sa pente, sa géométrie et sa rugosité afin de minimiser sa vitesse moyenne U . Ils adoptent ainsi $A^* = U$ et obtiennent les trois équations suivantes qui permettent le calcul de la géométrie d'équilibre, c'est à dire W , H et I , en connaissant le débit Q , la masse volumique de l'eau ρ_w , la viscosité cinématique ν , la masse volumique des sédiments ρ_s , le diamètre médian des sédiments d_{50} et l'accélération de la pesanteur g .

$$F_r = \frac{Q^2}{gW^2H^3} \quad (1.5)$$

$$W = \alpha \sqrt{Q/u_*} \quad (1.6)$$

$$F_r = C_h^2 J \rightarrow \min \quad (1.7)$$

avec F_r le nombre de Froude, α un coefficient empirique, C_h le coefficient de Chézy et Q le débit. La détermination de ce débit représentatif, caractéristique du régime fait encore débat parmi les scientifiques et est discutée dans le paragraphe 1.2.2.2.

1.2.1.4 Influence des actions anthropiques

Les modifications d'origine anthropique, destinées à améliorer l'utilisation du corridor fluvial, ont indéniablement une influence sur les formes fluviales et la dynamique morphologique. Les digues, construites pour protéger les vals des crues, tendent à favoriser l'incision du chenal et à figer les

formes fluviales en limitant les divagations du lit. Les épis construits pour améliorer la navigabilité des fleuves pendant les périodes d'étiage favorisent également la chenalisation et l'incision des lits en concentrant les écoulements dans le chenal principal. Les extractions massives de granulats en lit mineur, débutées après la seconde guerre mondiale dans de nombreux pays européens, ont également contribué à une incision du lit.

Les barrages et les ouvrages d'art influencent le transport de sédiments et donc la dynamique fluviale. L'urbanisation des corridors fluviaux et les modifications des pratiques agricoles et pastorales influent aussi indirectement sur la morphologie des rivières.

Les conséquences de ces actions anthropiques sur le système fluvial ont été largement étudiées mais il est souvent complexe de distinguer précisément l'influence de chaque action (Bravard *et al.*, 1997; Surian et Rinaldi, 2003; Martin-Vide *et al.*, 2010).

1.2.2 Classifications des cours d'eau

La notion de classification d'un cours d'eau mérite d'être définie ; ainsi une classification permet de regrouper des entités sur la base de similarités. Cette notion diffère de la sectorisation qui est définie par une succession d'entités emboîtées. En toute rigueur, la sectorisation doit précéder la classification ; ainsi, le cours d'eau segmenté en se basant sur les paramètres de contrôles (affleurement rocheux) peut ensuite être caractérisé en définissant les variables de réponse (ratio de la largeur sur la profondeur par exemple). Dans la réalité, ces concepts sont généralement croisés. Ainsi, dans de nombreuses approches les variables caractéristiques d'un cours d'eau permettent le découpage du site d'étude (Rosgen, 1994).

Différentes échelles spatiales (de la vallée jusqu'au plus petit banc de sédiment) sont également envisageables pour étudier l'évolution d'un cours d'eau (cf. Fig. 1.4). Les mécanismes mis en jeu, les paramètres explicatifs des phénomènes étudiés et les méthodologies qui en découlent sont également liés aux échelles temporelles d'observation. Ainsi, chaque approche correspond à une échelle spatiale et temporelle précise et aux spécificités des différentes disciplines scientifiques (Kondolf *et al.*, 2003).

Cette synthèse décrit les principales approches de classifications des cours d'eau existantes pour des analyses temporelles à moyen terme (c'est à dire entre quelques années et un siècle) et nous permet d'extraire les éléments orientant notre méthodologie de découpage en tronçons géomorphologiquement homogènes. Le tronçon homogène est caractérisé par des apports liquides et solides constants (c'est à dire pas de zones de confluence / diffuence) et des caractéristiques hydrauliques, morphologiques et géométriques similaires. Le regroupement proposé ici consiste en trois groupes principaux : les classifications qualitatives, les classifications introduisant la notion de débit de plein bord et celles basées sur la puissance fluviale. L'approche développée par Rosgen (1994), probablement la plus utilisée en géomorphologie fluviale, est ensuite présentée.

1.2.2.1 Classifications qualitatives

Les premières notions de classifications des cours d'eau sont basées sur une approche qualitative et descriptive (Brice 1975; Rust 1978). De sa source à son estuaire, un cours d'eau rencontre des conditions variables de pente, substrat, climat, végétation, sa forme évoluant en conséquence.

Les rivières à sable, constituées de grains dont le diamètre médian est inférieur à 2 mm avec une granularité pratiquement uniforme, sont ainsi distinguées des rivières à graviers dont le diamètre médian peut dépasser plusieurs décimètres avec une étendue granulométrique élevée. Ces différences de charge sédimentaire expliquent la distinction entre les deux typologies des cours d'eau, les différences observables dans leur tracé en plan et en long n'en étant que les conséquences (Ramez et Paquier, 2004).

La classification de Schumm (1977) permet de délimiter les tronçons d'un cours d'eau en se basant sur le mode de transport solide dominant et le style fluvial (cf. paragraphe 1.2.1.1). Les variables caractéristiques et la stabilité des chenaux sont reliées aux différentes formes fluviales (Fig. 1.6).

Thorne (2002) propose une classification (Catchment Baseline Survey, CBS) basée sur une étude du bassin versant pour déterminer la physiologie, la géologie, l'hydrologie, l'utilisation du terrain et la géomorphologie du bassin. Cette classification est basée sur l'utilisation de documents d'archives (cartes, photos..) complétée par des visites sur le terrain. Le CBS est complété par un audit fluvial qui permet de rattacher le transport des sédiments, la stabilité du cours d'eau et l'évolution morphologique à la dynamique sédimentaire globale du système. Enfin, les processus fluviaux sont examinés. La méthode proposée est utilisée pour des études de gestion des cours d'eau et dans les études de faisabilité précédant l'aménagement du cours d'eau.

Cependant, le découpage d'un cours d'eau selon ses formes fluviales ne permet pas de comprendre la morphodynamique. En effet, des formes fluviales identiques peuvent être le résultat de processus différents (Nanson et Knighton, 1996). D'autres paramètres sont nécessaires à une étude plus complète de la dynamique fluviale.

1.2.2.2 Classifications introduisant la notion de débit de plein bord

Le lit d'une rivière est essentiellement modelé par les débits de crue. Toutefois les débits qui donnent au cours d'eau sa géométrie moyenne sont ceux qui transportent le plus de matériaux compte tenu de leur capacité de transport et de leur fréquence. Nash (1994) analyse 55 cours d'eau américains afin de déterminer la fréquence de ce débit efficace caractéristique des évolutions morphologiques ; les périodes de retour déterminées sont très variables, allant d'une semaine à quelques décades. Ce débit efficace, morphogène, ou dominant, est souvent assimilé au débit de plein bord. Par définition, ce débit de plein bord représente la capacité d'écoulement du lit mineur juste avant le débordement

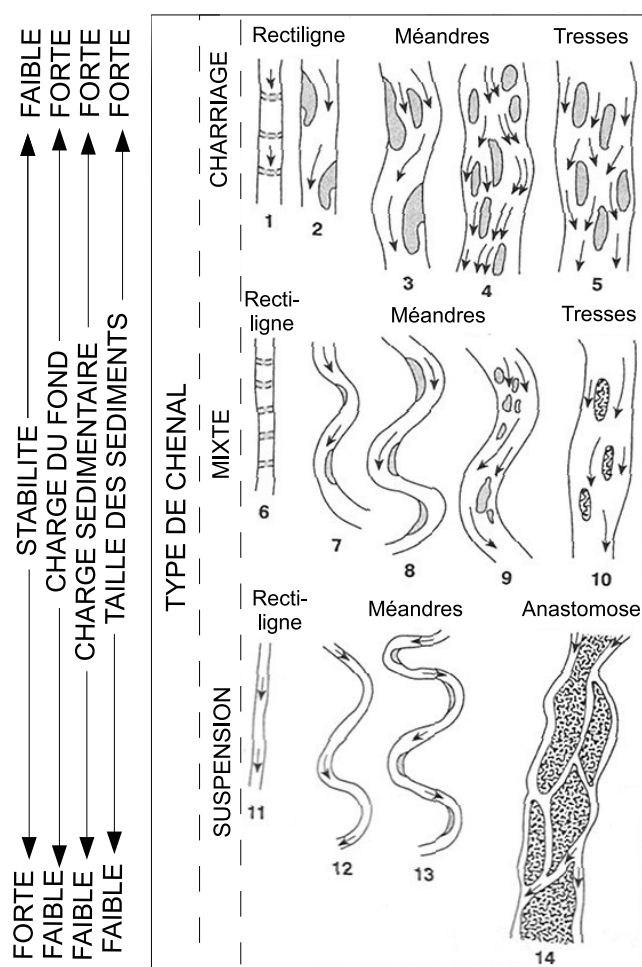


FIGURE 1.6 – Classification de Schumm (1977)

dans la plaine d'inondation.

Les différentes significations données au débit de plein bord ont créé une ambiguïté quant à son estimation (Williams, 1978). De nombreux auteurs ont étudié la fréquence d'un tel débit ; Leopold et Wolman (1957) et Richards (1982) estiment la période de retour du débit de plein bord entre 1,5 et 2 ans. La fréquence du débit de plein bord varie en fonction des caractéristiques lithologiques du bassin versant (Petit et Pauquet, 1997), et de la superficie du bassin versant (Hey, 1975). Il faut toutefois souligner que des variations sont possibles le long d'une rivière (Williams, 1978; Andrews, 1980; Pickup et Warner, 1976). Sur le terrain, la détermination d'un tel débit peut-être complexe (Navratil *et al.*, 2006), plus particulièrement pour les cours d'eau à chenaux multiples.

Les auteurs ont ensuite essayé de relier les caractéristiques de formes à des critères quantitatifs. Leopold et Maddock (1953) définissent les relations de géométrie hydraulique reliant la largeur W ,

la hauteur d'eau moyenne H et la vitesse U au débit Q :

$$W = aQ^b H = cQ^f U = kQ^m \quad (1.8)$$

avec a, b, c, f, k et m , des constantes empiriques.

Leopold et Wolman (1957) proposent de distinguer les rivières rectilignes, en tresses et à méandres en définissant une relation entre le débit de plein bord Q_{bf} et la pente longitudinale du fond I . La relation a été établie à partir d'un ensemble de mesures réalisées sur des rivières américaines et indiennes. Cette approche a ensuite été élargie aux chenaux anastomosés (Knighton et Nanson, 1993).

1.2.2.3 Classification basée sur la puissance fluviale

La notion de puissance fluviale fut introduite par Rubey (1933) et Knapp (1938), puis développée par Bagnold (1966), dans le but d'estimer la capacité de transport sédimentaire d'un cours d'eau. La puissance brute Ω , exprimée en W/m, est donnée par l'équation :

$$\Omega = \gamma Q_{bf} J \quad (1.9)$$

dans laquelle γ est le poids volumique de l'eau ($\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$), Q_{bf} est le débit de plein bord et J la pente moyenne de la ligne d'énergie assimilée à la pente de la ligne d'eau sur le tronçon considéré.

Pour s'affranchir de l'effet de taille du cours d'eau, la puissance brute est rapportée à une unité de surface, c'est la puissance spécifique ω exprimée en W/m² :

$$\omega = \frac{\Omega}{W_{bf}} = \tau \times u = \frac{\gamma u^3}{C^2} \quad (1.10)$$

dans laquelle W_{bf} est la largeur moyenne du chenal à plein bord (m).

En supposant une contrainte critique de mise en mouvement directement proportionnelle au diamètre médian des sédiments d_{50} , et le profil vertical de vitesse logarithmique, Bagnold (1980) définit une puissance critique de mise en mouvement telle que :

$$\omega_{cr} = 290 d_{50}^{3/2} \log_{10} \left(\frac{12H}{d_{50}} \right) \quad (1.11)$$

La puissance est donc fonction des conditions hydrologiques et de la morphologie générale (pente et forme de la vallée) et locale (style fluvial) du cours d'eau. Sa variabilité est donc à la fois spatiale (morphologie différente selon les tronçons de rivière) et temporelle (notamment sur le court terme par le biais des crues). La puissance fluviale a tendance à décroître de l'amont vers l'aval et montre généralement un pic dans la zone intermédiaire des cours d'eau (Knighton, 1999).

Dans une étude visant à sectoriser le Vidourle afin d'en améliorer la gestion, Bernot *et al.* (1996) aboutissent à des résultats comparables par deux méthodes de sectorisation différentes : la première

repose sur l'exploitation de données géomorphologiques et biotiques par une analyse factorielle à composante principale ; la seconde approche est basée sur l'évolution longitudinale de la puissance spécifique calculée sur des tronçons de 1 km.

Nanson et Knighton (1996), Bernot *et al.* (1996), Schmitt *et al.* (2001) soulignent la pertinence d'utiliser la puissance spécifique pour sectoriser les rivières tout en soulignant la nécessité de prendre en compte des variables supplémentaires (comme la granularité des sédiments, la sinuosité, la taille des îles, etc...) pour caractériser la morphologie et la dynamique des divers tronçons homogènes délimités par la puissance spécifique.

Schmitt *et al.* (2000) reprennent la méthode des gradients d'énergie longitudinaux de Bernot *et al.* (1996) et l'affinent en appliquant un traitement statistique multi varié. Les auteurs estiment la largeur du lit mineur grâce à l'équation adaptée de Leopold et Maddock (1953). En partant du constat que la prédiction des styles fluviaux est basée sur une connaissance de la géométrie des cours d'eau, Van den Berg (1995) propose d'utiliser la puissance spécifique en se basant sur des valeurs indépendantes. Les auteurs adoptent ainsi le débit correspondant à la crue annuelle moyenne, la pente du fond de vallée et une estimation de la largeur basée sur l'équation de Lacey (1929) pour définir la puissance spécifique. L'estimation de la largeur est ainsi reliée à un coefficient variant en fonction de la végétation et du diamètre des sédiments. La prise en compte de la pente du fond de vallée paraît plus pertinente. En effet, c'est la pente de la vallée, et non celle du talweg, dépendante de la sinuosité qui exerce un contrôle sur le style fluvial des cours d'eau alluviaux. Lewin et Brewer (2001) critiquent l'approche de Van den Berg (1995) et remettent en question le calcul de la largeur du lit. Lewin et Brewer (2001) déterminent ainsi la puissance spécifique avec des valeurs de largeur relevées sur le terrain et constatent une augmentation significative de la valeur de la puissance.

1.2.2.4 Classification de Rosgen

Une des méthodologies les plus appliquées actuellement aux Etats-Unis est l'approche de Rosgen (1994), qui mérite donc un développement particulier. La méthode différencie huit styles fluviaux majeurs (de A à G) en se basant sur la forme fluviale, le ratio d'encaissement (rapport de la largeur de la vallée sur la largeur de la rivière), le rapport largeur de plein bord sur profondeur de plein bord et la sinuosité. Un deuxième niveau permet de distinguer 42 types de tronçons en se basant sur la pente moyenne et la nature des matériaux du lit (Fig. 1.7). Ces paramètres sont considérés à une échelle hectométrique et sont ensuite moyennés. La longueur des tronçons délimités varie ainsi entre quelques centaines de mètres et plusieurs kilomètres.

Rosgen (1994) propose également un tableau d'interprétation qui permet d'évaluer la sensibilité du tronçon aux perturbations hydrologiques ou sédimentaires, son potentiel de (ré)ajustement, sa charge sédimentaire, le potentiel d'érosion des berges et l'influence de la végétation sur la stabilité

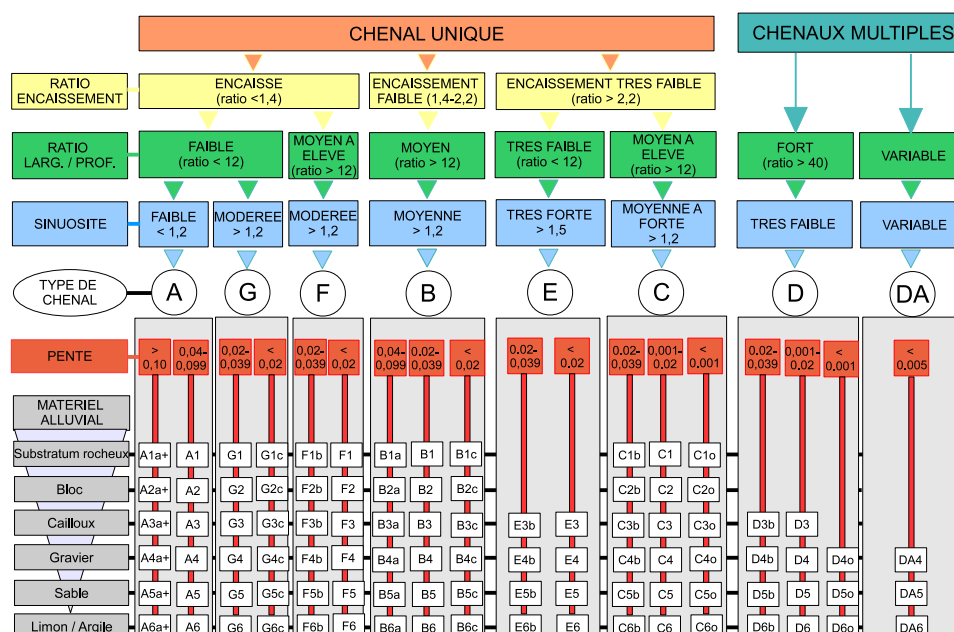


FIGURE 1.7 – Détails de la classification de Rosgen (adapté de Rosgen (1994))

du ratio W_{bf}/H_{bf} . Un extrait de ce tableau pour quelques tronçons de type ‘B’ et ‘D’ est présenté sur le tableau 1.1.

Type	Sensibilité aux perturbations	Potentiel d’ajustement	Recharge sédimentaire	Erosion des berges	Influence de la végétation
B4	modérée	excellent	modérée	faible	modérée
B5	modérée	excellent	modérée	modérée	modérée
D4	très forte	faible	très forte	très forte	modérée
D5	très forte	faible	très forte	très forte	modérée
D6	forte	faible	forte	forte	modérée

TABLE 1.1 – Extrait du tableau d’interprétation des évolutions des tronçons de Rosgen (1994).

Ces « pronostics » d’ajustement sont identiques pour certains types de tronçons (D4 et D5 dans notre exemple). L’utilisation de ce tableau d’interprétation semble, à première vue, délicate pour la planification des travaux de restauration des cours d’eau. La méthodologie de Rosgen (1994) est pourtant utilisée par de nombreux organismes américains comme l’Agence de l’Environnement Américaine (USEPA), le Département de l’Agriculture et des Forêts (USDA) et l’Agence de Conservation des Ressources Naturelles (NRCS). L’application de la méthodologie permet ainsi l’évaluation de l’état écologique des cours d’eau, l’évaluation de l’impact des paturages à proximité des cours d’eau et la planification des projets de restaurations (Juracek et Fitzpatrick, 2003).

Hey (2006) applique la méthode sur des cours d'eau américain et anglais et confirme son efficacité. Kondolf *et al.* (2001) rapportent les résultats des travaux de restauration effectués sur un tronçon de 0,9 km du cours d'eau Uvas Creek en Californie. La restauration de ce tronçon défini par un type C4, selon la classification de Rosgen (1994), a été complètement balayée par une crue de période de retour de 6 ans moins d'un an après la réalisation des travaux. L'étude des données historiques permet à Kondolf *et al.* (2001) d'émettre des doutes sur l'approche employée. Miller et Ritter (1996) et Simon *et al.* (2007) critiquent également cette approche en soulignant les difficultés à reproduire la méthodologie. La détermination du niveau de plein bord sur le terrain est délicate (Williams, 1978). Un autre défaut est la confusion des matériaux prélevés sur le lit avec ceux prélevés sur les berges (Simon *et al.*, 2007). Enfin il faut souligner que cette méthode ne considère pas les régimes hydrologiques.

1.2.3 Modélisation en géomorphologie fluviale

1.2.3.1 Modèles d'évolution

En géomorphologie fluviale, on peut distinguer les modèles selon les catégories suivantes :

- les modèles conceptuels, qui sont relativement simples à mettre en oeuvre mais restent descriptifs (Davis 1899; Simon 1989),
- les modèles empiriques, qui établissent des relations entre les paramètres géométriques du lit et le débit, (Leopold et Maddock, 1953) sont également simples à appliquer mais peu précis,
- les modèles analytiques, qui établissent ces relations en s'appuyant sur des lois physiques (White *et al.*, 1982),
- les modèles numériques qui s'appuient sur la puissance de calcul informatique et permettent de calculer des phénomènes plus complexes.

De nombreux codes unidimensionnels ont été développés ces vingt dernières années. On peut citer parmi les plus connus : HEC6 (U.S. Army Corps of Engineers (USACE), 1992), SEDICOU (Belleudy, 2000), ISIS (HR Wallingford Ltd and Sir William Halcrow & Partners, 2002), IALLUVIAL (Karim et Kennedy, 1982), SEDROUT (Hoey et Ferguson 1994; Ferguson *et al.* 2001) et RUBARBE (El Kadi Abderrezzak et Paquier, 2009). Ces approches unidimensionnelles présentent des limites. En effet, les géométries complexes sont difficilement interprétées dans un modèle 1-D. De plus, les phénomènes de dépôt/érosion sur les berges ne sont pas bien représentés (Piegay *et al.*, 2005). Une répartition différenciée des dépôts et érosions dans la section en travers est délicate voire impossible. La dynamique différente entre deux bras ne peut être rendue avec un modèle 1-D classique. Les approches permettant la construction d'un modèle maillé (ISIS) permettent ce type de calcul, mais le calage de ces modèles d'évolution est complexe.

De nombreux codes bidimensionnels (MIKE21, DELFT2D, RUBAR20TS, TELEMAC2D et SYPHE) voire tridimensionnels (TELEMAC3D, MIKE3, DELFT3D) de modélisation du transport solide ont aussi été développés ces 20 dernières années mais leur mise en oeuvre est plus délicate ; les données nécessaires, et surtout les durées de calcul en font des outils quasi impossibles à appliquer pour modéliser de long biefs sur de longues périodes.

Le choix du modèle est ainsi conditionné par les objectifs définis et par la quantité de données topographiques, hydrologiques et sédimentaires disponible. Avant de choisir un modèle, il s'agit donc de distinguer le type de phénomènes que l'on souhaite modéliser : la topographie du lit à une échelle fine (mésoformes), l'évolution du profil en long (phénomènes d'exhaussement et d'incision du lit), l'évolution du profil en travers (élargissement ou rétractation) ou l'évolution du style fluvial. Au vu de nos objectifs de modélisation d'évolution du lit sur un long bief (plusieurs centaines de kilomètres) à une échelle de temps longue (quelques décennies), seuls les modèles 1-D sont décrits dans les paragraphes suivants.

1.2.3.2 Définition des variables

Avant de décrire les équations caractérisant la modélisation, il s'agit de donner la définition du vocabulaire utilisé dans la suite du manuscrit ; en effet, certains termes sont propres à la géomorphologie fluviale et d'autres à la modélisation hydraulique. La largeur de la bande active B , par exemple, terme utilisé en géomorphologie fluviale, correspond à la zone non végétalisée du lit de la rivière et comprend les chenaux et les bancs fréquemment remaniés lors des crues (Bravard et Petit, 1997). La largeur active B_{LA} , en revanche, est un terme de modélisation qui définit la partie du lit où le transport de sédiment se déroule (ou plus précisément la partie de la bande active où le transport se déroule) ; cette largeur correspond ainsi à une zone sous l'eau où $\tau > \tau_{cr}$. Cette largeur active B_{LA} , généralement équivalente à la largeur du fond ou à la largeur au miroir qui sont proches pour des débits considérés dans la phase de charriage, est ainsi habituellement inférieure à la largeur de bande active B (Fig. 1.8).

La définition des lits caractérisant le cours d'eau diffère également ; ainsi en géomorphologie fluviale, trois lits sont généralement distingués : le lit mineur, le lit moyen et le lit majeur. Le lit mineur correspond à la section usuelle de l'écoulement ; le lit moyen assure le transit entre le lit mineur et le lit majeur et inclut donc les îles et les berges. Quant au lit majeur, il correspond à la plaine alluviale et ne fonctionne que pour les crues extrêmes. La distinction entre le lit moyen et le lit majeur n'est pas toujours évidente, en particulier pour les rivières de plaine présentant un contexte climatique régulier (Garry *et al.*, 2002). Cette distinction n'est pas faite en modélisation, en particulier pour la modélisation numérique 1D où l'on ne peut distinguer objectivement que deux rugosités transversales, celle de la bande active (sédiments) et celle du lit moyen (îles et berges)

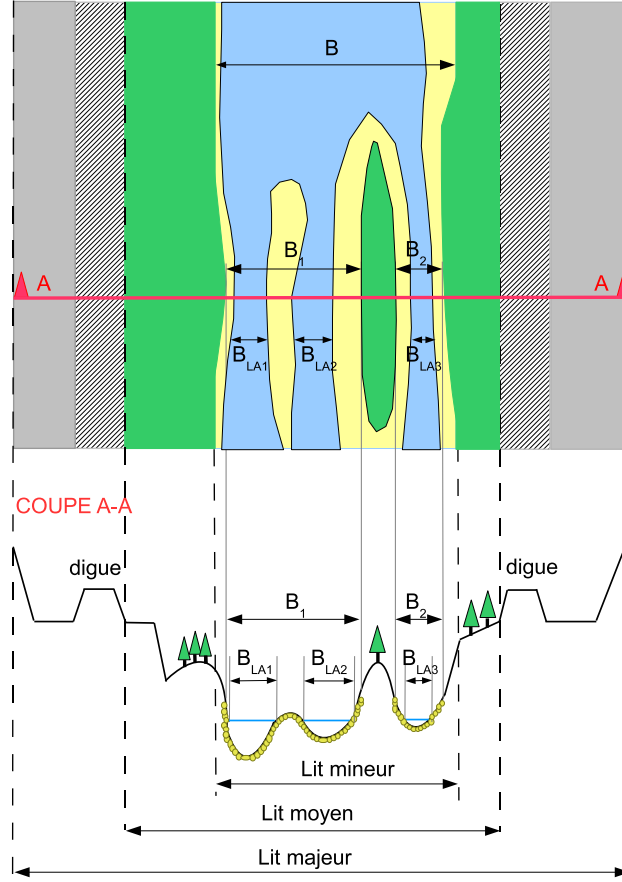


FIGURE 1.8 – Schéma définissant les caractéristiques d'un cours d'eau en plan et en coupe.

végétalisées). Dans la suite du manuscrit le lit moyen et le lit majeur ne seront pas distingués ; en effet, les digues constituant la limite de l'étendue transversale de l'étude, il n'y a pas lieu de différencier le lit moyen du lit majeur. Les grandeurs caractérisant la vue en plan et le profil transversal du cours d'eau sont rappelées sur la figure 1.8.

1.2.3.3 Modélisation hydraulique

Le calcul hydraulique repose sur les équations de Barré de Saint Venant basées sur les principes de conservation de la masse et de la quantité de mouvement. La formulation complète en 1D s'écrit :

– Equation de continuité :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat} \quad (1.12)$$

– Equation dynamique :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{S} \right) + gS \frac{\partial z}{\partial x} = -gS(J_l + J_s) + kq_{lat}U \quad (1.13)$$

avec S la section mouillée, t le temps, Q le débit, x l'abscisse en long, q_{lat} les pertes ou apports latéraux, β le coefficient de quantité de mouvement, g l'accélération de la pesanteur, z la côte de la surface libre, J_l les pertes de charge linéaires par frottement, J_s les pertes de charge singulières (avec $J = J_l + J_s$), U la vitesse moyenne sur la section et k un coefficient de transfert de quantité de mouvement généralement pris égal à 1.

La différence des vitesses entre lit mineur et lit majeur est simulée grâce à la formulation Debord (Nicolet et Uan, 1979), qui permet d'estimer le coefficient de quantité de mouvement β . Ce système d'équations aux dérivées partielles peut s'écrire sous forme d'un système hyperbolique non linéaire. Un grand nombre de schémas permettent sa résolution et la prise en compte de discontinuités dans la solution. C'est le cas du schéma explicite de Godunov 2^{nd} ordre qui résout le système par concaténation de solutions aux problèmes de Riemann aux interfaces. Ce type de résolution permet une modélisation cohérente des phénomènes singuliers comme le ressaut hydraulique ou la propagation d'une onde de crue.

1.2.3.4 Notions de transport solide

La contrainte au fond permet de définir la relation entre l'écoulement et le lit du cours d'eau. Cette contrainte totale τ est la somme des contraintes dues à la rugosité de peau (τ_{sf}), à la rugosité de forme (τ_{fd}) et à la résistance due à la sinuosité (τ_{sd}) ($\tau = \tau_{sf} + \tau_{fd} + \tau_{sd}$). D'après Meyer-Peter et Müller (1948), la contrainte efficace pour le transport des sédiments est équivalente à la contrainte de peau ($\tau_{eff} \equiv \tau_{sf}$). τ_{eff} est défini selon la relation :

$$\tau_{eff} = \tau \left(\frac{K}{K_p} \right)^{3/2} \quad (1.14)$$

avec τ_{eff} la contrainte efficace, τ la contrainte totale ($\tau = \gamma R_h J$), K le coefficient de rugosité de Strickler total et K_p la rugosité de peau ou de grain tel que $K_p = 21/d_{50}^{1/6}$ (Strickler, 1923).

La contrainte seuil, ou contrainte critique de mise en mouvement τ_{cr} , permet de caractériser les valeurs de la contrainte. Ainsi, la contrainte critique est définie comme la contrainte au delà de laquelle les grains sont en mouvement. La notion de contrainte seuil est discutable ; en effet il n'est pas possible que tous les grains d'un lit naturel présentent tous la même contrainte de début d'entraînement. La contrainte critique peut-être calculée en appliquant la formule de Soulsby et Withehouse (1997) pour déterminer le paramètre de Shields critique :

$$\tau_{cr} = \tau^* g(\rho_s - \rho_w) d_{50} \quad (1.15)$$

$$\tau^* = \frac{0.30}{1 + 1.2D^*} + 0.055[1 - \exp(-0.020D^*)] \quad (1.16)$$

avec τ^* le paramètre de Shields critique de mise en mouvement des sédiments, g l'accélération de la pesanteur, ρ_s la masse volumique du matériau, ρ_w la masse volumique de l'eau, d_{50} le diamètre médian des grains et D^* le paramètre adimensionnel des sédiments défini par :

$$D^* = d_{50}[\Delta g / \nu^2]^{1/3} \quad (1.17)$$

où Δ est la densité relative et ν la viscosité cinématique.

Les formules de transport solide sont nombreuses et une revue détaillée de toutes les formules existantes n'est pas notre objectif. Seules les trois formules semi-empiriques les plus utilisées sont détaillées ci-après. La formule empirique de Meyer-Peter et Müller (1948), basée sur la contrainte au fond, donne la capacité de transport solide par charriage pour une granularité uniforme :

$$q_s^{cap} = 8(\tau_{eff}^* - 0.047)^{3/2} \sqrt{\Delta g d^3} \quad (1.18)$$

où q_s^{cap} est la capacité solide, τ_{eff}^* la contrainte efficace adimensionnelle, d le diamètre des sédiments et Δ , la densité déjaugée ($\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w = 1.65$ avec ρ_w et ρ_s les masses volumiques de l'eau et du matériau solide).

La formule de Bagnold (1966) s'appuie sur le concept de puissance d'écoulement, elle permet de calculer la capacité de transport solide total (charriage et suspension) pour les sédiments :

$$q_s^{cap} = K \rho_s R_h^{5/3} J^{3/2} (0.17 + 0.01 K R_h^{2/3} J^{1/2} w_{ch}) \quad (1.19)$$

avec w_{ch} la vitesse de chute des particules en suspension. Il est à noter que le premier terme de l'équation correspond au charriage et le second à la suspension.

La loi d'Engelund et Hansen (1967) donne le transport solide total :

$$q_s^{cap} = K \frac{0,05 U^2 R_h^{3/2} J^{3/2}}{\Delta d \sqrt{g}} \quad (1.20)$$

1.2.3.5 Modélisation sédimentaire

Les équations précédentes permettant le calcul hydraulique sont établies pour un lit à fond fixe. Les variables caractérisant le transport de matériaux au passage d'une section donnée sont le débit solide Q_s et la section solide S_s . Il est possible de formaliser la conservation de la masse solide de la

même façon que l'équation de conservation liquide :

$$(1 - p) \frac{\partial S_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = q_{s,lat} \quad (1.21)$$

avec p la porosité du matériau, S_s la section solide, Q_s le débit solide et $q_{s,lat}$ le débit latéral solide par unité de longueur. Le débit solide Q_s est estimé à partir de la largeur active B_{LA} , soit $Q_s = q_s B_{LA}$, avec q_s le débit solide par unité de largeur. Ce dernier est souvent considéré égal à la capacité de transport calculée à partir des formules semi-empiriques de Meyer-Peter et Müller (1948), Bagnold (1966) et Engelund et Hansen (1967). Ces modèles en débit solide sont généralement distingués des modèles en concentration qui calculent la phase solide à partir d'une équation de convection-diffusion. Les modèles en débit solide sont réservés aux cas où la suspension est faible avec des sédiments non cohésifs, alors que les modèles en concentration sont plus adaptés au traitement du transit des particules fines.

Dans ces modèles en débit solide, l'évolution du lit est déduite de l'équation d'Exner (cf. eqn 1.21) sans apport latéral et en posant $S_s = B_{LA}(Z_f - \text{constante})$, afin d'exprimer la conservation de la masse solide :

$$(1 - p) B_{LA} \frac{\partial Z_f}{\partial t} = - \frac{\partial Q_s}{\partial x} \quad (1.22)$$

avec B_{LA} la largeur active du lit, Z_f l'altitude du lit, p la porosité de la couche active, t le temps et x la position longitudinale et Q_s la charge sédimentaire transportée.

1.3 Objectifs et démarche scientifique

Objectifs

La prise en compte des évolutions morphologiques des cours d'eau anthropisés est un enjeu majeur de l'aménagement du territoire. La compréhension de ces processus d'évolution nécessite le développement d'outils permettant d'appréhender de façon globale le fonctionnement du cours d'eau. Il s'agit ensuite de définir des approches permettant de simuler les évolutions morphologiques d'un lit alluvial sur de grands pas d'espaces (plusieurs centaines de kilomètres) et de temps (plusieurs décennies). Ce travail de thèse a pour objectif de proposer des méthodes pour améliorer la compréhension du fonctionnement d'un long cours d'eau et la modélisation à long terme. Ces méthodes sont appliquées et discutées sur la Loire moyenne.

Problématique de la Loire moyenne

La Loire moyenne a été sélectionnée pour développer ces approches. En effet, la Loire, souvent présentée comme le « dernier grand fleuve sauvage d'Europe », a pourtant été aménagée par l'homme.

L'endiguement du fleuve, la construction d'ouvrages de navigation et d'ouvrages d'art, les extractions de granulats en lit mineur, ont contribué à l'enfoncement du lit (Gasowski, 1994), à l'instar des grands cours d'eau européens (Petts *et al.* 1989; Bravard 1994). L'espace alluvial s'est ainsi rapidement transformé, avec des conséquences sur le milieu naturel et les aménagements anthropiques. Les extractions en lit mineur sont interdites depuis les années 1990, une stabilisation progressive du lit est donc attendue. Toutefois, le lit est globalement plus bas qu'historiquement, des affleurements du substratum sont désormais visibles à l'étiage, les chenaux secondaires, moins souvent connectés, se végétalisent. La capacité d'écoulement s'est ainsi fortement réduite avec pour conséquence une augmentation des hauteurs d'eau en crue (Belleudy, 2000).

Suite à l'arrêt des extractions en lit mineur, de nombreuses études et programmes de recherche ont été initiés afin de parfaire les connaissances sur le fleuve et de comprendre les modifications observées. On peut citer entre autres les travaux de l'équipe Pluridisciplinaire du Plan Loire Grandeur Nature et les thèses de Rodrigues (2004) sur l'évolution des chenaux fluviaux de Bréhémont et de Grivel (2008) sur l'évolution des îles entre le Bec d'Allier et Gien.

Dans le cadre du Plan Loire Grandeur Nature, les opérations de restauration ou d'entretien du lit de la Loire visent à améliorer la capacité d'écoulement des crues en limitant les obstacles au passage de l'eau, enrayer l'enfoncement de la ligne d'eau d'étiage en favorisant la mobilisation des sédiments stockés dans les zones marginales (grèves, chenaux secondaires) par le cours d'eau, et la préservation de la diversité biologique des milieux naturels. Les gestionnaires du bassin ont besoin d'un outil global permettant une vision d'ensemble afin de cibler les travaux de restauration et d'entretien du lit.

Démarche scientifique

La compréhension du fonctionnement des cours d'eau est généralement abordée par une approche géomorphologique tandis que la prédiction des évolutions morphologiques se base habituellement sur la modélisation numérique hydro-sédimentaire. Il s'agit donc de coupler l'approche géomorphologique avec l'approche hydraulique, sans oublier l'hydrologie qui permet de définir les apports liquides et solides, pour proposer un modèle d'évolution du lit pertinent.

Le premier enjeu est donc de caractériser les évolutions morphologiques de la Loire moyenne depuis le début du XX^{ème} siècle. Le secteur d'étude est ainsi divisé en tronçons géomorphologiquement homogènes. L'application des méthodologies de sectorisation existantes n'étant pas totalement satisfaisante au vu de la longueur du site d'étude et des pressions anthropiques exercées sur la Loire moyenne, une approche de sectorisation est proposée. L'approche de découpage en tronçons s'appuie sur des paramètres classiques de la géomorphologie fluviale complétée par la prise en compte des seuils naturels ou artificiels. La compréhension des processus d'évolution est ensuite abordée en caractérisant les tronçons avec des paramètres hydro-sédimentaires dont des paramètres obtenus avec

une modélisation hydraulique unidimensionnelle.

Le cours d'eau ainsi découpé, une géométrie simplifiée est dérivée pour chaque tronçon. A partir des données géométriques réelles il s'agit de définir une géométrie équivalente permettant de conserver la représentativité hydraulique et sédimentaire des différents tronçons. Les chroniques de débit sont ensuite simplifiées afin de permettre un gain de temps de calcul en se limitant uniquement à la modélisation des événements morphogènes ; il s'agit également de définir des hydrogrammes de crues « types » afin de dériver des scénarios hydrologiques prédictifs. Ces simplifications de la géométrie et des chroniques de débits sont ensuite introduites dans un modèle 1D hydro-sédimentaire et appliquées sur trois sites de références sur lesquels des données topographiques sont disponibles à plusieurs temps, ce qui permet une certaine vérification. Ces sites, en outre, présentent des styles fluviaux et des degrés d'anthropisation différents.

Les simplifications géométriques et hydrologiques retenues sont ensuite appliquées sur la Loire moyenne afin d'estimer les tendances générales d'évolution du lit pour les différents tronçons. Une plus grande précision est illusoire en pratique compte tenu de l'incertitude sur la validité des formules classiques de transport solide et de l'absence quasi-générale d'un volume de données historiques suffisant. Ces approches de simplification de la géométrie des tronçons et de l'hydrologie apportent ainsi les bases permettant la modélisation de l'évolution morphologique d'un lit alluvial. De plus cette approche à grande échelle permet de donner un cadre morphologique aux études locales déjà menées sur la Loire moyenne.

Plan du mémoire

Ce manuscrit se divise en deux parties ; une première partie présente le site d'étude et ses évolutions morphologiques. Ainsi, après avoir donné une description de la Loire moyenne, le découpage en tronçons géomorphologiquement homogènes et la caractérisation des tronçons sont détaillés. L'analyse des évolutions morphologiques des tronçons ainsi que les évolutions observées sur trois sites de référence est ensuite réalisée.

La deuxième partie du manuscrit expose la modélisation numérique hydro-sédimentaire ; les approches de simplification de la géométrie et des chroniques de débits sont exposées avant d'être testées sur les trois sites de référence. Les approches de simplification retenues sont ensuite appliquées à la Loire moyenne afin de pouvoir modéliser les évolutions du lit à grande échelle avec un temps de calcul convenable.

PREMIÈRE PARTIE

Présentation et évolutions morphologiques de la Loire moyenne

2

Présentation du site d'étude

Cette présentation du site d'étude détaille succinctement la situation géographique et géologique de la Loire, avant de se concentrer sur la Loire moyenne et de détailler ses caractéristiques sédimentaires, son régime hydrologique et les actions anthropiques qui l'affectent. Les données collectées nécessaires à la compréhension des processus d'évolution morphologique et à la modélisation hydro-sédimentaire du lit sont également présentées dans cette section.

2.1 Caractéristiques géographiques et géologiques du bassin de la Loire

2.1.1 Présentation du bassin versant de la Loire

La Loire est le plus long fleuve de France (1 012 km) et draine un bassin d'une superficie de 117 800 km² (Fig. 2.1). Elle prend sa source au Mont Gerbier de Jonc dans les Cévennes et se jette dans l'Océan Atlantique à St Nazaire. Après un cours orienté globalement SSE-NNO jusqu'à Briare, le tracé du fleuve s'infléchit dans l'Orléanais pour suivre une direction E-O jusqu'à l'Océan Atlantique. Les particularités géographiques, physiques et géologiques permettent de distinguer trois secteurs :

- la Loire supérieure, ou Loire amont, de sa source jusqu'au Bec d'Allier,
- la Loire moyenne, du Bec d'Allier jusqu'au Bec de Maine,
- la Loire aval ou Basse Loire, du Bec de Maine jusqu'à l'océan.

Le bassin de la Loire est composé de cinq sous bassins, constitués des cinq affluents principaux (Fig. 2.1) : en rive droite la Maine (21 300 km²), confluence de la Mayenne, du Loir, de la Sarthe, et en rive gauche de l'amont vers l'aval, de l'Allier (18 700 km²), du Cher (13 700 km²), de l'Indre (4,000 km²) et de la Vienne (20 000 km²) (Fig. 2.1).

Le secteur d'étude se limite à la Loire moyenne ; la Loire amont est caractérisée par la présence de gorge jusqu'au barrage de Grangent avant de s'étendre dans un val non endiqué présentant un méandrage actif. La Loire moyenne offre une plus grande variété de styles fluviaux (cf. paragraphe 1.2.1.1). Elle présente ainsi, le long de son cours un lit unique, des méandres, et des chenaux multiples que nous définirons par un style mixte « tressage-anastomose ». En effet, certains chenaux

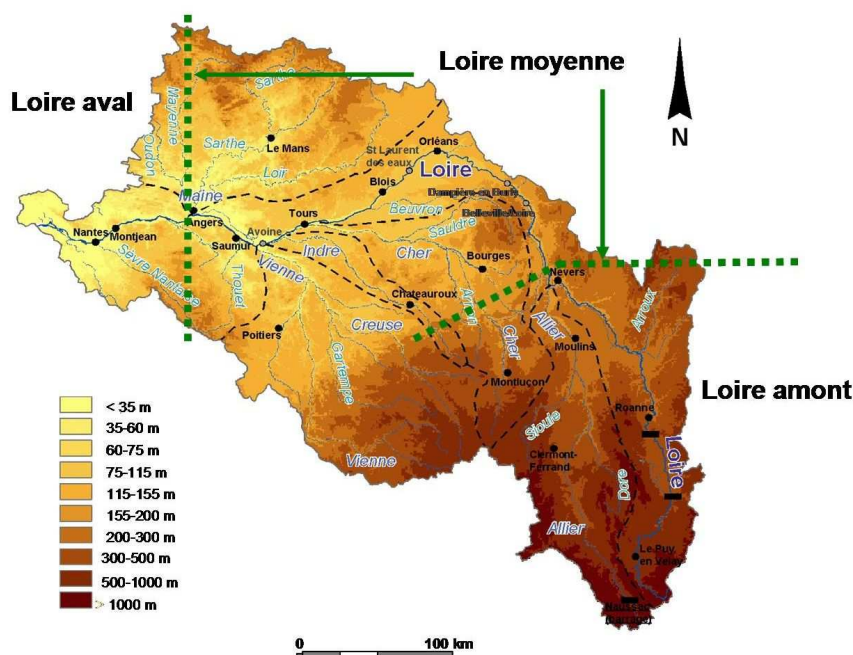


FIGURE 2.1 – Relief du bassin versant de la Loire (d'après Andriamahefa, 1999) avec les bassins versants des principaux affluents.

multiples de la Loire moyenne sont séparés par des îles stabilisées depuis des siècles (caractéristique de l'anastomose), alors que d'autres secteurs caractérisés par des bancs peu végétalisés et instables dans le temps correspondent plus à un style en tresse. La Loire aval n'a pas été incluse dans le site d'étude car son hydrologie et sa dynamique sont influencées par la marée. Il faut souligner que la limite aval du secteur d'étude a été étendue jusqu'à l'aval du Bec de Maine pour inclure la station hydrométrique de Montjean-sur-Loire, soit un linéaire de 450 km.

2.1.2 Caractéristiques lithologiques et histoire géologique de la Loire

Le bassin de la Loire est caractérisé par des lithologies variées qui influencent son tracé, la forme et la largeur de sa vallée (Fig. 2.2). Les trois ensembles identifiés sont de l'amont vers l'aval :

- le Massif Central (représentant une partie de la chaîne Hercynienne),
- le Bassin Parisien, caractérisé par des auréoles sédimentaires déposés à partir du Trias,
- le Massif Armoricaïn, résultant de l'orogénèse Hercynienne.

Dans le Massif Central, la Loire et l'Allier cheminent au sein de gorges et de fossés d'effondrement. Les gorges où s'écoule la Loire sont taillées dans les roches plutoniques, volcaniques et métamorphiques. A l'aval de Roanne, la présence des calcaires dévoniens du Morvan provoque l'orientation du fleuve vers les formations sédimentaires du Bassin Parisien. Entre le Bec d'Allier et Gien, la largeur de la vallée fluctue entre 2 et 5 km en fonction de la lithologie. Les élargissements sont loca-

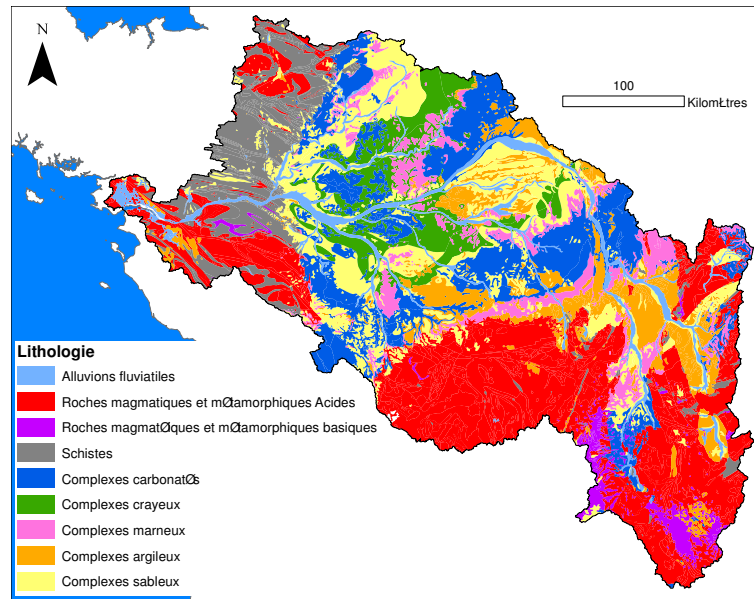


FIGURE 2.2 – Carte lithologique du bassin de la Loire (d'après Blanchard, 2007).

lisés dans les marnes bajociennes et bathoniennes des dépressions de Fourchambault et de Pougues et dans les terrains crétacés sableux et marneux de la région de Léré (Larue, 2004). Les étranglements correspondent aux calcaires calloviens et oxfordiens du Nivernais, au calcaire du Berry et aux conglomérats à silex éocènes recoupés par la Loire entre Tracy et Bannay puis entre Ousson et Chatillon-sur-Loire. A l'aval de Gien, la vallée s'élargit rapidement et offre un bel étagement de terrasses alluviales. La plaine alluviale de la Loire se développe sur 1,5 km et est bien délimitée par des côteaux abrupts entre Chatillon-sur-Loire et Briare.

La région Orléanaise est caractérisée par deux formations tertiaires, les sables de Sologne, et le calcaire de Beauce qui permettent des écoulements souterrains. Les formations crétacées accompagnent ensuite la Loire de la Touraine en Anjou. Puis, aux Ponts-de-Cé, la Loire entre dans le Massif Armoricain.

Du Bec d'Allier au Bec de Maine, la vallée de la Loire et ses trois grands affluents traversent successivement les différentes auréoles sédimentaires, secondaires et tertiaires du Bassin Parisien :

- les calcaires jurassiques affleurant de l'amont de Nevers à Cosnes-sur-Loire ;
- la frange crétacée entre Cosnes-sur-Loire et Gien ;
- les formations tertiaires principalement représentées par la table des calcaires de Beauce (miocène) entre Gien et Blois. Ces formations affleurent en rive droite de la Loire et sont recouvertes par les formations eluviales provenant de l'altération des granites du Massif Central (Brenne et Sologne) en rive gauche ;

- les formations crétacées réapparaissent de façon dominante à l'aval de Tours et jusqu'à Angers.

La construction du sous sol du bassin de la Loire a débuté il y a plus de 500 Ma. Les évolutions de ce réseau hydrographique depuis le paléozoïque sont détaillées par Nehling (2010). Au cours du Quaternaire, l'ancien cours de la Loire rejoignait la Seine puis la Manche avant de se heurter à la résistance des dépôts tertiaires et de s'écouler vers l'Atlantique (Gigout, 1975; Macaire, 1983; Debrand-Passard *et al.*, 1998).

2.1.3 Épaisseur du manteau alluvial

La répartition des épaisseurs d'alluvions présente une variabilité géographique forte. Champion *et al.* (1971) estiment l'épaisseur du remplissage entre 10 m à Cosnes (PK 523) et 3 m à Amboise (PK 735). Dans une étude visant à déterminer la présence de karsts sous les levées domaniales du bassin de la Loire, Donsimoni *et al.* (2008) actualisent la précédente étude. Certains secteurs sont ainsi caractérisés par des épaisseurs relativement faibles (entre Blois et Tours) alors que d'autres présentent des accumulations importantes (entre Saumur et Angers). Les secteurs présentant une épaisseur importante du manteau alluvial sont localisées dans les secteurs où le lit majeur est plus large, et dans les zones de confluences où les affluents apportent un supplément de sédiments fluviaux. Les auteurs notent aussi une variabilité latérale importantes (comme dans le val à l'amont d'Orléans) probablement liée à des variations litho-stratigraphiques ou à des jeux complexes de failles (Castanet, 2008).

2.1.4 Profil en long et affleurements rocheux identifiés sur la Loire moyenne

Le profil en long de la Loire moyenne a été réalisé à partir des données topographiques de 1995 (cf. paragraphe 2.1.5) et est présenté sur la figure 2.3. Le cours de la Loire est constitué d'une alternance de zones à faibles pentes et de rapides. Ces rapides sont liés à la présence de seuils rocheux ou affleurements du substratum qui composent le soubassement du fleuve et affectent sa morphologie. Ces seuils naturels ont une influence sur l'écoulement (rupture de pente de la ligne d'eau d'étiage, accélération du courant, déviation de l'écoulement). Certains de ces seuils étaient déjà mentionnés sur les cartes de 1850 (comme le seuil « Le Jard d'Argent » situé à Briare, PK 558). Dans les années 1970, Babonaux (1970) répertorie 42 seuils rocheux entre Roanne et Nantes. Ce travail a été mis à jour par Rethoret (2001) qui recense 107 seuils naturels entre le Bec d'Allier et Nantes. Cette différence entre le nombre de seuils répertoriés s'explique tout d'abord par les moyens techniques utilisés aux différentes époques et ensuite, très certainement, par les prélèvements de matériaux en lit mineur, qui ont eu un impact sur l'épaisseur des alluvions, favorisant l'apparition d'affleurements à l'étiage.

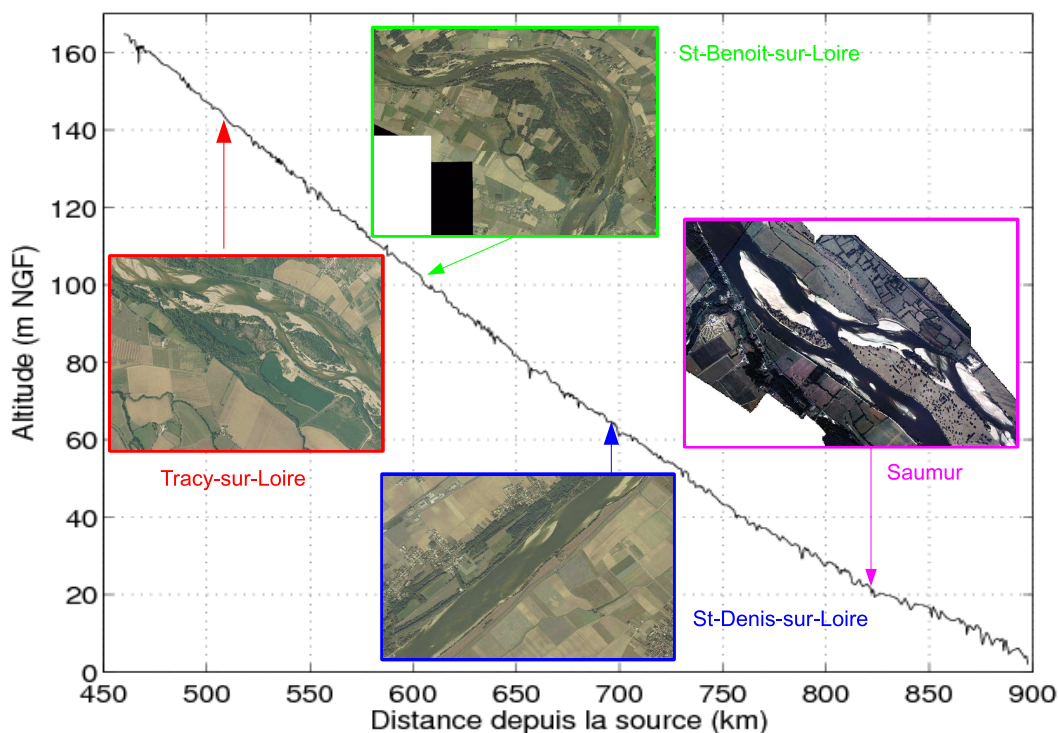


FIGURE 2.3 – Profil en long de la Loire moyenne et photographies des principaux styles fluviaux.

2.1.5 Données topographiques

Les profils en travers et les données bathymétriques ont été fournis par la DREAL Centre (base de données SIEL, Système d'Information sur l'Evolution du lit de la Loire), le CETE (Centre d'Etude Technique pour l'Equipement) de Blois, les DDE (Direction Départementale de l'équipement) d'Indre et Loire, du Maine et Loire et du Loiret, EDF (Electricité de France), l'Université de Tours, l'AITL (Arrondissement Interdépartemental des Travaux de la Loire), le SMN (Service Maritime de Navigation) de Nantes, le GIP (Groupement d'Intérêt Public) Loire Estuaire de Nantes et l'Agence de l'Eau Loire Bretagne.

Une seule campagne topographique, la campagne « Crougneau 1995 » couvre l'ensemble de la Loire moyenne (du Bec d'Allier aux Ponts-de-Cé) avec des profils en travers levés tous les 2 km environ. Les autres données topographiques et bathymétriques couvrent des secteurs précis en réponse à des problématiques particulières. Le lit de la Loire au droit des centrales nucléaires est ainsi régulièrement suivi, les zones urbaines (Blois, Orléans, Tours) et les sites de restauration (Givry-Fourchambault, Chalonnes, Ingrandes) présentent également de nombreuses données. Un récapitulatif complet des données topographiques disponibles est fourni en Annexe A.

Des données LIDAR (Light Detection And Ranging) levées en 2002 ont permis de compléter l'étendue des profils en travers jusqu'au haut des digues. On peut également mentionner la mise en ligne des photographies aériennes (campagnes de 1955, 1984, 1995, 2002 et 2005), des cartes

anciennes (1850) et des cartes morphologiques permettant de caractériser l'évolution du tracé en plan du lit ainsi que la localisation des données. La majorité de ces données est accessible sur le site internet de la DREAL Centre ([http ://www2.centre.ecologie.gouv.fr/SIEL/index-0.htm](http://www2.centre.ecologie.gouv.fr/SIEL/index-0.htm)).

2.2 Caractéristiques sédimentaires

2.2.1 Données granulométriques

Les données granulométriques proviennent majoritairement de la base de données (« BD Granulo ») réalisée dans le cadre du SIEL. Il s'agit d'une base de données couplée à un SIG qui centralise les données granulométriques et géologiques de la Loire et de ses principaux affluents. Des données supplémentaires ont été fournies par l'Université de Tours et le GIP Loire Estuaire. Les données collectées correspondent à des échantillons prélevés entre 1970 et 2008. Les données granulométriques disponibles sont peu nombreuses au regard de l'étendue du secteur d'étude. Les travaux de Babonaux (1970) et Brossé (1982) font encore figures de référence dans la description des caractéristiques sédimentaires de la Loire moyenne.

2.2.2 Caractéristiques sédimentaires longitudinales de la Loire moyenne

La Loire présente une granularité très étendue. La nature des sédiments est majoritairement liée aux zones d'alimentation en roches cristallines et volcaniques du haut bassin. Les sédiments sont en grande majorité composés de sables grossiers et de graviers, bien que dans le bassin amont les galets soient dominants.

Babonaux (1970) présente une évolution longitudinale de la granularité des sédiments pour différents niveaux par rapport à l'étiage. Les courbes granulométriques présentées sur la figure 2.4 ont été réalisées à partir des données de Babonaux, complétées avec des échantillons prélevés dans le chenal principal et issus de la « BD Granulo ». Les courbes obtenues entre le Bec d'Allier et Montjean-sur-Loire traduisent cette décroissance amont-aval avec un d_{50} variant entre 4,6 mm et 0,63 mm.

A l'aval du Bec d'Allier, les apports sédimentaires des affluents sont supposés relativement faibles. La recharge sédimentaire provenant des érosions de berges est relativement faible jusqu'à l'amont de Tours et réduite à l'aval de Bréhémont où la majorité des berges sont protégées par des empierrements. La présence des levées, qui déconnecte le lit mineur du lit majeur, conduit également à une diminution des sources potentielles d'alimentation latérale en charge solide.

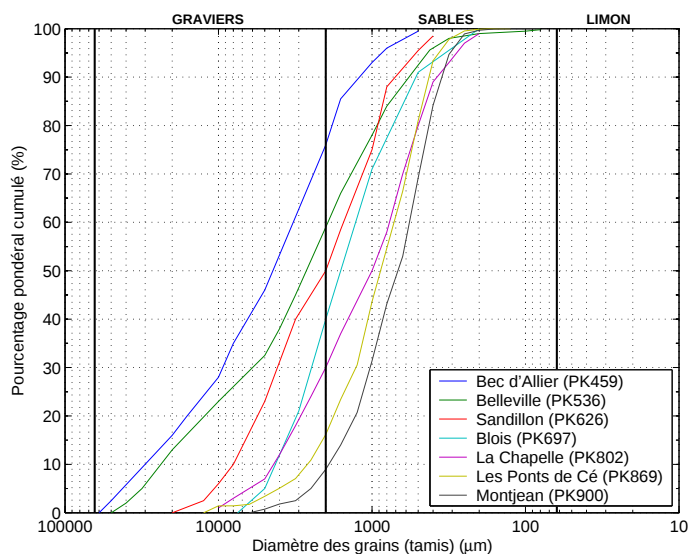


FIGURE 2.4 – Variations longitudinales de la granularité du chenal principal de la Loire moyenne entre le Bec d'Allier et Montjean-sur-Loire.

2.2.3 Caractéristiques sédimentaires transversales

La caractérisation de la variabilité transversale des sédiments nécessite de distinguer les différentes unités morphologiques actives. Ces unités morphologiques correspondent aux parties du lit qui, suivant le débit, participent à la fourniture, au transit et au dépôt de la charge de fond. Chaque unité présente un transit et un dépôt différent lié à des conditions hydrauliques variées dans l'espace et dans le temps. La définition de ces unités morphologiques actives est adaptée des travaux de Malavoi (2001) ; on peut ainsi distinguer :

- le chenal principal, à 1 ou 2 m sous le niveau de ligne d'eau d'étiage,
- le(s) chenal(aux) secondaire(s),
- les grèves et les bancs, environ 1 m au dessus de l'étiage,
- les îles, environ 2 m au dessus de l'étiage.

La granularité de ces différentes unités est présentée sur la figure 2.5 pour des échantillons disponibles à l'aval du Bec d'Allier, au niveau de l'île Marzy. Les granularités les plus grossières correspondent au chenal principal ($d_{50} = 4,6$ mm) et aux chenaux secondaires ($d_{50} = 1,6$ mm), les îles étant caractérisées par des sédiments fins ($d_{50} = 0,23$ mm) et les grèves par une granularité intermédiaire ($d_{50} = 0,58$ mm). Il faut également souligner la variabilité granulométrique perceptible au niveau des bifurcations ; ainsi l'armurage est souvent présent à l'entrée des chenaux secondaires.

2.2.4 Variabilité verticale de la granularité en crue

En plus de la variabilité longitudinale et transversale, il faut aussi souligner l'hétérogénéité verticale des sédiments. Les seules mesures disponibles pour illustrer cette distribution granulométrique

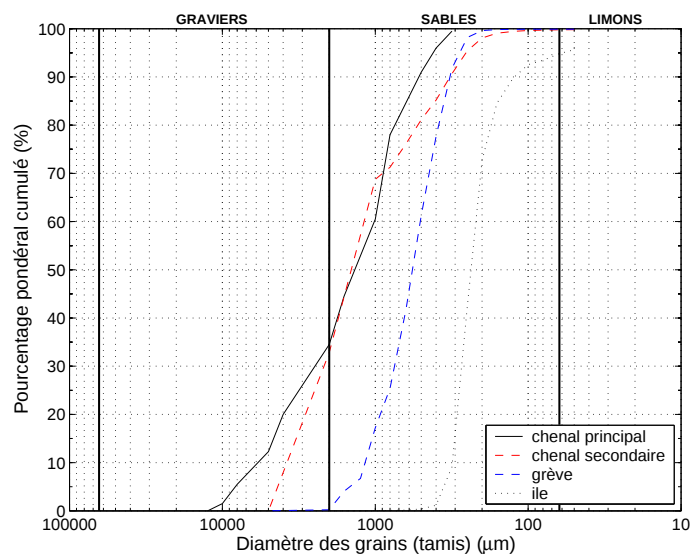


FIGURE 2.5 – Variations transversales de la granularité des unités morphologiques actives à l'aval du Bec d'Allier.

sur la verticale ont été réalisées sur le site de Bréhémont lors d'une crue. La figure 2.6 présente les résultats obtenus (Gautier *et al.*, 2008) à partir de ces mesures réalisées le 09 mars 2007, lors de la phase décroissante de la crue ($Q_{JM} = 1350 \text{ m}^3/\text{s}$).

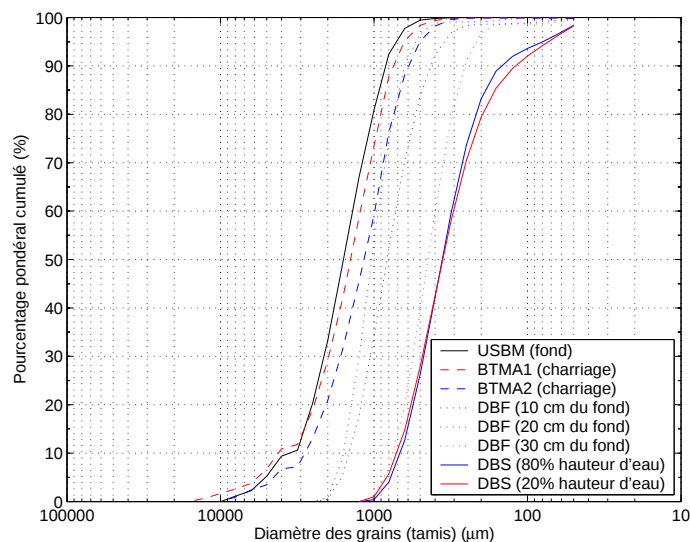


FIGURE 2.6 – Evolution de la distribution granulométrique sur la verticale à Bréhémont (mesures sur la verticale 4, profil L44, d'après Gautier *et al.*, 2008).

Il est rappelé que l'échantillonneur USBM fournit les données pour le matériel du fond, BTMA le charriage, DBF le transport en suspension à 10, 20 et 30 cm au dessus du fond et DBS correspondent aux prélèvements à la Bouteille de Delft de la suspension à la hauteur de 80% et 20% de la hauteur d'eau. Une ségrégation plus ou moins marquée du fond vers la surface est observée

même si la précision des mesures est discutable ; il s'agit en effet de sédiments en transit, pas « archivés ». La variabilité verticale des sédiments déposés doit également être mentionnée ; les phénomènes d'armurage et l'histoire lithologique de la rivière expliquent cette variabilité.

2.3 Caractéristiques hydrologiques

2.3.1 Données hydrométriques

Les chroniques de débits, jaugeages et courbes de tarage ont été fournis par la DREAL Centre et la DREAL Pays de la Loire pour les douze principales stations hydrométriques bordant la Loire moyenne. Les données de débit journalier moyen disponibles sont récapitulées dans le tableau 2.1. Les stations anciennes et remplacées (comme la station du pont Wilson à Tours) ne sont pas mentionnées.

Station	PK	Code station	Période
Givry	466,860	K4000010	1967 - 2010
St-Satur	513,000	K4080010	2000 - 2010
Gien	563,990	K4180010	1936 - 2010
Orléans	638,060	K4350010	1964 - 2010
Blois	698,090	K4470010	1863 - 2010
Onzain	714,900	K4800010	1994 - 2010
Tours (Mirabeau)	756,480	K4900030	1995 - 2010
Langeais	782,020	K6830020	1985 - 2010
Montsoreau	814,290	L8000010	1916 - 1988
Saumur	824,830	L8000020	1988 - 2010
Les Ponts-de-Cé	867,790	L8700010	2000 - 2010
Montjean-sur-Loire	897,550	M5300010	1863 - 2010

TABLE 2.1 – Périodes d'observation des débits journaliers moyens (QJM) disponibles sur la Banque Hydro.

Des données complémentaires de débits et de hauteurs d'eau mesurées aux quatre centrales nucléaires ont été transmises par EDF. Les incertitudes associées à ces mesures sont estimées à ± 5 cm sur les hauteurs d'eau et $\pm 10\%$ sur les débits.

Les données de lignes d'eau constituent un moyen de suivre l'évolution du lit et des niveaux de crue. 200 sites, espacés de 2 à 3 km, sur les deux rives de la Loire moyenne font l'objet de relevés réguliers de la cote altimétrique de l'eau. Ces relevés sont effectués lors d'événements hydrologiques significatifs tels que les étiages et les crues. Les données en version numérique sont disponibles entre 1978 et 2010 sur le site du SIEL. Les erreurs associées aux mesures de lignes d'eau sont de ± 3 cm.

Un profil en long de lignes d'eau, levés principalement à l'étiage dans les années 1940 par les Services des Grandes Forces Hydrauliques, a été numérisé afin de disposer de données plus anciennes. Ces données présentent néanmoins de fortes incertitudes. Ce profil ancien a nécessité des conver-

sions altimétriques, du système Lallemand, dit orthométrique (en vigueur entre 1892 et 1969) en IGN 69 ou normal (valable depuis 1969). Pour convertir les données altimétriques anciennes, les corrections ont été définies à partir du tableau de conversion donné par l'IGN (<http://professionnels.ign.fr/ficheProduitCMS.do?idDoc=5276264>). Les données altimétriques fournies par EDF ont également été converties du NGF Ortho en NGF Normal.

2.3.2 Régime hydrologique

Le régime hydrologique de la Loire est marqué par une variabilité intermensuelle et interannuelle (Dacharry, 1974). Il se caractérise par l'alternance d'étiages très prononcés ($Q_{JM} = 19 \text{ m}^3/\text{s}$ à Blois en 1949) et de crues dévastatrices ($Q_{JM} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$ à Blois en 1866, Duband (1996)). La présentation du régime hydrologique est basée sur la chronique de débit à Blois qui couvre la période 1863 - 2010. La figure 2.7(a) représente l'année schématique moyenne à la station de Blois ; l'année schématique est caractérisée par une période d'étiage l'été et de plus forts débits entre octobre et juin.

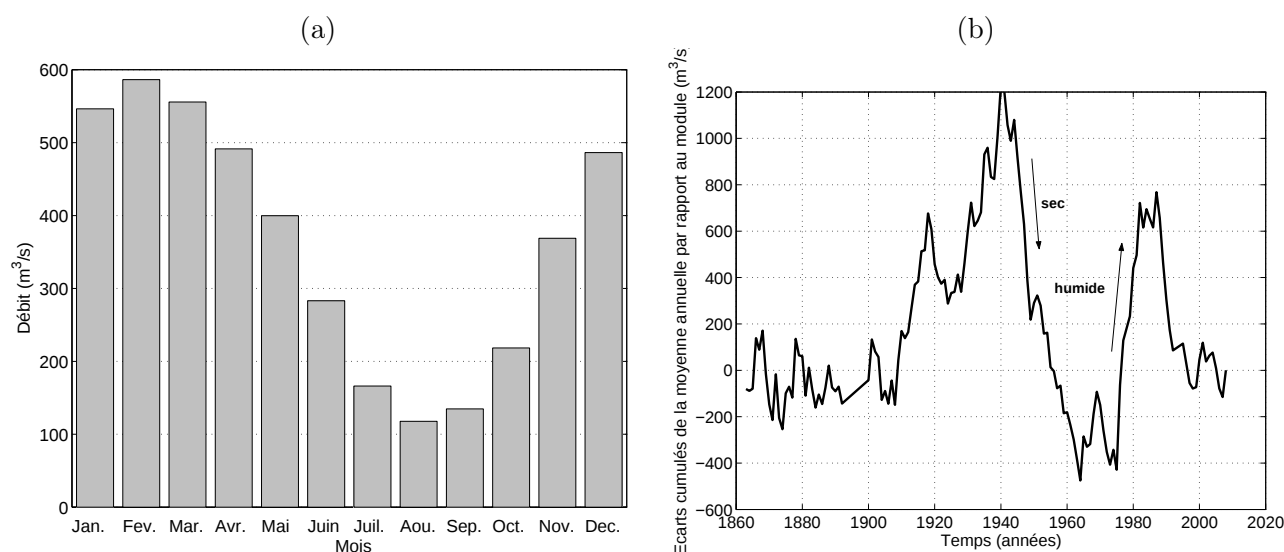


FIGURE 2.7 – Caractéristiques hydrologiques à la station hydrométrique de Blois : (a) Année schématique moyenne pour la période 1863-2008. (b) Ecart cumulé de la moyenne annuelle par rapport au module pour la période 1863-2008.

Depuis 130 ans on n'a pas observé de crues catastrophiques comparables à celles de 1846, 1856 et 1866 (Duband, 1996). Au $\text{XX}^{\text{ème}}$ siècle, le bassin a connu quelques crues importantes mais pas de crues extrêmes. La courbe des écarts cumulés à la moyenne annuelle permet de visualiser les variations de débits moyens annuels sur de longues périodes et donc de caractériser l'instabilité du régime de la Loire. Cette courbe, définie selon l'équation 2.1, est ascendante pendant les périodes

humides et descendante pendant les périodes sèches.

$$Q_d = \sum (Q_{MA} - Q_{MOD}) \quad (2.1)$$

avec Q_d l'écart cumulé de la moyenne annuelle par rapport au module (m^3/s), Q_{MA} le débit moyen annuel et Q_{MOD} le module.

La figure 2.7(b) fournit la courbe obtenue pour la station hydrométrique de Blois. La fin du XIX^{ème} siècle est relativement stable malgré les crues de 1846, 1856 et 1866. On observe ensuite une alternance de périodes humides (1905-1941 et 1973-1984) et de périodes sèches (1941-1964 et 1984-2008).

2.3.3 Apports des affluents

Sur les 315 km séparant l'aval du Bec d'Allier de Tours, les affluents sont de petites tailles et leurs apports au débit de la Loire sont négligeables. Le bassin versant passe ainsi d'une superficie de 32610 km^2 à Givry (station hydrométrique à l'aval du Bec d'Allier) à 42130 km^2 à Tours. Puis, de l'aval de Tours jusqu'à Montjean-sur-Loire, les apports du Cher, de l'Indre et de la Vienne viennent contribuer au débit de la Loire (la superficie du bassin versant à Montjean-sur-Loire atteint 109930 km^2). La figure 2.8 illustre l'évolution des débits de différentes périodes de retour entre Nevers et Montjean-sur-Loire.

D'autres petits cours d'eau alimentent bien évidemment la Loire ; ils sont toutefois peu nombreux, leurs débits sont faibles et ne sont pas mesurés régulièrement. On peut citer par exemple le Beuvron ($Q_{MOD} = 6,12 \text{ m}^3/\text{s}$), la Cisse ($Q_{MOD} = 1,62 \text{ m}^3/\text{s}$) et la Brenne ($Q_{MOD} = 1,17 \text{ m}^3/\text{s}$).

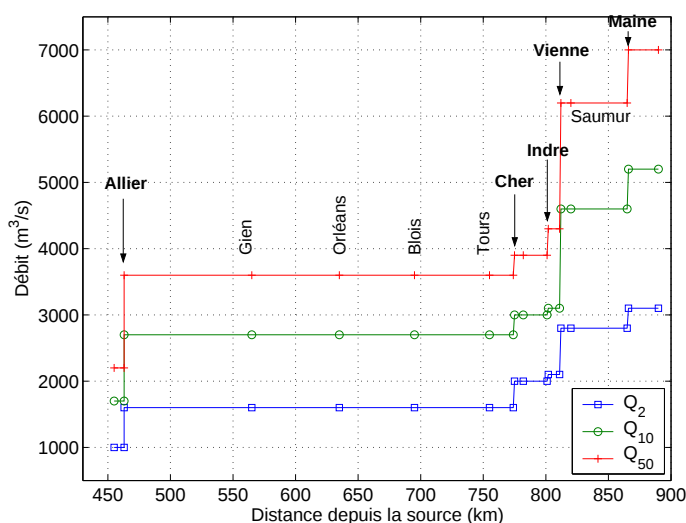


FIGURE 2.8 – Evolution des débits de période de retour de 2, 10 et 50 ans entre Nevers et Montjean-sur-Loire (valeurs extraites de la Banque Hydro).

2.3.4 Concomittance des crues

Le bassin de la Loire est soumis principalement à deux influences climatiques susceptibles de provoquer trois types de crues :

- les crues d'origine méditerranéenne (ou « crues cévenoles »), subites et de forte intensité ; elles se produisent généralement entre septembre et mai. Les pluies intenses en région cévenole affectent particulièrement la Loire en amont de Nevers et l'Allier (crue de septembre 1980 à Brives-Charensac) ;
- Les crues océaniques se caractérisent par un important volume d'eau accumulé sur un ou deux mois et des débits importants atteints graduellement. Ces crues s'étendent généralement à l'ouest et au nord du bassin versant ;
- Les crues mixtes qui résultent de la conjonction des deux types d'événements précédents (crues de 1846, 1856 et 1866), et qui surviennent souvent au printemps.

La similitude des crues de la Loire et de l'Allier lors des événements exceptionnels est depuis longtemps reconnue et expliquée par la similitude des bassins versants (surface, linéaire du cours d'eau, forme, influence pluviométrique). Ce n'est pas le cas pour les autres affluents majeurs que sont le Cher, l'Indre, la Vienne et les trois tributaires de la Maine (Loir, Sarthe et Mayenne). Ce décalage temporel Δt entre le pic de crue des affluents et le pic de crue de la Loire contribue aux différences observées sur le temps de propagation des crues de septembre 1866 et de décembre 2003 (Fig. 2.9a et b). Pour la crue de 1866, une avance d'environ 3 jours de la pointe de crue de la Vienne à Nouâtre sur celle de la Loire à Montsoreau a ainsi été constatée (Gautier, 2001).

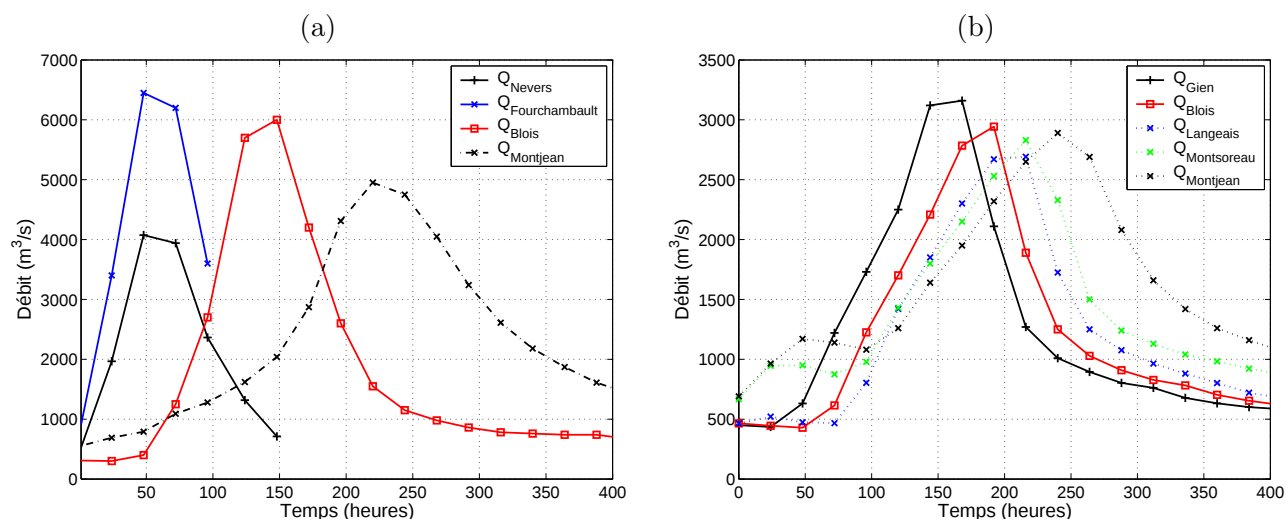


FIGURE 2.9 – Concomittance des crues sur la Loire moyenne : (a) Crue de septembre 1866 (Q_{JM} estimé par la DREAL Centre) et (b) Crue de décembre 2003 (Q_{JM} extraits de la Banque Hydro).

A partir des données de débits disponibles pour les quatre principaux affluents, une estimation du décalage temporel Δt entre le pic des différents affluents et le pic de la Loire a été faite. La valeur

du Δt moyen obtenue est donnée dans le tableau 2.2.

Affluents	Δt
Cher	- 10 h
Indre	- 48 h
Vienne	- 96 h
Maine	- 120 h

TABLE 2.2 – Décalage temporel moyen Δt entre les pics de crues des affluents et de la Loire.

2.3.5 Formes des hydrogrammes de crues

La forme des hydrogrammes de crues de différentes périodes de retour au droit de quatre stations hydrométriques situées le long de la Loire est ici analysée. Les événements présentant des périodes de retour de 2, 5, 10 et 20 ans ont ainsi été sélectionnés pour les stations hydrométriques de Gien, Blois, Saumur (en incluant les données de Montsoreau) et Montjean-sur-Loire. Ces quatre stations ont été retenues car elles présentent les jeux de données les plus complets dans le temps et permettent de couvrir le linéaire de la Loire moyenne. Les données de débits journaliers moyens ont été extraites de la banque Hydro en considérant une période de 20 jours encadrant le pic de crue. Les hydrogrammes observés sont normalisés par le débit de pointe comme illustré sur la figure 2.10.

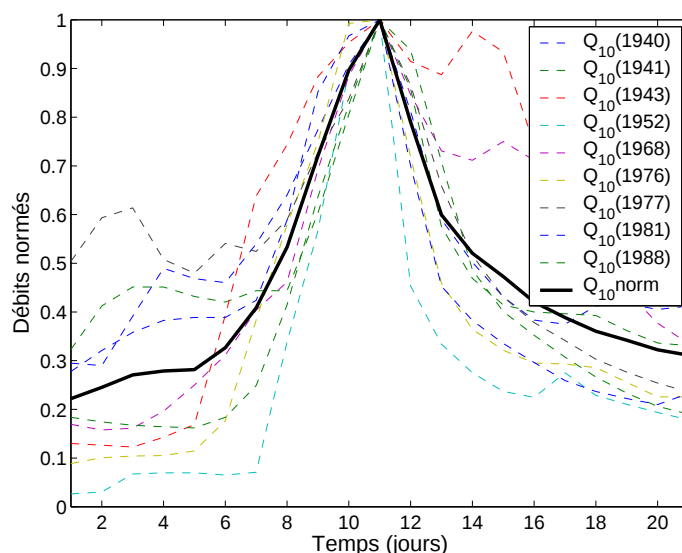


FIGURE 2.10 – Exemple de dérivation d'un hydrogramme normé à Gien pour une période de retour de 10 ans.

Il faut noter que ces hydrogrammes normés ne correspondent pas strictement à une définition hydrologique. En effet, en hydrologie, la dérivation d'hydrogramme normé consiste à extraire de la chronique disponible les hydrogrammes pour chaque année hydrologique (du 1^{er} septembre au 31 août de l'année civile suivante). Les événements sont ensuite identifiés par l'instant t du pic

(Lang et Lavabre, 2007). Dans notre approche, la chronique de débits complète n'est pas utilisée et un hydrogramme normé est défini pour chaque période de retour. Les pentes des hydrogrammes pour les montées et les descentes de crues diffèrent suivant la période de retour (Fig. 2.11). Cette variation peut-être associée au type de crue ainsi qu'au phénomène de crues à pics multiples qui n'ont pas été distinguées dans cette approche.

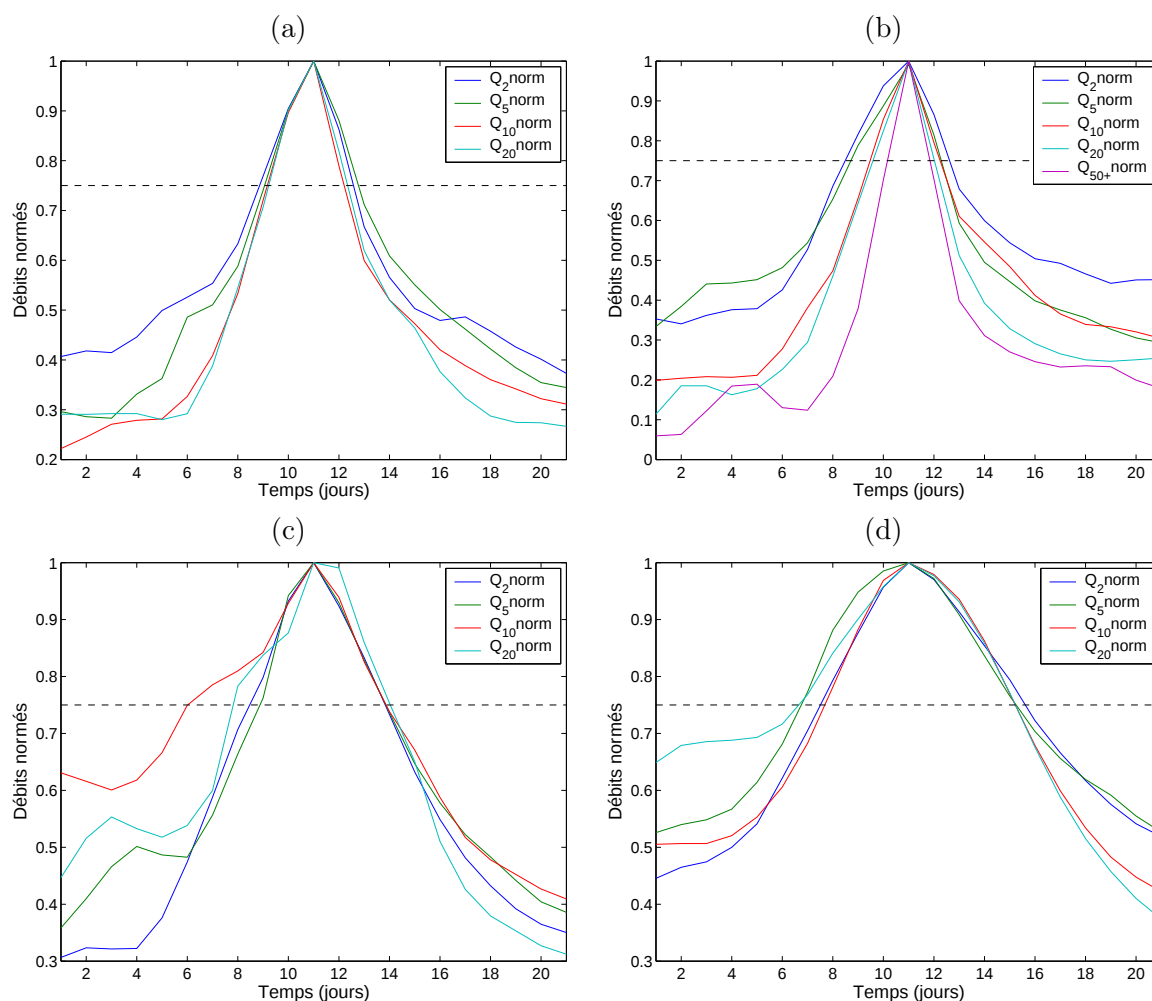


FIGURE 2.11 – Hydrogrammes normés pour les périodes de retour 2, 5, 10 et 20 ans aux stations de (a) Gien, (b) Blois, (c) Saumur et (d) Montjean sur Loire.

On constate que la durée de la pointe de crue, pour les débits au dessus d'un seuil correspondant à 75% de la valeur du débit, est fonction de la distance à la source et, qu'à une station donnée, les durées sont comparables pour toutes les périodes de retour. Il faut toutefois nuancer cette constatation car peu de données sont disponibles pour les crues fortes (i.e. ayant une période de retour supérieure ou égale à 20 ans). Si on considère la station de Blois, on s'aperçoit que la durée du pic de crue dépend du type de crue. Ainsi, à cette station, l'hydrogramme normé pour une période de retour supérieure à 50 ans comprend la crue de 1866 qui était une crue mixte. La similitude des durées peut donc s'expliquer par des types de crues identiques.

Cette étude préliminaire nous permet de compléter la présentation des caractéristiques hydrologiques de la Loire moyenne et nous fournit les bases de l'approche de simplification des chroniques de débits qui sera détaillée dans la partie 5.2.3.

2.4 Actions anthropiques

2.4.1 Ouvrages fluviaux, ouvrages d'art et travaux

Depuis le Moyen Age, la Loire a été sans cesse modelée et remodelée. Dans le passé, les riverains ont tenté de maîtriser le fleuve en construisant des turcies ou levées qui bordent les vals de Loire sur près de 700 km. Les digues permettaient en plus de la protection contre les crues de gagner des terres agricoles (Charlot *et al.*, 1995). Les digues ont par la suite été surélevées et les pieds de digues confortés avec des enrochements dont l'emprise semble atteindre le chenal principal sur certains secteurs. La création des premiers déchargeoirs remontent au début du XVII^{ème} siècle ; des déversoirs supplémentaires ont été construits suite à la crue de 1866 (La Charité, Léré, Gien, Ouzouer, Jargeau, Ardoux, Avaray, Blois-Montlivault, Blois-La Bouillie, Langeais, La Chapelle aux Naux ; cf. Annexe A).

Parallèlement à ces problèmes de protection contre les crues, les ouvrages de navigation ont joué un rôle fondamental sur l'écoulement de la Loire. Pour améliorer la navigabilité, notamment pendant l'étiage, des duits, chevrettes, épis et enrochements sont construits afin de concentrer les écoulements et favoriser l'auto-curage du chenal navigable. A partir de 1850, le chemin de fer et la route supplantent peu à peu la voie d'eau, les ouvrages de navigation sont laissés à l'abandon. Certains de ces ouvrages contribuent cependant encore aujourd'hui à la chenalisation et à l'érosion du lit.

Cinquante huit ponts permettent de traverser la Loire entre le Bec d'Allier et Montjean sur Loire. On peut distinguer les 43 ponts « modernes », tel que le pont de l'Europe à Orléans, possédant de large travées, peu de piles et présentant un faible coefficient d'obstruction, des 15 ponts « anciens », tel que le pont de Beaugency. Ces ponts anciens sont caractérisés par de nombreuses piles et un coefficient d'obstruction important en crue, provoquant une surélévation de la ligne d'eau à l'amont.

Dans le cadre du Plan Loire Grandeur Nature, des travaux de restauration et d'entretien du milieu physique sont menés. Les objectifs des travaux affectant le chenal principal de la Loire concernent essentiellement le libre écoulement des eaux en période de crue ainsi que la remobilisation des sédiments fixés par la végétation ligneuse pionnière. Les travaux visent à supprimer ou araser certains ouvrages de navigation, à éliminer les ligneux pionniers (dévégétalisation) et à scarifier les sédiments des chenaux secondaires en vue de les remobiliser.

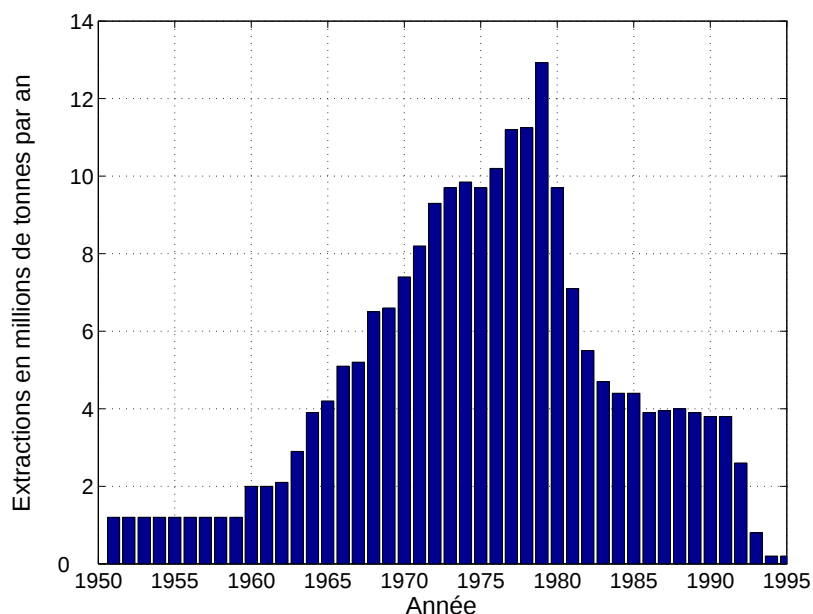


FIGURE 2.12 – Estimation des extractions de matériaux dans le lit mineur de la Loire entre le Bec d’Allier et Nantes (adapté de Dambre, 1996).

2.4.2 Extractions de granulats

A la fin de la seconde guerre mondiale, le fleuve est utilisé comme gisement de matériaux. La figure 2.12 présente le tonnage annuel extrait du lit mineur de la Loire entre le Bec d’Allier et Nantes entre 1950 et 1995. On peut ainsi distinguer quatre phases d’exploitation des matériaux du lit (Hydratec, 1984) :

- Avant 1968, une première phase d’exploitation avec des entreprises peu nombreuses, souvent familiales, extrayant en région Centre environ 2 millions de tonnes annuelles dont la moitié en Indre et Loire ;
- une seconde phase, de 1967 à 1973, marquée par le développement du nombre des extractions et de la technologie qui se traduit par le doublement du tonnage annuel extrait ;
- de 1974 à 1980, une troisième phase d’exploitation massive du gisement sur environ 90 sites avec un rythme annuel moyen dépassant les 10 millions de tonnes ;
- une quatrième phase de 1981 aux années 1990, de diminution importante du nombre des exploitations et des tonnages extraits passant à moins de 5 millions de tonnes en moyenne annuelle.

Entre 1949 et 1992, Dambre et Malaval (1993) estiment qu’au moins 220 millions de tonnes (soit 83 millions de m^3) de sables et graviers ont ainsi été extraits du lit mineur de la Loire entre le Bec d’Allier et Nantes, soit près de 2 million de m^3 /an. Berthois (1971) estime la quantité de sédiment annuelle apportée à la Loire à 750 000 m^3 . Le taux de remplissage, c’est à dire la quantité de sédiment nécessaire pour combler les volumes prélevés, n’est donc pas assurée.

Les extractions en lit mineur sont stoppées en 1990, sauf dans le département d'Indre et Loire où elles se poursuivent jusqu'en 1995. Quelques sites d'extractions subsistent aujourd'hui en lit majeur.

Les autorisations de prélèvements annuelles de cent deux sites d'extractions « officiels » localisés entre Nevers et Saumur, ont été collectées et les données numérisées. Les sites répertoriés ainsi que les quantités extraites sont fournies en Annexe C.

2.4.3 Barrages

L'hydrologie et le transport de sédiments de la Loire sont également influencés par la présence de barrages. En amont de Roanne, le barrage de Villerest assure l'écrêtement des crues à partir de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ et le soutien des étiages. D'une capacité de 170 millions de m^3 , ce barrage est en service depuis 1984. Le barrage de Grangent, construit entre 1955 et 1957, se situe entre Aurec-sur-Loire (Haute-Loire) et Saint-Just-Saint-Rambert (Loire). Ce barrage d'une capacité de 28 millions de m^3 contribue au soutien d'étiage. Le barrage de St Etienne de Vigan, situé sur l'Allier supérieur, a été construit en 1895 et démantelé en 1998. Le barrage de Naussac sur l'Allier, a une capacité de 190 millions de m^3 . Cette retenue participe depuis 1983 au soutien d'étiage durant la période estivale. Le soutien d'étiage vise à fournir un débit d'au moins $60 \text{ m}^3/\text{s}$ à Gien sur l'ensemble de l'année afin de garantir le fonctionnement des centrales nucléaires bordant le fleuve en aval de Nevers.

Le seul barrage localisé sur la Loire moyenne était le barrage de Blois, construit en 1970, afin de créer une base de loisirs. Cet ouvrage a été démantelé en 2005 ; la déconstruction a consisté à retirer les six vannes du barrage et leurs vérins. Les sept piles ont été conservées afin de servir de support à une future passerelle.

Plus en aval, le barrage de Maisons Rouges, sur la Vienne, a été construit en 1924 et démantelé en 1998. Les études de Malavoi (2001) ont permis d'estimer une vitesse moyenne de propagation des sédiments de l'ordre de $2 \text{ km}/\text{an}$. Sur les $900\,000 \text{ m}^3$ de sédiments accumulés dans la retenue $600\,000 \text{ m}^3$ se répartissent dans la Vienne (et le reste dans la Creuse). Le temps de propagation des sédiments à la Loire est donc estimé à environ 25 ans pour les particules constituant la charge de fond.

2.4.4 Centrales nucléaires

Le développement économique de la seconde moitié du $\text{XX}^{\text{ème}}$ siècle a engendré une croissance des besoins énergétiques. Quatre centrales ont été implantées sur la Loire moyenne pour répondre à ces besoins.

A l'amont, la centrale de Belleville a été construite en 1979 entre La Celle-sur-Loire et Bonny-sur-Loire. La centrale est située sur la commune de Belleville sur Loire en rive gauche de la Loire. La construction de la centrale a nécessité la construction d'une plateforme et un dragage du chenal

principal.

La centrale de Dampierre est implantée en rive droite de la Loire, au niveau d'un méandre, sur la commune de Dampierre-en-Burly. Construite en 1980, la centrale a nécessité l'approfondissement et l'élargissement du lit afin de fournir les matériaux nécessaires à l'édification de la plateforme.

La centrale de St Laurent des Eaux a été construite en 1963 sur la rive gauche de la Loire sur la commune de St Laurent-Nouan.

Le site de Chinon est situé à l'aval immédiat de la confluence entre la Loire et l'Indre, sur la commune d'Avoine. La construction de la centrale a débuté en 1959.

Les quatre centrales sont équipées d'un seuil transversal en Loire permettant d'alimenter la centrale en eau pour les faibles débits.

2.4.5 Conséquences des actions anthropiques

Dans un rapport sur la navigation de 1787, Lavoisier soulignait l'exhaussement général du lit de la Loire auquel « l'industrie humaine ne peut apporter que de bien médiocres obstacles à cet effet de la nature » Un siècle plus tard, Guillon (1898) mitige ces affirmations ; il rapporte la dynamique morphologique de la Loire caractérisée par des zones d'abaissement du lit ainsi que par des secteurs où l'exhaussement domine.

Au XX^{ème} siècle, les fosses réalisées en Loire pour les extractions de matériaux provoquent un abaissement de la ligne d'eau amont, donc une érosion régressive souvent considérée comme la principale conséquence d'un prélèvement. Cependant le débit solide provenant de l'amont se bloque partiellement dans la zone draguée. A l'aval, le cours d'eau reconstitue son débit solide, correspondant à sa capacité de transport, aux dépens des matériaux de son lit, provoquant un abaissement du fond avec diminution de pente par érosion progressive.

Cette tendance à l'incision est ensuite confirmée par les études effectuées par le Service Hydrologique Centralisateur (Service Hydrologique Centralisateur du Bassin de la Loire, 1979) et par Hydratec (Hydratec, 1984, 1986) dans les années 70 et 80. Ces études ont aussi mis en évidence la contribution active des extractions de granulats dans le lit mineur. Bomer (1972) souligne aussi le colmatage des chenaux latéraux et les « soudures » des îles aux berges. Cette tendance amène à une réduction de la largeur de la bande active.

Une des conséquences de l'incision du lit est l'abaissement de la ligne d'eau d'étiage. Les conséquences de l'abaissement de la ligne d'eau d'étiage sont :

- la déstabilisation de certains ouvrages d'art (digues et pont) ;
- la non recharge des nappes phréatiques ;
- le développement de la végétation dans les chenaux secondaires et donc la réduction de la largeur active et de la capacité hydraulique en crue ;



FIGURE 2.13 – Effondrement du pont Wilson à Tours (source : La Nouvelle République, décembre 1978).

– la réduction de la diversité de l'habitat dans les zones humides.

L'effondrement du pont Wilson à Tours en Décembre 1978 est le résultat de l'incision qui a causé un déchaussement des piles du pont (Fig. 2.13).

Les changements des pratiques agricoles et l'utilisation des berges doivent aussi être mentionnée. En effet, les îles et les berges étaient utilisées comme paturage (Gautier *et al.*, 2000), l'arrêt de ces pratiques a favorisé le développement de la végétation, influençant la connection des chenaux secondaires pour les faibles débits et le transport des sédiments.

3

Sectorisation géomorphologique de la Loire moyenne

Les approches de sectorisation géomorphologique des cours d'eau permettent de distinguer des entités spatiales emboîtées présentant un fonctionnement homogène. Les évolutions de ces entités peuvent ensuite être comparées et analysées afin de comprendre les processus morphologiques. Le découpage de la Loire moyenne en tronçons géomorphologiquement homogènes a d'abord été réalisé en appliquant les principales approches de classification existantes. Les outils disponibles n'étant pas concluants pour satisfaire nos objectifs de compréhension des évolutions de la Loire moyenne et ultérieurement de modélisation sédimentaire, une approche de découpage en tronçons et de caractérisation des tronçons est proposée.

3.1 Applications des classifications existantes à la Loire moyenne

3.1.1 Classification basée sur la puissance fluviale

De façon similaire à l'étude de Bernot *et al.* (1996) sur le Vidourle (cf. paragraphe 1.2.2.3), l'évolution longitudinale de la puissance spécifique de la Loire moyenne est analysée afin de délimiter les secteurs présentant une dynamique forte des secteurs moins dynamiques. Le calcul de la puissance fluviale s'effectue, par définition, avec les données de largeur et de débit correspondant au plein bord (cf. paragraphe 1.2.2.2). Toutefois, dans la majorité des études (Bernot *et al.* 1996), la largeur est mesurée sur des photographies aériennes (généralement prises à l'étiage) ou sur le terrain, et le débit de plein bord est assimilé au débit de période de retour de 1,5 ou 2 ans. La pente est généralement calculée en utilisant le profil en long de lignes d'eau ou à défaut les cartes topographiques. Afin d'appliquer cette approche à la Loire moyenne, les largeurs de bande active mesurées par Ginestet (1999) tous les 500 m sur les photographies aériennes de 1995 ont été assimilées aux largeurs à plein bord. Certaines mesures ont toutefois nécessité d'être corrigées, en particulier à l'aval du secteur d'étude où la définition de la bande active était erronée sur les secteurs présentant des îles. La pente a été calculée à partir des données de lignes d'eau d'étiage de 1995 afin de correspondre à la date des mesures de bande active (1995). Le débit de plein bord a été pris égal au débit de période de retour de 2 ans. L'évolution longitudinale de la puissance spécifique, calculée sur ces segments de 500 m,

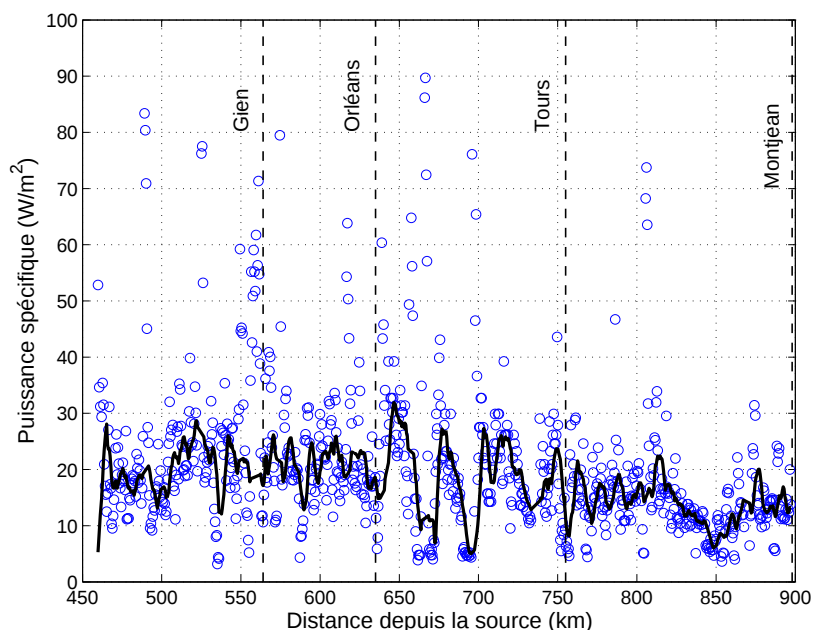


FIGURE 3.1 – Evolution longitudinale de la puissance spécifique calculée sur des segments de 500 m pour un débit biennal. La courbe en trait plein présente les valeurs moyennes tous les 5 km. Les droites verticales en pointillées indiquent la localisation des principales villes.

est présentée sur la figure 3.1. La décroissance amont-aval avec un pic dans la partie intermédiaire, comme explicitée par Knighton (1999), et mentionnée au paragraphe 1.2.2.3, est perceptible vers Gien (PK 560). Les fortes variations observées sont liées à la présence d’ouvrages d’art, et donc aux ruptures de pentes.

Cette approche permet à priori d’identifier rapidement les secteurs les plus dynamiques du cours d’eau mais elle n’est pas suffisante pour définir rigoureusement des tronçons géomorphologiquement homogènes. Des variables supplémentaires caractérisant la morphologie sont donc nécessaires (Nanson et Knighton, 1996). De plus, ce calcul « classique » de la puissance spécifique fournit seulement une approximation car il ne s’appuie pas sur des données de largeur correspondant rigoureusement au débit de plein bord, même si la détermination d’une largeur de plein bord sur les secteurs à chenaux multiples reste imprécise.

3.1.2 Application de la méthodologie de Rosgen

La méthodologie de sectorisation de Rosgen (1994), présentée au paragraphe 1.2.2.4, a ensuite été appliquée. Il s’agit, dans un premier temps, de distinguer les secteurs présentant un chenal unique des secteurs à chenaux multiples, puis de calculer le ratio d’encaissement (ratio de la largeur de la vallée sur la largeur de la rivière). Le nombre de chenaux, les largeurs de bande active, et les largeurs entre digues mesurées par Ginestet (1999) ont été utilisées. Le ratio de la largeur de plein bord W_{bf} sur la hauteur de plein bord moyenne H_{bf} est ici calculé avec les largeurs de bande active B et les

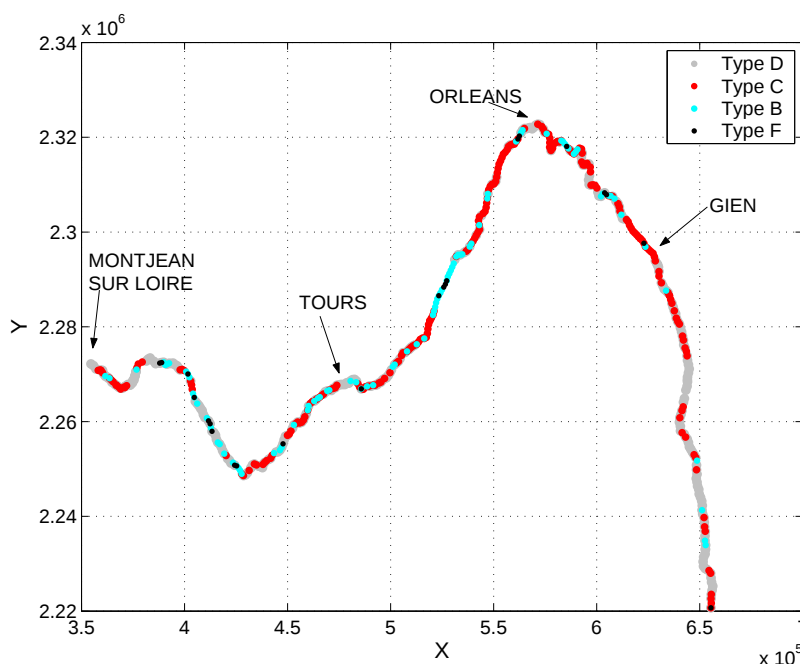


FIGURE 3.2 – Localisation des types de chenaux obtenus avec la méthode de Rosgen (1994)

hauteurs d'eau définies à partir des lignes d'eau mesurées pour un débit biennal Q_2 , assimilé au débit de plein bord ($Q_{bf} = Q_2$). Les hauteurs d'eau sont définies à partir des altitudes des lignes d'eau mesurées pour le débit biennal et des points bas des profils en travers disponibles ; ce ne sont donc pas des hauteurs moyennes mais des hauteurs d'eau « locales » ($H_{bf} = h_{Q_2}$). Il est également important de noter qu'à l'aval de Langeais (PK 782), les hauteurs d'eau utilisées correspondaient à un débit légèrement supérieur au débit biennal. Les valeurs de B/h_{Q_2} ainsi obtenues sont très largement supérieures aux valeurs suggérées par Rosgen (1994). En effet, le calcul nous donne des valeurs comprises entre 25 et 130 alors que Rosgen (1994) considère les valeurs de ratio supérieures à 12 comme élevées et celles supérieures à 40 comme fortes (cf. Fig. 1.7, paragraphe 1.2.2.4). Seuls les chenaux de type F, B, C et D pour lesquels le ratio $W_{bf}/H_{bf} > 12$ sont donc considérés. Le type DA n'est pas inclus car sa définition est imprécise, le ratio W_{bf}/H_{bf} et la sinuosité ayant des valeurs variables. La Loire moyenne est ainsi caractérisée par 117 tronçons de type B, 314 de type C, 401 de type D et 26 de type F (Fig. 3.2). Les tronçons de type B sont par définition larges et peu profonds et peuvent être instables. Le type C est généralement caractéristique des secteurs à méandres ; les tronçons de ce type sont définis comme stables lorsque les berges et le lit majeur sont végétalisées. Les seuls méandres de la Loire moyenne étant les méandres de Guilly, qui couvrent environ 35 km, le nombre de tronçons de type C obtenus est surprenant.

La méthodologie se poursuit ensuite en considérant la pente et le matériel alluvial. Les pentes calculées pour les segments de la Loire moyenne sont inférieures à 0,02 ; la prise en compte de

la pente ne permet donc pas de valider le type de chenal défini précédemment mais la méthode est poursuivie en considérant le matériel alluvial. Le matériel alluvial de la Loire est principalement composé de sable et de graviers, les tronçons sont donc des types B5, C5, D5 et F5 selon la définition de Rosgen (1994). Les tronçons de type D5, caractérisés par la présence de chenaux multiples, présentent, d'après la table d'interprétation proposée (cf. paragraphe 1.2.2.4), une forte sensibilité aux perturbations, avec un potentiel d'ajustement faible, une recharge sédimentaire forte et une forte érosion de berges. Les interprétations proposées sont à prendre avec précaution ; en effet, sur la Loire moyenne, le type D5 se localise sur le secteur amont de la Loire moyenne ainsi qu'à l'aval de Tours. Ces deux secteurs présentent pourtant des dynamiques morphologiques différentes liées à leur localisation et à la présence d'empierrements protégeant les berges sur le secteur aval de la Loire moyenne.

La détermination des paramètres permettant le découpage est complexe à partir des données cartographiques et des mesures de lignes d'eau. La méthodologie semble plus opérationnelle pour des données collectées sur le terrain, similairement au « River Habitat Survey » (RHS) utilisé au Royaume-Uni (Raven *et al.*, 1998). La méthodologie de Rosgen (1994) ne peut s'implémenter directement sur la Loire moyenne ; en effet, les valeurs des paramètres calculées ne correspondent pas aux valeurs proposées et ne sont donc pas discriminantes. De plus, la table d'interprétation ne semble pas adaptée aux spécificités de la Loire moyenne, en particulier pour intégrer les influences anthropiques influençant la dynamique sédimentaire.

3.1.3 Limites des découpages existants de la Loire moyenne

La Loire a fait l'objet de nombreuses études parmi lesquelles des approches de sectorisation. Wasson *et al.* (1993) se sont attachés à découper le bassin de la Loire en hydro-écorégions dont la définition repose sur une hiérarchisation des facteurs de contrôle du fonctionnement physique et écologique des hydrosystèmes. Ce découpage se base ainsi sur la géologie, le relief et le climat. La régionalisation de ces paramètres permet de délimiter onze hydro-écorégions homogènes sur le bassin de la Loire. Ce découpage est ensuite validé en analysant la variabilité hydrologique, la structure morphologique et la distribution des peuplements de poissons. Cette approche globale ne satisfait pas nos objectifs de compréhension des évolutions du lit de la Loire moyenne. Une échelle inférieure de sectorisation est donc nécessaire.

Une sectorisation plus détaillée entre le Bec d'Allier et le Bec de Maine a également été proposée par Malavoi et Gautier (1997). Ce découpage permet de différencier une succession d'entités emboîtées. Les auteurs distinguent ainsi le secteur, l'unité, le tronçon et le sous-tronçon. Cette approche, basée sur une analyse qualitative de la morphologie du fleuve, a été approfondie par Ginestet (1999). La géologie, la largeur du lit actif, le nombre de chenaux, la largeur des îles et la pente du lit mineur

étaient ainsi considérés dans le découpage. L'étude aboutit à un découpage en 4 unités géologiques, 12 tronçons et 33 sous-tronçons. Cette sectorisation reflète plus les variations latérales que les évolutions verticales et n'intègre pas les points durs. De plus, les sous-tronçons ont une longueur comprise entre 7 km et 62 km, ce qui au vu de notre objectif de modélisation nécessite d'être affiné.

3.2 Méthodologie de découpage en tronçons

La définition des tronçons adoptée repose sur les approches existantes de Ginestet (1999) et Rosgen (1994) en mettant l'accent sur la présence des points durs naturels ou artificiels influençant l'écoulement et le transport solide. Le découpage en tronçons a ainsi été conduit en cinq étapes :

- l'identification des unités géologiques
- la détection de discontinuités sur les profils de ligne d'eau d'étiage,
- la présence de points durs naturels ou artificiels,
- l'analyse des formes fluviales,
- la prise en compte de fortes variations de largeurs de bande active.

3.2.1 Identification des unités géologiques

Les caractéristiques géologiques fournissent les bases de la géomorphologie de la rivière car elles conditionnent la largeur de la vallée et sa pente. La Loire moyenne peut être découpée en quatre unités géologiques (Ginestet, 1999). L'unité 1 est constituée par les tables calcaires du Jurassique et s'étend du Bec d'Allier (PK 459) à Bonny sur Loire (PK 550) (cf. paragraphe 2.1.2 et Fig. 3.3). L'unité 2, caractérisée par les formations sablo-argileuse et calcaire du Tertiaire s'étend jusqu'à la confluence avec le Beuvron (PK 720). L'unité 3 correspond à la traversée des plateaux calcaires du Crétacé. La limite de cette unité est localisée aux Ponts-de-Cé (PK 870), à l'aval de la diffuence du Louet et des premiers affleurements du socle armoricain. L'unité 4 est relativement petite, elle correspond aux roches magmatiques et métamorphiques du socle Hercynien. Les quatre unités géologiques ainsi que les pentes moyennes du lit sont présentées sur la figure 3.3.

3.2.2 Analyse des lignes d'eau d'étiages

Les niveaux d'eau d'étiage, relevés à un débit d'environ 70 m³/s à la station hydrométrique de Gien dans les années 1995 et 1996, ont été analysés afin d'identifier les ruptures de pentes et d'aboutir à un premier découpage en tronçons. La figure 3.4 présente un exemple de ligne d'eau d'étiage disponible en 1996 sur les secteurs de Meung-sur-Loire (PK 655 à PK 665) et à l'aval de Blois, sur la commune d'Onzain (PK 715 à PK 725). Les ruptures de pentes sont généralement associées à la présence d'ouvrages d'art, comme à Meung-sur-Loire. Toutefois, sur d'autres secteurs,

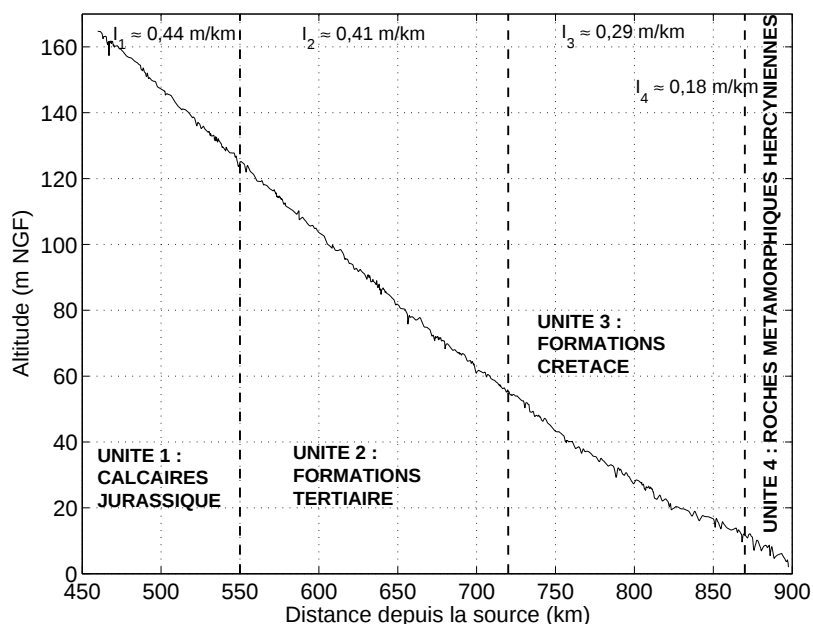


FIGURE 3.3 – Profil en long de la Loire moyenne. Les droites verticales en pointillées délimitent les 4 unités géologiques. Les pentes du lit des différentes unités sont également indiquées.

comme à l’aval de Blois, aucun ouvrage ne semble perturber l’écoulement ; la rupture de pente est vraisemblablement liée à la présence de deux anciens sites d’extractions.

La précision et la répartition spatiale des données de lignes d’eau d’étiage ne permet bien évidemment pas d’identifier toutes les ruptures de pentes de la Loire moyenne mais les principaux seuils affectant l’écoulement peuvent ainsi être répertoriés et les causes de ces ruptures intégrées dans la définition des tronçons.

3.2.3 Prise en compte des points durs affectant la pente

L’analyse des photographies aériennes de 1995, de la base de données des points durs de Rethoret (2001) et la consultation des données d’extraction permet, dans la majorité des cas, d’associer une cause aux ruptures de pente observées sur les lignes d’eau d’étiage (Fig. 3.4). Les affleurements rocheux, ouvrages d’art et ouvrages de navigation et les confluences ont donc été intégrés dans notre classification pour caractériser la limite d’un tronçon. 132 tronçons ont ainsi été définis sur la Loire moyenne.

3.2.4 Analyse des formes fluviales

La campagne de photographies aériennes de 1995 a permis de caractériser la forme en plan des tronçons. Dans un premier temps, des tronçons supplémentaires ont été définis pour différencier les secteurs à chenaux multiples des secteurs à chenal unique. En effet, la présence de chenaux secondaires et d’îles influencent le transport de sédiments et donc les évolutions morphologiques.

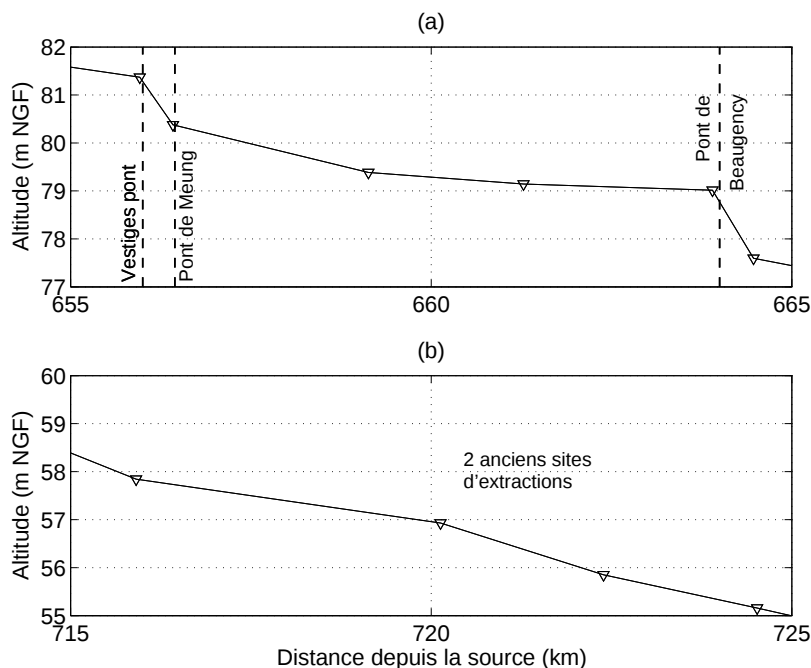


FIGURE 3.4 – Exemple de lignes d'eau d'étiage disponible en 1996 (a) à Meung (PK655) et (b) à l'aval de Blois (PK 720).

Les passages d'un chenal unique à des chenaux multiples (et inversement le passage de chenaux multiples à un chenal unique) ont ainsi permis de délimiter 35 tronçons supplémentaires. Le style fluvial des tronçons a ensuite été considéré. La définition du style fluvial repose sur la détermination de la sinuosité r calculée comme le ratio de la longueur réelle du tronçon (c'est à dire le long de son axe hydraulique) sur la longueur « directe » (à vol d'oiseau) entre le point amont et le point aval du tronçon. La « vrai » définition de la sinuosité est le rapport entre la longueur développée de la rivière L_r et la longueur de la vallée L_v (cf. paragraphe 1.2.1.1) ; la définition adoptée ici induit donc une influence de l'échelle de mesure. La longueur des tronçons ne permettant pas de caractériser les méandres, deux styles fluviaux ont été distingués : les tronçons rectilignes et les tronçons sinueux. Les tronçons rectilignes sont ainsi définis par une sinuosité $r \leq 1,05$ et les tronçons sinueux par une sinuosité $r > 1,05$ (Schumm, 1985).

3.2.5 Variations des largeurs de bande active

La largeur de la bande active B , c'est à dire la largeur correspondant à l'emprise des chenaux d'écoulements, les barres sédimentaires non végétalisées étant incluses dans cette définition, a ensuite été analysée (cf. paragraphe 1.2.3.2). Les largeurs de bande active mesurées par Ginestet (1999) sur les photographies aériennes de 1995 ont été utilisées afin de vérifier que les variations de B entre deux tronçons adjacents étaient de ± 50 m. Il est important de rappeler que les mesures de bande active sont fortement dépendantes de la résolution des photographies, de la végétation riveraine et

de l'interprétation de l'opérateur. L'erreur de mesure est estimée à 25 m sur les photographies ; cette erreur est plus forte pour les mesures effectuées sur les cartes anciennes de 1850 où elle est estimée à 50 m. Cette analyse a cependant permis d'ajuster les limites de quelques tronçons.

3.2.6 Récapitulatif de la méthode de découpage

Les quatre unités géologiques définies présentent une échelle d'analyse trop grande ne permettant pas d'analyser les évolutions morphologiques récentes de la Loire moyenne ; la géologie reste néanmoins un paramètre important dans la compréhension des processus. Le découpage en tronçons proposé repose donc essentiellement sur l'analyse des lignes d'eau d'étiage, l'intégration des points durs (naturels ou artificiels) et la distinction entre les secteurs à chenal unique des secteurs à chenaux multiples. La prise en compte du style fluvial et des variations de largeur de bande active permet d'ajuster les limites des tronçons mais ne sont donc pas des paramètres discriminants. Les paramètres discriminants ainsi que la nomenclature adoptée pour identifier les tronçons par la suite sont fournis dans le tableau 3.1.

Paramètres	Classes définies	
Nombre de chenaux	1 : Unique	2 : Multiple
Limite amont	a : structure artificielle (pont, seuil..) b : affleurement rocheux c : confluence d : île, chenal unique à multiple	
Limite aval	a, b, c, d : voir définition ci-dessus	
Localisation du tronçon	Distance depuis la source en km	

TABLE 3.1 – Paramètres discriminants du découpage en tronçons géomorphologiquement homogènes et définition des classes adoptées pour l'identification des tronçons. La localisation du tronçon n'est pas un paramètre discriminant mais un identifiant du tronçon.

L'application de la méthodologie de découpage à la Loire moyenne sur le jeu de données de 1995 a permis de distinguer 167 tronçons d'une longueur moyenne de 2,5 km. La distribution des différents types de tronçons, basée sur leur nombre de chenaux et leurs limites, est présentée sur la figure 3.5. Les types de tronçons dominants sont ceux à chenal unique ou chenaux multiples délimités par des structures artificielles (type '1aa' ou '2aa'), les tronçons à chenaux multiples délimités par deux îles (type '2dd') ou une île et une structure artificielle (type '2ad' ou '2da'). Un tableau récapitulant les différents tronçons identifiés est donné en Annexe B.

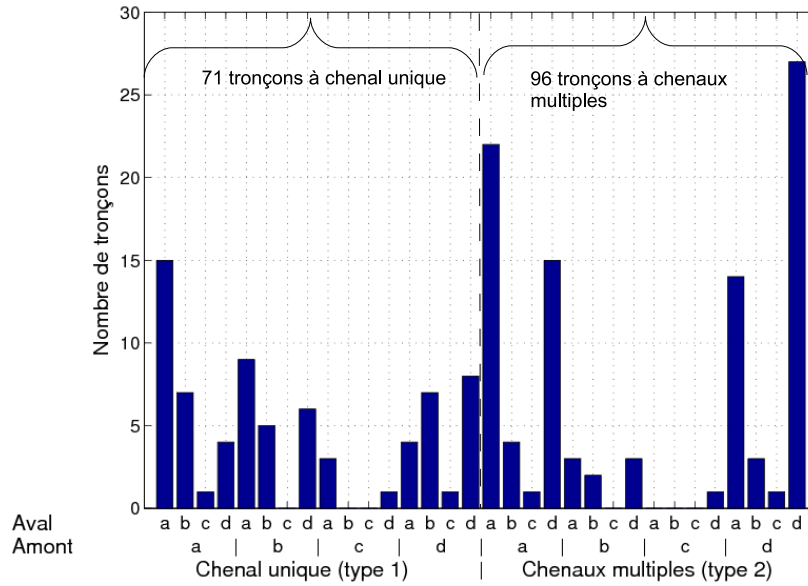


FIGURE 3.5 – Répartition des différents types de tronçons définis. Les limites amont (notées ‘Amont’) et aval (notées ‘Aval’) sont définies par ‘a’ pour une structure artificielle, ‘b’ pour un affleurement rocheux, ‘c’ pour une confluence et ‘d’ pour signifier la présence d’une île.

3.3 Caractérisation des tronçons

Pour chaque tronçon ainsi défini, des paramètres morphologiques complémentaires sont ensuite spécifiés afin de caractériser, classer et analyser les évolutions temporelles des différents tronçons. La détermination de ces paramètres sédimentaires, géométriques et hydrauliques est détaillée dans les paragraphes suivants.

3.3.1 Paramètres géométriques

La vallée de la Loire moyenne est naturellement large (3,5 km en moyenne) mais aucun ajustement latéral ne s’est produit depuis l’endiguement car les levées restreignent le fleuve. La largeur de la vallée n’est donc pas retenue dans notre approche. La distance entre digues est de 700 m en moyenne bien que cette largeur soit significativement réduite au droit des agglomérations (400 m en moyenne à Orléans).

Les données de largeur de bande active B mesurées par Ginestet (1999) et Handfus (2008) sur les photographies aériennes de 1955, 1984, 1995 et 2002 ont été reprises. La largeur de bande active ayant été mesurée tous les 500 m, une valeur moyenne a été attribuée à chaque tronçon. La figure 3.6 présente la largeur de la bande active obtenue pour les tronçons en 1995. B varie entre 200 m et 600 m, avec les tronçons les plus larges se situant à l’aval du secteur d’étude où la configuration en chenaux multiples domine. B augmente également avec la valeur du débit (Knighton, 1999), ce qui est ici vérifié sur la partie aval du secteur d’étude, à l’aval des confluences avec le Cher,

la Vienne et la Maine. Afin de simplifier la comparaison des tronçons et de pouvoir établir une nomenclature, quatre classes de largeur ont été définies. Le type 'J' correspond aux tronçons les plus étroits ($200 \leq B \leq 300$ m), les types 'K' et 'L' à des largeurs intermédiaires et le type 'M' aux tronçons les plus larges ($500 \leq B \leq 600$ m) (cf. Tab. 3.2).

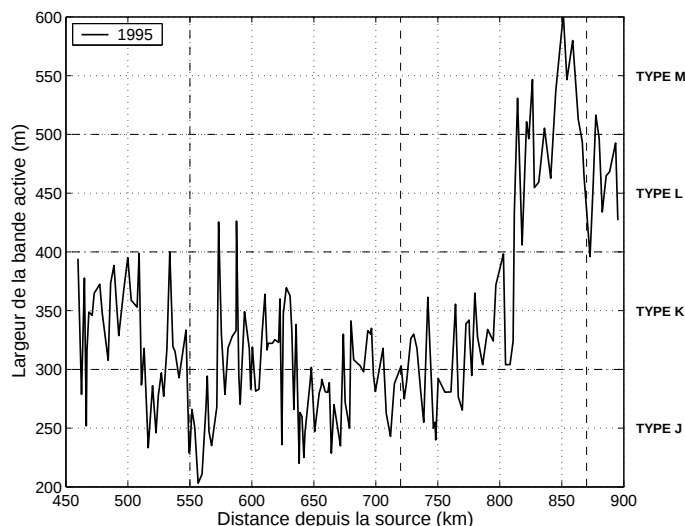


FIGURE 3.6 – Largeur de la bande active des tronçons en 1995 et définition des 4 classes : type J pour $200 \leq B \leq 300$ m, type K pour $300 < B \leq 400$ m, type L $400 < B \leq 500$ m et type M pour $B > 500$ m. Les droites verticales en pointillées séparent les 4 unités géologiques préalablement définies.

La pente des tronçons a été définie en assimilant le profil en long de la Loire moyenne aux profils de lignes d'eau disponibles en étiage. Les pentes I ont été calculées pour 1940 (source : IGN), 1978, 1986, 1996 2002 et 2006 (source : DREAL). Les valeurs obtenues variant entre 0,10 m/km et 0,65 m/km, quatre classes ont été adoptées : de I_1 pour les tronçons avec des pentes faibles à I_4 pour les tronçons ayant les pentes les plus fortes.

3.3.2 Paramètres sédimentaires

A partir des données granulométriques disponibles, des paramètres sédimentaires ont été définis afin de pouvoir appliquer les formules de transport solide. Le diamètre médian d_{50} a été calculé pour chaque échantillon disponible dans le chenal principal ; les prélèvements effectués sur les îles et les grèves ont été exclus. Il semble en effet complexe, au vu des données disponibles et de l'objectif du travail, d'intégrer les variabilités transversales et verticales mentionnées aux paragraphes 2.2.3 et 2.2.4.

La détermination des paramètres granulométriques pour chaque tronçon nécessite une extrapolation des données disponibles. Du fait de la limitation des données, nous assimilerons le diamètre médian d_{50} au diamètre moyen d_m . En l'absence d'injections latérales de sédiments plus grossiers, les processus d'abrasion et de tri granulométriques produisent une décroissance exponentielle de la

taille des sédiments vers l'aval (Knighton 1980, 1982). Sternberg (1875) a proposé la formulation mathématique suivante :

$$d_m = d_{m0} \exp(-a_d x) \quad (3.1)$$

avec d_m le diamètre moyen des sédiments à une distance x (en m) de l'amont, d_{m0} le diamètre moyen des sédiments mesurés à l'amont (à $x = 0$ m, $d_{m0} = 4,4$ mm), et a_d un coefficient reflétant l'effet du tri granulométrique et de l'abrasion ($a_d = 4,65 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ dans notre cas, Fig. 3.7). La valeur de a_d , très variable, dépend de la taille des sédiments et de leur nature lithologique.

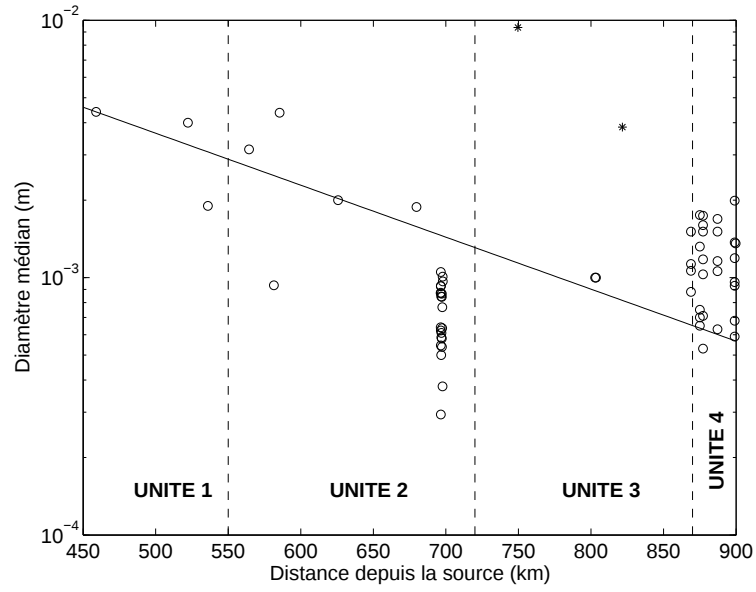


FIGURE 3.7 – Variation longitudinale du diamètre médian du chenal principal. Les cercles représentent les valeurs mesurées retenues et les étoiles les valeurs exclues de l'analyse. La droite représente la loi exponentielle définie (Eqn. 3.1).

Afin de compléter les caractéristiques sédimentaires, un paramètre permettant d'indiquer la dispersion de la taille des sédiments par rapport à leur moyenne a également été défini. Les paramètres les plus répandus sont l'indice de classement (ou sorting index) de Trask (1932) σ_{SO} ou le σ_{ϕ_i} de Folk et Ward (1957), définis respectivement par les équations 3.2 et 3.3 :

$$\sigma_{SO} = \sqrt{d_{75}/d_{25}} \geq 1 \quad (3.2)$$

$$\sigma_{\phi_i} = \frac{d_{84} - d_{16}}{4} + \frac{d_{95} - d_5}{6,6} \quad (3.3)$$

Il est rappelé que le diamètre des sédiments d_i désigne le diamètre tel que $i\%$ en masse des sédiments sont de diamètres inférieurs. Le coefficient de Trask (1932), basé sur les quartiles, ignore les extrêmes de la courbe granulométrique. Le coefficient de Folk et Ward (1957) permet de carac-

tériser les extrêmes de la courbe mais la formulation, plus complexe, est très sensible aux erreurs d'échantillonnage. Le paramètre d'étendue granulométrique σ (Molinas et Wu, 1998; Otto, 1939) sensiblement équivalent au coefficient σ_{SO} et inclus dans le modèle d'évolution RubarBE (cf. Chapitre 5) a donc été préféré pour caractériser les sédiments.

$$\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}} \geq 1 \quad (3.4)$$

Le paramètre d'étendue granulométrique σ calculé pour les différents échantillons présente également une décroissance longitudinale et varie entre 3,5 et 1,6 (Fig. 3.8). Ces valeurs confirment l'hétérogénéité granulométrique des sédiments de la Loire moyenne. De façon similaire à la détermination du d_m , une formulation exponentielle a été définie afin d'obtenir une valeur du paramètre d'étendue granulométrique pour tous les tronçons :

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-a_\sigma x) \quad (3.5)$$

avec $a_\sigma = 1,75 \times 10^{-6}$.

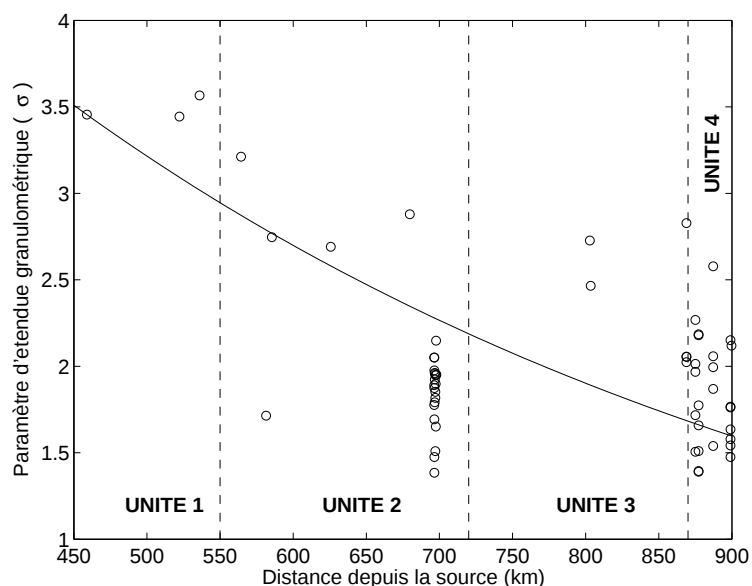


FIGURE 3.8 – Variation longitudinale du paramètre d'étendue granulométrique. Les cercles représentent les valeurs mesurées et la droite la loi exponentielle définie (Eqn. 3.5).

Loin d'être précises ou exactes, les lois définies permettent de donner des valeurs continues et cohérentes au diamètre et au paramètre d'étendue granulométrique en l'absence de données mesurées suffisamment détaillées.

3.3.3 Paramètres hydrauliques

Les paramètres classiques utilisés en géomorphologie fluviale, c'est à dire le ratio largeur de plein bord sur hauteur d'eau W_{bf}/H_{bf} ou ratio d'aspect, la contrainte efficace τ_{eff} et la puissance spécifique ω , ont été calculés pour chaque tronçon. Afin d'obtenir ces paramètres pour un débit de plein bord, un modèle hydraulique unidimensionnel, RubarBE, développé au Cemagref, a été utilisé. Le modèle résout les équations de St Venant par un schéma explicite (Paquier et El Kadi Abderezzak, 2008). Une présentation succincte du modèle est fournie dans la partie modélisation (cf. chapitre 5) ; la description complète et détaillée du modèle est faite par El Kadi Abderrezzak (2006).

Le modèle 1D de la Loire moyenne est basé sur les levés topographiques de 1995 et 1996. Des profils datant de 1993 ont également été numérisés et inclus afin de compléter le secteur à l'aval de Tours. Ces profils ont été localisés à partir des plans d'implantation ; leur localisation peut donc présenter un décalage estimé à environ 25 m. Les berges des profils en travers ont été prolongées avec les données LidAR de 2003. Le prolongement des profils a été réalisé avec un programme développé par le LIFO d'Orléans dans le cadre du projet Extengis (Coullon *et al.*, 2010).

Malgré la controverse associée à la définition d'un débit de plein bord (cf. paragraphe 1.2.2.2), Q_{bf} a été assimilé au débit biennal ($Q_{bf} = Q_2$). Les apports des affluents ont été estimés de façon à conserver les valeurs du débit biennal Q_2 le long de la Loire moyenne. Cette hypothèse est purement numérique car il est improbable voire impossible dans la réalité que les précipitations et les apports des affluents permettent de conserver un débit biennal sur le linéaire de la Loire moyenne.

Le calage du modèle, destiné à minimiser les écarts entre la ligne d'eau calculée et la ligne d'eau mesurée, a abouti à une valeur du coefficient de rugosité K du lit mineur comprise entre $28 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ et $32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Ce calage a été effectué en modélisant le débit biennal Q_2 en régime permanent sur tout le linéaire. Un calage plus affiné a été réalisé par la suite afin de pouvoir modéliser les débits d'étiages et de crues. Il est rappelé que le coefficient de rugosité K correspond à une valeur globale du Strickler qui prend en compte le frottement de peau, due à la rugosité des grains du substrat, la rugosité de forme, fixe ou induite par les formes du lit (rides, dunes..) et la rugosité des berges influencée par la présence de végétation ; ce coefficient fluctue donc en fonction du débit. Le coefficient de rugosité du lit majeur K_{maj} a été pris égal à $15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$; ce coefficient intervient peu dans ce calcul à plein bord, qui, par définition, ne déborde pas dans la plaine d'inondation. Ce coefficient permet toutefois de caractériser la rugosité des îles « naissantes » que la végétation commence à coloniser et qui sont submergées pour un débit biennal Q_2 .

Les données en sortie du modèle ont permis le calcul du ratio de la largeur de plein bord à la hauteur de plein bord (W_{Q2}/H_{Q2}) et de la contrainte moyenne au fond efficace τ_{eff} calculée selon la formule 1.14, donnée dans le paragraphe 1.2.3.4.

La puissance spécifique ω a également été définie (cf. paragraphe 1.2.2.3). De façon similaire à

la contrainte critique, la puissance spécifique critique ω_{cr} a été estimée selon la formule de Bagnold (1980) (cf. paragraphe 1.2.2.3).

L'évolution longitudinale du débit de plein bord et des paramètres hydrauliques des tronçons est présentée sur la figure 3.9. Le ratio W_{Q2}/H_{Q2} varie entre 57 et 421, avec les plus grandes valeurs localisées à l'amont et à l'aval du secteur d'étude où les chenaux multiples dominent. La dispersion observée dans les résultats sur les unités géologiques 1 et 4 est liée à la présence des chenaux multiples où la détermination du ratio W_{bf}/H_{bf} est complexe. En effet, un modèle 1D classique ne permet pas de différencier les hauteurs d'eau entre le chenal principal et un chenal secondaire « perché ». Seul un modèle 1D maillé serait susceptible d'améliorer les résultats. Cette piste n'a toutefois pas été exploitée car les données nécessaires pour caler un tel modèle n'étaient pas disponibles. La hauteur d'eau moyenne calculée pour un débit de plein bord ne varie pas significativement entre l'amont et l'aval de la Loire moyenne (de $H_{Q2} \approx 3$ m à $H_{Q2} \approx 4$ m) ; il est donc logique que le ratio W_{Q2}/H_{Q2} présente les mêmes tendances que la largeur de la bande active B (cf. Fig. 3.6). Trois classes ont été définies pour caractériser le paramètre W_{Q2}/H_{Q2} : de R_1 pour un ratio inférieur à 100 à R_3 pour $W_{Q2}/H_{Q2} > 150$.

La contrainte efficace calculée varie entre 0,9 et 8,2 N/m². τ_{eff} augmente sur l'unité géologique 1 indiquant un potentiel d'érosion. Un maximum est ensuite observé à une distance d'environ 550 km depuis la source, qui correspond à la délimitation entre l'unité géologique 1 et l'unité 2. La décroissance de τ_{eff} à l'aval du PK 550 indique un potentiel à la sédimentation. Trois classes ont été distinguées pour ce paramètre : un transport de sédiments limité correspond à $\tau_{eff} \leq 2,5$, un transport intermédiaire pour des valeurs de $2,5 < \tau_{eff} \leq 5$ et un transport intense pour $\tau_{eff} > 5$.

La puissance spécifique calculée est comprise entre 4 et 47 W/m². Le profil en long de ω est l'opposé de la courbe représentant le ratio W_{Q2}/H_{Q2} . ω est, par définition, fortement corrélée aux variations longitudinales de la pente et de la largeur. Il faut également noter que les paramètres τ et ω se comportent de façon similaire avec une augmentation sur la première unité géologique suivie d'une décroissance. ω présente une plus forte dispersion que τ_{eff} . En se basant sur la formule de Strickler (1923), on peut déduire ω est proportionnel à $\tau^{1,5}$. Les classes définies pour caractériser la puissance spécifique devraient être reliées à des valeurs de la littérature. Toutefois, malgré les essais de nombreux auteurs pour établir une relation entre la stabilité du chenal et une valeur seuil, aucune valeur n'est communément admise. Brookes (1987) rapporte que les rivières à chenal unique et à faible pente du Danemark et du Pays de Galles atteignent un état d'équilibre pour des valeurs de ω inférieures à 35 W/m². Pour Magilligan (1992), les ajustements morphologiques des rivières alluviales se produisent pour des valeurs de puissance spécifique supérieure à 300 W/m². Au vu de ces disparités dans la littérature, trois classes ont été distinguées spécifiquement pour qualifier la Loire moyenne : ω_1 pour $\omega \leq 10$, ω_2 pour $10 < \omega \leq 20$, et ω_3 pour $\omega > 20$ W/m².

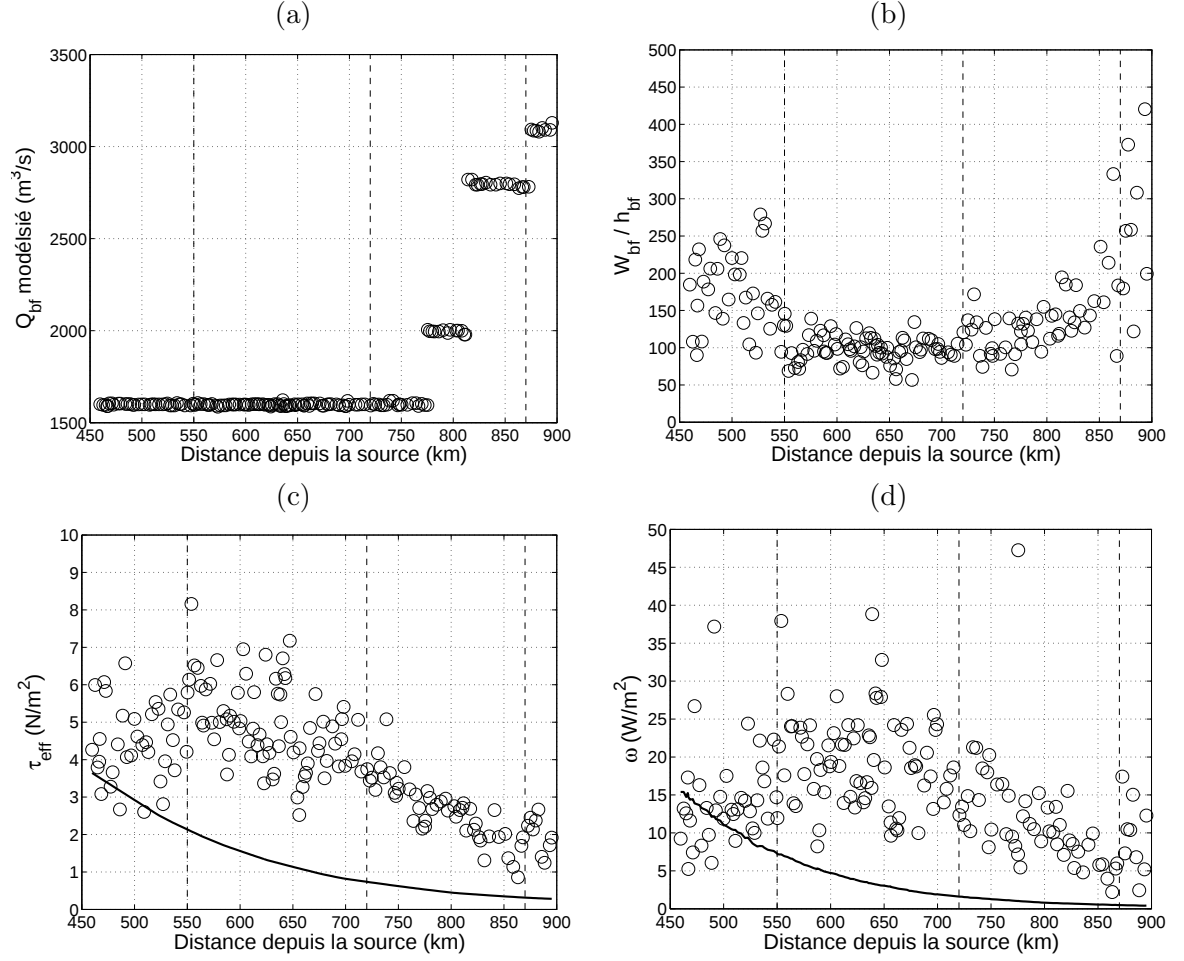


FIGURE 3.9 – Variations longitudinales (a) du débit de plein bord ($Q_{bf} = Q_2$), et des paramètres hydrauliques (b) ratio largeur de plein bord sur hauteur de plein bord (W_{Q_2}/H_{Q_2}), (c) contrainte efficace τ_{eff} (avec la contrainte critique en trait plein) et (d) puissance spécifique ω (avec la puissance critique en trait plein). Les droites verticales en pointillées délimitent les 4 unités géologiques.

3.3.4 Synthèse des paramètres retenus pour l'étude de la Loire moyenne

Les classes adoptées pour les différents paramètres morphologiques des tronçons de la Loire moyenne sont récapitulées dans le tableau 3.2. Les paramètres ont été regroupés selon qu'ils permettent une description de la forme en plan, du profil en long ou de la géométrie. La distance depuis la source en kilomètre ainsi qu'une estimation des quantités de sédiments extraites du lit mineur sont également fournies afin de permettre la localisation des tronçons et de compléter leur description. Les estimations des quantités de sédiments extraites annuellement dans le chenal principal sont basées sur les autorisations de prélèvements annuelles disponibles entre Nevers et Saumur (cf. Annexe C). Trois classes ont été définies pour fournir une indication sur la quantité de sédiments prélevée : de *E1* pour caractériser les tronçons avec un taux d'extraction annuel faible, à *E3* pour les tronçons où les quantités extraites étaient conséquentes.

Certains des paramètres définis précédemment étaient nécessaires pour découper ou affiner le

découpage en tronçons mais ils ne présentent pas forcément un intérêt pour analyser les évolutions récentes de la Loire moyenne. La colonne 'R' du tableau 3.2 identifie par un ou plusieurs '+' les paramètres les plus pertinents et un '-' les paramètres écartés de l'analyse des évolutions. Le paramètre caractérisant le style fluvial n'est pas retenu dans notre analyse temporelle. En effet, la présence de digues contraint la Loire moyenne latéralement empêchant toute divagation et donc le passage d'un chenal rectiligne à un chenal à méandre. Cette stabilité est à l'opposée de la Loire amont où le « val libre » permet les ajustements latéraux (Leteinturier *et al.*, 2000).

Le nombre de chenaux, les limites des tronçons et leur largeur de bande active sont conservés pour caractériser les formes en plan. Pour le profil en long, le paramètre de pente I est primordial, cependant la contrainte efficace et la puissance spécifique sont directement liées à I . Compte tenu des incertitudes associées à la détermination du d_{50} , et le diamètre moyen des sédiments du lit étant lié à la valeur de la pente du lit I , les classes caractérisant le d_{50} sont simplifiées en les reliant aux unités géologiques. Il est bien évident que l'analyse des évolutions morphologiques étant réalisée sur une période de plusieurs décades, les actions anthropiques influencent les évolutions récentes bien plus fortement que la géologie, mais le paramètre sédimentaire reste fondamental quant à la compréhension du transport solide.

Le transport de sédiments et la géométrie du chenal sont caractérisés par trois paramètres hydrauliques : le ratio largeur pour un débit biennal sur hauteur d'eau pour un débit biennal, la contrainte efficace et la puissance spécifique. Le ratio W_{Q2}/H_{Q2} complète les données de largeur de bande active ; en effet, les tronçons larges et peu profonds peuvent ainsi être distingués des tronçons de faibles largeurs avec un chenal étroit. Les largeurs de plein bord sont légèrement supérieures aux mesures de bande active réalisées sur les photographies aériennes disponibles pour des débits d'étiage ($W_{Q2}/B \approx 1.5$). La contrainte efficace intègre de nombreuses variables géomorphologiques et sédimentaires (hauteur d'eau, pente d'énergie, diamètre médian des sédiments) et a donc été conservée. La puissance spécifique a également été retenue car elle fournit une mesure de l'énergie disponible dans la rivière et est liée au transport de sédiment (Bagnold, 1977) et aux évolutions morphologiques. Les deux derniers paramètres restent cependant très liés.

	Paramètres	Classes définies		R
FORME EN PLAN	Style fluvial	1 : Rectiligne	2 : Sinueux	-
	Nombre de chenaux	1 : Unique	2 : Multiple	++
	Largeur de la bande active (B)	'J' pour $200 \leq B \leq 300$ m 'K' pour $300 < B \leq 400$ m 'L' pour $400 < B \leq 500$ m 'M' pour $500 < B \leq 600$ m		+
PROFIL EN LONG	Pente moyenne (I)	'I ₁ ' pour $I \leq 0,25$ m/km 'I ₂ ' pour $0,25 < I \leq 0,35$ m/km 'I ₃ ' pour $0,35 < I \leq 0,45$ m/km 'I ₄ ' pour $I > 0,45$ m/km		++
	Diamètre médian du lit (d_{50})	'd ₁ ' pour $d_{50} > 2,5$ mm (Unité 1) 'd ₂ ' pour $1 < d_{50} \leq 2,5$ mm (Unité 2) 'd ₃ ' pour $d_{50} \leq 1$ mm (Unité 3 et 4)		+
	Paramètre d'étendue granulométrique (σ)	'σ ₁ ' pour $\sigma < 2$ 'σ ₂ ' pour $\sigma > 2$		-
GEOMETRIE	Ratio largeur sur profondeur (W_{Q2}/H_{Q2})	'R ₁ ' pour $W_{Q2}/H_{Q2} \leq 100$ 'R ₂ ' pour $100 < W_{Q2}/H_{Q2} < 150$ 'R ₃ ' pour $W_{Q2}/H_{Q2} > 150$		++
	Contrainte efficace (τ_{eff})	'τ ₁ ' pour $\tau_{eff} \leq 2,5$ N/m ² 'τ ₂ ' pour $2,5 < \tau_{eff} \leq 5$ N/m ² 'τ ₃ ' pour $\tau_{eff} > 5$ N/m ²		++
	Puissance spécifique (ω)	'ω ₁ ' pour $\omega \leq 10$ W/m ² 'ω ₂ ' pour $10 < \omega \leq 20$ W/m ² 'ω ₃ ' pour $\omega > 20$ W/m ²		+
	Quantité annuelle extraite dans le chenal principal (EX)	'E1' pour $EX \leq 1\,000$ T/an 'E2' pour $EX \leq 100\,000$ T/an 'E3' pour $EX > 100\,000$ T/an		+
	Localisation du tronçon	Distance depuis la source en km		+

TABLE 3.2 – Classes définies pour caractériser les tronçons.

Le tableau 3.3 illustre les corrélations entre le paramètre de largeur de bande active B et le ratio W_{Q2}/H_{Q2} , ainsi qu'entre les classes de pentes I et les classes de contrainte efficace τ_{eff} . Le ratio W_{Q2}/H_{Q2} et τ_{eff} sont à priori plus pertinent pour la compréhension des évolutions morphologiques. L'analyse temporelle des évolutions est seulement réalisable à partir des données de largeur de

bande active et de pente où des jeux de données sont disponibles dans le temps (1955, 1984, 1995 et 2002). En effet, un seul jeu de données topographiques datant de 1995 et couvrant l'ensemble de la Loire moyenne et nécessaire à la construction du modèle est disponible. Les classes définies pour la contrainte efficace sont fortement corrélées aux classes caractérisant la puissance spécifique. L'analyse de ces deux paramètres (τ_{eff} et ω) est peut-être donc superflue.

	W_{Q2}/H_{Q2}				τ				τ		
	R_1	R_2	R_3		τ_1	τ_2	τ_3		τ_1	τ_2	τ_3
<i>J</i>	27	13	5,0	<i>I</i> ₁	11	9,6	1,2	ω_1	11	9,0	1,2
<i>K</i>	6,0	22	10	<i>I</i> ₂	3,0	15	6,0	ω_2	4,2	38	12
<i>L</i>	0,0	4,8	6,0	<i>I</i> ₃	1,8	17	7,8	ω_3	0,6	9,6	14
<i>M</i>	0,6	1,2	4,2	<i>I</i> ₄	0,6	15	13				

TABLE 3.3 – Correspondance en pourcentage entre les classes définies pour la largeur de la bande active *B* (classe du plus étroit au plus large : de *J* à *M*) et les classes du ratio W_{Q2}/H_{Q2} (ratio croissant de R_1 à R_3), les classes de pente *I* (pentes croissantes de I_1 à I_4) et les classes de contrainte efficace τ_{eff} (croissant de τ_1 à τ_3) et les classes de puissance spécifique ω (croissant de ω_1 à ω_3) et les classes de τ_{eff} .

3.4 Synthèse du chapitre

3.4.1 Spécificités du découpage de la Loire moyenne

Le découpage de la Loire moyenne proposé est basé sur les paramètres morphologiques utilisés classiquement dans les approches de sectorisation des cours d'eau, complété avec la prise en compte des points durs artificiels afin de considérer les influences anthropiques dans l'analyse des évolutions. Les paramètres hydrauliques sont dérivés avec un modèle hydraulique permettant une meilleure définition du plein bord. Les 167 tronçons obtenus permettent une analyse des évolutions morphologiques à une échelle d'étude correcte pour comprendre les processus et répondent aux objectifs de modélisation qui seront développés dans les chapitres 5, 6 et 7.

La sectorisation de la Loire moyenne a été réalisée sur les données de 1995. Les limites des tronçons peuvent, par définition, varier dans le temps. Cependant, afin de faciliter les comparaisons, les limites définies sur le jeu de données de 1995 ont été conservées dans l'analyse des évolutions morphologiques. Cette hypothèse est donc « imposée » par les données disponibles et par la démarche qui doit permettre de comparer des tronçons à deux dates différentes.

3.4.2 Apport de la modélisation à la classification

La dérivation des paramètres hydrauliques avec un modèle hydraulique 1D permet une détermination plus rigoureuse pour un débit assimilé au débit de plein bord. Ces paramètres permettent

une description de la géométrie du chenal (W_{Q2}/H_{Q2}) et une estimation de son potentiel dynamique (ω et τ_{eff}).

La puissance spécifique a pu ainsi être calculée avec la pente de ligne d'eau correspondant au débit de plein bord (J_{Q2}). En se basant sur les résultats du modèle, on trouve $0,17 < J_{Q2}/I < 19$. Ces fortes variations sont dues à la présence de structures artificielles ou naturelles qui influent sur la ligne d'eau à l'étiage mais sont gommées pour des débits plus forts. Les valeurs de la puissance spécifique calculées avec les résultats du modèle hydraulique au niveau de ces structures artificielles sont donc logiquement plus faibles que les valeurs de ω définies à partir des photographies aériennes et des lignes d'eau d'étiage (cf. Fig 3.1 et 3.9). Ces variations sont également liées aux largeurs de plein bord calculées avec le modèle qui sont supérieures aux largeurs de bande active mesurées sur les photographies aériennes ($W_{bf}/B \approx 1,5$).

La distribution des classes définies pour les paramètres hydrauliques pour les principaux types de tronçons est illustrée sur la figure 3.10. Les tronçons à chenal unique délimités par deux structures artificielles ou naturelles présentent un ratio d'aspect important (la classe $R1$ domine), un potentiel de sédimentation important (les classes τ_2 et τ_3 dominant) et une puissance spécifique reflétant les tronçons avec une dynamique sédimentaire moyenne (la classe ω_2 domine) (Fig. 3.10a). Le ratio d'aspect et la contrainte efficace ne présentent pas de tendance significative pour les tronçons à chenaux multiples délimités par deux structures artificielles ou naturelles (Fig. 3.10b). La dynamique sédimentaire est légèrement plus faible que les résultats obtenus sur les tronçons à chenal unique (τ_2 domine) et la puissance spécifique est comparable. Les tronçons à chenaux multiples délimités par une structure naturelle ou artificielle et une île et les tronçons délimités par deux îles (Fig. 3.10c et 3.10d) présentent des tendances similaires avec des ratios d'aspect élevés et des potentiels de sédimentations moyens (la classes τ_2 domine). Les résultats obtenus pour la contrainte efficace sont similaires aux résultats de la puissance spécifique mais avec une dispersion moindre. Bien que ω soit communément utilisé en géomorphologie fluviale, τ_{eff} semble plus adapté pour caractériser les tronçons dynamiques.

La contrainte efficace rendue adimensionnelle par la contrainte critique τ_{eff}/τ_{cr} est représentée en fonction du ratio W_{Q2}/H_{Q2} sur la figure 3.11. Les paramètres τ_{eff}/τ_{cr} et W_{Q2}/H_{Q2} permettent de distinguer les quatre unités géologiques :

- dans l'unité géologique 1, caractérisée par les tables calcaires du Jurassique, le ratio τ_{eff}/τ_{cr} est relativement faible ($\tau_{eff}/\tau_{cr} \approx 1,5$) et indépendant des valeurs du ratio W_{Q2}/H_{Q2} ;
- sur l'unité géologique 2, c'est à dire les formations sablo-argileuse et calcaire du Tertiaire, τ_{eff}/τ_{cr} atteint une valeur intermédiaire ($2 < \tau_{eff}/\tau_{cr} < 6,5$) et présente un rapport d'aspect constant ($W_{Q2}/H_{Q2} \approx 100$).
- l'unité 3, défini par le plateau calcaire du Crétacé, est caractérisée par un ratio τ_{eff}/τ_{cr} relativement élevé ($2,8 < \tau_{eff}/\tau_{cr} < 9$) qui a tendance à décroître lorsque le ratio W_{Q2}/H_{Q2}

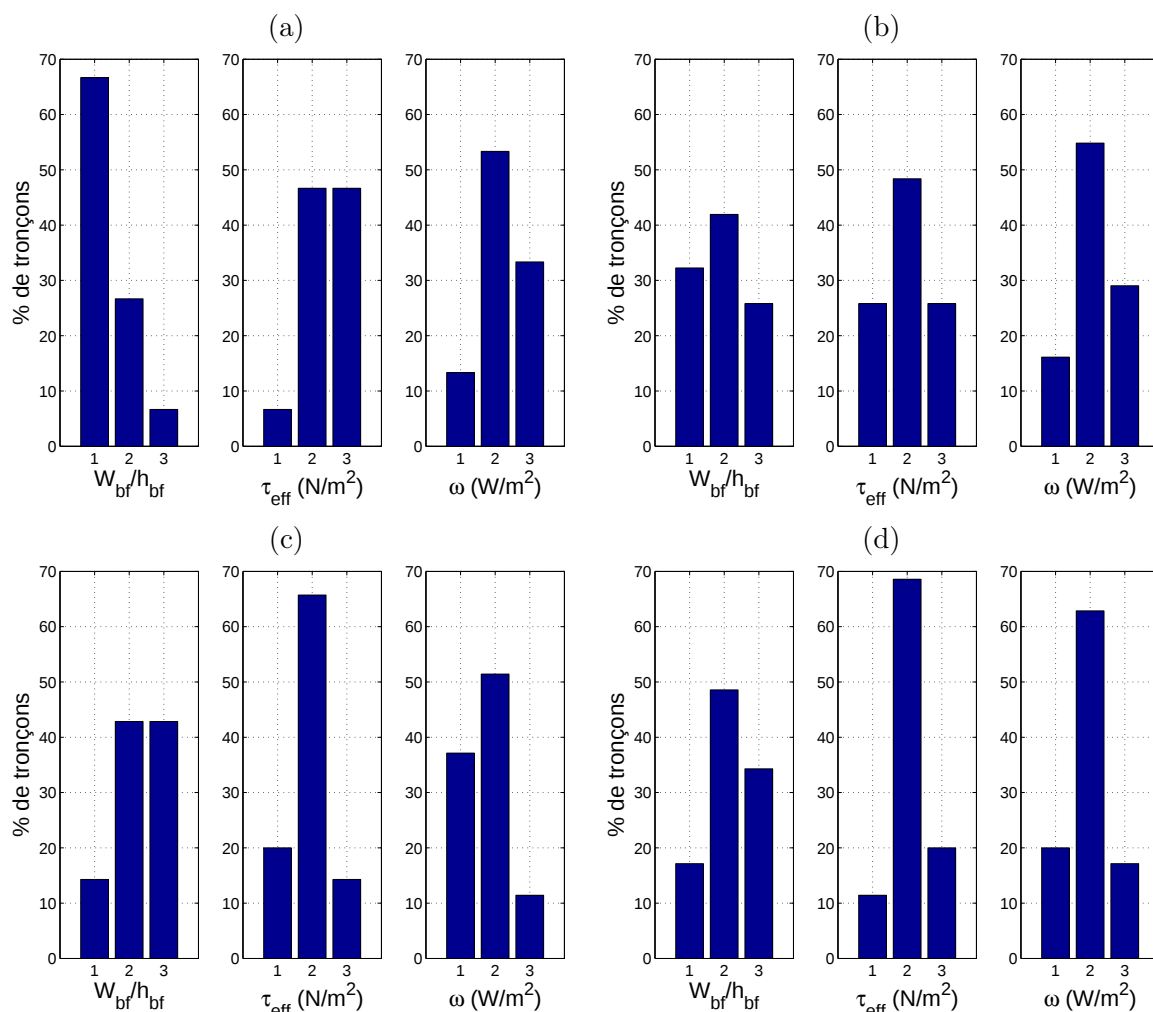


FIGURE 3.10 – Répartition des classes définies pour les caractéristiques hydrauliques pour (a) les tronçons à chenal unique délimité par deux structures artificielles ou naturelles (type ‘1aa’, ‘1ab’, ‘1ba’ ou ‘1bb’); (b) tronçons à chenaux multiples délimités par deux structures artificielles ou naturelles (type ‘2aa’, ‘2ab’, ‘2ba’ ou ‘2bb’); (c) tronçons à chenaux multiples délimités par une structure naturelle ou artificielle et une île (type ‘2ad’, ‘2da’, ‘2bd’ ou ‘2db’); (d) tronçons délimités par 2 îles (type ‘1dd’ ou ‘2dd’).

augmente;

- bien que l’unité 4 soit la plus petite (et donc défini par seulement 9 tronçons), cette unité géologique caractérisée par les roches magmatiques et métamorphiques (Hercynien) semble présenter des tendances similaires à celles observées sur l’unité 3.

L’unité géologique 1, caractérisée par des chenaux multiples est, au vu des valeurs de τ_{eff}/τ_{cr} obtenues, plus dynamique que les autres secteurs présentant des chenaux multiples (c’est à dire l’aval de l’unité 3 et l’unité 4). En effet la valeur de la contrainte efficace atteint un pic à l’aval de l’unité géologique 1 tandis que la contrainte critique décroît de l’amont vers l’aval. L’unité 2 semble être une unité de transition et correspond aux zones fortement urbanisées (Orléans, Blois,..). La décroissance du ratio τ_{eff}/τ_{cr} observée sur l’unité 2 peut être mis en relation avec l’évolution longitudinale de la

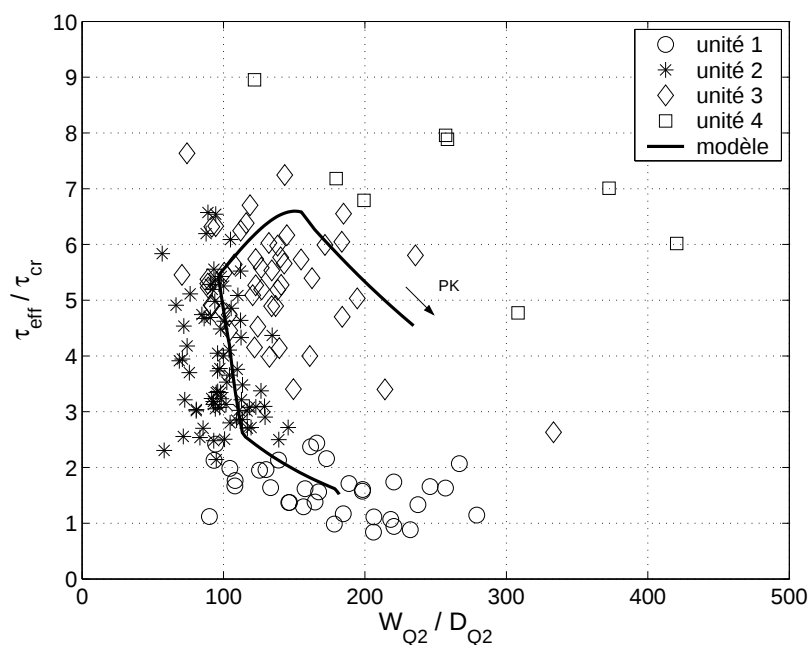


FIGURE 3.11 – Relation entre le ratio de la contrainte efficace adimensionnée par la contrainte critique (τ_{eff}/τ_{cr}) et le ratio largeur de plein bord sur hauteur d'eau à plein bord (W_{Q2}/H_{Q2}). La courbe en trait plein représente une fonction continue du PK pour ces paramètres.

contrainte efficace (Fig. 3.9) : le potentiel de sédimentation diminue avec la distance.

En prenant une fonction continue du PK pour chacun de ces paramètres (de manière identique au d_{50}), on s'aperçoit d'une tendance générale et continue (courbe en trait plein Fig. 3.11), avec des variations ou tendances pour chacune des unités géologiques. Cette courbe confirme les tendances observées sur les différents tronçons des quatre unités géologiques.

4

Evolutions morphologiques de la Loire moyenne depuis le début du XX^{ème} siècle

Depuis le début du XX^{ème} siècle, le lit de la Loire moyenne s'est incisé et la largeur de sa bande active s'est réduite (Gasowski, 1994). La définition des tronçons homogènes permet d'analyser les évolutions morphologiques en les spatialisant. Il s'agit ici de comparer les évolutions des différents types de tronçons identifiés en regroupant les tronçons selon les unités géologiques, les limites des tronçons et la présence d'anciens sites d'extractions. Trois sites présentant des styles fluviaux distincts sont identifiés comme sites de référence pour la modélisation. Les caractéristiques de ces sites sont décrites et leurs évolutions dans le temps détaillées.

4.1 Evolution des tronçons de la Loire moyenne

4.1.1 Evolutions des tronçons selon les unités géologiques

Les ajustements transversaux et longitudinaux sont analysés en considérant les 4 unités géologiques définies au paragraphe 3.2.1. Les évolutions temporelles des ajustements sont représentées sur la figure 4.1 pour quatre dates caractéristiques : au début de la période d'extractions mécanisées en 1955, à l'apogée des extractions dans les années 1980, après l'arrêt des extractions en 1995 et quasiment une décennie après l'arrêt des extractions (2002). Les données historiques de lignes d'eau étant limitées, les pentes calculées datent de 1978 et non de 1955 (Fig. 4.2).

Dans l'unité géologique 1, correspondant aux tables calcaires du Jurassique, la largeur de la bande active s'est réduite depuis 1955 (les classes de largeur de bande active J et K dominant en 1996 et 2002). Cette diminution de la largeur de la bande active dans ce secteur présentant des chenaux multiples est liée à la végétalisation des chenaux secondaires, et donc au rattachement des îles aux berges (Grivel, 2008). La pente diminue pour la majorité des tronçons de cette unité, probablement liée à une érosion régressive due à la réduction de la bande active. L'unité géologique 2, correspondant aux formations sablo-argileuse et calcaire Tertiaire, est caractérisée par des zones urbaines limitant les ajustements latéraux. L'espace de mobilité étant restreint, la largeur de la bande active est ainsi

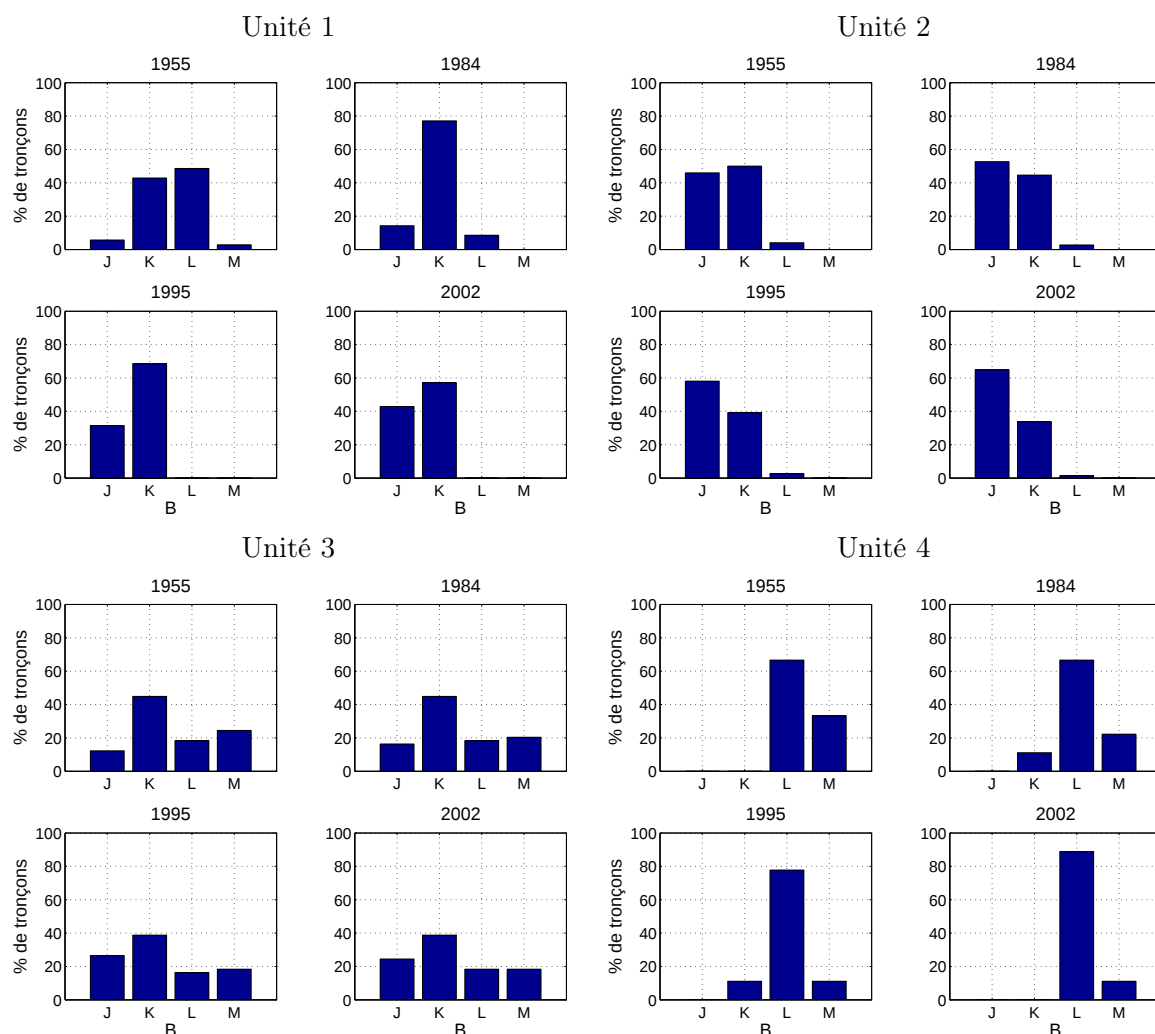


FIGURE 4.1 – Evolution dans le temps de la distribution des classes de la largeur de la bande active B en fonction des quatre unités géologiques. La définition des classes de largeur J, K, L, M est donnée dans le tableau 3.2 (la classe J correspond à la largeur la plus faible et la classe M à la largeur la plus grande).

restée relativement stable (les classes J et K dominent quelle que soit la période considérée). L'unité géologique 3 (plateaux calcaires du Crétacé) est dominée par des chenaux multiples. Les berges étant protégées dans ce secteur, peu d'évolutions latérales se sont produites. Similairement aux unités 1 et 2 la pente a diminué. Les évolutions constatées sur l'unité 4 sont difficiles à interpréter. En effet, cette unité est seulement définie par neuf tronçons. On peut toutefois noter que le nombre de tronçons larges (type M) a légèrement diminué.

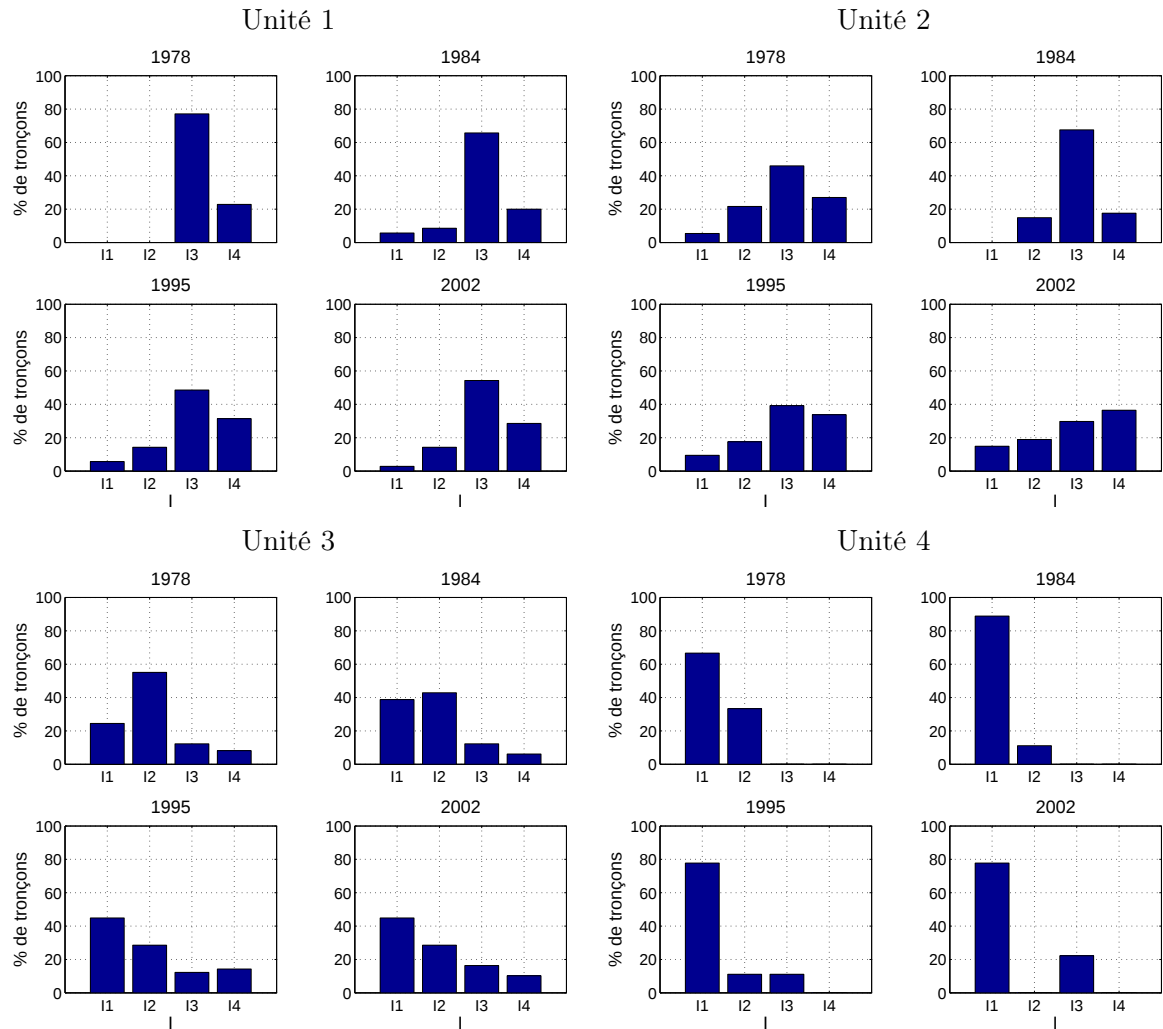


FIGURE 4.2 – Evolution dans le temps de la distribution des classes de pente en fonction des quatre unités géologiques. La définition des classes I₁, I₂, I₃ et I₄ est donnée dans le tableau 3.2 (la classe I₁ correspond aux pentes les plus faibles et la classe I₄ aux pentes les plus fortes).

4.1.2 Evolutions des tronçons selon leurs limites

La figure 4.3 présente la variation annuelle (Δz) entre 1978 et 2002 pour les neuf types de tronçons dominants. Δz a été défini à partir des données de lignes d'eau d'été. Une estimation des erreurs est fournie sur le graphe. Les erreurs ont été estimées en calculant l'écart type, ce qui permet de visualiser la dispersion dans les données ($\pm 1 \times \text{std}$). La tendance générale est au creusement du lit entre 1978 et 1996 suivie par une incision ralentie voire une aggradation entre 1996 et 2002. Les tronçons présentant des chenaux multiples ont évolué plus rapidement que les tronçons à chenal unique bien que le taux d'évolution ait diminué depuis 1996.

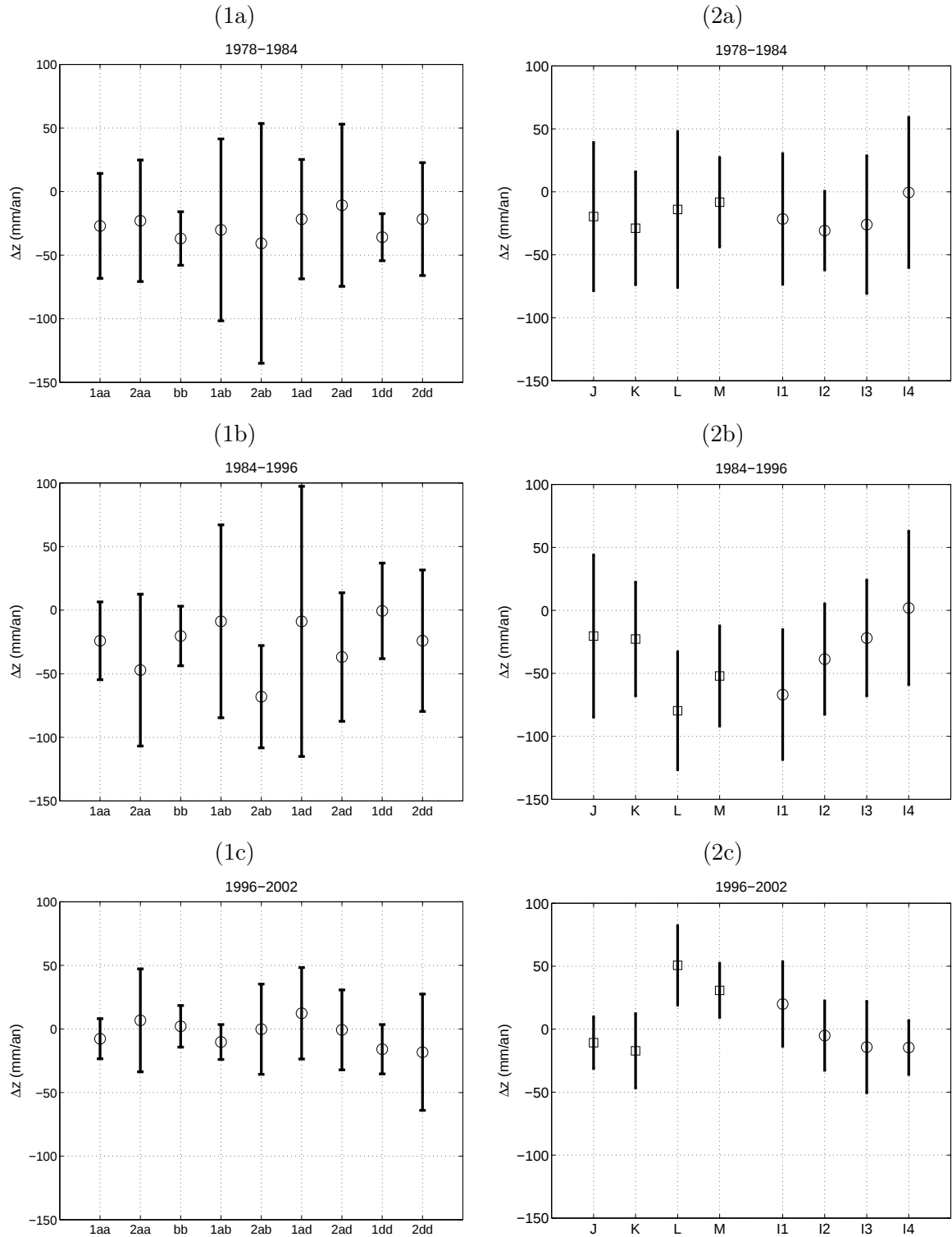


FIGURE 4.3 – Variation annuelle de l'altitude du fond du lit (Δz) pour (a) 1978-1984, (b) 1984-1996, et (c) 1996-2002 pour les 9 types de tronçons définis par (1) leurs limites et (2) les types de tronçons définis par leurs classes de largeur (avec de J à M : les largeurs croissantes) et de pente (avec de I₁ à I₄ : les pentes croissantes). Les barres d'erreurs permettent de visualiser la dispersion dans les données.

Les tronçons délimités par au moins une structure artificielle (type ‘1aa’, ‘2aa’ ou ‘2ad’) présentent peu d’évolutions verticales depuis 1996. Le Δz des tronçons ‘1aa’ calculé entre 1978 et 1984 est fortement influencé par deux tronçons particuliers localisés à l’amont de Blois, où la construction du barrage et du pont ont perturbé l’écoulement dans les années 1970. Ces structures ont eu un effet ponctuel d’incision qui s’est atténué dans le temps. De façon similaire, la tendance à l’incision observée pour les tronçons de type ‘2aa’ est principalement causée par trois tronçons influencés par des ponts et localisés à Tours. Ces trois tronçons présentent une incision supérieure à 45 cm. Un comblement est visible depuis 1996 sur les tronçons à chenaux multiples délimités par deux structures artificielles (type ‘2aa’), en particulier à l’aval de la confluence avec la Vienne.

Les évolutions observées pour les tronçons définis par leur pente peuvent être associées aux évolutions constatées en considérant les classes de largeur de bande active. Les tronçons présentant des pentes faibles (‘I₁’ et ‘I₂’) correspondent aux tronçons les plus larges (‘L’ et ‘M’) : les variations de Δz sont similaires avec une incision conséquente entre 1984 et 1996 suivie par une période d’aggradation entre 1996 et 2002. De la même façon, les tronçons étroits sont les tronçons ayant les pentes les plus importantes et leurs évolutions sont comparables.

4.1.3 Influence des extractions sur les évolutions

Une action anthropique qui a eu un impact direct sur la géométrie du lit de la Loire est l’extraction de granulats en lit mineur. La figure 4.4 présente les évolutions annuelles du niveau du lit entre 1978 et 2002 pour les 3 classes d’extractions définies.

La tendance générale est à l’incision pour toutes les classes et toutes les périodes. L’incision est similaire pour toutes les classes durant la période d’extraction (1978-1984). Entre 1984 et 1995, les tronçons affectés par des extractions massives se sont considérablement érodés avant de se combler à la fin de la période d’extraction (1996-2002). Pour cette dernière période nous avons défini les classes d’extractions en se basant sur la moyenne des quantités annuelles extraites sur toute la période d’extraction considérée (de 1978 à 1995).

Pour cinq tronçons particuliers où la quantité de sédiments extraite est connue et considérable, le volume de prélèvement autorisé V_{ex} est comparé au volume calculé à partir des données de lignes d’eau d’étiage pour la période 1978-2002. Ce volume déposé ou érodé $V_{d/e}$ a été estimé en multipliant Δz par la largeur de la bande active et par la longueur du tronçon ($V_{d/e} = \Delta z \times B \times L_t$). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.1 et permettent de visualiser les effets localisés des extractions. Il faut noter que les valeurs négatives représentent de l’érosion.

Les volumes de sédiments extraits du lit mineur sont supérieurs aux volumes calculés à partir des lignes d’eau d’étiage. Avant de détailler les résultats obtenus dans ce tableau, il faut rappeler les incertitudes associées aux mesures de lignes d’eau et de largeurs de bande active, aux quantités

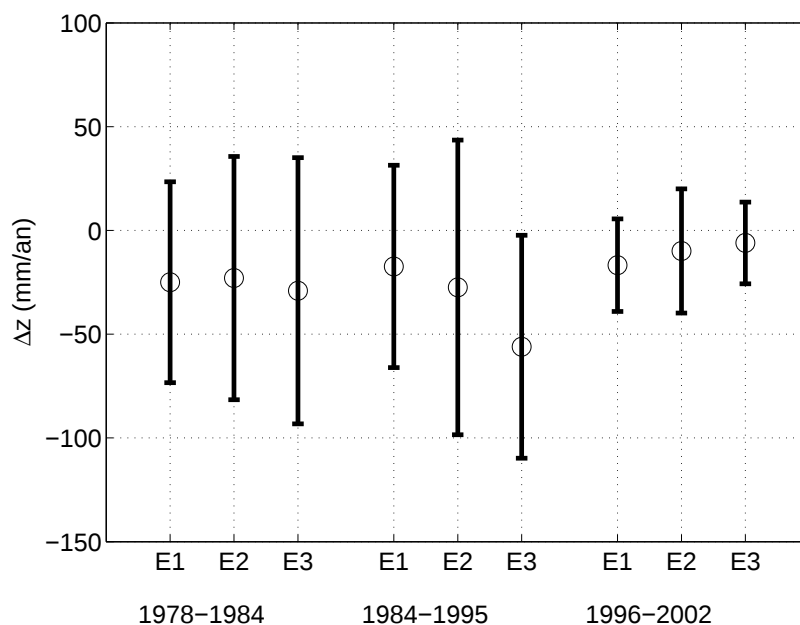


FIGURE 4.4 – Variation annuelle de l'altitude du fond du lit (Δz) en fonction des quantités de sédiments extraites pour les périodes 1978-1984, 1984-1996, et 1996-2002 (E1 : faible taux d'extraction, E2 : taux d'extraction modéré et E3 : fort taux d'extraction). Les barres d'erreurs permettent de visualiser la dispersion dans les données.

PK (km)	1978 - 1984			1984 - 1996			1996 - 2002
	V_{ex} (10^4 m^3)	$V_{d/e}$ (10^4 m^3)	Ratio	V_{ex} (10^4 m^3)	$V_{d/e}$ (10^4 m^3)	Ratio	$V_{d/e}$ (10^4 m^3)
502,65	-11,5	9,4	-1,2	-2,8	-6,1	0,5	-8,2
536,50	-78,6	9,2	-8,5	-0,5	0,03	-16,6	-0,4
625,35	-13,4	-3,6	3,7	-4,8	-0,6	8	-0,6
705,81	-15,1	-2,9	5,2	-4,3	-1,6	2,7	-0,5
748,28	-15,8	-0,4	39,5	-6,1	-2,8	2,2	0,4

TABLE 4.1 – Comparaison entre le volume de sédiments extrait annuellement (V_{ex}) et le volume déposé ou érodé ($V_{d/e}$) entre 1978 et 1984, 1984 et 1996 et 1996 et 2002 pour 5 tronçons présentant de forts taux d'extraction. Le ratio correspond au rapport entre le volume extrait et le volume érodé ou déposé calculé à partir des lignes d'eau d'étiage.

de sédiments prélevés et à la localisation des sites d'extractions. Il faut également noter que les ajustements diffèrent d'un tronçon à l'autre. Le tronçon '502,65' est caractérisé par la présence d'un pont à sa limite aval. Le lit s'est comblé pendant la période correspondant au pic d'extractions. Ce comblement est contraire aux évolutions attendues mais il est plausible que la fosse d'extraction soit invisible sur les données de lignes d'eau d'étiage (les localisations des points de mesures de lignes d'eau ne correspondent pas aux localisations des fosses d'extractions). Ensuite une phase d'incision est observée entre 1984 et 1996 malgré une réduction dans les prélèvements de matériaux. Pour ce tronçon, l'influence des extractions n'est pas visible à l'échelle du tronçon.

Le tronçon '536,50' a subi des extractions massives de granulats pour la construction de la centrale nucléaire de Belleville. Ce tronçon est localisé à l'aval du seuil transversal de la centrale, qui limite le transport de sédiments. Le volume calculé à partir des lignes d'eau entre 1978 et 1984 montre un comblement de ce tronçon alors qu'en utilisant les données de profils en travers on obtient un volume érodé de $8,3 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{an}$ (Rollet, 2007). Les travaux de recalibrage du lit effectués pour la construction de la centrale ont eu un effet ponctuel qui n'est pas visible sur le tronçon dans sa globalité (similairement aux évolutions constatées sur le tronçon '502,65'). Les résultats obtenus pour les trois autres tronçons sont cohérents avec la théorie ; une incision est observée pendant la durée des extractions puis les tronçons ont tendance à se combler.

L'estimation des volumes érodés ou déposés à partir des données de lignes d'eau est donc complexe. En effet une incision localisée due à la présence d'une fosse d'extraction ou liée à la présence d'un affleurement rocheux située entre deux échelles de mesures des lignes d'eau ne sera pas visible. La précision de la localisation des points de mesures des lignes d'eau est également discutable. De plus, notre approche par tronçon a tendance à lisser les évolutions et donc à gommer une incision localisée.

Un autre point à considérer est l'influence des extractions sur les tronçons adjacents. Un déficit sédimentaire causé par les extractions a pour conséquence une érosion régressive, se propageant du site d'extraction vers l'amont et une érosion progressive se propageant vers l'aval en raison du déficit en charge alluviale provoqué par le piégeage des sédiments dans la fosse. Sur un tronçon localisé à l'amont de Blois, l'incision du tronçon situé à l'amont du tronçon où a eu lieu les extractions est plus forte.

4.2 Présentation et évolutions des sites de références

Trois sites de références ont été choisis pour développer et valider les méthodes de simplification et le modèle d'évolution du lit. Ces sites ont été sélectionnés car ils présentent différents styles fluviaux, des degrés d'anthropisation variés, et un suivi topographique dans le temps. La localisation des trois sites sélectionnés est donnée sur la figure 4.5.

4.2.1 Site fortement anthropisé : Belleville

4.2.1.1 Présentation du site de Belleville

Le site de référence de Belleville représente un linéaire d'environ 37 km et s'étend de Myennes (PK 526,824) à la station hydrométrique de Gien (PK 564). Ce site est caractérisé par la présence de la centrale nucléaire de Belleville, de quatre ponts (Bonny-sur-Loire, Chatillon-sur-Loire, Briare et Gien), d'ouvrages de navigation (Chatillon-sur-Loire) et de quelques îles (par exemple l'île de

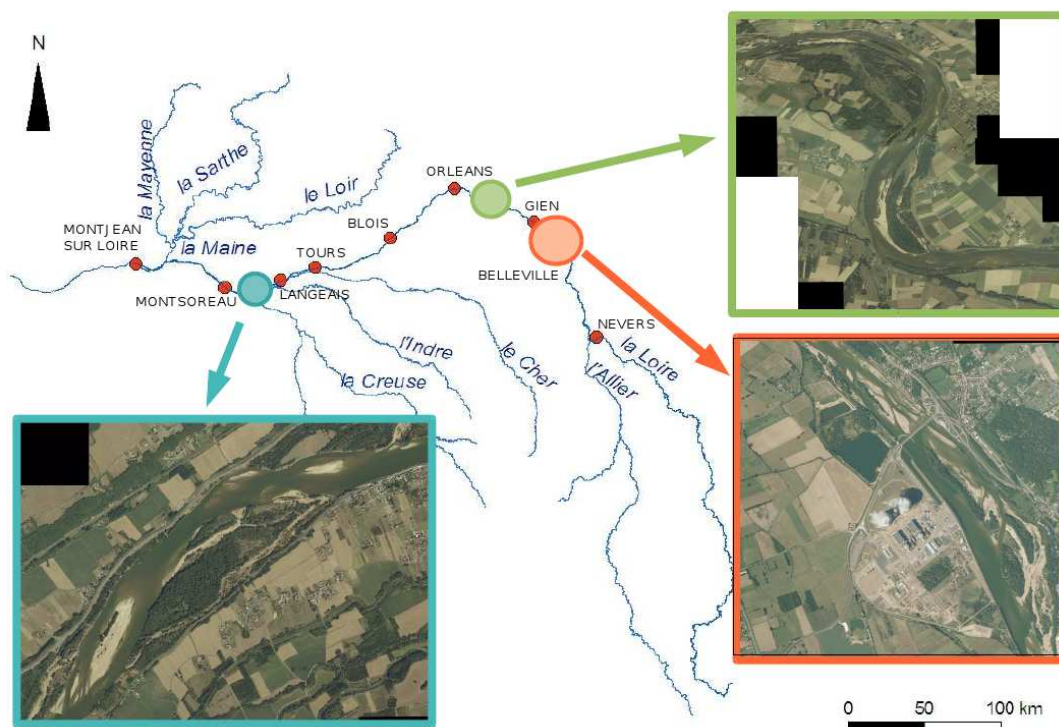


FIGURE 4.5 – Carte de localisation des trois sites de référence. De l'amont vers l'aval : Belleville, Guilly et Bréhémont.

Coudreaux et l'île Bon). Ce site a été découpé en 14 tronçons homogènes dont les caractéristiques sont définies dans le tableau 4.2.

Sur les 14 tronçons définis dix sont délimités par un ouvrage. Les tronçons sont également caractérisés par de nombreuses îles jusqu'à Briare (PK 556), la Loire retrouve ensuite un chenal unique. La largeur moyenne des tronçons est comprise entre 200 et 400 m. Les pentes sont variables et sont liées à la présence des ouvrages.

La Centrale Nucléaire de Production Electrique (CNEPE) est localisée en rive gauche de la Loire sur la commune de Belleville-sur-Loire. La construction de la centrale a débuté au cours de l'étiage de 1979 par la construction d'un seuil et d'un pont. Le seuil de fond a été construit à l'aval de la prise d'eau et à l'aval immédiat du pont. Le seuil a une largeur de 377 m ; sa cote est à 134 m NGF excepté pour un tronçon de 94 m en rive droite qui est à la cote de 133,67 m NGF. Ce seuil concentre les écoulements en rive gauche, ce qui permet pendant l'étiage de maintenir devant la prise d'eau une quantité d'eau suffisante pour le refroidissement des réacteurs. Ces travaux ont été suivis en 1982 par la construction de deux passes à poissons. Les effets du seuil sont gommés pour les débits forts (débits estimés supérieurs à 1200 m³/s).

Des extractions de matériaux (sables et graviers) ont été effectués en 1979 et 1980 à Neuvy-sur-

No.	Type	PK amont	PK aval	B (m)	I (m/km)	Remarques
1	12dd	526,824	528,763	295	0,420	
2	11dd	528,763	531,400	275	0,480	
3	12dd	531,400	533,900	315	0,290	
4	12da	533,900	536,300	400	0,080	extraction
	ouvrage	536,350		SEUIL CENTRALE		
5	12ad	536,500	538,100	320	0,510	
6	12da	538,100	541,159	315	0,530	extraction
	ouvrage	541,209		PONT BONNY		
7	11aa	541,259	546,915	290	0,320	
8	12aa	546,915	549,240	330	0,650	chevrette
	ouvrage	549,290		PONT CHATILLON		
9	12ad	549,340	550,175	230	0,400	
10	12da	550,175	553,850	235	0,390	extraction
	ouvrage	553,900		PONT BRIARE		
11	12ab	553,950	556,660	240	0,490	
12	11bb	556,660	559,090	200	0,655	
13	11ba	559,090	562,890	210	0,390	
		562,940		PONT DEVIATION GIEN		
14	11aa	562,990	563,950	265	0,170	
	ouvrage	564,000		PONT VIEUX GIEN		

TABLE 4.2 – Caractéristiques des 14 tronçons définis sur le secteur de Belleville.

Loire afin de constituer la plateforme de la centrale et de limiter l'impact des crues. L'estimation de la quantité de matériaux extraits en 1979 et 1980 est de 3 500 000 m³. En 1981, 350 000 m³ supplémentaires ont été extraits pour constituer un stock de matériaux sur l'emprise des tranches 3 et 4. Deux autres sites d'extractions ont été identifiés à Baulieu et à Briare (cf. Annexe C).

Les quatre îles végétalisées situées en amont du seuil (entre Neuvy et Les Pelus) ont subi un renforcement de leurs berges amont, afin de les fixer et d'éviter leur progression vers l'aval. La capacité du lit mineur a aussi été augmentée en élargissant le lit. Une nouvelle passe à poissons en enrochements a été mise en place en rive gauche à l'aval du seuil. Enfin, pour satisfaire les usagers du port de Neuvy sur Loire, une modification du lit en rive droite accompagné d'enrochements a été entreprise afin d'assurer un tirant d'eau quasi permanent devant le port.

Avant la construction de la centrale (1975), EDF a procédé à des prélèvements d'échantillons de sédiments à partir d'un ponton flottant. La variabilité de la granularité selon la profondeur et la variabilité en plan a été analysée. Pour cette campagne, les résultats montrent une homogénéité des valeurs de d_{10} , d_{50} et d_{90} sur la verticale et en plan. Pour le chenal principal, Bouchard et Courivaud (2000) présentent les valeurs granulométriques moyennes suivantes :

- $d_{10} = 0,45$ mm (sable grossier)
- $d_{50} = 1,9$ mm (sable grossier)

- $d_{90} = 19,4$ mm (graviers)

La valeur du d_{50} est inférieure à celle indiquée par Babonaux (1970) sur le site de Cosnes-sur-Loire ($d_{50} = 3,9$ mm). Ces deux résultats sont toutefois cohérents compte tenu des variations que l'on rencontre fréquemment dans les mesures granulométriques. Selon la loi exponentielle définie au paragraphe 3.3.2, nous adoptons la valeur $d_{50} = 3,1$ mm.

4.2.1.2 Evolutions du site de Belleville

L'analyse des photographies aériennes au droit du site de la centrale (Fig. 4.6) nous montre qu'entre 1850 et 1955, les îles se sont agrandies et se sont rattachées aux berges. Entre 1955 et 1971, la végétalisation des bancs de sables et des îles se poursuit. La photographie aérienne de 1998 permet d'observer le basculement du chenal principal (devenu rectiligne) vers la rive gauche, qui est la conséquence des travaux d'aménagements nécessaires à la construction de la centrale, ainsi que le colmatage du lit en rive droite.

Malgré l'élargissement de la bande active effectué lors de la construction de la centrale, la végétalisation des îles en rive droite et le comblement des chenaux secondaires qui s'ensuivent ont conduit à une réduction de la largeur de la bande active. Ce phénomène n'est pas uniquement observable au droit de la centrale (Fig. 4.7), mais concerne l'ensemble du site de référence étudié. Les évolutions sont toutefois plus fortes à l'amont de la centrale, en particulier entre « Les Grands Ormes » et « Les Chaumes Claires » (PK 532 et PK 533,9) où l'engraissement des îles est considérable. Sur cette zone, les déplacements de dunes sont perceptibles, ceci semble témoigner d'une zone active d'un point de vue du transport solide.

Les niveaux d'eau sont relevés par EDF à neuf échelles localisées le long du site étudié, qui complètent les mesures faites par la DREAL Centre. Nous disposons au total de 21 points de mesures des hauteurs d'eau ; les débits sont disponibles à la station EdF de la centrale ainsi qu'à la station hydrométrique de Gien. Les données de lignes d'eau d'étiage disponibles entre 1940 et 2006 sont présentées sur la figure 4.8.

Entre 1940 et 2006, on observe un comblement sur le secteur situé à l'amont de la centrale et une incision sur l'aval du secteur d'étude. Les évolutions observées entre 1978 et 2006 semblent illustrer une légère incision, néanmoins ces résultats sont difficilement interprétables en raison du faible nombre de données disponibles sur l'ensemble du secteur d'étude. Afin de compléter cette analyse on s'intéresse aux relations hauteurs-débits établies pour quatre stations localisées le long du site d'étude. On peut ainsi visualiser les effets de l'incision du lit et de réduction de la largeur active sur les débits d'étiage ainsi que sur les débits moyens et de crues. La figure 4.9 présente ainsi les relations hauteurs-débits pour les stations de Myennes (PK 526,8), de Belleville (à l'aval du seuil de la centrale au PK 536,5), des Loups (PK 545,3) et de Gien (PK 564).

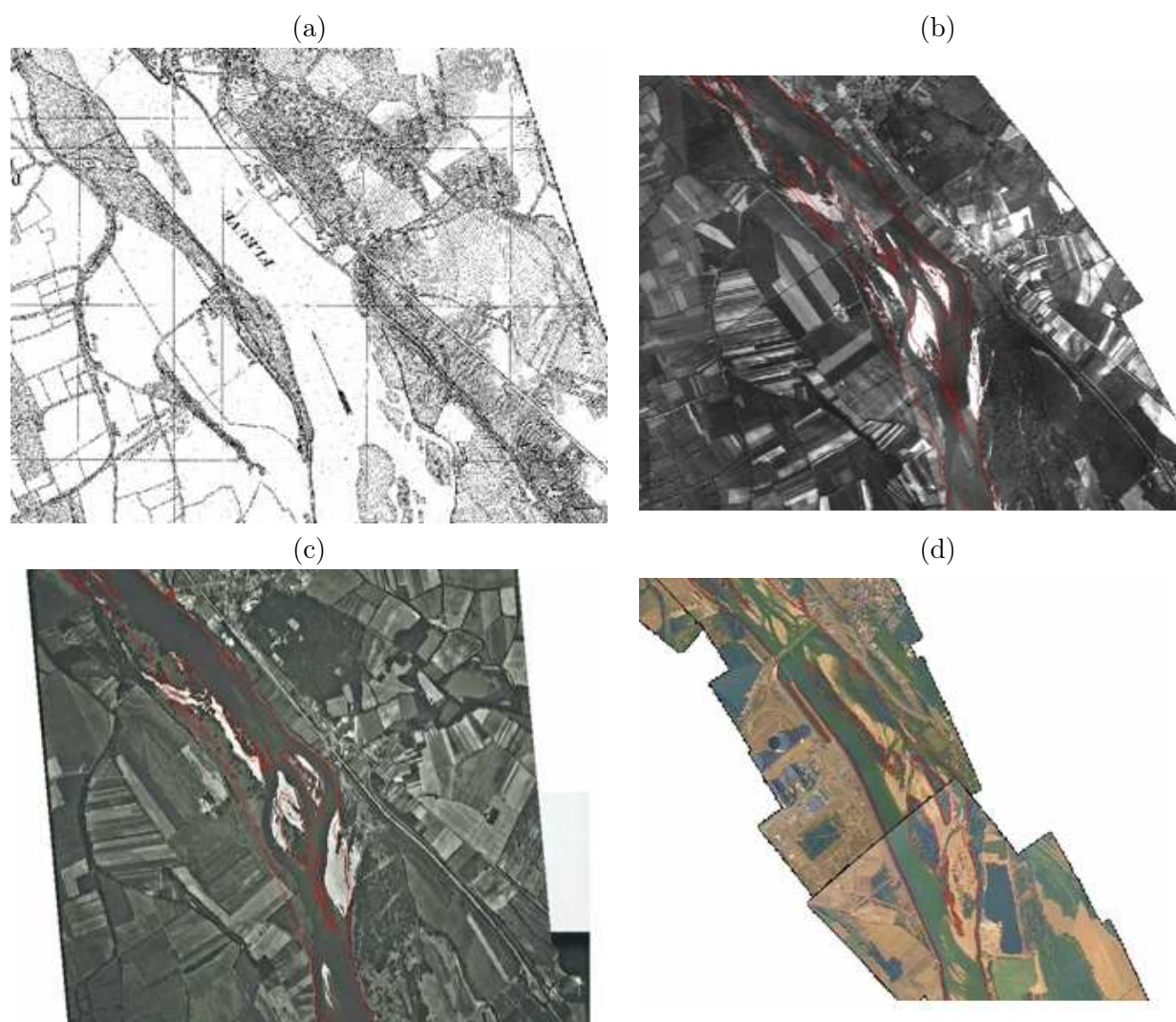


FIGURE 4.6 – Cartes et photographies aériennes au droit de la centrale de Belleville en (a) 1850, (b) 1955, (c) 1971, (d) 1998. Les contours des berges de 1998 sont reportés en rouge sur les photographies de 1955 et 1971.

Les relations hauteurs-débits établies pour ces quatre stations permettent de confirmer ces tendances d'incision et de réduction de la largeur de la bande active. En effet, à Myennes ainsi qu'à la station de Belleville, localisée à l'aval du seuil, les hauteurs d'eau estimées pour les débits d'étiage sont plus faibles en 2003 qu'en 1986. Par contre pour les débits de crue, les altitudes de la surface libre sont plus fortes de nos jours que dans le passé, ce qui va de pair avec une réduction de la largeur active et une végétalisation du lit. Pour les deux stations localisées plus à l'aval du seuil, la tendance est moins forte, les relations hauteurs-débits sont plus stables dans le temps. La fiabilité des niveaux d'eau pour les valeurs extrêmes de débits (étiage et crue) et la dispersion des hauteurs d'eau pour un même débit sont discutables. L'analyse des relations hauteurs-débits permet néanmoins de dégager les tendances générales d'évolution des niveaux d'eau. Il est toutefois complexe d'associer les évolutions constatées à la seule construction de la centrale. Depuis la construction de la centrale

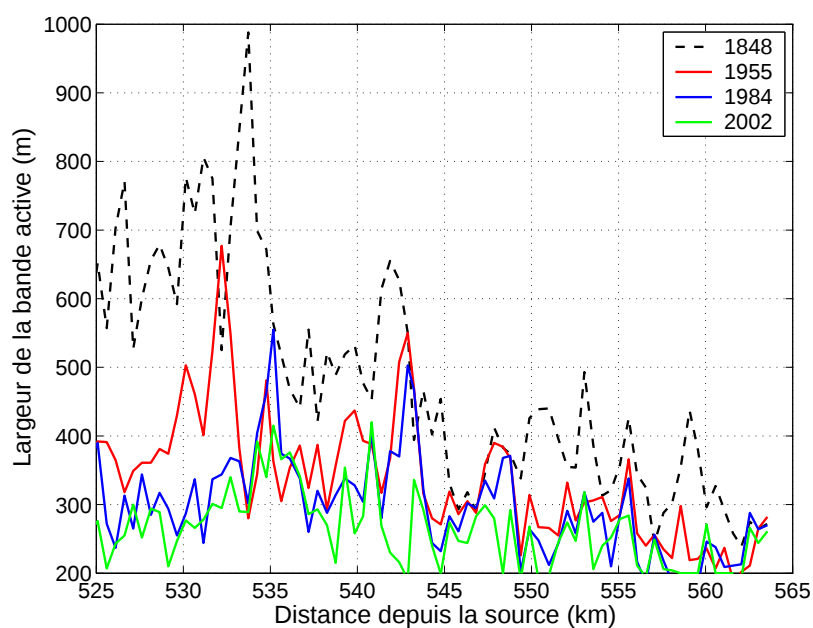


FIGURE 4.7 – Evolutions de la largeur de la bande active à Belleville entre 1848 et 2002.

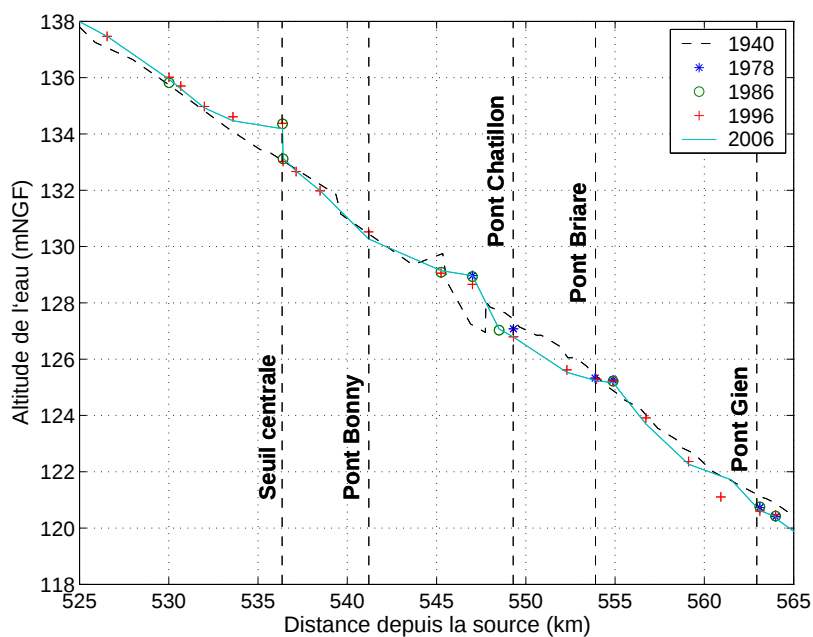


FIGURE 4.8 – Evolution de la ligne d'eau d'étiage à Belleville entre 1940 et 2006.

en 1979, six crues présentant un débit supérieur à un débit de période de retour de 5 ans ($Q_5 = 2300 \text{ m}^3/\text{s}$) se sont produites (Fig. 4.10). Peu d'événements de crues fortes ont donc eu lieu mais le facteur hydrologique a indéniablement contribué aux ajustements de la Loire.

L'analyse des évolutions morphologiques du secteur de Belleville est ensuite complétée avec les données topographiques et bathymétriques. En effet, dans le cadre du protocole de surveillance des mesures compensatoires sur le site, EDF réalise des levés bathymétriques tous les deux ans

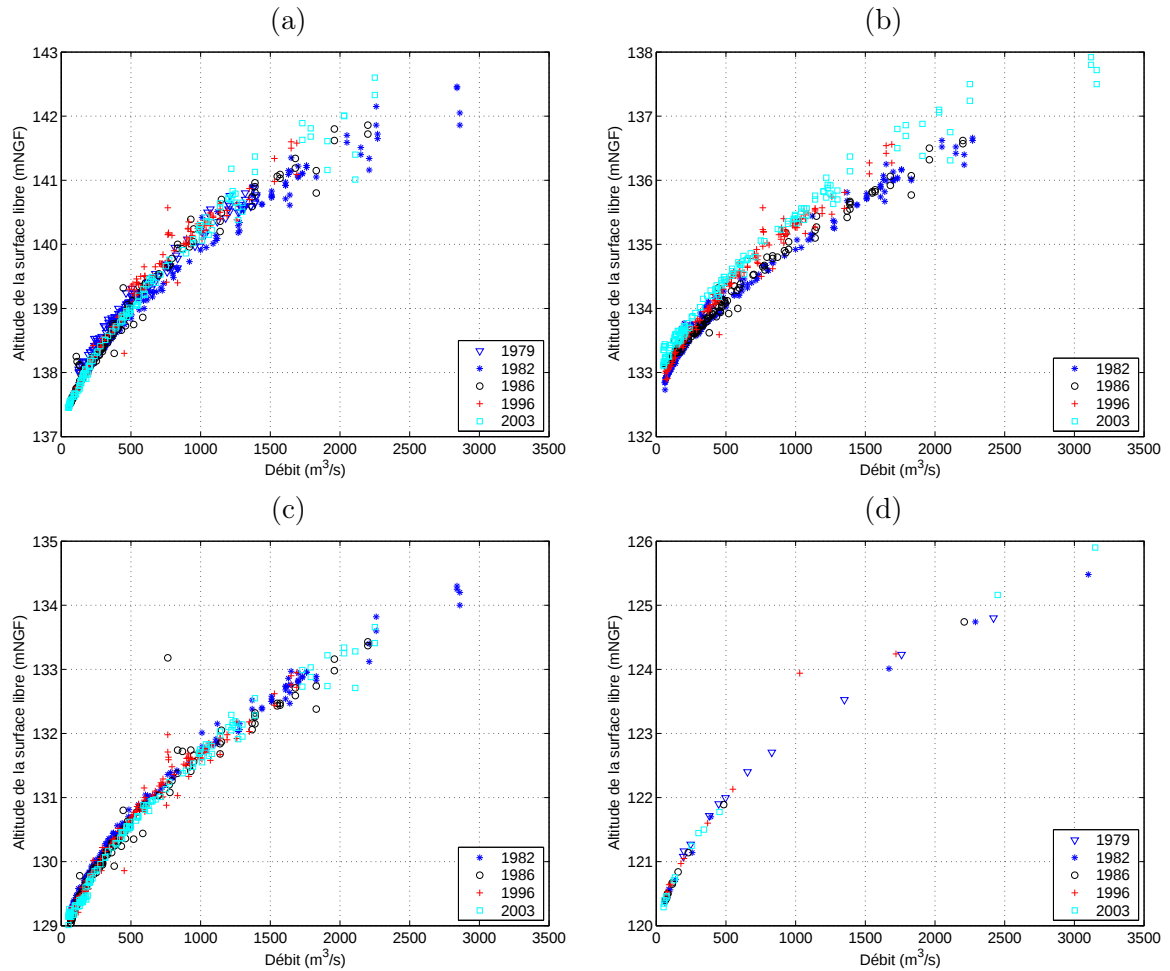


FIGURE 4.9 – Belleville : Relation hauteurs-débits pour les stations de (a) Myennes (PK 526,8) (b) Belleville (aval du seuil, PK 536,5), (c) Les Loups (PK 545,3) et (d) Gien (PK 564).

environ. 31 profils sont ainsi levés depuis 1978 entre le PK 529,4 et le PK 542,1. Ces mesures régulières concernent six tronçons du site de référence qui a été pris plus long afin de s'affranchir des effets du seuil de la centrale et de disposer de conditions limites correctes à l'aval pour satisfaire l'objectif de modélisation. Ces mesures topographiques et bathymétriques permettent des diagnostics morphologiques réguliers du site (Pons, 2000; Pauchet, 2007; Claude, 2008).

L'évolution annuelle des surfaces déposées ou érodées sur chaque profil en travers est analysée juste après la construction de la centrale (1977-1982), quelques années après la construction (1982-1986) puis tous les 10 ans jusqu'en 2006 (Fig. 4.11). Pendant la construction de la centrale (1977-1982), on constate une incision du lit sur l'ensemble des profils, en particulier à l'amont immédiat du seuil, suivi par un comblement entre 1982 et 1986. Cette incision localisée à l'amont du seuil est due aux travaux de construction de la centrale durant lesquels 3 500 000 m³ de matériaux ont été extraits du lit de la Loire. Cette quantité correspond au volume calculé sur les profils en travers (3 600 000 m³ si l'on considère tous les profils dont 1 750 000 m³ extrait sur le tronçon 4). L'exhaussement qui

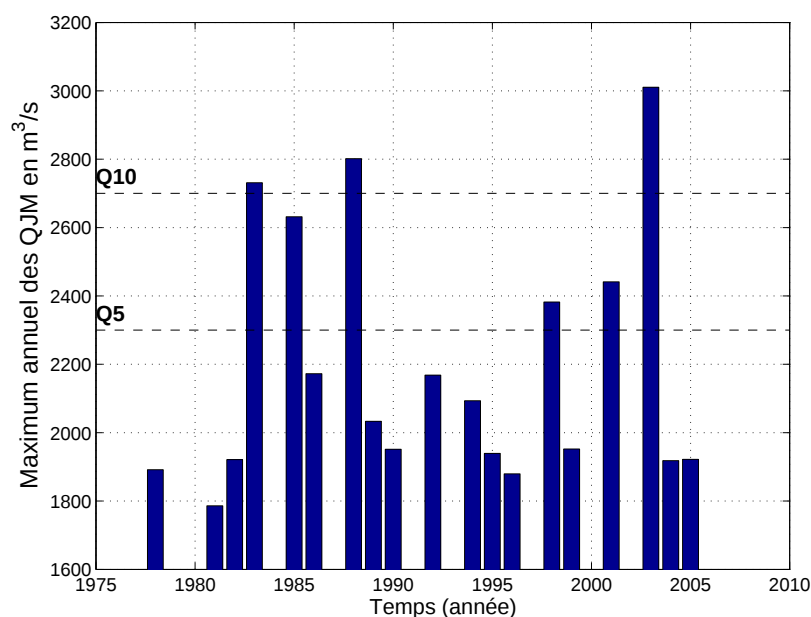


FIGURE 4.10 – Maximum annuel des débits journaliers moyens (QJM) supérieurs à un débit biennal ($Q_2 = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$) à la station hydrométrique de Belleville entre 1979 et 2006.

s'ensuit entre 1982 et 1986 ne comble pas complètement la fosse ; en effet on calcule un dépôt de $1\,330\,000 \text{ m}^3$ de matériaux. Sur la période 1986-1996, la tendance générale est à l'exhaussement, à des échelles plus modestes, sauf sur deux profils en travers localisés aux PK 531,1 et 531,4 où le lit s'incise. Sur la dernière décennie (1996-2006), l'aggradation se poursuit malgré de faibles incisions localisées. Le découpage en tronçons apparaît cohérent, les tendances d'incision ou de comblement étant homogènes pour les différents tronçons.

Afin de pouvoir raisonner de façon plus synthétique à l'échelle du tronçon, les volumes érodés ou déposés ont également été calculés. Deux approches peuvent être considérées pour estimer ces volumes : la première consiste à pondérer les surfaces mesurées sur les profils en travers par la distance entre 2 profils, on calcule donc une moyenne pondérée ; la seconde consiste à définir les volumes en faisant la moyenne arithmétique des surfaces sur tout le tronçon. Dans cette deuxième approche, on suppose donc le découpage en tronçons comme adéquat. Ces deux approches génèrent des différences comme illustré sur la figure 4.12, où on considère l'évolution entre 1996 et 2006.

Lorsque les profils en travers sont équidistants, on obtient logiquement des résultats comparables comme pour les tronçons 2, 3, 4, 5. Par contre pour les tronçons présentant peu de données ou des profils levés avec des pas variables d'échantillonnage, comme les tronçons 6 et 7, les résultats obtenus diffèrent considérablement. L'approche par moyenne pondérée est toutefois préférée pour la suite des analyses même si cette approche est discutable pour les tronçons présentant des jeux de données disparates.

On remarque toutefois l'incision du profil P22 (PK 531,1) sur le tronçon 2 entre 1986 et 1996.

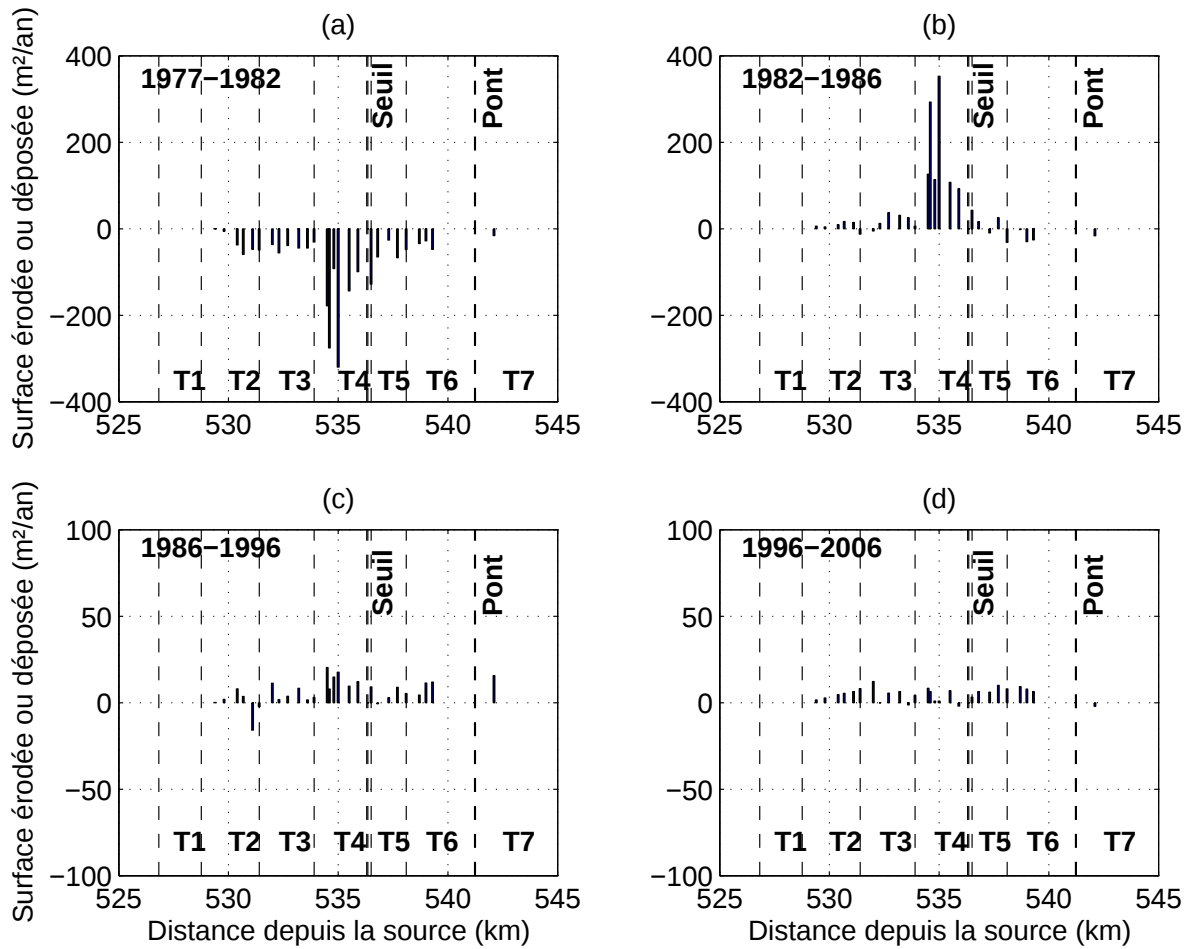


FIGURE 4.11 – Belleville : surfaces déposées ou érodées par an entre (a) 1977 - 1982, (b) 1982 - 1986, (c) 1986 - 1996 et (d) 1996 - 2006. Les droites verticales en pointillées délimitent les tronçons. Les échelles des ordonnées diffèrent suivant les périodes.

Cette incision, bien que faible par rapport aux évolutions précédentes, mérite d'être analysée plus en détail pour justifier la définition du tronçon 2. L'évolution de ce profil ainsi que sa localisation sont fournies sur la figure 4.13. Ce profil présente une île en rive droite. En 1986, le chenal principal était localisé en rive droite ; dès 1996 on constate un comblement du chenal principal et un début de basculement en rive gauche. Cette évolution qui se confirme sur le profil de 2006 est visible sur la photographie aérienne où on aperçoit un banc de sable.

Cette analyse des profils en travers est complétée par le profil en long des points bas mesurés entre 1977 et 2006 ainsi que par le profil P13 (PK 534,6) localisé à l'amont de la centrale et présentant une forte évolution (Fig. 4.14). Le profil en long des points bas révèle un abaissement par rapport au profil de 1977 qui n'a pas été totalement comblé malgré les processus de sédimentation. Le profil en travers illustre l'amplitude des travaux de restructuration du lit nécessaire à la construction de la centrale.

En résumé, l'implantation de la centrale a eu des conséquences directe sur la morphologie de la

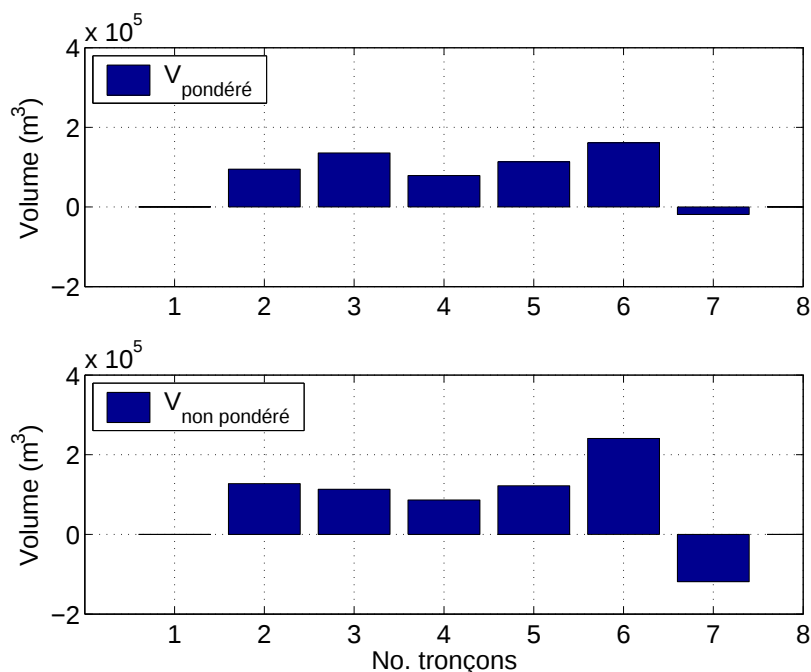


FIGURE 4.12 – Belleville : volumes déposés ou érodés par tronçon entre 1996 et 2006 (a) méthode avec pondération des volumes, (b) méthode sans pondérations des volumes.

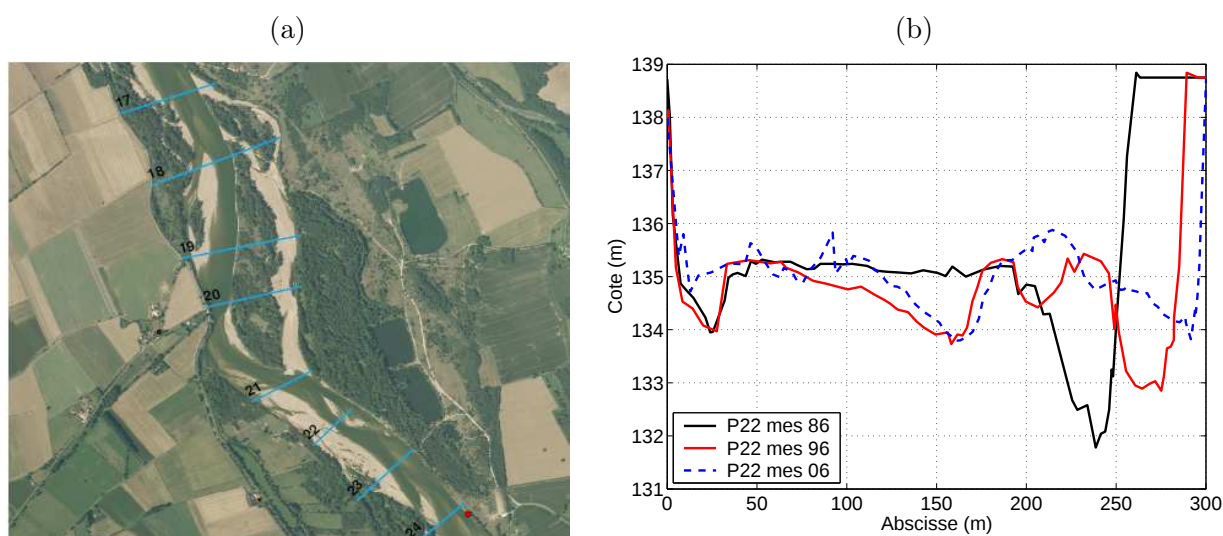


FIGURE 4.13 – (a) Localisation des profils en travers sur une photographie aérienne de 2005 et (b) évolutions du profil P22 (PK 531,1) entre 1986, 1996 et 2006.

Loire qui a réajusté son tracé en plan et abaissé son profil en long. Jusqu'au début des années 1990, on constate des processus de sédimentation importants ; en d'autres termes, la Loire a cherché à retrouver son état initial. Le processus de recouvrement s'est ensuite atténué bien que l'état avant travaux n'ait pas été atteint. Le régime hydrologique semble avoir eu peu d'influence sur les processus observés ; il faut néanmoins souligner que les débits faibles qui ont dominés la période tendent à favoriser le comblement et la végétalisation des chenaux secondaires.

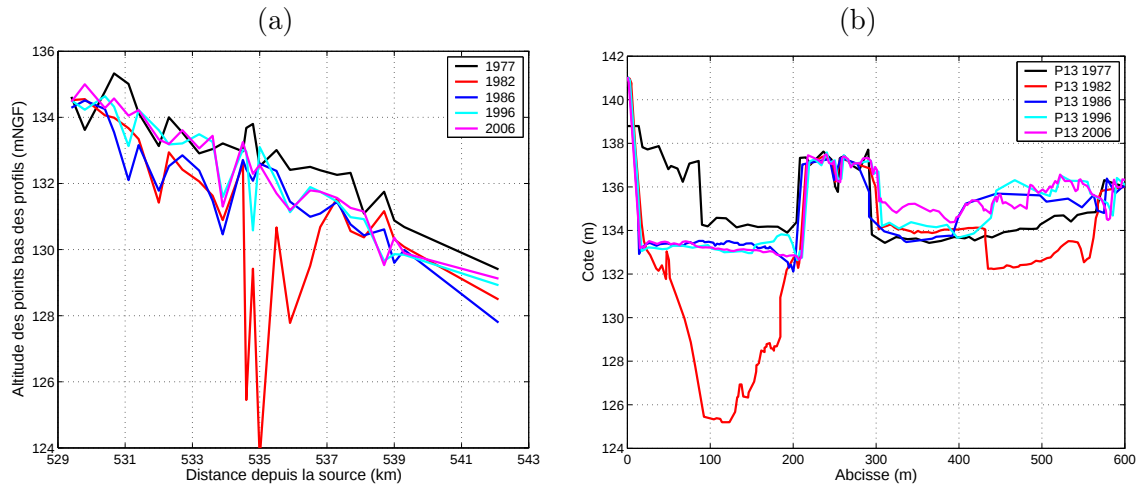


FIGURE 4.14 – Belleville : (a) profil en long des points bas (1977-2006). (b) Evolution du profil en travers P13 (PK 534,6) entre 1977 et 2006.

4.2.2 Site à méandres : Guilly

4.2.2.1 Présentation du site de Guilly

Le secteur de Guilly est caractérisé par les seuls méandres de la Loire moyenne et se situe entre Sully-sur-Loire (PK 585) et Orléans (PK 630,5). Au vu des données dont nous disposons, le site de référence couvre 25 km entre St-Père-sur-Loire (PK 590,5) et St-Denis-de-l'Hotel (PK 616,5). Ce site peu urbanisé a été découpé en 11 tronçons dont les caractéristiques sont détaillées dans le tableau 4.3. Malgré la faible anthropisation de ce secteur, quatre anciens sites d'extractions sont répertoriés : à St-Benoit-sur-Loire, à Germiny-des-Prés, à Chateaufort-sur-Loire et à Ouvrouer-les-Champs.

No.	Type	PK amont	PK aval	B (m)	I (m/km)	Remarques
1	21bd	590,550	594,000	260	0,390	
2	22dd	594,000	597,880	340	0,385	
3	21dd	597,880	599,000	300	0,465	extractions
4	12dd	599,000	600,400	275	0,450	extractions
5	22dd	600,400	603,000	285	0,420	
6	21db	603,000	605,700	255	0,400	
7	21ba	605,700	608,150	265	0,500	extractions
	ouvrage	608,200		PONT CHATEAUNEUF SUR LOIRE		
8	21ab	608,250	610,500	330	0,445	
9	21bd	610,500	612,260	350	0,510	extractions
10	12dd	612,260	613,270	280	0,310	
11	11da	613,270	616,540	305	0,450	
	ouvrage	616,580		PONT ST DENIS DE L'HOTEL		

TABLE 4.3 – Caractéristiques des 11 tronçons définis sur le secteur de Guilly.

Sur les 11 tronçons définis, deux sont délimités par des ouvrages et quatre tronçons présentent

une île centrale. La largeur de la bande active est comprise entre 250 et 350 m ; la pente des tronçons diffère peu et semble uniquement influencée par la présence d'anciennes fosses d'extractions.

Peu de données granulométriques sont disponibles pour le lit mineur. La loi exponentielle décrite au paragraphe 3.3.2 pour définir un d_{50} permet d'adopter une valeur de 2,3 mm.

4.2.2.2 Evolutions du site de Guilly

Les méandres de Guilly sont conditionnés par la géologie et leur forme en plan est restée stable ce dernier siècle (Fig. 4.15). Entre 1848 et 2005, aucune divagation de méandres n'est visible sur les cartes et photographies aériennes. L'analyse des largeurs de bande active (Fig. 4.16) montre pourtant une réduction de B entre 1848 et 1955 (- 180 m au maximum). Par la suite, entre 1955 et 2002, la largeur de bande active évolue peu, avec des variations comprises entre - 50 m et + 100 m, ce qui, au vu des incertitudes des mesures (cf. paragraphe 3.2.5) révèle un secteur stable en plan.

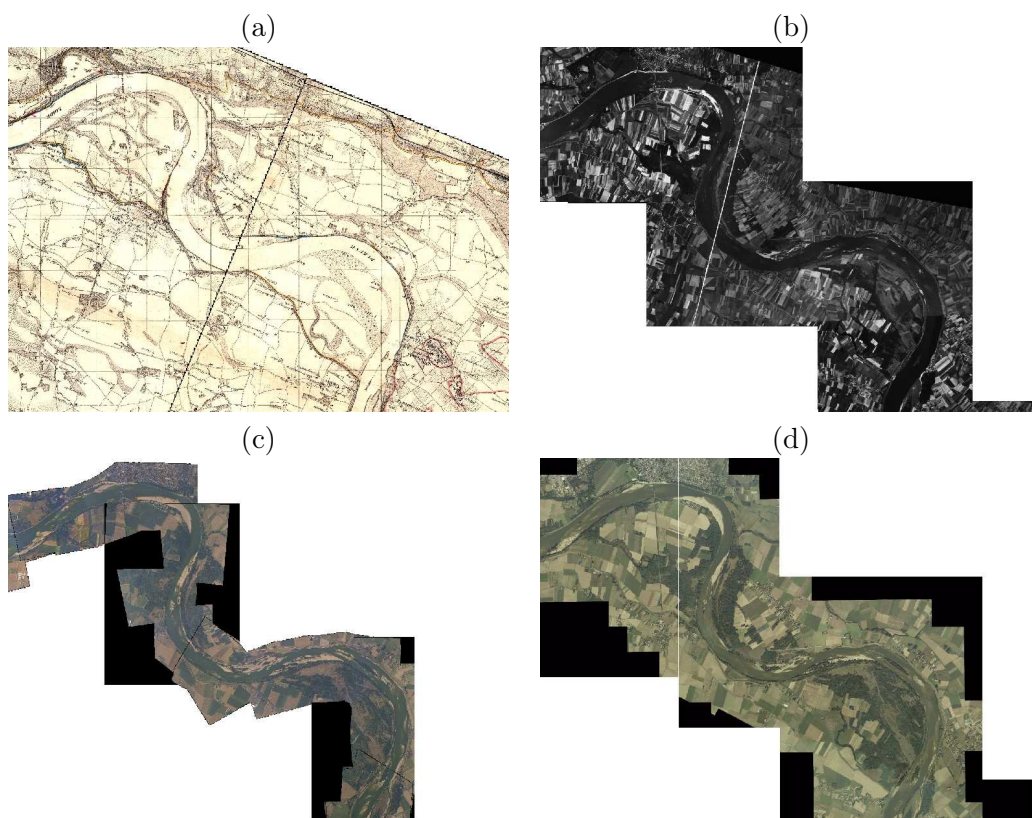


FIGURE 4.15 – Cartes et photographies aériennes des méandres de Guilly en (a) 1848, (b) 1963, (c) 1998, (d) 2005.

Cette stabilité des formes en plan n'est pourtant pas associée à une stabilité du profil en long sur tout le secteur d'étude. Ainsi l'analyse des lignes d'eau d'étiage présentée sur la figure 4.17 nous montre une incision sur tout le secteur entre 1978 et 2006. L'incision atteint - 40 cm au PK 597,77 entre 1978 et 2006 et - 44 cm au PK 611,81 entre 1986 et 2006. Le profil en long de 1940 est fourni

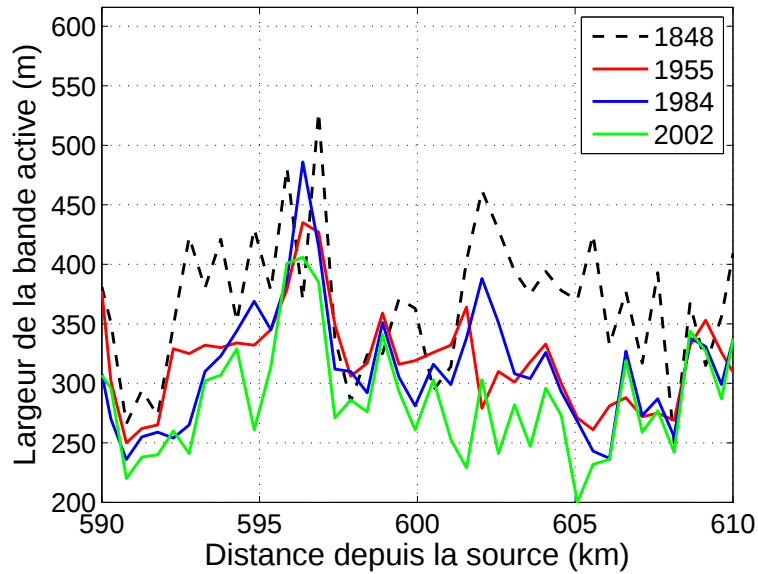


FIGURE 4.16 – Evolutions de la largeur de la bande active à Guilly entre 1848 et 2002.

à titre indicatif mais l'incertitude sur ce jeu de données ne permet pas de conclure convenablement.

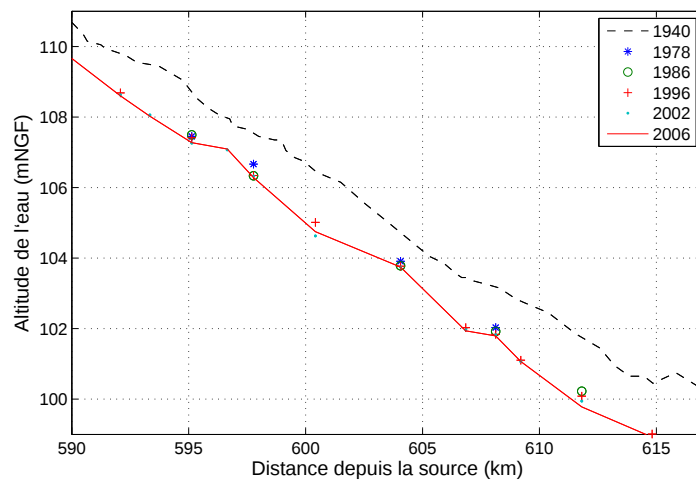


FIGURE 4.17 – Evolutions de la ligne d'eau d'étiage sur le secteur de Guilly entre 1940 et 2006.

Les évolutions transversales du site de Guilly sont ensuite analysées. Le LRPC de Blois a levé 113 profils en travers entre Guilly et St-Benoit-sur-Loire entre le 16 et le 26 juin 2008. Cette étude inclut les six profils « Crougneau » levés en 1995. La comparaison des profils en travers est illustrée sur la figure 4.18. Pour le profil P594, une érosion comprise entre 1 et 3 m est visible sur la partie centrale du lit (sur environ 150 m). Le profil P596 présente une érosion localisée en pied de digue sur la rive gauche, tandis que la partie centrale est restée stable. Pour le profil P597, où nous disposons également d'un relevé datant de 1975, on constate une incision entre 1975 et 1995 sur le chenal en

rive droite puis un déplacement du talweg vers la gauche sans incision notable du lit entre 1995 et 2008. Le bras localisé en rive gauche est resté stable sur la période 1975-2008. Sur le profil suivant (P598), l'érosion se concentre sur la partie centrale du lit et en rive droite et varie entre 50 cm et 1 m. Le profil P599 présente une sédimentation sur la rive gauche, tandis que la partie centrale du chenal reste stable et la rive droite s'incise. La pose de palplanches pour consolider la digue sur la rive droite, est probablement la cause de cette incision ponctuelle. Enfin sur le profil P599 R1, la tendance est à la sédimentation en rive gauche avec une légère érosion en rive droite. Une analyse plus détaillée des évolutions de ce secteur devrait être faite par Nabet (thèse en cours).

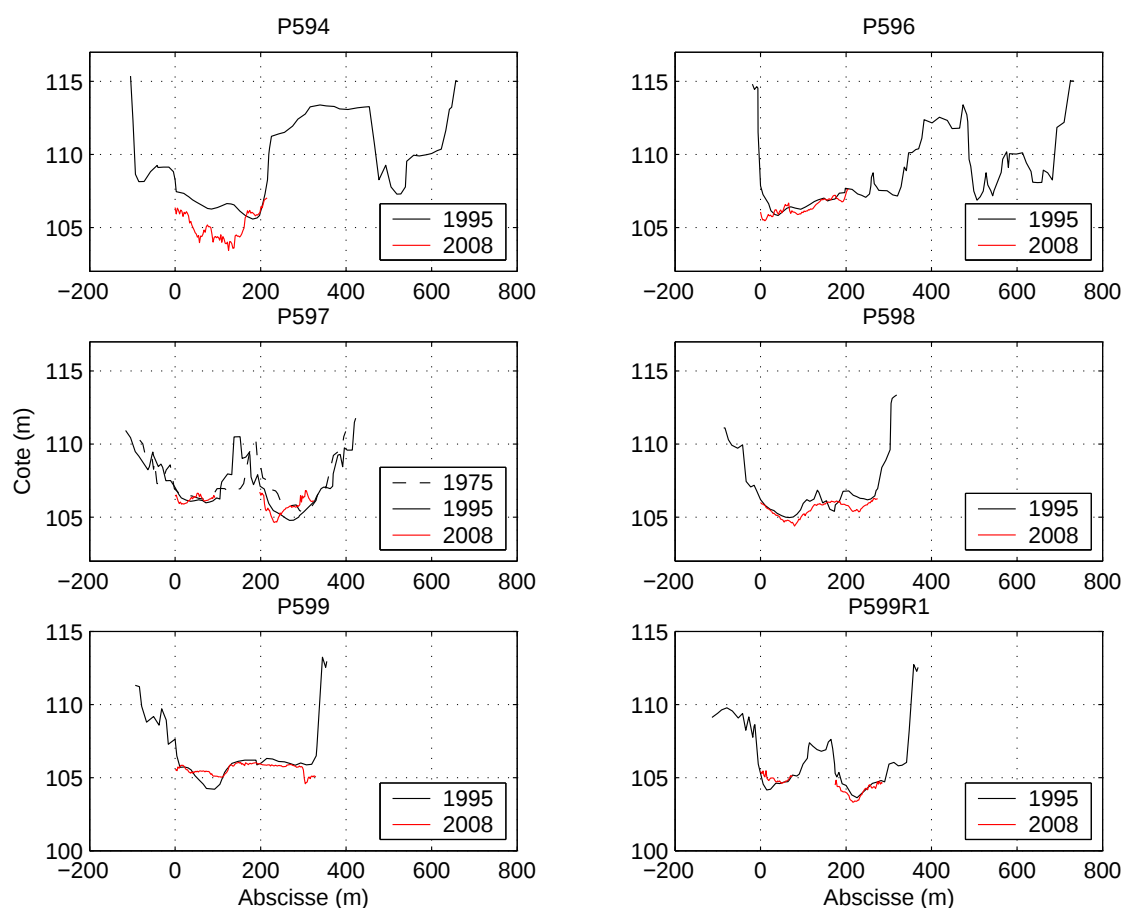


FIGURE 4.18 – Guilly : évolutions des profils en travers entre 1995 et 2008. Les données de 2008 étant issues d'une bathymétrie, seul le lit en eau est disponible.

Afin de pouvoir raisonner à l'échelle du tronçon, les évolutions sont donc considérées en terme de volume érodé ou déposé pour chacun des tronçons (Fig. 4.19).

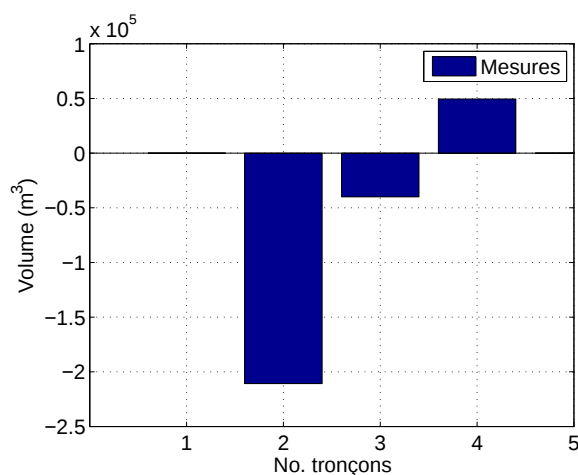


FIGURE 4.19 – Guilly : volumes mesurés déposés ou érodés par tronçon entre 1995 et 2008.

Les données de profils en travers disponibles à différentes dates ne concernent que trois des tronçons définis (tronçons 2, 3 et 4 du tableau 4.3). Le tronçon 2 s'incise fortement tandis que les tronçons 3 et 4 révèlent peu d'évolution entre 1995 et 2008. Le tronçon 3 présente un léger dépôt.

4.2.3 Site à chenaux multiples : Bréhémont

4.2.3.1 Présentation du site de Bréhémont

Bréhémont se situe à 30 km à l'aval de Tours, entre les confluences du Cher (11 km à l'amont) et de l'Indre (18 km à l'aval). Ce site de référence représente un linéaire de 13 km et s'étend de l'aval de la station hydrométrique du pont de Langeais (PK 782) à La Chapelle-sur-Loire (PK 795). Il est caractérisé par la présence de trois chenaux secondaires, situés en rive gauche et séparés du chenal principal par des îles végétalisées relativement pérennes. Les chenaux secondaires sont exondés une grande partie de l'année ; leur inondation survient lors des crues, bien que l'eau de la nappe alluviale affleure toute l'année dans des « mouilles » (fosses localisées). Une description plus détaillée du site est donnée par Rodrigues (2004).

Le site a été divisé en 4 tronçons homogènes dont les caractéristiques sont définies dans le tableau 4.4 ci-dessous.

No.	Type	PK amont	PK aval	B (m)	I (m/km)
1	12ad	783,440	785,710	340	0,210
2	12dd	785,710	790,210	300	0,230
3	12dd	790,210	794,710	325	0,305
4	11dd	794,710	796,820	335	0,290

TABLE 4.4 – Caractéristiques des quatre tronçons définis sur le secteur de Bréhémont.

Les quatre tronçons sont principalement caractérisés par la présence d'îles. Les largeurs de bande

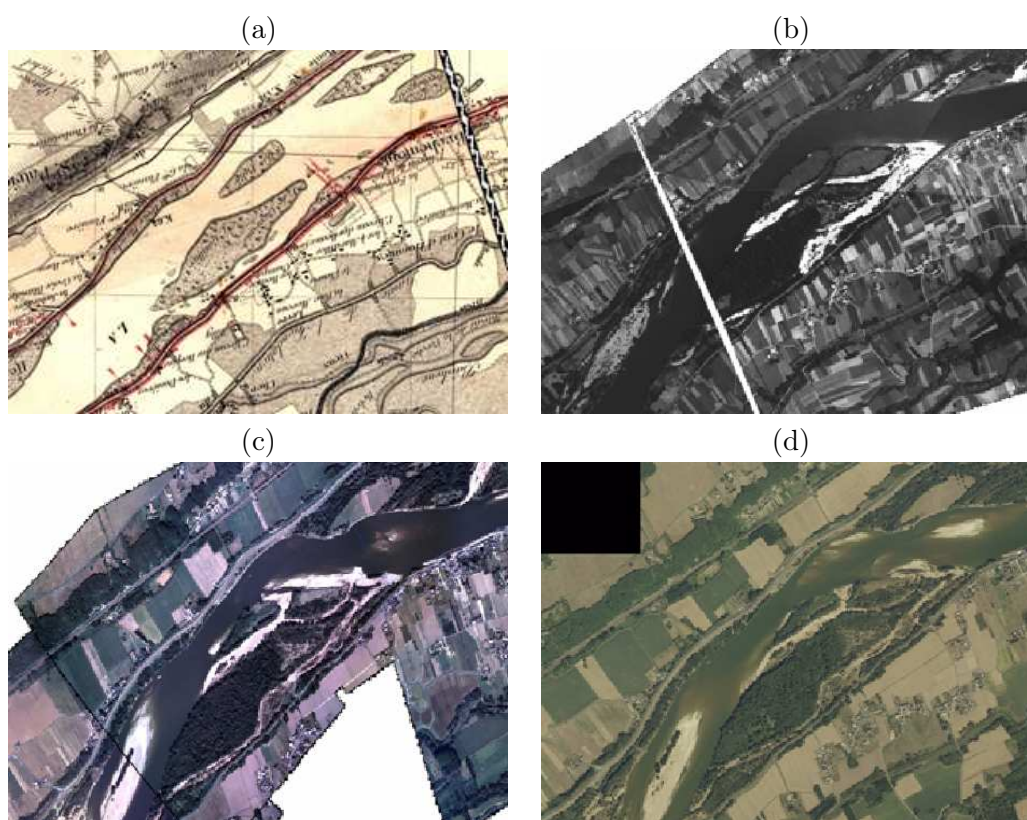


FIGURE 4.20 – Cartes et photographies aériennes du site de Bréhémont en (a) 1848, (b) 1956, (c) 1999, (d) 2005.

active et les pentes sont similaires pour les différents tronçons. Les limites et le nombre de chenaux permettent de comprendre la distinction entre les tronçons 1 et 4. Les tronçons 2 et 3 se justifient par la complexité des îles et des chenaux secondaires. Ainsi le tronçon 2 est caractérisé par la présence de trois îles en rive gauche et de nombreux chenaux secondaires étroits. Quant au tronçon 3 il est caractérisé par une île quasi centrale et un chenal secondaire unique et large.

La granularité des sédiments du site a fait l'objet de campagnes de mesures du transport solide détaillées dans le chenal principal (Rodrigues, 2004; Gautier *et al.*, 2008), et sur les îles et chenaux secondaires (Rodrigues, 2004; Détriché *et al.*, 2010) qui illustrent la variabilité verticale, transversale et longitudinale des sédiments (cf. paragraphe 2.2). Par souci de cohérence nous adoptons la valeur définie avec la loi exponentielle décrite au paragraphe 3.3.2, c'est à dire $d_{50} = 0,95$ mm.

4.2.3.2 Evolutions du site de Bréhémont

La forme en plan du site de Bréhémont est restée stable dans le temps. Entre 1848 et 2005, les îles se sont rattachées à la berge gauche comme illustré sur les photographies aériennes présentées sur la figure 4.20, créant trois chenaux secondaires séparés par des îles végétalisées relativement pérennes.

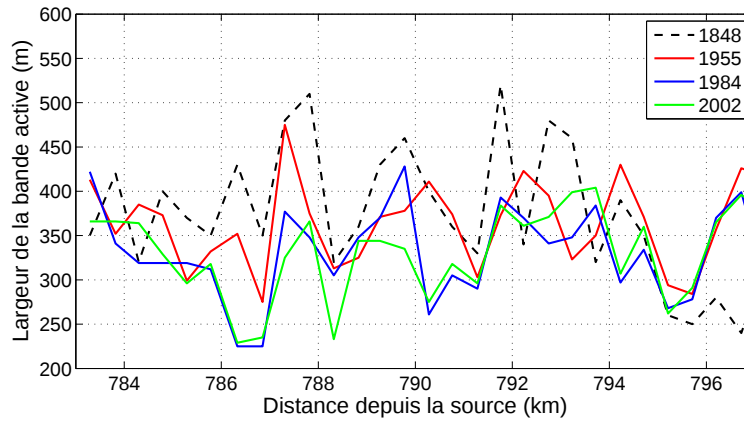


FIGURE 4.21 – Bréhémont : évolutions de la largeur de la bande active entre 1848 et 2002.

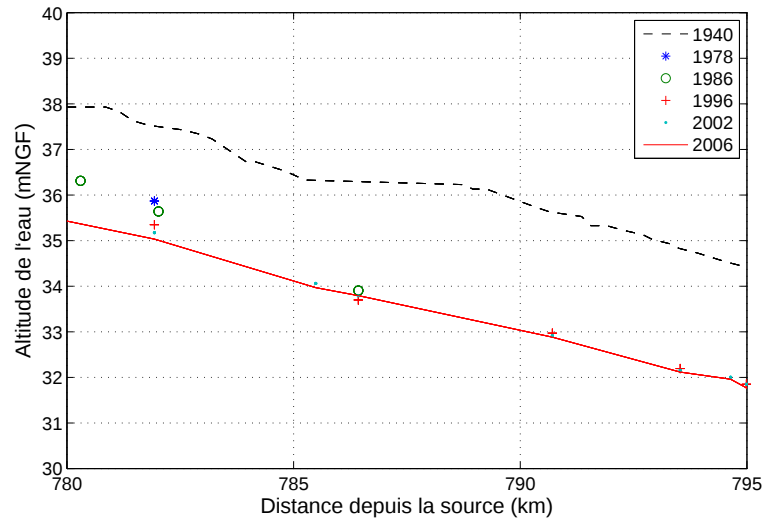


FIGURE 4.22 – Evolutions de la ligne d'eau d'étiage à Bréhémont entre 1940 et 2006.

Malgré cette stabilité perceptible sur les cartes et photographies aériennes, l'analyse de la largeur de la bande active démontre une réduction de largeur importante en certains points. Ainsi, il semblerait qu'au PK 786,5, B ait diminué de 120 m entre 1955 et 2002 alors que l'évolution moyenne sur cette période est de - 30 m en moyenne. Les incertitudes sur les mesures de B sont importantes sur ce secteur où la présence de nombreux chenaux secondaires rend l'identification de la bande active sur les photographies aériennes complexe. Les îles se sont adaptées en plan et en altitudes depuis les années 1960, comme montré par Détriché *et al.* (2010) grâce à des analyses au ^{137}Cs .

L'évolution de la ligne d'eau d'étiage est présentée sur la figure 4.22. Si on considère les données entre 1978 et 2006, peu d'évolutions sont constatées hormis sur le tronçon amont où l'incision atteint 60 cm. Les données de 1940 sont également présentées à titre indicatif; toutefois ce profil semble avoir été levé à un débit supérieur au débit d'étiage.

Des campagnes bathymétriques sont effectuées régulièrement par l'Université de Tours afin d'as-

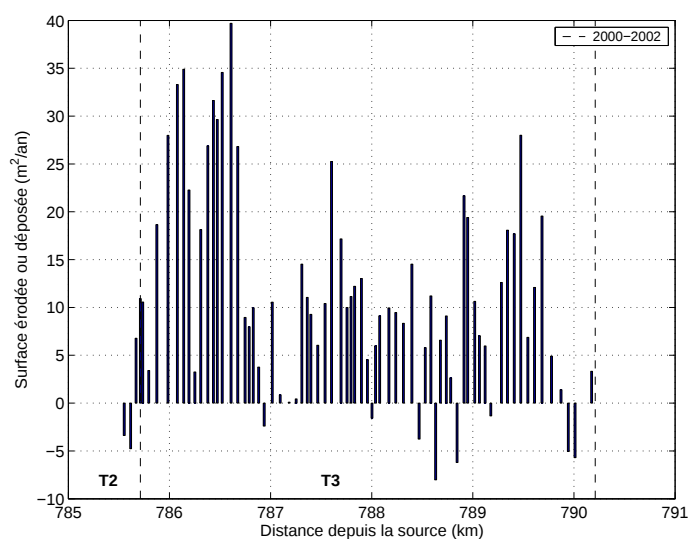


FIGURE 4.23 – Bréhémont : surfaces déposées ou érodées par an entre 2000 et 2002. Les droites verticales en pointillées délimitent les tronçons.

sur le suivi de ce site. 73 profils en travers espacés de 50 m ont ainsi été levés en juin 2000, novembre 2000, décembre 2001, novembre 2002 et décembre 2003. Dans le cadre de la thèse de Nicolas Claude (en cours), certains de ces profils sont suivis, on dispose ainsi de quelques données de sections levées en février 2009, décembre 2009 et mars 2010. L'évolution des surfaces érodées et déposées pour 73 profils est présentée sur la figure 4.23 pour la période 2000-2002, où le jeu de données est complet.

Les données disponibles ne représentent qu'un seul tronçon complet (le tronçon 3) et l'aval du tronçon 2. Le tronçon 3 est caractérisé par du dépôt avec quelques profils présentant une incision localisée ; il faut cependant souligner que les sections sont levées uniquement dans le chenal principal, et qu'au vu de la période considérée ici (2000-2002), les évolutions constatées correspondent principalement à la migration des dunes, c'est à dire à un transit dans le chenal principal (Rodrigues, 2004).

4.3 Synthèse du chapitre

4.3.1 Avantages et limites de l'approche de classification

L'analyse des évolutions morphologiques à l'échelle du tronçon complète l'étude longitudinale en permettant la comparaison de tronçons similaires localisés en deux points distincts du cours d'eau. Par rapport aux classifications existantes, la prise en compte des limites artificielles (seuils, ponts, etc...) ou naturelles (confluence, affleurement du substratum) influe fortement le découpage en tronçons homogènes ainsi que les évolutions observées. L'intégration du facteur anthropique apparaît fondamental dans la classification des cours d'eau de plaine (qui sont généralement anthropisés). L'application d'une méthodologie de sectorisation existante est complexe car chaque approche a été

développée en réponse à des objectifs précis, pour un cours d'eau donné (Kondolf *et al.*, 2003). La méthodologie décrite ici ne fait pas exception à cette règle ; les classes définies pour caractériser les paramètres des différents tronçons sont spécifiques à la Loire moyenne et nécessiterait d'être adaptées pour une application sur un autre cours d'eau.

L'utilisation d'un modèle hydraulique 1-D pour dériver les paramètres hydrauliques permet une définition plus rigoureuse du ratio de largeur de plein bord sur hauteur d'eau au plein bord W_{Q2}/H_{Q2} , de la contrainte efficace τ_{eff} et de la puissance spécifique ω . La modélisation numérique permet ainsi de déterminer la puissance fluviale en se basant sur la pente de ligne d'eau correspondant au plein bord.

Les limites des approches de classification en tronçons sont principalement liées à la notion de tronçons mêmes : à cette échelle d'analyse, les paramètres morphologiques fournissent uniquement des valeurs moyennes, et donc des tendances générales d'évolution. L'approche par tronçon rend ainsi difficilement compte des différentes évolutions que l'on peut observer dans le chenal principal et dans les chenaux secondaires. Pour certains sites particuliers (en l'occurrence les trois sites de référence sélectionnées) il est donc intéressant de comparer les mesures détaillées afin dans un premier temps de comprendre les évolutions constatées et dans un second temps de valider le découpage en tronçons.

Une des principales difficultés dans l'application d'une approche de sectorisation et de classification est liée à la quantité de données nécessaires au découpage et à la définition des paramètres morphologiques. Les données disponibles ne couvrent souvent pas complètement le linéaire étudié. Pour la Loire moyenne, le peu de données granulométriques et de transport solide est regrettable. Il faut toutefois souligner la difficulté et les incertitudes associées aux mesures de transport solide ainsi que leur coût. La prise en compte des matériaux des berges constituerait une amélioration de l'approche de classification proposée. Pour la Loire moyenne cette caractéristique est implicitement incluse dans la localisation des tronçons. En effet les berges sont protégées sur l'aval du secteur d'étude.

4.3.2 Evolutions observées sur la Loire moyenne

Les variations annuelles de l'altitude du lit Δz sont déterminées à partir des données de lignes d'eau d'étiage pour les différents tronçons entre 1978 et 1984, 1984 et 1996 et 1996 et 2002 (Fig. 4.24). Il est rappelé que cette vitesse d'incision/dépôt correspond aux évolutions du chenal principal ; les ajustements observables dans les chenaux secondaires ne sont pas intégrés. Il faut également rappeler les incertitudes sur les données de lignes d'eau d'étiage ainsi que le raisonnement à l'échelle du tronçon qui conduit à une estimation du Δz moyen par tronçon. Les trois périodes considérées présentent des tendances d'évolution différentes ; ainsi, entre 1978 et 1984, les variations annuelles

de l'altitude du lit sont conséquentes avant de diminuer entre 1984 et 1996 et de globalement se stabiliser après 1996.

Entre 1978 et 1984, de fortes évolutions du lit sont constatées : la plus forte incision ($\Delta z = -220$ mm/an) est localisée sur le tronçon 116 (type '12da', PK 736,1), localisé à l'aval d'Amboise, où les extractions de granulats en lit mineur étaient importantes (cf. Annexe C) ; le fort dépôt ($\Delta z = 180$ mm/an), visible à l'amont de la centrale de Belleville, confirme les évolutions observées dans le paragraphe 4.2.1.2. Ainsi, ce tronçon localisé à l'amont du seuil de la centrale s'est fortement incisé entre 1977 et 1982 avant de se combler entre 1982 et 1984 ; la tendance générale d'évolution entre 1978 et 1984 sur ce tronçon est donc bien au dépôt. La forte incision du tronçon 46 (type '22ad', PK 573,15) est liée à la construction de la centrale nucléaire de Dampierre.

Entre 1984 et 1996, les évolutions sont moins fortes sur l'ensemble de la Loire moyenne. Des inversions de tendance sont observées. En particulier, l'aval de la Charité-sur-Loire qui présentait du dépôt entre 1978 et 1984, s'incise entre 1984 et 1996. Il en est de même pour les tronçons localisés à l'aval de Montsoreau.

Sur la dernière période considérée, 1996 - 2002, trois secteurs d'évolution peuvent être distingués : un secteur localisé entre le Bec d'Allier et St Satur (tronçons 1 à 20) qui présente de l'incision ; puis un secteur relativement stable (tronçons 21 à 140) malgré la présence de quelques pics d'incision ou de dépôt localisé jusqu'à Montsoreau (tronçon 140) ; et enfin, à l'aval de Montsoreau, un secteur (tronçons 141 à 167) dont la tendance est au dépôt. Le détail des évolutions des différents tronçons est donné en Annexe F.

Ces tendances générales d'évolution du lit de la Loire moyenne corroborent les observations faites précédemment sur les ajustements de pente et de largeurs des différentes classes de tronçons. La pente et la largeur de la bande active ont ainsi diminué entre 1978 et le début des années 1990 ; suite à l'arrêt des extractions de granulats en lit mineur, les ajustements se poursuivent mais dans des proportions moins fortes. Il semblerait donc que la Loire moyenne n'a pas complètement atteint son profil d'équilibre. Les évolutions morphologiques constatées sur la Loire moyenne semblent comparables aux évolutions observées sur les autres cours d'eau européens par Surian et Rinaldi (2003).

La difficulté d'analyse des évolutions morphologiques de la Loire moyenne doit également être mentionnée. Ainsi, l'influence des extractions sur les évolutions des tronçons et sur les tronçons adjacents est complexe à établir. Il est quelque peu simpliste de relier directement les ajustements des tronçons aux extractions. En effet, l'apogée des extractions coïncide avec un régime hydrologique favorable aux changements morphologiques. La distinction entre les évolutions liées aux extractions des évolutions liées au régime hydrologique est quasiment impossible.

Un autre point intéressant de l'analyse des évolutions est le fonctionnement particulier de certains tronçons où les ajustements latéraux ne sont pas toujours associés à des évolutions verticales. Ces tronçons sont généralement influencés par des affleurements rocheux qui empêchent l'érosion. Ainsi,

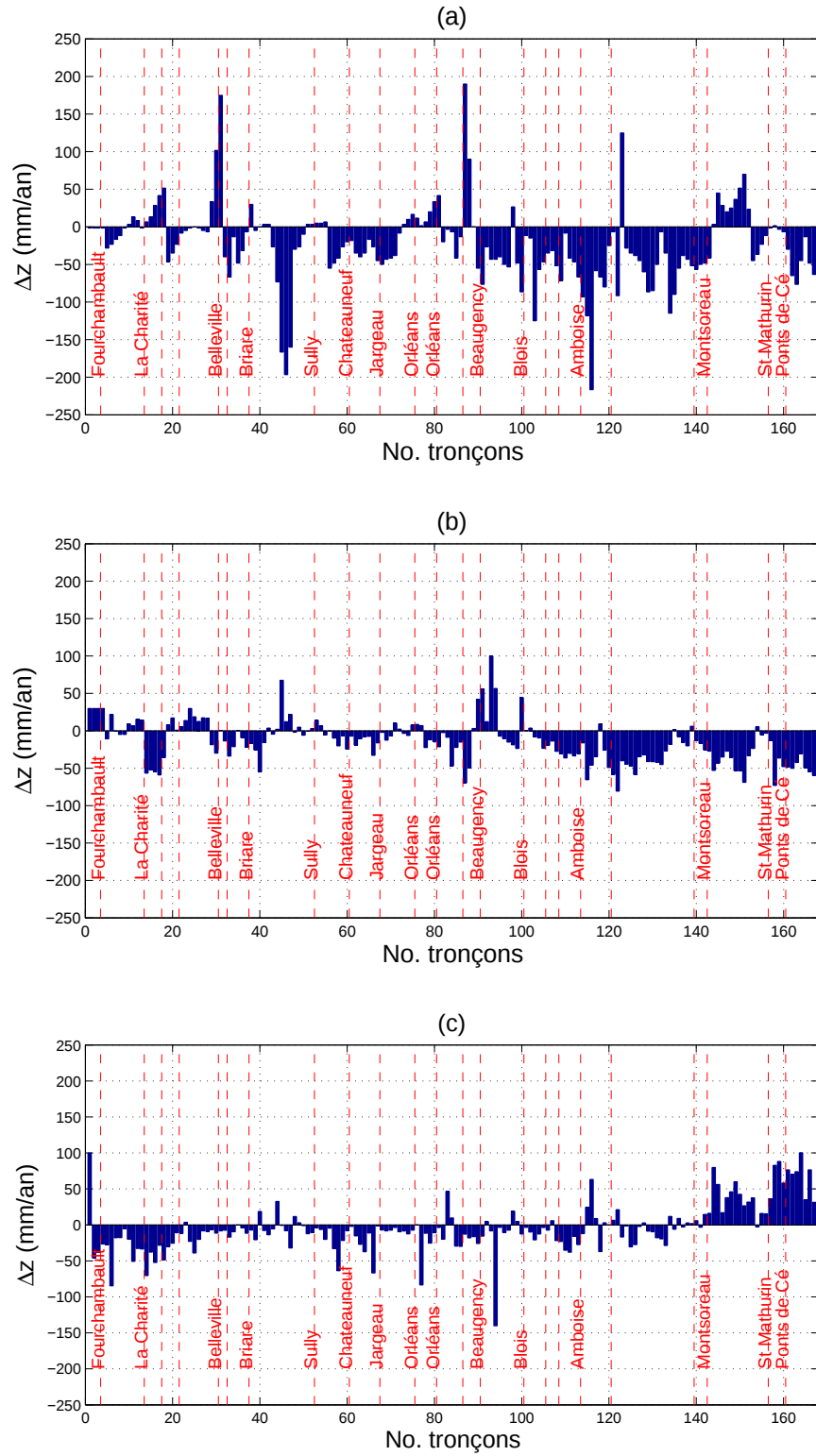


FIGURE 4.24 – Variations annuelles de l'altitude du lit Δz (mm/an) pour les différents tronçons de la Loire moyenne entre (a) 1978 et 1984, (b) 1984 et 1996 et (c) 1996 et 2002.

4. Evolutions morphologiques de la Loire moyenne depuis le début du XX^{ème} siècle

l'incision stoppée par la présence d'un seuil inérodable va entraîner une dissipation d'énergie latérale.

DEUXIÈME PARTIE

Modélisation numérique hydro-sédimentaire

5

Approches de simplification et modèle d'évolution

La modélisation de l'évolution d'un lit alluvial à grande échelle de temps et d'espace nécessite une simplification des données afin de réduire le temps de calcul. En se basant sur la définition des tronçons géomorphologiquement homogènes, deux types d'approches de simplification de la géométrie sont détaillées. Des méthodologies de simplification et de dérivation des chroniques de débits sont ensuite proposées. Enfin, le modèle 1D RubarBE, qui sera par la suite utilisé pour valider les approches de simplification, est brièvement décrit.

5.1 Simplifications de la géométrie

Les approches de simplification de la géométrie se basent sur le découpage en tronçons géomorphologiquement homogènes préalablement établi. Il s'agit de dériver, pour chaque tronçon, une géométrie lissée équivalente à la géométrie réelle d'entrée selon certains critères hydrauliques. La simplification doit conserver la représentation de la dynamique des phénomènes prédominants, tant d'un point de vue hydraulique que sédimentaire, en gardant en mémoire que l'objectif final est de conserver une évolution morphologique similaire au modèle en géométrie réelle. Chaque tronçon est ainsi défini par les grandeurs caractéristiques permettant la description du lit de la rivière : une hauteur d'eau moyenne H , une largeur au miroir W , un débit Q , une pente d'énergie J , un coefficient de Strickler du lit mineur K_{min} et du lit majeur K_{maj} . La géométrie du tronçon est ainsi définie par un profil lissé amont et un profil lissé aval. Les profils caractéristiques des ouvrages d'art ne peuvent bien évidemment pas être lissés, ils sont donc conservés et réécrits en sortie du programme. Les méthodologies de lissage de la géométrie décrites ci-après s'appuient sur les travaux de Morin (2007). Le programme de lissage est écrit en Fortran et a été modifié pour prendre en compte le coefficient de rugosité du lit majeur. Les données nécessaires à l'application du programme de lissage sont : la géométrie réelle, les abscisses des tronçons, les coefficients de frottement du lit mineur et du lit majeur des sections et un fichier contenant les paramètres hydrauliques (H , Q) d'une succession de profils de lignes d'eau obtenus en régime permanent. Le format des données de géométrie et de frottement correspondent aux fichiers générés avec le modèle hydraulique 1D RubarBE

(El Kadi Abderrezzak et Paquier, 2009 ; cf. paragraphe 5.3). A partir de ces données, pour chaque profil de ligne d'eau (i) et chaque tronçon (j) de longueur $L_t(j)$, on détermine :

- les débits moyens $Q(i, j)$;
- les surfaces mouillées $S(i, j)$;
- les périmètres mouillés $P(i, j)$;
- les largeurs au miroir $W(i, j)$;
- les hauteurs moyennes $H(i, j)$;
- les pentes d'énergie moyennes $J(i, j)$;
- les largeurs au miroir minimum $W_{min}(i, j)$;
- les hauteurs minimum $h_{min}(i, j)$.

$W_{min}(i, j)$ et $h_{min}(i, j)$ permettent de définir la largeur minimum et la hauteur minimum auxquelles sont appliquées le calcul dichotomique nécessaire pour appliquer les différentes méthodes. La cote du fond des profils simplifiés est dictée par la ligne d'eau d'étiage. Cette définition de la cote du fond entraîne une légère surestimation du profil en long lissé par rapport au profil en long initial.

5.1.1 Simplification de la géométrie en $2 \times n$ points

Cette première approche permet de construire une section symétrique conservant la largeur au miroir moyenne W , en fonction du débit Q . La largeur au miroir pour un débit donné est défini comme le quotient de la surface inondée par la longueur du tronçon, $W(i, j) = S(i, j)/L_t(j)$. Les hauteurs d'eau $H(i, j)$ sont ajustées afin de répondre à la loi de Manning Strickler :

$$Q(i, j) = K \frac{S(i, j)^{5/3}}{P(i, j)^{2/3}} \sqrt{J(i, j)} \quad (5.1)$$

La pente d'énergie est initialisée à sa moyenne sur le tronçon puis d'autres pentes sont testées afin de réduire l'écart entre les lignes d'eau (cf. paragraphe 5.1.3). Le programme permet d'effectuer un calcul dichotomique afin de déterminer les hauteurs d'eau $H(i, j)$ vérifiant l'équation de Manning Strickler pour chaque profil de ligne d'eau. Le profil en travers obtenu est défini par $2 \times n$ points, où n est le nombre de profils de lignes d'eau disponibles en entrée. Un exemple de profil lissé obtenu par cette approche est illustré sur la figure 5.1. Ce tronçon, localisé sur le site de référence de Belleville (PK amont du tronçon = 559,1) est défini par sept sections et douze profils de lignes d'eau calculés pour des débits variant de 20 à 4000 m³/s. Les profils simplifiés reproduisent convenablement la largeur et les cotes de fond des sections initiales.

L'approche opposée, c'est à dire en conservant les hauteurs d'eau (H) et en ajustant les largeurs au miroir (W) afin d'obtenir le régime uniforme est également implémentée dans le programme. Cette simplification est toutefois beaucoup plus sensible aux données disponibles en entrée. En effet, il est possible d'obtenir une largeur pour un profil de ligne d'eau (i) qui soit inférieure à la largeur

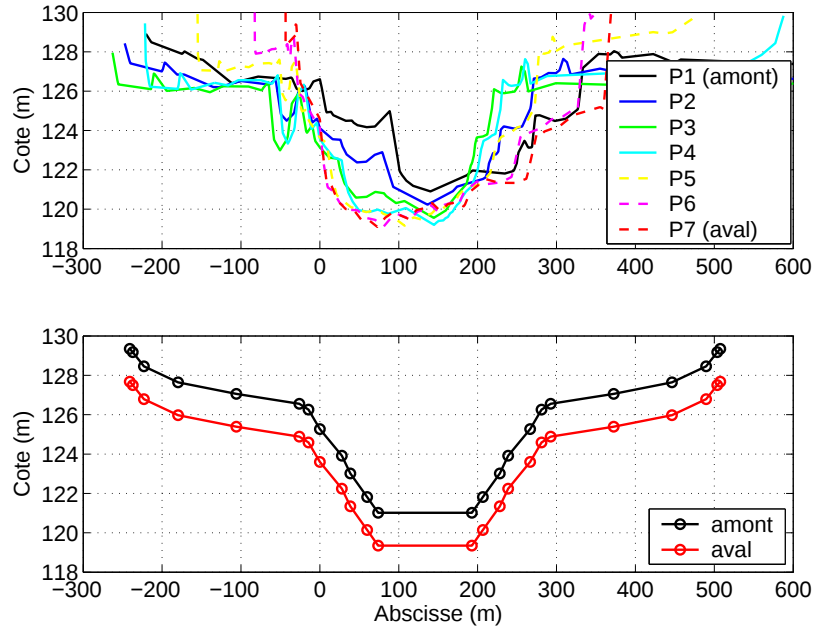


FIGURE 5.1 – Exemple de profil en travers lissé obtenu avec la simplification en $2 \times n$ points pour un tronçon défini par 7 sections et $n = 12$ (lignes d'eau).

calculée sur la ligne d'eau précédente (i-1). Un profil lissé avec des berges qui se rapprochent étant improbable, le calcul n'aboutit pas dans ce cas de figure.

5.1.2 Simplification de la géométrie en huit points

Dans cette approche, la section symétrique est définie par huit points : 4 points pour le lit mineur, 2 pour le lit moyen et 2 pour le lit majeur. La simplification du lit mineur est basée sur la définition du débit de plein bord (Q_{bf}) sélectionnée par l'utilisateur parmi les quatre définitions suivantes :

- point d'inflexion de la courbe de la surface mouillée S en fonction du débit Q ;
- abscisse telle que le ratio de la largeur moyenne sur la hauteur moyenne soit minimum ;
- abscisse telle que la moyenne du ratio de la largeur sur la hauteur soit minimum ;
- abscisse des limites rive gauche et rive droite définies dans la géométrie initiale (c'est à dire les limites lit mineur / lit majeur).

La largeur moyenne et la hauteur moyenne d'un premier trapèze peuvent ainsi être définies selon le débit de plein bord telles que pour le régime permanent uniforme, le débit sélectionné transite à plein bord dans le trapèze. Pour le lit moyen, un fruit de rive compris entre le profil à plein bord et le profil de ligne d'eau immédiatement supérieur est calculé et fixé. De la même manière, le fruit du lit majeur est calculé. W et H sont déterminés afin de satisfaire le régime uniforme en les faisant évoluer en même temps à pas géométrique fixe entre leurs moyennes et leurs minimums. Le nombre de points définissant la section dépend de la présence d'un lit majeur ou non. La section lissée compte ainsi quatre, six ou huit points de définition. Cette approche, illustrée sur la figure

5.2, est appliquée sur le tronçon défini par sept sections en travers et douze lignes d'eau, mentionné précédemment.

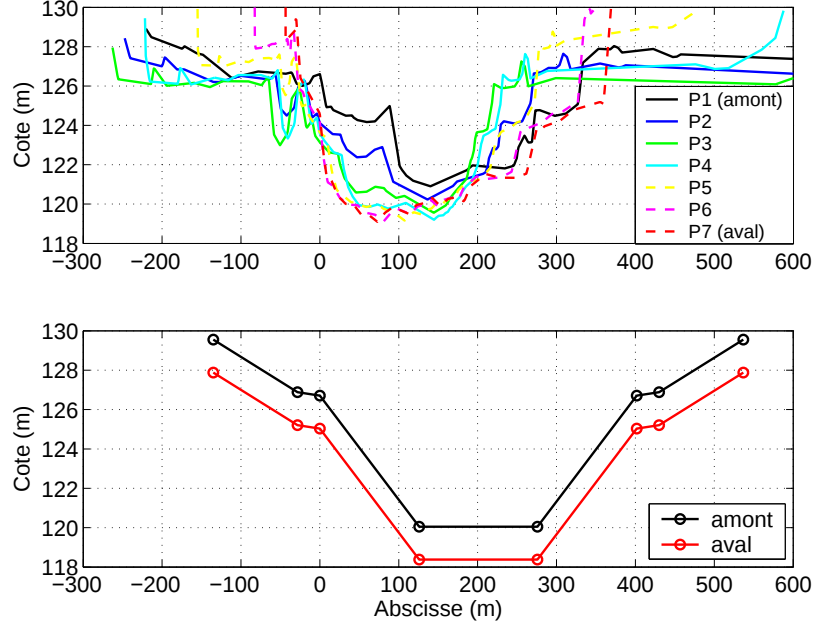


FIGURE 5.2 – Exemple de profil en travers lissé obtenu avec la simplification en huit points pour un tronçon défini par 7 sections et $n = 12$ (lignes d'eau).

Les sections lissées présentent une cote de fond plus basse et une largeur du lit moyen plus importante que les sections réelles et que l'approche de simplification en $2 \times n$ points. Les simplifications en huit points reposent sur la définition du débit de plein bord et nécessite donc un nombre de profils de lignes d'eau conséquent afin d'appréhender correctement Q_{bf} . Cette dépendance sur le Q_{bf} paraît à priori un inconvénient majeur pour le cas de la Loire moyenne où la présence d'îles et donc de chenaux secondaires rend la détermination d'un tel débit complexe.

L'approche opposée, c'est à dire avec la largeur maximale et la hauteur maximale fixes, est également implémentée dans le programme. Les fruits sont ensuite déterminés afin de satisfaire le régime uniforme.

5.1.3 Optimisation du lissage

Le lissage de la géométrie est optimisée sur la pente d'énergie afin de satisfaire le régime permanent. On cherche ainsi à réduire les écarts entre les lignes d'eau calculées avant et après lissage. La pente est ajustée afin d'obtenir une valeur minimum pour le critère de précision δz , défini par la relation suivante :

$$\delta z = (z_f(i, k) - z_f(j))^2 \times \frac{x(k) - x(k-1)}{x(j) - x(j-1)} \quad (5.2)$$

avec z_f la cote du fond, x l'abscisse curviligne, i l'indice de ligne d'eau, j l'indice des tronçons et k l'indice des sections en travers. Le critère de précision correspond à la moyenne sur les profils de la moyenne des écarts quadratiques entre les lignes d'eau calculées sur la géométrie lissée et les lignes d'eau initiales. Plusieurs pentes sont testées : on commence par la pente moyenne de la géométrie « réelle » puis on la fait croître ou décroître afin d'observer une diminution du coefficient d'optimisation.

Il est important de souligner que dans l'approche proposée, les coefficients de Strickler K_{min} et K_{maj} sont déterminés dès le début (ce sont des données d'entrée) et le processus de lissage se fait à Strickler constant. La détermination de la géométrie sert de calage.

5.2 Simplifications des chroniques de débit

La simplification des chroniques de débit semble une étape nécessaire à la modélisation de l'évolution d'un lit de rivière sur quelques années afin de réduire le temps de calcul. En plus de cet objectif, les approches de simplifications proposées doivent permettre de dériver des chroniques prédictives. Dans un premier temps, les chroniques de débits existantes sont simplifiées, puis des hydrogrammes de crue synthétiques sont définis afin de pouvoir dériver des chroniques de débits prédictives.

La simplification de la chronique de débit existante peut être envisagée avec une approche par débits classés, ou par une approche descriptive avec des débits seuils. La définition d'hydrogrammes synthétiques pour différentes périodes de retour est abordée avec deux méthodes : une approche permettant de conserver la forme des hydrogrammes et une approche basée sur la conservation du volume de crue. Des chroniques de débits caractéristiques sont ainsi réalisées à partir d'une succession d'hydrogrammes synthétiques.

5.2.1 Approche par débits classés

La courbe des débits classés représente le nombre de jours, ou le pourcentage du temps, durant lesquels la valeur du débit a été atteinte ou dépassée. Deux approches peuvent être dérivées, suivant que l'on considère les débits par ordre croissant ou par ordre décroissant. La figure 5.3 permet de comparer, pour la crue de décembre 2003, à la station hydrométrique de Gien, les débits classés calculés avec les débits mesurés à pas de temps variables ($QTVAR$) à ceux calculés avec les débits journaliers moyens (QJM). Les données de $QTVAR$ sont plus précises au pic de crue que les QJM . Il faut toutefois noter que les données de QJM disponibles couvrent une plus longue période, et qu'au regard des simplifications que nous allons apporter, la différence entre les deux mesures est négligeable. Les données de QJM seront donc utilisés dans nos approches de simplifications des chroniques de débits.

Cette approche par palier paraît peu probante pour modéliser l'évolution du lit sur plusieurs

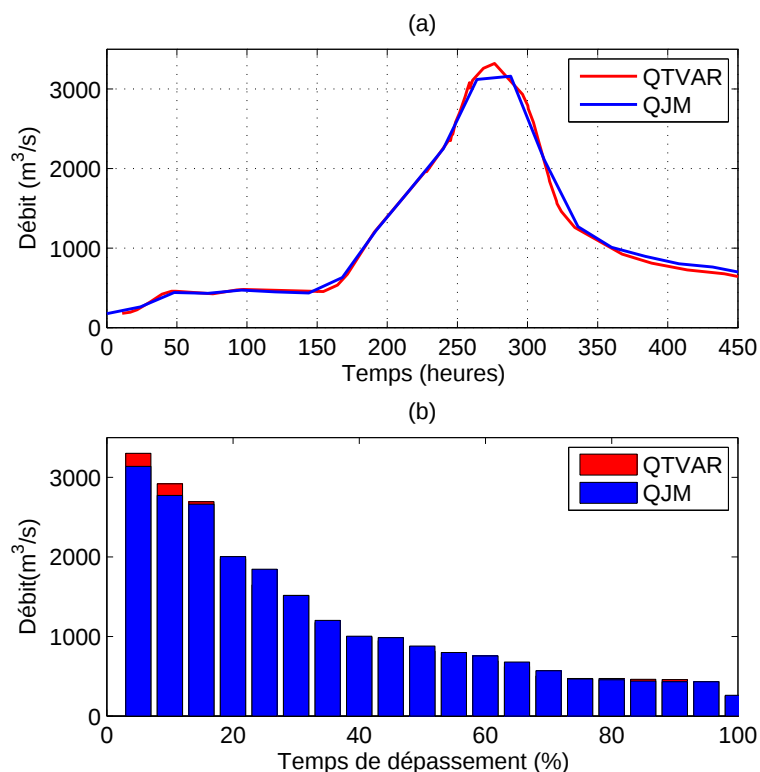


FIGURE 5.3 – Débits journaliers moyens Q_{JM} et débits à pas de temps variables Q_{TVAR} à la station hydrométrique de Gien pour la crue de décembre 2003 (a) et courbe des débits classés correspondantes (b).

années. En effet elle ne permet pas la prise en compte des montées et descente de crues. Or, durant une crue, le transport de sédiments diffère lors de la montée, au pic, et lors de la descente de crue (hystérèse). Une troisième approche est donc également dérivée en divisant les périodes de chaque palier en deux et en centrant la courbe des débits classés sur la valeur de débit maximale de façon à obtenir une forme pyramidale. Les hydrogrammes obtenus avec ces trois approches sur une chronique de débit plus longue (1996 - 1998 à la station hydrométrique de Gien) sont illustrés sur la figure 5.4. Cette approche ne permet pas de réduire la durée de l'hydrogramme mais les calculs correspondent ainsi à une succession de régimes permanents. Ces trois approches de débits classés ascendant, descendant et en pyramide seront testées sur le site de référence de Belleville.

Il est à noter que l'approche par débits classés est adaptée pour la prédiction puisqu'elle n'induit pas de construction d'hydrogrammes. La prise en compte du changement climatique peut aussi se faire relativement simplement à partir de résultats d'études hydrologiques.

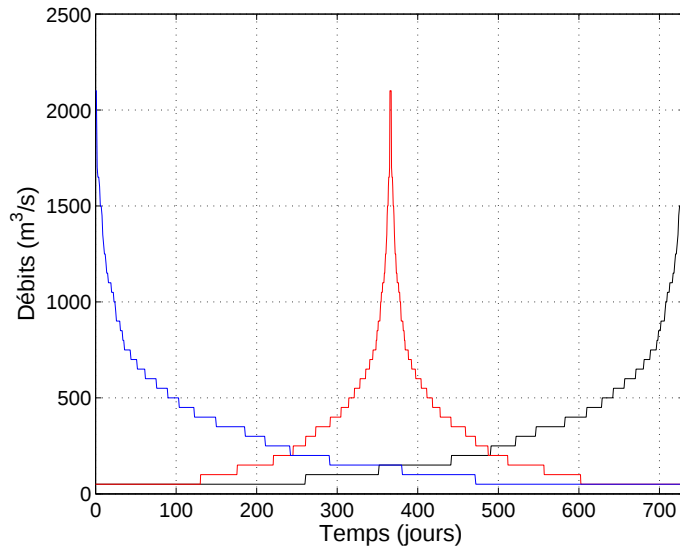


FIGURE 5.4 – Courbes de débits classés ascendants, descendants et en pyramide à la station hydrométrique de Gien pour la période 1996 - 1998.

5.2.2 Approche descriptive avec seuils

Cette approche a pour but de simplifier une chronique de débit existante en conservant les montées et descentes de crue et les phénomènes de crues multiples. Il s'agit donc de diminuer la durée de la chronique sans altérer considérablement sa forme. Cette approche est abordée en trois étapes :

- l'identification des débits maximums locaux et la simplification de ces pics de crues en se basant sur une valeur seuil de débit de crue Q_c ;
- la définition d'un débit seuil d'étiage Q_e permettant de supprimer les périodes d'étiage ayant, à priori, peu d'influence sur le transport solide.
- la simplification des périodes intermédiaires, c'est à dire $Q_e < Q < Q_c$.

Le débit seuil de crue a été pris égal au module de la station hydrométrique étudiée. En effet, une succession de crues de faible intensité a une influence sur l'évolution des fonds. La simplification des hydrogrammes de crues et la définition de Q_e sont détaillés dans les paragraphes suivants.

5.2.2.1 Simplification d'un hydrogramme de crue en cinq points

Cette approche de simplification se base sur les formes des hydrogrammes normés préalablement décrites au paragraphe 2.3.5. Chaque pic de crue de la chronique est ainsi caractérisé par une forme simplifiée définie par cinq points (Fig. 5.5).

Les cinq points sont déterminés selon la méthode suivante :

- point A : le pic de crue est conservé avec la valeur de débit Q_{max} au temps t_{max} ;
- points Cm et Cd : les débuts et fins de crue sont déterminés au temps $t_{max} \pm 10$ jours avec la

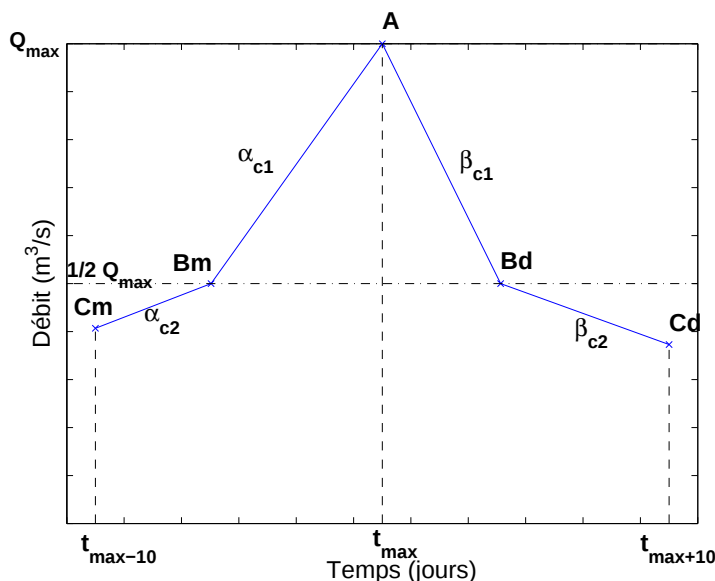


FIGURE 5.5 – Schéma illustrant la simplification des hydrogrammes de crue en cinq points. Les pentes α_c et β_c sont explicitées dans le paragraphe 5.2.3.1.

valeur de débit correspondante dans l'hydrogramme réel ;

- points Bm et Bd : ces deux points intermédiaires sont définis pour $Q = Q_{max}/2$ avant et après le pic de crue. Si les points se situent à plus de huit jours du pic, ils sont fixés au temps $t_{max} \pm 8$ jours avec la valeur de débit correspondante dans l'hydrogramme réel.

La figure 5.6 présente les différents pics de crues identifiés et simplifiés sur la chronique 1996-1998 à la station hydrométrique de Gien en prenant Q_c égal à la valeur du module à la station (soit $Q_c = 350 \text{ m}^3/\text{s}$). Sur cet exemple, 14 pics de crue ont été identifiés et simplifiés. Il faut noter que certaines crues étant constituées de pics multiples, un filtre est également appliqué afin de dériver les cinq points des hydrogrammes simplifiés en éliminant les chevauchements.

5.2.2.2 Définition d'un débit seuil d'étiage

Afin de construire une chronique de débits simplifiée tout en réduisant le temps de calcul, on s'est attaché à définir un débit seuil d'étiage Q_e , en dessous duquel aucune évolution notable du lit est constatée. D'un point de vue purement géomorphologique, la définition d'un tel débit est contestable. En effet, le transport de sédiments existe pour des débits relativement faibles en Loire moyenne (Rodrigues et Claude, 2010). Cependant, au vu des modifications engendrées par ces débits et des échelles temporelles que l'on souhaite modéliser, l'élimination de certaines valeurs de débits paraît nécessaire à notre approche de simplification. La définition de Q_e est basée sur le calcul du ratio de la contrainte efficace sur la contrainte critique de mise en mouvement τ_{eff}/τ_{cr} , pour différentes valeurs de débits (cf. paragraphe 3.3.3). La figure 5.7 présente l'évolution de ce ratio entre le Bec d'Allier et Gien pour des débits de $100 \text{ m}^3/\text{s}$, $200 \text{ m}^3/\text{s}$ et $300 \text{ m}^3/\text{s}$. Il faut noter que

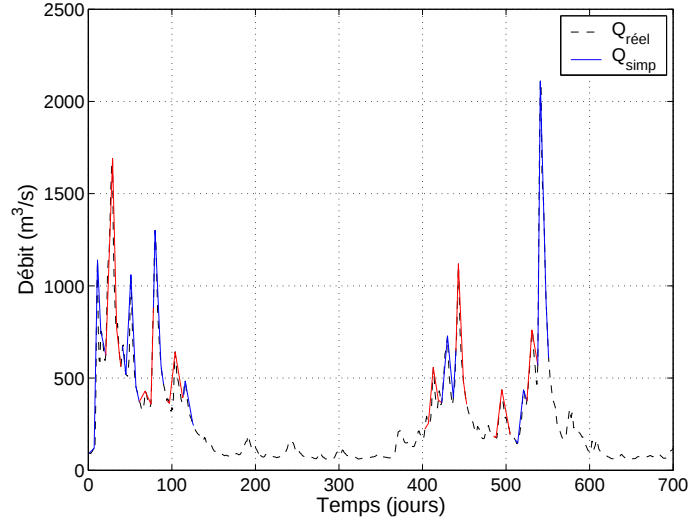


FIGURE 5.6 – Identification et simplification des pics de crue sur la chronique de débit disponible à la station hydrométrique de Gien pour la période 1996-1998.

la contrainte critique de mise en mouvement τ_{cr} est calculée avec les valeurs du diamètre médian d_{50} déterminées dans le paragraphe 3.3.2; la granularité étendue de la Loire moyenne n'est donc pas intégrée et la mise en mouvement déterminée ici est donc une approximation. Les pics observés correspondent aux localisations d'ouvrages. A l'amont du secteur d'étude (entre le PK 460 et le PK 545), le ratio τ_{eff}/τ_{cr} est inférieur à 1, c'est à dire que le seuil de mise en mouvement n'est pas atteint, pour une valeur de Q_e de 200 m³/s. Cette valeur est donc adoptée pour Q_e pour la dérivation des chroniques simplifiées. Les tests effectués sur les sites de référence permettront de valider ou de modifier cette valeur du débit seuil d'étiage.

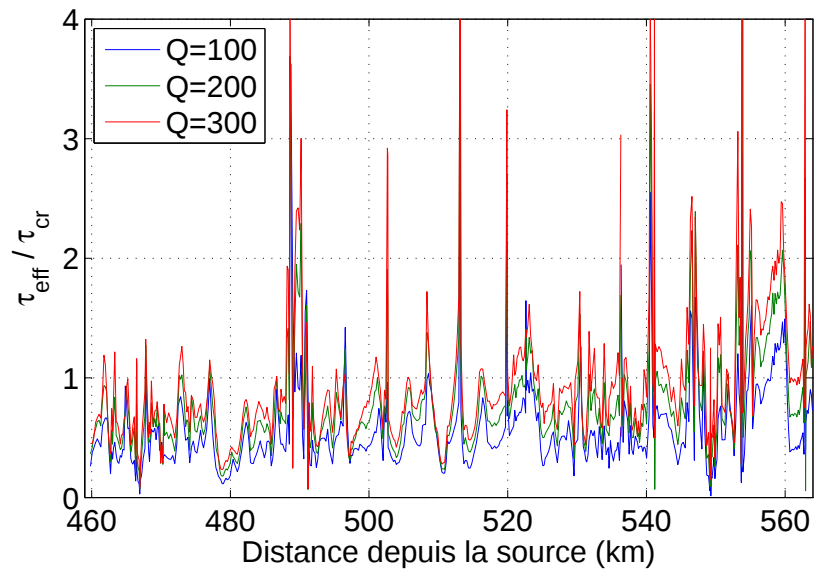


FIGURE 5.7 – Evolution du ratio τ_{eff}/τ_{cr} entre le Bec d'Allier et Gien pour $Q = 100$ m³/s, $Q = 200$ m³/s et $Q = 300$ m³/s.

5.2.2.3 Simplification d'une chronique existante

L'approche de simplification descriptive avec seuils est appliquée sur la chronique de débit enregistrée à Gien entre 1996 et 1998 en adoptant $Q_c = 350 \text{ m}^3/\text{s}$ et $Q_e = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ (Fig. 5.8). Chacun des 14 pics de crues identifiés est simplifié en cinq points. Les périodes intermédiaires aux pics présentant des débits compris entre Q_e et Q_c sont réduites à une valeur moyenne constante avec une durée minimum de deux jours. Cette approche permet de reproduire correctement les crues multiples mais sous-estime l'influence des débits faibles. La chronique de débit de 2 ans est ainsi réduite de moitié (de 733 jours à 315 jours). Toutefois, de part sa définition, cette simplification ne permet pas de reproduire le régime hydrologique de la Loire qui est caractérisé par des périodes d'étiage l'été et de fort débit entre octobre et juin (cf. paragraphe 2.3.2). L'influence de ces périodes présentant des débits faibles sur les évolutions morphologiques du lit devra donc être évaluée afin de confirmer la validité de la définition de Q_e .

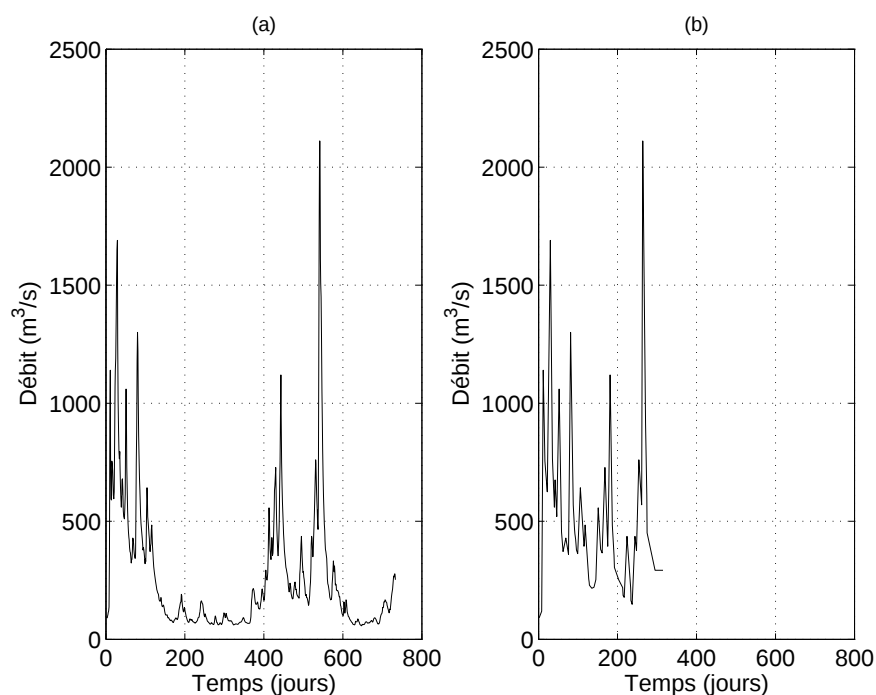


FIGURE 5.8 – (a) Chronique de débit à Gien entre 1996 et 1998 et (b) simplification de cette chronique avec l'approche descriptive avec seuils.

5.2.3 Dérivation de chroniques de débits simplifiées

La simplification de chroniques existantes est nécessaire pour tester la valeur de Q_e et le traitement des périodes intermédiaires aux pics de crue. Il est également essentiel de pouvoir dériver des hydrogrammes prédictifs. Deux approches de simplifications et de reconstitution des hydrogrammes de crue sont détaillées : l'une permet de conserver la forme, la deuxième permet de conserver les

volumes de crue.

5.2.3.1 Approche 1 : conservation de la forme d'un hydrogramme de crue

L'approche de simplification en cinq points est ici reprise afin de déterminer les pentes α_c et β_c (Fig. 5.5), correspondant respectivement aux montées et descentes de crue pour différentes périodes de retour. A partir des chroniques de débits journaliers moyens Q_{JM} de la station hydrométrique de Gien de 1936 à 2006 et de Blois de 1863 à 2006, une estimation de ces coefficients est proposée pour les crues de différentes périodes de retour (Fig. 5.9).

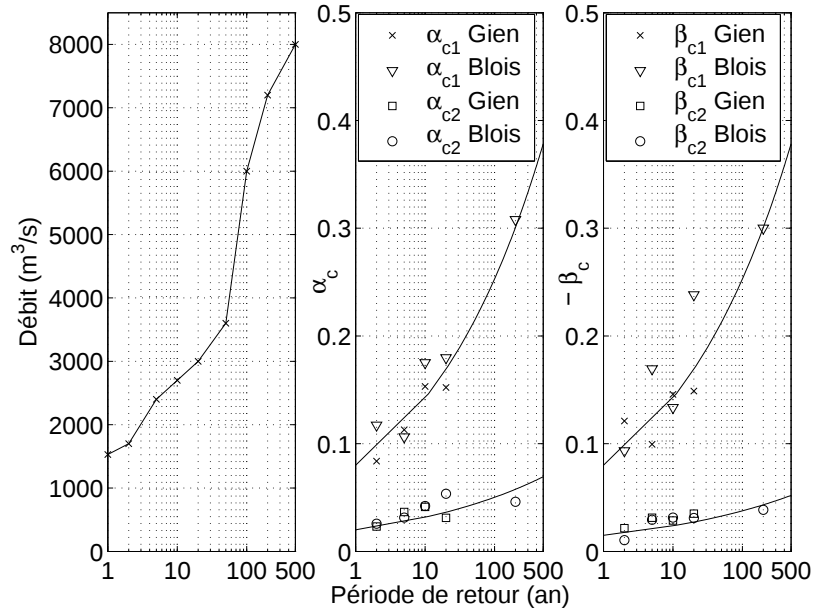


FIGURE 5.9 – Valeurs des débits estimés pour différentes périodes de retour à la station de Gien et détermination des coefficients α_c et β_c à partir des données de Gien et Blois (les pentes calculées pour la station de Blois sont utilisées dans la détermination de la loi puissance afin d'inclure les données de la crue de 1866).

En supposant le débit Q_{max} connu (description statistique, où Q_{max} correspond au débit de période de retour T), il est nécessaire de pouvoir prédire les coefficients α_c et β_c . Une fonction puissance est ainsi dérivée pour chacun des coefficients :

$$\alpha_{c1} = 0,08 T^{0,25} = -\beta_{c1} \quad (5.3)$$

$$\alpha_{c2} = 0,02 T^{0,25} \quad (5.4)$$

$$\beta_{c2} = -0,015 T^{0,2} \quad (5.5)$$

La validité de ces coefficients est discutable en particulier pour les débits présentant une période de retour supérieure à 20 ans. En effet peu de données sont disponibles pour ces crues fortes et les débits de Blois ont donc été utilisés pour obtenir une estimation des coefficients. La prise en compte

de ces débits ne devraient pas introduire de biais car aucun affluent majeur ne vient grossir le débit de la Loire entre Gien et Blois. A partir de la valeur des débits caractéristiques pour différentes périodes de retour, des coefficients α_c et β_c ainsi définis et de la durée caractéristique des crues (soit 20 jours, cf. paragraphe 2.3.5), des hydrogrammes synthétiques sont déterminés (Fig 5.10). Il est à noter que les crues ainsi décrites sont quasiment symétriques (montée et descente).

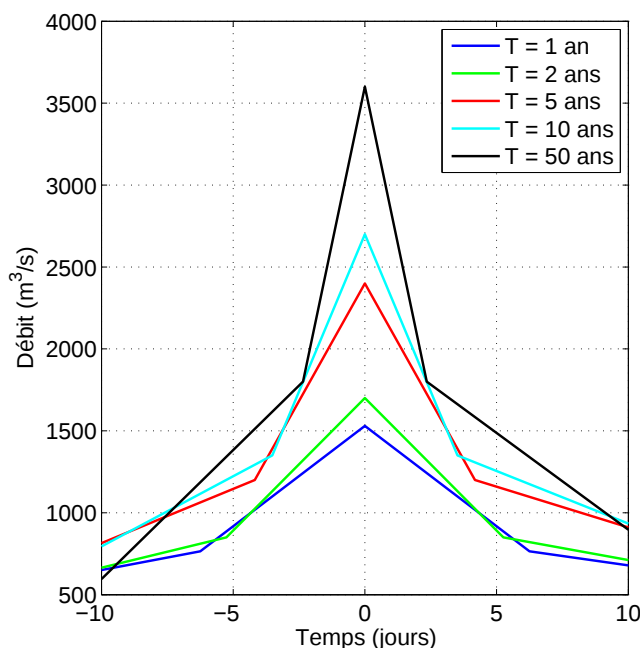


FIGURE 5.10 – Hydrogrammes Synthétiques avec conservation de la forme pour différentes périodes de retour à Gien.

5.2.3.2 Approche 2 : conservation des volumes d'un hydrogramme de crue

D'un point de vue hydrologique, l'approche permettant de conserver la forme décrite précédemment (cf. paragraphe 5.2.3.1), est critiquable. En effet, les volumes de crue ne sont pas pris en compte, seule la forme de l'hydrogramme réel est considérée. Une approche plus robuste hydrologiquement est donc ici testée. Le logiciel *Prethy*, développé par Sauquet *et al.* (2003), permet de définir des hydrogrammes de projet pour différentes périodes de retour en se basant sur la durée caractéristique des crues qui décrit la dynamique de l'événement et les volumes générés maximaux. Les hydrogrammes de projet sont les Hydrogrammes Synthétiques Mono-Fréquence (HSMF) déduits des courbes Débit-durée-Fréquence (QdF), c'est à dire des quantiles de débits moyens de différentes durées d'une même période de retour. La phase de montée s'appuie sur celle de l'hydrogramme normé. La pointe de crue est définie par le débit instantané maximal de la période de retour T choisie. Pour différentes durées t , on construit la courbe de récession de telle sorte que le volume généré maximal sur la durée t coïncide avec le quantile de période de retour T et de durée t . L'avantage

de l'HSMF est de garantir que toutes les caractéristiques de l'hydrogramme sont rattachées à une même fréquence d'occurrence. Il s'agit d'objets mathématiques aux formes intermédiaires entre des événements réellement observés et une forme simplifiée de la crue en cinq points.

Les hydrogrammes sont définis à partir des 16 années de données de débits à pas de temps variables $QTVAR$ disponibles à la station hydrométrique de Gien entre 1993 et 2010, en considérant l'année hydrologique, soit du 01 septembre au 31 août de l'année suivante. Les hydrogrammes synthétiques obtenus sont présentés sur la figure 5.11. Les hydrogrammes ainsi obtenus sont pertinents d'un point de vue hydrologique, en ce sens que les volumes de crue sont conservés. Toutefois, la forme de la descente de crue est singulière et mérite d'être testée dans le modèle d'évolution.

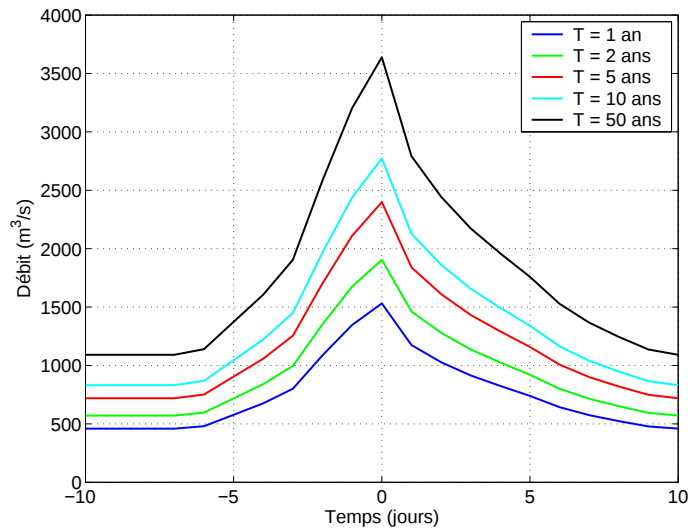


FIGURE 5.11 – Hydrogrammes Synthétiques Mono-Fréquences (conservation des volumes de crue) de différentes périodes de retour à la station de Gien

5.2.3.3 Comparaison des approches de simplification des hydrogrammes de crue

Les approches de dérivation des hydrogrammes de crue présentées dans les paragraphes précédents ont des formes de pics distinctes (cf. paragraphes 5.2.3.1 et 5.2.3.2). Toutefois, l'approche conservant la forme permet d'obtenir des volumes de crue proches des volumes des *HSMF* pour les débits présentant des périodes de retour faibles ($T < 10$ ans). Pour les crues plus fortes, les différences s'accroissent (Fig. 5.12). Il faut également noter que les valeurs de Q_{max} diffèrent entre les méthodes. Cette distinction est liée à la définition même de ces deux approches. L'approche de conservation de la forme est définie à partir des QJM disponibles entre 1936 et 2006 à Gien tandis que l'approche de conservation des volumes se base sur les données de $QTVAR$ qui fournissent une valeur du débit maximal plus précise.

Les approches de dérivation des hydrogrammes de crues sont ensuite comparées en reconstituant

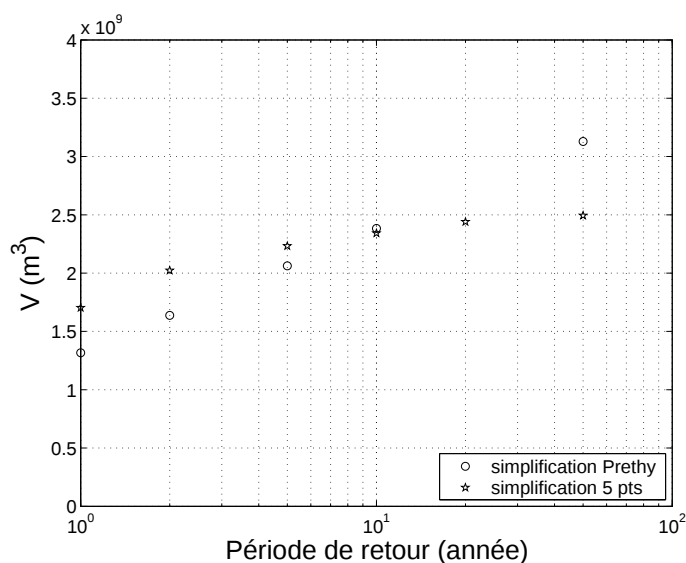


FIGURE 5.12 – Comparaison des volumes de crues obtenus avec l'approche de dérivation des hydrogrammes de crue conservant la forme (notée simplification en 5 points) et l'approche *HSMF* (notée simplification Prethy sur la figure).

la chronique de débits 1996-1998 disponible à la station hydrométrique de Gien. La chronique réelle est donc analysée afin d'estimer les périodes de retour des 14 pics de crues identifiés. Douze pics sont inférieurs au Q_1 , un est égal au Q_2 et un au Q_5 . A partir de ces caractéristiques, ces pics de crue sont simplifiés avec les approches d'hydrogrammes synthétiques définis en conservant la forme puis avec l'approche conservant les volumes (HSMF). Les périodes de débits faibles et les chevauchements sont ici traités de façon similaire à la simplification descriptive avec seuils. La reconstitution des 100 premiers jours de la chronique réelle est présentée sur la figure 5.13; la simplification obtenue avec l'approche descriptive à seuils est également représentée. L'approche de simplification des hydrogrammes de crue avec conservation de la forme présente des débits élevés au début des pics; l'approche permettant la conservation des volumes respecte mieux ces périodes de débits faibles mais génère des montées de crues avec des pentes plus raides qui peuvent poser problème pour la modélisation.

5.2.3.4 Dérivations de chroniques prédictives

A partir des définitions des hydrogrammes synthétiques pour différentes périodes de retour (cf. paragraphes 5.2.3.1 et 5.2.3.2), des chroniques de débits simplifiées types peuvent être dérivées. Une dérivation rigoureuse de scénarios de successions d'hydrogrammes nécessiterait de mettre en oeuvre une approche Monte-Carlo, coûteuse en temps. Afin de tester et d'illustrer notre approche, sept événements identifiés sur la chronique de débits réelle disponible entre 1996 et 1998 à Gien sont utilisés. Le Q_5 , le Q_2 , et cinq Q_1 sont ainsi considérés. Les ébauches de chroniques prédictives sont produites en créant deux chroniques types, l'une considérant la crue de période de retour de 5

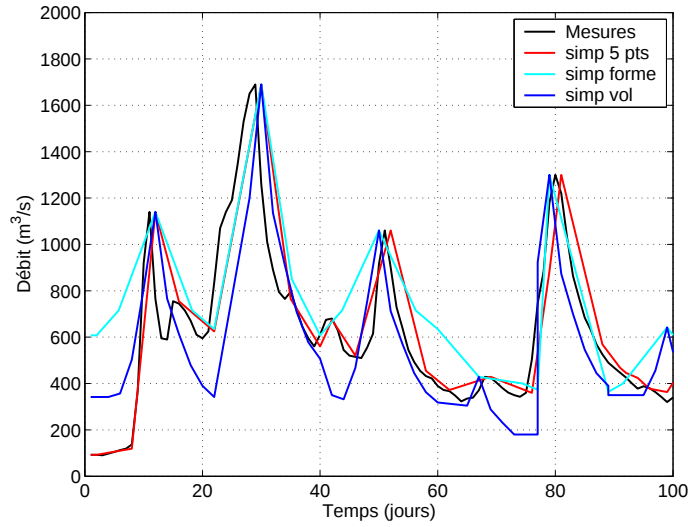


FIGURE 5.13 – Application des différentes approches de simplification des chroniques de débits sur les 100 premiers jours de la chronique disponible à Gien entre 1996 et 1998.

ans en début de chronique et une seconde considérant cette Q_5 à la fin. La définition des périodes intermédiaires à ces pics de crue est délicate. Le pourcentage du temps moyen annuel t_e pendant lequel $Q_e < Q < Q_c$ (avec $Q_e = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ et $Q_c = 350 \text{ m}^3/\text{s}$) est déterminé pour trois périodes : sur 2 ans (entre 1996 et 1998), sur 10 ans (entre 1996 et 2006) et enfin sur les 74 années de données de débits journaliers moyens disponibles à Gien (1936 - 2010). La détermination de t_e est réalisée en considérant les années hydrologiques, soit du 01 septembre au 31 août de l'année suivante (cf. Tab. 5.1).

	Durée (% du temps annuel)		
	1996 - 1998	1996 - 2006	1936 - 2010
$Q < Q_e$	54 %	48 %	45 %
$Q > Q_c$	25 %	31 %	32 %
t_e	21 %	21 %	23 %

TABLE 5.1 – Détermination des durées intermédiaires t_e à partir des chroniques 1996-1998, 1996-2006 et 1936 - 2010 disponible à la station hydrométrique de Gien.

Sur une année, la période intermédiaire assimilée à une période à débit constant dans notre approche représente ainsi en moyenne 21 % de l'année, soit 76 jours. Les chroniques dérivées doivent donc inclure au moins deux mois avec un débit constant. L'application de l'approche de simplification des hydrogrammes de crue avec la conservation de la forme permet d'obtenir les chroniques présentées sur la figure 5.14. Le débit constant a été pris égal à une valeur intermédiaire entre Q_e et Q_c soit $275 \text{ m}^3/\text{s}$ dans cet exemple.

La sensibilité du modèle à l'ordre chronologique des crues pourra ainsi être analysée. En fonction des résultats obtenus pour les tests avec ce type de chroniques, des tests supplémentaires pourront

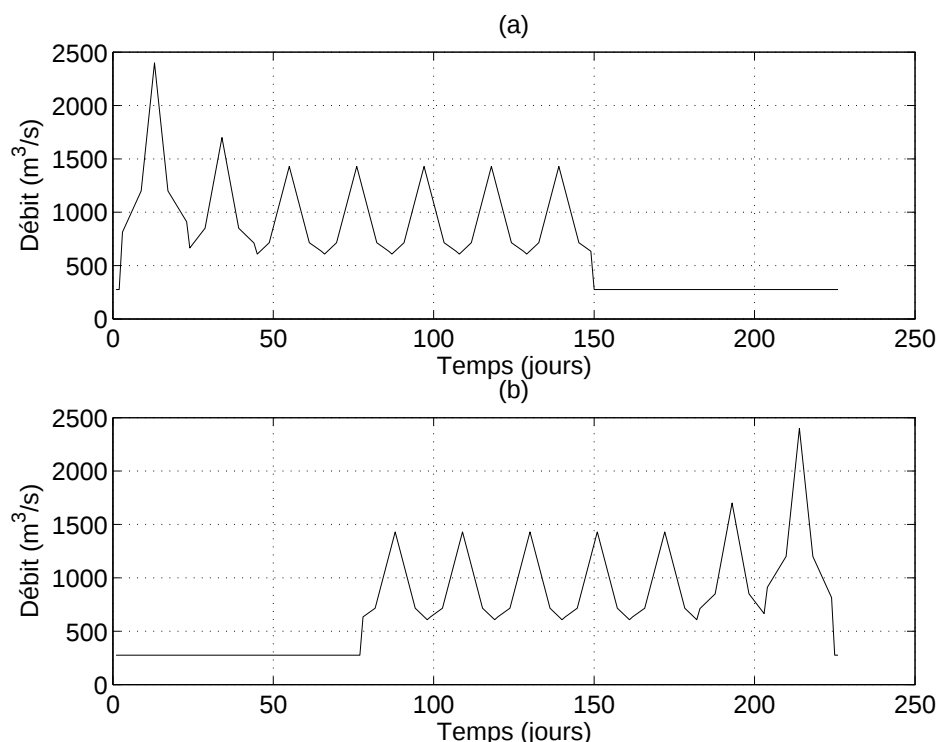


FIGURE 5.14 – Chroniques dérivées à partir des hydrogrammes synthétiques basés sur la conservation de la forme, en considérant (a) le Q_5 en début et (b) en fin de chronique.

être effectués afin de considérer la valeur des débits intermédiaires. Une estimation de ces débits intermédiaires aux crues peut être réalisée à partir de la courbe des débits classés.

5.2.3.5 Estimations des hydrogrammes d'apports des affluents

La modélisation des évolutions de la Loire moyenne, nécessite également de définir les apports des principaux affluents que sont le Cher, l'Indre, la Vienne et la Maine. Les stations hydrométriques des affluents étant localisées à plusieurs dizaines de kilomètres à l'amont des confluences avec la Loire, des courbes fictives d'apports sont donc constituées en se basant sur les données disponibles aux stations hydrométriques situées sur la Loire. L'apport de l'affluent est ainsi assimilé à la différence du débit aval et du débit amont à sa confluence afin de conserver l'hydrologie représentative de la Loire. Les stations de Tours et Langeais permettent de dériver les apports du Cher, Langeais et Chinon, les apports de l'Indre, Chinon et Montsoreau, les apports de la Vienne et enfin Montsoreau et Montjean, les apports de la Maine. Un coefficient λ est ensuite déterminé afin de relier l'apport de l'affluent à la station amont pour différentes périodes de retour (Fig. 5.15). Les variabilités observées dans les valeurs de λ sont liées au nombre de données disponibles aux différentes stations. Le coefficient λ présente une tendance décroissante pour le Cher, l'Indre et la Maine avec des valeurs variant entre 0,05 et 0,2. Le coefficient défini pour la Vienne présente des valeurs plus élevées (de 0,3 à 0,6) et

ayant tendance à croître avec la période de retour.

$$\lambda = \frac{Q_{aval} - Q_{amont}}{Q_{amont}} \quad (5.6)$$

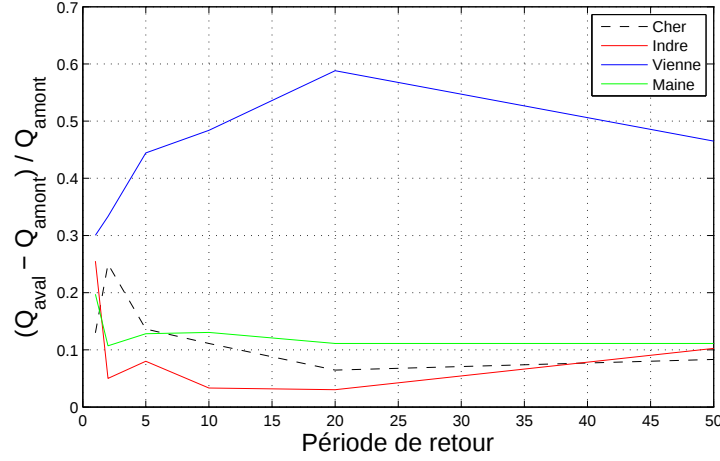


FIGURE 5.15 – Détermination des coefficients λ des quatre principaux affluents de la Loire moyenne pour différentes périodes de retour.

A partir des coefficients ainsi définis et du décalage temporel Δt décrit dans le paragraphe 2.3.4, l'apport de l'affluent est défini selon la relation :

$$q(t + \Delta t) = \lambda Q(t) \quad (5.7)$$

Cette approche considère que les affluents présentent un débit de même période de retour que la Loire moyenne. Cette hypothèse est acceptable pour le Cher, l'Indre et la Maine dont les apports sont relativement faibles. En revanche, l'impact de la Vienne sur l'hydrologie de la Loire est important et relier la chronique de la Vienne à celle de la Loire amont peut-être source d'erreurs. En effet, la synthèse des connaissances hydrologiques réalisée par Gautier (2001) révèle que sur les 60 événements de crue de la Vienne analysés, seuls quatre ont donné lieu à une concomittance avec la Loire. Cette hypothèse de crue concomittante pour tous les affluents est improbable dans la réalité mais permet une définition homogène des apports le long du tronçon d'étude pour tester le modèle simplifié d'évolution du lit. Les crues localisées en amont ou aval de la Loire moyenne ne seront donc pas considérées par la suite.

5.2.4 Accélération de l'hydrogramme

L'objectif de réduction du temps de calcul nous a également amené à considérer une accélération de l'hydrogramme. Cette approche, fréquemment utilisée dans les études de morphodynamique des

estuariers, a également été utilisé par De Linares (2007) avec le logiciel Telemac, et consiste à réduire la durée réelle de l'hydrogramme en divisant ce temps réel par un coefficient multiplicatif b ($b > 1$; Bernardes *et al.* (2006)). Le débit solide est ensuite multiplié par ce même facteur b afin de ne pas diminuer les évolutions simulées. Ce facteur d'accélération a été implémenté dans le code de calcul RubarBE. Il est bien évident qu'une accélération trop forte amplifiera les effets hydrodynamiques instationnaires; l'approche sera donc testée sur le site de référence de Belleville afin d'obtenir un facteur b permettant de diminuer le temps de calcul sans induire d'erreurs notables.

5.3 Spécificités du modèle d'évolution du lit RubarBE

Les tests des approches de simplification de la géométrie et des chroniques de débit, nécessaires à leur validation, ont été effectués avec le modèle 1D RubarBE d'évolution du lit. Ce modèle a été appliqué à d'autres cas d'étude, sur des tronçons plus courts et des périodes moins longues, et a fourni des résultats satisfaisants (El Kadi Abderrezzak et Paquier, 2009). Le calcul hydraulique du modèle RubarBE est basé sur les équations de Barré de Saint Venant et sur l'équation d'Exner préalablement décrite dans le paragraphe 1.2.3.3. La description fournie ici se concentre sur les options de calcul du transport sédimentaire. Une présentation détaillée du modèle est disponible dans la notice du logiciel (Paquier, 2009) et dans l'article d'El Kadi Abderrezzak et Paquier (2009).

5.3.1 Distance de chargement

Le modèle RubarBE a la particularité d'inclure une loi de chargement qui exprime le retard spatial de l'évolution de la charge solide par rapport aux variations des conditions hydrauliques. En effet, dans la plupart des cours d'eau, le mouvement de fond est considéré comme lent par rapport à celui de la phase liquide. La loi de chargement de Daubert et Lebreton (1967), adaptée au transport par charriage en régime quasi permanent et uniforme, est utilisée :

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} = \frac{Q_s^{cap} - Q_s}{D_{char}} \quad (5.8)$$

avec Q_s^{cap} la capacité de transport solide qui exprime la quantité de sédiments que la rivière est capable de mobiliser, Q_s le transport solide effectif qui exprime la quantité de sédiments que l'écoulement transporte réellement et D_{char} la distance de chargement qui traduit l'inertie spatiale du débit solide par rapport à l'écoulement.

Les valeurs à adopter pour D_{char} varient suivant le mode de transport dominant, la taille des sédiments et les formes du fond. En présence de rides sur le fond du lit, Phillips et Sutherland (1989) recommandent une distance égale à la longueur des rides, Wu *et al.* (2000) conseillent une distance correspondant à 100 fois la taille du d_{50} et, si les dunes prédominent sur le fond, la longueur de la

dune est prise. Ces résultats ont été obtenus à partir de données expérimentales. En modélisation numérique, D_{char} est souvent utilisé comme un terme de diffusion permettant de lisser les résultats. Belleudy (2001) recommande une distance de chargement au moins égale au pas d'espace. La valeur de D_{char} est fonction de la taille des sédiments, des formes du lit et de la géométrie du chenal et devrait donc d'être calibrée en fonction du site étudié.

5.3.2 Calcul des contraintes locales et du seuil de mise en mouvement

Le modèle 1D permet de calculer la contrainte hydrodynamique moyenne sur chaque section. Cependant, pour l'estimation du transport solide, cette valeur moyenne peut induire de fortes erreurs (Camenen *et al.*, 2011). Il est plus correct d'estimer les contraintes de cisaillement au fond locales, de calculer le transport solide local puis de sommer les valeurs sur une section afin d'obtenir une prédiction du débit solide total sur la section.

Dans le modèle RubarBE, la répartition de la contrainte hydrodynamique de cisaillement sur la section est effectuée par la Méthode des Perpendiculaires Confondues (MPC). Alternativement, une répartition uniforme de la contrainte sur la section en travers peut être imposée. La MPC est une méthode géométrique qui permet de calculer une distribution non uniforme de la contrainte de cisaillement sur une section donnée (Khodashenas et Paquier, 1999; El Kadi Abderrezak et Paquier, 2009).

De nombreuses formules de transport solide prennent en compte une contrainte de mise en mouvement. Celle-ci est généralement déduite du diagramme de Shields (cf. paragraphe 1.2.3.5). En plus de ce calcul classique, le modèle RubarBE propose une option permettant le calcul de la répartition de la contrainte critique qui modifie la valeur précédente (Shields) en prenant en compte l'influence de la pente transversale par la formule d'Ikeda (1982).

5.3.3 Calcul de la capacité de transport solide

Le calcul sédimentaire est basé sur l'équation de conservation de la masse et une loi de capacité solide choisie parmi différentes lois empiriques existantes choisies dans la littérature (Meyer-Peter et Müller 1948; Engelund et Hansen 1967; Bagnold 1966; Ackers et White 1973; Van Rijn 1984).

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 B_{LA} ($Q_s = q_s^{cap} \times B_{LA}$). Cette capacité est calculée pour les sédiments de la couche active et intervient dans le calcul du bilan sédimentaire. Trois méthodes sont proposées dans le code de calcul pour déterminer q_s^{cap} :

- option 1 : la capacité solide unitaire q_s^{cap} est calculée à partir de la contrainte hydrodynamique moyenne et de la contrainte de mise en mouvement τ_{cr} . La largeur active correspond à la valeur minimum de la largeur au miroir ou de la largeur active.

- option 2 : de façon similaire à l'option 1, la capacité solide unitaire est calculée à partir de la contrainte hydrodynamique moyenne et de la contrainte de mise en mouvement τ_{cr} . La largeur active est calculée en fonction des contraintes locales données par la MPC et des contraintes critiques corrigées par le facteur d'Ikeda.
- option 3 : q_s^{cap} et la largeur active sont calculées à partir des contraintes locales données par la MPC et des contraintes critiques corrigées par le facteur d'Ikeda.

La définition de la largeur active proposée par l'option 1 semble peu adaptée pour les cours d'eau présentant des chenaux multiples. Les options 2 et 3 sont similaires ; toutefois l'option 3 est basée sur le calcul des contraintes locales qui paraît plus pertinent.

5.3.4 Prise en compte de la granulométrie étendue

Le calcul du transport sédimentaire se fait d'un compartiment vers un autre. Lorsque deux compartiments échangent des sédiments, leurs compositions granulométriques doivent être mises à jour. La composition sédimentaire de différentes strates superposées peut être définie pour le lit actif des sections. La strate supérieure correspond ainsi aux sédiments présents à la surface du lit. La composition sédimentaire est décrite par le diamètre médian d_{50} et le paramètre d'étendue granulométrique σ . Les compartiments sédimentaires peuvent ainsi échanger des sédiments selon un processus de mixage ou de démixage. Le mixage correspond à l'intégration de sédiments venant d'un autre compartiment dans le compartiment considéré et donc au mélange des deux populations de sédiments tandis que le démixage correspond à l'extraction de sédiments du compartiment considéré vers un autre compartiment. La prise en compte de ces processus a un intérêt si la granulométrie est composée de sédiments de diamètres différents et donc présente un facteur d'étendue granulométrique grand. Ces options de mixage/démixage ne sont pas considérées pour la Loire moyenne car les données granulométriques disponibles ne sont pas suffisantes pour définir les compartiments sédimentaires et donc pour intégrer ces processus.

5.3.5 Déformation des sections en travers

L'abscisse transversale des points du lit actif, dont le modèle RubarBE permet une évolution des fonds à un pas de temps donné, est fixe. Cette évolution est retranscrite par une modification de leurs cotes. Selon le résultat de bilan de masse, on a érosion ou dépôt.

Pour l'érosion, RubarBE traduit le bilan sédimentaire en abaissant chacun des points j érodables dont la contrainte locale de mise en mouvement des sédiments de la sous couche $\tau_{cr,j}$ est inférieure à la contrainte hydrodynamique locale τ_j . La déformation locale Δz est fonction de $(\tau_j - \tau_{cr,j})^m$, où l'exposant m dépend de la formule de transport utilisée (cf. Fig 5.16 gauche, $m = 3/2$ avec la formule de Meyer-Peter et Müller (1948)).

Pour les dépôts, six options sont proposées :

- option 1 : le dépôt se fait par couches horizontales : le fond de la section est progressivement comblé en commençant par le ou les points bas ; on tend ainsi vers un fond plat ;
- option 2 : le dépôt uniforme le long du périmètre mouillé : tous les points situés sous la surface libre sont ainsi remontées de la même hauteur ;
- option 3 : le dépôt est inversement proportionnel à la contrainte locale : la déformation est fonction de $1/\tau_j$;
- option 4 : le dépôt variable est fonction de $(\tau_{cr,j} - \zeta\tau_j)^m$: on suppose ici que le dépôt est plus important dans les zones de la section où l'écart entre la contrainte critique de mise en mouvement et la contrainte de cisaillement est plus grand. La déformation locale $\Delta z_{b,j}$ associée au point j est ainsi fonction de $(\tau_{cr,j} - \zeta\tau_j)^m$ avec $\zeta = \frac{1}{2} \frac{1}{\sum \Delta y_j} \sum \Delta y_j \frac{\tau_{cr,j}}{\tau_j}$;
- option 5 : similairement à l'option 4, le dépôt variable est fonction de $(\tau_{cr,j} - \zeta\tau_j)^m$ avec $\zeta = 1/2 \min(\frac{\tau_{cr,j}}{\tau_j})$;
- option 6 : le dépôt variable est fonction de $(\tau_j)^m$: on suppose ici que le dépôt est plus important dans les zones de la section où la contrainte de cisaillement est plus grande. Cette hypothèse s'appuie sur le fait que le potentiel de transport solide est plus important dans les zones à fortes contraintes.

Les différentes options d'érosion et de dépôts sont illustrées pour un chenal composé théorique et symétrique sur la figure 5.16. La première figure considère les érosions induites si la contrainte locale est proportionnelle à la hauteur d'eau h ou à $(\tau - \tau_{cr})^{3/2}$ (seule cette deuxième déformation est implémentée dans RubarBE). Pour les dépôts, les options 1 et 2 sont uniformes, ce qui, sur une section réelle de rivière peut provoquer des résultats aberrants. Les options 3, 4 et 5 sont relativement similaires et induisent des dépôts plus importants sur les zones de contraintes faibles (bancs). L'option 6 induit des résultats nettement différents des autres options car elle suppose une dynamique très faible sur les bancs.

Certaines des options étant relativement similaires, seules les options de calcul de dépôt 1, 4 et 6 seront testées. La déformation induite par un dépôt uniforme (option 1) pourra ainsi être comparée à la déformation obtenue avec un dépôt variable fonction de τ_{cr} (option 4) et à la déformation calculée avec un dépôt variable proportionnel au débit solide (option 6). La pertinence de ces options sur les géométries réelles complexes et sur les sections lissées pourra ainsi être discutée.

5.4 Modèle simplifié et bilan sédimentaire

En complément de l'application du modèle 1D RubarBE, une approche de détermination simplifiée de l'évolution du lit à partir des bilans sédimentaires, nommée Mobise, est également abordée. Pour ce calcul, le volume solide déposé ou érodé sur un tronçon, défini par deux sections (une section

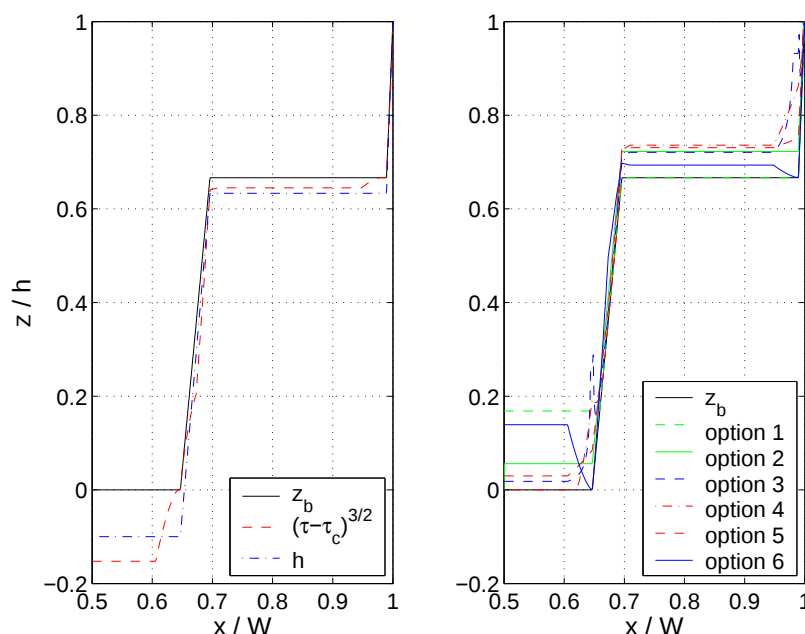


FIGURE 5.16 – Schéma illustrant les options d'érosion et de dépôt du modèle RubarBE pour un chenal composé théorique et symétrique.

amont et une section aval), au cours de la durée t est calculé selon la différence de capacité solide entre le tronçon amont et le tronçon lui-même. Le calcul de capacité solide est effectué à partir d'une série de régimes uniformes dans le tronçon en utilisant la formule de Meyer-Peter et Müller (1948) et se limite donc au charriage pour une granulométrie homogène. A la suite du calcul de bilans, la géométrie est actualisée en ajoutant une couche horizontale d'épaisseur adéquate à chaque section (Morin *et al.*, 2008). Cette approche est dérivée pour des chenaux simples et ne considère qu'un chenal principal ; les ouvrages sont complètement transparents, c'est à dire qu'ils ne bloquent ni accélèrent le transport sédimentaire.

5.5 Temps de calcul et estimation de la performance du modèle d'évolution

Temps de calcul

Le temps de calcul d'un modèle numérique dépend bien évidemment du matériel informatique utilisé et du code de calcul mis en oeuvre. Un modèle hydraulique unidimensionnel utilisant un schéma implicite, tel que le logiciel Mage (Faure, 2009), permet de réaliser des simulations à l'échelle de la crue sur une centaine de kilomètres en moins d'une minute. Le logiciel RubarBE, qui résout explicitement, nécessite plusieurs heures pour effectuer ce même calcul. La prise en compte du transport de sédiments et l'évolution du fond allonge encore le temps de calcul de façon non négligeable. Les modèles réalisés dans le cadre de ce travail de thèse ont pour la plupart été réalisés via les deux

fermes de calcul dont disposent le Cemagref. La ferme de calcul de Clermont-Ferrand dispose ainsi de 54 noeuds de calcul et celle de Lyon de cinq noeuds. Cette différence a toutefois peu d'influence dans nos calculs car le modèle RubarBE n'est pas parallélisé (le calcul est donc effectué sur un seul noeud, comme s'il s'agissait d'un PC affecté uniquement à un calcul). Les différences observées dans les temps de calcul des simulations peuvent entre autres s'expliquer par les versions des compilateurs fortran, le nombre de processeurs, etc...(les temps de calcul sur la ferme de Lyon étant plus longs, cf. Annexe E). La majorité des calculs a été réalisé sur la ferme de Clermont-Ferrand. Toutefois, quelques pannes techniques nous ont amené à utiliser la ferme de calcul de Lyon. Quelques-unes des spécificités techniques des deux fermes de calcul sont détaillées dans le tableau 5.2. Une description plus détaillée de la ferme de Clermont-Ferrand est disponible dans la notice d'utilisation de Bonnet (2009).

	LYON	CLERMONT
Nombre de processeurs	2 de 5990 BogoMips chacun ¹	8 de 5000 BogoMips chacun
Système d'exploitation	Linux.master0.alineos.net 2.4 (2006)	Linux.master0.alineos.net 2.6 (2008)
Version du compilateur fortran	v 3.2.3	v 3.4.6
Version de Linux	SL release 4.7 (Beryllium)	SL release 3.0.5 (SL)

TABLE 5.2 – Caractéristiques des fermes de calcul de Lyon et de Clermont-Ferrand utilisées pour la modélisation.

Estimation de la performance du modèle

La validité de chacune des simplifications et modélisations réalisées sera estimée en utilisant le Brier Skill Score BSS calculé avec la formule :

$$BSS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (z_b(xi, t)_{mes} - z_b(xi, t)_{cal})^2}{\sum_{i=1}^n (z_b(xi, t)_{mes} - z_b(xi, 0)_{mes})^2} \quad (5.9)$$

avec $z_b(xi, t)_{mes}$ la cote moyenne de fond de la section mesurée au temps t , et $z_b(xi, t)_{cal}$ la cote moyenne de fond de la section calculée au temps t . Afin de pouvoir comparer les volumes V obtenus avec les différents modèles, le BSS est adapté; ce paramètre sera noté $BSSbis$ et s'écrit de la façon suivante :

$$BSSbis = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_{mes} - V_{cal})^2}{\sum_{i=1}^n V_{mes}^2} \quad (5.10)$$

1. Le BogoMips est une unité de mesure non scientifique de la vitesse du processeur calculée par le noyau Linux lorsqu'il boote, pour calibrer une boucle d'activité interne (source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/BogoMips>).

Van Rijn *et al.* (2003) fournissent une table liant la valeur du BSS à une caractérisation qualitative. Un code couleur a été défini pour ces différentes caractérisations qualitatives, afin de faciliter la lecture (Tab. 5.3). Cette table pourra également être utilisée pour caractériser les résultats du *BSSbis*.

Qualité	Brier Skill Score
Excellent	$1.0 \geq BSS > 0.8$
Bon	$0.8 \geq BSS > 0.6$
Convenable	$0.6 \geq BSS > 0.3$
Médiocre	$0.3 \geq BSS > 0.0$
Mauvais	$BSS \leq 0.0$

TABLE 5.3 – Lien entre la valeur du *BSS* et une caractérisation de la performance du modèle (d'après Van Rijn *et al.* (2003)) et définition du code couleur adopté par la suite.

5.6 Synthèse du chapitre

5.6.1 Approches de simplification de la géométrie retenues

Les approches de lissage de la géométrie présentées dans ce chapitre ont été testées, dans un premier temps, sur des cas simples (chenal unique) avant d'être appliquées sur les tronçons représentatifs de la Loire moyenne (c'est à dire un tronçon avec une île centrale et un tronçon avec une île latérale). L'application sur ces quelques tronçons révèle que l'approche de simplification en $2 \times n$ points avec largeur fixe donne des résultats concluants. Ainsi pour le profil localisé au PK 559,1 dont la géométrie simplifiée avec l'approche à $2 \times n$ points et une largeur fixe est illustrée dans ce chapitre sur la figure 5.1, permet d'obtenir un critère de précision δz de 6 cm. L'approche opposée, c'est à dire en $2 \times n$ points avec largeur variable, ne semble pas applicable aux spécificités géométriques de la Loire moyenne et la simplification n'aboutit pas dans la grande majorité des cas (en particulier pour le tronçon situé au PK 559,1).

Les approches en huit points, qui à première vue semblent les plus pertinentes pour conserver les caractéristiques du lit mineur et du lit majeur sur les sections lissées, sont difficiles à appliquer lorsque les sections présentent des îles ou des géométries complexes. Sur les différents tests effectués, peu de calculs aboutissent sans une correction manuelle du fruit de berges ou de la hauteur d'eau par l'utilisateur du programme de lissage. Le lissage du tronçon localisé au PK 559,1, par exemple, n'aboutit pas avec l'approche en huit points et les fruits fixes ; l'approche opposée permet d'obtenir un critère de précision δz de 35 cm. Il faut toutefois souligner que sur les autres tronçons testés sur le secteur de Belleville la valeur moyenne du δz était supérieure à 2 m. Au vu de ces tests préliminaires et du nombre de tronçons à lisser sur la Loire moyenne, seule la méthode en $2 \times n$ points avec largeur

fixe a été retenue et utilisée dans la suite du manuscrit. Cette méthode sera nommée méthode à $2 \times n$ points par la suite.

Le programme de lissage de la géométrie semble limité mais il faut rappeler que sa dérivation initiale a été réalisée pour des géométries simples qui ne s'apparentent donc en rien à la géométrie de la Loire moyenne. Le programme mériterait donc de plus amples tests sur des sections réelles présentant des géométries complexes et quelques améliorations sur les méthodologies de lissage et le critère d'optimisation du lissage.

5.6.2 Approches de simplification des chroniques de débits retenues

Les approches de simplification des chroniques de débit ont pour objectifs de permettre le calcul des évolutions morphologiques tout en réduisant le temps de calcul des modélisations numériques hydro-sédimentaires. La simplification des chroniques de débits existantes est nécessaire à la dérivation de chroniques de débits simplifiées.

L'approche par débits classés ne permet pas de réduire la durée de la chronique. Toutefois, un des avantages de ce type d'approche est de permettre une succession de calculs pour des régimes quasi permanents. La courbe de débits classée ascendante ou descendante aura, à priori, tendance à surestimer les quantités déposées ou érodées car les phases de montée et de descente de crue ne sont pas prises en compte. La courbe de forme pyramidale peut résoudre cet inconvénient des approches « classiques » de débits classés.

La simplification de chroniques existantes avec l'approche descriptive à seuils semble plus adaptée pour reproduire l'hydrologie réelle même si la succession de pics de crue avec des périodes intermédiaires réduites peut amener des instabilités dans le modèle. La valeur définie pour le débit seuil d'étiage Q_e et l'influence des périodes à faibles débits sur les évolutions du lit nécessitent d'être validées avant de dériver des chroniques de débits prédictives.

La dérivation d'hydrogrammes synthétiques pour différentes périodes de retour, nécessaires à la réalisation de scénarios prédictifs est abordée avec une approche permettant de conserver la forme et une approche plus robuste hydrologiquement permettant de conserver les volumes de crues (HSMF). Ces approches permettent ainsi de dériver des scénarios afin de tester la sensibilité des évolutions du lit à l'ordre des crues.

Toutes les approches de simplification des chroniques de débit présentées dans ce chapitre seront donc testées sur le site de référence de Belleville.

6

Application aux sites de références

Ce chapitre vise à tester les approches de simplifications de la géométrie et des chroniques de débit présentées dans le chapitre 5 et à valider les approches les plus pertinentes. Il s'agit également de confronter les résultats obtenus avec le modèle RubarBE appliqué sur la géométrie réelle avec les chroniques de débit réelles aux mesures de terrain et de déterminer les limites d'application du modèle. Trois sites, présentant différents styles fluviaux, des degrés d'anthropisation variés et un suivi topographique dans le temps sont ainsi utilisés pour tester les approches de simplification. Le site de Belleville, dont le jeu de données disponibles est le plus conséquent dans le temps et l'espace, permet de tester toutes les approches et de sélectionner les méthodologies de simplification les plus probantes. La validation des approches est ensuite réalisée sur les sites de Bréhémont et de Guilly.

6.1 Site anthropisé : Belleville

Le site de Belleville a été sélectionné car il présente un bon suivi dans le temps et un degré d'anthropisation important, caractéristique de la Loire moyenne. Avant de tester les approches de simplification de la géométrie et des chroniques de débits, les options de calcul susceptibles d'avoir une incidence sur les résultats doivent être testées. Les choix effectués pour la formule de transport solide et de la distance de chargement sont ainsi détaillés. Le modèle d'évolution du lit est ensuite réalisé sur la géométrie réelle avec la chronique de débit réelle. Il s'agit ainsi de pouvoir confronter les prédictions numériques aux mesures de terrain et de pouvoir déterminer les limites d'application du modèle. Ce calcul sert ainsi de référence et permet la comparaison entre le modèle « réel » et les simplifications apportées par la suite. Les approches de simplification de la géométrie et des chroniques de débits présentées dans le chapitre précédent sont ensuite testées pour ne sélectionner que les plus pertinentes. Les tests sont ainsi réalisés sur la géométrie réelle avec la chronique de débit réelle et les chroniques de débit simplifiées, sur la géométrie simplifiée avec la chronique de débit réelle puis les chroniques de débit simplifiées. Le nombre de tests réalisé sur le site de Belleville étant conséquent, les différentes simulations effectuées dans les paragraphes suivants et leurs objectifs sont détaillés dans le tableau 6.1 afin de permettre au lecteur de visualiser la démarche entreprise.

Paragraphe	Objectif de la simulation et description
6.1.1	Calage du modèle (coefficients de Strickler et lois de seuils)
6.1.2.1	Choix de la formule de transport
6.1.2.2	Choix de la distance de chargement
6.1.2.3	Définition des options de calcul de RubarBE (τ , dépôt,...) : tests en géométrie réelle avec la chronique de débit réelle
6.1.3.3	Validation de la géométrie simplifiée : tests en géométrie simplifiée avec la chronique de débit réelle
6.1.4.1	Validation de la chronique simplifiée avec l'approche des débits classés : tests en géométrie simplifiée et chronique de débit simplifiée (Q classés)
6.1.4.2	Validation de la chronique simplifiée avec l'approche descriptive à seuils : tests en géométrie réelle et géométrie simplifiée avec la chronique simplifiée
6.1.4.3	Test de dérivation d'hydrogrammes synthétiques : géométrie simplifiée et chronique simplifiée
6.1.4.4	Test d'accélération de l'hydrogramme : géométrie réelle et chronique de débit réelle

TABLE 6.1 – Belleville : objectifs et description des simulations réalisées.

6.1.1 Calage du modèle hydraulique

Avant de procéder aux tests de simplification de la géométrie et des chroniques de débit, un premier modèle hydraulique a été réalisé afin de caler au mieux le coefficient de Strickler sur chacun des tronçons et de vérifier les lois de seuils. En effet, les conditions d'écoulement dans les ouvrages (seuil, pont) peuvent être très éloignées des hypothèses de Saint Venant (en particulier passage du régime graduellement varié au régime fortement varié) du fait des fortes pentes locales, de resserrlements prononcés impliquant des vitesses verticales ou transversales non négligeables. Dans ce cas, on abandonne localement le calcul « classique » pour relier directement le débit aux autres variables hydrauliques par le biais d'une loi d'ouvrage. Deux seuils sont visibles sur les lignes d'eau d'étiage pour le secteur de Belleville : le seuil de la centrale (PK 536,3) et une rupture de pente au niveau des ouvrages de navigation situées à Ousson-sur-Loire (PK 548) (cf. Fig. 4.8). Les lois de seuil introduites dans le modèle sont détaillées en Annexe D.

Le modèle est défini par 184 profils en travers levés en 1995 (profils « Crougneau ») et 1996 (profils EDF), interpolés tous les 200 m au maximum et prolongés avec les données LidaR de 2003 de façon à inclure le lit majeur. Cet espacement entre profils en travers a été réduit au droit des ouvrages à 50 m. Le modèle s'étend de la station de Myennes (échelle limnimétrique EDF) au deuxième pont de Gien où se situe la station hydrométrique. Le calage consiste à définir des valeurs du coefficient de Strickler pertinentes par tronçon afin d'obtenir un écart jugé acceptable entre les hauteurs d'eau calculées et les mesures. La quantification de la notion « d'acceptable » dépend de l'incertitude connue ou supposée sur les données mesurées. Dans notre cas, nous admettrons qu'un écart relatif $\Delta H/H$ entre la hauteur d'eau calculé par le modèle H_{mod} et la hauteur d'eau mesurée

H_{mes} est acceptable s'il n'excède pas 10% (avec $\Delta H/H = (H_{mod} - H_{mes})/H_{mes}$).

Le calage du coefficient de Strickler pour le lit mineur a été effectué sur les données d'étiage de juillet 1994 ($Q = 107 \text{ m}^3/\text{s}$), et de débit moyen ($Q = 930 \text{ m}^3/\text{s}$ en mai 1996). Le coefficient de rugosité du lit majeur a ensuite été calé sur les crues de décembre 1996 ($Q_{max} = 1690 \text{ m}^3/\text{s}$) et décembre 2003 ($Q_{max} = 3160 \text{ m}^3/\text{s}$). Le calage a été réalisé en gardant la notion de tronçon homogène : pour le lit mineur, K varie entre $28 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ pour les tronçons présentant des îles végétalisées et $32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ pour les tronçons peu végétalisés. Le coefficient de rugosité du lit majeur est posé égal à $15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ pour l'ensemble du modèle. Seuls les profils présentant des ouvrages d'art ont été traités spécifiquement en appliquant un coefficient de $55 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. La figure 6.1 présente les erreurs relatives ($\Delta H/H$) obtenues pour les deux crues simulées après calage des coefficients de Strickler. La hauteur d'eau moyenne H est définie comme la différence entre la cote de la surface libre mesurée et la cote moyenne du fond. Le calcul de $\Delta H/H$ permet de s'affranchir de la localisation du site d'étude et donc, par la suite, la comparaison des résultats entre les trois sites de références.

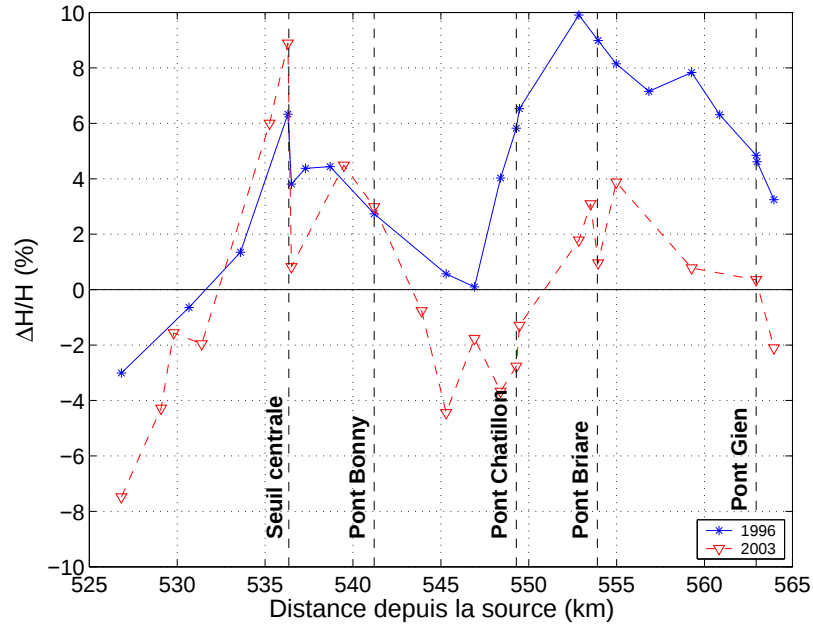


FIGURE 6.1 – Belleville : erreurs du modèle sur les crues de décembre 1996 et décembre 2003.

Les écarts sont importants au droit des ouvrages en particulier au niveau du seuil de la centrale, à Chatillon sur Loire où la présence de chevrettes affectent l'écoulement, ainsi qu'à l'amont du pont canal de Briare où la présence d'une île à l'amont du pont influence le calcul de hauteur d'eau. On constate qu'à l'amont de Briare l'erreur est plus forte pour la crue de 1996 ($\max(\Delta H/H) = 10\%$ soit $\max(\Delta H) = 51 \text{ cm}$ pour un débit à Gien de $1690 \text{ m}^3/\text{s}$) alors que pour la crue de 2003, l'erreur la plus forte est observée au seuil de la centrale ($\max(\Delta H/H) = 8,9\%$ soit $\max(\Delta H) = 59 \text{ cm}$ avec $Q_{max} = 3160 \text{ m}^3/\text{s}$).

6.1.2 Modèle d'évolution en géométrie réelle

Le modèle RubarBE avec transport de sédiments a ensuite été appliqué avec la géométrie réelle de 1996 et la chronique de débits réelle de la crue 1996. Ce premier modèle « complet » permet de définir les options pertinentes pour le calcul du transport solide avant de lancer un second calcul sur une chronique de débit plus longue (1996-1998) permettant une comparaison avec les données topographiques mesurées en 1998. Les résultats de la modélisation « réelle » servent également de base pour appréhender les apports et les limites des approches simplifiées.

6.1.2.1 Test sur la crue de 1996 : choix de la formule de transport

Ce premier calcul avec transport de sédiments sur la crue de décembre 1996 permet de sélectionner la formule de transport solide la plus adaptée à la Loire moyenne. Les formules de Meyer-Peter et Müller (1948), Bagnold (1966) et Engelund et Hansen (1967) sont testées. Les simulations sont réalisées avec l'option de dépôt uniforme (dépôt 1, cf. paragraphe 5.3.5), la distribution des contraintes selon la MPC, le calcul de la contrainte critique corrigée avec la formule d'Ikeda (1982) et une distance de chargement de 10 km (une distance de chargement de 500 m a également été testée avec les différentes formules de transport ; ce paramètre est discuté dans le paragraphe 6.1.2.2).

Les évolutions du lit Δz obtenues avec les trois formules de transport en considérant les cotes moyennes du fond et les cotes minimums du fond sont présentées sur la figure 6.2. Les évolutions observées sur la cote minimum du fond sont bien plus fortes que celles calculées sur la cote moyenne du fond et les tendances sont opposées. Ainsi, l'analyse du Δz , défini avec les cotes moyennes du fond, révèle des dépôts légers et des incisions localisées ($\max(\Delta z) = -0,28$ m à l'amont du pont de Bonny-sur-Loire, PK 541). En revanche, Δz calculé sur les cotes minimums, induit du dépôt le long du secteur d'étude ($\max(\Delta z) = 3$ m à l'amont du pont de Bonny-sur-Loire, PK 541). Quelle que soit la cote de fond considérée pour la détermination de Δz , les évolutions du lit sont plus fortes avec les formules d'Engelund et Hansen (1967) et Bagnold (1966) qui estiment un transport de sédiments total (charriage + suspension). Il faut également noter que les formules d'Engelund et Hansen (1967) et Bagnold (1966) n'incluent pas de seuil de mise en mouvement des sédiments (Camenen *et al.*, 2005).

Les variations de tendances observées sur les Δz (incision sur la figure 6.2a et dépôt sur la figure 6.2b) semblent traduire un comblement du chenal principal et une érosion des chenaux secondaires (qui ont une cote de fond supérieure au chenal principal). Les déformations de trois profils en travers sont donc considérées afin de vérifier cette hypothèse. Deux profils en travers présentant les incisions et les dépôts maximaux suivant que le calcul de Δz soit basé sur les cotes de fond moyennes ou minimums, et localisés à l'amont du pont de Bonny-sur-Loire et à l'amont du pont de Briare (PK

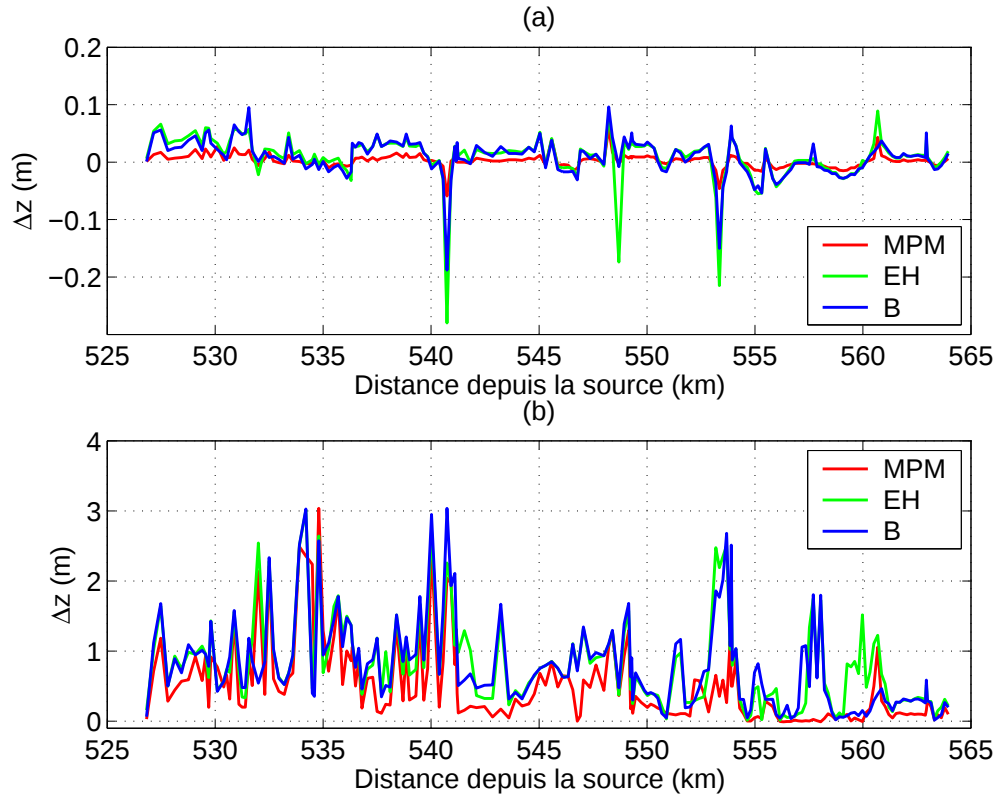


FIGURE 6.2 – Belleville : évolutions du lit Δz obtenus sur (a) les cotes moyennes du fond et (b) les cotes minimales du fond avec les formules de transport solide de Meyer-Peter et Müller (1948) (MPM), Bagnold (1966) (B) et Engelund et Hansen (1967) (EH) pour la crue de décembre 1996.

540,740 et PK 553,350) respectivement, sont ainsi présentés. Ces deux sections étant caractérisées par des îles, deux sections supplémentaires à chenal unique sont analysées (PK 529,8 et PK 538,1) (Fig 6.3). Le modèle induit du dépôt sur tous les profils en travers. Sur la section caractérisée par une île centrale (PK 540,74), le dépôt est conséquent dans le chenal principal et le chenal secondaire alors que l'île centrale (l'île Bon) s'érode considérablement ; en particulier avec la formule de Bagnold (1966) où le profil à la fin de la crue atteint un fond plat. Le chenal principal de la section située au PK 553,35 se comble tandis que le chenal secondaire s'incise avec les formules de Bagnold (1966) et d'Engelund et Hansen (1967). Pour les sections à chenal unique, le modèle produit du dépôt quelle que soit la formule de transport solide appliquée. Pour ces sections, les mesures de 1998 sont disponibles ; les évolutions visibles sur les mesures sont bien moindres que les résultats obtenus avec les différentes formules de transport sur la crue de décembre 1996.

Au vu des résultats obtenus sur une crue, présentant une période de retour de deux ans, la formule de Meyer-Peter et Müller (1948), prenant en compte uniquement le charriage semble la plus appropriée pour notre étude même si des mesures ont montré que la suspension n'était pas négligeable sur la Loire moyenne (Gautier *et al.*, 2008). En effet, la formule de Meyer-Peter et Müller (1948) induit des évolutions qui se rapprochent plus des tendances observées. Cette formule, basée sur la

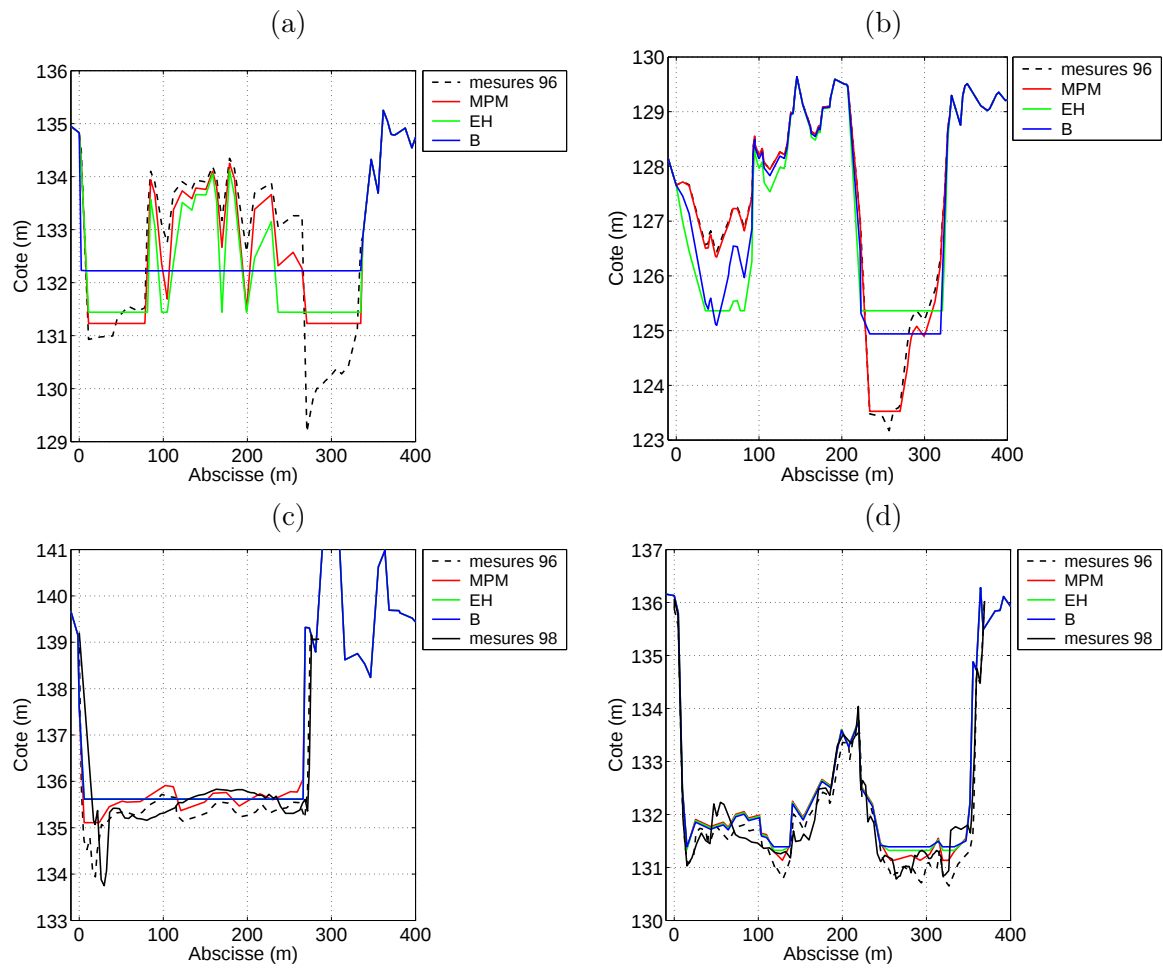


FIGURE 6.3 – Belleville : comparaison des évolutions des profils en travers durant la crue de décembre 1996 avec les formules de transport solide de Meyer-Peter et Müller (1948) (MPM), Bagnold (1966) (B) et Engelund et Hansen (1967) (EH) pour (a) une section avec une île centrale (PK 540,74), (b) une section avec une île latérale (PK 553,350), (c) une section à chenal unique (PK529,8) et (d) une section à chenal unique (PK538,1).

notion de contrainte efficace, sera donc utilisée dans les calculs d'évolution suivants. Il faut également souligner que les autres options de calculs telles que les options de déformation de la section et la distance de chargement sont identiques pour les simulations effectuées mais ne semblent pas les plus pertinentes. Des tests sur les différentes options de déformation et la distance de chargement sont donc nécessaires pour obtenir le meilleur compromis entre la physique des phénomènes et les simplifications associées à une modélisation 1D.

6.1.2.2 Test sur la crue de 1996 : choix de la distance de chargement

Comme indiqué dans le paragraphe 5.3.1, en terme de modélisation morphologique, la distance de chargement doit être au minimum égale à la taille d'une maille et peut prendre des valeurs beaucoup plus élevées (El Kadi Abderrezzak, 2006). En effet, la prise en compte d'une distance de chargement

longue permet de lisser les évolutions du fond en intégrant un phénomène de diffusion. Dans les premiers tests réalisés, la distance de chargement D_{char} a été prise légèrement supérieure au pas d'espace (soit $D_{char} = 500$ m). Les résultats des évolutions de la cote moyenne du fond Δz durant la crue de décembre 1996 présentent de fortes instabilités avec des incisions atteignant $-0,47$ m à l'amont du pont de Briare (PK 553,35) et des dépôts de $0,34$ m à l'aval de ce pont (PK 553,9) (Fig. 6.4). La valeur de D_{char} a donc été augmentée à 2 km afin d'évaluer la sensibilité du modèle à ce paramètre. Les instabilités observées sur Δz sont atténuées mais restent fortes pour des évolutions à l'échelle d'une crue. Un autre test avec $D_{char} = 10$ km est donc réalisé. Cette distance peut paraître exagérée mais il faut signaler que la distance de chargement doit être suffisamment grande afin de pouvoir raisonner à l'échelle des tronçons homogènes. Les résultats obtenus avec cette distance de 10 km permettent de reproduire correctement les évolutions constatées sur le lit de la Loire moyenne (cf. paragraphe 6.1.2.1). Il faut noter que dans le cas d'un transport par charriage uniquement, comme supposé ici par l'utilisation d'une formule de capacité solide de Meyer-Peter et Müller (1948), la distance de chargement devrait être négligeable. La distance de chargement de 10 km est donc conservée et sera aussi validée sur le modèle basé sur la géométrie réelle avec la chronique de débit réelle entre 1996-1998.

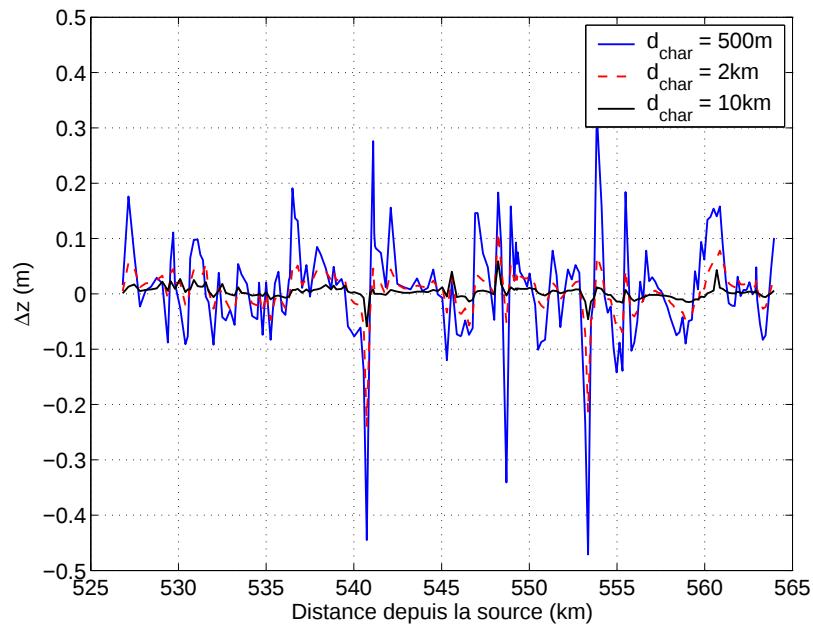


FIGURE 6.4 – Influence de la distance de chargement sur les évolutions du fond Δz calculées sur la cote moyenne du fond.

6.1.2.3 Modèle d'évolution « réel » (1996-1998)

Les évolutions du lit entre le 07 Novembre 1996 et le 08 Novembre 1998 ont ensuite été modélisées afin d'être comparées aux évolutions mesurées. Sur cette période, deux crues supérieures au débit

biennal ($Q_2 = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$) se sont produites, entrecoupées par des périodes d'étiage (Fig. 6.5).

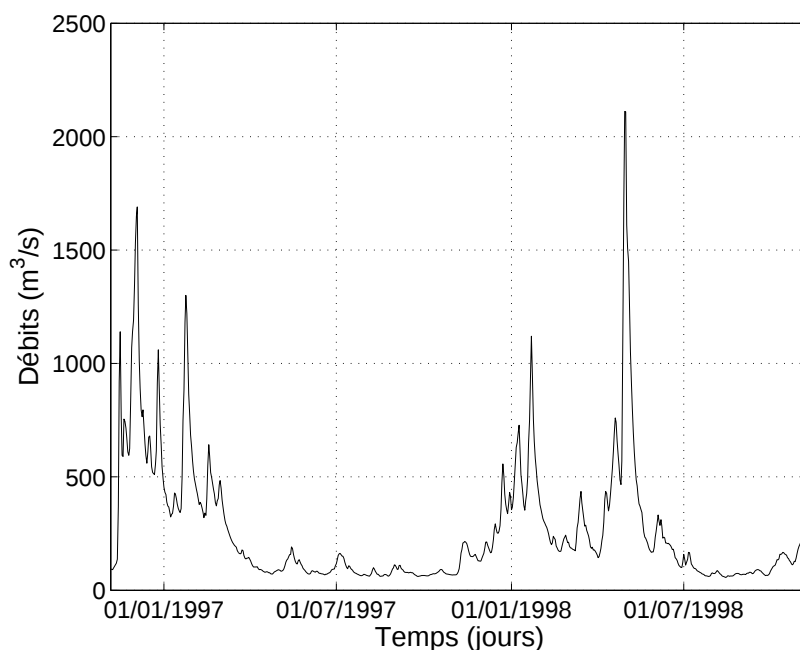


FIGURE 6.5 – Hydrogramme de 1996 à 1998 à la station hydrométrique de Gien.

La simulation de cette chronique de débit réelle avec la géométrie réelle nécessite 15 jours de calcul sur la ferme de calcul de Clermont-Ferrand (cf. paragraphe 5.5 et Annexe E). Il faut toutefois rappeler que le calcul n'est pas parallélisé. Cinq simulations ont été réalisées afin de pouvoir analyser l'influence des différents modes de déformation, le calcul de la contrainte τ et le calcul du seuil de mise en mouvement τ_{cr} . Le récapitulatif des différentes simulations effectuées est fourni dans le tableau 6.2.

Identifiant simulation	bel-reel-v0	bel-reel-v1	bel-reel-v2	bel-reel-v3	bel-reel-v4
Contrainte (τ)	MPC	MPC	MPC	MPC	uniforme
Seuil de mise en mouvement (τ_{cr})	Shields	Ikeda	Ikeda	Ikeda	Shields
Option de dépôt	4	4	1	6	6
Option de capacité solide	3	3	3	3	1

TABLE 6.2 – Belleville : récapitulatif des différentes simulations effectuées avec la géométrie réelle et la chronique de débit réelle.

Le dépôt 1 correspond au dépôt par couches horizontales, le dépôt 4, au dépôt variable, fonction de $(\tau_{c,j} - \varsigma\tau_j)^m$, et le dépôt 6 au dépôt variable fonction de τ_j^m (cf. paragraphe 5.3 pour une description détaillée des différentes options). Pour chacune des simulations, la formule de transport solide de Meyer-Peter et Müller (1948) (MPM) et la distance de chargement de 10 km sont appliquées. La formule de MPM étant utilisée, le paramètre m est égal à $3/2$. Le diamètre médian d_{50} et le paramètre d'étendue granulométrique σ sont définis selon la loi exponentielle décrite au paragraphe 3.3.2.

Les conditions initiales solides ont été déterminées à l'aide d'un modèle préliminaire correspondant au débit initial établi en régime permanent.

Comparaison des profils en long

Les profils en long obtenus en fin de calcul avec ces différentes options sont comparés au profil en long mesuré en 1998 sur la figure 6.6 en considérant les cotes minimum de fond et les cotes moyennes du fond. Seul le secteur où les données sont disponibles en 1996 et 1998 est représenté. Les profils en long basés sur les points bas diffèrent considérablement selon les simulations (Fig. 6.6a). Les calculs bel-reel-v0 et bel-reel-v1 utilisant le mode de dépôt inversément proportionnel à la contrainte (dépôt 4) induisent une forte incision du lit, tandis que l'option de dépôt par couches horizontales (dépôt 1) (simulation bel-reel-v2) tend à induire du dépôt. Les approches bel-reel-v3 et bel-reel-v4, basées sur le mode de dépôt proportionnel à la contrainte (dépôt 6), fournissent, à priori, les résultats les plus proches du profil en long mesuré. L'incision observée en amont du seuil de la centrale, en particulier sur la section localisée au PK 532, n'est pas reproduite par les différentes simulations. A l'aval du seuil, les mesures de points bas révèlent un secteur stable avec une légère tendance au dépôt, tendance correctement reproduite par les calculs bel-reel-v3 et bel-reel-v4.

Les profils en long réalisés à partir des cotes de fond moyennes ne permettent pas d'évaluer les différentes options de calcul qui semblent fournir des résultats similaires (Fig. 6.6b). Les évolutions observées sur les cotes moyennes ne correspondent pas à celles quantifiées à partir des points bas des sections. En particulier, la cote moyenne de fond définie à partir des mesures disponible en 1998 et localisée au PK 542,1 semble erronée ; en effet les dépôts mesurés sur cette section ne sont pas les plus importants du secteur d'étude comme l'analyse des surfaces érodées ou déposées nous le montrent dans les paragraphes suivants. La comparaison entre les mesures et les résultats des simulations est donc complexe ; cette difficulté est liée aux incertitudes associées aux mesures ainsi qu'au type de résultats analysé. Ainsi il est nécessaire de considérer les évolutions des profils en travers et des surfaces érodées ou déposées avant de pouvoir émettre des conclusions sur les différentes simulations effectuées.

Evolutions des profils en travers

L'analyse des profils en long est donc complétée en examinant les déformations obtenues avec les différentes simulations de deux sections en travers « types ». La figure 6.7 illustre ainsi les sections obtenues en fin de calcul pour le profil P20 (PK 532) qui présente une forte incision du chenal principal et le profil P07 (PK 536,8) qui présente le plus fort dépôt observé sur la période 1996-1998. Trois tendances d'évolution de la section sont observées, liées aux options de dépôt et de calcul de la contrainte choisies :

- L'option de dépôt inversément proportionnel à la contrainte (dépôt 4) appliquée avec une dis-

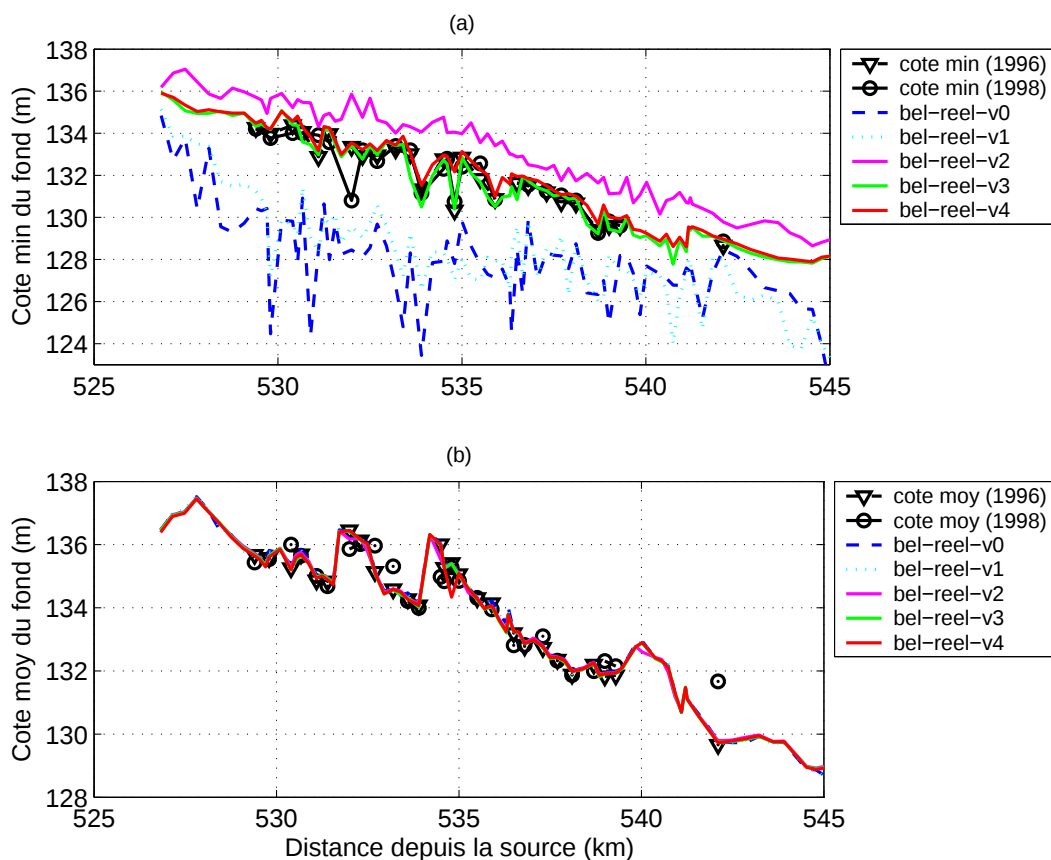


FIGURE 6.6 – Comparaison du profil en long mesuré en 1996 et 1998 et du profil en long calculé à partir (a) des cotes de fond minimum et (b) des cotes de fond moyennes.

tribution de la contrainte selon la *MPC* (simulations bel-reel-v0 et bel-reel-v1) produit une incision très localisée du chenal principal et du dépôt sur l'île centrale pour le profil P20. Ces deux simulations (bel-reel-v0 et bel-reel-v1) sont les seules à reproduire l'incision observée même si celle-ci est surestimée localement. Cette surestimation de l'érosion est liée à la valeur de la contrainte τ qui est faible proche des berges et donc induisant peu d'incision. Par contre ces calculs induisent un dépôt trop important sur le lit moyen. Les évolutions obtenues avec le seuil de mise en mouvement calculé avec Shields (bel-reel-v0) sont légèrement plus fortes que celles calculées avec Ikeda (bel-reel-v1).

- Le dépôt par couches horizontales (dépôt 1) (calcul bel-reel-v2) correspond à un dépôt uniforme par couche horizontale, induisant un comblement du chenal principal et de l'érosion sur les îles. Ce mode de dépôt ne convient donc pas à la géométrie complexe de la Loire moyenne.
- Le dépôt proportionnel à la contrainte (dépôt 6) (simulations bel-reel-v3 et bel-reel-v4) induit des résultats cohérents au niveau de la forme de la déformation et des quantités déposées pour le profil P07 ainsi que pour les dépôts pour le profil P20, quelle que soit l'option de calcul de la distribution de la contrainte (avec la *MPC* pour la simulation bel-reel-v3 et uniforme pour

bel-reel-v4). En revanche l'incision observée sur le profil P20 n'est pas reproduite.

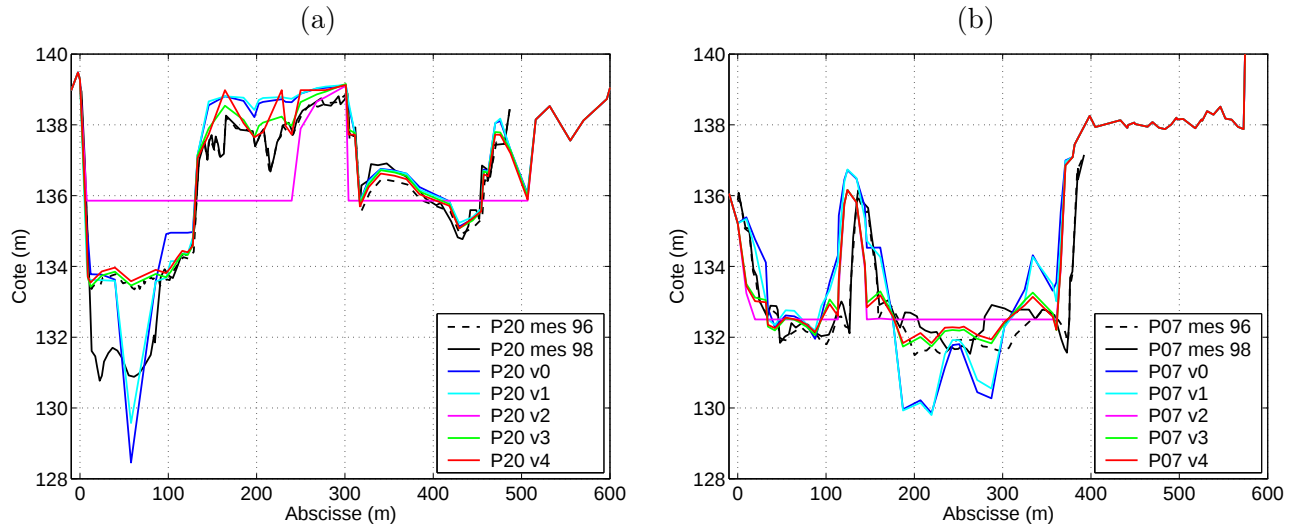


FIGURE 6.7 – Belleville : Evolutions types des sections en travers pour (a) le profil P20 (PK 532) qui présente une forte incision et (b) le profil P07 (PK 536,8) qui présente le dépôt le plus fort sur la période 1996-1998.

Comparaison des surfaces déposées ou érodées

Les surfaces érodées ou déposées ΔS entre 1996 et 1998 sur les profils en travers obtenues avec les différentes simulations, sont comparées aux surfaces mesurées sur la figure 6.8 ; les limites des sept tronçons homogènes définis sur Belleville, et sur lesquels les mesures sont disponibles en 1996 et 1998, sont également symbolisées. L'évolution des surfaces mesurées entre 1996 et 1998 montre une tendance générale au dépôt hormis quelques sections présentant une légère incision (par exemple aux PK 529,4 où $\Delta S = -13 \text{ m}^2$ et PK 535,9 où $\Delta S = -24 \text{ m}^2$) voire une forte incision localisée comme au PK 532 où $\Delta S = -118 \text{ m}^2$. Cette forte érosion du profil P20 (PK 532) est correctement reproduite par les simulations bel-reel-v0, bel-reel-v1 et bel-reel-v3 mais avec des valeurs plus faibles que celles mesurées sur le terrain. Le calcul bel-reel-v2 permet d'obtenir la valeur de ΔS la plus proche des mesures sur cette section particulière ($\Delta S = -136 \text{ m}^2$). Toutefois les évolutions des autres sections confirment l'inadéquation de la simulation bel-reel-v2 à reproduire les évolutions morphologiques sur le secteur de Belleville. Les calculs bel-reel-v0 et bel-reel-v1 reproduisent correctement les tendances de dépôts observées dans des proportions plus faibles mais une certaine homogénéité des évolutions est perceptible sur les tronçons. Les calculs bel-reel-v3 et bel-reel-v4 qui, au vu des profils en long et des déformations des profils en travers semblaient les plus probantes, produisent une forte incision à l'amont du seuil (tronçon T4) et des dépôts très faibles sur les tronçons 2 et 3. L'analyse des surfaces érodées ou déposées par tronçon montre que les simulations bel-reel-v0 et bel-reel-v1 sont les plus cohérentes en terme de quantité érodée ou déposée même si elles ne permettent pas d'obtenir la

déformation de la section désirée.

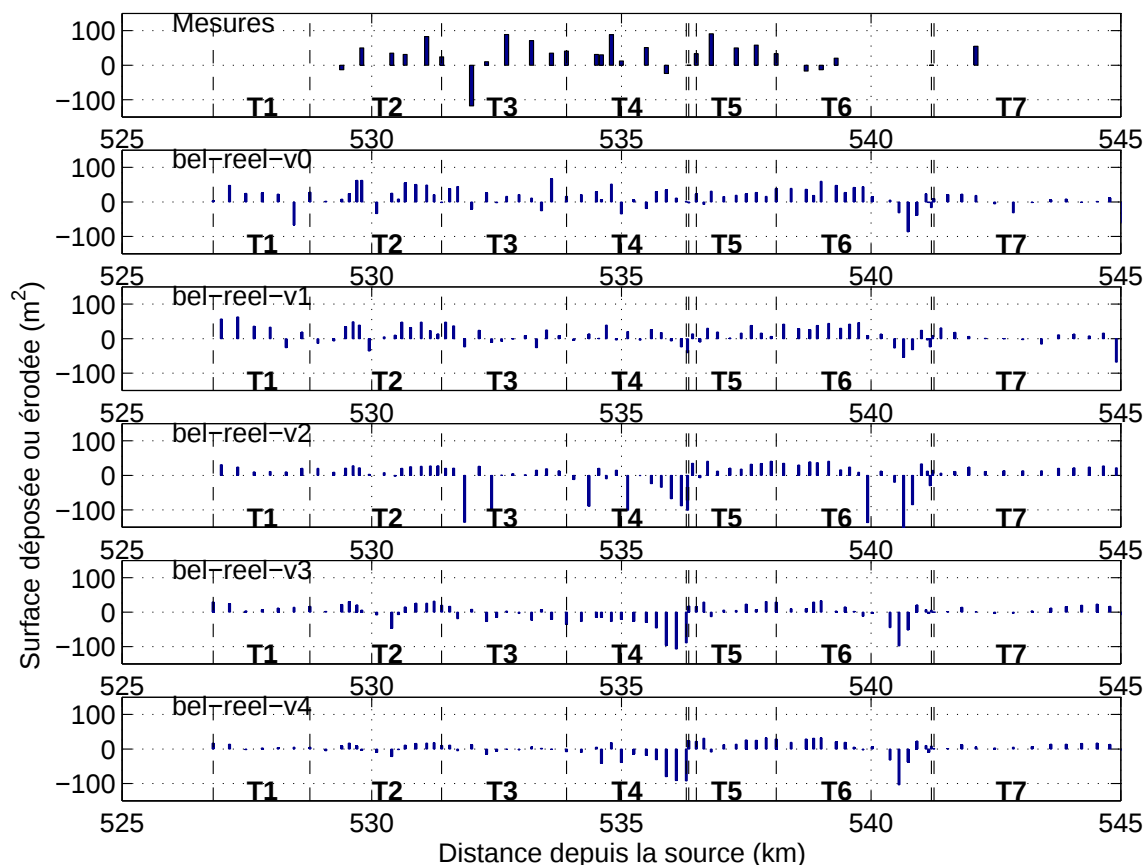


FIGURE 6.8 – Belleville : Surfaces érodées ou déposées sur les profils entre 1996 et 1998 pour les différentes simulations effectuées.

Comparaison des volumes

Enfin, afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec le modèle « réel » aux modèles simplifiés ultérieurs, les volumes déposés ou érodés sur chaque tronçon ont été calculés et comparés aux volumes mesurés (Fig. 6.9). Comme observé précédemment sur les surfaces, la tendance au dépôt observée sur les tronçons est correctement reproduite par les simulations *bel-reel-v0* et *bel-reel-v1*. Les volumes calculés avec la simulation *bel-reel-v0* sont plus proches des mesures. Par exemple pour le tronçon 3, le dépôt calculé est de $41\,400\text{ m}^3$ avec le modèle *bel-reel-v0*, et seulement de $10\,300\text{ m}^3$ avec la *bel-reel-v1*, le volume mesuré étant de $46\,900\text{ m}^3$. Les résultats les moins bons sont obtenus à l'amont du seuil (tronçon 4). Il est difficile de commenter les résultats des deux tronçons aval (tronçons 6 et 7) car peu de mesures sont disponibles pour ces tronçons. Les trois autres simulations (*bel-reel-v2*, *bel-reel-v3* et *bel-reel-v4*) présentent des dépôts plus faibles mais surtout une incision sur les tronçons 3 et 4. Pour le tronçon 4, l'erreur est particulièrement grande du fait des fortes incisions

induïtes à l'amont du seuil.

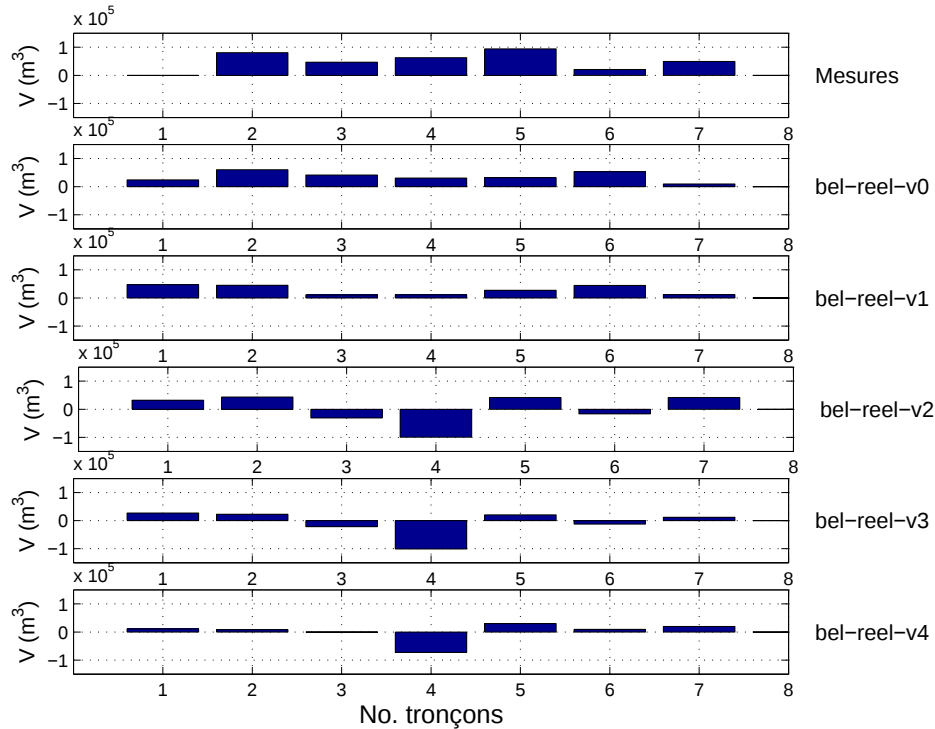


FIGURE 6.9 – Belleville : comparaison des volumes érodés ou déposés mesurés et calculés sur les tronçons entre 1996 et 1998 pour les différentes simulations effectuées.

Synthèse des simulations avec la géométrie réelle et la chronique réelle

Les variations obtenues dans les résultats des différentes simulations soulignent la sensibilité des modèles aux options de calcul. Le calcul de la contrainte critique avec Shields ou Ikeda influence peu les résultats : les résultats des simulations bel-reel-v0 et bel-reel-v1 sont comparables. La distribution de la contrainte avec la *MPC* ou de façon uniforme semble également avoir peu d'influence : les calculs bel-reel-v3 et bel-reel-v4 donnent des effets similaires. Ceci pourrait s'expliquer du fait que les contraintes sont bien supérieures à la contrainte critique de mise en mouvement (Camenen *et al.*, 2011). En revanche les options de dépôts ont un impact considérable sur les résultats. Ainsi, l'analyse des profils en long révèle que les simulations bel-reel-v0 et bel-reel-v1 induisent de fortes incisions sur tout le secteur tandis que bel-reel-v2 produit un dépôt excessif et les calculs bel-reel-v3 et bel-reel-v4 apparaissent être les plus pertinents. Les conclusions de cette analyse préliminaire sur les profils en long sont ensuite nuancées avec la prise en compte des déformations des sections en travers. En effet, l'incision observée sur la section P20 (PK 532) est correctement reproduite seulement par les simulations bel-reel-v0 et bel-reel-v1 bien que cette érosion calculée soit surestimée et accompagnée de dépôts sur l'île. La simulation bel-reel-v2 dépose sur toute la section et les deux autres calculs (bel-reel-v3 et bel-reel-v4) induisent un faible dépôt sur le lit moyen mais très peu

d'évolution. Enfin l'analyse des surfaces érodées ou déposées sur les sections et des volumes déposés ou érodés par tronçon confirme les observations faites sur les profils en travers. Ainsi, le choix des options est conditionnée par l'objectif du modèle. L'option de dépôt uniforme (dépôt 1) n'est pas concluante en terme de déformations. Le mode de dépôt proportionnel à la contrainte (dépôt 6) semble le plus approprié en terme de déformation, hormis pour l'érosion, mais pas en terme de quantité déposée/érodée. Il est à noter que l'option de répartition des dépôts similaire à la répartition des érosions (dépôt 6) est l'option la plus souvent proposée dans les modèles unidimensionnel de géomorphologie fluviale. L'objectif de l'approche par tronçon et des simplifications de géométrie et des chroniques de débits étant de pouvoir raisonner à une échelle globale, il semble que les simulations bel-reel-v0 et bel-reel-v1 permettant de reproduire correctement les volumes déposés ou érodés soient les plus adaptées.

Il faut également souligner que des tests complémentaires sur la sensibilité de ces simulations aux conditions solides à la limite et surtout à la granularité des sédiments du lit actif nécessiteraient d'être réalisés. En particulier, une évolution réaliste de la forme des sections en travers ne peut être obtenue qu'en utilisant un modèle bidimensionnel et en prenant en compte la variation transversale de la granularité, ce qui n'était pas envisageable compte tenu des données granulométriques disponibles.

6.1.3 Modèle d'évolution en géométrie simplifiée

La simplification de la géométrie des tronçons nécessite des données de lignes d'eau calculées pour différents débits en régime permanent. Un hydrogramme en palier est donc utilisé en entrée du modèle. Les débits modélisés sont compris entre $20 \text{ m}^3/\text{s}$ et $4000 \text{ m}^3/\text{s}$. Bien qu'un débit d'étiage aussi faible soit impossible sur la Loire moyenne (le barrage de Villerest assurant un débit minimum de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ à Gien), les données de débit faible conditionnant la cote de fond des profils lissés, il est primordial d'inclure ces valeurs pour la dérivation de la géométrie simplifiée. Il est rappelé que la géométrie réelle des ouvrages est conservées (cf. paragraphe 5.1). Les limites des tronçons ont donc été décalées sur des profils interpolés 50 m à l'amont et 50 m à l'aval des ouvrages.

6.1.3.1 Simplification de la géométrie

La méthodologie décrite au paragraphe 5.1.1 permet d'obtenir une simplification de la géométrie en $2 \times n$ points. Les 14 tronçons homogènes définis sur Belleville sont ainsi caractérisés par 33 sections en travers simplifiées (28 sections pour les tronçons et les 5 sections des structures artificielles). Chaque section est définie par 42 points ($n = 21$ lignes d'eau). Le profil en long du modèle simplifié est présenté sur la figure 6.10. La cote de fond du profil en long simplifié, conditionnée par les données de débit faible, est supérieure à l'altitude réelle des points bas des sections mais la pente moyenne de la géométrie lissée est cohérente avec le profil réel.

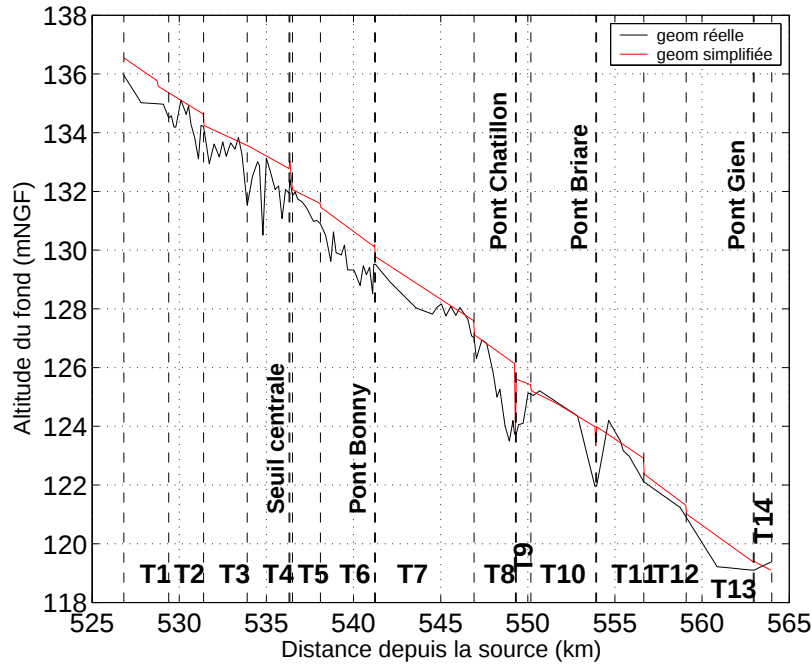


FIGURE 6.10 – Belleville : comparaison des profils en long du modèle en géométrie réelle et du modèle en géométrie simplifiée.

Le critère de précision δz (cf. equation 5.2, paragraphe 5.1.3), obtenu pour cette simplification, varie entre 5 cm et 36 cm avec une moyenne de 15 cm. Les tronçons 9 et 11 situés respectivement à l’aval du pont de Chatillon et à l’aval du pont vieux à Gien présentent les plus mauvaises valeurs de δz ($\delta z = 36$ cm pour le tronçon 9 et $\delta z = 23$ cm pour le tronçon 11). Le lissage des tronçons caractérisés par la présence d’îles (tronçon 1 et 2 entre autres) semble cohérent avec la géométrie réelle ; en effet les largeurs de la géométrie simplifiée de ces tronçons sont supérieures aux tronçons présentant un chenal unique. De plus, pour ces tronçons caractérisés par la présence d’une île, δz est compris entre 10 et 12 cm.

6.1.3.2 Tests hydrauliques sur les crues de 1996 et 2003

La validation de la méthode de lissage de la géométrie consiste dans un premier temps à comparer les hauteurs d’eau moyennes obtenues avec la géométrie réelle à celles calculées avec la géométrie simplifiée pour les crues de décembre 1996 et décembre 2003. Les erreurs relatives ($\Delta H/H$) ont été calculées entre les hauteurs d’eau moyennes obtenues en géométrie simplifiée et les hauteurs d’eau moyennes mesurées, entre les hauteurs d’eau moyennes calculées en géométrie simplifiée et en géométrie réelle. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 6.11a pour la crue de 1996 et sur la figure 6.11b pour la crue de 2003. Le modèle simplifié donne des résultats similaires au modèle « réel ». Les erreurs comparées aux les mesures sont moins importantes pour l’approche simplifiée sur la crue de 1996 et légèrement supérieures sur la crue de 2003 que les erreurs obtenues avec le

modèle en géométrie réelle. Pour la crue de 1996 ($Q_{max} = 1690 \text{ m}^3/\text{s}$), le $\Delta H/H$ calculé entre la géométrie simplifiée et les mesures atteint un maximum de $-8,3\%$ au PK 533,6 ($\Delta H = -42,5 \text{ cm}$). Entre le modèle simplifiée et le modèle « réel » $\Delta H/H = -10\%$ au PK 559,3 ($\Delta H = -55,0 \text{ cm}$). Au droit du seuil de la centrale, les erreurs des deux modèles sont fortes, en particulier pour la crue de 2003 ($Q_{max} = 3160 \text{ m}^3/\text{s}$). Les résultats hydrauliques obtenus avec la géométrie simplifiée sont satisfaisants et équivalents au modèle en géométrie réelle ; la géométrie simplifiée est donc validée pour effectuer les tests avec transport de sédiments.

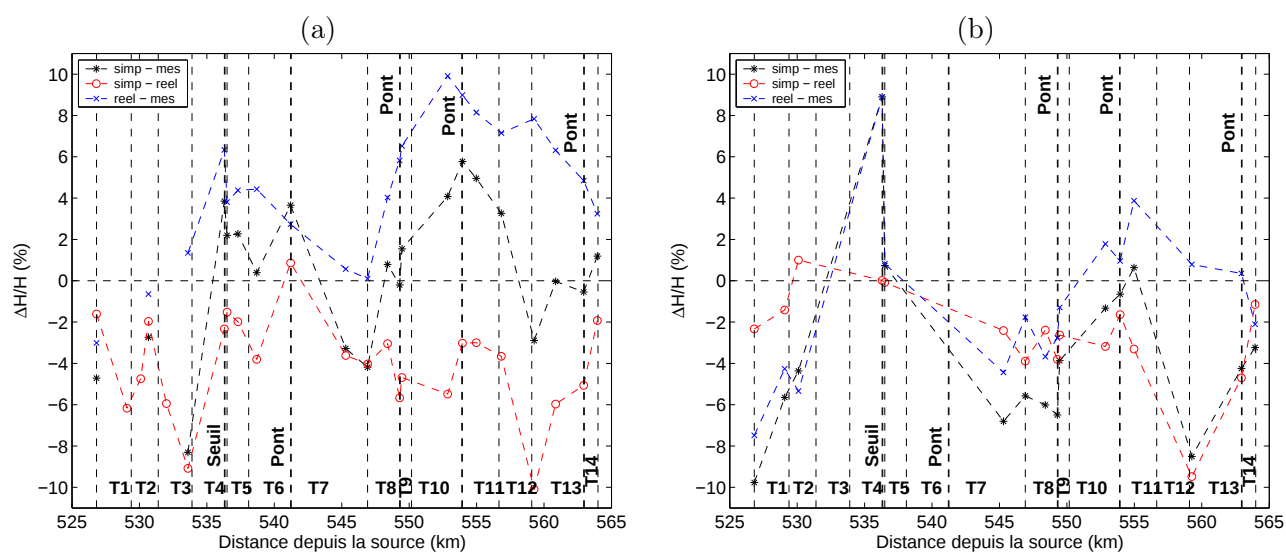


FIGURE 6.11 – Belleville : erreurs relatives du modèle avec la géométrie simplifiée sur (a) la crue de décembre 1996 et (b) la crue de décembre 2003 . La notation « simp » fait référence au modèle en géométrie simplifiée, « reel » au modèle en géométrie réelle et « mes » aux mesures.

6.1.3.3 Modèle d'évolution en géométrie simplifiée (1996 - 1998)

Ce premier calcul est réalisé avec la géométrie simplifiée et la chronique de débit réelle mesurée entre 1996 et 1998. Il s'agit d'abord de tester la validité des conditions solides aux limites sur la géométrie simplifiée. Dans un premier temps, les mêmes conditions que le modèle en géométrie réelle sont donc appliquées. Le gain de temps de calcul par rapport au modèle « réel » est considérable puisque la simulation prend entre 23 h et 32 h selon les options de calculs au lieu des 15 jours nécessaires pour un calcul en géométrie réelle sur la ferme de calcul de Clermont-Ferrand (cf. Annexe E). Les options de calcul des modèles v0 et v1 appliquées sur la géométrie réelle dans le paragraphe 6.1.2.3 ont été reprises car elles donnaient les résultats les plus probants en terme de volume déposé ou érodé ; les options de la simulation v4 ont également été utilisées afin d'effectuer un test avec un calcul de contrainte uniforme. Les différentes simulations sont récapitulées dans le tableau 6.3. La numérotation des différentes simulations a, à ce stade, été définie afin de rendre la lecture la plus compréhensible possible ; les modèles sont donc définis par les trois premières lettres du site étudié,

les caractéristiques 'r' pour réelles ou 's' pour simplifiées de la géométrie 'g' et des chroniques de débit 'q'; enfin le caractère 'v' traduit les options de calculs appliquées.

Identifiant simulation	bel-gsqr-v0	bel-gsqr-v1	bel-gsqr-v4	bel-gsqr-v4T
Contrainte (τ)	MPC	MPC	uniforme	uniforme
Seuil de mise en mouvement (τ_{cr})	Shields	Ikeda	Shields	Shields
Option de dépôt	4	4	6	6
Option de capacité solide	3	3	1	1

TABLE 6.3 – Belleville : récapitulatif des différentes simulations effectuées sur la géométrie simplifiée avec la chronique de débit réelle. La lettre 'T' (simulation bel-gsqr-v4T) indique l'introduction d'un tronçon tampon détaillé ci-après.

Comparaison des profils en long

Comme précédemment avec le modèle « réel » l'analyse des profils en long est effectuée. La comparaison du profil en long obtenu en géométrie simplifiée avec le profil en long mesuré en 1998 n'étant pas pertinente, une géométrie lissée a été réalisée à partir des mesures de profils en travers levés en 1998. Les données de 1998 ne couvrant pas tout le linéaire du site de référence, les données de 1996 ont été conservées pour calculer les lignes d'eau nécessaires au programme de lissage, ce qui introduit quelques erreurs. Les profils en long obtenus avec les différentes simulations et le profil mesuré lissé sont présentés sur la figure 6.12. Peu d'évolutions sont visibles sur les profils lissés entre 1996 et 1998; la tendance générale est un comblement avec un dépôt de 12 cm en moyenne sur l'ensemble des tronçons, sauf sur le tronçon 2 (PK 531,37) où une incision de 15 cm est observée. Les tendances d'évolution obtenues avec les différentes simulations sont similaires aux observations faites sur le modèle « réel ». Ainsi, les calculs bel-gsqr-v0 et bel-gsqr-v1, qui en terme de volume, donnent les résultats les plus satisfaisants, induisent une incision très accentuée des cotes du fond. Cette érosion est particulièrement forte à l'amont des ouvrages où l'incision calculée peut atteindre 5 m. La simulation bel-gsqr-v4 induit de l'incision sur le profil en long de quelques tronçons mais les évolutions sont moindres en comparaison des résultats du calcul bel-gsqr-v1. L'obtention d'un volume cohérent avec les mesures avec les simulations bel-gsqr-v0 et bel-gsqr-v1 alors que l'incision du profil en long est conséquente implique vraisemblablement des dépôts sur les berges compensant cette dégradation excessive du lit.

Evolution des profils en travers

Deux profils en travers simplifiés, localisés à l'amont du tronçon 3 (PK 531,4) et à l'aval du tronçon 4 (PK 536,300), sont donc comparés pour vérifier cette hypothèse de dégradation excessive du lit compensée par des dépôts sur les berges (Fig. 6.13). Le profil lissé obtenu à partir de la géométrie de 1998 a une cote de fond plus basse et une largeur de chenal plus grande que le profil lissé de 1996.

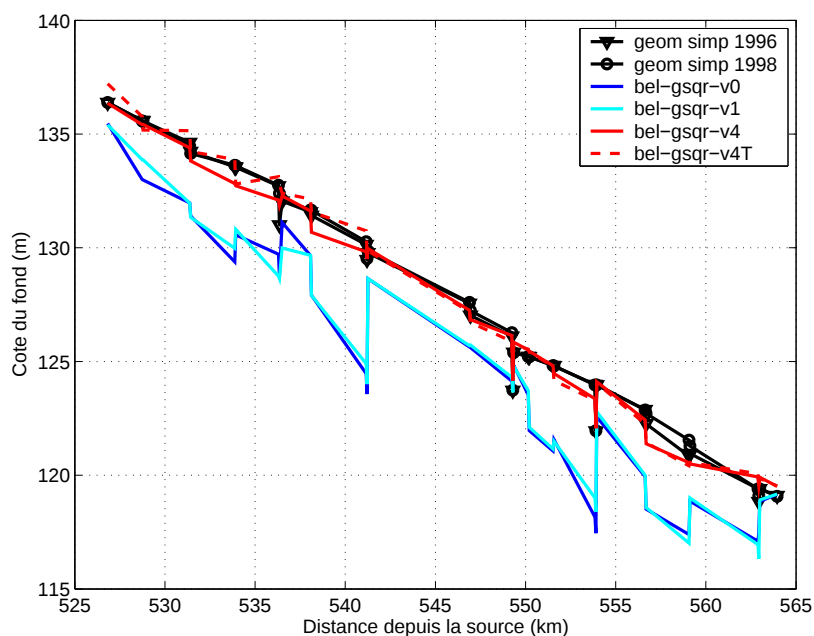


FIGURE 6.12 – Belleville : comparaison des profils en long simplifiés réalisés avec les mesures (geom simp 1996 et geom simp 1998) et des profils en long obtenus en fin de calcul avec les différentes simulations.

L'option de dépôt inversement proportionnel à la contrainte (dépôt 4) (bel-gsqr-v0 et bel-gsqr-v1) reproduit cette incision localisée du talweg et induit un dépôt sur les berges. L'option de dépôt proportionnel à la contrainte (dépôt 6) (bel-gsqr-v4) donne une légère incision du lit mineur mais sans modifications des berges.

Comparaison des volumes

Les volumes érodés ou déposés, obtenus avec la géométrie simplifiée, sont comparés aux volumes mesurés pour les différents tronçons sur la figure 6.14. Toutes les simulations réalisées avec la géométrie simplifiée donnent de l'incision sur le premier et le dernier tronçon alors que le modèle « réel » (simulations en géométrie réelle avec les chroniques de débits réelles nommés « bel-reel ») donnait du dépôt sur ces tronçons. Ces résultats illustrent la sensibilité du modèle en géométrie simplifiée aux conditions solides aux limites. Les dépôts observés sur les autres tronçons sont correctement reproduits par la simulation bel-gsqr-v1 bien que dans des proportions plus importantes que les dépôts mesurés. Le calcul bel-gsqr-v0 donne des tendances similaires à la simulation bel-gsqr-v1 avec des volumes supérieurs. Seule l'évolution du tronçon 5 diffère entre ces deux calculs. Les options de calcul de la simulation bel-gsqr-v4 donnent une incision pour pratiquement tous les tronçons. Les incisions obtenues avec le modèle « réel » équivalent (bel-reel-v4) sont fortement accentuées sur la géométrie simplifiée ; pour le tronçon 4, le volume était de $-72\,600\text{ m}^3$ avec la simulation bel-reel-v4 et atteint $-205\,400\text{ m}^3$ avec la géométrie simplifiée (bel-gsqr-v4).

Un test supplémentaire a été effectué afin de s'affranchir des effets liés à l'approximation des

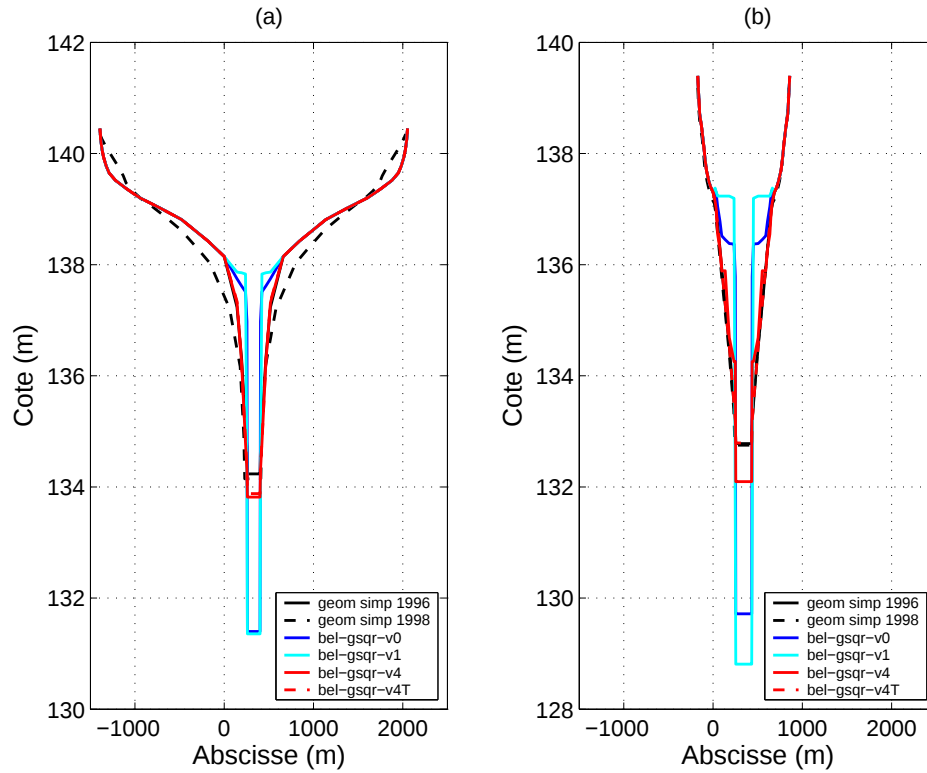


FIGURE 6.13 – Belleville : évolutions types des profils en travers simplifiés pour (a) l'amont du tronçon 3 (PK 531,4) et (b) l'aval du tronçon 4 (PK 536,3) avec les différentes simulations.

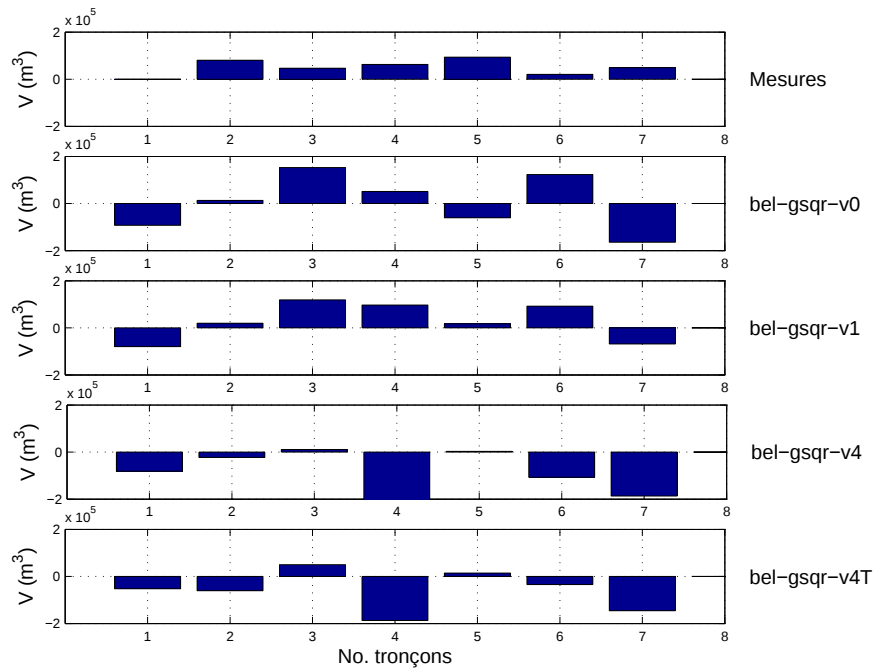


FIGURE 6.14 – Belleville : comparaison des volumes mesurés au volumes déposés ou érodés obtenus avec le modèle en géométrie simplifiée et la chronique de débit réelle entre 1996 et 1998.

conditions solides aux limites. Un tronçon « tampon » similaire au tronçon 1, est introduit dans le modèle. Les options de calcul des simulations bel-gsqr-v1 et bel-gsqr-v4 ont été reprises. La simulation bel-gsqr-v1 n'aboutit pas et les résultats de la simulation bel-gsqr-v4T sont présentés sur la figure 6.14. Le tronçon tampon permet de diminuer l'incision du premier tronçon et améliore les résultats sur les tronçons 2 à 7 mais de façon très modérée. La prise en compte de ce tronçon tampon n'est donc pas poursuivie dans les tests suivants.

Synthèse des simulations en géométrie simplifiée avec la chronique réelle

Les tests hydrauliques effectués sur la géométrie simplifiée permettent d'obtenir des hauteurs d'eau cohérentes avec les mesures et comparables aux résultats du modèle en géométrie réelle. Les calculs réalisés avec transport de sédiments avec les options de calcul v0, v1 et v4 donnent des tendances d'évolutions similaires aux résultats obtenus sur la géométrie réelle. La géométrie simplifiée apparaît être plus sensible aux conditions aux limites solides ; en effet, les résultats obtenus sur le bilan des volumes par tronçon montrent une incision du premier et du dernier tronçon. L'introduction d'un tronçon « tampon » afin d'atténuer les effets de la condition aux limites ne permet pas d'amélioration sensible des résultats. L'application de la méthodologie de simplification de la géométrie sur l'ensemble de la Loire moyenne permettra de vérifier si on peut s'affranchir de cette limite. Les évolutions des profils en long et des sections obtenus confirment que l'approche de simplification de la géométrie par tronçons permet uniquement de raisonner de façon globale en terme de volume déposé ou érodé. Les options de calcul de la simulation bel-gsqr-v1 semblent les plus adaptées pour reproduire les tendances de dépôts et d'incision sur la géométrie simplifiée.

6.1.4 Modèle d'évolution avec les chroniques de débit simplifiées

Les différentes approches de simplification des chroniques de débits décrites dans le paragraphe 5.2 sont testées sur la période 1996-1998, afin de pouvoir comparer les résultats aux modèles précédents, d'estimer le gain de temps de calcul et enfin de valider la méthodologie la plus probante.

6.1.4.1 Tests avec les débits classés (1996-1998)

La courbe des débits classés, réalisée avec la chronique des débits journaliers moyens (QJM) disponible à la station hydrométrique de Gien entre 1996 et 1998, est appliquée sur la géométrie simplifiée (cf. paragraphe 5.2.1). Les simulations bel-gsqsas-v1 et bel-gsqsas-v4¹ sont réalisées avec la courbe des débits classés ascendante, puis, pour la simulation bel-gsqsde-v1², la courbe descendante ; la simulation bel-gsqspe-v1³ permet de tester l'approche en pyramide (cf. paragraphe 5.2.1).

1. la notation 'as' signifie ascendant

2. la notation 'des' signifie descendant

3. la notation 'py' signifie pyramide

Les différentes simulations effectuées sont récapitulées dans le tableau 6.4. Les options de calcul de la simulation v1 donnant les résultats les plus satisfaisants en terme de volume sur la simulation en géométrie simplifiée (bel-gsqsr-v1), seules ces options de calcul sont testées pour les approches de simplification des chroniques de débits classés descendants et en pyramide.

Identifiant simulation	bel-gsqsas-v1	bel-gsqsas-v4	bel-gsqsdv-v1	bel-gsqspy-v1
Contrainte (τ)	MPC	uniforme	MPC	MPC
Seuil de mise en mouvement (τ_{cr})	Ikeda	Shields	Ikeda	Ikeda
Option de dépôt	4	6	4	4
Option de capacité solide	3	1	3	3

TABLE 6.4 – Belleville : récapitulatif des différentes simulations effectuées sur la géométrie simplifiée avec l’approche des débits classés ascendants, descendants et en « pyramide ».

Les approches de simplification par débits classés permettent un gain de temps de calcul, le modèle tourne en 12 h en moyenne sur la ferme de calcul de Clermont-Ferrand au lieu des 15 jours nécessaires au modèle en géométrie réelle avec la chronique de débit réelle (cf. Annexe E). Les volumes déposés ou érodés sur les tronçons pour les différentes simulations sont présentés sur la figure 6.15. Toutes les simulations effectuées avec les approches de débits classés produisent de fortes incisions sur la majorité des tronçons. Les résultats obtenus avec les débits classés descendants présentent des alternances de dépôt et d’incision encore plus marquées que l’approche de débits classés ascendants. La prise en compte d’une phase de montée puis de descente de crue (approche en pyramide) n’améliore pas les résultats, en particulier pour les tronçons 1, 2 et 7 où l’incision atteint des valeurs considérables. Au vu des résultats, il semble que la représentation des phases de montées et de descentes de crues avec un calcul en non permanent soit nécessaire pour modéliser convenablement les évolutions du fond.

6.1.4.2 Tests de l’approche de simplification descriptive avec seuils (1996-1998)

La chronique de débit 1996 - 1998, simplifiée avec l’approche descriptive à seuils, est tout d’abord appliquée sur la géométrie réelle avant d’être testée sur la géométrie simplifiée. Il s’agit ainsi de distinguer les erreurs associées aux simplifications géométriques des erreurs liées aux simplifications de la chronique de débits.

Tests sur la géométrie réelle

Les différentes simulations effectuées sur la géométrie réelle sont récapitulées dans le tableau 6.5. Le temps de calcul est de 9 jours en moyenne (suivant les options de calcul) au lieu des 15 jours nécessaires au calcul « réel » sur la ferme de calcul de Clermont-Ferrand (cf. Annexe E). Les volumes déposés ou érodés sur les différents tronçons sont présentés sur la figure 6.16. Les options de calcul

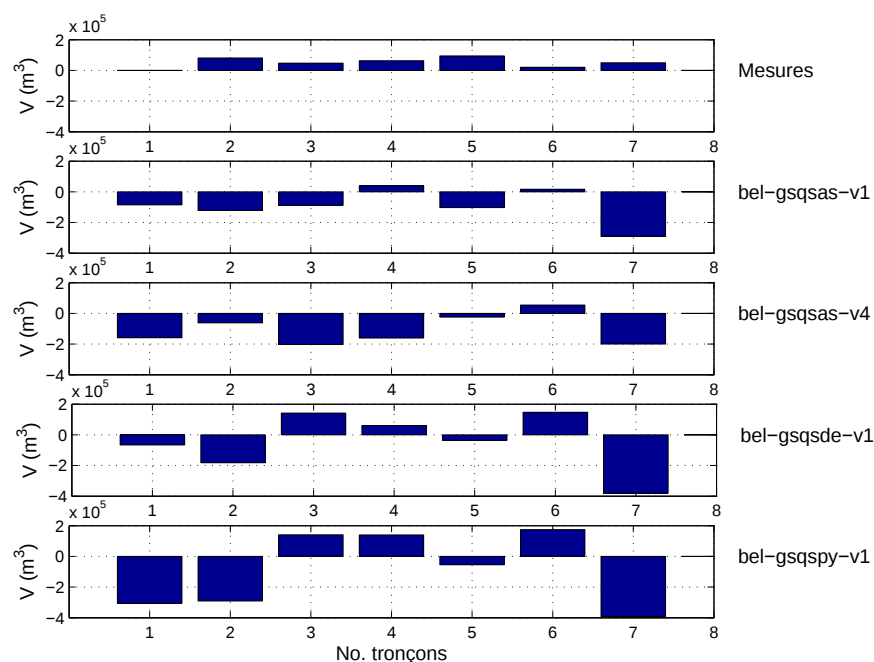


FIGURE 6.15 – Belleville : volumes déposés ou érodés obtenus avec le modèle en géométrie simplifiée et l’approche de débits classés pour la période 1996-1998.

de la simulation bel-grqsd-v0⁴, qui, dans le modèle « réel » (bel-reel-v0), permettait de reproduire les dépôts et les volumes les plus proches des volumes mesurés sur les différents tronçons, produit de l’incision sur les tronçons 3 et 4 avec la chronique de débit simplifiée avec l’approche descriptive à seuils. La simulation bel-grqsd-v1 détériore les résultats en donnant de l’érosion sur la majorité des tronçons (seul le tronçon 5 présente un léger dépôt).

Identifiant	bel-grqsd-v0	bel-grqsd-v1	bel-grqsd-v0a	bel-grqsd-v0b	bel-grqsd-v0c
Contrainte τ	MPC	MPC	MPC	MPC	MPC
τ_{cr}	Shields	Ikeda	Shields	Shields	Shields
Dépôt	4	4	4	4	4
Capacité solide	3	3	3	3	3
Variation test chronique de débits	-	-	chronique réelle sans $Q < 200 \text{ m}^3/\text{s}$	pics réels et Q constant pour $200 < Q < 350 \text{ m}^3/\text{s}$	pics simplifiés et $Q_e = 150 \text{ m}^3/\text{s}$

TABLE 6.5 – Belleville : récapitulatif des différentes simulations effectuées avec la géométrie réelle et la chronique de débit simplifiée avec l’approche descriptive à seuils.

La chronique de débit simplifiée avec l’approche descriptive à seuils détériore les résultats en géométrie réelle. Au vu de la méthodologie de dérivation de la chronique simplifiée (cf. paragraphe 5.2.2), cette dégradation peut-être due à la description des pics de crue en cinq points, à la définition

4. la notation 'd' signifie approche descriptive avec seuils

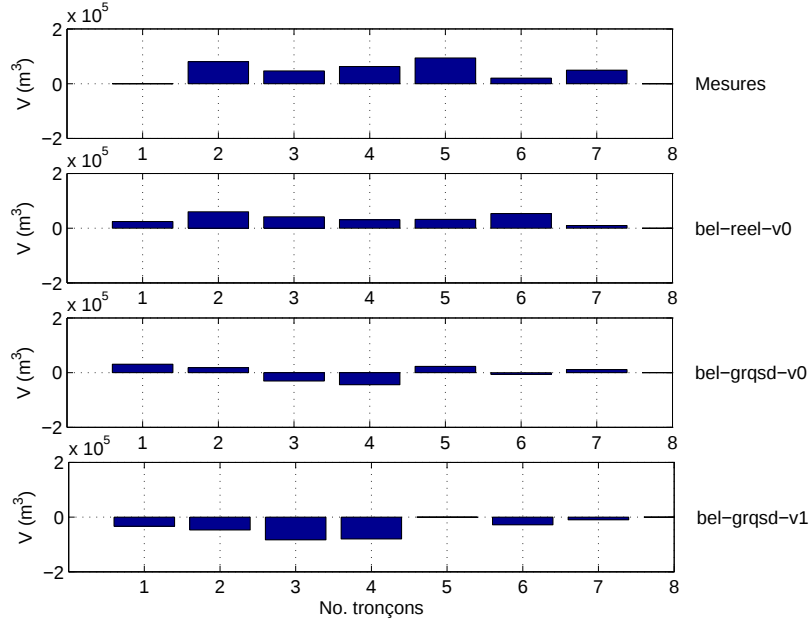


FIGURE 6.16 – Belleville : volumes déposés ou érodés obtenus avec le modèle en géométrie réelle et la chronique de débit 1996 - 1998 simplifiée avec l’approche descriptive à seuils.

du débit d’étiage Q_e , ou à la durée des périodes intermédiaires aux pics de crue. Afin d’identifier la source des erreurs et d’améliorer l’approche de simplification des débits descriptive avec seuils, trois tests supplémentaires sont effectués avec les options de calcul de la simulation bel-grqsd-v0 :

- test a : la chronique réelle est conservée en supprimant uniquement les valeurs de débits inférieures à Q_e ($Q_e = 200 \text{ m}^3/\text{s}$) ;
- test b : la description des pics de crue de la chronique réelle est conservée et un débit constant est adoptée pour les périodes où $200 < Q < 350 \text{ m}^3/\text{s}$;
- test c : les pics de crue sont simplifiés en cinq points et la valeur de Q_e est diminuée (soit $Q_e = 150 \text{ m}^3/\text{s}$).

Les résultats obtenus avec ces trois tests sont présentés sur la figure 6.17. Le calcul bel-grqsd-v0a est comparable au calcul bel-grqsd-v0 ; le lissage des pics de crues en cinq points n’est donc pas la source des erreurs. Le test effectué sur la durée des périodes intermédiaires aux pics de crue (simulation bel-grqsd-v0b) ne permet pas d’améliorations notables. Les volumes érodés sont moins importants que les volumes obtenus avec le calcul bel-grqsd-v0, mais pour le tronçon 2 les résultats sont dégradés (le calcul bel-grqsd-v0b donne de l’incision sur ce tronçon). Enfin la simulation bel-grqsd-v0c, réalisée afin de tester la valeur du débit seuil d’étiage Q_e , n’améliore pas les résultats.

L’application de la simplification des chroniques de débits avec l’approche descriptive à seuils sur la géométrie réelle ne permet pas de reproduire les évolutions obtenus avec la chronique de débit réelle. Les différents tests effectués laissent à supposer que les périodes à débits faibles (c’est à dire pour des $Q < 150 \text{ m}^3/\text{s}$) jouent un rôle important dans les évolutions du fond de la Loire

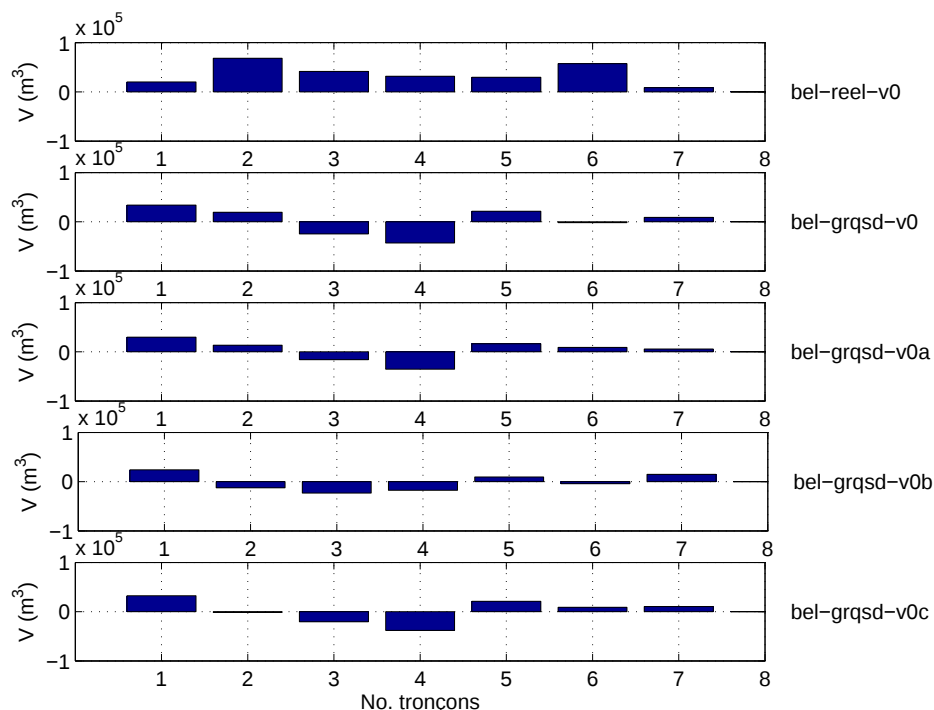


FIGURE 6.17 – Belleville : volumes déposés ou érodés obtenus avec le modèle en géométrie réelle et les tests supplémentaires de simplification de la chronique de débit 1996 - 1998.

moyenne. Cette approche de simplification des chroniques de débits n'est pas pour autant invalidée. En effet, la géométrie simplifiée devrait, à priori, être moins sensible aux pentes des pics de crue et aux variations de l'hydrogramme simplifié avec l'approche descriptive à seuils.

Tests sur la géométrie simplifiée

La simplification des chroniques de débits avec l'approche descriptive à seuils, telle que définie initialement dans le paragraphe 5.2.2 est reprise pour les tests sur la géométrie simplifiée. Une simulation supplémentaire est testée, il s'agit de la simulation bel-gsqsd-v5, caractérisée par un dépôt par couches horizontales et une répartition uniforme de la contrainte de cisaillement. Ce mode de dépôt, peu concluant sur la géométrie réelle, ne devrait pas apporter de résultats aberrants sur les sections simplifiées, qui, par définition, présentent un fond plat. Les différentes options de calcul testées sont rappelées dans le tableau 6.6.

Identifiant simulation	bel-gsqsd-v0	bel-gsqsd-v1	bel-gsqsd-v4	bel-gsqsd-v5
Contrainte (τ)	MPC	MPC	uniforme	uniforme
Seuil de mise en mouvement (τ_{cr})	Shields	Ikeda	Shields	Shields
Option de dépôt	4	4	6	1
Option de capacité solide	3	3	1	1

TABLE 6.6 – Belleville : récapitulatif des différentes simulations effectuées avec le modèle en géométrie simplifiée et la simplification de la chronique 1996-1998 avec l'approche descriptive à seuils.

L'utilisation de la géométrie simplifiée permet un gain de temps supplémentaire puisque le modèle tourne en 12 h en moyenne sur la ferme de calcul de Clermont-Ferrand (cf. Annexe E). Les bilans des volumes déposés et érodés obtenus avec ces différentes simulations sont présentés sur la figure 6.18. Les simulations bel-gsqsd-v0 et bel-gsqsd-v1 permettent d'obtenir du dépôt sur la majorité des tronçons. L'incision observée sur les tronçons 1 et 7 est directement liée à la géométrie et non à la simplification de la chronique de débit ; en effet les calculs effectués sur la géométrie simplifiée avec la chronique de débits réelle donnait des tendances similaires pour ces deux tronçons (cf. paragraphe 6.1.3.3). Les simulations bel-gsqsd-v4 et bel-gsqsd-v5 produisent de l'incision sur tous les tronçons. Ces options de calcul sont donc écartées des simulations ultérieures sur le site de référence de Belleville.

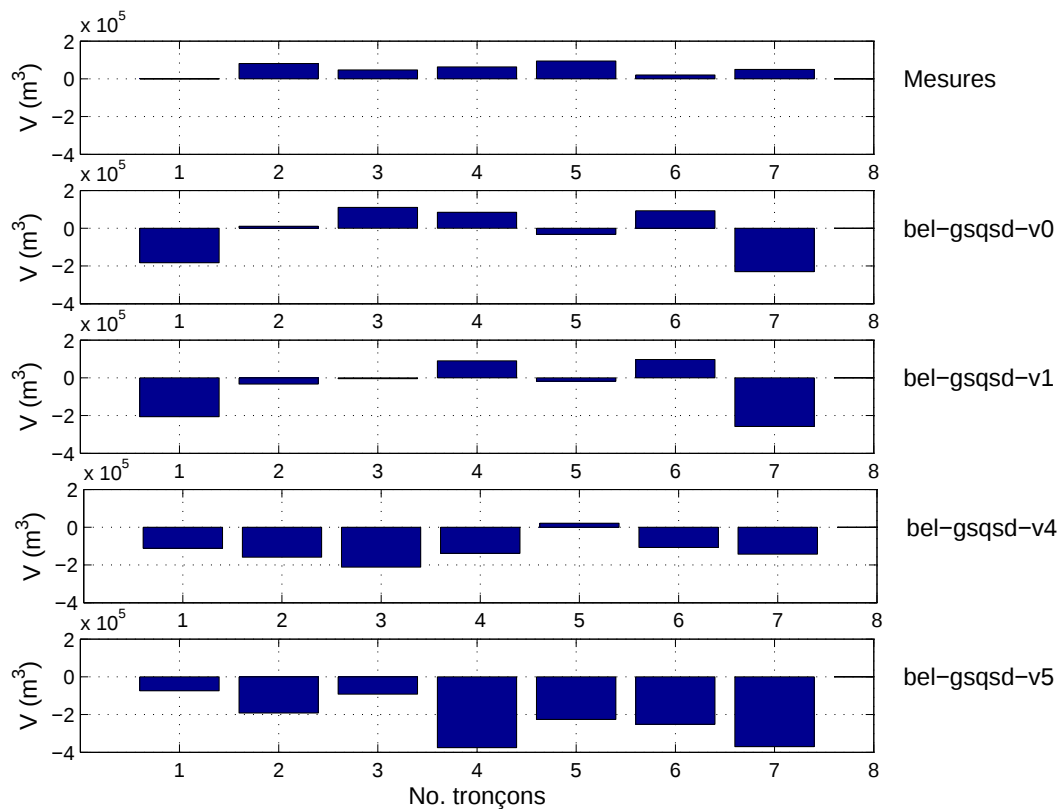


FIGURE 6.18 – Belleville : volumes déposés ou érodés obtenus avec le modèle en géométrie simplifiée et la chronique de débit 1996 - 1998, simplifiée avec l'approche descriptive à seuils.

L'application de la simplification de la chronique de débit avec l'approche descriptive à seuils sur la géométrie simplifiée permet d'obtenir des résultats plus satisfaisants que son application sur la géométrie réelle. Les tendances de dépôts et d'incision obtenus avec la géométrie simplifiée et la chronique de débits simplifiée sont cohérentes avec les mesures et les résultats du modèle « réel » hormis pour les tronçons 1 et 7.

L'incision systématique observée sur le tronçon 1 quelles que soient les options de calcul nous

a amené à effectuer une simulation supplémentaire afin de tenter d'améliorer la condition solide amont. Une simulation considérant le débit solide égal à la capacité maximale de transport dans la section amont a ainsi été réalisée. Les résultats ne sont pas concluants (et ne sont donc pas présentés ici), l'incision sur le tronçon 1 est légèrement réduite par rapport à la simulation bel-gsqsd-v1 mais pas de manière significative.

6.1.4.3 Tests d'une succession d'hydrogrammes synthétiques

La chronique réelle 1996-1998 est reconstituée à partir des définitions d'hydrogrammes de crue conservant la forme et les volumes (cf. paragraphes 5.2.3.1 et 5.2.3.2). Les périodes intermédiaires aux pics de crue sont traitées de façon similaire à l'approche descriptive à seuils, c'est à dire qu'elles sont résumées à un débit constant avec $Q_e = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ et $Q_c = 350 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces chroniques simplifiées sont ensuite appliquées sur la géométrie simplifiée avec les options de calcul définies dans le tableau 6.7.

Identifiant simulation	bel-gsqsf-v0	bel-gsqsv-v0
Contrainte (τ)	MPC	MPC
Seuil de mise en mouvement (τ_{cr})	Shields	Shields
Option de dépôt	4	4
Option de capacité solide	3	3

TABLE 6.7 – Belleville : récapitulatif des différentes simulations effectuées avec le modèle en géométrie simplifiée et la chronique 1996-1998 reconstituée avec les hydrogrammes synthétiques conservant la forme (bel-gsqsf-v0) et le volume (bel-gsqsv-v0).

Les volumes calculés sur les différents tronçons avec les deux approches sont présentés sur la figure 6.19. Les résultats obtenus avec ces deux simulations sont similaires ; les calculs produisent de l'incision sur les tronçons amont 1 et 2 et sur le tronçon aval. L'incision des tronçons 1 et 7 est constante sur tous les tests effectués sur la géométrie simplifiée. Pour le tronçon 2, en revanche, une telle incision n'a été obtenue dans aucun des tests précédents effectués avec ces options de calcul. La chronique de débit reconstituée avec les hydrogrammes de crue conservant la forme et le volume sont moins satisfaisants que ceux obtenus avec la chronique de débit simplifiée avec l'approche descriptive à seuils. Cette dégradation des résultats est vraisemblablement causée par les fortes pentes des hydrogrammes synthétiques lors des montées/descentes de crue. Ces approches seront néanmoins employées pour dériver des chroniques prédictives sur la Loire moyenne où les tests consisteront principalement à analyser la sensibilité du modèle à l'ordre des crues.

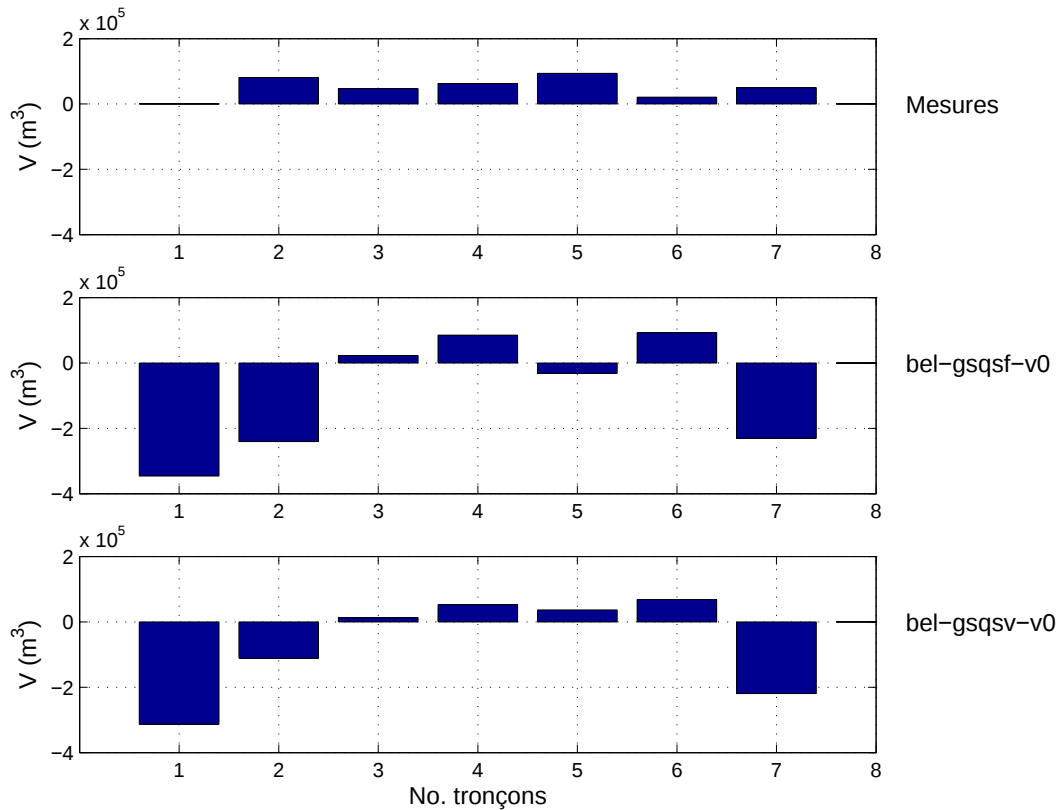


FIGURE 6.19 – Belleville : volumes déposés ou érodés obtenus avec le modèle en géométrie simplifiée et la chronique de débit 1996 - 1998, reconstituée avec les hydrogrammes de crue conservant la forme et le volume.

6.1.4.4 Tests d'accélération de l'hydrogramme

L'accélération de l'hydrogramme est appliquée sur le modèle « réel » (c'est à dire la géométrie réelle et la chronique de débits réelle) afin de tester cette approche permettant un gain de temps de calcul sans détérioration de l'hydrologie. Le calcul n'aboutit pas pour un facteur d'accélération supérieur à 5 appliqué à l'hydrogramme, les instabilités causées par des vitesses excessives étant fortes. Les résultats illustrés sur la figure 6.20 présentent le bilan des volumes déposés ou érodés sur les différents tronçons, pour les options de calcul de la simulation bel-reel-v1 et un facteur d'accélération de 1,5 appliqué sur l'hydrogramme. Le gain de temps de calcul est proportionnel au facteur d'accélération ; le modèle tourne ainsi en 11 jours avec un facteur d'accélération de l'hydrogramme de 1,5 (au lieu des 15 jours de calcul initiaux). Le modèle avec un facteur d'accélération de 1,5 permet de reproduire correctement les tendances d'évolution mais avec des volumes déposés légèrement inférieurs aux mesures et surtout différent des résultats de la simulation sans facteur d'accélération. Le modèle avec le facteur d'accélération permet d'obtenir des volumes plus proches des mesures pour les tronçons 3, 5 et 7 que les résultats du modèle « réel » (bel-reel-v1). Le tronçon 2 présente la plus forte erreur avec un volume mesuré de $80\,700 \text{ m}^3$ et un volume calculé de $29\,000 \text{ m}^3$.

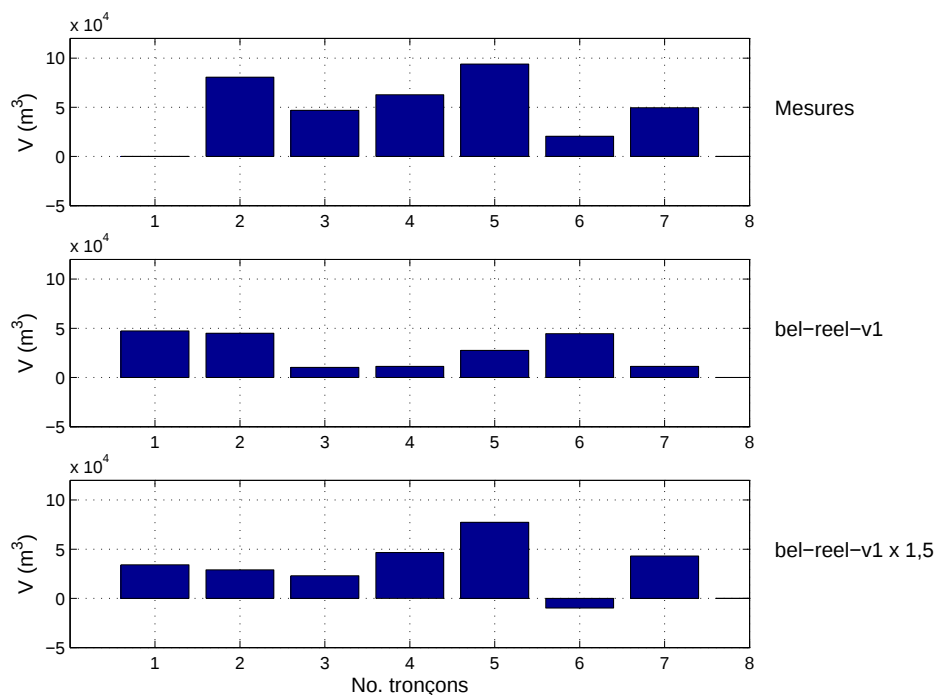


FIGURE 6.20 – Belleville : comparaison des volumes érodés ou déposés mesurés et calculés avec la simulation bel-reel-v1 $\times 1,5$ pour laquelle un facteur d'accélération de 1,5 est appliqué sur l'hydrogramme.

Un test supplémentaire avec un facteur d'accélération de 2,5 a été réalisé mais les résultats ne sont pas satisfaisants. En effet, la simulation induit bien du dépôt sur tous les tronçons mais dans des proportions trop grandes. Ainsi sur le tronçon 3, les dépôts calculés sont 17 fois supérieurs au volume mesuré. Cette approche d'accélération de l'hydrogramme est donc pertinente pour un facteur d'accélération égal à 1,5 et permet une réduction du temps de calcul conséquente. Toutefois, la réduction du temps de calcul obtenue ne semble pas suffisante pour effectuer une modélisation sur quelques décennies sur un bief de quelques centaines de kilomètres.

Des simulations ont également été réalisées sur la géométrie simplifiée et la chronique de débit réelle. Des facteurs de 1,5 puis 1,2 ont été testés, induisant de brusques augmentations de vitesse lors de la descente de la dernière crue ; ces deux calculs n'aboutissent pas. Cette approche ne semble donc pas assez stable pour une application sur la géométrie simplifiée. Ceci peut être dû aux variations de topographie qui sont relativement fortes pour les ponts où la topographie réelle est conservée.

Au vu du gain de temps de calcul obtenu avec les simulations en géométrie réelle avec la chronique de débits réelle, cette approche n'est pas appliquée sur les autres sites de référence.

6.1.5 Application du modèle simplifié avec les bilans sédimentaires

Le modèle simplifié basé sur les bilans sédimentaires, décrit au paragraphe 5.4, est appliqué sur le site de Belleville. Trois simulations ont été réalisées avec des simplifications de chroniques de débits

différentes et sont récapitulées dans le tableau 6.8.

Identifiant simulation	belmob-qsas	belmob-qspy	belmob-qsqsd
Simplification de la chronique	débit classé ascendant	débit classé pyramide	approche descriptive à seuils

TABLE 6.8 – Belleville : simulations réalisées avec Mobise.

Le temps de calcul de ces simulations est de quelques minutes. Le bilan des volumes érodés ou déposés sur les tronçons avec le modèle Mobise est présenté sur la figure 6.21 et comparé aux résultats obtenus avec le modèle RubarBE correspondant. Quelles que soient l'approche de simplification des chroniques de débits utilisée dans le modèle Mobise, les évolutions obtenues sont comparables. Les résultats sont très différents des volumes obtenus avec le logiciel RubarBE. Les calculs effectués avec Mobise ne sont pas concluants. Toutefois certains résultats obtenus avec les simplifications et le modèle RubarBE étant également discutables, et le temps de calcul des simulations Mobise étant extrêmement court, cette approche sera testée sur la Loire moyenne.

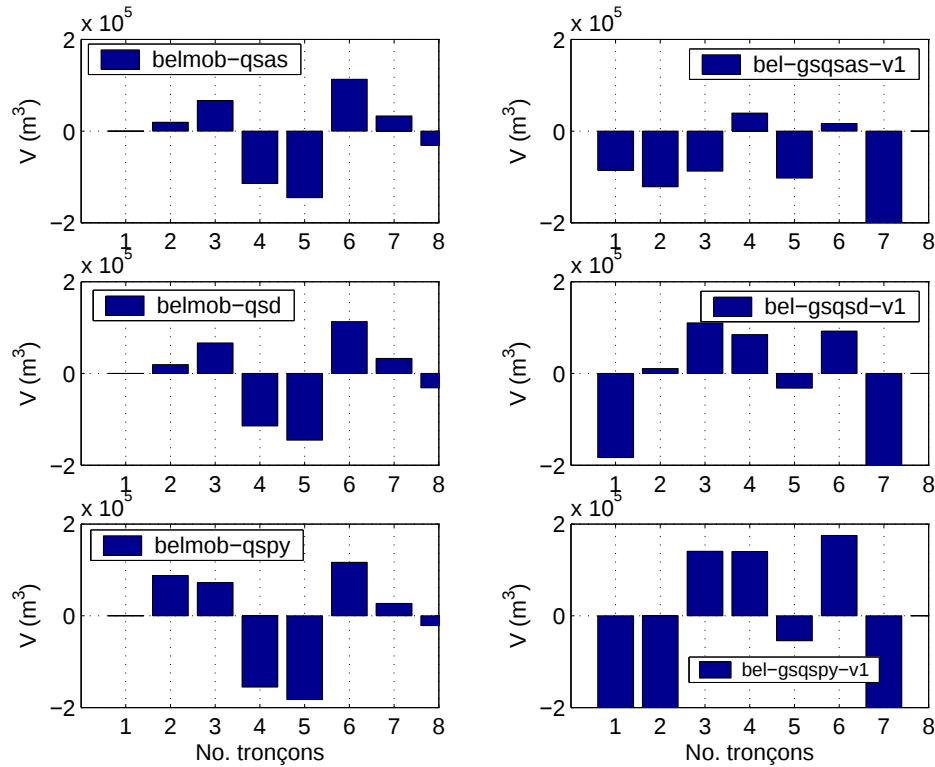


FIGURE 6.21 – Belleville : comparaison des volumes érodés ou déposés calculés avec le modèle Mobise et les simulations bel-gsqsas-v1 (géométrie simplifiée et chronique de débits simplifiée avec les débits classés ascendants), bel-gsqsd-v1 et bel-gsqspy-v1.

6.1.6 Synthèse des simulations effectuées sur le site de Belleville

Les tests effectués sur le site de Belleville nous ont permis de sélectionner les options de calculs du modèle RubarBE pertinentes pour réaliser les tests de simplifications de la géométrie et des chroniques de débits. Toutes les approches de simplifications de la géométrie et des chroniques de débits présentées dans le chapitre 5 ont ensuite été testées sur le site anthropisé de Belleville. Une synthèse des simulations réalisées ainsi que les conclusions faites sur ces différents tests est donnée dans le tableau 6.9.

Objectif des simulations	Nom simulations	Conclusions (meilleure option)
test options de calcul	bel-reel	option de dépôt variable fonction de $(\tau_{c,j} - \xi\tau_j)^m$ $D_{char} = 10$ km
test géométrie simplifiée	bel-gsqr	validation de la géométrie simplifiée (bel-gsqr-v1)
test simplification des chroniques de débits	bel-gsqs	simplification des chroniques avec les débits classés rejetée approche descriptive à seuils à valider hydrogrammes de projets : acceptable pour prédictif

TABLE 6.9 – Belleville : synthèse des simulations effectuées.

Les simulations réalisées sur le site de Belleville ont permis de sélectionner l’option de dépôt variable fonction de $(\tau_{c,j} - \xi\tau_j)^m$ (dépôt 4), de confirmer l’adéquation de la distance de chargement de 10 km et de la formule de transport. La sélection des meilleures options de calcul est basée sur les résultats obtenus pour le bilan des volumes érodés ou déposés sur les différents tronçons. L’objectif étant de raisonner à l’échelle des tronçons définis par une géométrie simplifiée, il semble illusoire de vouloir reproduire correctement les déformations des sections.

La simplification de la géométrie est également validée, même si les modèles en géométrie simplifiée semblent plus sensibles aux conditions aux limites solides et au facteur d’accélération appliqué à l’hydrogramme. La simplification des chroniques de débits avec une approche par débits classés n’est pas concluante. Les tests de l’approche descriptive à seuils effectués sur la géométrie réelle ne sont pas probants ; par contre, cette simplification de la chronique de débits appliquée sur la géométrie simplifiée donne des résultats cohérents avec les mesures. La reconstitution de la chronique réelle avec les hydrogrammes de crue conservant la forme et le volume ne donne pas de résultats satisfaisants. Ces hydrogrammes de crue permettront néanmoins de tester différents scénarios prédictifs. Un facteur d’accélération a également été appliqué à l’hydrogramme réel et testé sur la géométrie réelle. Les résultats sont cohérents avec les mesures mais le gain de temps de calcul ne permet pas d’envisager cette approche pour modéliser l’ensemble de la Loire moyenne. Enfin, les simulations réalisées avec le modèle Mobise montrent des successions de dépôt et érosions sur les différents tronçons. Un test sera donc effectué sur la Loire moyenne dans le chapitre 7.

6.2 Site à chenaux multiples : Bréhémont

Les approches de simplification les plus pertinentes sont maintenant testées sur le site de Bréhémont, caractérisé par la présence d'îles et de chenaux secondaires. Les résultats obtenus sur le site de Bréhémont sont présentés avant ceux du site de Guilly car de plus nombreux tests ont été effectués du fait du jeu de données plus conséquent.

6.2.1 Calage du modèle hydraulique

Le modèle hydraulique sur le secteur de Bréhémont est défini par 87 profils en travers. Deux jeux de données topographiques ont été assemblés : une campagne de novembre 2000 localisée sur les îles de Bréhémont (îles Pallu et Ferrandière) avec des profils en travers tous les 50 m environ (données de l'Université de Tours) et les données « Crougneau 1995 ». La géométrie des îles a été complétée avec les données Lidar et les profils de 1995 ont été interpolés tous les 500 m afin d'assurer la stabilité du modèle.

Le modèle a été calé sur les données d'étiage de septembre 2000 et août 2006 ainsi que sur les lignes d'eau de crue de mai 2001, décembre 2003, mars 2007 et janvier 2008. Un coefficient de rugosité de Strickler du lit mineur de $50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}^5$ permet de reproduire correctement les lignes d'eau d'étiage (Fig. 6.22a). Pour les débits compris entre $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ et $1490 \text{ m}^3/\text{s}$ (crues de janvier 2008 et mars 2007 respectivement), un K_{min} de $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ est plus adapté si l'on conserve un $K_{maj} = 15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (Fig. 6.22b). Il faut souligner que le déversement sur le seuil d'entrée des chenaux secondaires s'opère pour un débit de $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ bien que la connection avec les chenaux secondaires débute pour un débit relativement faible de $700 \text{ m}^3/\text{s}$ (Rodrigues, communication personnelle). Les crues les plus fortes (crue de mai 2001, $Q = 2906 \text{ m}^3/\text{s}$ et décembre 2003, $Q = 2690 \text{ m}^3/\text{s}$) sont correctement calculées avec un $K_{min} = 28 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (Fig. 6.22c et d). Cette diminution du Strickler pour les débits forts s'explique par les débordements et la mise en eau des chenaux secondaires et peut être également liée aux formes de fonds (dunes) présentes lors des crues. La modélisation 1-D ainsi que l'approche de simplification de la géométrie proposée (cf. paragraphe 5.1) nous obligent à définir un K_{min} unique pour le lit mineur et les chenaux secondaires, constant pour toutes les valeurs de débits. Au vu des résultats obtenus sur la figure 6.22, un coefficient de Strickler de $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ pour le lit mineur est le plus pertinent pour la simulation d'une gamme complète de débits (c'est à dire des débits d'étiage au débit de crue). K_{min} étant ainsi fixé, le coefficient de rugosité du lit majeur a ensuite été ajusté afin de permettre un calage correct pour les différents débits modélisés. Les résultats les plus probants sont obtenus avec un $K_{maj} = 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Ce calage diffère des coefficients de rugosité mentionnés dans le paragraphe 3.3.3. Il faut souligner

5. Le lit mineur correspond à la section usuelle de l'écoulement ; il est rappelé que le lit moyen et le lit majeur ne sont pas distingués dans ce manuscrit (cf. paragraphe 1.2.3.2)

6. Application aux sites de références

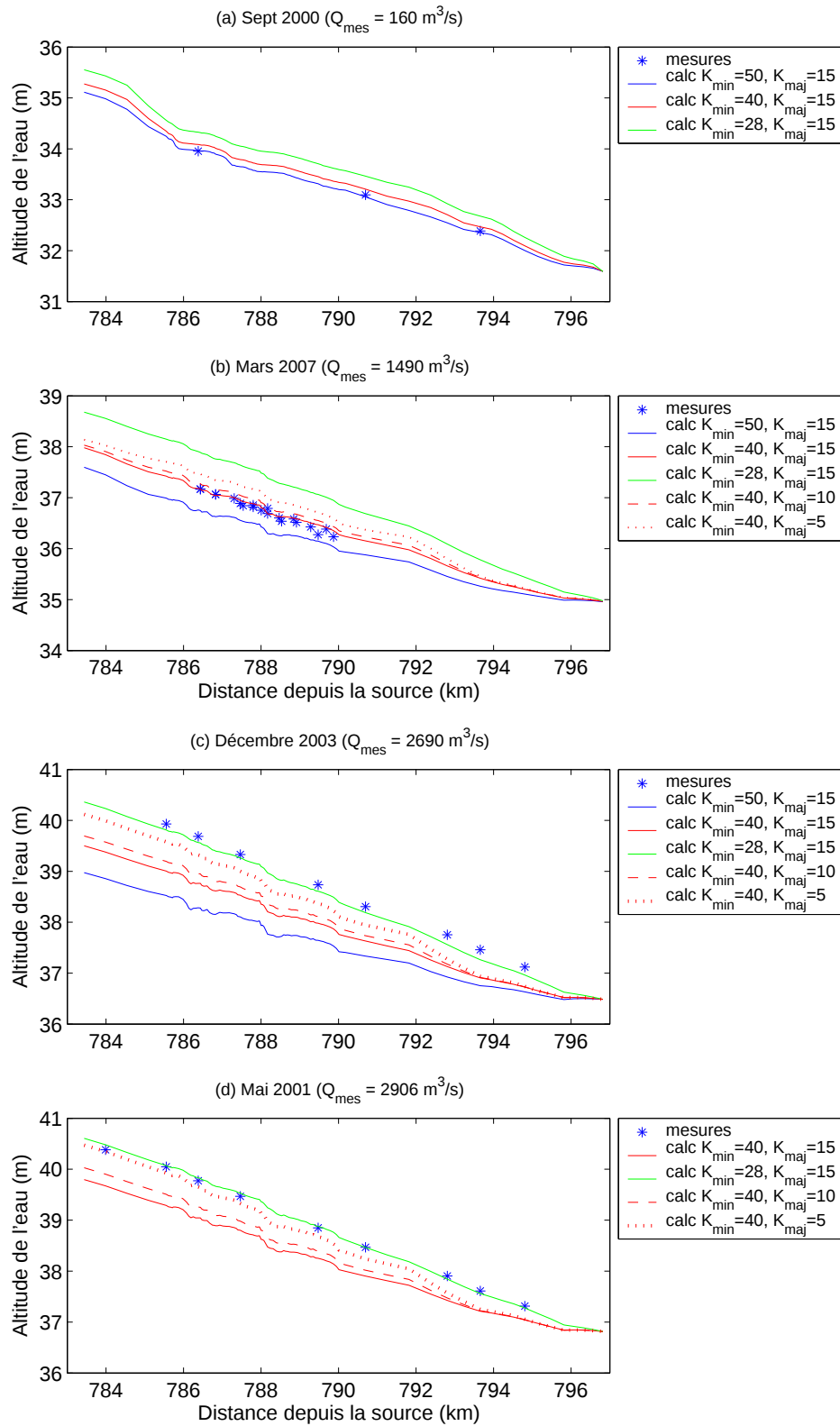


FIGURE 6.22 – Bréhémont : exemples de lignes d'eau du calage hydraulique du modèle (seules les valeurs pertinentes de $K_{\min}$ et K_{maj} sont présentées).

que le calage mentionné précédemment pour le modèle avec les tronçons homogènes a été réalisé sur les données topographiques de 1995 où le nombre de profils en travers est bien inférieur au détail du modèle de Bréhémont exposé ici. Cette différence de calage permet ainsi la comparaison des résultats obtenus sur ce modèle local avec les résultats du modèle Loire moyenne réalisé dans le chapitre 7 afin de voir l'influence d'un calage global sur les résultats.

6.2.2 Modèle d'évolution « réel » (2000 - 2002)

Les évolutions du lit sont modélisées avec la géométrie réelle et la chronique de débit réelle, disponible entre le 08 Novembre 2000 et le 08 Novembre 2002 à la station hydrométrique de Langeais, afin d'être comparées aux évolutions mesurées. Durant cette période, deux pics de crues supérieurs à 1500 m³/s sont visibles (Fig. 6.23).

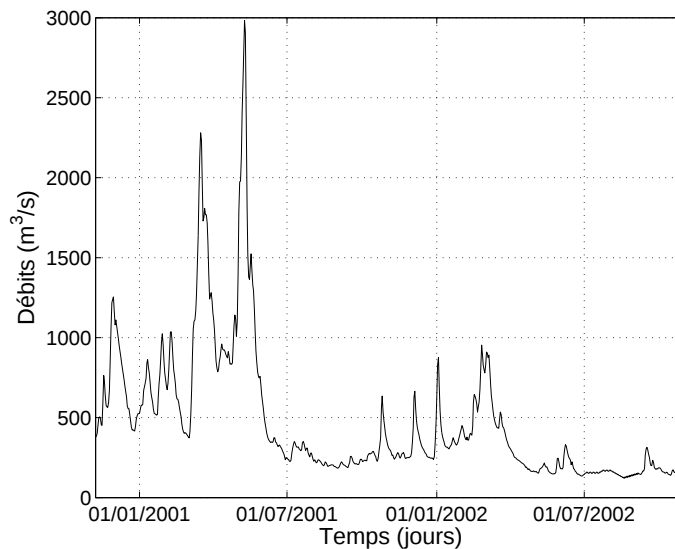


FIGURE 6.23 – Hydrogramme de 2000 à 2002 à la station hydrométrique de Langeais

La simulation de cette chronique de débit réelle avec la géométrie réelle nécessite 23 jours de calcul sur la ferme de Clermont-Ferrand. Les résultats obtenus avec les différentes options de calcul sur le site de Belleville n'étant pas complètement satisfaisants du point de vue de la morphologie du lit, les mêmes options de calcul ont été reprises pour les simulations effectuées sur le site de Bréhémont (cf. Tab. 6.10). Les différentes simulations ont été réalisées en conservant la distance de chargement de 10 km. Les conditions initiales liquides et solides ont été déterminées avec un modèle préliminaire correspondant au débit initial de la chronique en régime permanent.

Comparaison des profils en long

Les profils en long obtenus avec les différentes simulations sont comparés au profil en long mesuré en 2002 sur la figure 6.24 en considérant les cotes minimums de fonds, c'est à dire les cotes

Identifiant simulation	bre-reel-v0	bre-reel-v1	bre-reel-v2	bre-reel-v3	bre-reel-v4
Contrainte (τ)	MPC	MPC	MPC	MPC	uniforme
Seuil de mise en mouvement (τ_{cr})	Shields	Ikeda	Ikeda	Ikeda	Shields
Option de dépôt	4	4	1	6	6
Option de capacité solide	3	3	3	3	1

TABLE 6.10 – Bréhémont : récapitulatif des différentes simulations effectuées avec la géométrie réelle et la chronique de débit réelle (2000 - 2002).

minimum du chenal principal. Les tendances d'évolutions obtenues avec les différentes simulations sont similaires aux résultats obtenus sur le site anthropisé de Belleville (cf. paragraphe 6.1.2.3). Les calculs bre-reel-v0 et bre-reel-v1 produisent une incision localisée du talweg, tandis que la simulation bre-reel-v2 produit un dépôt excessif. Les options des calcul bre-reel-v3 et bre-reel-v4 induisent peu d'évolutions du profil en long.

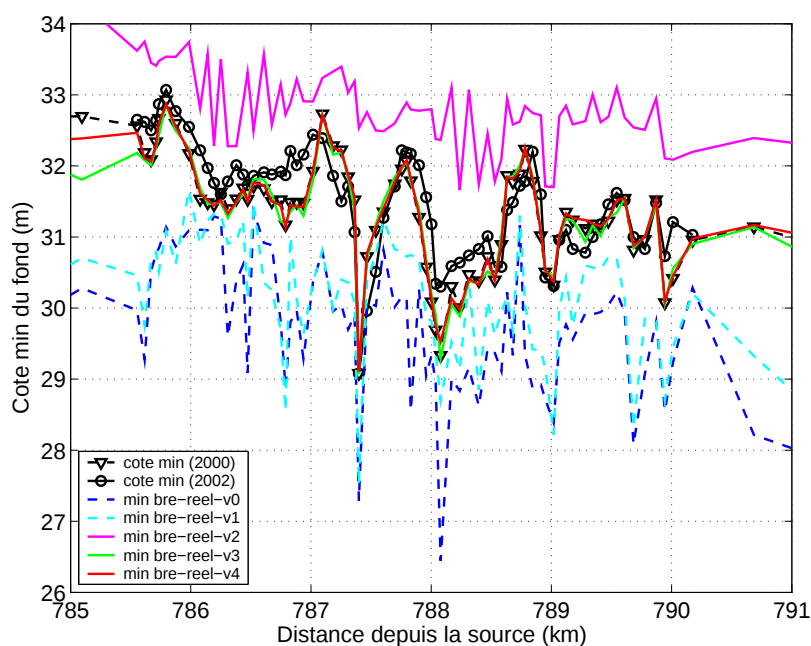


FIGURE 6.24 – Bréhémont : Profil en long mesuré et calculé avec le modèle en géométrie réelle et la chronique de débit réelle (2000 - 2002) pour les différentes simulations.

Evolutions des profils en travers

La géométrie des profils en travers sur le secteur de Bréhémont étant complexe, on s'intéresse à deux profils en travers localisés au PK 786,6 (P18) et au PK 788,6 (P51) afin d'analyser les évolutions modélisées. Ces deux sections ont été sélectionnées car elles présentent respectivement le plus fort dépôt et la plus forte incision du chenal principal observée (Fig. 6.25). Il faut noter que les données de profils en travers mesurées en 2000 et introduites dans le modèle ont été purgées : c'est à dire que

le nombre de points définissant la section a été réduit lorsque les variations d'altitudes entre deux points proches étaient faibles. En effet les relevés bathymétriques possédaient plus de 500 points définissant le chenal principal alors que le modèle RubarBE n'admet que 300 points au maximum pour la définition d'une section. Les simulations bre-reel-v0 et bre-reel-v1 produisent une incision localisée du chenal principal pour les deux sections considérées et du dépôt sur les berges. Les calculs bre-reel-v3 et bre-reel-v4 produisent très peu d'évolution de la section. Les profils initiaux P18 mes 2000 et P51 mes 2000 sont ainsi quasiment confondus avec les profils bre-reel-v3 et bre-reel-v4. Enfin, le dépôt uniforme par couche horizontale de la simulation bre-reel-v2 n'est pas adapté pour des calculs en géométrie réelle.

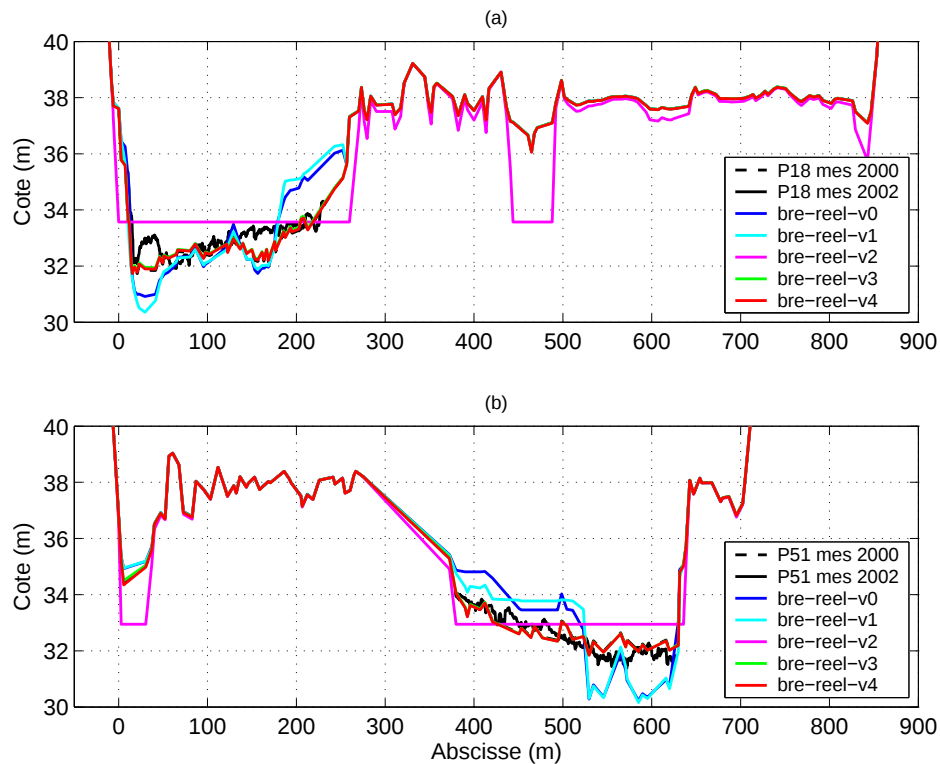


FIGURE 6.25 – Bréhémont : évolutions types des sections en travers pour (a) le profil P18 (PK 786,61) qui présente le plus fort dépôt et (b) le profil P51 (PK 788,6) qui présente la plus forte incision sur la période.

Comparaison des volumes

Le bilan des volumes déposés ou érodés calculé sur les différents tronçons est ensuite comparé au volume mesuré sur la figure 6.26. Malgré la forte incision du chenal principal générée par les simulations bel-reel-v0 et bel-reel-v1, les dépôts observés sur les berges permettent d'obtenir un volume, à l'échelle du tronçon, comparable aux mesures. La simulation bel-reel-v1 donne les meilleurs résultats, y compris pour le tronçon 3 où toutes les autres simulations induisent une érosion alors que du dépôt est observé. La prise en compte du facteur d'Ikeda pour la containte critique (effet de

penne) apparaît donc être utile pour le cas particulier de Bréhémont, c'est à dire pour les secteurs présentant des îles. La détermination des volumes confirme l'inadéquation de l'option bel-reel-v2 et le peu d'évolution engendrée par les calculs bel-reel-v3 et bel-reel-v4, en particulier pour les tronçons 2 et 3, la simulation bel-reel-v4 donne les résultats les moins bons.

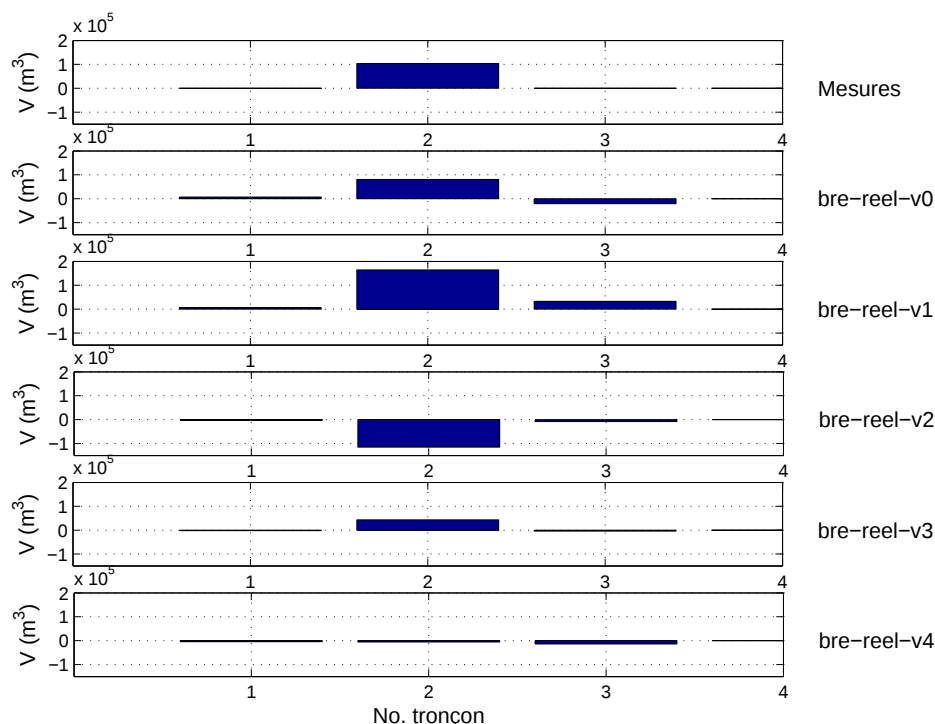


FIGURE 6.26 – Bréhémont : comparaison des volumes déposés ou érodés, mesurés et calculés sur les tronçons entre 2000 et 2002 pour les simulations en géométrie réelle avec la chronique de débit réelle.

6.2.3 Modèle d'évolution en géométrie simplifiée

6.2.3.1 Simplification de la géométrie

La simplification de la géométrie a d'abord été effectuée en considérant un profil unique pour le chenal principal et les chenaux secondaires. Cependant, au vu du nombre de sections disponibles sur ce secteur (1 profil tous les 50 m) et des discontinuités observées sur le lit, deux tronçons intermédiaires ont été introduits au confluent et diffluent avec les chenaux secondaires afin de permettre le bon déroulement du programme de lissage. Le lissage a donc été réalisé sur 6 tronçons, soit 12 sections en travers simplifiées, définies chacune par 34 points (soit $n = 17$ lignes d'eau). En considérant un profil en travers unique, le critère de précision δz (cf. équation 5.2) augmente lorsque l'on considère les débits forts. Ainsi, le lissage effectué pour des débits compris entre 50 m³/s et 2800 m³/s nous permet d'obtenir $5 \text{ cm} < \delta z < 15 \text{ cm}$. Si les débits de crue sont considérés ($Q > 2800 \text{ m}^3/\text{s}$), le critère de précision atteint des valeurs de 35 cm. Ces variations illustrent les difficultés à

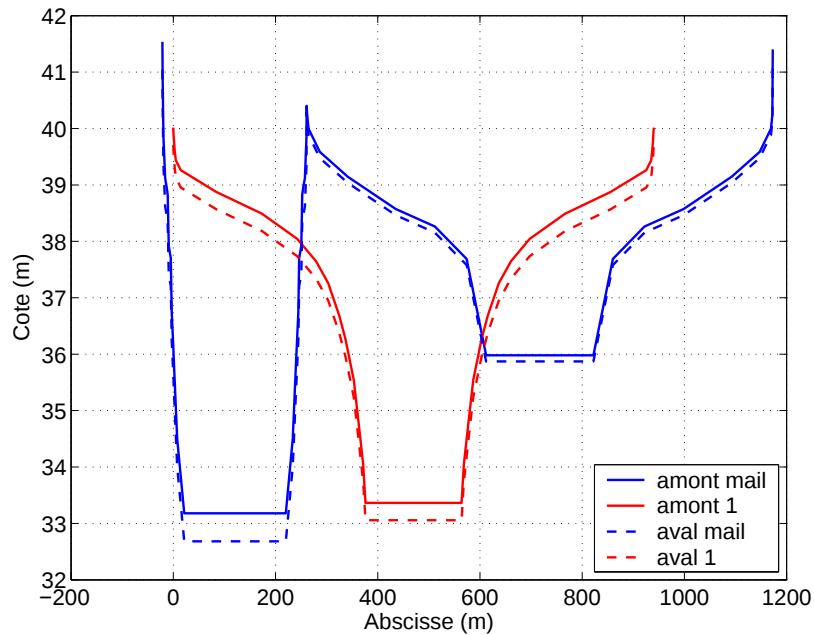


FIGURE 6.27 – Bréhémont : profils en travers lissés avec l’approche et les résultats du modèle maillé.

modéliser correctement les hauteurs d’eau pour des débits débordants sur des secteurs présentant des îles avec un modèle 1D non maillé.

Afin de compléter les tests de simplification sur des sections complexes, les résultats d’un modèle maillé ont été utilisés pour effectuer un test supplémentaire. Un lissage est ainsi réalisé en séparant le lissage du chenal principal du lissage des chenaux secondaires. Ce test a été effectué en reprenant les deux profils intermédiaires introduits précédemment qui correspondent aux connections et diffluences avec les chenaux secondaires. La comparaison des résultats obtenus avec les deux approches est donc possible et cohérente. La figure 6.27 présente les sections lissées obtenus pour le tronçon 2, qui s’étend de l’amont de l’île située en rive droite à l’aval (du PK 785,55 au PK 786,88), avec ces deux approches. La géométrie lissée obtenue avec le modèle maillé paraît plus pertinente car elle prend en compte la dissymétrie des sections en travers présentant des îles et en particulier où la cote de fond du chenal secondaire est généralement supérieure à la cote de fond du chenal principal. Toutefois, cette représentation de la section peut poser des difficultés dans le calcul avec transport de sédiments. En effet, le modèle RubarBE considère un lit actif unique qui, sur un profil simplifié composé, doit inclure les deux lits.

Les profils en long lissés avec les deux approches sont présentés sur la figure 6.28. La cote du fond du profil en long lissé avec l’approche maillée est supérieure au lissage « classique » sur les tronçons présentant des îles. Une forte discontinuité est observée sur l’aval du secteur.

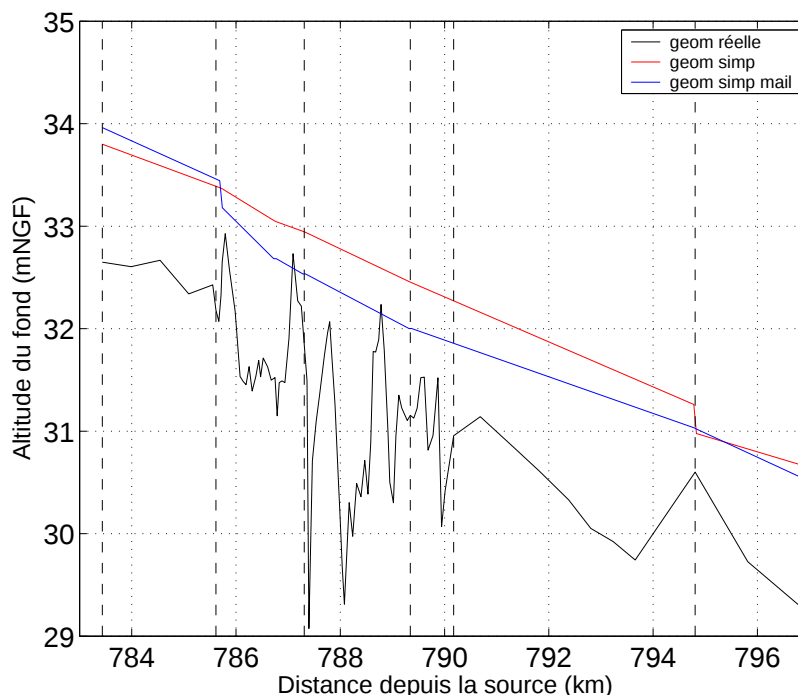


FIGURE 6.28 – Bréhémont : comparaison des profils en long réel et simplifiés avec l’approche de lissage sur une section unique et la simplification maillée

6.2.3.2 Tests hydrauliques sur les crues de 2001 et 2003

La validation des méthodologies de lissage de la géométrie consiste à comparer les hauteurs d’eau obtenues avec la géométrie réelle à celles calculées avec les géométries simplifiées pour les crues de mai 2001 et décembre 2003. Les erreurs relatives $\Delta H/H$ ($\Delta H/H = (H_{mod} - H_{mes})/H_{mes}$) sont ainsi calculées entre les mesures et les résultats obtenus en géométrie réelle et en géométrie simplifiée. Les résultats obtenus avec le modèle non maillé sont présentés sur la figure 6.29.

Le modèle en géométrie simplifiée donne des résultats satisfaisants sur la crue 2001. L’erreur maximale atteint 5% sur cette crue ($\Delta H = 22$ cm) au PK 786,4 qui correspond à l’aval de l’île située en rive droite. Les erreurs observées sur la crue de 2003 sont plus fortes mais présentent une certaine uniformité pour les différents modèles. Ainsi, entre le modèle « réel » et les mesures $-7,5\% < \Delta H/H < -4,2\%$, entre le modèle simplifié et le modèle « réel » $\Delta H/H$ varie entre $-7,9\%$ et $-5,3\%$ et enfin entre $-0,8\%$ et $1,5\%$ pour la comparaison modèle simplifié et calcul en géométrie réelle. Ces résultats reflètent le calage effectué sur cette crue en géométrie réelle (cf. paragraphe 6.2.1). La géométrie simplifiée ne dégrade pas les résultats de lignes d’eau et peut donc être validée pour effectuer les tests avec transport de sédiments.

Il faut souligner que les tests hydrauliques ont également été réalisés avec la géométrie lissée définie à partir des résultats du modèle maillé ; pour ces tests on obtient un $\Delta H/H$ compris entre -4% et -12% pour la crue 2001 soit un $\Delta H = 27$ cm et 53 cm respectivement. Pour la crue 2003,

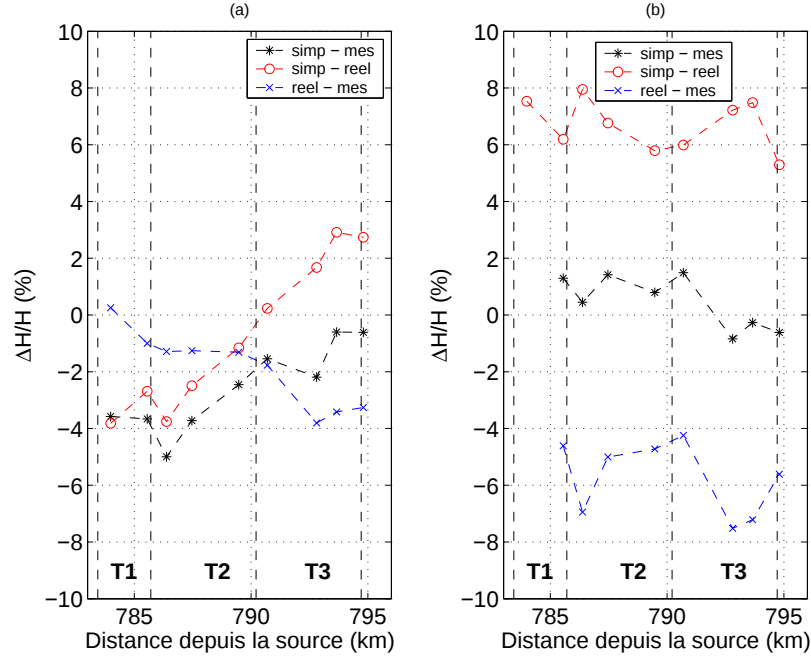


FIGURE 6.29 – Bréhémont : erreurs relatives du modèle avec la géométrie simplifiée par un profil unique sur (a) la crue de 2001 et (b) la crue de 2003. « simp » fait référence au modèle en géométrie simplifiée, « reel » au modèle en géométrie réelle avec les chroniques de débits réelles et « mes » aux mesures.

les erreurs sont encore plus accentuées avec une erreur relative comprise entre -7% et -19%. Cette approche n'est donc pas satisfaisante au vu de notre objectif. L'approche maillé de RubarBE est en cours de validation et devrait permettre de tester cette approche plus rigoureusement.

6.2.3.3 Modèle d'évolution du lit en géométrie simplifiée (2000-2002)

Ces premiers calculs avec transport de sédiments sont réalisés avec la géométrie simplifiée et la chronique de débit réelle. Les différentes simulations effectuées sont récapitulées dans le tableau 6.11.

Identifiant simulation	bre-gsqr-v0	bre-gsqr-v1	bre-gsqr-v4
Contrainte (τ)	MPC	MPC	uniforme
Seuil de mise en mouvement (τ_{cr})	Shields	Ikeda	Shields
Option de dépôt	4	4	6
Option de capacité solide	3	3	1

TABLE 6.11 – Bréhémont : récapitulatif des différentes simulations effectuées avec la géométrie simplifiée et la chronique de débit réelle (2000-2002).

Le bilan des volumes obtenus pour les différents tronçons est présenté sur la figure 6.30. Les résultats obtenus avec la simulation bre-gsqr-v0 sont similaires aux tendances observées sur la géométrie réelle (simulation bre-reel-v0). Les calculs bre-gsqr-v1 et bre-gsqr-v4 détériorent les résultats

en accentuant l'incision du tronçon 3. L'utilisation du facteur d'Ikeda induit donc des résultats opposés en utilisant la géométrie simplifiée par rapport à la géométrie réelle. En retenant la simulation bre-gsqr-v0, la simplification de la géométrie du site de Bréhémont est donc validée. Il est intéressant de noter que sur le site de Belleville une incision sur le premier tronçon était récurrente pour tous les tests en géométrie simplifiée. Cette constatation, invalidée sur le site de Bréhémont, n'est à priori pas liée à la simplification de la géométrie même, mais pourrait être associée au degré d'anthropisation du site.

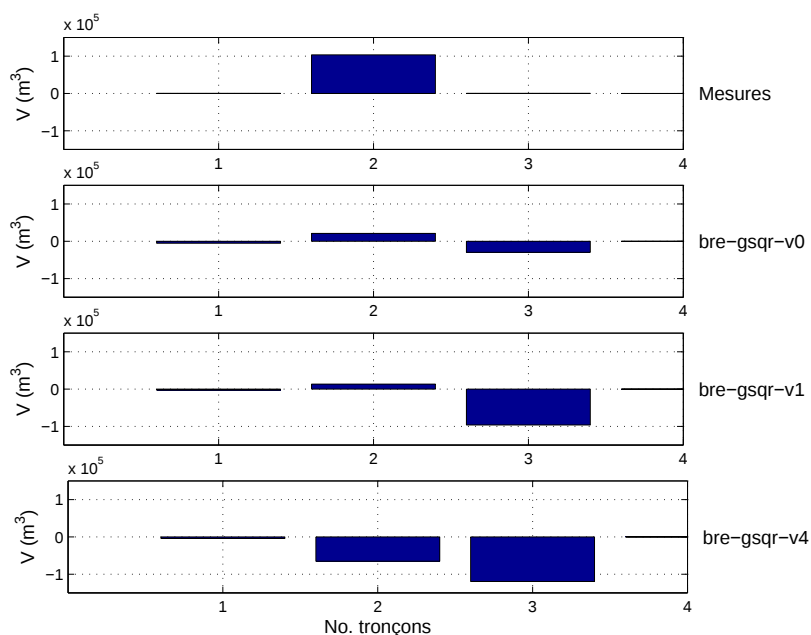


FIGURE 6.30 – Bréhémont : volumes déposés ou érodés obtenus avec la géométrie simplifiée et la chronique de débit réelle (2000 - 2002).

6.2.4 Modèle d'évolution du lit avec la chronique de débits simplifiée (2000-2002)

Seule la méthodologie de simplification descriptive avec seuils est appliquée sur le site de Bréhémont (cf. paragraphe 5.2.2). La valeur de Q_e est conservée à 200 m³/s. La valeur seuil du débit de crue, qui est défini comme le module de la station hydrométrique la plus proche, est basée sur la station de Langeais ($Q_c = Q_{MOD} = 440$ m³/s). Les périodes intermédiaires aux pics de crues ($Q_e < Q < Q_c$) sont considérées comme des périodes à débits constant. Cette simplification de la chronique permet de la réduire à une durée de 355 jours, soit quasiment de 50%.

6.2.4.1 Géométrie réelle et chronique simplifiée

La chronique de 2000-2002 simplifiée est d'abord appliquée sur la géométrie réelle. Seule une des simulations avec les options de calculs donnant le bilan de volume le plus proche de la réalité en

géométrie réelle est effectuée (bre-reel-v1). Le bilan des volumes déposés ou érodés sur les tronçons est présenté sur la figure 6.31.

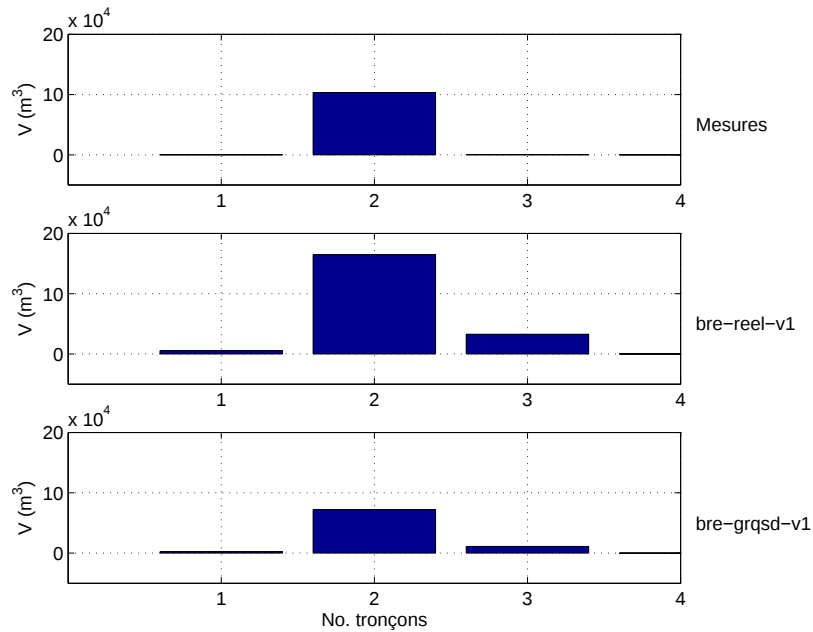


FIGURE 6.31 – Bréhémont : volumes déposés ou érodés obtenus avec la géométrie réelle et la chronique de débit 2000 - 2002 simplifiée avec l’approche descriptive à seuils.

La simplification de la chronique de débit avec l’approche descriptive à seuils permet de reproduire correctement les tendances observées. Les volumes calculés avec la simulation bre-grqsd-v1 sont mêmes plus proches des volumes mesurés que le modèle en géométrie réelle avec la chronique de débit réelle (bre-reel-v1). Bien que le nombre de tronçons permettant la validation des méthodologies de simplification soit limité, les résultats obtenus sur le site de Bréhémont sont plus probants que ceux calculés sur le site de référence de Belleville.

6.2.4.2 Géométrie simplifiée et chronique simplifiée

La géométrie simplifiée et la chronique de débits simplifiée sont ensuite introduites dans le modèle. Les simulations bre-gsqsd-v0 et bre-gsqsd-v1 sont effectuées et le bilan des volumes érodés ou déposé par tronçon est présenté sur la figure 6.32. La simulation bre-gsqsd-v0 donne des résultats satisfaisants et comparable aux mesures et au modèle « réel » (simulation bre-reel-v0). Les résultats sont aussi similaires aux simulations avec géométrie simplifiée et chronique réelle (cf. paragraphe 6.2.3.3) validant donc la chronique de débit simplifiée pour ce site. Les options de calcul de la simulation bre-gsqsd-v1 sont moins concluants en géométrie simplifiée.

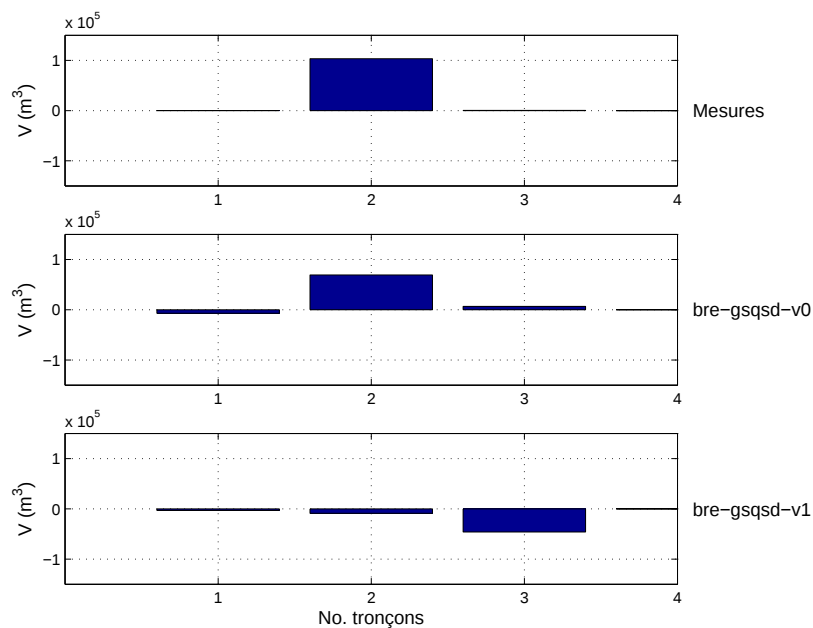


FIGURE 6.32 – Bréhémont : volumes déposés ou érodés obtenus avec la géométrie simplifiée et la chronique de débit 2000 - 2002 simplifiée avec l'approche descriptive à seuils.

6.2.5 Synthèse des simulations effectuées sur le site de Bréhémont

Le modèle « réel », c'est à dire avec la géométrie réelle et la chronique de débit réelle, induit les mêmes tendances d'évolution que celles observées sur le site de référence de Belleville. L'option de dépôt variable, fonction de $(\tau_{c,j} - \xi\tau_j)^m$ (option de dépôt 4) permet de reproduire correctement les évolutions des tronçons en terme de volumes déposés ou érodés. La simplification de la géométrie avec une approche maillée ne semble pas pertinente au vu de nos objectifs. Les simplifications de la chronique de débit avec l'approche descriptive à seuil donne des résultats satisfaisants; cette approche est donc validée.

6.3 Site à méandres : Guilly

Le site de Guilly présente les seuls méandres de la Loire moyenne. Seul le modèle simplifié, c'est à dire avec la géométrie simplifiée et les chroniques de débits simplifiées est testé sur ce site, du fait de la longueur du site (25 km) et de la période simulée (12 ans).

6.3.1 Calage du modèle hydraulique

Le modèle hydraulique sur le secteur de Guilly est défini par 112 profils en travers interpolés à partir des données « Crougneau 1995 ». Le calage du coefficient de rugosité du lit mineur a été réalisé sur les données d'étiage d'août 1995 ($Q = 71,5 \text{ m}^3/\text{s}$) et de débit moyen de janvier 2008 ($Q = 835 \text{ m}^3/\text{s}$). Le calage du K_{maj} a été réalisé sur les crues de décembre 1996 ($Q = 1690 \text{ m}^3/\text{s}$)

et décembre 2003 ($Q = 3160 \text{ m}^3/\text{s}$). Par définition les méandres ne sont pas considérés dans un modèle 1D, le coefficient de rugosité du lit mineur doit donc prendre en compte cette particularité influençant l'écoulement. Le calage le plus pertinent est obtenu avec un K_{min} compris entre $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ et $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ suivant les tronçons et un $K_{maj} = 15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Les erreurs relatives obtenues avec cette combinaison des coefficients de rugosité sur les hauteurs d'eau des crues 1996 et 2003 sont présentées sur la figure 6.33. Les erreurs relatives sont plus fortes pour la crue de 1996 mais restent comprises entre -6 % et 3 % ($\Delta H = -36 \text{ cm}$ et $\Delta H = 16 \text{ cm}$). Ceci reste donc tout à fait acceptable.

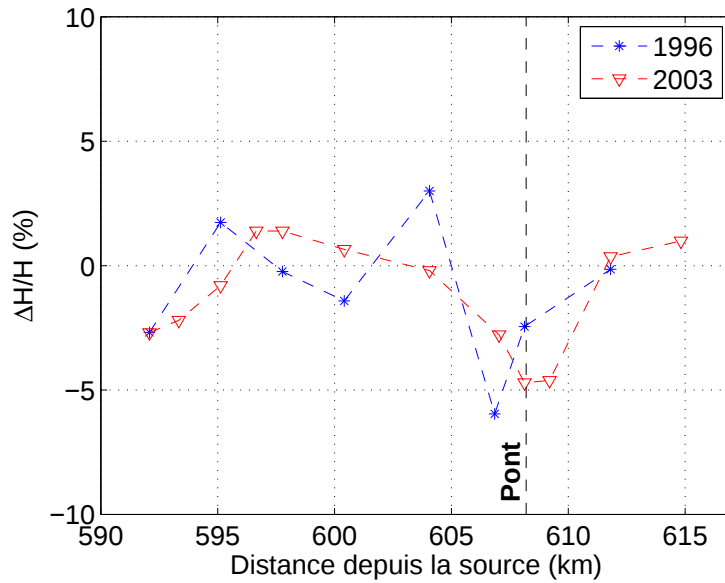


FIGURE 6.33 – Guilly : erreurs du modèle sur les crues de décembre 1996 et décembre 2003.

6.3.2 Simplification de la géométrie

La simplification en simple trapèze avec largeur fixe permet d'obtenir une section lissée définie par $2 \times n$ points, avec n le nombre de lignes d'eau. Les débits de lissage sont compris entre $70 \text{ m}^3/\text{s}$ et $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ ($n = 13$). Les sections définies sont ainsi caractérisées par 26 points. La simplification de la géométrie des 11 tronçons homogènes nous permet d'aboutir au profil en long défini par 23 sections en travers (11 tronçons et la géométrie réelle du pont de Chateaufort sur Loire). Le profil en long lissé est comparé au profil en long initial sur la figure 6.34. Le critère de précision δz (cf. équation 5.2) est compris entre 6 cm et 19 cm avec une valeur moyenne de 10,65 cm.

Des tests hydrauliques sur les crues de décembre 1996 et décembre 2003 sont également réalisés.

6.3.3 Modèle d'évolution du lit en géométrie simplifiée (1996-2008)

Les données topographiques disponibles pour la validation de la méthodologie ont été levées par le CETE de Blois en juin 2008. La chronique de débit en entrée est basée sur les données de

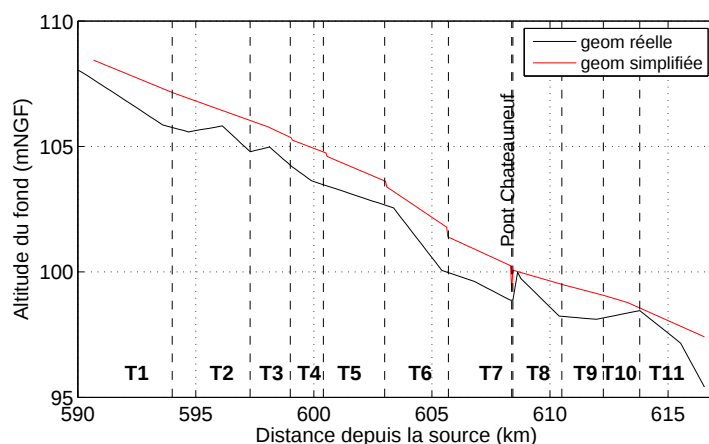


FIGURE 6.34 – Guilly : comparaison des profils en long réel et simplifiés.

débit journaliers moyens disponibles à Gien entre le 01 février 1996 et le 30 juin 2008 (Fig. 6.35). L'hydrogramme 1996-2008 illustre la variabilité inter-annuelle des débits sur la Loire moyenne avec les périodes d'étiage (été et automne) et des débits plus élevés au printemps et en hiver. La prise en compte de périodes d'étiage joue un rôle important dans les évolutions du lit.

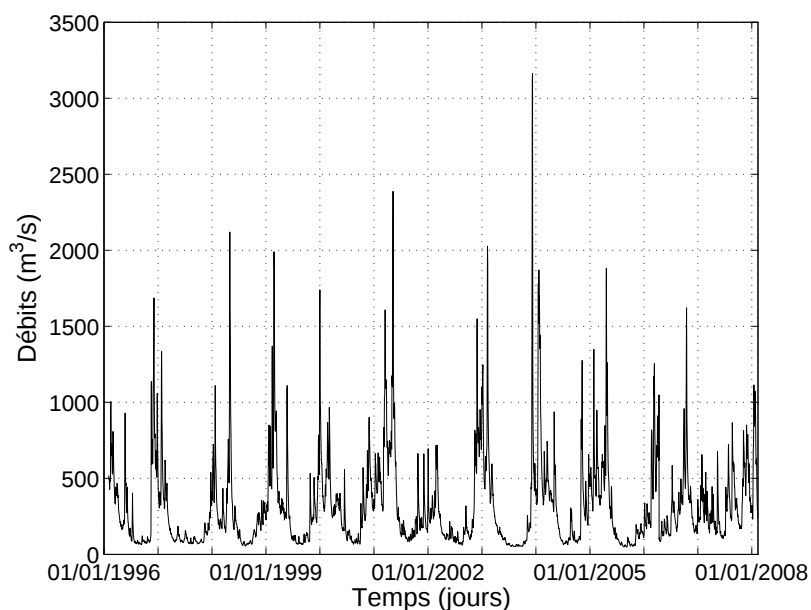


FIGURE 6.35 – Hydrogramme 1996 - 2008 à la station hydrométrique de Gien

Le temps de calcul pour un modèle « réel » étant relativement long du fait de la densité des sections et de la longueur de la chronique de débit à simuler, seule une simulation avec la géométrie simplifiée et les chroniques de débit simplifiées avec l'approche descriptive à seuils a été réalisée. La chronique de débit réelle s'étend sur 4393 jours ; la simplification permet de réduire cette chronique à 2550 jours. Les options de calcul des simulations v0 et v1 étant les plus probantes pour les sites

de références de Belleville et de Bréhémont seules ces deux options sont ici considérées (Tab. 6.12).

Identifiant simulation	gui-gsqsd-v0	gui-gsqsd-v1
Contrainte (τ)	MPC	MPC
Seuil de mise en mouvement (τ_{cr})	Shields	Ikeda
Option de dépôt	4	4
Option de capacité solide	3	3

TABLE 6.12 – Guilly : récapitulatif des différentes simulations effectuées avec le modèle en géométrie simplifiée et la chronique de débits simplifiée avec l’approche descriptive à seuils.

Le bilan des volumes obtenus sur les différents tronçons est présenté sur la figure 6.36. Les deux simulations donnent des résultats similaires permettant de reproduire correctement les tendances d’incision des tronçons 2 et 3. Le dépôt observé sur le tronçon 3 n’est pas reproduit. La simulation gui-gsqsd-v1 donne une incision légèrement supérieure au calcul gui-gsqsd-v0. La prise en compte du facteur de pente d’Ikeda ne semble pas jouer sur les résultats pour les méandres de Guilly.

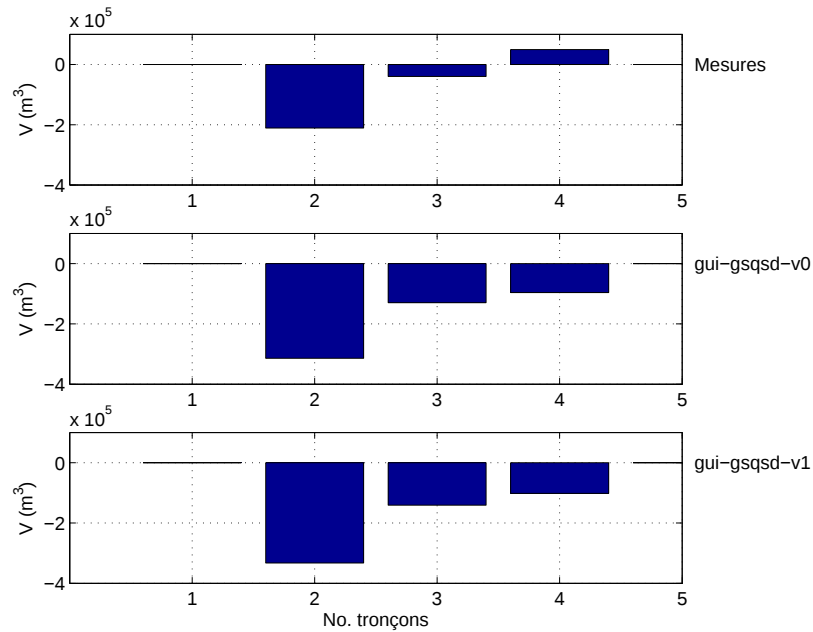


FIGURE 6.36 – Guilly : volumes déposés ou érodés obtenus avec la géométrie réelle et la chronique de débit 1996 - 2008, simplifiée avec l’approche descriptive à seuils.

6.4 Synthèse du chapitre

6.4.1 Avantages et limites des différentes options de calcul

Les principales options de calcul de transport sédimentaire du modèle RubarBE ont été testées sur les trois sites de référence avec des simulations en géométrie et chroniques de débits réelles et simplifiées. Les options permettant de reproduire correctement les volumes érodés ou déposés sur un

tronçon ne correspondent pas nécessairement aux options permettant un calcul de la déformation de la section cohérente avec les mesures. Afin de pouvoir comparer les différentes simulations réalisées sur les sites de références, les BSS ont été calculés. Le BSS est déterminé à partir des valeurs de cotes moyennes du fond et le $BSSbis$ est basé sur les volumes (cf. paragraphe 5.5). Les valeurs de BSS et $BSSbis$ obtenues pour les différentes simulations sur les sites de Belleville et de Bréhémont sont données dans le tableau 6.13.

BELLEVILLE	BSS	BSSbis	BREHEMONT	BSS	BSSbis
bel-reel-v0	0,06	0,66	bre-reel-v0	0,13	0,93
bel-reel-v1	-0,08	0,49	bre-reel-v1	0,31	0,63
bel-reel-v2	-0,18	-0,39	bre-reel-v2	-1,25	-3,56
bel-reel-v3	-0,04	-0,63	bre-reel-v3	0,14	0,62
bel-reel-v4	-0,08	-0,17	bre-reel-v4	-0,03	-0,13
bel-gsqsd-v0	-0,01	0,04	bre-gsqsd-v0	-0,1	0,12
bel-gsqsd-v1	-0,05	-0,40	bre-gsqsd-v1	-0,1	-0,07

TABLE 6.13 – Estimations du BSS pour les différentes simulations. Pour les simulations bel-gsqsd-v0 et bel-gsqsd-v1, les résultats des tronçons 1 et 7 ont été écartés du calcul.

Pour les modèles réalisés sur le secteur de Belleville, avec la géométrie réelle et la chronique de débit réelle (simulations bel-reel), les options de calcul v0 et v1 donnent les résultats les plus satisfaisants en terme de volume; le $BSSbis$ est égal à 0,66 et 0,49 respectivement. Ces modèles devraient donc également présenter les valeurs de BSS les meilleures. Toutefois, contrairement au calcul de BSS , le calcul du $BSSbis$ est réalisé à l'échelle du tronçon; on observe donc un lissage des résultats qui explique le fait qu'une simulation peut donner une valeur de BSS mauvaise et une valeur de $BSSbis$ correcte. Sur le site de Bréhémont, les simulations les plus cohérentes avec les mesures en terme de volume, sont les simulations bre-reel-v0, bre-reel-v1 et bre-reel-v3 ($BSS > 0,6$). Ces trois simulations présentent également les valeurs de BSS les meilleures ($BSS > 0,13$). Le BSS étant basé sur les cotes moyennes du fond et les évolutions constatées étant moins fortes que sur le site de Belleville, ce résultat semble cohérent. Pour les modèles réalisés avec la géométrie simplifiée et la chronique de débit simplifiée, le bilan des volumes déposés ou érodés sur les tronçons, obtenu avec les options de calcul v0, est plus satisfaisant que les résultats des simulations effectuées avec les options v1 ($BSSbis = 0,04$ pour le site de Belleville et $BSSbis = 0,12$ pour le site de Bréhémont avec les options de calcul v0). Les évolutions du profil en long obtenus avec la géométrie simplifiée sont médiocres pour les deux sites quelles que soient les options de calcul ($BSS < 0$).

Les valeurs obtenues pour le $BSSbis$ sur le site de Guilly sont de 0,17 et 0,15 pour les simulations qui-gsqsd-v0 et qui-gsqsd-v1 respectivement. Les approches de simplification de la géométrie et des chroniques de débit permettent ainsi d'obtenir des volumes déposés ou érodés cohérents avec les mesures à l'échelle du tronçon. En terme de déformation du fond, les simplifications apportées à la

géométrie ne permettent pas d'obtenir des déformations comparables aux mesures.

La formule de transport appliquée dans les modèles hydrauliques est également discutable. La formule de Meyer-Peter et Müller (1948) utilisée dans les différentes simulations donne des résultats satisfaisants. Cependant, il se peut qu'une surestimation du transport solide (la formule de MPM ne considère que le charriage) permette de compenser les incertitudes topographiques, granulométriques et les incertitudes inhérentes à la modélisation.

6.4.2 Apports et limites de la géométrie simplifiée

La géométrie simplifiée définie pour les trois sites de référence reproduit correctement les pentes longitudinales de la géométrie réelle. Les tests hydrauliques permettent de confirmer cette cohérence entre la géométrie lissée et la géométrie réelle. En effet, les hauteurs d'eau simulées avec la géométrie simplifiée sont proches des hauteurs d'eau calculées avec le modèle en géométrie réelle.

Les simulations avec évolutions des fonds, effectuées avec la géométrie simplifiée, donnent des résultats mitigés. Ainsi, sur le site de Belleville, tous les modèles d'évolution effectués en géométrie simplifiée induisent de l'incision sur le premier tronçon. En revanche cette constatation n'est pas vérifiée sur les sites de Bréhémont et Guilly. La seule différence entre le site de Belleville et les deux autres étant l'anthropisation, ce facteur peut être considéré comme étant la cause de cette incision à l'amont. Les seuils et ponts n'étant pas simplifiés, l'erreur pourrait venir de là. L'application des approches de simplification à la Loire moyenne complète dans le chapitre 7 permettra de vérifier si le modèle global permet de lisser ce phénomène local.

La simplification de la géométrie permet, dans tous les cas, un gain de temps de calcul considérable : les modèles tournent en quelques dizaines d'heures au lieu des dizaines de jours nécessaires pour un modèle « réel » soit une réduction d'un facteur 30.

Une des limites de la géométrie simplifiée est qu'elle n'intègre pas les îles et les chenaux secondaires ; les sections se déforment donc sur un chenal unique. Une approche de simplification maillée a été testée sur le site de Bréhémont. Bien que les sections lissées soient a priori plus cohérentes avec les sections réelles, les résultats de la validation hydraulique montre qu'un lissage en chenal unique est plus pertinent. Un calcul sédimentaire sur un tronçon lissé et maillé devrait être effectué afin de valider (ou invalider) cette approche. Ce calcul n'a pas abouti avec le modèle RubarBE maillé ; le modèle étant en cours de validation.

6.4.3 Apports et limites des chroniques de débits simplifiées

Les approches de simplifications des chroniques de débits réalisées avec les courbes de débits classés ascendantes, descendantes et en pyramides ne sont pas probantes. Au vu des résultats obtenus avec les tests effectués sur Belleville, il semble que la représentation des phases de montées et de

descentes de crues soit nécessaire pour modéliser convenablement les évolutions du fond. L'intensité, la durée et la fréquence des crues jouent donc un rôle important sur la morphologie du cours d'eau.

La simplification des chroniques de débit avec l'approche descriptive à seuils n'est pas concluante pour les tests effectués sur la géométrie réelle sur le site de Belleville. Sur les sites de Bréhémont et de Guilly, cette simplification de la chronique donne des résultats cohérents avec les mesures. La simplification des pics de crues en cinq points ne semble pas poser d'incohérence dans les calculs d'évolution du fond. La définition des périodes intermédiaires aux crues est plus discutable, en particulier pour les sites anthropisés comme celui de Belleville.

Les approches de simplification des hydrogrammes de crue conservant la forme ou le volume ont été testées sur le site de Belleville. Ces deux approches fournissent des résultats similaires et accentuent l'incision sur le tronçon amont sans toutefois détériorer significativement les tendances d'évolution des autres tronçons. L'application de ces approches pour dériver des chroniques prédictives ne semblent donc pas aberrante.

Le facteur d'accélération appliqué à l'hydrogramme, testé sur le site de Belleville, produit des résultats satisfaisants sur la géométrie réelle tant que le facteur d'accélération est inférieur à 2. Toutefois le gain de temps n'est pas suffisant pour envisager des simulations sur plusieurs décennies. De plus, le calcul n'aboutit pas avec la géométrie simplifiée même si un facteur d'accélération plus petit est utilisé.

7

Application à la Loire moyenne

Les simplifications de la géométrie et des chroniques de débits les plus pertinentes sont appliquées à la Loire moyenne. Il s'agit de modéliser les tendances d'évolutions du lit entre 1996 et 2006, et de comparer ces résultats aux évolutions obtenues précédemment sur les sites de référence de Belleville et de Guilly. Une première partie détaille le calage hydraulique du modèle Loire moyenne nécessaire aux simplifications de la géométrie. Le modèle basé sur les bilans sédimentaires, Mobise, est également appliqué. Deux tests de chroniques de débits prédictives sont ensuite effectués afin de tester l'influence de l'ordre des crues sur les évolutions.

7.1 Calage du modèle hydraulique sur la géométrie réelle

Le modèle 1D de la Loire moyenne est basé sur les données topographiques de 1995 et 1996 ; il est défini par 1880 profils en travers interpolés tous les 300 m environ, et comporte 47 sections de pont. Il faut noter que 11 ponts supplémentaires affectent l'écoulement mais qu'aucune donnée topographique ou caractéristique de ces 11 structures n'était disponible. 16 lois d'ouvrages ont également été introduites dans le modèle. La localisation et la description de ces lois de seuils sont fournies en Annexe D. Les conditions aux limites sont définies à l'amont par l'hydrogramme enregistré à la station de Givry et à l'aval par la courbe de tarage de Montjean-sur-Loire. Les apports latéraux du Cher, de l'Indre, de la Vienne et de la Maine ont été introduits dans le modèle en déduisant leurs hydrogrammes par différence entre l'hydrogramme sur la Loire en amont de la confluence et celui en aval.

Le calage du coefficient de rugosité du lit mineur a été effectué pour dériver les paramètres hydrauliques des tronçons pour des débits d'étiage et des débits correspondants au plein bord (cf. paragraphe 3.3.3). Les valeurs permettant un calage cohérent avec les données de lignes d'eau disponibles sont $K_{min} = 28 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ pour les tronçons présentant des îles et $K_{min} = 32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ pour les tronçons sans îles. Le calage du coefficient de rugosité du lit majeur a été effectué sur les crues de décembre 1996 ($Q_{max} = 1690 \text{ m}^3/\text{s}$ à Gien et $Q_{max} = 2560 \text{ m}^3/\text{s}$ à Montjean-sur-Loire) et décembre 2003 ($Q_{max} = 3300 \text{ m}^3/\text{s}$ à Gien et $Q_{max} = 2890 \text{ m}^3/\text{s}$ à Montjean-sur-Loire), un K_{maj} de $15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ est posé. Les erreurs relatives $\Delta H/H$ obtenues pour ces deux crues sont présentées sur les figures 7.1 et 7.2. Les erreurs obtenues pour le calage sur la crue de décembre 1996 sont plus faibles que

pour la crue de 2003. Il est rappelé que sur l'amont du secteur d'étude, la crue de 2003 a entraîné le fonctionnement des déversoirs de La Charité-sur-Loire, Léré et Gien, qui n'ont pas été intégrés dans le modèle (cf. liste des déversoirs en Annexe A).

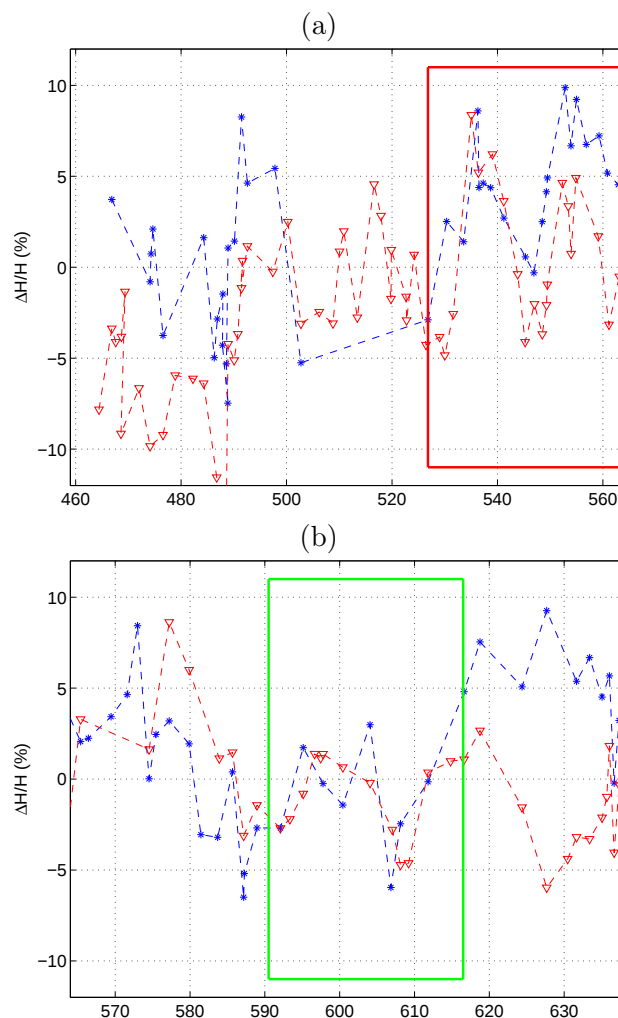


FIGURE 7.1 – Loire moyenne : erreurs relatives $\Delta H/H$ du modèle en géométrie réelle sur les crues de décembre 1996 (en bleu) et décembre 2003 (en rouge) (a) entre le Bec d'Allier et Gien et (b) entre Gien et Orléans. Les abscisses des graphes diffèrent. Les rectangles localisent les sites de référence : en rouge Belleville et en vert Guilly.

Les erreurs les plus fortes se localisent au droit des ouvrages, comme au pont de La Charité-sur-Loire (PK 488,65) où on obtient un $\Delta H/H$ de -12,27% soit un ΔH de 66 cm pour la crue de décembre 2003. Le secteur localisé entre le pont de Meung-sur-Loire (PK 656,44) et Blois (PK 696,5) présente des erreurs fortes liées à la présence de seuils (seuil de la centrale de St Laurent des Eaux et barrage de Blois). De façon similaire, les nombreux ponts situés sur le secteur de Tours (PK 757), rendent le calage de la ligne d'eau difficile. À l'aval des Ponts-de-Cé (PK 864), la géométrie complexe et le peu de données de lignes d'eau pour ces deux crues nous permettent d'obtenir un calage cohérent. Il est également rappelé que de nombreuses échelles limnimétriques sont localisées

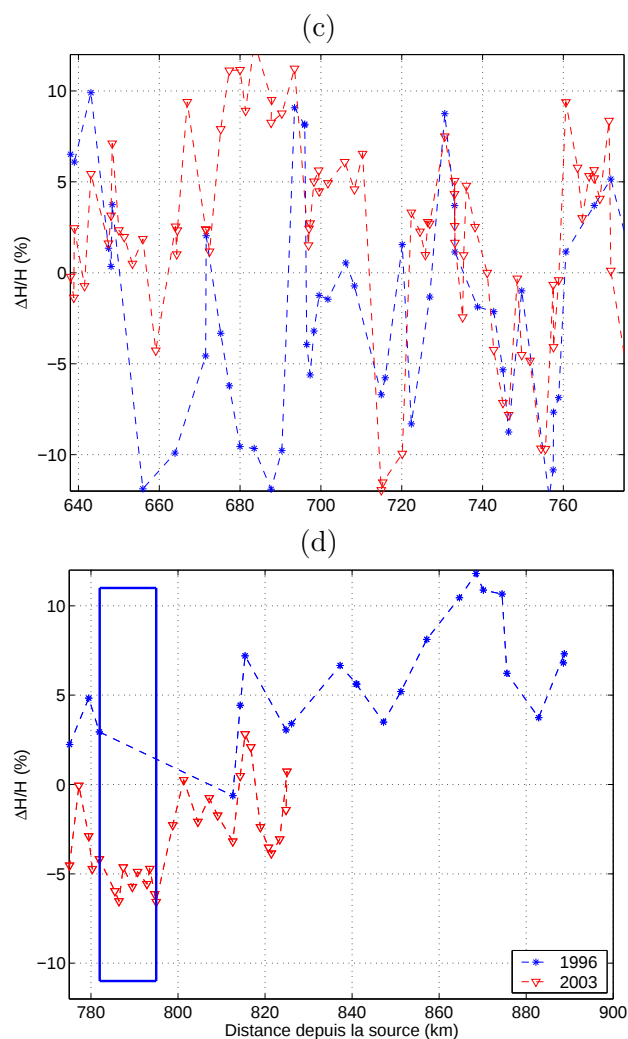


FIGURE 7.2 – Loire moyenne : erreurs relatives $\Delta H/H$ du modèle en géométrie réelle sur les crues de décembre 1996 et décembre 2003 entre (c) Orléans et la confluence avec le Cher et (d) de la confluence avec le Cher à Montjean-sur-Loire. Les abscisses des graphes diffèrent. Le rectangle bleu localise le site de référence de Bréhémont.

au droit de ces ouvrages d'art, où les turbulences peuvent influencer la cote mesurée. De plus les cotes de l'eau relevées sur le terrain sont sujettes aux imprécisions de lecture ainsi qu'aux incertitudes sur les débits correspondants à ces mesures.

Les temps de propagation des crues ont également été vérifiés pour les crues de 1996 et 2003 aux stations de Gien, Orléans, Saumur et Montjean-sur-Loire. Les temps de propagation obtenus pour la crue de décembre 1996 sont présentés sur la figure 7.3. La propagation à l'amont du site d'étude (entre le Bec d'Allier et Orléans) est correcte ; le débit de pointe est toutefois surestimé à Gien et légèrement sous-estimé à Orléans. Il faut noter que seuls les affluents majeurs sont intégrés dans le modèle ; l'omission des petits affluents peut expliquer cette différence. L'hydrogramme calculé à Saumur reproduit correctement les mesures. A Montjean-sur-Loire, l'intensité du pic est correctement reproduite par le modèle mais avec une avance temporelle. La descente de crue est également plus

rapide que dans la réalité. Cette différence est vraisemblablement liée aux estimations des apports de la Vienne et de la Maine.

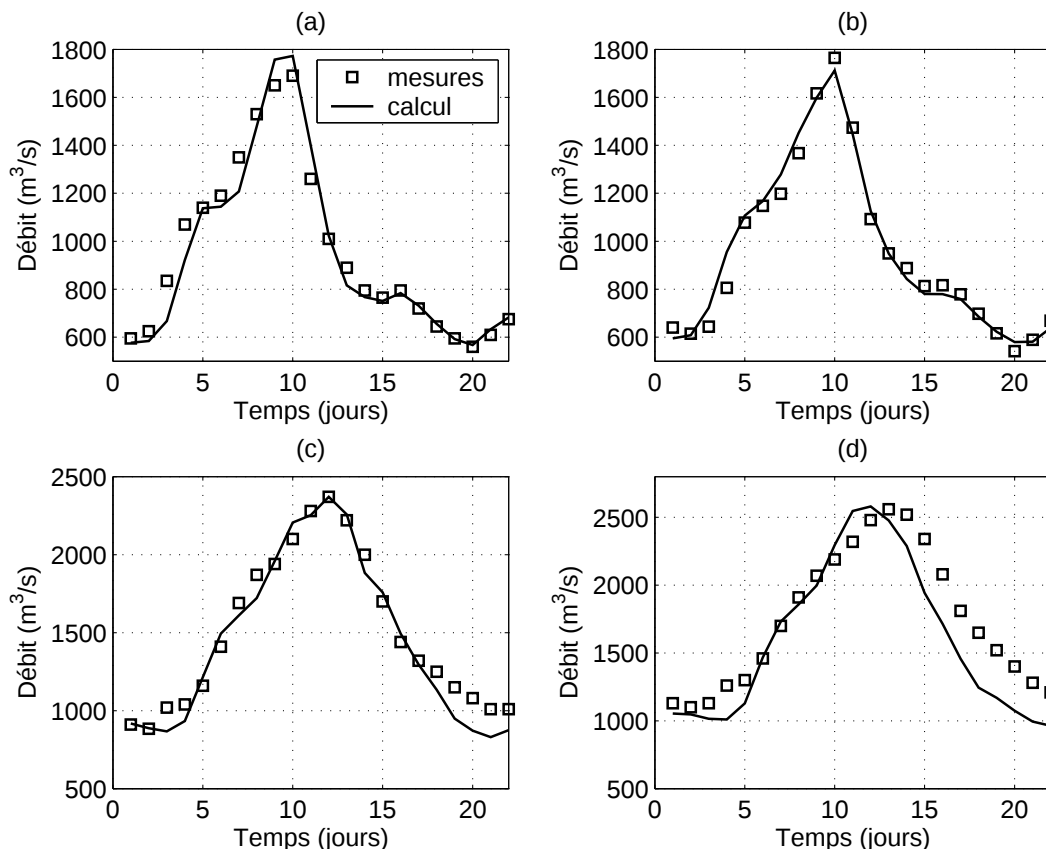


FIGURE 7.3 – Temps de propagation de la crue de décembre 1996 aux stations de (a) Gien (PK 564), (b) Orléans (PK 638), (c) Saumur (PK 814), et (d) Montjean-sur-Loire (PK 897).

7.2 Simplification de la géométrie

La simplification de la géométrie a été réalisée en découpant le modèle en quatre afin de faciliter la gestion des fichiers tout en disposant de conditions aux limites correctes. Les quatre modèles suivants ont été définis :

- du Bec d’Allier à l’amont de Gien (PK 459,8 au PK 563,9),
- de Gien à Orléans (PK 563,9 au PK 638,1),
- Orléans à la confluence avec le Cher (PK 638,1 au PK 775,1),
- de l’aval de la confluence avec le Cher à Montjean-sur-Loire (PK 775,1 au PK 897,2).

Modèle 1 : du Bec d’Allier à Gien

Le modèle entre le Bec d’Allier (PK 459,82) et Gien (PK 563,95) est défini par 41 tronçons homogènes. Le lissage de la géométrie a été effectué avec $n = 16$ lignes d’eau, pour des débits

variant de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ à $3800 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce secteur est ainsi caractérisé par 92 sections (82 sections pour les tronçons et 10 structures artificielles). Le profil en long simplifié et les noms de quelques villes sont illustrés sur la figure 7.4. La différence d'altitude entre la géométrie réelle et la géométrie simplifiée peut paraître forte (jusqu'à $+1,5 \text{ m}$). Le profil en long de la géométrie réelle étant réalisé à partir des données de points bas, cette différence n'est pourtant pas aberrante. Le critère de précision δz (cf. paragraphe 5.1.3) est compris entre $3,5 \text{ cm}$ et 61 cm .

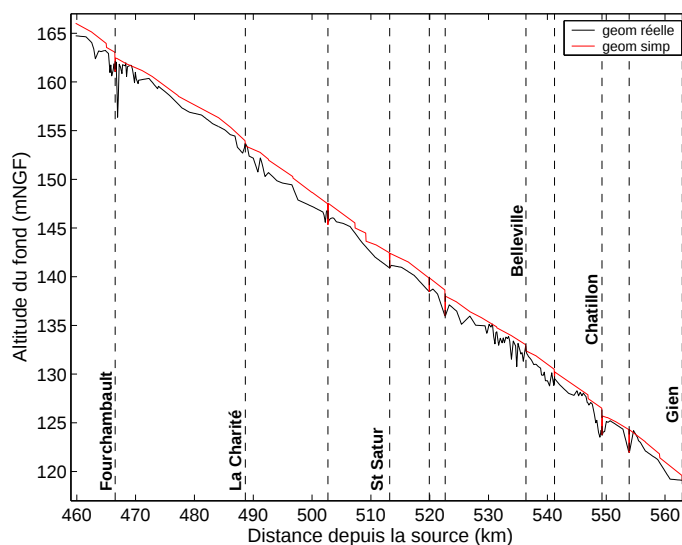


FIGURE 7.4 – Bec d'Allier à amont de Gien : profil en long du modèle réel (basé sur les points bas des sections) et profil en long de la géométrie simplifiée. Les droites verticales en pointillées représentent les structures artificielles.

Les tests hydrauliques sur la crue de décembre 1996 ($Q_{max} = 1690 \text{ m}^3/\text{s}$ à Gien) ont également été réalisés afin d'estimer les erreurs apportées par la géométrie simplifiée. Les erreurs relatives $\Delta H/H$ obtenues sur cette crue sont présentées sur la figure 7.5 et sont comparées aux erreurs relatives obtenues sur la géométrie réelle. La géométrie simplifiée ne dégrade pas significativement les résultats de lignes d'eau ; ainsi, les valeurs de $\Delta H/H$ calculées avec la géométrie réelle et la géométrie simplifiée suivent les mêmes tendances. A l'amont du secteur (jusqu'au PK 490), la simulation en géométrie simplifiée sous-estime les hauteurs d'eau, contrairement à la simulation en géométrie réelle qui les surestimait. Sur le secteur de Belleville (PK 527 à PK 564), la géométrie lissée permet de réduire les erreurs. Les erreurs relatives sont comprises entre -10% et $+10\%$ pour les deux géométries (réelles et simplifiées) ; la géométrie lissée est donc validée pour des débits équivalents à ceux de la crue de 1996.

Modèle 2 : de Gien à Orléans

Ce modèle s'étend de l'aval du pont de la station hydrométrique de Gien (PK 564,050) à l'amont du Pont Royal d'Orléans (PK 638,105) ; il est caractérisé par 35 tronçons homogènes. Le lissage de

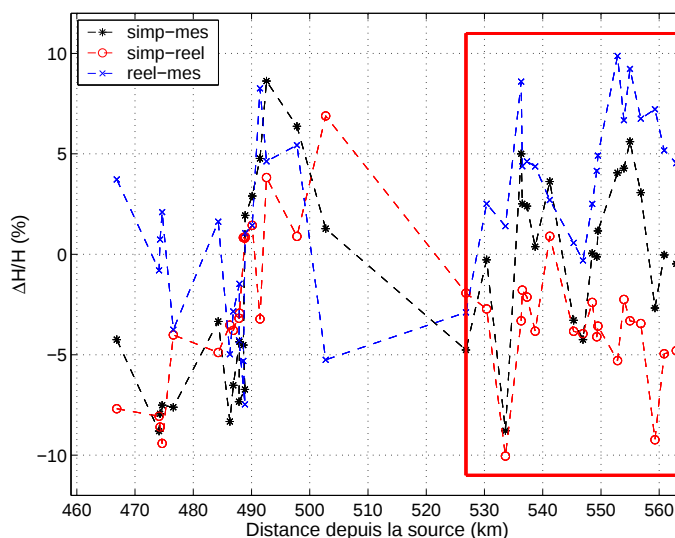


FIGURE 7.5 – Bec d’Allier à amont de Gien : erreurs relatives $\Delta H/H$ du modèle en géométrie simplifiée sur la crue de décembre 1996. « simp » fait référence au modèle en géométrie simplifiée, « reel » au modèle en géométrie réelle et « mes » aux mesures. L’encadré rouge indique la localisation du site de référence de Belleville.

la géométrie a été effectuée avec $n = 15$ lignes d’eau, pour des débits variant de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ à $3800 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce secteur est ainsi caractérisé par 77 sections (70 sections pour les tronçons et 7 sections réelles de structures artificielles). Le critère de précision δz est compris entre 5 cm et 45 cm, avec la valeur maximale obtenue pour le tronçon délimité à l’aval par le seuil de la centrale de Dampierre (PK 573,15). Le profil en long lissé est présenté sur la figure 7.6. Le profil en long lissé est généralement plus haut que le profil en long réalisé sur les points bas de la géométrie réelle. En certains points, comme à l’amont du pont de Sully-sur-Loire (PK 587,6), la cote du profil lissé est inférieure à la cote minimum du fond réelle. Ces points particuliers correspondent à des sections présentant un point bas localisé.

Le test hydraulique sur la géométrie simplifiée a été réalisé sur la crue de décembre 1996. Les erreurs relatives obtenues avec cette simulation sont présentées sur la figure 7.7. Les valeurs de $\Delta H/H$ obtenues avec la géométrie réelle et la géométrie simplifiée suivent les mêmes tendances. La majorité des erreurs relatives déterminées est comprise entre -10% et +10%. Toutefois, à l’amont de Sully-sur-Loire (PK 587), les erreurs relatives entre le modèle en géométrie simplifiée et les mesures sont supérieures à -10%. Cette erreur est associée à la présence de deux ponts, séparés d’environ 300 m, et causant de fortes instabilités dans le calcul en géométrie simplifiée.

Modèle 3 : d’Orléans à la confluence avec le Cher

Le modèle s’étend de l’aval du Pont Royal d’Orléans (PK 638,205) à l’amont de la confluence avec le Cher (PK 775,103) ; il est caractérisé par 54 tronçons homogènes et la présence de nombreux ouvrages d’art. Le lissage de la géométrie a été réalisé avec $n = 16$ lignes d’eau, pour des débits

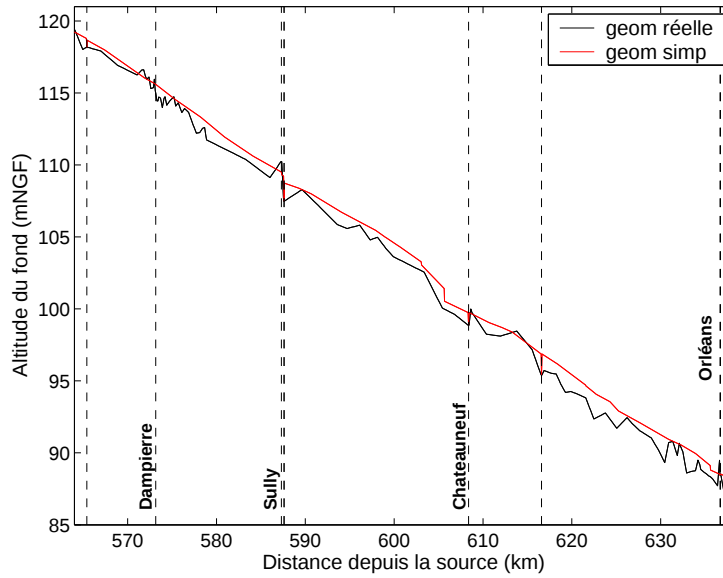


FIGURE 7.6 – Gien à Orléans : profil en long du modèle réel (basé sur les points bas des sections) et profil en long de la géométrie simplifiée. Les droites verticales en pointillées représentent les structures artificielles.

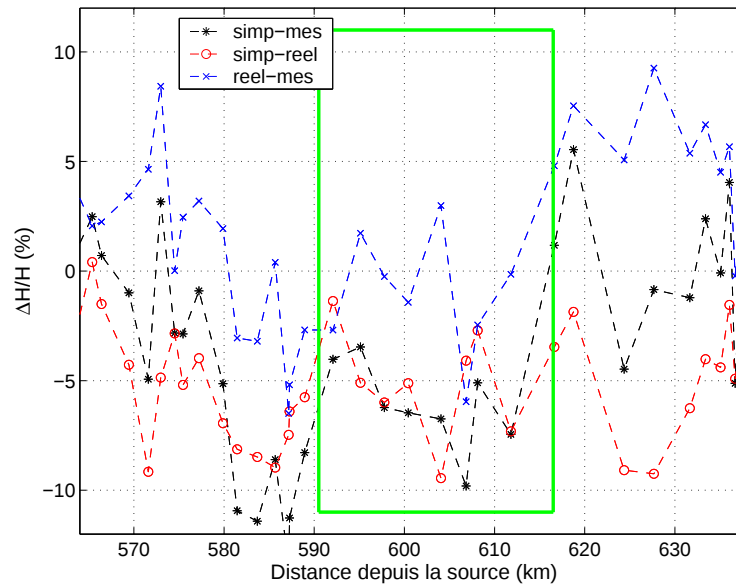


FIGURE 7.7 – Gien à Orléans : erreurs relatives $\Delta H/H$ du modèle en géométrie simplifiée sur la crue de décembre 1996. « simp » fait référence au modèle en géométrie simplifiée, « reel » au modèle en géométrie réelle et « mes » aux mesures.

variant de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ à $3800 \text{ m}^3/\text{s}$. Le profil en long lissé obtenu est illustré sur la figure 7.8. Le critère de précision δz (cf. paragraphe 5.1.3) varie entre 3 cm et 64 cm ; le tronçon présentant le δz le plus fort est situé à l'amont du barrage de Blois (PK 695). La pente du profil en long lissé est cohérente avec la géométrie initiale. Seul le secteur de Tours (PK 760) présente une géométrie lissée avec une marche à contre courant liée à la succession de nombreux ponts et au peu de sections réelles

définissant ce secteur. Ce tronçon sera donc considéré par la suite comme un tronçon non érodable.

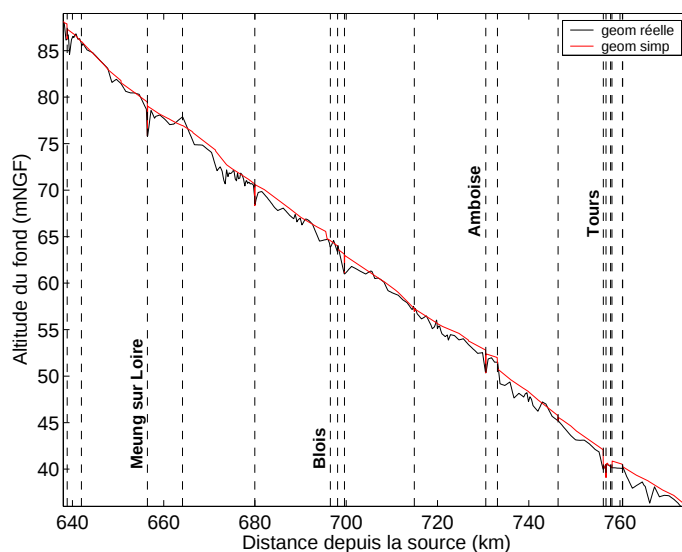


FIGURE 7.8 – Orléans à la confluence avec le Cher : profil en long du modèle réel (basé sur les points bas des sections) et profil en long de la géométrie simplifiée. Les droites en pointillées représentent les structures artificielles.

Le test hydraulique sur la géométrie simplifiée a été réalisé sur la crue de décembre 1996. Les erreurs relatives obtenues avec cette simulation sont présentées sur la figure 7.9. Les valeurs de $\Delta H/H$ obtenues avec la géométrie réelle et la géométrie simplifiée suivent les mêmes tendances et sont, pour la plupart, comprises entre -10% et +10%. Les erreurs les plus fortes sont localisées sur le secteur de Tours, où les données topographiques et le nombre conséquent de ponts ne permet pas de reproduire correctement les hauteurs d'eau. La valeur des erreurs relatives entre le modèle en géométrie simplifiée et les mesures est toutefois plus faible sur le secteur de Tours. Par contre, la géométrie simplifiée a tendance à détériorer les résultats à l'aval de Blois (PK 710).

Modèle 4 : de la confluence avec le Cher à Montjean-sur-Loire

Ce dernier secteur couvre l'aval de la confluence avec le Cher (PK 775,103) à la station hydro-métrique de Montjean-sur-Loire (PK 897,195). Ce secteur est défini par 37 tronçons homogènes. Le lissage a été réalisé avec $n = 12$ lignes d'eau, pour des débits variant de 100 m³/s à 4200 m³/s. Un débit de 70 m³/s, comme sur les modèles précédents, ne permettait pas d'effectuer un calcul hydraulique. Le profil en long de la géométrie lissée est présenté sur la figure 7.10 ; le profil en long obtenu est pertinent jusqu'au Ponts-de-Cé (PK 867). Après cet ouvrage aux Ponts-de-Cé, le lissage se détériore. En effet, les sections réelles présentent des géométries complexes avec des bras multiples et des îles centrales. Il faut également noter la présence de nombreux ouvrages de navigation (épis) qui affectent l'écoulement en étiage et rendent donc le lissage de la géométrie difficile. Le coefficient de précision δz varie entre 4 cm et 80 cm.

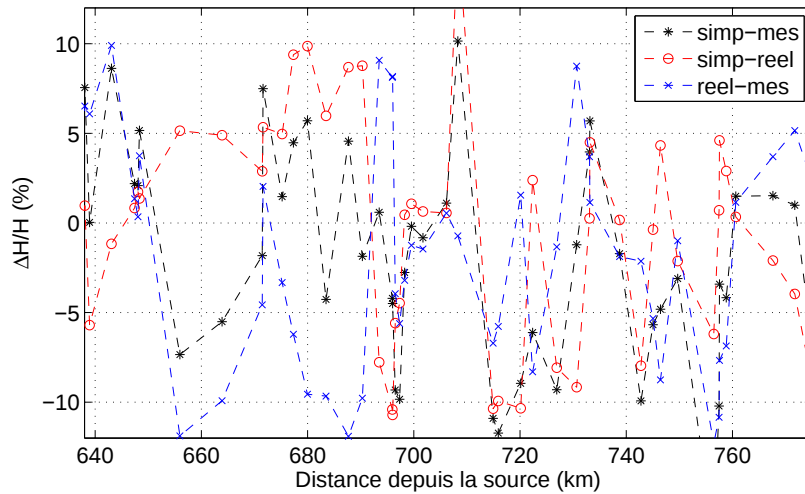


FIGURE 7.9 – Orléans à la confluence avec le Cher : erreurs relatives $\Delta H/H$ du modèle en géométrie simplifiée sur la crue de décembre 1996. « simp » fait référence au modèle en géométrie simplifiée, « reel » au modèle en géométrie réelle et « mes » aux mesures.

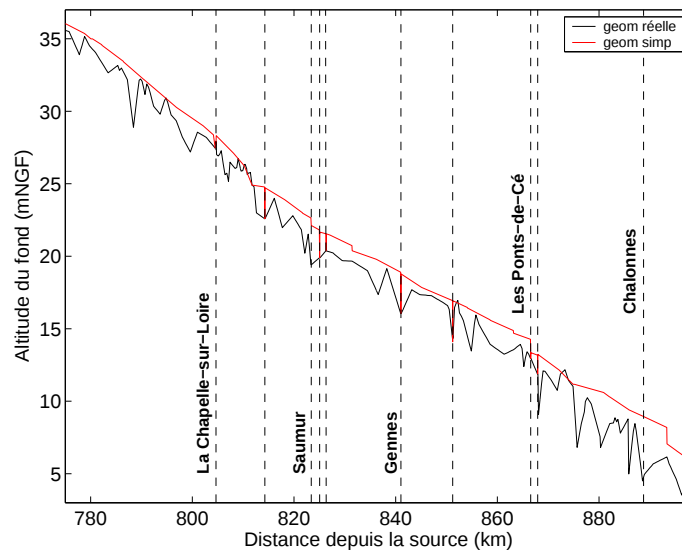


FIGURE 7.10 – Confluence avec le Cher à Montjean-sur-Loire : profil en long du modèle réel (basé sur les points bas des sections) et profil en long de la géométrie simplifiée. Les droites en pointillées représentent les structures artificielles.

Le test hydraulique sur la géométrie simplifiée a été réalisé sur la crue de décembre 1996. Les erreurs relatives obtenues avec cette simulation sont présentées sur la figure 7.11. Peu de mesures de lignes d'eau sont disponibles pour cette crue sur ce secteur, en particulier entre Bréhémont et Montsoreau (soit entre le PK 782 et le PK 812). La plus forte erreur observée entre les modèles et les mesures est localisée entre les Ponts-de-Cé et le pont de Sainte-Gemmes-sur-Loire où la valeur du $\Delta H/H$ atteint 11,8 %.

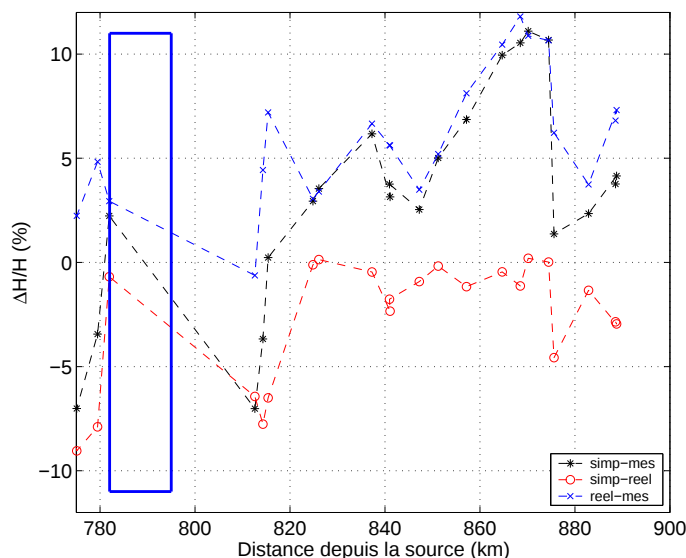


FIGURE 7.11 – Confluence avec le Cher à Montjean-sur-Loire : erreurs relatives $\Delta H/H$ du modèle en géométrie simplifiée sur la crue de décembre 1996. « simp » fait référence au modèle en géométrie simplifiée, « reel » au modèle en géométrie réelle et « mes » aux mesures.

7.3 Simplification des chroniques de débits

7.3.1 Simplification de la chronique 1996-2006 avec l'approche descriptive à seuils

Un premier test a été réalisé en simplifiant la chronique de débits disponible à la station hydro-métrique de Givry (station la plus à l'amont du modèle), entre le 01 septembre 1995 et le 31 août 2006 (Fig. 7.12), avec l'approche descriptive à seuils (cf. paragraphe 5.2.2). Il s'agit ainsi de vérifier la stabilité du modèle et de pouvoir comparer les résultats du modèle Loire moyenne complet aux résultats des modèles réalisés sur les sites de référence et aux mesures disponibles (pour les sites de Belleville et de Guilly). La simplification de la chronique existante permet de réduire sa durée initiale de moitié environ (soit 2075 jours au lieu des 4019 jours initiaux). Les apports des affluents ont été estimés en se basant sur la différence des hydrogrammes réels amont-aval et la prise en compte du Δt défini dans le paragraphe 2.3.4. La simplification de ces hydrogrammes avec l'approche descriptive à seuils nécessite de définir un débit seuil de crue Q_c et un débit seuil d'étiage Q_e . La valeur du débit seuil d'étiage, estimée à partir du ratio τ_{eff}/τ_{cr} pour la Loire moyenne, n'a pas été définie pour les affluents en raison du manque de données. Comme mentionné dans le paragraphe 5.2.2 le débit seuil de crue Q_c a été pris égal à la valeur du module pour chacun des affluents, soit :

- pour le Cher $Q_c = 95 \text{ m}^3/\text{s}$
- pour la Vienne $Q_c = 200 \text{ m}^3/\text{s}$
- pour la Maine $Q_c = 130 \text{ m}^3/\text{s}$

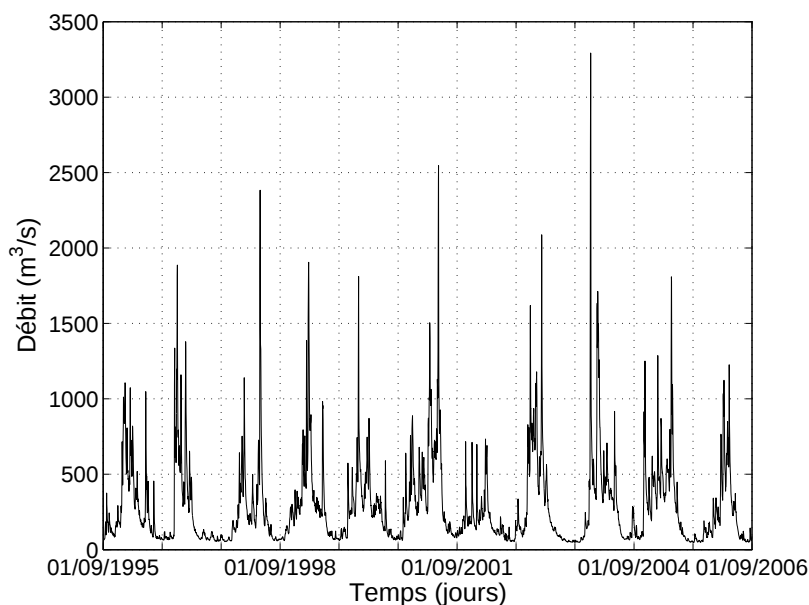


FIGURE 7.12 – Hydrogramme du 01 septembre 1995 au 31 août 2006 à la station hydrométrique de Givry.

7.3.2 Dérivation de chroniques prédictives

A partir des événements identifiés sur la chronique de débit réelle disponible à Givry entre le 01 Septembre 1995 et le 31 Août 2006, la décennie hydrologique est reconstituée avec l'approche des hydrogrammes synthétiques conservant la forme. Plutôt que d'essayer de prédire l'hydrologie future, il s'agit d'analyser l'influence de l'ordre des crues dans la chronique dérivée sur les évolutions morphologiques du lit. La chronique 1995 - 2006 est caractérisée par une crue de période de retour de 20 ans, deux Q_5 , six Q_2 et douze Q_1 . Une première chronique f_1 définit les crues en début de chronique, une deuxième f_2 permet de tester les mêmes événements en appliquant les crues en fin de chronique. Les tests effectués sur les sites de références ont démontré l'importance des périodes intermédiaires aux crues. Ces chroniques dérivées intègrent aussi des périodes intermédiaires aux pics de crue, d'une durée de 76 jours (cf. paragraphe 5.2.3.4).

7.4 Modèle d'évolution du lit de la Loire moyenne

Le modèle d'évolution de la Loire moyenne a été réalisé en concaténant les quatre modèles simplifiés définis précédemment. Les tests effectués sur les sites de références (cf. chapitre 6) nous ont permis de sélectionner les options de calcul les plus pertinentes en géométrie simplifiée afin d'étudier les bilans sédimentaires pour les différents tronçons. Trois tests sont effectués avec les options de calcul v_0 : une simulation avec la chronique de débit réelle 1996 - 2006 simplifiée avec l'approche descriptive à seuils (simulation LM-gsqsq- v_0), une simulation avec une chronique dérivée

dans laquelle les pics de crue se situent en début de chronique (LM-gsqsf1-v0) et en fin de chronique (LM-gsqsf2-v0). Les simulations effectuées sont récapitulées dans le tableau 7.1.

Identifiant simulation	LM-gsqsd-v0	LM-gsqsf1-v0	LM-gsqsf2-v0
Contrainte (τ)	MPC	MPC	MPC
Seuil de mise en mouvement (τ_{cr})	Shields	Shields	Shields
Option de dépôt	4	4	4
Option de capacité solide	3	3	3
Chronique de débit simplifiée	descriptive	crues au début	crues à la fin

TABLE 7.1 – Loire moyenne : récapitulatif des différentes simulations effectuées. Les différentes options de calcul sont décrites dans le paragraphe 5.3.

7.4.1 Application de la chronique 1996-2006 simplifiée

La chronique 1996-2006 simplifiée avec l’approche descriptive à seuils est appliquée sur la Loire moyenne. Le bilan des volumes déposés ou érodés sur les 167 tronçons définis sur la Loire, est présenté sur les figures 7.13 et 7.14. La définition des quatre sous-modèles est conservée pour la présentation des résultats. Ces résultats sont à comparer avec les variations annuelles du lit Δz , calculées à partir des lignes d’eau d’étiage (cf. paragraphe 4.3.2). Le calcul des volumes déposés ou érodés à partir des valeurs de Δz n’a pas été réalisé car la définition d’une largeur de bande active moyenne sur une période est délicate ; les incertitudes sont déjà fortes en raisonnant sur des mesures de lignes d’eau d’étiage moyenne sur un tronçon.

7.4.1.1 Applications sur les quatre sous-modèles

Evolutions entre le Bec d’Allier et Gien

Les volumes déposés ou érodés entre le Bec d’Allier et l’amont de la Charité-sur-Loire sont faibles par rapport aux évolutions obtenues sur le reste du secteur étudié (Fig. 7.13a). Le transport solide est influencé par la présence d’ouvrages ; cette influence n’étant pas liée à la hauteur brute du seuil mais à la perte de charge qu’il provoque pour les débits dits morphogènes. Ce remou de la ligne d’eau engendre un dépôt des sédiments à l’amont du seuil et une érosion à l’aval. Les tronçons présentant de l’incision sont, pour la plupart, localisés à l’aval d’ouvrages d’art. Certains ouvrages ont une influence conséquente, comme le pont de Bonny-sur-Loire situé au PK 541,2 (à l’aval du tronçon 32), qui engendre un volume érodé de 700 000 m³ sur le tronçon aval. L’incision observée sur le tronçon 10 (type 2dd, PKamont = 484,1) est vraisemblablement liée à la présence d’un ancien site d’extraction et d’une chevrette en rive gauche. Sur ce tronçon, l’abaissement de la ligne d’eau d’étiage entre 1996 et 2002 était estimé à 30 cm. Ces évolutions modélisées diffèrent cependant des variations annuelles de l’altitude du lit présentées dans le paragraphe 4.3.2. En effet, l’analyse

des lignes d'eau montrait une incision généralisée sur ce secteur tandis que les résultats du modèle semble illustrer une tendance au dépôt sur certains des tronçons. Il faut également mentionner les incertitudes associées aux données géométriques sur le secteur de la Charité-sur-Loire. Certains des profils du modèle, disponibles au format papier et en abscisse-cote, ont été repositionnés à l'aide d'un plan d'implantation.

Evolutions entre Gien et Orléans

Entre Gien et Orléans, la dynamique sédimentaire est moins forte que sur le secteur situé entre le Bec d'Allier et Gien (Fig. 7.13b).

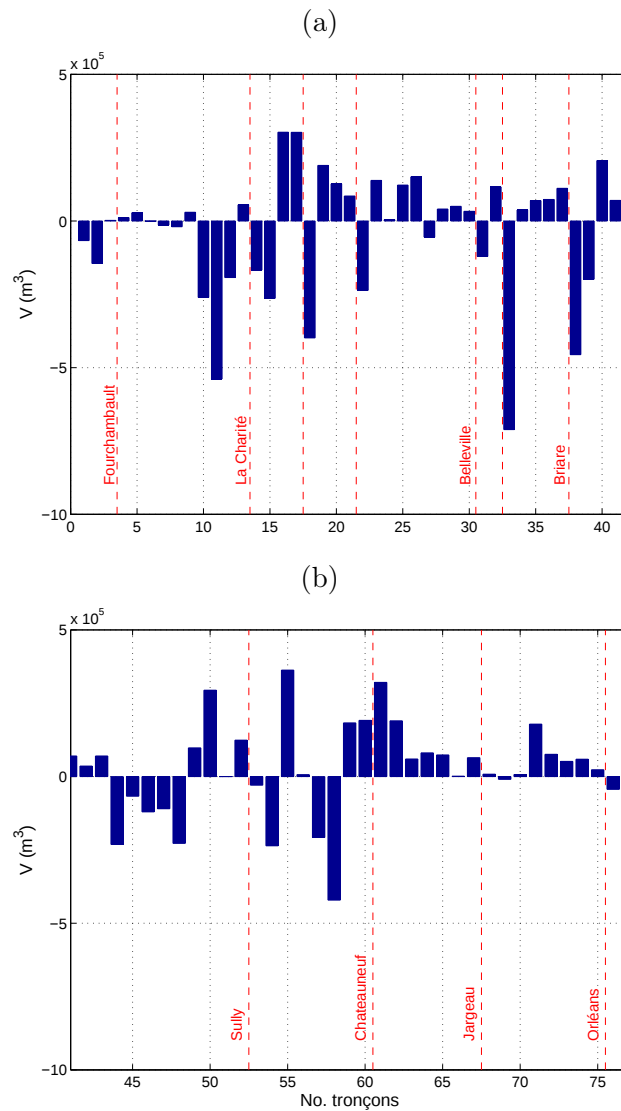


FIGURE 7.13 – Loire moyenne : bilan des volumes déposés ou érodés sur les différents tronçons localisés entre (a) le Bec d'Allier et Gien et (b) Gien et Orléans. Les droites en pointillées représentent les structures artificielles.

L'incision la plus forte est constatée sur le tronçon 58 (type 2dd, PK amont = 600,4) avec un volume érodé de 450 000 m³. L'analyse des lignes d'eau d'étiage révélait également un abaissement entre 1996 et 2002 ($\Delta H = -38$ cm) sur ce tronçon localisé dans les méandres de Guilly. Cette incision est peut-être associée à la présence d'un affleurement rocheux.

Les volumes érodés obtenus entre le tronçon 44 et 48 (PK 567,5 et 578,2 respectivement) correspondent à une zone présente des affleurements rocheux et le seuil de la centrale de Dampierre (PK 573). Les volumes déposés, calculés entre le tronçon 59 et le tronçon 65 (entre le PK 603 et le PK 616), correspondent à des tronçons localisés à l'aval des méandres de Guilly, qui présentaient plutôt des tendances à l'incision d'après l'analyse des lignes d'eau d'étiages. Le modèle indique de nombreux tronçons en dépôt alors que la majorité des tronçons seraient en érosion selon l'analyse effectuée dans le paragraphe 4.3.2. Il est à noter que les dates de comparaison diffèrent légèrement et que la géométrie simplifiée du modèle inclut les bancs et les chenaux secondaires contrairement à l'analyse des lignes d'eau d'étiage qui se focalise sur le chenal principal. De plus, les modélisations montraient que l'incision du chenal était souvent compensée par des dépôts sur les berges (cf. paragraphe 6.1.3.3).

Evolutions entre Orléans et la confluence avec le Cher

Les évolutions calculées entre Orléans et la confluence avec le Cher sont d'une « intensité » comparable aux évolutions obtenues entre le Bec d'Allier et Gien (Fig. 7.14a). Les incisions sont principalement localisées à l'aval des structures artificielles. L'incision la plus forte est observée à l'aval du pont de Beaugency (tronçons 91 et 92, PK 664,1 et PK 666,3) où le volume érodé atteint 700 000 m³. En plus de l'influence du pont de Beaugency, il faut signaler le seuil de la centrale de St-Laurent-des-Eaux, localisé à l'aval du tronçon 92. Une zone présentant des dépôts se distingue entre l'aval du seuil de la centrale de St-Laurent-des-Eaux (PK 671,5, tronçon 93) et le barrage de Blois (PK 696, tronçon 100). Sur cette zone l'analyse des lignes d'eau d'étiage révélait un secteur stable avec une légère tendance à l'incision. Les évolutions calculées à l'aval d'Amboise présentent de fortes incertitudes, en particulier entre Montlouis-sur-Loire (PK 746, tronçon 120) et Tours (PK 761, tronçon 126) où la présence de nombreux ponts n'a pas permis d'obtenir une géométrie lissée cohérente.

Evolutions entre la confluence avec le Cher et Montjean-sur-Loire

De la confluence avec le Cher jusqu'à Montjean-sur-Loire, les évolutions du lit sont faibles par rapport aux volumes déposés ou érodés observés à l'amont (Fig. 7.14b). Ce secteur apparaît donc relativement stable avec de légères tendances au dépôt. Ce dépôt calculé entre Montsoreau et St Mathurin est en accord avec les observations faites sur les lignes d'eau d'étiage analysées entre 1996 et 2002 (cf. paragraphe 4.3.2). A l'aval de St Mathurin, en revanche, le modèle donne de l'incision tandis que du dépôt était visible sur l'analyse des évolutions de la ligne d'eau d'étiage. Les tronçons

présentant de l'incision sont localisés pour la plupart à l'aval des ouvrages. De plus, il est rappelé que la géométrie simplifiée sur ce secteur n'est pas pertinente en raison d'une géométrie complexe, caractérisée par des chenaux multiples et des îles. Il est également intéressant de rapprocher les valeurs de τ_{eff}/τ_{cr} , mentionnées dans le chapitre 3 (cf. Fig. 3.11) des évolutions modélisées.

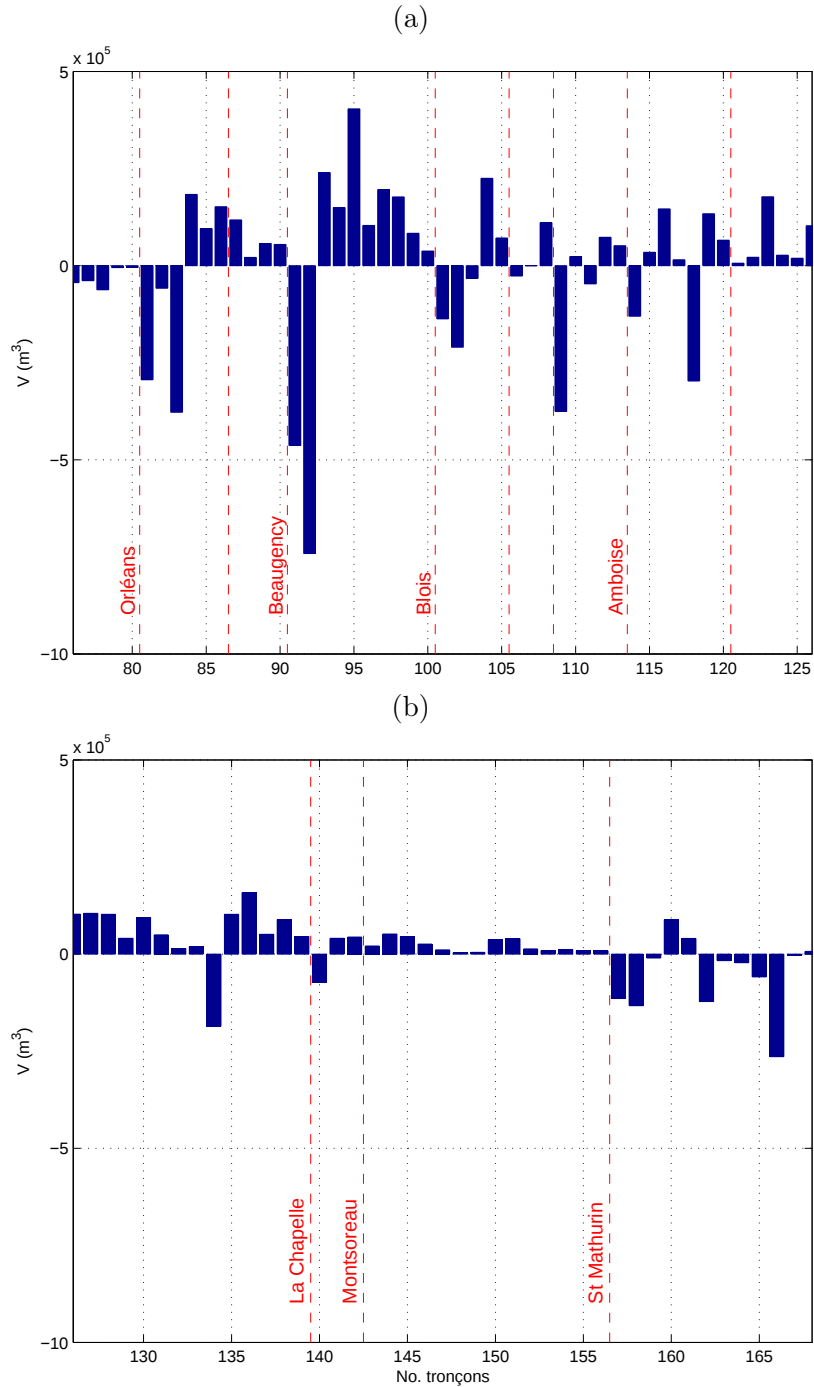


FIGURE 7.14 – Loire moyenne : bilan des volumes déposés ou érodés sur les différents tronçons localisés entre (a) Orléans et la confluence avec le Cher et (b) de la confluence avec le Cher à Montjean-sur-Loire. Les droites en pointillées représentent les structures artificielles.

Sur ce secteur, le ratio τ_{eff}/τ_{cr} atteint des valeurs fortes ($\tau_{eff}/\tau_{cr} > 4$) pour le débit biennal Q_2 qui devrait engendrer de fortes évolutions. Néanmoins, ce secteur présente aussi des valeurs du ratio W_{Q2}/H_{Q2} fortes qui peuvent expliquer cette faible dynamique morphologique.

7.4.1.2 Comparaison du modèle global et des modèles sur Belleville et Guilly

Les résultats obtenus avec le modèle RubarBE (avec la géométrie simplifiée et la chronique de débit 1996-2006 simplifiée) appliqué à la Loire moyenne sont comparés aux résultats des modèles locaux réalisés sur les sites de références de Belleville et de Guilly (cf. chapitre 6). Les résultats obtenus sur le site de Bréhémont ne sont pas comparés aux résultats du modèle global car le modèle local correspondait à la période 2000-2002.

Belleville

Les résultats, obtenus sur le site de référence de Belleville avec le modèle RubarBE et les approches de simplification de la géométrie et des chroniques de débit avec l'approche descriptive à seuils, et présentés dans le paragraphe 6.1.4.2 (simulation bel-gsqsd-v0), sont comparés aux résultats du modèle Loire moyenne complet (simulation LM-gsqsd-v0) appliqué sur la période 1996-1998. Les bilans des volumes déposés ou érodés sur les différents tronçons obtenus avec ces deux simulations sont présentés et comparés aux mesures sur la figure 7.15. Pour les tronçons 2 à 7, le modèle Loire moyenne complet permet d'obtenir les mêmes tendances d'évolutions que le modèle local tout en lissant les résultats. Cette atténuation des volumes déposés ou érodés est liée à la distance de chargement et donc à l'effet de lissage plus important sur le modèle de la Loire moyenne. Ainsi, l'incision observée sur le premier tronçon avec le modèle local (bel-gsqsd-v0) n'est plus visible sur le modèle global (LM-gsqsd-v0). Le modèle global ne permet toutefois pas de réduire l'incision observée sur le tronçon 7 (simulation bel-gsqsd-v0) ; ce tronçon est fortement influencé par le pont de Bonny-sur-Loire. Cependant, les mesures étant peu nombreuses sur ce tronçon, ces résultats ne sont pas nécessairement faux. Le modèle global ne permet pas de réduire l'incision obtenue sur le tronçon 5 avec la simulation locale bel-gsqsd-v0. Le dépôt observé sur ce tronçon, localisé à l'aval du seuil de la centrale, n'est pas correctement reproduit par les différentes simulations en géométrie simplifiée.

Le bilan des volumes déposés ou érodés, obtenu avec la simulation effectuée sur la Loire moyenne, pour la période 1996-2006, est ensuite comparée aux volumes calculés à partir des mesures de profils en travers disponibles entre ces deux dates. Les résultats sont présentés sur la figure 7.16. Sur cette décennie, les mesures révèlent du dépôt sur tous les tronçons hormis sur le tronçon 7 où une légère incision est mesurée. Le modèle Loire moyenne complet (LM-gsqsd-v0) reproduit correctement les dépôts observés sur les tronçons 2, 3, 4 et 6. De façon similaire aux observations faites précédemment, la simulation LM-gsqsd-v0 induit de l'incision sur les tronçons 5 et 7. Ces fortes incisions mentionnées dans le paragraphe sur les évolutions modélisées entre le Bec d'Allier et Gien correspondent à des

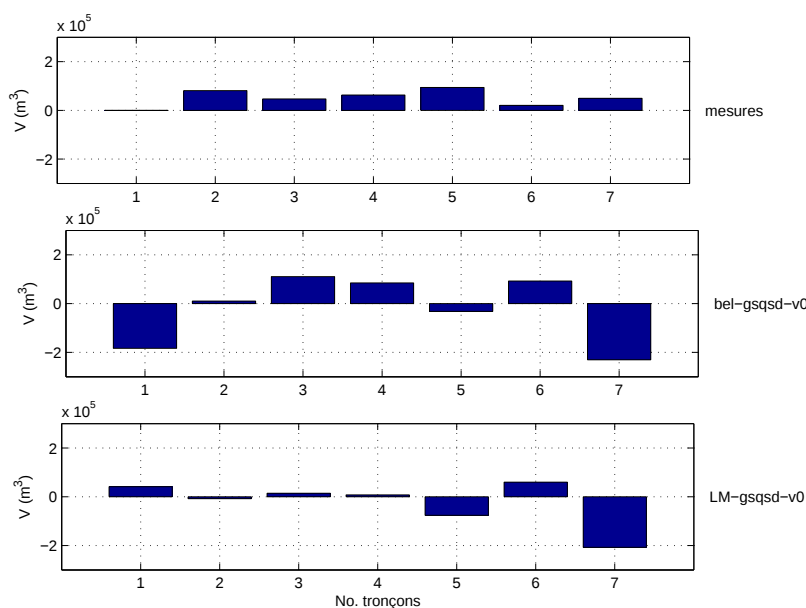


FIGURE 7.15 – Belleville : comparaison des volumes déposés ou érodés mesurés avec les volumes obtenus avec le modèle local (bel-gsqsd-v0) et le modèle global de la Loire moyenne (LM-gsqsd-v0).

tronçons localisés à l'aval d'ouvrages.

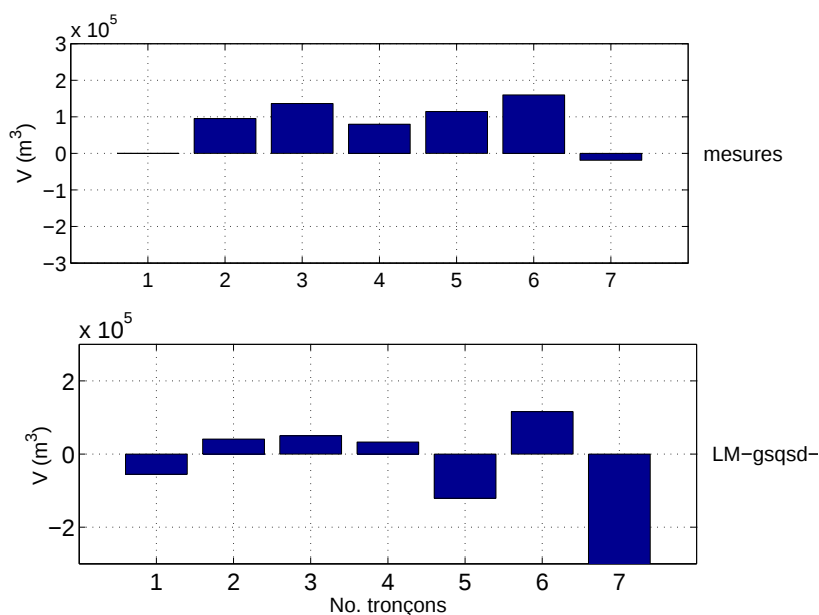


FIGURE 7.16 – Belleville : comparaison des volumes obtenus avec le modèle Loire moyenne en géométrie simplifiée et la chronique de débit simplifiée avec l'approche descriptive à seuils et les mesures 1996-2006. L'échelle des ordonnées est tronquée, le volume érodé sur le tronçon 7 atteint $700\,000 \text{ m}^3$.

Guilly

Les résultats du modèle RubarBE, appliqué sur le site de référence de Guilly entre 1996 et 2008

et décrit dans le paragraphe 6.3, sont comparés aux résultats obtenus avec le modèle Loire moyenne sur la période 1996 - 2006. Les périodes diffèrent légèrement mais aucun événement majeur ne s'est produit entre 2006 et 2008 (cf. Fig. 6.35, chapitre 6). Les bilans des volumes déposés ou érodés, obtenus avec ces deux simulations, sont présentés sur la figure 7.17 et comparés aux mesures. Contrairement au modèle local (simulation gui-gsqsd-v0) qui permettait de reproduire correctement les tendances des évolutions mesurées, le modèle complet de la Loire moyenne n'est pas satisfaisant sur ce secteur. Seule l'incision induite sur le tronçon 4 est cohérente avec les mesures.

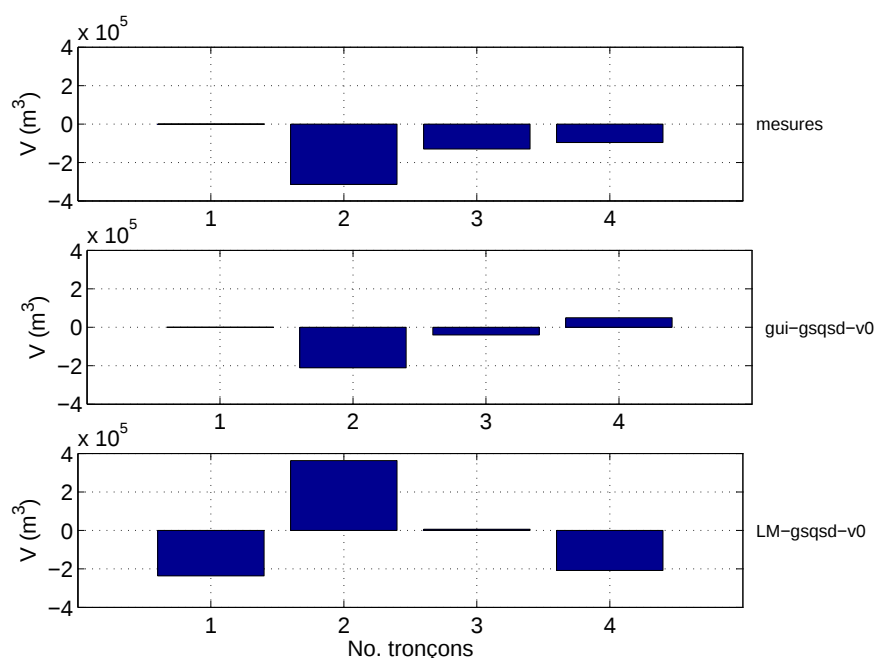


FIGURE 7.17 – Guilly : comparaison des volumes obtenus avec les modèles RubarBE en géométrie simplifiée avec la chronique de débit simplifiée avec l'approche descriptive à seuils (1996 - 2006) appliquée sur le site de référence et sur la Loire moyenne et les mesures 1996-2008.

7.4.2 Application des chroniques dérivées

Les deux tests effectués avec les chroniques dérivées ne prétendent pas prédire le futur hydrologique et géomorphologique de la Loire moyenne. Ces simulations ont uniquement pour but d'analyser l'influence de l'ordre des crues sur les évolutions du lit. Le bilan des volumes déposés ou érodés sur les différents tronçons localisés entre l'aval du Bec d'Allier et Gien pour les deux simulations est présenté sur la figure 7.18. Le modèle est très sensible à l'ordre des crues ; ainsi la simulation LM-gsqsf1-v0, introduisant les crues en début de chronique présente des fortes évolutions en début de calcul qui ont tendance à se lisser une fois les pics de crue modélisés. La simulation opposée LM-gsqsf2-v0, dans laquelle les crues se déroulent à la fin de la période donne de fortes incisions sur quasiment tous les tronçons.

La dérivation de chroniques prédictives nécessiterait donc pour être rigoureuse, d'appliquer une

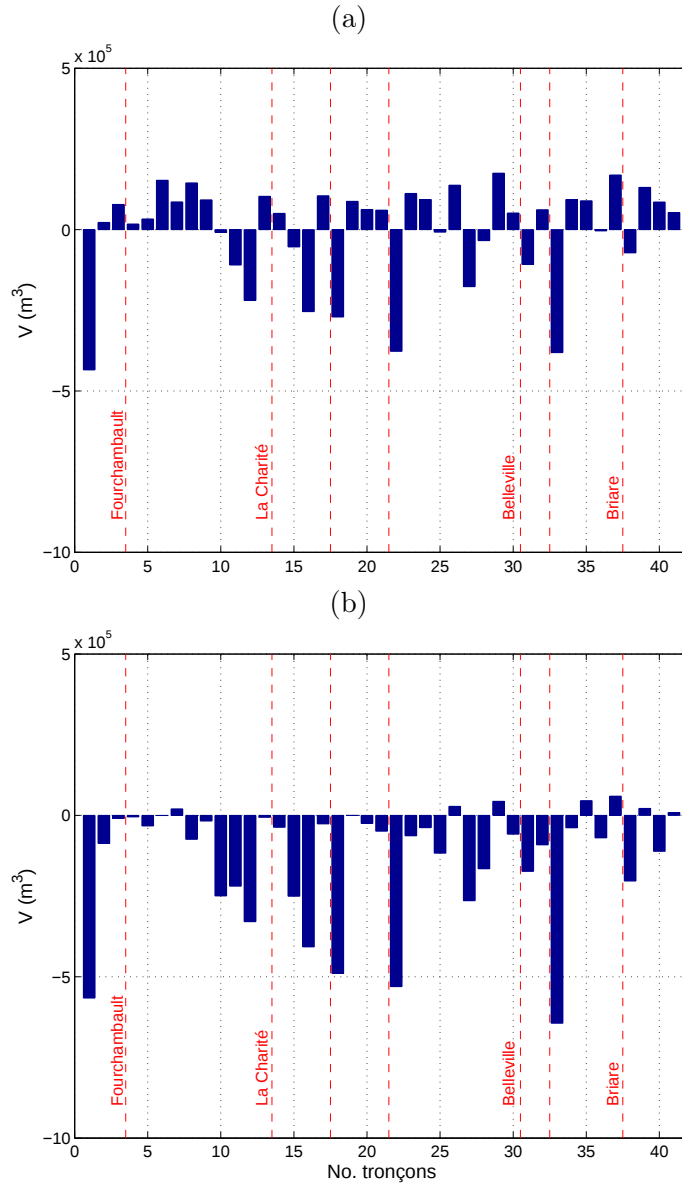


FIGURE 7.18 – Loire moyenne : bilan des volumes déposés ou érodés sur les différents tronçons localisés entre le Bec d’Allier et Gien obtenu avec (a) la chronique prédictive $f1$ (crues en début de chronique) et (b) la chronique prédictive $f2$ (crues en fin de chronique). Les droites en pointillées représentent les structures artificielles.

approche Monte-Carlo afin de générer plusieurs scénarios comprenant le même nombre de crues dans des ordres différents et en faisant varier les périodes intermédiaires. Les chroniques de débits ainsi dérivées pourraient ensuite être introduites dans le modèle afin de pouvoir déterminer les évolutions moyennes pour les différents tronçons ainsi que les enveloppes (c’est à dire les évolutions maximales obtenues).

7.4.3 Application du modèle simplifié Mobise

Le modèle Mobise basé sur les bilans sédimentaires, décrit au paragraphe 5.4, a été appliqué sur la Loire moyenne. La chronique de débit en entrée correspond à la chronique réelle 1996-2006 simplifiée avec l'approche de débits classés en forme de pyramide. Le temps de calcul est de quelques minutes. Les résultats obtenus sont comparés aux volumes calculés avec le modèle RubarBE et la simplification de la chronique avec l'approche descriptive à seuils (simulation LM-gsqsd-v0). Les différences entre les volumes ΔV obtenus avec les deux calculs sont présentées sur la figure 7.19.

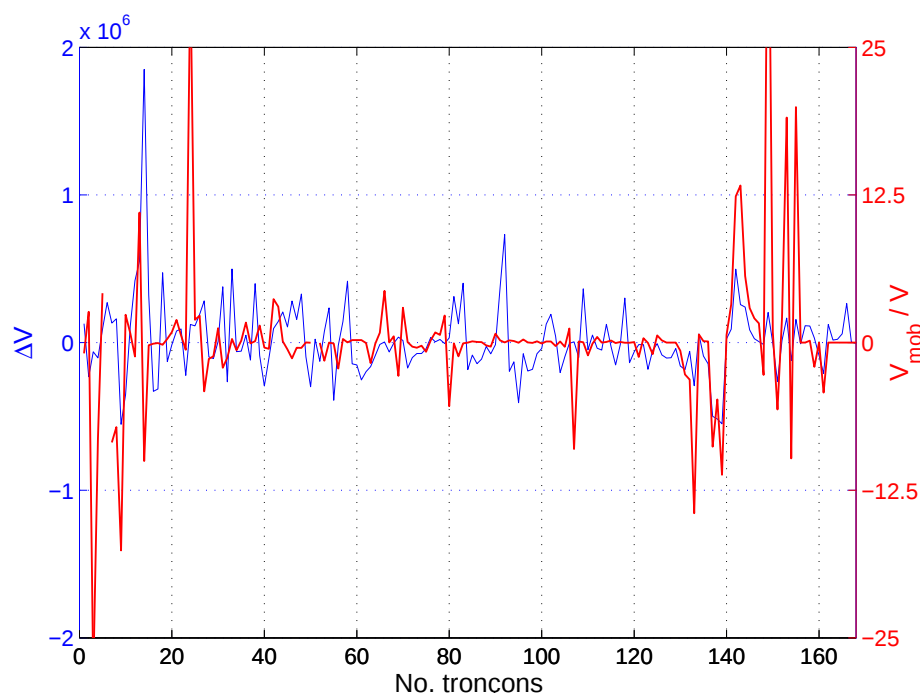


FIGURE 7.19 – Loire moyenne : comparaison entre les volumes obtenus avec le modèle Mobise V_{mob} et les volumes obtenus avec le modèle RubarBE de la Loire moyenne V ($\Delta V = V_{mob} - V$) et détermination du ratio V_{mob}/V .

Le ratio entre les volumes obtenus avec Mobise (V_{mob}) et le volume calculé avec RubarBE (V) a également été déterminé afin de visualiser si les tendances d'évolutions étaient similaires avec les deux calculs. Le modèle Mobise a tendance à induire des évolutions plus fortes que le modèle RubarBE. Cette surestimation est considérable sur le tronçon 14, localisé à l'aval du pont de La Charité-sur-Loire, où le modèle mobise induit un dépôt excessif de 1 680 000 m³ tandis que le modèle RubarBE induit une incision de 167 700 m³. Le calcul du ratio V_{mob}/V révèle que pour 72 tronçons (soit dans 43 %) des cas, les évolutions obtenus avec le modèle Mobise diffèrent de façon importantes des évolutions calculées avec le modèle RubarBE (avec la géométrie et la chronique de débits simplifiée). Les secteurs présentant de fortes variations correspondent aux secteurs à chenaux multiples localisés à l'aval du Bec d'Allier et à l'aval de Langeais (tronçon 140).

Les bilans sédimentaires effectués sur les tronçons permettent de prendre en compte une distance de chargement correspondant à une demi longueur de tronçon. Cette distance de chargement est inférieure à la valeur de D_{char} intégrée dans le modèle RubarBE de la Loire moyenne. Le phénomène de diffusion ne peut pas être correctement intégré dans un modèle basé sur les bilans sédimentaires.

7.5 Synthèse des résultats du modèle d'évolution de la Loire moyenne

Les simplifications de la géométrie et des chroniques de débits permettent de simuler les tendances d'évolutions du lit de la Loire moyenne sur une décennie en un temps raisonnable. La géométrie simplifiée obtenue pour la Loire moyenne est cohérente avec la géométrie initiale du lit. Il faut toutefois souligner que la géométrie lissée obtenue pour le secteur de Tours ainsi qu'à l'aval des Ponts-de-Cé est moins pertinente en raison de la géométrie complexe de ces secteurs, caractérisée par la présence de nombreux ouvrages d'art et d'îles. Ce problème rencontré dans la procédure de lissage de la géométrie, se répercute ensuite sur la modélisation des évolutions du lit.

La chronique de débits 1996 - 2006, simplifiée avec l'approche descriptive à seuils, et appliquée sur la géométrie de la Loire moyenne avec le modèle RubarBE, permet d'obtenir des résultats comparables au modèle local pour le site de référence de Belleville. Les incisions induites par le modèle à l'aval des ouvrages est conséquente pour le modèle de la Loire moyenne complet. La comparaison faite entre les résultats expérimentaux sur le site de référence de Guilly et le modèle de la Loire moyenne est moins concluante, alors que le modèle local donnait des résultats satisfaisants.

L'application de chroniques de débits dérivées à partir des hydrogrammes synthétiques permet de visualiser l'importance de l'ordre des crues dans une simulation numérique hydro-sédimentaire. La dérivation de scénarios hydrologiques prédictifs robustes nécessiterait la mise en oeuvre d'une approche Monte-Carlo et la simulation des différents scénarios afin de dégager des tendances moyennes. Cette proposition ne prend pas en compte les probabilités des concomitances de crues de la Loire avec ces affluents et les notions de changement climatique.

Le modèle simplifié Mobise, basé sur les bilans sédimentaires permet un calcul en quelques minutes des évolutions des tronçons. Les volumes calculés avec cette approche semblent toutefois fortement surestimés et sujets à des variations. De plus, Mobise induit des résultats similaires quelle que soit la forme des hydrogrammes.

Il faut également rappeler que le modèle est réalisé sur une chronique de 10 ans ; à cette échelle de temps, la dynamique fluviale rend essentiellement compte des évolutions liées aux variations du transport solide en réponse aux modifications climatiques ou anthropiques des bassins versants (Bravard et Peiry, 1993).

8

Conclusion générale et perspectives

Une première partie de ce travail consistait à la compréhension des ajustements du lit de la Loire moyenne observés au cours de ces cinquante dernières années ainsi qu'à la proposition d'une méthodologie de découpage en tronçons homogènes et de classification de ces tronçons afin d'appréhender la dynamique de la Loire moyenne à grande échelle. Dans une seconde partie, nous nous sommes attachés à la modélisation numérique 1D d'un lit alluvial à grande échelle de temps et d'espace. Une réflexion sur les simplifications possibles du modèle est présentée afin de permettre des temps de simulations raisonnables. La compréhension des évolutions d'un lit alluvial à grande échelle de temps et d'espace est complexe car elle nécessite des jeux de données importants et une réflexion globale difficile car on s'attarde facilement aux dynamiques locales.

8.1 Conclusion générale

Sectorisation de la Loire moyenne et description des tronçons homogènes

L'analyse des évolutions morphologiques est réalisée en découpant le secteur d'étude en tronçons géomorphologiquement homogènes. Les méthodes existantes de sectorisation morphologique des cours d'eau étant difficilement applicables sur de grands cours d'eau présentant de fortes pressions anthropiques, une méthodologie de découpage en tronçons est proposée. L'approche est basée sur les caractéristiques classiques utilisées en géomorphologie fluviale (comme les variations de pente et de largeurs de bande active), complétée avec la prise en compte des seuils naturels et artificiels influençant l'écoulement et donc le transport sédimentaire.

La compréhension globale des évolutions morphologiques est ensuite abordée en caractérisant les tronçons homogènes avec des paramètres hydro-sédimentaires définis sous forme de classes (largeur de bande active, diamètre médian, etc...). En plus de ces paramètres classiquement utilisés en géomorphologie fluviale des paramètres hydrauliques, dérivés d'une modélisation numérique unidimensionnelle des écoulements, ont été utilisés. Ces derniers apparaissent plus judicieux dans la compréhension de la dynamique sédimentaire mais demandent un jeu de données topographiques complet afin de pouvoir réaliser le modèle numérique. La définition des tronçons permet ainsi une

analyse des ajustements du lit ; elle répond également aux objectifs de modélisation qui suivent.

Evolutions morphologiques de la Loire moyenne

Les tendances générales d'évolution de la Loire moyenne se traduisent par une diminution de sa pente et une réduction de sa largeur de bande active entre 1978 et 1996. Après 1996, suite à l'arrêt des extractions de granulats en lit mineur, les ajustements se poursuivent mais de façon plus modérés, ce qui laisse à penser que la Loire moyenne n'a pas tout à fait atteint son profil d'équilibre. Il est toutefois difficile de relier directement ces ajustements aux extractions. En effet, la période d'extraction massive coïncide avec un régime hydrologique favorable aux changements morphologiques. De plus, les tendances d'évolutions données ici, sont analysées à une échelle globale qui n'intègre pas toutes les spécificités locales qui peuvent influencer la dynamique sédimentaire.

Les tronçons ainsi caractérisés sont la base de la méthodologie de simplification de la géométrie nécessaire à la modélisation des évolutions du lit à grande échelle de temps et d'espace.

Approches de simplifications et modélisation hydro-sédimentaire

L'objectif est de tester différentes approches de simplification des données en entrée des modèles hydro-sédimentaires afin de voir si le temps de calcul peut être réduit sans toutefois altérer les résultats.

En se basant sur la définition des tronçons homogènes, une géométrie simplifiée est dérivée tout en conservant les principales caractéristiques hydrauliques des tronçons, soit une largeur et une hauteur moyennes pour différentes valeurs de débits. Ce lissage de la géométrie permet d'aboutir à une représentation du cours d'eau réduite à une succession de tronçons définis par des sections uniformes et une pente moyenne. Cette transformation permet d'obtenir un fonctionnement hydro-sédimentaire concordant avec celui de la géométrie initiale et une description à grande maille du système fluvial. Les temps de calcul sont ainsi considérablement réduits (facteur de 10 à 20).

Les approches de simplification des chroniques de débits permettent aussi de réduire les temps de calcul (facteur 2) en se limitant à la modélisation des événements qui influencent le transport de sédiments et façonnent le lit du cours d'eau (crue). Ces simplifications des hydrogrammes de crues permet également d'approcher les objectifs de prédiction. Les simplifications géométriques et hydrologiques sont ensuite introduites dans le modèle unidimensionnel de transport solide RubarBE afin d'être comparées aux résultats obtenus avec la géométrie détaillée et la chronique de débits complète.

Les modèles « réels » (c'est à dire en géométrie détaillée avec des chroniques de débits complètes) sont complexes à caler, en particulier sur les sites fortement anthropisés où les différentes options de calcul (distance de chargement, option de dépôt,...) amènent à des résultats très différents. Les options permettant une simulation correcte de la cote du fond ne correspondent pas aux options

permettant un calcul des volumes déposés ou érodés cohérent avec les mesures. Le site de référence très anthropisé (Belleville), sur lequel de nombreuses données sont disponibles, présente des résultats moins bons que les sites à priori plus complexes à modéliser avec une approche 1D que sont Bréhémont, caractérisé par des îles, et Guilly présentant les seuls méandres de la Loire moyenne.

Les modèles simplifiés (c'est à dire avec la géométrie simplifiée et les chroniques de débits simplifiées) nous ont permis de confirmer la validité de la géométrie simplifiée. La simplification des chroniques de débits avec l'approche de débits classés n'est pas concluante. En revanche, l'approche de simplification des chroniques de débits avec l'approche descriptive à seuils est cohérente pour les sites de référence de Bréhémont et de Guilly. Les tests réalisés sur le site de Belleville avec cette approche sont moins concluants.

Les simplifications sont ensuite appliquées sur l'ensemble de la Loire moyenne. Les résultats présentés ne prétendent pas donner avec précision les ajustements du lit d'un site particulier ; il s'agit de dégager les tendances générales d'évolution. Il est bien évident que des travaux localisés doivent faire l'objet d'une réflexion plus détaillée mais l'approche simplifiée permet d'avoir une vision globale et d'évaluer les conditions aux limites influencées par ce qui se passe à l'amont et à l'aval des sites d'études. Le modèle réalisé avec la géométrie simplifiée et la chronique de débits simplifiée entre 1996 et 2006 confirme les tendances observées sur les tronçons dans la première partie de l'étude. Ainsi, entre le Bec d'Allier et Gien, les évolutions sont conséquentes ; entre Gien et la confluence avec le Cher, les tronçons dynamiques correspondent aux tronçons localisés à proximité d'ouvrages d'art. Enfin entre la confluence avec le Cher et Montjean-sur-Loire, peu d'évolutions sont visibles. Il faut également rappeler qu'à cette échelle de temps (la décennie), la dynamique fluviale rend essentiellement compte des évolutions liées aux variations du transport solide en réponse aux variations climatiques et anthropiques (Bravard et Peiry, 1993). Les dernières simulations effectuées présentent des chroniques pseudo-prédictives, qui permettent de tester l'influence de l'ordre des crues sur les évolutions du lit.

Le modèle RubarBE avec les données ainsi simplifiées permet de simuler de longs biefs sur de longues périodes (la définition de longue période étant prise dans le contexte de la modélisation numérique et non de la géologie) en un temps acceptable (de quelques heures à quelques jours suivant la longueur du bief et la chronique considérée).

Les tests effectués avec le modèle basé sur les bilans sédimentaires Mobise permettent de comprendre les limites de telles approches. En effet, ce type de modèle permet des calculs très rapides mais il a été démontré que la non prise en compte des structures artificielles dans le calcul engendre des erreurs. De plus, l'approche étant dérivée pour résoudre une succession de régimes permanents, la gamme des crues n'est pas prise en compte et l'ordre des crues n'a que peu d'influence sur les résultats. Or ces éléments ont une importance qui est perceptible dans les évolutions obtenues avec le logiciel RubarBE.

Finalement, les modèles les plus simples donnent souvent d'aussi bons résultats que les modèles complexes car dans les deux cas les lois de dépôt / érosion ne sont pas bien connues et les incertitudes sur les données géométriques, hydrologiques et granulométriques sont fortes.

8.2 Perspectives

Les perspectives à donner à cette thèse proviennent pour la plupart des limites actuelles du travail. Ces perspectives sont récapitulées dans les points suivants :

Bases de données

La création d'une base de données recensant toutes les données topographiques, granulométriques, hydrologiques existantes sur la Loire moyenne serait un atout majeur pour les gestionnaires du bassin et les chercheurs. Cette démarche de regroupement de l'information, déjà entreprise par la DREAL Centre dans le cadre du SIEL, est à poursuivre et à compléter. Pour les données granulométriques, le projet de protocole de mesures de transport solide initié par la DREAL, l'Agence de l'eau et l'Université de Tours doit également être poursuivi et encouragé. En effet, les données existantes sur l'ensemble de la Loire moyenne sont peu nombreuses et la localisation des mesures effectuées n'est pas toujours très claire. Une planification des données à acquérir pour comprendre le fonctionnement hydro-sédimentaire de la Loire moyenne serait bénéfique. En se basant sur les tronçons identifiés comme en cours d'incision, des études plus locales pourraient être entreprises. De plus, ces études locales permettraient également d'expliquer l'évolution morphologique de certains tronçons présentant une stabilité en plan alors qu'une incision est observable sur la ligne d'eau (ou inversement).

Méthodologie de sectorisation des cours d'eau

Un calcul des paramètres hydrauliques des tronçons avec des données anciennes serait pertinent afin de voir l'évolution de ces paramètres dans le temps. Ce calcul pourrait être réalisé pour les sites de références de Belleville et de Guilly en particulier où les données anciennes sont disponibles. Les paramètres sédimentaires pourraient également être conservés dans la classification si les données permettaient de caractériser l'ensemble de la Loire moyenne. Une autre amélioration de la méthodologie de découpage en tronçons serait la prise en compte des matériaux des berges mais cela nécessite alors une base de données très complète. Cette méthodologie mérite également d'être testée et adaptée sur d'autres rivières afin d'être complétée et validée.

Modélisation hydro-sédimentaire

Le modèle réalisé avec les données simplifiées considère deux coefficients de rugosité (lit mineur et lit majeur) identiques au modèle réel, des tests supplémentaires sont nécessaires pour valider ce

choix. Les options de répartition des érosions et des dépôts dans un modèle 1D sont fondamentales quant à l'évolution finale des tronçons et des sections. Une réflexion sur ces différentes options ainsi qu'une possible amélioration semblent également nécessaires.

La dérivation de chronique des débits prédictives est quelque peu illusoire ; il est difficile de prévoir le futur qui plus est si la notion de changement climatique est intégrée. Des scénarios hydrologiques plus robustes, en se basant sur des approches Monté-Carlo, en particulier pour simuler des concomittances de crues de la Loire et de ses affluents, méritent de plus amples investigations.

Un modèle simplifié basé sur des bilans sédimentaires par tronçon peut être pertinent ; les approches de simplification de la géométrie et des chroniques de débits constituent la première étape de ce genre de développement. Le modèle Mobise mentionné dans ce manuscrit nécessite quelques améliorations, en particulier pour intégrer les lits composés et les structures artificielles.

ANNEXES

A

Données collectées

Relevés topographiques et bathymétriques

Année	Secteur	Format	Source
1870 - 1873	Amboise, Montlouis	papier	DDE + archives
1961	St Laurent à Blois	Shp + txt	DREAL
1964	St Pere à La Riche	Shp + txt	DREAL
1967	La-Chapelle-St-Mesmin à Blois	Shp + txt	DREAL
1968	St-Jean-le-Blanc à Blois	Shp + txt	DREAL
1969	Tours	Shp + txt	DREAL
1973	Briare à Rilly-sur-Loire	Shp + txt	DREAL
1975	Sully-sur-Loire à Tavers	Shp + txt	DREAL
1976	Mosnes à Montlouis-sur-Loire	Shp + txt	DREAL
1977	Belleville	txt	EDF
1978	Veuves, Chouzy/Cisse, St-Dié, Blois		
1979	Chateauneuf-sur-Loire	Shp + txt	DREAL
1980	Villandry	Shp + txt	DREAL
1980	Montsoreau - Les Ponts-de-Cé (1932-1980)	papier	DDE49
1981	Montlouis-sur-Loire	papier	CETE Blois
1983	De Sigloy à Menars (château)	Shp + txt	DREAL
1984	De Jargeau à La Riche	Shp + txt	DREAL
1984	Montlouis-sur-Loire	papier	CETE Blois
Mai 1985	Blois	papier	CETE Blois
Juin 1985	Pont Canal de Briare	papier	CETE Blois
Août 1985	Villandry - Cinq Mars la Pile	papier	CETE Blois
Nov et Dec 1985	Cinq Mars la Pile et Villandryr	papier	CETE Blois
Janvier 1986	Pont de Cinq Mars la Pile	papier	CETE Blois

A. Données collectées

Année	Secteur	Format	Source
Janvier 1986	Pont de St Come à Tours	papier	CETE Blois
1988	Pont Port Boulet	papier	CETE Blois
Sept1988	Pont de Port Boulet	papier	CETE Blois
Mars 1989	Cinq Mars la Pile	papier	CETE Blois
Avril 1989	Bathy Pont Wilson, Tours	papier	CETE Blois
Mai 1989	Montlouis sur Loire	papier	CETE Blois
1990 ??	St Dye sur Loire	papier	CETE Blois
Janvier 1991	Pont Vouvray ?	papier	CETE Blois
1991	Pont Langeais	shp + txt	CETE Blois
1993	Belleville	Shp + txt	DREAL
Bodin 1993	La Chapelle sur Loire à Montsoreau	Shp + txt	DREAL
Bodin 1994	Dampierre à Muides sur Loire	Shp + txt	DREAL
1994	Belleville	Shp + txt	DREAL
Crougneau1995	Du Bec d'Allier à Pont de Cé	Shp + txt	DREAL
1995	La Charité sur Loire (15 profs.)	Shp + txt	DREAL
Bodin 1996	De Marzy à Briare	Shp + txt	DREAL
Legrand 1996	De Chécy à St Mesmin	Shp + txt	DREAL
1996	Belleville	Shp + txt	DREAL
1997	Dampierre	Shp + txt	DREAL
1997	De Marzy “ les mourez” à Marzy ” Corcelles “	Shp + txt	DREAL
1998	Dampierre et Orléans	Shp + txt	DREAL
1998	De St Denis en Val à Veuves	Shp + txt	DREAL
1998	Saumur	autocad	DDE 49
Legrand1999	De Veuves à Amboise	Shp + txt	DREAL
1999	aval Les Ponts de Cé	txt	DREAL
2000	Saumur	dwg	DDE 49
2003	Bréhémont	excel	Univ. Tours
2005	De Menars à Blois	Shp + txt	DREAL
2005	La Charité-sur-Loire	Shp + txt	CETE
2006	Fourchambault	Shp + txt	DREAL
2006	Orléans	txt	CETE
2007	Ste Gemmes	txt	CETE
2008	méandres de Guilly	txt	AITL + CETE

Année	Secteur	Format	Source
2008	Decize	txt	CETE
2008	La Charité-sur-Loire	txt	CETE
2008	La Possonière	txt	SMN

TABLE A.1: Récapitulatif des données topographiques et bathymétriques disponibles.

Des profils en long ont également été récupérés et sont listés ci-dessous :

- Profil en long de la Loire entre Montsoreau et Nantes (SMN, 2000)
- Profil en long Pont Bonaparte (Tours) - Pont de la Motte (DDE 37, 1945)
- Profil en long Montsoreau - Ancenis (DDE 49, 1962)
- Profil en long (IGN, 1933)

Cartes et photographies aériennes

Année	Secteur	PK	Source
1850 NB	Bec d'Allier à Oudon	459 - 930	DREAL
1850 SC	St Péré à Oudon	587 - 930	DREAL
1955	Neuvy à St Laurent	535 - 671	DREAL
1956	St Laurent à Candes	671 - 811	DREAL
1957	Bec d'Allier à Belleville	459 - 536	DREAL
1958	Candes à Montjean	671 - 900	DREAL
1963	Ouzouer à St Mesmin	583 - 643	DREAL
1969	Bec d'Allier à Nantes	459 - 900	DREAL
1971	Belleville	536	EDF
1995	Loire moyenne	459 - 900	DREAL
1999	Limeray à Montjean	726 - 900	DREAL
2002	Bec d'Allier à Nantes	459 - 939	DREAL
2003	Bec d'Allier à Gien	459 - 557	DREAL
2005	Bec d'Allier à Varennes	459 - 812	DREAL

TABLE A.2: Récapitulatif des cartes et photographies aériennes.

Stations hydrométriques

Stations	Code	$QTVAR$	QJM
Givry	K4000010	1967 - 2008	1970 - 2008
St Satur	K4080010	2000 - 2007	2000 - 2008
Gien	K4180010	1996 - 2007	1936 - 2008
Orléans (pont Royal)	K4350010	1993 - 2007	1971 - 2008
Orléans (quai du Roi)	K4350020	2002	1964 - 2008
Blois	K4470010	1994 - 2007	1863 - 2008
Tours (Mirabeau)	K4900030	1998 - 2007	1971 - 2008
Tours (Wilson)	K4900010		1957 - 1971
Langeais	K6830020	1994 - 2007	1985 - 2008
Montsoreau	L800001		1916 - 1988
Saumur	L8000020	1993 - 2007	1988 - 2008
Ponts-de-Cé	L8700010	2000 - 2007	
Montjean-sur-Loire	M5300010	1992 - 2007	1863 - 2008

TABLE A.3: Stations hydrométriques de la Loire moyenne disponible sur la banque Hydro.

Caractéristiques des déversoirs

On peut distinguer trois types de déversoirs sur la Loire moyenne : les déversoirs au terrain naturel, les déversoirs sans fusibles et les déversoirs à fusibles. Les déversoirs au terrain naturel ressemblent à une interruption de la levée qui permet à l'eau de rejoindre sa vallée naturelle. Les déversoirs sans fusibles laissent entrer l'eau pour des crues plus rares et sont situés en amont du val. Les déversoirs à fusible sont réalisés en maçonnerie afin de résister au courant qui le traverse. Le fusible est constitué de terre qui s'érode lors des crues et permet d'effacer le fusible. Le seuil de fonctionnement est défini par le point bas du seuil fixe maçonné.

Nom déversoir	Nom val	Type	Longueur déversoir (m)	Altitude seuil (m)	seuil de fonctionnement	Date de construction
Passy	La Charité	TN			3500	
Léré	Bannay	TN et SSF	2500	139.05	2300	1846
St Martin-sur-Ocre	Gien	SSF	226	126.95	3000	1771
Pierrelaye	Dampierre	SSF				
Ouzouer	St Benoit	SAF	800	119.65	6500	1886
Jargeau	Orléans	SAF	575	104.85	6500	1882
Mazan	Mareau	TN	2780	88.35	5500	fin 16ème
Avaray	Avaray	SAF	550	80.00	5200	1887
Montlivault	Blois	SAF	400	75.00	6000	1890
La Bouillie	Blois	SSF	380	71.20	3600	1618
La Chapelle-aux-Naux	La Chapelle	SAF	320	43.35	5700	1892
Bel air	Montjean		175	14.63	6500	1915

TABLE A.4: Liste des déversoirs.

avec TN : seuil au niveau du terrain naturel

SSF : seuil au dessus du terrain naturel non surmonté d'un fusible effaçable

SAF : seuil au dessus du terrain naturel surmonté d'un fusible effaçable

Caractéristiques des tronçons

Tronçon	PK amont	Longueur tronçon (m)	B(m)	Pente moyenne (m/km)	Sinuosité	Limite amont	Limite aval
12cdK	459,75	2863,57	346,37			Bec d'Allier	Aval île Marzy
11ddJ	462,61	2334,54	265,49	0,939	1,00	Aval île Marzy	Amont île RD
12daJ	464,95	1502,30	284,96	0,302	1,00	Amont île RD	Pont Fourchambault
12aaK	466,45	527,12	301,88	0,302	0,96	Pont Fourchambault	Chevrette Cours-les- Barres
12adJ	466,98	1535,96	286,09	0,427	1,05	Chevrette Cours-les- Barres	Amont île RD
12ddK	468,51	2713,59	328,79	0,427	1,01	Amont île RD	chenal 2nd Aval île
11ddK	471,23	1593,23	319,47	0,364	1,03	Aval île	Amont îles RG +RD che- naux 2nd
22ddK	472,82	4474,32	321,91	0,364	1,20	Amont îles RG +RD	chenaux 2nd Aval îles RG +RD
12ddK	477,29	1951,15	315,98	0,444	1,02	Amont îles	Aval îles
12ddJ	479,25	4854,90	288,30	0,355	1,00	Aval îles	Amont île RG, chenal 2nd + seuil naturel
12ddK	484,10	1984,60	302,33	0,436	0,98	Amont île RG, chenal 2nd + seuil naturel	île au Page
12daK	486,09	2659,87	352,73	0,320	1,00	île au Page (c)	Pont
12adK	488,75	2385,47	368,94		1,01	Pont	Aval île du Pont de la Batte (rg)

Tronçon	PK amont	Longueur tronçon (m)	B(m)	Pente moyenne (m/km)	Sinuosité	Limite amont	Limite aval
12ddK	491,13	1547,59	339,63	0,439	0,99	Aval île du Pont de la Batte (rg)	Aval île RD
12ddK	492,68	4088,40	331,54	0,185	1,05	Aval île RD	Aval île du Lac RG
22ddK	496,77	3167,25	362,02	0,185	1,05	Aval île du Lac RG	Aval ilots des Barreaux
12daK	499,93	2716,12	373,39	0,443	1,03	Aval ilots des Barreaux	Pont
12abK	502,65	4745,44	353,55	0,359	1,02	Pont Pouilly sur Loire	seuil naturel
12ddK	507,40	1674,10	341,65	0,582	1,05	Amont île centrale	Aval île + seuil naturel
11deK	509,07	1862,24	333,01	0,328	0,51	Aval île + seuil naturel	Rétrécissement chenal
12eaJ	510,93	2159,04	255,34	0,581		Rétrécissement chenal	Pont + île aux Balais (c)
12adJ	513,09	3324,30	299,21	0,581	1,01	Pont St Satur + île aux Balais (c)	Aval île
12baJ	516,42	3502,04	231,08	0,431	1,00	Aval île + seuil naturel RD	Pont
22aaJ	519,92	2807,38	279,56	0,340	1,05	Pont Port Aubry	Pont
11abJ	522,72	1877,47	262,17	0,385	1,03	Pont	seuil naturel
21bdJ	524,60	2411,93	244,68		1,10	seuil naturel	Amont île RD
12ddJ	527,01	1894,02	283,89	0,345	1,00	Amont île RD	Aval île RD
12ddJ	528,91	2557,34	255,74	0,345	1,01	Aval île RD	Amont île + chenal 2nd RD
12ddK	531,47	2327,67	302,82	0,463	1,03	Amont île + chenal 2nd RD	Amont île RD

Tronçon	PK amont	Longueur tronçon (m)	B(m)	Pente moyenne (m/km)	Sinuosité	Limite amont	Limite aval
12daK	533,79	2501,08	377,71	0,247	1,01	Amont île RD	Seuil centrale
12adK	536,29	1713,98	306,77	0,247	0,98	Seuil centrale	Amont île Coudreaux (c)
12daJ	538,01	3225,94	299,79	0,571	1,03	île Coudreaux + île Bon (c)	Pont
12adJ	541,23	1970,28	226,48	0,559	1,00	Pont	Aval île
11daJ	543,20	3683,34	264,31	0,559	1,03	Aval île	Amont duis
12aaJ	546,89	2402,34	261,33	0,346	1,03	Amont duis	Pont
12adJ	549,29	943,41	229,87	1,019	1,02	Pont	Amont île RG
12ddJ	550,23	1433,20	211,29	0,346	1,00	Amont île RG	Aval île RG
22daJ	551,67	2227,27	261,30	0,346	1,05	Aval île RG	Pont
12abJ	553,89	2780,37	243,53	0,425	1,04	Pont	seuil naturel
21bbI	556,67	3145,09	197,28	0,037	1,05	seuil naturel	seuil naturel
11baJ	559,82	3139,94	206,03	0,620	1,02	seuil naturel + élargisse- ment chenal	Pont
11aaJ	562,96	1044,83	252,49	0,620	1,04	Pont	Pont
11aaJ	564,00	1383,70	263,18	0,140	1,00	Pont	Pont
11abJ	565,39	2101,74	230,15	0,404	0,99	Pont	Affleurement rocheux
11bbJ	567,49	4259,52	214,79	0,229	1,01	Affleurement rocheux	Affleurement rocheux
21baJ	571,75	1398,13	265,74	0,273	1,07	Affleurement rocheux	seuil centrale
22adK	573,15	2300,91	323,58	0,167	1,12	seuil centrale	Aval île (chenal 2nd RG)
22ddK	575,45	2804,74	323,28	0,327	1,02	Aval île	Aval île RD

Tronçon	PK amont	Longueur tronçon (m)	B(m)	Pente moyenne (m/km)	Sinuosité	Limite amont	Limite aval
12dbJ	578,25	2495,71	264,50	0,665	1,00	Aval île RD	Seuil naturel
12bbJ	580,75	3493,97	294,07	0,616	1,04	Seuil naturel	Affleurement rocheux
21baK	584,24	3036,89	309,56	0,415	1,10	Affleurement rocheux	Pont
11aaK	587,28	335,46	333,76	0,189	0,97	Pont	Pont
22adK	587,61	1863,80	393,45	0,189	1,12	Pont + île centrale	Aval île
12dbK	589,48	1075,15	305,55	0,239	1,01	Aval île	seuil naturel "Le Mar- gat"
21bdJ	590,55	3487,33	258,46	0,239	1,12	seuil naturel	amont île RD
22ddK	594,04	3837,06	338,02	0,454	1,39	Amont île	Aval île
21ddK	597,88	1202,45	300,89	0,664	1,07	Aval île	Amont île centrale
12ddJ	599,08	1354,87	277,16	0,664	1,01	Amont île centrale	Aval île centrale
22ddJ	600,44	2557,64	265,76	0,641	1,05	Aval île centrale	Aval petite île
22ddJ	602,99	2749,13	255,13	0,641	1,16	Aval petite île	Point inflexion méandre
22daJ	605,74	2412,36	266,71	0,243	1,43	Point inflexion méandre	Pont
12abK	608,15	2384,95	328,53	0,108	1,01	Pont	Seuil naturel RD
22bdK	610,54	1715,63	352,32	0,715	1,06	Seuil naturel RD	Amont île centrale
12ddJ	612,26	1014,24	272,21	0,428	1,01	Amont île centrale	Aval île centrale
11daK	613,27	3309,02	307,45	0,428	1,04	Aval île centrale	Pont
11abK	616,58	1862,76	320,47	0,414	1,02	Pont + vestige ancien pont	Seuil naturel
12bdK	618,44	3126,76	320,86	0,799	1,03	Seuil naturel	Aval île RD

Tronçon	PK amont	Longueur tronçon (m)	B(m)	Pente moyenne (m/km)	Sinuosité	Limite amont	Limite aval
11ddK	621,57	1119,92	301,35	0,169	1,03	Aval île RD	Amont île centrale
12ddK	622,69	1507,75	308,15	0,334	1,04	Amont île centrale	Aval île centrale
21deJ	624,20	1153,67	225,25	0,334	1,10	Aval île centrale	Elargissement chenal
22ebK	625,35	2421,83	331,75	0,599	1,06	Elargissement chenal	Seuil naturel
21bdK	627,77	3074,79	327,91	0,310	1,10	Seuil naturel	Amont île RG
12ddK	630,85	1458,32	333,59	0,401	1,02	Amont île	Aval île + amont île RG
12daK	632,30	1589,58	354,69	0,350	0,99	Amont île RG	Aval île + duis RG
12aaJ	633,89	1749,92	248,48	0,430	1,04	Duis RG	Duis
11aaK	635,64	1107,13	345,08	0,430	1,00	Duis + île centrale	Pont Thinat
12aaK	636,75	1409,33	332,46	0,034	1,00	Pont Thinat	Pont George V
12aaJ	638,16	686,49	251,66		1,00	Pont George V	Pont Joffre
12aaJ	638,85	1553,32	291,50	0,419	1,01	Pont Joffre	Pont
11aaJ	640,40	1574,12	275,52		1,01	Pont	Pont
12adJ	641,97	884,59	242,31	0,321	1,00	Pont	Aval île RG
11dcJ	642,86	4222,55	262,04		1,02	Aval île RG	Confluence Loiret
11cdJ	647,08	861,76	285,36	0,582	1,00	Confluence Loiret	Amont île
12ddJ	647,94	2668,85	291,97	0,226	1,04	Amont île	Aval île
11dbJ	650,61	3724,62	263,19	0,173	1,01	Aval île	Seuil naturel
11baJ	654,34	1704,68	287,52	0,293	1,00	Seuil naturel	Vestige ancien pont
11aaJ	656,04	385,72	249,47	0,235	0,99	Vestiage ancien pont	Pont
11abJ	656,43	2857,51	251,56		1,00	Pont	Seuil naturel

Tronçon	PK amont	Longueur tronçon (m)	B(m)	Pente moyenne (m/km)	Sinuosité	Limite amont	Limite aval
21bdJ	659,28	1965,68	268,62	0,325	1,07	Seuil naturel	Amont île centrale
12ddJ	661,25	1214,81	272,71	0,325	1,00	Amont île centrale	Aval île centrale
11daJ	662,46	1621,09	234,96	0,107	1,03	Aval île + duis	Pont
12abJ	664,09	2156,94	287,19	0,098	1,01	Pont	Seuil naturel
21baJ	666,24	5223,70	269,71		1,08	Seuil naturel	seuil centrale
21adJ	671,47	2350,15	226,84	0,054	1,40	seuil centrale	Amont île centrale
22ddK	673,82	1417,57	301,39		1,14	Amont île centrale	Aval île
11dbJ	675,23	3587,74	265,67	0,250	1,02	Aval île	Affleurement rocheux
11baJ	678,82	1157,33	240,42	0,366	1,00	Affleurement rocheux	Pont
12adK	679,98	2117,15	326,80	0,366	1,02	Pont	Aval île
11ddI	682,10	432,81	186,30	0,140	1,00	Aval île	Amont île RD
12ddK	682,53	4929,60	302,91	0,140	1,04	Amont île RD	Aval île
12deJ	687,46	2634,75	288,47	0,552	1,01	Aval île	léger rétrécissement che- nal + chenal unique
12eaJ	690,09	3385,20	297,19	0,286	1,00	rétrécissement chenal	Vestige ancien pont
11aaK	693,48	2494,88	346,28	0,102	1,02	Vestige ancien pont	Barrage
11aaI	695,97	547,52		0,003	1,00	Barrage	Pont Charles de Gaulle
11aaI	696,52	1589,02		0,130	0,99	Pont Charles de Gaulle	Pont Gabriel
11aaI	698,11	1470,28		0,500	1,00	Pont Gabriel	Pont F. Mitterrand
11adI	699,58	6227,49		0,260	1,02	Pont F. Mitterrand	Amont île centrale
11dbJ	705,81	2617,61	281,61	0,552	1,01	Amont île centrale	Seuil naturel

Tronçon	PK amont	Longueur tronçon (m)	B(m)	Pente moyenne (m/km)	Sinuosité	Limite amont	Limite aval
21beJ	708,43	3414,50	244,86	0,310	1,10	Seuil naturel	Retrécissement chenal
11eaJ	711,84	3077,21	247,25	0,543	1,00	Retrécissement chenal	Pont + vestige ancien pont
12adJ	714,92	2010,80	281,59	0,543	1,02	Pont + vestige ancien pont	Aval île centrale
11deJ	716,93	3483,08	251,76	0,432	1,01	Aval île centrale	Rupture pente ligne o
12edK	720,41	2493,26	328,84	0,270	1,02	Rupture pente ligne o	Aval île centrale
11ddJ	722,90	1907,83	281,80	0,509	1,03	Aval île centrale	Amont île centrale
12ddK	724,81	3414,91	316,14	0,233	1,04	Amont île centrale	Aval île
11daK	728,23	2334,91	312,79	0,395	1,01	Aval île	Pont déviation
12aaK	730,56	2575,18	350,62	0,395	1,01	Pont déviation	Pont île d'Or
12adK	733,14	2973,48	338,14	0,325	1,02	Pont île d'Or	Aval île RD
12daJ	736,11	2560,73	281,92	0,188	1,00	Aval île RD + épis	Epis RG
12aaJ	738,67	3245,10	267,20	0,188	1,00	Epis	Epis
12aaK	741,92	4534,06	369,20	0,377	1,02	Epis	Pont SNCF
11aaJ	746,45	1333,96	286,24	0,316	0,74	Pont SNCF	Pont SNCF 2
11aaJ	747,78	492,02	240,60			Pont SNCF 2	Pont Vouvray
12aaJ	748,28	2036,71	282,85		1,02	Pont Vouvray	Epis RG
12aaK	750,31	5406,19	321,93	0,422	1,00	Epis RG	Pont autoroute

Tronçon	PK amont	Longueur tronçon (m)	B(m)	Pente moyenne (m/km)	Sinuosité	Limite amont	Limite aval
12aaJ	755,72	4854,05	277,38	0,128	1,03	Pont autoroute+ pont Mirabeau + passerelle+ pont Wilson + Pont Na- poléon ?	Pont Choisille + Pont SNCF
12adJ	760,57	3711,91	254,73	0,216	1,01	Pont Choisille + Pont SNCF	Amont île centrale
12dbJ	764,29	2227,27	295,98	0,351	1,00	Amont île centrale	Seuil naturel
11bdJ	766,51	3228,28	278,66	0,366	1,00	Seuil naturel	Amont île
12daJ	769,74	2933,27	283,68	0,112	1,01	Amont île	Epis RG
12aaK	772,67	2585,62	323,54	0,261	1,02	Epis RG	Pont SNCF
11acK	775,26	190,00			1,00	Pont SNCF	Confluence Cher
11caK	775,45	1953,44	352,92		1,04	Confluence Cher	Pont autoroute
11abK	777,40	2487,44	307,72	0,313	1,00	Pont autoroute	Affleurement rocheux
12baK	779,89	2131,37	393,16	0,172	1,00	Affleurement rocheux	Pont
22aeK	782,02	4114,62	338,05	0,269	1,08	Pont	Rétrécissement chenal
12edK	786,14	4075,58	301,54	0,313	1,04	Rétrécissement chenal	Aval île
12ddK	790,21	4501,46	347,55	0,286	0,99	Aval île	Aval île
11ddK	794,71	2160,14	328,33	0,137	1,01	Aval île	Amont île centrale
12daK	796,87	6089,81	380,03	0,431	1,00	Amont île centrale	Epis RD
12aaL	802,96	1644,14	428,51	0,423	1,03	Epis RD	Pont
12aaK	804,61	3590,14	338,12	0,081	1,00	Pont	Epis RD

Tronçon	PK amont	Longueur tronçon (m)	B(m)	Pente moyenne (m/km)	Sinuosité	Limite amont	Limite aval
11aaK	808,20	2502,81	358,50	0,436	1,03	Epis RD	Epis + île centrale
12acK	810,70	1038,44	329,50	0,470	1,02	Epis + île centrale	Confluence avec la Vienne
11caL	811,74	2533,54	460,07	0,470	1,00	Confluence avec la Vienne	Pont
11aeM	814,27	3755,95	564,34	0,299	1,04	Pont	Retrécissement chenal
12edL	818,03	3580,17	494,26	0,139	0,97	Retrécissement chenal	Aval île de Souzay
12daM	821,61	1764,99	501,70	0,218	1,00	Aval île de Souzay	Pont SNCF
12aaL	823,37	2970,45	465,13	0,218	0,98	Pont SNCF + pont Ces- sart	Pont Cadre Noir
11adM	826,34	1460,54	532,25	0,197	0,99	Pont Cadre Noir	Amont île Ardouin
12ddL	827,81	3636,71	452,64	0,197	0,99	Amont île Ardouin	Aval île Buisson Rouge
12ddL	831,44	2774,08	417,37	0,218	1,00	Aval île Buisson Rouge	Aval île Gaut + seuil na- turel
11ddM	834,22	1241,17	574,40	0,216	1,00	Aval île Gautier + seuil naturel	Amont île Pistolet
12ddL	835,46	3186,30	495,09	0,216	1,00	Amont île Pistolet	Aval île Pistolet
12daM	838,64	2412,81	538,22	0,200	0,98	Aval île Pistolet	Pont
12adL	841,06	1305,38	430,22	0,200	1,04	Pont	Aval île de Gennes
11dbL	842,36	2237,08	473,25		1,01	Aval île de Gennes	Seuil naturel
12bdL	844,60	2595,23	432,02	0,083	1,03	Seuil naturel	Aval île de Baure

Tronçon	PK amont	Longueur tronçon (m)	B(m)	Pente moyenne (m/km)	Sinuosité	Limite amont	Limite aval
11daM	847,19	4032,68	580,02	0,083	1,00	Aval île de Baure	Pont
12adM	851,23	2948,38	590,65	0,195	1,01	Pont	Aval île Buisson + rétrécissement chenal
11ddM	854,17	4640,28	551,08	0,195	1,00	Aval île Buisson	Amont île de Mézangeon
12ddM	858,82	4496,57	576,84	0,199	1,02	Amont île de Mézangeon	Aval Belle île
11daM	863,31	3241,40	521,58	0,215	1,01	Aval Belle île	Pont + vestige ancien pont
11aaL	866,55	1394,21	441,30	0,178	1,04	Pont + vestige ancien pont + épis Pont + vestige pont	
12adK	867,95	4802,14	395,60	0,245	1,05	Pont Dumnacus	Aval île aux Chevaux
11dcK	872,75	2472,58	378,97	0,149	1,00	Aval île aux Chevaux	Confluence avec la Maine
11caK	875,22	2230,88	383,51	0,149	1,01	Confluence avec la Maine	Amont île Béhuard + épis
12aaL	877,45	2714,05	408,94	0,108	1,04	Amont île Béhuard + épis	Pont
12adL	880,17	2476,91	410,93	0,204	1,01	Pont	Aval île Béhuard
11daK	882,64	3119,70	358,51	0,204	1,00	Aval île Béhuard + épis	Viaduc
12aaL	885,76	2819,53	428,39	0,098	1,00	Viaduc	Pont
12aaL	888,58	4805,07	460,00	0,410	1,01	Pont	Aval île Bataillon (bras gauche)

Tronçon	PK amont	Longueur tronçon (m)	B(m)	Pente moyenne (m/km)	Sinuosité	Limite amont	Limite aval
12aaL	893,39	1830,65	479,09	0,268	1,04	Aval île Bataillon	Aval île Guesse (bras gauche)
12aaK	895,22	2309,51	397,40	0,268		Aval île de la Guesse (bras gauche)	Pont

TABLE B.1: Caractéristiques des tronçons définies sur la Loire
moyenne.

Sites d'extraction

La localisation des sites d'extraction est fournie sur la figure C.1. La liste des sites d'extraction fournie dans le tableau ci-après provient des Annexes du rapport Hydratec (1984). Les données fournies dans les colonnes « Prod. 1984 » correspondent à la production annuelle autorisée en milliers de tonnes. Les cartes d'implantation et tableaux consultés ne contiennent des données qu'entre le Bec d'Allier et Saumur.

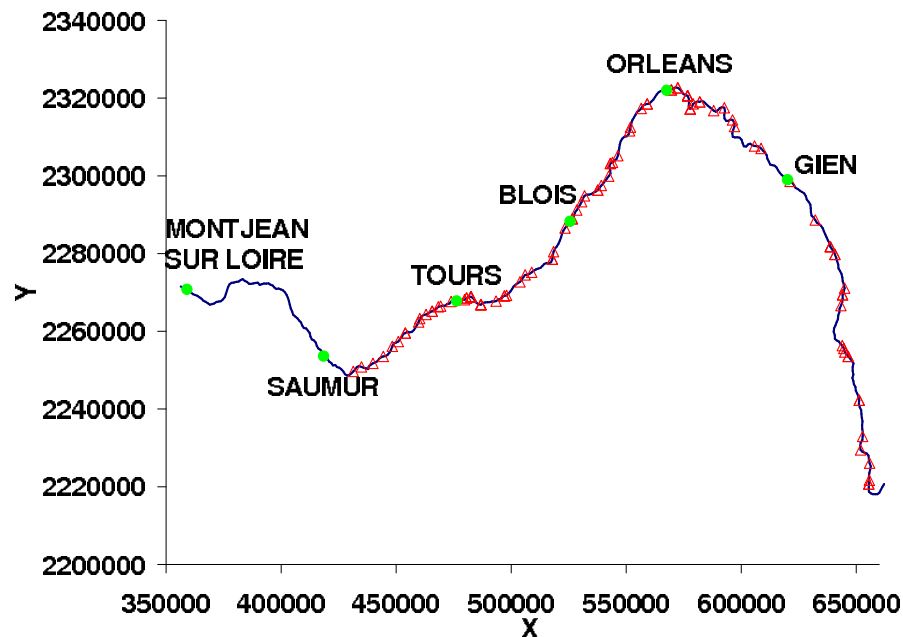


FIGURE C.1 – Localisation des sites d'extractions entre le Bec d'Allier et Saumur.

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
Chimique de la route	Cuffy	1971	G	459	Arrêtée	Arrêtée	220	Arrêtée le 31/12/1981
Beauprix	Marzy	1973	D	461	15.4	11	22	
Morini	Marzy	1972	D	464	49	35	70	
Gillet	Garchizy	1962	D	469	35	25	50	
Bonnin	Marseilles les A.	1971	G	475	15	15	15	
Piat	Beffes	1972	G	479	Arrêtée	Arrêtée	10	Arrêtée en mars 1981
Decaux	La Charité	1972	D	489	21	15	30	Lit mineur et majeur
Viollet	La Charité	1972	D	489	5.25	Arrêtée	7.5	
Sirot	Mesves/Loire Ű Pouilly	1972	D	503	Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée	
Sogemac	Couargues	1972	G	503	50	50	50	
Sogemac	Couargues/Thouvenot	1969	G	505	161	50	230	
Thouvenot	Tracy	1966	D	506	2.8	2	5	
Sables et roches de Tracy	Tracy	1977	D	507	14	7	20	Lit mineur 2 + lit majeur 5
Lasnes	Boulleret	1970	G	524	4	4	4	Bras secondaire
Cochery	Boulleret	1979	G	524	50	50	70	extraction 12 000 T en 1982 dans bras secondaire

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
Chaput	Cosnes/Loire	1930	D	521	4.9	3.5	7	
Renault	Myennes	1964	D	526	2.8	2	4	
Foucher	Neuvy/Loire	1970	D	536	35	25	100 ?	
EDF	Centrale Belleville	79-82	G et D	536	Arrêtée	Arrêtée	2380	
Ciment route	Beaulieu	1977	G		35	25	50	
Foucher	Beaulieu	1973	G		49	35	70	
Debenne	Beaulieu	1973	G		Arrêtée	Arrêtée	11.5	
CBF	Briare	1973	D	549	56	40	80	
Gauthier	Poilly Les Gien	1964	G		Arrêtée	Arrêtée	20	
Begue	St Aignan	1963	G		Arrêtée	Arrêtée	8	
Roland	St Pere	1962	D		Arrêtée	Arrêtée	35	
Fragner	St Be- noit/Loire	1964	D	598	35	25	50	
Roland	Germigny des Prés	1972	D	600	Arrêtée	Arrêtée	50	
Chatouillat	Sigloy ũ Chateau- neuf	1964	G	607	50	50	50	

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
Ligérienne	Ouvrouer/Loire	1969	G et D	612	242	175	200	
Mauger	Jargeau	1975	G	619	Arrêtée	Arrêtée	15	
Ligérienne	Jargeau		G	619	Arrêtée	Arrêtée		
Montigny	Bou	1965	D	622	Arrêtée	Arrêtée	50	
Roland F.	Sandillon	1964	G	624	Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée	Renouvellement refusé en 1979 (64 - 69 : 200m ³ /jour = 90 000 T/ an)
CBF	Sandillon	1970	G	624	Arrêtée	Arrêtée	15	70 - 76 : 50 m ³ /jour = 20 000 T/ an) - Arrêtée en 1982
Montigny	Sandillon	1964	G	624	189	135	270	1965 - 1972 = 25 000 T ; 1972 - 1977 = 110 000 T ; 1977 - 1982 = 200 000 T / an
Nioche	Checny	1965	D	628	168	120	240	1965 - 1970 = 25 000 T ; 1970 - 1976 = 35 000 T ; 1977 - 1982 = 240 000 T / an

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
Ligérienne	Checy	1964	D	628	112	80	60	1964 - 1976 = 40 000 T ; 1976 - 1982 = 60 000 T / an
SETC	Checy	1972	D	628	30	30	30	1972 - 1976 = 20 000 T / an ; 1976 - 1982 = 30 000 T / an
Nioche	Checy	1966	D	628	Arrêtée	Arrêtée	25	Arrêtée en 1983, reporté sur l'autre site. 1966 - 1970 = 18 000 T/an ; 1970 - 1982 = 25 000 T/an
Morillon	St Denis en Val	1968	G	633	Arrêtée	Arrêtée	60	Arrêtée le 01/01/82 ; 1968 = 50 m ³ /jour = 20 000 T/an
Moreau	St Denis en Val	1964	G	633	40	40	40	
Morillon Corvol	St Jean Le Blanc	1964	G	636	Arrêtée	Arrêtée	60	
Ligérienne	Orléans	1964	D	636	Arrêtée	Arrêtée	60	Arrêtée en 1982 (1964 : 18 000 T/an. 1965 - 1982 : 60 000 t/an)

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
Rose	Chaingy	1964	D	648	20	20	20	
Le Strat	Mareau aux Prés	1964	G	648	65	60	90	
Ligérienne	St Ay - Cléry	1964	D	651	80	60	110	
Ste Nouvelle de dragage	Baule	1972	D	661	63	50	90	1972 = 35 000 T/an
Morillon	Dry	1964	D		96	69	138	Arrêtée en 1983 ; 1964- 1967 = 40 000 T/an ; 1968 - 1981 = 45 000 T/an
Jallat	Tavers	1964	D	668	5	Arrêtée	30	1964 - 1968 = 20 000 T/an ; 1968 - 1976 = 30 000 T/an ; 1976 - 1981 = 30 000 T/an
Salviam Ũ Brun	St Laurent - Nouan	1974	G	671	-	-	-	De 1974 à 1979 1 500 000 m ³ pour construction centrale St Laurent
Veyer	Avaray	1965	D	672	63	50	90	
SCREG	Avaray		D	672	-	-	15	

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
Landre	St Laurent - Nouan	1958	G	676	40	40	40	
Ploux	Courbouzon	1968	D	680	56	40	220	
Dragages du Centre à Binas	Suevres	1960	D		Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée	Fin exploitation 1976 (80 000 T en 1965)
Salviam Brun	Suevres	1965	D		168	115	235	
Salviam Brun	Cours sur Loire	1974	D		Arrêtée	Arrêtée		Pas extrait depuis 1980
Salviam Brun	Menars	1968	D	690	Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée	Fin exploitation 1970 (100 000 m ³ pour Pont Cele Gaulle)
Dragues Blésoises	Vineuil	1924	G		Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée	Fin exploitation 1968 (30 000 m ³ en 1965)
Sté Ligérienne et Orléanaise de ma- térieux	Blois ũ La Chaussée St Victor	1933	D		Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée	100 000 m ³ en 1965 ; ar- rêtée en 1968
Société Tremblay	Vineuil	1947	G		Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée	18 000 m ³ en 1965 ; arrê- tée en 1967

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
Salviam Brun	Blois	1968	D	700	Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée	300 000 m ³ extraits pour remblais du pont Charles de Gaulle ; arrêtée en 1970
Sté Ligérienne	Blois ũ Chouzy	1968	D	708	280	200	400	
Sablières loire	Cande sur Beuvron	1967	G	710	50	50	70	
Mac Bean	Cande sur Beuvron	1970	G	710	Arrêtée	Arrêtée	10	
Lenoir	Veuves	1668 ?	D	720	30	30	30	
Masson (Ligé- rienne)	Mosne	1977	G	723	Arrêtée	Arrêtée	68	Site abandonné en 1982
Masson (Ligé- rienne)	Charge	1963	G		120	95	104	
Roland (DDE)	Nazelles		D					
Lechipre	Amboise	1973	G	731	50	50	60	
Ligérienne	Amboise	1963	G	732	Arrêtée	Arrêtée	8	Arrêtée en 1982
Ploux	Noizay	1965	D		90	60	110	
Sadel	Montlouis sur Loire		G	745				

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
Ploux	Vernou / Vouvray	1977	D	750	Arrêtée	Arrêtée	25	Arrêtée en 1981
Sadel	Montlouis	1965	G	745	Arrêtée	Arrêtée	25	Arrêtée en 1982
Sadel	Vouvray	1967	D	750	Arrêtée	Arrêtée	13	Arrêtée en 1982
St Georges	Vouvray	1970	D	750	Arrêtée	Arrêtée	10	Arrêtée en 1982
St Georges	Montlouis	1973	G	745	Arrêtée	Arrêtée	8	Arrêtée en 1982
Ligérienne	Vouvray / Montlouis	1968	G et D	750	430	270	390	
Giguret	Montlouis	1966	G	745			0.38 ?	entre 49 et 300 m ³ / an
DDE/Colas	La Ville aux Dames		G					
DDE/Brougalay	La Ville aux Dames							
Ligérienne	St Pierre des Corpsn	1963	G et D		Arrêtée	Arrêtée	100	Arrêtée en 1982
St Georges	Rochercoiron	1963	D	752	150	130	145	
St Georges	St Pierre des Corps	1964	D		Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée en 1976
Ligérienne	Tours	1963	G et D	759	Arrêtée	Arrêtée	94	Arrêtée en 1982

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
St Georges	Fondettes	1968	D	764	Arrêtée	Arrêtée	0	Exploité 1 an en 1968 puis en 1980. arrêté en 1982
Sagral	St Genouph	1964	G	765	Arrêtée	Arrêtée	30	Arrêtée en 1982
Sagral	Berthenay	1971	G	768	95	95	70	
Giaugue	Berthenay	1969	G	768	50	50	55	
Sté Tourangelle	St Etienne de Chigny	1963	D	771	Arrêtée	Arrêtée	8	Arrêtée en 1980
Sté Tourangelle	Cinq Mars	1963	D		-	-	16	
Sté Tourangelle	Villandry	1977	G	775	120	85	5	
Sté Tourangelle	Langeais	1966	D	782				
Sté Tourangelle	Langeais	1963		782	Arrêtée	Arrêtée	10	Arrêtée en 1980
Sté Tourangelle	St Patrice	1970	D		Arrêtée	Arrêtée	14	Arrêtée en 1982
Sagral	Bréhémont	1967	G	786	Arrêtée	Arrêtée	8	Site supprimé en 1982
Sagral	Rigny Ussé	1967	D	794	Arrêtée	Arrêtée	10	Site supprimé en 1982
Sagral	Avoine	1963	D	805	89	20	70	
DDE	La Cha- pelle/Loire			799				
Sagral	Savigny en V.	1973	G et D	809	Arrêtée	Arrêtée	10	Site supprimé en 1982

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
------------	---------	------------------------------	------	----	---------------	---------------	---------------	-----------

TABLE C.1: Sites d'extractions entre le Bec d'Allier et Saumur.

D

Liste des seuils

Lieu	PK (km)	Identification	Cote de crête (m NGFN)
La Charité-sur-Loire	488,75	pont	
Belleville	536,3	seuil centrale	134,20
Chatillon	548	écluse + duis	125,60
Briare	553,9	pont	
Dampierre	573,15	seuil centrale	117,4
St-Denis-de-l'Hotel	616,6	pont	97,60
Jargeau	618,44	affleurement rocheux	
Orléans	638,16	pont George V	88,70
Mareau	648,1	affleurement	84,85
Meung sur Loire	656	vestige pont	81,10
Beaugency	664,1	pont	78,35
St Laurent des Eaux	671,47	seuil centrale	76,30
Blois	695,97	barrage	68,35
Amboise	733,1	pont Ile d'Or	
Montlouis	746,45	pont SNCF	
Tours	757,55	pont Wilson	42,90
Port Boulet	804,6	pont	28,90
Gennes	823,37	pont	18,60
Les-Ponts-de-Cé	867,95	pont Dumnacus	14,30
Chalonnnes	885,76	La Possonière	

TABLE D.1 – Liste des seuils intégrés dans le modèle Loire moyenne.

E

Temps de calcul

Lieu	Nom modèle	Description	Temps calcul
BELLEVILLE	1-crue-1996-RubarBE-tronc1	Calage K sur crue 1996	1 min (M)
		Calage loi ouvrage sur crue 1996	5 h (R)
		Final crue 1996	5 h (R)
	2-crue-2003-RubarBE-tronc1	Validation sur crue 2003	1 min (M)
	3-1996-TS-RubarBE-tronc1	Test formule TS (MPM) crue 1996	13 h (R)
		Test formule TS (EH) crue 1996	13 h (R)
		Test formule TS (B) crue 1996	23 h (R) ^L
		Test D _{char} = 500m crue 1996	23 h (R) ^L
		Test D _{char} = 2km crue 1996	23 h (R) ^L
	4-1996-1998-TS-RubarBE-tronc1	Test répartition uniforme τ (sur 1 mois)	15 h (R)
		Test condins (sur 1 mois)	15 h (R)
		Test τ_{cr} avec IKEDA	15 jours(R)
		bel-reel (1996 - 1998)	15 jours(R)
		bel-reel avec $Q \times 2,5$	7 jours(R)
	5-lissage-RubarBE-tronc1	Succession régime uniforme (lissage)	1 min (M)
	6-geom-simp-hydro-true	Crue 1996	45 mins(R)
		Crue 2003	1 min(M)
		bel-gsq (1996 - 1998)	37 h30 (R)
	7-geomreel-hydro-simp	bel-grqs (1996 - 1998)	9 jours (R)
	8-geomsimp-hydrosimp	Q classé (1996 - 1998)	33 h (R)
		Approche 1 - seuil (1996 - 1998)	16 h (R)
		Approche 2 - forme (1996 - 1998)	16 h (R)
		Approche 3 - volume (1996 - 1998)	15 h (R)
	Test Mobise	1996 - 1998	1 min

Lieu	Nom modèle	Description	Temps calcul
BREHEMONT	brehem	Calage K sur étiage 2000	1 min (M)
		Calage K sur étiage 2006	1 min (M)
		Calage K sur crue 2003	1 min (M)
		Calage K sur crue 2007	1 min (M)
		Valisation crue 2001	1 min (M)
		Validation crue 2008	1 min (M)
	Lissage	Succession régime uniforme	1 min (M)
	3-brehem-TS	bre-reel (2000 - 2002)	23 jours (R)
4-geom-true-hydro-simp	bre-grqsd (2000 - 2002)	13,5 jours (R)	
5-geom-simp-hydro-true	bre-gsqr (2000 - 2002)	8 h (R)	
6-geom-simp-hydro-simp	bre-gsqsd (2000 - 2002)	6 h (R)	
GUILLY	1-gui-reel-calage	Calage K sur crue 1996	1 min (M)
		Calage K sur crue 2003	1 min (M)
		Succession régime uniforme	1 min (M)
	2-gui-geomsimp-qsimp	gui-gsqsd (1995 -2008)	32 h (R)
LOIRE MOYENNE	LM-reel	Calage K sur crue 1996	1 min (M)
		Loi ouvrage crue 1996	1 min (M)
		Validation crue 2003	1 min (M)
		Succession régime uniforme	1 min (M)
	Geom-simp-hydro-simp	LM-gsqsd (1996-2006)	1 mois (R)
		LM-gsqsf1	1 mois (R)
		LM-gsqsf2	1 mois (R)
	Mobise	1996 - 2006	2 mins

TABLE E.1: Récapitulatif des simulations mentionnées dans le manuscrit et des temps de calcul. Les simulations réalisées avec le logiciel Mage sont notées (M) et celles réalisées avec RubarBE sont notées (R). La majorité des calculs RubarBE a été lancée sur la ferme de calcul de Clermont-Ferrand sauf ceux notés L qui ont été lancés sur la ferme de calcul de Lyon.

F

Evolutions des tronçons

Les vitesses d'évolutions annuelles latérales (variations de largeurs de bande active) ΔB et verticales (variations de lignes d'eau d'étiage) Δz sont récapitulées dans le tableau F.2. Un code couleur a été adopté pour distinguer les tronçons présentant une faible évolution des tronçons présentant une forte dynamique morphologique. Il faut toutefois noter que le code couleur ne permet pas de différencier l'incision du dépôt ; seul le signe '-' permet d'identifier l'incision ou le retrécissement du chenal. Le code couleur adopté est le suivant :

ΔB (m/an)	Δz (mm/an)
$\Delta B \leq 1 $	$\Delta z \leq 25 $
$ 1 < \Delta B < 2 $	$ 25 < \Delta z < 50 $
$\Delta B \geq 2 $	$\Delta z \geq 50 $

TABLE F.1 – Caractérisation des vitesses d'évolution des tronçons.

Tronçon	PK amont	ΔB (m/an)			Δz (mm/an)		
		55-84	84-95	95-02	78-84	84-96	96-02
12cd	459,75	-3.73	0.93	-6.82	-1.67	30.00	100.00
11dd	462,61	-5.92	-0.42	-1.89	-1.67	30.00	-46.00
12da	464,95	-5.31	0.49	1.00	-1.67	30.00	-38.33
12aa	466,45	-1.93	-5.00	7.14	-1.67	30.00	-26.67
12ad	466,98	-3.15	0.27	-4.29	-28.33	-10.92	-27.67
12dd	468,51	-2.54	-0.38	-2.83	-23.33	22.00	-84.83
11dd	471,23	-3.62	-0.55	-3.76	-16.67	-0.50	-18.00
22dd	472,82	-3.53	-0.32	-6.13	-11.67	-5.00	-17.83
12dd	477,29	-3.28	0.66	-8.07	-1.67	-4.92	-5.50
12dd	479,25	-1.74	0.37	-8.52	3.33	9.17	-20.00
12dd	484,10	-1.85	-0.25	-0.79	13.33	6.83	-50.67
12da	486,09	1.09	-2.82	-3.00	8.33	15.50	-32.83

Tronçon	PK amont	ΔB (m/an)			Δz (mm/an)		
		55-84	84-95	95-02	78-84	84-96	96-02
12ad	488,75	-0.10	-3.70	-2.79	-1.67	14.33	-33.50
12dd	491,13	-1.87	-2.36	-0.75	6.67	-56.67	-70.50
12dd	492,68	-2.14	-5.99	-0.35	13.33	-52.33	-37.83
22dd	496,77	-3.05	-0.06	-0.93	28.33	-54.42	-52.33
12da	499,93	-0.58	1.25	-3.09	41.67	-59.00	-28.33
12ab	502,65	-1.06	-2.30	-0.76	51.67	-35.75	-48.83
12bd	507,40	-2.98	-4.03	-1.62	-46.67	7.83	-30.33
11dd	509,07	-1.72	0.41	-9.39	-35.00	17.33	-25.67
12da	510,93	-3.30	0.27	-4.46	-23.33	1.00	-11.00
12ad	513,09	-0.82	-2.18	-2.69	-8.33	5.42	-12.00
12da	516,42	-1.40	-1.14	-0.33	-5.00	13.75	3.67
12aa	519,92	-2.24	-5.21	-0.95	-1.67	30.00	-23.00
11ab	522,72	-1.56	-7.84	1.64	0.00	18.75	-39.17
21bd	524,60	-2.19	-2.27	-4.68	-1.67	12.50	-20.17
12dd	527,01	-1.04	-3.25	-1.89	-5.00	17.42	-8.33
11db	528,91	-5.19	-0.56	-3.09	-6.67	16.75	-9.33
12bd	531,47	-4.81	-2.29	-2.09	33.33	-18.67	-6.67
12da	533,79	2.18	-2.96	-3.17	101.67	-29.92	-11.50
12ad	536,29	-2.06	1.21	-1.81	175.00	0.67	-8.50
12da	538,01	-1.80	-1.29	-2.19	-40.00	-13.58	-7.50
11aa	541,23	-0.97	-3.20	-5.88	-66.67	-34.00	-17.17
12aa	546,89	-1.02	-1.11	-10.32	-13.33	-21.17	-9.67
11ab	549,29	-1.28	-0.36	0.07	-48.33	0.08	0.00
11bb	550,23	-0.98	0.06	-3.38	-31.67	-9.08	-4.00
12ba	551,67	-0.66	-1.77	-0.68	-6.67	-22.00	-11.67
12ab	553,89	-1.22	-0.27	-1.07	30.00	-16.50	-7.17
11bb	556,67	-1.22	-0.30	-0.83	-5.00	-25.33	-20.67
11ba	559,82	0.70	-2.12	-0.67	0.00	-55.17	18.83
11aa	562,96	-0.22	0.00	-2.07	3.33	-15.67	-7.83
11aa	564,00	0.03	0.51	-4.43	3.33	3.67	-13.83
11ab	565,39	-0.96	0.52	-2.50	-26.67	-4.58	-5.67
11bb	567,49	-0.87	-0.16	-1.89	-73.33	2.25	32.67
21ba	571,75	-0.08	-1.24	-0.86	-166.67	67.58	-0.83

Tronçon	PK amont	ΔB (m/an)			Δz (mm/an)		
		55-84	84-95	95-02	78-84	84-96	96-02
22ad	573,15	1.47	1.75	-2.86	-196.67	12.17	-8.17
22dd	575,45	1.02	0.06	2.74	-160.00	22.00	-32.17
11db	578,25	-1.52	0.45	-1.37	-30.00	-2.00	11.67
11bb	580,75	-0.26	-0.90	-4.51	-26.67	5.00	3.00
21ba	584,24	-0.44	-0.24	-0.48	-10.00	-5.92	-1.17
11aa	587,28	-0.41	-0.18	0.11	3.33	-0.67	-12.33
22ad	587,61	-0.89	-1.68	-4.68	3.33	3.00	-10.83
12db	589,48	-2.24	-0.82	1.57	5.00	14.08	-4.33
21bd	590,55	-0.94	-0.16	-1.67	5.00	6.83	-6.50
22dd	594,04	-0.21	-1.48	-1.57	6.67	-5.58	-20.17
21dd	597,88	-0.33	0.00	-2.38	-55.00	-0.25	-4.67
12dd	599,08	-0.84	-0.91	-0.86	-48.33	-9.75	-33.00
22dd	600,44	-0.13	0.05	-4.74	-41.67	-20.25	-63.83
21db	602,99	-0.24	-0.80	-3.79	-26.67	-6.83	-21.83
21ba	605,74	-0.04	0.65	-2.34	-20.00	-24.42	-8.17
12ab	608,15	0.04	-0.05	-0.11	-18.33	-7.25	-2.17
21bd	610,54	0.29	-1.48	-1.64	-35.00	-19.17	-15.33
12dd	612,26	-1.33	-6.23	-4.93	-40.00	-10.67	-27.17
11da	613,27	-0.44	-0.85	-2.12	-35.00	-8.08	-37.33
11ab	616,58	-0.33	-0.95	-0.25	-16.67	-7.50	-11.33
12bd	618,44	-0.24	-5.08	-0.64	-26.67	-32.83	-66.83
11dd	621,57	0.09	-0.45	-3.07	-45.00	-16.25	-1.50
12dd	622,69	-0.51	-1.24	-4.57	-50.00	-2.25	-7.17
21db	624,20	-0.55	0.00	-1.50	-43.33	-12.58	-8.50
22bb	625,35	-0.08	-0.82	-2.23	-41.67	-6.58	-7.33
21bd	627,77	-0.83	-1.08	-5.95	-38.33	10.08	-3.67
12dd	630,85	-0.59	-1.41	-4.14	-8.33	2.42	-9.67
12da	632,30	1.1	-1.27	3.21	3.33	-3.58	-8.67
12aa	633,89	-0.34	0.79	-2.52	10.00	-6.33	-12.50
11aa	635,64	-0.70	-0.97	2.67	16.67	7.83	-7.33
12aa	636,75	0.29	-0.45	3.36	11.67	8.58	0.17
12aa	638,16	1.10	-1.09	4.57	1.67	7.00	-83.50
12aa	638,85	-0.64	0.21	4.05	6.67	-22.50	-11.67

Tronçon	PK amont	ΔB (m/an)			Δz (mm/an)		
		55-84	84-95	95-02	78-84	84-96	96-02
11aa	640,40	-0.17	0.57	2.19	20.00	-12.08	-25.50
12ad	641,97	-1.69	-0.68	2.50	33.33	-14.33	-11.00
11dc	642,86	-0.63	0.30	2.23	41.67	-21.50	-3.67
11cd	647,08	-0.52	1.00	-0.64	-20.00	-2.58	-20.00
12dd	647,94	-0.07	-0.26	-2.71	-3.33	-8.83	46.83
11db	650,61	-0.43	0.05	2.82	-6.67	-46.92	9.83
11ba	654,34	-0.09	-1.58	1.10	-41.67	-22.25	-29.67
11aa	656,04	0.07	-0.35	-5.31	-13.33	-15.17	-30.00
11ab	656,43	-0.36	-0.42	-5.69	190.00	-69.58	-13.00
21bd	659,28	-3.30	0.33	-1.72	90.00	-49.83	-18.17
12dd	661,25	-1.28	-4.09	-1.07	0.00	3.25	-16.33
11da	662,46	0.32	0.68	-2.21	-55.00	42.08	-26.00
11ab	664,09	-1.30	-2.80	4.25	-76.67	55.92	-15.67
21ba	666,24	0.55	-0.99	-0.10	-26.67	12.17	4.83
21ad	671,47	0.02	0.26	-1.14	-43.33	100.00	-8.33
22dd	673,82	-0.34	-0.66	-1.21	-43.33	56.58	-140.33
11db	675,23	-0.11	-1.92	-0.92	-40.00	-7.17	-3.50
11ba	678,82	-0.94	-0.58	-1.38	-50.00	-10.42	-10.67
12ad	679,98	1.14	1.86	-2.04	-53.33	-15.25	-7.33
12db	682,10	-0.32	-1.00	-2.26	26.67	-18.75	19.17
12bb	687,46	-0.13	-0.75	-2.09	-48.33	-23.67	4.83
11ba	690,09	1.09	-3.26	-0.12	-86.67	44.25	-12.67
11aa	693,48	0.68	0.73	1.26	-11.67	0.50	-3.50
11aa	695,97	0.34	0.68	-0.86	-15.00	3.67	-10.00
11aa	696,52	-0.60	2.09	-1.52	-125.00	-8.25	-20.83
11aa	698,11	0.37	0.45	-2.48	-56.67	-9.67	-12.67
12ad	699,58	-0.74	0.23	-4.71	-46.67	-23.50	-3.67
11db	705,81	-0.11	-0.13	-5.20	-35.00	-19.33	-7.33
21bb	708,43	-1.82	-0.20	-2.52	-31.67	-13.75	6.00
11ba	711,84	-0.76	-2.96	0.63	-51.67	-27.42	-22.00
12ad	714,92	-0.73	-2.32	-3.58	-71.67	-30.83	-23.17
12dd	720,41	-0.40	-0.29	-2.03	-8.33	-36.33	-35.33
11dd	722,90	0.25	-3.36	0.95	-41.67	-30.33	-38.17

Tronçon	PK amont	ΔB (m/an)			Δz (mm/an)		
		55-84	84-95	95-02	78-84	84-96	96-02
12dd	724,81	-1.70	-1.36	-0.63	-46.67	-33.50	-16.00
12da	728,23	0.71	-0.34	-1.93	-66.67	-30.50	-27.50
12aa	730,56	-0.06	-2.15	2.94	-93.33	-16.17	-12.17
12ab	733,14	-0.11	-4.45	2.86	-118.33	-65.42	24.67
12ba	736,11	-0.46	-0.45	0.00	-45.67	-46.08	63.17
12aa	738,67	-0.70	0.00	1.76	-58.33	-34.42	9.00
12aa	741,92	0.01	-0.17	1.14	-66.67	9.33	-37.17
11aa	746,45	-1.02	-1.67	5.19	-80.00	-25.58	3.00
11aa	747,78	-1.66	0.73	-2.00	-25.00	-49.25	-0.17
12aa	748,28	-1.01	-2.27	6.14	-6.67	-58.17	6.50
12aa	750,31	0.00	-6.79	4.21	-91.67	-80.75	21.17
12aa	755,72	-0.45	-1.40	-0.47	-52.00	-40.17	-16.83
12ad	760,57	-0.27	-3.31	-3.71	-28.33	-44.50	-1.67
12db	764,29	0.40	-4.55	-2.75	-35.00	-47.00	-30.67
11bd	766,51	-0.14	-1.02	0.26	-38.33	-58.33	-27.50
12da	769,74	0.18	-2.15	2.64	-45.00	-34.58	-2.33
12aa	772,67	0.66	-0.73	-2.20	-60.00	-31.58	2.83
11ac	775,26	0.69	-0.73	-2.40	-86.67	-41.25	-8.83
11ca	775,45	0.68	-0.73	3.11	-85.00	-41.33	-9.67
11ab	777,40	-0.64	-1.89	1.83	-50.00	-42.00	-18.00
12ba	779,89	-1.20	-4.57	4.04	-6.67	-45.17	-19.50
12ad	782,02	-0.44	-0.55	1.50	-35.00	-26.83	-28.67
12dd	786,14	-1.03	-2.20	-0.37	-25.00	-17.92	11.83
12dd	790,21	-1.48	-0.75	-0.93	-90.00	1.25	-6.17
11dd	794,71	-0.57	-0.51	1.51	-55.00	-7.83	9.17
12da	796,87	-1.77	0.60	1.17	-38.33	-15.67	-3.00
12aa	802,96	-0.34	0.59	3.07	-43.33	-20.25	2.83
12aa	804,61	-0.77	-2.04	3.73	-51.67	6.17	2.00
11aa	808,20	-1.84	-1.11	6.46	-56.67	-13.08	6.00
12ac	810,70	-2.33	-1.23	3.43	-50.00	-17.08	-3.33
11ca	811,74	-0.40	-0.70	0.11	-48.33	-25.58	14.67
11ad	814,27	-1.62	2.26	2.93	-41.67	-27.33	16.17
12dd	818,03	-3.11	-0.12	1.33	3.33	-53.00	79.83

Tronçon	PK amont	ΔB (m/an)			Δz (mm/an)		
		55-84	84-95	95-02	78-84	84-96	96-02
12da	821,61	-1.97	0.94	-2.67	45.00	-43.17	56.33
12aa	823,37	-1.12	1.57	-3.57	28.33	-35.17	17.17
11ad	826,34	0.12	1.91	-4.91	20.00	-27.33	37.83
12dd	827,81	-0.11	-1.42	-0.31	25.00	-35.50	46.00
12dd	831,44	0.18	-1.08	-0.36	36.67	-53.17	60.17
12da	836,00	-0.08	-1.38	-0.14	51.67	-53.75	42.67
11ad	841,06	0.67	-0.05	-2.45	70.00	-69.00	26.67
12da	845,19	-0.26	1.01	-3.17	23.33	-33.25	31.83
12ad	851,23	0.24	3.09	-5.29	-45.00	-23.75	37.67
11dd	854,17	-0.36	-0.78	-1.30	-36.67	5.42	-2.83
12dd	858,82	-0.34	-0.68	-2.61	-23.33	-5.42	16.00
11da	863,31	-0.47	-1.41	1.26	-11.67	-3.33	15.50
11aa	866,55	-1.20	-0.82	4.67	-1.67	-13.25	36.33
12ad	867,95	-0.43	-3.07	2.90	1.67	-73.17	82.83
12dc	872,75	-2.15	-0.14	3.25	-3.33	-36.58	88.17
11ca	875,22	0.34	-2.95	-1.11	-6.67	-47.92	58.17
12aa	877,45	-0.39	0.35	-2.06	-30.00	-48.42	76.67
12ad	880,17	-0.15	0.60	-2.46	-65.00	-50.17	70.33
11da	882,64	0.08	-1.56	3.29	-76.67	-42.42	74.00
12aa	885,76	-1.01	-1.76	-3.02	-45.00	-30.42	100.33
12aa	888,58	-0.31	-0.36	-0.90	-13.33	-49.58	35.00
12aa	893,39	-0.42	-1.50	-1.93	-48.33	-54.67	76.67
12aa	895,22	-0.07	-1.70	-3.68	-63.33	-59.75	31.50

TABLE F.2: Vitesses d'évolution de la largeur de la bande active B et de l'altitude de la ligne d'eau d'étiage pour les tronçons définis sur la Loire moyenne.

Bibliographie

Bibliographie

- ACKERS, P. et WHITE, W. R. (1973). Sediment transport : New approach and analysis. *Journal of Hydraulics Division*, 99(11):2041–2061.
- ANDREWS, E. (1980). Effective and bankfull discharges of streams in the Yampa River basin, Colorado and Wyoming. *Journal of Hydrology*, 46:311–330.
- ANDRIAMAHEFA, H. (1999). *Les hydro-écorégions du bassin de la Loire. Morphologie, hydrologie, pressions anthropiques sur les cours d'eau et les bassins versants*. Thèse de doctorat, Université Jean Monnet, St Etienne.
- ASHMORE, P. (1991). How do gravel bar rivers braid? *Can. J. Earth Sciences*, 28:326–341.
- BABONAUX, Y. (1970). *Le lit de la Loire, Etude hydrodynamique fluviale*. Thèse de doctorat, Ministère de l'éducation nationale. Comité des travaux historiques et scientifiques. Mémoires de la Section de géographie.
- BAGNOLD, R. (1966). An approach of sediment transport model from general physics. Rapport technique 422, U.S. Geol. Survey.
- BAGNOLD, R. (1977). Bed load transport by natural rivers. *Water Resources Research*, 13(2):303–312.
- BAGNOLD, R. (1980). An empirical correlation of bedload transport rates in flumes and natural rivers. *In Proceedings of the Royal Society of London*, pages 453–473.
- BELLEUDY, P. (2000). Restoring flow capacity in the Loire River bed. *Hydrological Processes*, 14:2331–2344.
- BELLEUDY, P. (2001). Numerical simulation of sediment mixture deposition. part 2 : a sensitivity analysis. *Journal of Hydraulic Research*, 39:25–31.
- BERNARDES, M. E. C., DAVIDSON, M. A., DYER, K. et GEORGE, K. (2006). Towards medium term (order of months) morphodynamic modelling of the Teign estuary, UK. *Ocean dynamics*, 56:186–197.
- BERNOT, V., CALLAND, V., BRAVARD, J. et FOUSSADIER, R. (1996). La sectorisation longitudinale du Vidourle (Gard-Hérault), une méthode appliquée à la gestion environnementale d'un espace fluvial méditerranéen. *Revue de Géographie de Lyon*, 71, Numéro 4:323–339.
- BERTHOIS, L. (1971). Les transports sédimentaires et l'érosion dans le bassin de la Loire. *Etudes Ligériennes*, 11.
- BLANCHARD, C. (2007). *Qualité des cours d'eau du bassin de la Loire (ions majeurs et nutriments) : Evolution, régionalisation et modélisation*. Thèse de doctorat, Université de Tours.
- BOMER, B. (1972). Les îles de la Loire : évolution ou stabilité. *Etudes Ligériennes*, 11:70–80.
- BONNET, G. (2009). Grappe de PC - notice d'utilisation (version du 05/05/2009). Rapport technique, Cemagref.
- BOUCHARD, J. et COURIVAUD, J. (2000). Diagnostic morphologique de la Loire à Belleville. Rapport technique, EDF. Rapport EDF HP-73/200/020/A.
- BRAVARD, J. (1994). L'incision des lits fluviaux : du phénomène morphodynamique naturel et réversible aux impacts irréversibles. *Géocarrefour*, 69:5–10.
- BRAVARD, J., AMOROS, C., PAUTOU, G., BORNETTE, G., BOURNAUD, M., CREUZÉ DES CHÂTELLIERS, M., GIBERT, J., PEIRY, J., PERRIN, J. et TACHET, H. (1997). River incision in south east France : morphological phenomena and ecological effects. *Regulated Rivers : Research and Management*, 13:75–90.
- BRAVARD, J. et PEIRY, J. (1993). La disparition du tressage dans les Alpes françaises sous l'effet de l'aménagement des cours d'eau (19^{me} - 20^{me} siècles). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 88:67–79.
- BRAVARD, J. et PETIT, F. (1997). *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*.

BIBLIOGRAPHIE

- BRICE, J. (1975). Air photo interpretation of the form and behavior of alluvial rivers. Rapport technique, U.S. Army Research Office, St Louis, MO.
- BRIDGE, J. (2005). *Rivers and Floodplains*. Blackwell.
- BROOKES, A. (1987). River channel adjustments downstream from channelization works in England and Wales. *Earth Surface Processes & Landforms*, 12:337–351.
- BROSSÉ, R. (1982). *Les processus sédimentaires dans le fleuve Loire*. Thèse de doctorat, Université d'Angers.
- CAMENEN, B., HOLUBOVA, K., LUKAC, M., LE COZ, J. et PAQUIER, A. (2011). Assessment of the methods using 1D modelling for computing bedload transport in a large river : the Danube River in Slovakia. *Journal of Hydraulic Engineering*. accepté.
- CAMENEN, B., LARSON, M. et YAMASHITA, T. (2005). A suspended load formula for the nearshore. *In Proc. 52nd Japanese Coastal Eng. Conf.*, pages 381–385. JSCE. (in Japanese).
- CAO, Z. et CARLING, P. (2002). Mathematical modelling of alluvial rivers : reality and myth. part 1 General review. *Water and Maritime Engineering*, 154 (3):207–219.
- CASTANET, C. (2008). *La Loire en Val d'Orléans. Dynamiques fluviales et socio-environnementales durant les derniers 30 000 ans : de l'hydrosystème à l'anthroposystème*. Thèse de doctorat, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- CHAMPION, M., MAILLARD, P. et CARIO, P. (1971). Les alluvions de la Loire dans la région Centre. Inventaire de la production et des gisements. Rapport technique, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées.
- CHARLOT, F., FALOURD, B., VIVIER, N. et XOUILLOT, T. (1995). Historique des protections contre les crues de la Loire. section Orléans-Angers. Rapport technique, Direction régionale de l'équipement centre.
- CLAUDE, N. (2008). Evolution morphologique du lit de la Loire au droit du secteur de Belleville et comparaison des évolutions régionales. Mémoire de D.E.A., Université de Tours.
- COULLON, H., LATAPIE, A., LIMET, S., MELIN, E., PIERRE, D. et ROBERT, S. (2010). Utilisation des architectures parallèles pour le traitement des gros volumes de données liées aux risques environnementaux. *Revue Ingénierie des Systèmes d'Information*. accepté.
- DACHARRY, M. (1974). *Hydrologie de la Loire en amont de Gien*. Thèse de doctorat, Paris-Sorbonne.
- DAMBRE, J. (1996). Les extractions de matériaux dans le lit mineur et le lit majeur de la Loire et de ses affluents. *La Houille Blanche*, 6/7:108–113.
- DAMBRE, J. et MALAVAL, P. (1993). Evaluation des conditions de poursuite de la politique de limitation des extractions de matériaux dans le lit de la Loire du Bec d'Allier à Nantes. Rapport technique, Cellule de mesures et de bilans Loire Estuaire.
- DAUBERT, A. et LEBRETON, J. (1967). Etude expérimentale sur modèle mathématique de quelques aspects des processus d'érosion des lits alluvionnaires, en régime permanent et non permanent. *In 12th IAHR Congress*, volume 3, pages 26–37, Fort Collins, Colorado, USA.
- DAVIES, T. et SUTHERLAND, A. (1983). Extremal hypothesis for river behaviour. *Water Resources Research*, 19:141 – 148.
- DAVIS, W. (1899). The geographical cycle. *Geographical Journal*, 14:481–504.
- DE LINARES, M. (2007). *Modélisation numérique bidimensionnelle du transport solide et de la dynamique fluviale. Validation sur deux sites en Loire et sur l'Arc*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble.
- DEBRAND-PASSARD, S., MACAIRE, J., CLOZIER, L. et FLEURY, R. (1998). Particularités de l'évolution du système solonchot dans le bassin de la Loire au Quaternaire. corrélations possibles. *Géologie de la France*, 2:55–68.
- DOERING, M., UEHLINGER, U., ROTACH, A., SCHLAEPFER, D. R. et TOCKNER, K. (2007). Ecosystem expansion and contraction dynamics along a large alpine alluvial corridor (Tagliamento River, Northeast Italy). *Earth Surface Processes & Landforms*, 32:1693 – 1704.
- DONSIMONI, M., BERTHIER, H., MARTIN, J. et NACHBAUR, A. (2008). Détermination de la présence de karsts sous

- les levées domaniales du bassin de la Loire et réduction du risque d'effondrement de la digue lié à la présence de ces conduits souterrains naturels (Tranche 1 : analyse géologique et hydrogéologique). Rapport technique, BRGM.
- DÉTRICHÉ, S., RODRIGUES, S., MACAIRE, J., BONTÉ, P., BRÉHÉRET, J., BAKYONO, J. et JUGÉ, P. (2010). Caesium 137 in sandy sediments of the River Loire (France) : Assessment of an alluvial island evolving over the last 50 years. *Geomorphology*, 115:11–22.
- DUBAND, H. (1996). La genèse des crues dans le bassin de la Loire. *La Houille Blanche*, 6-7:54–62.
- 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.
- EL KADI ABDERREZZAK, K. (2006). *Evolution d'un lit de rivière en fonction des apports*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1.
- ENGELUND, F. et HANSEN, E. (1967). *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. Teknisk Forlag.
- FAURE, J. (2009). MAGE. Résolution des équations de Barré de Saint-Venant 1D en réseaux complexes (notice de janvier 2009). Rapport technique, Cemagref.
- FERGUSON, R., CHURCH, M. et WEATHERLY, H. (2001). Fluvial aggradation in Vedder River : Testing a one-dimensional sedimentation model. *Water Resources Research*, 37:3331–3347.
- FOLK, R. et WARD, W. (1957). Brazos river bar : a study of the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27:3–26.
- GARRY, G., BALLAIS, J. et MASSON, M. (2002). La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation en France méditerranéenne. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1:5–16.
- GASOWSKI, Z. (1994). L'enfoncement du lit de la Loire. *Géocarrefour*, 69:41–45.
- GAUTIER, E., PIÉGAY, H. et BERTAINA, P. (2000). A methodological approach of fluvial dynamics oriented towards hydrosystem management : case study of the Loire and Allier rivers. *Geodinamica Acta*, 1:29–43.
- GAUTIER, J. (2001). Etude Loire moyenne - Synthèse des connaissances hydrologiques. Rapport technique, Equipe pluridisciplinaire plan Loire Grandeur Nature.
- GAUTIER, J., RODRIGUES, S., PETERS, J., PEETERS, P. et JUGÉ, P. (2008). Transport solide en Loire moyenne lors des crues. Justification des mesures in situ et quantification. *La Houille Blanche*, 5:71–78.
- GIGOUT, M. (1975). Sur l'histoire du coude de la Loire au Villafranchien (sens large) et au quaternaire. *C.R. Académie des Sciences (Paris)*, 280:1653–1656.
- GINESTET, P. (1999). Sectorisation géomorphologique de la Loire entre le Bec d'Allier et Monjean sur Loire. Rapport technique, Equipe Pluridisciplinaire du Plan Loire Grandeur Nature.
- GRIVEL, S. (2008). *La Loire des îles, du Bec d'Allier à Gien : rythme d'évolution et enjeux de gestion*. Thèse de doctorat, Université Paris 8.
- GUILLON, P. (1898). Ecoulement des sables et matières solides. marche des grèves et des mouilles. transformation continue du fond du lit. Rapport technique, Ponts et Chaussées.
- HANDFUS, T. (2008). Mise à jour de la sectorisation de la Loire moyenne. Mémoire de D.E.A., Université de Tours.
- HEY, R. (1975). *Design discharge for natural channels*. Saxon House, Farnborough, England.
- HEY, R. (2006). Fluvial geomorphological methodology for natural stable channel design. *Journal of the American Water Resources Association*, 42:357–374.
- HOEY, T. et FERGUSON, R. (1994). Numerical simulation of downstream fining by selective transport in gravel bed rivers : model development and illustration. *Water Resources Research*, 30:2251–2260.
- HR WALLINGFORD LTD AND SIR WILLIAM HALCROW & PARTNERS (2002). *ISIS Flow user manuel. Version 2.1*.
- HYDRATEC (1984). Suivi de l'évolution du lit de la Loire moyenne de Nevers à Angers. Rapport technique, Hydratec (Setec hydraulique).
- HYDRATEC (1986). Suivi de l'évolution du lit de la Loire moyenne. Rapport technique, Hydratec.

BIBLIOGRAPHIE

- IKEDA, S. (1982). Incipient motion of sand particles on side slopes. *Journal of Hydraulic Division*, 108(1):95–114.
- JACKSON, R. (1976). Depositional model of point bars in the Wabash River. *Journal of Sedimentary Petrology*, 46:579–594.
- JURACEK, K. et FITZPATRICK, F. (2003). Limitations and implications of stream classification. *Journal of the American Water Resources Association*, 39(3):659–670.
- KARIM, M. et KENNEDY, J. (1982). A computer based flow and sediment routing for alluvial streams and its application to the Missouri River. Rapport technique 250, Iowa Institute of Hydraulic Research.
- KHODASHENAS, S. et PAQUIER, A. (1999). A geometrical method for computing the distribution of boundary shear stress across irregular straight open channels. *Journal of Hydraulic Research*, 37:381–388.
- KNAPP, R. (1938). Energy balance in stream flows carrying suspended load. In *Am. Soc. Mech. Engineers*, volume 19, pages 501–505.
- KNIGHTON, A. (1980). Longitudinal changes in size and sorting of stream bed material in four English rivers. *Geological Society of America Bulletin*, 31:55–62.
- KNIGHTON, A. (1982). Longitudinal changes in the size and the shape of stream bed material : evidence of variable transport conditions. *Catena*, 9:25–34.
- KNIGHTON, A. (1998). *Fluvial Forms and Processes : A new perspective*. Oxford University Press.
- KNIGHTON, A. (1999). Downstream variation in stream power. *Geomorphology*, 29:293–306.
- KNIGHTON, A. et NANSON, G. (1993). Anastomosis and the continuum of channel pattern. *Earth Surface Processes & Landforms*, 18:613–625.
- KONDOLF, G., MONTGOMERY, D., PIEGAY, H. et SCHMITT, L. (2003). *Tools in fluvial geomorphology*. John Wiley & Sons.
- KONDOLF, G., SMELTZER, M. et RAILSBACK, S. (2001). Design and performance of a channel reconstruction project in a coastal California gravel-bed stream. *Environmental Management*, 28:761–776.
- LACEY, C. (1929). Stable channels in alluvium. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers.*, 229:259–384.
- LANE, E. (1955). The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, volume 81, pages 1–17.
- LANG, M. et LAVABRE, J. (2007). *Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations*. Editions Quae.
- LARUE, J. (2004). Morphodynamique fluviale actuelle d'origine anthropique : exemples dans le bassin de la Loire (France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 10:127–138.
- LEOPOLD, L. et MADDOCK, T. (1953). The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. U.S. Geological Survey professional paper. (no. 252, 57p.).
- LEOPOLD, L. et WOLMAN, M. (1957). River channel patterns : braided, meandering and straight. U.S. Geological Survey professional paper. (no.282-B, 85 p.).
- LETEINTURIER, B., ENGELS, P., PETIT, F., CHIFFAUT, A. et MALAISSE, F. (2000). Morphodynamisme d'un tronçon de Loire bourbonnaise depuis le 18^{ème} siècle. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4:239–252.
- LEWIN, J. et BREWER, P. (2001). Predicting channel patterns. *Geomorphology*, 40:329–339.
- MACAIRE, J. (1983). Evolution du réseau hydrographique dans le sud ouest du bassin de paris pendant le pliocène et le quaternaire. *Bulletin de l'association française pour l'étude du Quaternaire*, 4:183–195.
- MAGILLIGAN, F. (1992). Thresholds and the spatial variability of flood power during extreme floods. *Geomorphology*, 5:373–390.
- MALAVOI, J. (2001). Protocole de mesures granulométriques pour une approche globale du fonctionnement de la Loire. Rapport technique, Plan Loire Grandeur Nature.
- MALAVOI, J. et GAUTIER, J. (1997). Sectorisation géomorphologique de la Loire entre le Bec d'Allier et le Bec de

- Maine. Rapport technique, Epteau, EPL.
- MARTIN-VIDE, J., FERRER-BOIX, C. et OLLERO, A. (2010). Incision due to gravel mining : Modelling a case study from the Gallego River, Spain. *Geomorphology*, 117:261–271.
- MEYER-PETER, E. et MÜLLER, R. (1948). Formulas for bed-load transport. *In Proceedings of the 2nd IAHR congress*, pages 39–64, Stockholm.
- MILLER, J. et RITTER, J. (1996). An examination of the Rosgen classification of natural rivers. *Catena*, 27:295 – 299.
- MOLINAS, A. et WU, B. (1998). Effect of size gradation on transport of sediment mixtures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124 (8):786–793.
- MORIN, E. (2007). Evaluation de modèles d'évolution des lits alluviaux à grandes échelles de temps et d'espace. Mémoire de D.E.A., Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg et Université de Caen.
- MORIN, E., PAQUIER, A. et LATAPIE, A. (2008). A model to simulate alluvial bed evolutions on large time and space scales. *In River Flow*, Cesme, Izmir, Turquie.
- MOSLEY, M. (1981). Semi-determinate hydraulic geometry of river channels, South Island, New Zealand. *Earth Surface Processes & Landforms*, 6:127–137.
- NANSON, G. et KNIGHTON, A. (1996). Anabranching rivers : their cause, character and classification. *Earth Surface Processes & Landforms*, 21:217–239.
- NASH, D. (1994). Effective sediment transporting discharge from magnitude-frequency-analysis. *Journal of Geology*, 102:79–95.
- NAVRATIL, O., ALBERT, M., HÉROUIN, E. et GRÉSILLON, J. (2006). Determination of bankfull discharge magnitude and frequency : comparison of methods on 16 gravel bed river reaches. *Earth Surface Processes & Landforms*, 31:1345–1363.
- NEHLING, P. (2010). Géologie du bassin de la Loire. *Géosciences*, 12:10–23.
- NICOLET, G. et UAN, M. (1979). Ecoulements permanents à surface libre en lits composés. *La Houille Blanche*, 1:21–30.
- OTTO, G. (1939). A modified logarithmic probability graph for interpretation of mechanical analyses of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 9:62–76.
- PAQUIER, A. (2009). Notice d'emploi de Rubarbe (version d'octobre 2009). Rapport technique, Cemagref.
- PAQUIER, A. et EL KADI ABDEREZZAK, K. (2008). *Hyperbolic Problems : Theory, Numerics, Applications.*, chapitre A model for bedload transport and morphological evolution in rivers : description and pertinence, pages 285–296. Springer, New York.
- PAUCHET, T. (2007). Evolution morphologique de la Loire moyenne. Mémoire de D.E.A., INP ENSEEIHT.
- PETIT, F. et PAUQUET, A. (1997). Bankfull discharge recurrence interval in gravel bed rivers. *Earth Surface Processes & Landforms*, 22:685–693.
- PETTS, G., MÖLLER, H. et ROUX, A. (1989). *Historical change of large alluvial rivers : Western Europe*. John Wiley and Sons.
- PHILLIPS, B. et SUTHERLAND, A. (1989). Spatial lag effects in bed load sediment transport. *Journal of Hydraulic Research*, 27(1):115–133.
- PICKUP, G. et WARNER, R. (1976). Effects of hydrologic regime on magnitude and frequency of dominant discharge. *Journal of Hydrology*, 29:51–75.
- PIEGAY, H., DARBY, S., MOSSELMAN, E. et SURIAN, N. (2005). The erodible corridor concept : applicability and limitations for river management. *River Research and Applications*, 21:773–789.
- PONS, A. (2000). Evolutions morphologiques du lit de la Loire dans le secteur de Belleville-sur-Loire. Mémoire de D.E.A., ENSEEIHT.

BIBLIOGRAPHIE

- RAMEZ, P. et PAQUIER, A. (2004). Morphologie des rivières à gravier pavées avec berges érodables. partie 1 : valorisation d'expérience de laboratoire. *La Houille Blanche*, 5:101–106.
- RAVEN, P., BOON, P., DAWSON, H. et FERGUSON, A. (1998). Towards an integrated approach to classifying and evaluation rivers in the UK. *Aquatic Conservation : Marine and Freshwater Ecosystems*, 8(4):383–394.
- RETHORET, H. (2001). Etat des connaissances des seuils et points durs en Loire - campagne de localisation 2000 entre le Bec d'Allier et Nantes. Rapport technique, Direction Régionale de l'Environnement Centre.
- RICHARDS, K. S. (1982). *Rivers : form and process in alluvial channels*. Routledge.
- RODRIGUES, S. (2004). *Dynamique sédimentaire et végétation : évolution de chenaux fluviaux en Loire moyenne (France)*. Thèse de doctorat, Université de Tours.
- RODRIGUES, S. et CLAUDE, N. (2010). Le transport solide de la Loire : des sédiments sans cesse en mouvement. *Géosciences*, 12:110.
- ROLLET, A. (2007). *Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain*. Thèse de doctorat, Université Jean Moulin (Lyon 3).
- ROSGEN, D. (1994). A classification of natural rivers. *Catena*, 22:169–199.
- RUBEY, W. (1933). Equilibrium conditions in debris laden streams. In *Am. Geophys. Union Trans. 14th annual meeting*, pages 497–505.
- RUST, B. (1978). *A classification of alluvial channel systems*, chapitre 5, pages 187–198. Fluvial Sedimentology, Can. Soc. Petrol. Geol.
- SAUQUET, E., JAVELLE, P. et CLERC, S. L. (2003). Description des régimes hydrologiques des hautes eaux : nouvelle formulation pour l'analyse en débit-durée-fréquence et applications en ingénierie. *Ingénieries EAT*, 24:3–16.
- SCHMITT, L., MAIRE, G. et HUMBERT, J. (2000). Typologie hydro-géomorphologique des cours d'eau : vers un modèle adapté à la gestion du milieu physique des rivières du versant sud occidental du fossé rhénan. *Géocarrefour*, 75, Numéro 4:347–363.
- SCHMITT, L., MAIRE, G. et HUMBERT, J. (2001). La puissance fluviale : définition, intérêt et limites pour une typologie hydro-géomorphologique de rivière. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 45:201–224.
- SCHUMM, S. (1977). *The Fluvial System*. Wiley.
- SCHUMM, S. (1981). Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication*, 31:19–29.
- SCHUMM, S. (1985). Patterns of alluvial rivers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 13:5–27.
- SCHUMM, S. et LICHTY, R. (1965). Time, space and causality in geomorphology. *American Journal of Science*, 263:110–119.
- Service Hydrologique Centralisateur du Bassin de la LOIRE (1979). Abaissement du lit de la Loire. départements de la Nièvre et du Cher à l'aval du Bec d'Allier. Rapport technique, Direction Régionale de l'Environnement. Service de Bassin Loire Bretagne.
- SIMON, A. (1989). A model of channel response in disturbed alluvial channels. *Earth Surface Processes & Landforms*, 14:11–26.
- SIMON, A., DOYLE, M., KONDOLF, M., JR., F. S., RHOADS, B. et MCPHILLIPS, M. (2007). Critical evaluation of how the Rosgen classification and associated "natural channel design" methods fail to integrate and quantify fluvial processes and channel response. *Journal of the American Water Resources Association*, 43(5):1117–1131.
- SMITH, D. (1986). Anastomosing river deposits sedimentation rates and basin subsidence, Magdalena river, North-western Columbia, South America. *Sedimentary Geology*, 46:177–196.
- SOULSBY, R. et WITHEHOUSE, R. (1997). Threshold of sediment motion in coastal environments. In *Proceedings of the Pacific Coasts and Ports*, pages 149–154, Canterbury, New Zealand.
- STERNBERG, H. (1875). Untersuchungen über Langen und Querprofil Geschiebeführende Flüsse. [Estimation de la

- charge de fond pour des profils transversaux et longitudinaux]. *Zeitschrift Bauwesen*, 25:483–506. (en allemand).
- STRICKLER, A. (1923). Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. [contribution à la formulation de la vitesse et de la rugosité pour les rivières, canaux et canalisations.]. Mitteilung 16, Amt für Wasserwirtschaft, Bern, Switzerland. (en Allemand).
- SURIAN, N. et RINALDI, M. (2003). Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology*, 50:307–326.
- TAL, M. et PAOLA, C. (2010). Effects of vegetation on channel morphodynamics : results and insights from laboratory experiments. *Earth Surface Processes & Landforms*, 35:1014–1028.
- THORNE, C. (2002). Geomorphic analysis of large alluvial rivers. *Geomorphology*, 44:203–219.
- TRASK, P. (1932). *Origin and environment of source sediments of petroleum*. Golf Publishing Company.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE) (1992). Guidelines for the calibration and application of computer program HEC-6. Training document no. 13, hec, davis, calif., Hydrologic Engineering Center(HEC).
- VAN DEN BERG, J. (1995). Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers. *Geomorphology*, 12:259–279.
- VAN RIJN, L. (1984). Sediment transport, part I : bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10):1431–1456.
- VAN RIJN, L., WALSTRA, D., GRASMEIJER, B., SUTHERLAND, J., PAN, S. et SIERRA, J. (2003). The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. *Coastal Engineering*, 47:295–327.
- WASSON, J., BETHEMONT, J., DEGORCE, J., DUPUIS, B. et JOLIVEAU, T. (1993). Approche écosystémique du bassin de la Loire. Eléments pour l’élaboration des orientations fondamentales de gestion. Phase 1, Atlas. (81p + planches et annexes). Rapport technique, Cemagref, division biologique des écosystèmes aquatiques et université de St Etienne-CRENAM.
- WHITE, W., BETTESS, R. et PARIS, E. (1982). Analytical approach to river regime. *J. Hydr. Div., ASCE*, 108.
- WILLIAMS, P. (1978). Bankfull discharge of rivers. *Water Resources Research*, 14:1141–1154.
- WU, W., VIERA, D. et WANG, S.-Y. (2000). New capabilities of the CCHE1D channel network model. In *Water Resources 2000 : Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management*, 26, Minneapolis, Minnesota, USA.
- YALIN, S. et DA SILVA, F. (2001). *Fluvial processes*. AIRH Monograph.
- YANG, C., SONG, C. et WOLDENBERG, M. (1981). Hydraulic geometry and minimum rate of energy dissipation. *Water Resources Research*, 17:1014–1018.

MODELISATION DE L'EVOLUTION MORPHOLOGIQUE D'UN LIT ALLUVIAL : APPLICATION A LA LOIRE MOYENNE

Résumé :

Ce travail a pour objectif de proposer des méthodes pour améliorer la compréhension des processus d'évolution de la Loire moyenne sur quelques décennies.

L'analyse des évolutions morphologiques est réalisée en découpant le secteur d'étude en tronçons géomorphologiquement homogènes. Une diminution de la pente et une réduction de la largeur de la bande active entre 1955 et 1996 sont observées. Suite à l'arrêt des extractions (1996), les ajustements se poursuivent de façon plus modérés.

Des simplifications géométriques et hydrologiques sont ensuite introduites dans un modèle de transport solide unidimensionnel (RubarBE) afin d'être comparées aux résultats obtenus avec la géométrie détaillée et la chronique de débit complète. La géométrie simplifiée permet une modélisation des évolutions du lit pertinente tout en réduisant le temps de calcul ; la simplification des chroniques de débit illustre la sensibilité des modèles numériques hydro-sédimentaires à l'hydrologie. Enfin, l'application des simplifications sur l'ensemble de la Loire moyenne sur la période 1996-2006 confirme les tendances observées par l'analyse des données.

Mots clés : évolutions morphologiques, Loire moyenne, modélisation 1D, grande maille.

MODELLING THE MORPHOLOGICAL EVOLUTION OF THE MIDDLE LOIRE RIVER (FRANCE)

Abstract :

This work deals with the development of methods that sought to assess channel changes of a long anthropogenised river over several decades. These methods are applied on the Middle Loire River (France).

Channel changes are evaluated by dividing the study reach into geomorphically distinct river reaches. A narrowing of the active channel width and a decrease of the river bed slope were observed between 1955 and 1996. Since in stream gravel mining stopped (1996), river adjustments have continued at a slower rate.

Simplified geometry and simplified hydrographs are then derived and introduced into a one dimensional sediment transport model (RubarBE). The simplified geometry allows pertinent calculation of the river bed evolution whilst reducing calculation time. The use of simplified hydrographs highlights the sensitivity of sediment transport modelling to hydrology. Finally, the application of the simplifications to the whole Middle Loire River confirms the general trend observed between 1996 and 2006.

Keywords : morphological evolution, Middle Loire River, 1D model, large scale.