



HAL
open science

Trajectoire hydrogéomorphologique d'un petit cours d'eau périurbain francilien : aménagement, "désaménagement"?

Marion Jugie

► **To cite this version:**

Marion Jugie. Trajectoire hydrogéomorphologique d'un petit cours d'eau périurbain francilien : aménagement, "désaménagement"?. Géographie. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2018. Français. NNT : 2018PA01H087 . tel-02181434

HAL Id: tel-02181434

<https://theses.hal.science/tel-02181434>

Submitted on 12 Jul 2019

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

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

Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

École doctorale de Géographie de Paris (ED 434)

Laboratoire de Géographie Physique, Environnements Quaternaires et Actuels

UMR 8591 CNRS

Thèse présentée par

Marion JUGIE

Soutenue publiquement le 28 septembre 2018 en vue de l'obtention du

DOCTORAT de l'UNIVERSITE DE PARIS 1 PANTHEON-SORBONNE

Spécialité : Géographie physique, humaine, économique et régionale

Trajectoire hydrogéomorphologique d'un petit cours d'eau périurbain francilien. Aménagement, « *désaménagement* » ?

Sous la direction de : **Charles LE COEUR** et **Frédéric GOB**

Membres du jury

Nathalie CARCAUD	Professeure, AgroCampus Ouest	Rapporteur
Simon DUFOUR	Maître de Conférences HDR, Université Rennes 2	Examinateur
Marie-Anne GERMAINE	Maître de Conférences, Université Paris 10 Nanterre	Examinatrice
Frédéric GOB	Maître de Conférences, Université Paris 1	Co-directeur
Charles LE COEUR	Professeur émérite, Université Paris 1	Directeur
Laurence LESTEL	Directrice de Recherches, CNRS METIS	Examinatrice
Pierre-Gil SALVADOR	Professeur, Université Lille 1	Rapporteur



**LABORATOIRE DE
GÉOGRAPHIE PHYSIQUE**
ENVIRONNEMENTS QUATERNAIRES ET ACTUELS
UMR 8591



*À mes grands-pères,
À mes enfants,*

REMERCIEMENTS

À venir

L'objectif de la thèse est, tout d'abord, d'identifier et caractériser la trajectoire spatio-temporelle d'un petit cours d'eau périurbain de faible énergie, à travers l'exemple francilien de la Mérintaise (Essonne-Yvelines). Ces objets d'étude sont, en effet, trop souvent négligés par la communauté scientifique alors même que les enjeux environnementaux de restauration et de préservation écologique, préconisés depuis plusieurs décennies par la DCE, y sont importants (impacts de l'urbanisation et des aménagements anciens). Une approche croisée géohistorique et hydromorphologique a permis de reconstituer l'évolution passée et actuelle de la rivière : la vallée a été fortement aménagée depuis le Moyen-Âge par des équipements hydrauliques modestes mais ayant affecté plus de 80% du linéaire. Les moulins à eau ont été abandonnés au cours du 20^{ème} siècle, libérant partiellement le chenal. Désormais, la trajectoire actuelle, marquée par des ajustements morphologiques significatifs récents, est moins commandée par les aménagements anciens que par les pressions anthropiques actuelles qui touchent le bassin versant (urbanisation, réseau de transports et de drainage, intensification de l'agriculture). Enfin, cette thèse est également l'occasion de s'interroger sur le caractère écologiquement pertinent et hydromorphologiquement durable des travaux de restauration des milieux aquatiques. Ce travail doctoral propose, par ailleurs, de considérer les opérations de restauration comme de nouveaux équipements de la rivière répondant à des besoins socio-politiques nouveaux et participants pleinement de la trajectoire fonctionnelle de la rivière.

ABSTRACT

The objective of this research is, first of all, to identify and characterize the spatio-temporal trajectory of a small low energy periurban river, through the example of the Merantaise River located in the Seine Basin. These objects of investigation are too often neglected by the scientific community even though the environmental issues of ecological restoration politics, advocated for several decades by the WFD, are important (impacts of urbanization and ancient watermills). An interdisciplinary geohistorical and hydromorphological approach allowed to reconstruct the past and present evolution of the river: the valley has been heavily developed since the Middle-Ages by modest hydraulic equipment but has been affected on more than 80% of the channel. Water mills were abandoned during the 20th century, partially clearing the channel. Nowadays, the current trajectory is marked by recent significant morphological adjustments and is less controlled by old hydraulic structures than by current anthropogenic pressures affecting the watershed (urbanization, transport and drainage network, intensification of agriculture). Finally, this thesis is also an opportunity to question the ecologically relevant and hydromorphologically sustainable nature of ecological restoration. This doctoral work also proposes to consider restoration operations as new river facilities responding to new socio-political needs and fully participating of the river's functional trajectory.

REMERCIEMENTS.....	5
RÉSUMÉ	7
ABSTRACT.....	7
SOMMAIRE.....	9
ABRÉVIATIONS	21
Introduction générale.....	23
▪ Contexte de la recherche.....	23
▪ Objectifs et hypothèses de la thèse	24
▪ Organisation de la thèse.....	27
Partie 1. Contexte scientifique et objet d'étude.....	31
Chapitre 1. Cadre thématique : l'influence des aménagements hydrauliques et de l'urbanisation sur les petites rivières périurbaines	33
Introduction	34
A. Définitions et enjeux des petits cours d'eau de faible énergie en contexte périurbain	35
1. Définition de l'objet scientifique	35
1.1. Les petits cours d'eau périurbains de faible énergie.....	35
1.2. Définitions juridiques de propriété et de gestion.....	37
2. Intérêt et enjeux des petits cours d'eau peu dynamiques du bassin parisien.....	40
B. L'anthropisation des petits cours d'eau : pressions et impacts hydromorphologiques ...	41
1. Des forçages anthropiques multiples	41
1.1. Les pressions directes : les aménagements hydrauliques	42
1.1.1. Les ouvrages en travers : définition et fonction	43
1.1.2. Les travaux de chenalisation	46
1.1.3. L'entretien du lit et des berges	46
1.2. Les pressions indirectes : l'actuel rôle majeur de l'urbanisation.....	47
1.2.1. Occupations des sols et structures du réseau de drainage.....	47
1.2.2. Urbanisation et périurbanisation.....	48

2. Les modifications hydromorphologiques liées à l’anthropisation des rivières	50
2.1. Bases théoriques du fonctionnement des cours d’eau : système fluvial, hydrosystème et perturbations anthropiques	50
2.2. Impacts des aménagements hydrauliques.....	52
2.2.1. Les travaux de chenalisation et d’entretien du lit et des berges	53
2.2.2. Les impacts des seuils en rivière	53
2.3. Modifications hydromorphologiques liées à l’urbanisation	57
2.3.1. Seuil(s) de sensibilité et temps de réponse des hydrosystèmes (péri)urbains	57
2.3.2. Modifications du régime hydrologique (débit liquide).....	60
2.3.3. Une production sédimentaire modifiée par l’urbanisation	62
2.3.4. Les effets de l’urbanisation sur la morphologie des cours d’eau.....	64
Éléments de synthèse.....	65
C. La restauration écologique : définition et évolution du concept	69
1. Un cadre institutionnel pour une amélioration et une préservation des milieux aquatiques	69
2. La « restauration de la continuité écologique », un concept scientifique en constante évolution	70
2.1. « Historique » d’un concept scientifique évolutif	71
2.2. Trajectoire temporelle de dégradation et de restauration : durabilité des projets de restauration ?	73
Chapitre 2. Cadre géographique et hydromorphologique de la vallée de la Méranaise	77
Une petite vallée drainant les plateaux d’une marge urbaine	78
A. Le contexte géologique et géomorphologique	80
1. Une rivière inscrite dans les plateaux du centre du bassin parisien	80
2. Géologie locale du bassin versant de la Méranaise	81
3. Morphométrie de la vallée de la Méranaise.....	84
4. Caractéristiques du substrat et de la charge sédimentaire disponible	86
B. Le contexte hydro-climatique	89
1. Le climat.....	89

2. Le régime hydrologique	92
3. La réponse hydrogéologique du bassin versant de la Mérantaise.....	94
C. Un bassin versant périurbain : démographie, occupation du sol et contexte écologique.	96
1. Démographie, une augmentation rapide et récente.....	96
2. D'une vallée rurale à un contexte périurbain	98
3. Une vallée à fort caractère patrimonial et écologique.....	100
Chapitre 3. Cadre et outils d'analyse : le choix des méthodes	103
Introduction	104
A. Approches et échelles d'analyse	105
1. Une approche multiscalaire et interdisciplinaire.....	105
2. Des échelles variées et complémentaires.....	106
2.1. Échelles spatiales.....	106
2.2. Échelles temporelles.....	107
B. Sources, acquisition des données et méthodes de traitement	108
1. La documentation historique.....	108
1.1. Les documents cartographiques	109
1.1.1. Les cartes générales.....	109
1.1.2. Les plans locaux	111
1.1.3. Apports, limites et traitements des cartes anciennes	113
1.2. Les photographies aériennes.....	117
1.3. Les documents iconographiques : les cartes postales	118
1.4. Les données et archives textuelles.....	118
1.4.1. Les rapports d'ingénieurs des Ponts et Chaussées.....	120
1.4.2. Les enquêtes statistiques.....	121
1.4.3. Les monographies communales	122
1.4.4. Travaux de synthèse d'érudits locaux	123
1.5. Regard critique sur la documentation historique	124
1.6. Éléments de synthèse sur la documentation historique	124
2. Caractérisation de l'état hydromorphologique actuel de la Mérantaise	126

2.1. Établissement d'un état des lieux des conditions hydromorphologiques de la Mérançaise	126
2.1.1. Géométrie du lit : marques d'incision, d'érosion latérale et marques d'affouillement des berges ou des ouvrages latéraux.....	126
2.1.2. Les protections de berges	129
2.1.3. Les affluents, les buses et les drains des rejets du réseau de drainage artificiel....	131
2.1.4. Les obstacles à l'écoulement	133
2.1.5. Synthèse des éléments relevés lors de l'état des lieux des conditions hydromorphologique de la Mérançaise	134
2.2. Méthodes de mesures et quantification des évolutions morphologiques.....	135
2.3. Méthodes de mesures et quantification du fonctionnement hydrosédimentaire.....	136
2.3.1. Analyse du régime hydrologique.....	136
2.3.2. Détermination de la capacité de transport de la charge sédimentaire.....	138
Partie 2. Historique des aménagements et « désaménagements » de la Mérançaise.....	141
Intérêt et enjeux d'une étude rétrospective.....	143
Rappel des échelles d'analyse	143
Organisation des chapitres	144
Chapitre 4. Phase 1 : le temps fort des aménagements hydrauliques (XVII^{ème}-XIX^{ème} siècle).....	145
Introduction	146
A. Les aménagements hydrauliques, symboles de la maîtrise de l'eau	146
1. Les moulins de la Mérançaise et leurs ouvrages associés	147
1.1. Bref historique des moulins de la Mérançaise	147
1.1.1. Moulin de Mérançais (ou Mérançais) (<i>commune de Magny-les-Hameaux</i>)	148
1.1.2. Moulin de la Geneste (<i>commune de Châteaufort</i>).....	150
1.1.3. Moulin d'Ors (<i>commune de Châteaufort</i>)	151
1.1.4. Moulin des Vassaux (<i>commune de Villiers-le-Bâcle</i>)	155
1.1.5. Moulin Neuf (<i>commune de Villiers-le-Bâcle</i>)	156
1.1.6. Moulin Aubert/de la Tuilerie (<i>commune de Gif-sur-Yvette</i>).....	158

1.1.7. Moulin de Chamort (<i>commune de Gif-sur-Yvette</i>)	159
1.1.8. Moulin de Gibeciaux (<i>commune de Gif-sur-Yvette</i>).....	160
1.2. Généralités et évolutions spatio-temporelles des moulins durant la phase 1.....	162
1.2.1. Fonctionnement et mode d'alimentation des moulins	162
1.2.2. Forte densité de moulins et périodes de fonctionnement.....	165
1.3. Les ouvrages hydrauliques associés au moulin : seuil en rivière, vannes et déversoirs.	167
2. Ponts et lavoirs, les autres ouvrages en travers de la vallée	168
2.1. Les lavoirs-abreuvoirs de la vallée	168
2.2. Les ponts et passerelles	170
3. Les travaux de chenalisation des eaux de la Mérantaise	172
3.1. Dérivation du lit en pied de versant.....	173
3.1.1. Des moulins implantés en dérivation.....	173
3.1.2. La « <i>morte rivière</i> », destin d'un fond de vallée naturel face à la chenalisation ...	175
3.1.3. Déversoirs et dérivations annexes	176
3.2. Un chenal rectifié et des protections de berge.....	176
3.2.1. Rectification et reprofilage	177
3.2.2. Calibration artificielle de la géométrie du lit.....	178
1.1.1. Consolidation des berges	180
3.3. Un entretien nécessaire du chenal	182
3.3.1. Le curage à « vieux fond-vieux bords »	182
3.3.2. L'entretien et maintien des berges.....	182
3.3.3. L'entretien de la végétation	183
4. Une rivière qui a perdu sa liberté (Synthèse).....	184
B. Un bassin versant rural mais déjà fortement exploité.....	186
1. Un bassin versant agricole et boisé	187
1.1. Les paysages de la vallée.....	187
1.1.1. Les principales cultures	188
1.1.2. L'élevage	189

1.1.3. Autres activités : carrières, distilleries.....	190
2. Le réseau d'étangs et de rigoles du plateau de Saclay.....	190
2.1. Bref historique du réseau d'étangs et de rigoles des Eaux de Versailles.....	191
2.2. Description et fonctionnement des étangs et de rigoles du plateau de Saclay sur notre zone d'étude.....	193
3. Répartition du mode d'occupation du sol durant la Phase 1 (synthèse)	195
Chapitre 5. Phase 2 : Déprise de la petite hydraulique et réponses du bassin versant (fin XIX^e-début XX^e siècle)	197
Introduction	199
A. Le déclin précoce de la petite hydraulique.....	200
1. Les facteurs de déclin des moulins à eau et reconversion	200
1.1. Une industrialisation de l'hydraulique au détriment des moulins les plus modestes. ..	200
1.2. La deuxième vie des ouvrages hydrauliques	201
2. Le « (dés)aménagement » en deux temps de la Mérantaise	201
2.1. Abandon précoce de l'activité hydraulique des moulins.....	202
2.2. L'abandon en différé des chenaux en dérivation.....	206
2.2.1. Fin XIX ^{ème} siècle : maintien des biefs perchés	206
2.2.2. Début XX ^{ème} : la remise en eau de la « Morte Rivière ».....	207
2.3. Un nouvel équilibre entre chenal artificiel et chenal préservé	208
B. Des évolutions mesurées à l'échelle du bassin versant	210
1. Déprise paysagère du fond de vallée et revalorisation des plateaux	210
2. Du paysage productif du fond de vallée au paysage productif des plateaux (plateau de Saclay)	212
Chapitre 6. Phase 3 : Une urbanisation massive et récente (1950-2015)	215
Introduction	216
A. Un bassin versant devenu périurbain	217
1. La Ville-Nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines	219
1.1. Création et développement de Saint-Quentin-en-Yvelines	219
1.2. Une innovation dans la gestion des eaux de ruissellement urbain.....	219
2. Évolution des autres postes d'occupation du sol.....	221

3. Les nouvelles limites artificielles du bassin versant	222
B. Un linéaire hérité, désormais conditionné par les aménagements dans le bassin versant	224
1. Les conséquences de l'urbanisation sur le tracé de la Mérantaise.....	224
2. Les friches hydrauliques	226
3. Les rigoles à l'abandon	227
Synthèse : Reconstitution de la trajectoire historique de la Mérantaise. Héritages des différentes phases d'aménagements.....	229
Phase 1 : Une rivière contrainte par les équipements hydrauliques.....	229
Phase 2 : Un « désaménagement » progressif de la rivière sans réponses significatives des conditions hydromorphologiques.....	231
Phase 3 : Les grands changements d'occupation du sol : l'urbanisation du bassin versant	231
Partie 3. État des lieux et compréhension des ajustements hydromorphologiques récents de la Mérantaise	233
Chapitre 7. Caractérisation du fonctionnement hydromorphologique actuel de la Mérantaise	235
Introduction	236
A. Caractérisation morphologique du lit de la Mérantaise	237
1. État des lieux des conditions morphologiques du chenal et des berges (observations de terrain).....	238
1.1. Les marqueurs d'ajustement verticaux du chenal.....	238
1.1.1. Un chenal aux berges hautes	238
1.1.2. Des marques d'incision sur les ouvrages présents dans le chenal	240
1.1.3. Une capacité de transport quasi nulle de la charge de fond.....	243
1.2. État des lieux de l'érosion latérale.....	245
1.2.1. Les marques d'érosion active ou potentielle	246
1.2.2. Affouillement des ouvrages latéraux	247
2. La géométrie du chenal à l'échelle de stations hydromorphologiques	249

2.1. CarHyCE : un modèle de référence pour caractériser l'hydromorphologie des rivières	250
2.1.1. Description et localisation des stations hydromorphologiques de référence (CarHyCE).....	252
2.1.2. Description et localisation des stations hydromorphologiques de la Mérantaise ..	256
2.2. Indicateur Morphologique Global (IMG) des stations de la Mérantaise	259
2.3. Géométrie du chenal de la Mérantaise : écarts au modèle de référence CarHyCE	261
B. Évolutions spatiales et temporelles des ajustements morphologiques du chenal de la Mérantaise.....	263
1. Répartition spatiale des largeurs et des profondeurs du chenal à l'échelle de transects	263
1.1. Distribution des largeurs et profondeurs spécifiques au droit des transects	264
1.2. Les écarts au modèle CarHyCE des largeurs et des profondeurs de la Mérantaise.....	268
2. Des ajustements morphologiques récents.....	269
2.1. Comparaison diachronique des profils en long (années 80 – 2015).....	270
2.1.1. Présentation de la démarche générale.....	270
2.1.2. Une incision plus ou moins marquée à la comparaison diachronique des deux plans	273
2.2. Comparaison diachronique des profils en travers.....	277
2.2.1. Évolution des largeurs et des profondeurs à pleins bords depuis le début de l'urbanisation du bassin versant	281
2.2.2. Évolutions entre 1849 et 2015	281
2.2.3. Mise en perspective de nos résultats avec ceux obtenus sur le Morbras	282
2.3. Des ajustements récents confirmés par la fragilisation des ouvrages transversaux et latéraux	283
2.4. Affleurement du <i>bedrock</i> témoin de l'arrêt des dynamiques d'incision.....	285
3. Mesures de l'activité érosive des berges de la Mérantaise	286
3.1. Contexte et introduction à l'article	286
3.2. Characterizing and quantifying the discontinuous bank erosion of a small low energy river using Structure-from-Motion Photogrammetry and Erosion pins	286
3.3. Hydrological survey	300

Chapitre 8. Les facteurs de contrôle responsables des ajustements morphologiques actuels	327
Introduction	328
A. Les différents éléments de contrôle de l'hydrologie dans le bassin versant	329
1. L'urbanisation du bassin versant de la Mérantaise	329
1.1. Les modalités générales de l'urbanisation du bassin de la Mérantaise	330
1.2. Les réseaux de drainage artificiels	332
1.2. Les bassins de rétention.....	335
2. Les ravines, preuves du ruissellement important dans le bassin versant.....	338
3. La connectivité du bassin versant	343
3.1. Approche méthodologique	343
3.2. Résultats de la connectivité du bassin de la Mérantaise	345
3.2.1. Connectivité hydrologique en 2015.....	345
3.2.2. Reconstitution de la connectivité ante-urbanisation du bassin versant (1947-1949) grâce à la simulation SMA LSACAR	352
3.2.3. Synthèse de l'évolution diachronique de la connectivité hydrologique du bassin versant de la Mérantaise	356
B. La signature de l'urbanisation dans le régime hydrologique de la Mérantaise	357
1. Les effets de l'urbanisation sur l'hydrologie : éléments de tendance sur le long terme	357
1.1. Contexte de développement urbain à Villebon-sur-Yvette	357
1.2. Analyse de l'hydrogramme de la station hydrométrique Villebon-sur-Yvette.....	360
1.2.1. Caractéristiques principales du régime hydrologique	360
1.2.2. Tendance générale du régime hydrologique.....	361
2. Le fonctionnement hydrologique de la Mérantaise : influence des apports urbains... 364	364
2.1. Comportement hydrologique et débits caractéristiques.....	364
2.2. Réactivité du bassin versant	367
Conclusion du chapitre	371

Chapitre 9. Quel(s) projet(s) de restauration écologique pour les petits cours d'eau périurbains ? Éléments de discussion	375
Introduction	376
A. Des rivières de faible énergie mais pour autant dynamiques	377
1. La Mérantaise, une rivière de « faible énergie » dynamique.....	377
2. Des ajustements morphologiques discontinus et hétérogènes	379
3. Dynamique fluviale et ajustements morphologiques hérités de la succession d'aménagements hydrauliques dans le fond de vallée et de changements de pratiques à l'échelle du bassin versant	383
B. La restauration écologique, nouveau paradigme de la trajectoire des rivières.....	386
1. La remise en cause du retour à un état de référence <i>ante</i>-aménagements	387
2. La trajectoire des cours d'eau, un élément essentiel pour les projets de restauration	389
3. La « restauration écologique », une nouvelle étape de construction de la trajectoire de la rivière.....	390
C. Des projets durables de restauration écologique pour les petites rivières périurbaines ?	394
1. Une priorité donnée aux enjeux de lutte contre le risque inondation en contexte urbain	394
1.1. Les opérations de restauration écologique sur la Mérantaise	395
2. Des projets de restauration écologiquement pertinents et hydromorphologiquement durables ?	397
2.1. Des opérations de reconquête qui répondent d'abord à des préoccupations économiques et sociales	397
2.2. Une prise en compte variable des conditions hydrosédimentaires spécifiques à chaque site	398
2.3. Une emprise spatiale restreinte des opérations de restauration et des échelles d'intervention mal adaptées.....	399
2.4. Des projets systématiquement nécessaires et efficaces ?	400
2.5. Un manque de retour d'expérience et une trajectoire restaurée difficile à anticiper	401
3. Quelques pistes de réflexion pour mieux prendre en compte les conditions d'écoulement à l'échelle du bassin versant	404

Conclusion générale	407
▪ Une rivière historiquement aménagée et dynamique	408
▪ De nouvelles connaissances sur les petits hydrosystèmes périurbains franciliens et discussion autour du concept de la restauration écologique.....	410
▪ Perspectives	411
Références bibliographiques.....	413
Liste des figures	449
Liste des tableaux.....	463

ABRÉVIATIONS

AESN	Agence de l'Eau du bassin Seine-Normandie
AN	Archives Nationales
AD	Archives Départementales
BRGM	Bureau des Recherches Géologiques et minières
CARHYCE	CARactérisation HYdromorphologique des Cours d'Eau
CEA	Centre d'Études Nucléaires
DCE	Directive Cadre européenne sur l'Eau
DREAL	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DRIEE	Direction Régionale et Interdépartementales de l'Environnement et de l'Écologie (Île-de-France)
HEF	Hydro – Ecologie Fluviale
HER	HydroEcoRégion
IGN	Institut Géographique National
IRSTEA	Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
LEMA	Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (2006)
NGF	Nivellement général de la France
ONEMA	Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
PNR HVC	Parc Naturel Régional de la Haute Vallée de Chevreuse
SIAHVY	Syndicat Intercommunal pour l'Aménagement Hydraulique de la Vallée de l'Yvette
STEP	STation d'ÉPuration des eaux usées
SYB	Syndicat de l'Yvette et de la Bièvre

INTRODUCTION GÉNÉRALE

▪ Contexte de la recherche

Durablement soumis aux multiples pressions humaines, les espaces naturels – et en particulier les milieux aquatiques – font l’objet de politiques de gestions et de préservations rigoureuses depuis plusieurs décennies. En effet, constat a été fait d’une baisse de la qualité générale des milieux aquatiques, tant sur le plan écologique, physico-chimique que morphologique. Cette dégradation des cours d’eau est désormais directement imputable aux activités anthropiques (Wittfogel, 1956, cité par Downs et Gregory, 2004 ; Gregory, 2006; Lespez et al., 2015; Brown et al., 2018). Du point de vue de la dynamique fluviale, ces contraintes s’exercent sur la morphologie et le fonctionnement hydraulique des masses d’eau. Les modifications physiques qui touchent les cours d’eau sont nombreuses et diverses : succession de seuils et de barrages, dérivation des eaux, recalibrage et rectification des rivières, protection des berges et extraction de granulats. Leurs conséquences sont elles aussi nombreuses, comme la fragmentation du linéaire, donc de l’«espace de vie » des espèces aquatiques, et les contraintes exercées sur le transfert hydrosédimentaire.

Dans ce contexte, la Directive Cadre européenne sur l’Eau (DCE) du 23 octobre 2000 (Directive 2000/60/CE) est un exemple emblématique de cette prise en compte des enjeux environnementaux, politiques, économiques et sociaux majeurs que représente la gestion des masses d’eau et des bassins versants. Transposée en 2004 en droit français, ce cadre institutionnel européen est mise en œuvre dans l’Hexagone au travers de la Loi sur l’Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) à partir de 2006. La DCE fixe aux États membres un objectif général de restauration et de préservation des milieux aquatiques (Adam et al, 2007), à échéance 2021 ou 2027 selon leur état de dégradation et les possibilités de restauration mises en œuvre. D’un point de vue hydromorphologique, l’une des principales actions préconisées par la DCE pour atteindre le « bon état écologique » est le rétablissement de la libre circulation piscicole et sédimentaire par l’effacement partiel ou total des ouvrages en travers et latéraux, soit la **restauration de la continuité écologique**. Cette notion est définie ainsi par la DCE. : « *La continuité écologique, pour les milieux aquatiques, se définit par la circulation des espèces et le bon déroulement du transport des sédiments. Elle a une dimension amont-aval, impactée par les ouvrages transversaux comme les seuils et barrages, et une dimension latérale, impactée par les ouvrages longitudinaux comme les digues et les protections de berges* »¹.

¹ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN_Plan_de_restoration_des_cours_d_eau.pdf (consulté le 26-04-2012, p.3)

Article R2 14 – 109 du code de l’environnement définissant un obstacle à la continuité écologique.

L'atteinte du « bon état écologique » des rivières européennes s'appuie sur l'évaluation de trois critères principaux, à savoir la qualité physico-chimique, la qualité écologique, et enfin la qualité hydromorphologique. Notons que ce troisième critère est initialement considéré comme un soutien à la qualité biologique mais apparaît de plus en plus comme un élément majeur de la réflexion sur l'état écologique des cours d'eau (Melun, 2012; Gob et al., 2014). Les dynamiques fluviales sont considérées comme la clé d'un bon état écologique des rivières car elles conditionnent la diversité des milieux aquatiques – et donc des habitats – et leur capacité d'auto-épuration nécessaire aux conditions vitales des espèces aquatiques. Ainsi, cette qualité hydromorphologique est elle-même appréhendée selon trois paramètres : (1) le régime hydrologique, relatif aux débits et à la capacité de transport; (2) les conditions morphologiques (géométrie du lit, diversité des formes et des faciès, caractéristiques granulométriques) ; et (3) la libre circulation des organismes aquatiques et sédimentaires (Melun, 2012). En France, plus de 90 000 ouvrages² (96 912 en métropole) – barrages, écluses, seuils, moulins, lavoirs – ont été recensés sur les cours d'eau et sont autant d'obstacles à la continuité écologique et sédimentaire. Les ouvrages latéraux que constituent les digues, les murets de protection de berges, et autres constructions cloisonnant les berges et leur proximité immédiate, sont également des éléments préjudiciables à la bonne qualité écologique et hydromorphologique des rivières puisqu'ils contraignent latéralement les cours d'eau.

Cependant, les hydrosystèmes ne sont pas uniquement impactés par les pressions anthropiques touchant leur linéaire. En effet, les grandes évolutions des pratiques et usages dans les bassins versant de ces rivières ont également leur part de responsabilité dans la dégradation des cours d'eau. En France, la deuxième moitié du XX^{ème} siècle est notamment caractérisée par une diminution des surfaces agricoles, au profit des surfaces boisées mais surtout de l'urbanisation. Les conséquences sur les cours d'eau de ces changements du mode d'occupation des sols, et en particulier du développement massif de l'urbanisation, au cours du XX^{ème} siècle sont de mieux en mieux connus (Chin, 2006; Gregory, 2006; Grosprêtre, 2011).

▪ Objectifs et hypothèses de la thèse

Le travail de recherche proposé ici s'inscrit donc dans ce contexte politico-environnemental. D'un point de vue scientifique, il repose sur deux constats principaux constituant les deux objectifs majeurs de la thèse. Premièrement, grâce à la mise en œuvre de la DCE, la restauration écologique des rivières dégradées est devenu un concept très en vogue, aussi bien dans la sphère des gestionnaires de l'environnement que dans la communauté scientifique (Le Floc'h et Aronson, 1995; Morandi et Piégay,

² Recensement des obstacles à l'écoulement (données R.O.E.) sur les cours d'eau et évaluation de leur impact écologique par l'ONEMA mis à jour en juin 2017 ; <http://www.eaufrance.fr/observer-et-evaluer/pressions-sur-les-milieux/alterations-hydromorphologiques/> (consulté le 11/07/2018)

2011; Morandi, 2014). Elle renvoie à des opérations de natures et d'implications diverses pour les hydrosystèmes restaurés (Morandi et Piégay, 2011; Lespez et Germaine, 2016). Alors qu'une partie des opérations de restauration écologique relèvent surtout de la gestion et de l'entretien du lit et des berges, certaines plus radicales aboutissent à une reconfiguration en profondeur du chenal. C'est le cas des opérations d'effacement partiel ou total des obstacles à l'écoulement qui participe d'une « *libération des dynamiques naturelles jusque-là contraintes par la rivière aménagée* » (Lespez et Germaine, 2016). Ce type d'interventions sur les petits cours d'eau historiquement aménagés s'est multiplié en France et interroge donc la communauté scientifique sur le sens de la *restauration de la continuité écologique* et sur ses fins. Après la remise en cause unanime de l'idée initiale d'un « retour à un état originel » avant anthropisation des cours d'eau, ce principe est désormais revisité à la lumière du concept de trajectoire historique et fonctionnelle (Wohl et Merritts, 2007; Dufour et Piégay, 2009; Brown et al., 2018). Cependant, malgré une évolution épistémologique constante du concept, depuis son apparition dans les années 1970, celui-ci reste encore mal défini et fait débat sur son/ses acceptation(s) (Dufour et Piégay, 2009; Morandi et Piégay, 2011). Nous souhaitons donc y participer en interrogeant la place de la restauration écologique, et notamment du rétablissement de la continuité longitudinale et latérale des rivières, par rapport au concept de « trajectoire ». Ainsi, peut-on formuler ici une première hypothèse de recherche : **Les opérations de restauration écologique ne constitueraient-elles pas une nouvelle étape d'aménagement de la rivière ?** Et dans le prolongement de cette approche : **de quelles manière ces opérations ne participeraient-elles pas de la trajectoire hydrosédimentaire des petits cours d'eau « ordinaires » ?**

Deuxièmement, la reconstitution de la trajectoire historique et fonctionnelle des rivières est désormais un pré-requis fortement recommandé dans tout projet de restauration et pour tous les types de cours d'eau (Walter et Merritts, 2008; Wohl et al., 2015). Cependant, force est de constater qu'il y a un certain tropisme des études scientifiques (nationales et internationales) tournées vers les grands cours d'eau dynamiques (Viel, 2012 ; Rollet et Lespez, 2013). Ces grands hydrosystèmes ont toujours bénéficié d'une attention particulière de la part des sociétés humaines, tant sur le plan des enjeux d'occupation et de gestion de ces espaces que de l'intérêt scientifique. Du fait de leur caractère navigable et flottable, ils représentent des axes de communications, de circulation et de commerces majeurs, mais aussi un accès vital à l'eau. D'un point de vue scientifique, le contexte français est essentiellement renseigné pour les cours d'eau de forte énergie des domaines montagnard, piémontais ou méditerranéen (Descroix, 1994; Pont et al., 2002; Scäfer et al., 2002; Coynel et al., 2003; Esteves et Ludwig, 2003; Meybeck, 2003; Capanni, 2011). En 2013, Rollet et Lespez (communication orale) identifient, dans le fichier central des thèses françaises, que 50% des travaux doctoraux recensés concernent les cours d'eau à forte énergie (25% portent sur les grands fleuves, 15% sur les systèmes tropicaux et 7% sur le domaine méditerranéen). *A contrario*, ils ne recensent que 5% de thèses sur les petits cours d'eau à faible énergie (d'ordre 1 à 4 selon la classification de Strahler ; < 15 W/m²). Ces petits hydrosystèmes sont encore trop

peu considérés par la communauté scientifique alors même qu'ils sont essentiels dans le fonctionnement du cycle de l'eau et représentent près de 75% de la longueur totale du réseau hydrographique (Schumm, 1956 ; Shreve, 1969 ; Meyer et Wallace, 2001 ; Benda et al, 2005 ; Le Bihan, 2009 ; Lefèbvre, 2015).

En France, l'intérêt scientifique pour ce type de rivières peu dynamiques a été initié, d'une certaine manière, par les historiens du programme du PIREN-Seine, notamment Paul Benoît et Karine Berthier, qui se sont intéressés dès les années 1980 aux petites usines hydrauliques médiévales (moulins et hydraulique monastique) présentes sur les cours des petites rivières du bassin de la Seine (Benoit, 1998; Benoit et al., 1998). Cependant, leurs recherches étaient presque exclusivement orientées vers l'histoire des techniques médiévales, s'attardant que très peu sur les aspects de dynamique hydraulique. À la fin des années 1990, ce sont les géographes, en partenariat avec des historiens et des archéologues, qui s'emparent de ces objets d'études. Ils cherchent à comprendre les dynamiques fluviales des hydrosystèmes de petit gabarit sur le temps long (Holocène) et s'intéressent aux évolutions actuelles *via* le prisme du bouleversement des conditions d'écoulement et du fonctionnement hydromorphologique provoqué par l'aménagement hydraulique de ces rivières. Plusieurs groupes de recherche se sont intéressés à ces problématiques dans différents contextes. En Normandie, les travaux initiés par J.M. Cador et L. Lespez, puis rejoint ensuite par R. Barraud, M.A. Germaine, A.J. Rollet, V. Viel, A. Beauchamp parmi les géographes, ou E. Garnier et V. Carpentier chez les historiens et archéologues, font désormais référence pour les petites rivières rurales de plaines de l'ouest français. Ils intègrent, par ailleurs, de nouvelles problématiques relatives aux représentations sociales de ces paysages « ordinaires » et de leur reconfiguration par les opérations de restauration écologique (Germaine, 2009; Barraud et Germaine, 2017). Ces travaux de recherche ont, en grande partie, été menés, entre 2012 et 2015, dans le cadre du programme de recherche REPPAVAL (« Représentations des paysages et de la nature dans les petites vallées de l'Ouest de la France face aux projets de restauration écologique »), financé par l'Agence Nationale de la Recherche *via* le dispositif Jeunes chercheuses-Jeunes chercheurs. Le programme REPPAVAL a notamment été consacré par l'ouvrage intitulé « *Démanteler les barrages pour restaurer les cours d'eau : controverses et représentation* » et paru récemment en 2017. En 2005, les actes du colloque *La rivière aménagée, entre héritages et modernité. Formes, techniques et mis en œuvre* (Orléans, 2004) dirigés par V. Serna et A. Gallicé, font également référence sur la question et offre une synthèse des travaux menés, jusque-là, par cette communauté transdisciplinaire (géographe, hydromorphologue, historiens, archéologues) sur les aménagements hydrauliques. Apparaît notamment la notion de « friches hydrauliques » (Le Cœur, Gautier, 2005) et de désaménagement des rivières (Lespez et al., 2005). Mais il est alors encore peu question des petits cours d'eau de faible énergie. Ce sont pourtant ces cours d'eau relativement modestes qui sont les plus anciennement aménagés pour des raisons de maîtrises techniques (Barraud, 2007; Melun, 2012).

Cependant, au-delà du contexte de l'Ouest français, la majorité des petites rivières de faible énergie du territoire reste encore assez mal connue. Ce constat pose question et tient, selon nous, à deux choses : i) d'une part, les dynamiques hydrosédimentaires de ces cours d'eau sont, nous l'avons vu

supra, plus difficiles à appréhender, car plus ténues et les processus d'ajustement plus lents (Viel, 2012) ; ii) d'autre part, ces lacunes sont liées à la faible quantité et qualité des données disponibles pour ces objets d'étude. Les grands cours d'eau français sont renseignés par des siècles de données historiques diverses (plans, cartes, peintures, témoignages d'usagers, procès-verbaux, ...), mais aussi par des données acquises plus ou moins récemment, comme des relevés hydrauliques et hydrologiques (suivi de chroniques de crues), topographiques (LIDAR, TLS, photogrammétrie, ...) ou encore morphologiques et écologiques (diversité écologique et morphologique, ...). A l'inverse, malgré les nombreuses et anciennes interventions de l'Homme sur les petites rivières de faible énergie, il existe malheureusement peu de documents d'archives ou cartographiques anciens (quand ceux-ci n'ont pas été perdus ou détruits au cours du temps), ni d'études sur le fonctionnement hydrosédimentaire de ces hydrosystèmes. Par ailleurs, les rivières de faible énergie recouvrent une multitude de contextes hydrologiques, morphologiques et physiographiques. Parmi ceux-ci, les petits cours d'eau urbains et périurbains mériteraient une plus grande attention. Ils témoignent, en effet, d'enjeux nouveaux de gestion (lutte contre le risque d'inondation et gestion environnementale) qui vont de plus en plus s'imposer comme essentiels au regard du développement urbain en cours et à venir, tant à l'échelle de la France que dans le reste du monde (Gregory et al., 1992; Chin et al., 2016, 2013).

Ainsi, **dans un objectif de recherche plus appliqué, ce travail de thèse est l'occasion d'apporter de nouvelles connaissances et une meilleure compréhension du fonctionnement passé et actuel d'un petit cours d'eau périurbain du bassin parisien par une étude interdisciplinaire.** La Mérantaise apparaît comme une étude de cas emblématique de ce type de cours d'eau, historiquement aménagé, subissant de plein fouet le développement de l'urbanisation dans son bassin versant et faisant l'objet de projet de restauration écologique.

▪ Organisation de la thèse

Cette thèse s'organise en 3 grandes parties et 9 chapitres associés.

La première partie présente le contexte scientifique et le cadre géographique de l'étude ainsi que le cadre et le choix des outils d'analyse. Le chapitre 1 constitue une synthèse bibliographique, d'une part, sur les petits hydrosystèmes périurbains de faible énergie et sur les ajustements hydromorphologiques en réponses aux pressions humaines héritées et actuelles. D'autre part, ce chapitre comprend également un état de l'art sur le concept de restauration de la continuité écologique et son rôle dans la trajectoire hydrosédimentaire de l'aménagement des rivières. Le chapitre suivant (chapitre 2) contextualise le cadre géographique et géomorphologique de la rivière étudiée, à savoir la Mérantaise. Enfin, le chapitre 3 est l'occasion d'un aperçu global du choix des outils et méthodes d'analyse utilisés dans ce travail de recherche.

La deuxième partie présente les résultats de l'étude historique relative aux aménagements du chenal de la Mérantaise et de son bassin versant, depuis le XVII^{ème} siècle. Une nouvelle fois trois chapitres organisent cette partie. Ils respectent la chronologie des grandes phases d'aménagements caractérisant la trajectoire historique et fonctionnelle de notre site d'étude.

La troisième partie rend compte du fonctionnement hydromorphologique actuel de la Mérantaise. Le chapitre 7 est l'occasion d'une identification des altérations hydrosédimentaires subies par la rivière. Le chapitre 8 examine les facteurs de contrôle responsables des évolutions morphologiques observées. Enfin, une discussion (Chapitre 9) ouvrant sur la question de la restauration de la continuité écologique et son inscription dans la trajectoire hydrosédimentaire de la Mérantaise clôt ce travail de recherche doctorale.

Objectifs généraux	Questionnements	Hypothèses	Méthodes	Chapitre
1/ Définir la manière dont les opérations de restauration de la continuité écologique et sédimentaire participent de la trajectoire hydrosédimentaire des cours d'eau, et en particulier pour les petits cours d'eau périurbains.	1/ Comment les opérations de restauration de la continuité écologique et sédimentaire s'inscrivent dans la trajectoire hydrosédimentaire des cours d'eau ?	1/ Les opérations de restauration de la continuité écologique sont une nouvelle phase d'aménagement des cours d'eau, comme les ouvrages hydrauliques ne furent quelques siècles plus tôt.		9 : discussion
	2/ Les opérations de restauration écologique sont-elles écologiquement pertinentes et hydromorphologiquement durables dans le contexte des petits cours d'eau périurbains ?	2/ les projets de restauration écologique sont essentiellement pensé à l'échelle du site à restaurer et ignore trop souvent les interactions hydrosédimentaires à l'échelle du bassin versant.		
2/ Reconstituer la trajectoire historique et fonctionnelle d'un petit cours d'eau périurbain francilien, historiquement aménagé.	3/ Comment se sont succédées, dans le temps et dans l'espace, les différentes générations d'aménagements hydrauliques de la Mérançaise et de son bassin versant ? De quelle manière ces aménagements ont-ils affecté les conditions hydromorphologiques actuelles de la Mérançaise ?	3/ Trois phases « d'aménagements » hydrauliques ont marqué et conditionné la trajectoire de la Mérançaise. Les deux premières ont essentiellement touché le linéaire de la rivière, tandis que la troisième phase de grands changements a principalement concerné l'échelle du bassin versant (urbanisation).	Étude rétrospective : analyse diachronique des aménagements hydrauliques et de pratiques dans la vallée de la Mérançaise (cartes anciennes, archives textuelles, photographies aériennes)	4, 5, 6 : pour chaque phase de la trajectoire historique et fonctionnelle
	4/ Quel est l'impact de l'urbanisation massive et récente du bassin versant, ainsi que l'évolution des espaces ruraux sur les conditions d'écoulement de la Mérançaise ?	4/ Malgré une apparente immobilité du lit, la Mérançaise témoigne de véritables dynamiques fluviales dues au phénomène d'urbanisation du bassin versant. Son développement massif et récent (1980) expliquerait les ajustements morphologiques observés (incision, érosion des berges)		

Partie 1. CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET OBJET D'ÉTUDE

Chapitre 1 : Cadre thématique : influence des aménagements hydrauliques et de l'urbanisation sur les petites rivières périurbaines	p.33
Chapitre 2 : Cadre géographique et hydromorphologique de la vallée de la Méranthaise	p.77
Chapitre 3 : Cadre et outils d'analyse : le choix des méthodes	p.103

**Chapitre 1. CADRE THÉMATIQUE : L'INFLUENCE DES AMÉNAGEMENTS
HYDRAULIQUES ET DE L'URBANISATION SUR LES PETITES RIVIÈRES
PÉRIURBAINES**

A. : Définitions et enjeux des petites cours d'eau de faible énergie en contexte périurbain	p.35
B. : L'anthropisation des petits cours d'eau : pressions et impacts hydromorphologiques	p.41
C. : La restauration écologique : définition et évolution du concept	p.69

Introduction

Ce chapitre est l'occasion de définir le cadre thématique et de justifier les intérêts et objectifs de cette thèse. Il s'articule autour de trois principaux éléments de réflexion qui guident notre travail de recherche.

- (i) Il nous faudra tout d'abord définir ce que nous entendons par le terme de « petit cours d'eau à faible énergie » (**A**). En effet, la littérature reste encore floue quant à la définition des rivières de petit gabarit. Les petits cours d'eau de tête de bassin (rang 1 à 3 de l'ordre de Strahler) y sont encore trop peu représentés. D'autre part, cette thèse est l'occasion de s'intéresser à la catégorie bien précise de petits hydrosystèmes compris dans un contexte périurbain, notamment ceux du bassin parisien.
- (ii) Dans un deuxième temps, une large part de ce chapitre sera consacrée aux différentes pressions anthropiques exercées sur ces petits cours d'eau historiquement aménagés (**B**). Celles-ci sont le fait d'une succession spatiale et temporelle d'aménagements, affectant aussi bien le lit de la rivière, par les travaux de chenalisation, que son bassin versant, en particulier *via* l'urbanisation. Après avoir identifié les différentes formes de forçages anthropiques (pressions directes et indirectes), il s'agira d'établir leurs impacts sur le fonctionnement hydromorphologique.
- (iii) Enfin, la responsabilité de l'anthropisation dans la dégradation des fonds de vallée est aujourd'hui bien connue. Elle est désormais devenue un enjeu politique et environnemental majeur de reconquête de ces milieux aquatiques au travers d'opérations de restauration de la continuité écologique. Cependant, ce concept pose encore question dans la communauté scientifique et celle des gestionnaires quant aux objectifs et à la finalité des projets mis en œuvre. Ce troisième point bibliographique sera donc consacré à ces grandes interrogations (**C**).

A. Définitions et enjeux des petits cours d'eau de faible énergie en contexte périurbain

1. Définition de l'objet scientifique

1.1. Les petits cours d'eau périurbains de faible énergie

Les « **petites rivières de faible énergie en contexte périurbain** », constituent le principal objet d'étude de ces recherches doctorales, et plus particulièrement celles du bassin parisien où les enjeux liés au développement urbain sont croissants depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle et les attentes vis-à-vis de la DCE, de fait, de plus en plus importantes. Catégorie relativement spécifique des hydrosystèmes fluviaux, ces cours d'eau représentent une part de plus en plus importante du réseau hydrographique, notamment français, du fait de l'urbanisation grandissante des territoires (Booth et Jackson, 1997; Chin, 2006; Navratil et al., 2013).

Comme évoqué dans l'introduction générale, les petits cours d'eau de faible énergie sont aujourd'hui des objets d'étude encore trop souvent négligés par la communauté scientifique, au profit des hydrosystèmes les plus dynamiques (Gregory, 2006 ; Lespez et al., 2006 ; Viel, 2012 ; Lespez et Rollet, 2013) (**Figure 1.1**). De ce fait, leur définition scientifique reste assez floue (Lespez et al., 2005a, 2006). Il est même difficile d'en trouver une acquise par tous les scientifiques en hydromorphologie car les critères définissant les petites rivières de faible énergie varient selon les auteurs, à commencer par la taille de la rivière ou du bassin versant considérés, l'aspect de son chenal, ainsi que le régime hydrologique et la capacité d'ajustement de la rivière. Comme le rappelle Lespez et al., (2017), la diversité des contextes topographiques et hydrographiques participe de la difficulté à trouver une définition générale.

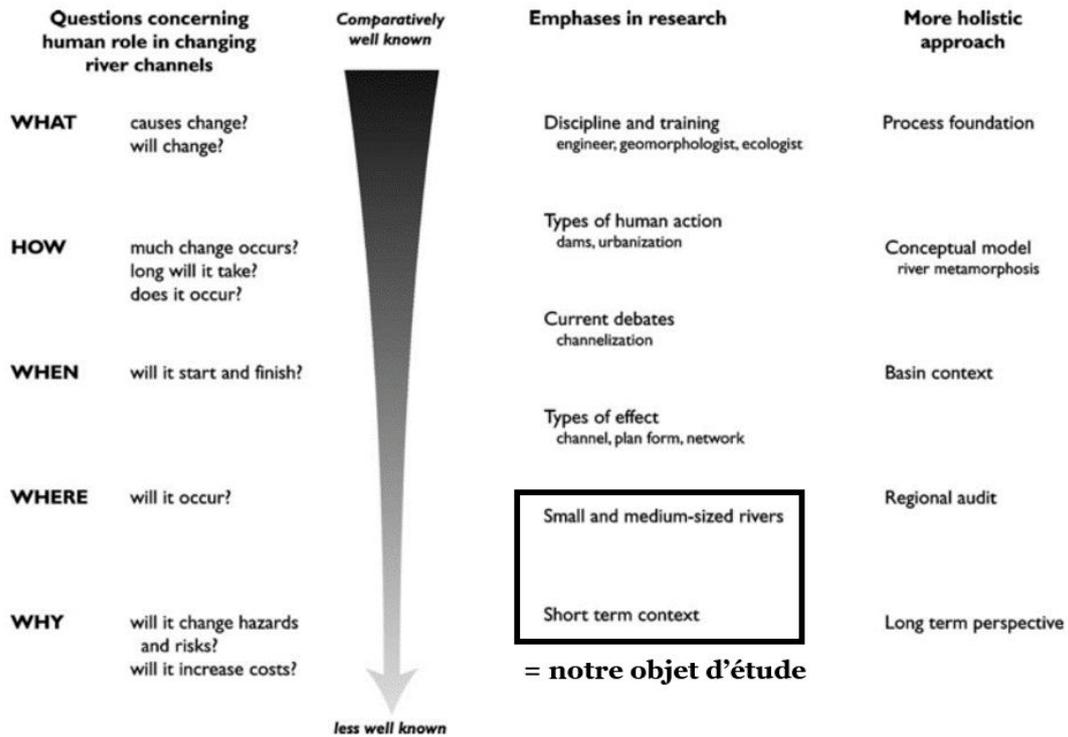


Figure 1.1 : Diagramme conceptuel des questionnements scientifiques relatifs à l'impact de l'anthropisation des cours d'eau et de leur niveau de connaissance et d'intérêt par la communauté scientifique (d'après Gregory, 2006, développé de Gregory, 1987).

La définition retenue correspond donc à celle généralement considérée dans le contexte des rivières de petites dimensions de l'ouest français, bien étudiées depuis quelques décennies grâce au programme REPAVAL (Lespez et al., 2015; Barraud et Germaine, 2017). En effet, celle-ci nous paraît la mieux adaptée à notre objet d'étude parce qu'elle se base sur le cas des petits cours d'eau de faible énergie français comparables à notre site d'étude (la Mérantaise). D'autre part, ces cours d'eau essentiellement normands, bien que situés dans les marges du bassin sédimentaire, sont compris dans le bassin parisien, soit dans un contexte hydrogéologique proche de celui des cours d'eau franciliens qui nous intéressent. Enfin, ils connaissent une trajectoire spatio-temporelle relativement similaire du fait de leur histoire commune en termes d'aménagements hydrauliques et d'exploitation des vallées (Meyer et Wallace, 2001).

Ainsi, les petites rivières de faible énergie se caractérisent par des chenaux aux dimensions modestes (en moyenne < 10 m de large et < 3 m de profondeur), rectilignes ou à méandrage libre, par un bassin versant inférieur à 1000 km² et des puissances spécifiques conditionnant la capacité d'ajustement de la rivière inférieure à 30 W/m² (Brookes, 1988 in Wasson, 1998 ; Adam et al., 2007 ; Lespez, 2012). Lespez et al. (2016) désignent également ce type de cours d'eau sous le terme de « rivières ordinaires », définies comme des cours d'eau non domaniaux, essentiellement soumis au droit privé et constituant l'essentiel du chevelu hydrographique de l'ouest de la France (contexte de recherche de l'étude). S'écoulant principalement dans des contextes de plaines ou de plateaux, ils correspondent

bien souvent à des cours d'eau d'ordre 1 à 6 selon la classification de Strahler. Cependant, nous préférons nous attarder sur les cours d'eau plus modestes de tête de bassin d'ordres 1 à 4. Par ailleurs, ces rivières de faible gabarit se caractérisent par un aménagement hydraulique ancien quasi systématique de leur chenal pour la production d'énergie, et une mise en valeur agricole des fonds de vallée. En effet, si ce mode de gestion – celui des moulins et des rivières aménagées – est désormais révolu, son influence sur le fonctionnement hydrosédimentaire actuel du chenal et la physionomie des paysages de la vallée reste marquée (Germaine et Barraud, 2013). Cet aspect sera développé plus tard, dans la sous-partie suivante (B.)

Pourtant, il est encore une fois nécessaire de réadapter cette définition, notamment empruntée à Germaine et Barraud (2013), à notre objet d'étude pour le contexte actuel. Du point de vue hydromorphologique, les critères de détermination de Germaine et Barraud (2013) s'appliquent aisément à la Méritantaise. Néanmoins, les modes d'occupation du sol sont différents. En effet, alors que les petites rivières de l'ouest français s'écoulent essentiellement dans des vallées rurales et agricoles, les petits cours d'eau franciliens sont nombreux à se trouver dans des contextes urbains et périurbains. Or, le caractère (péri)urbain des petites vallées du bassin parisien participe pleinement de la définition de nos objets d'étude car il conditionne désormais fortement leur fonctionnement hydromorphologique actuel et notamment leur capacité d'ajustement.

Enfin, le cas d'étude présenté dans cette thèse pourra contribuer à l'affinement des connaissances sur les rivières de faible énergie compris dans différents environnements.

1.2. Définitions juridiques de propriété et de gestion

Par ailleurs, il est également intéressant de se pencher sur les définitions juridiques et institutionnelles des petits cours d'eau car elles régissent les politiques d'aménagement et de gestion des milieux aquatiques (notamment à travers les projets de restauration de la continuité écologique), et donc les pratiques sociales et physiques de l'eau. En effet, le flou autour de la définition juridique et politique des petits cours d'eau est le reflet du flou de la définition scientifique de ces objets d'étude. Aussi, la législation française sur l'eau repose sur la notion de *cours d'eau* qui, dans le droit français, ne répond pas à une définition législative ou réglementaire unifiée³. Pour le moment, elle a été définie au fil des années par des éléments fournis par la jurisprudence administrative et judiciaire du Conseil d'État ou des divers tribunaux administratifs et Cours d'Appel. De ce fait, il existe tout de même une sorte de « définition institutionnelle » reposant sur un faisceau d'indices, reprise dans une circulaire du 2 mars

³ http://www.midi-pyrenees.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/GuideMP-DeterminarionCE_V3_cle142ada.pdf (consulté le 10/06/2016)

2005⁴ (non publiée au JO) : « (i) la présence et la permanence d'un lit naturel à l'origine, distinguant ainsi un cours d'eau d'un canal ou d'un fossé creusé par la main de l'homme, mais incluant dans la définition un cours d'eau naturel à l'origine mais rendu artificiel par la suite, sous réserve d'en apporter la preuve, ce qui n'est pas forcément aisé ; (ii) la permanence d'un débit suffisant une majeure partie de l'année apprécié au cas par cas par le juge en fonction des données climatiques et hydrologiques locales (1) à partir de présomptions au nombre desquelles par exemple l'indication du « cours d'eau » sur une carte IGN (2) ou la mention de sa dénomination sur le cadastre » (ONEMA, 2015).

Ainsi, la détermination des cours d'eau se base sur quatre critères principaux⁵ :

- La présence d'eau : ce critère correspond à un écoulement (par référence au Code civil) visible ou à des traces d'écoulements dans le cas de cours d'eau temporaires, et n'est pas attaché à une valeur minimale de débit.
- L'alimentation indépendante des précipitations : ce critère vise à identifier l'origine de l'écoulement et en particulier de vérifier si l'écoulement résulte du seul ruissellement des eaux de pluie (fossés et ravines) ou d'une source (active au moins une partie de l'année). L'alimentation est considérée comme indépendante des précipitations lorsque l'écoulement est observable après 8 jours sans pluies ou lorsque les précipitations cumulées sur cette période sont inférieures à 10 mm. Les fossés et les ravines sont ainsi distingués des cours d'eau.
- Le lit naturel : en théorie, ce terme de « lit naturel » suppose qu'il n'y a eu aucune intervention humaine ayant pu modifier le profil en travers ou le profil en long du cours d'eau. Il correspond alors à un chenal (talweg) comprenant les berges et le fond du lit (défini par sa composition granulométrique et l'arrangement stratigraphique comme des marques de transport et/ou de sédimentation par l'eau). Dans le cas, aujourd'hui très courant, des lits artificiel, la finalité des ouvrages impactant le lit est vérifiée. Si l'ouvrage en question sert à l'écoulement d'un cours à l'origine, il sera assimilé à cette catégorie. Si l'ouvrage sert à la dérivation d'une partie du débit, à alimenter des installations utilisant la force motrice de l'eau (moulins, usines hydroélectriques), il s'agira alors d'un canal. Les canaux, les rigoles et les fossés ne sont donc pas pris en compte dans la « définition ».

⁴ Circulaire du 02/03/2005 relative à la définition de la notion de cours d'eau, non publiée au Journal Officiel. http://www.ineris.fr/aida/consultation_document/7525/version_pdf (consulté le 10/06/2016)

⁵ <http://www.gers.gouv.fr/Politiques-publiques/Environnement/Gestion-de-l-eau/Cours-d-eau-fosses-et-drainages-agricoles/Comment-differencier-un-cours-d-eau-d-un-fosse> (consulté le 10/06/2016)

- *La faune benthique (invertébrés aquatiques)* : ce critère se rapporte essentiellement aux macro-invertébrés benthiques ayant un cycle de vie complet en milieu aquatiques. En l'absence d'individus vivants, les coquilles et les exuvies vides sont recherchées comme indices de vie aquatiques.

Dans la construction actuelle de la définition de « cours d'eau », c'est surtout la prise en compte des fossés agricoles et des ravines, nombreux en tête de bassin, qui pose problème et questionne la définition institutionnelle. Ils ne sont, en effet, pas soumis aux mêmes obligations réglementaires que les cours d'eau. Cette situation d'absence de définition législative ou réglementaire unifiée laisse une part importante à l'interprétation pour les cours d'eau non domaniaux, et est source potentielle de contentieux entre les usagers et les services de l'État chargés de la conservation et de la Police des cours d'eau ou encore de divergences d'appréciation entre ces mêmes services d'un département à l'autre, d'un service à l'autre. C'est donc dans l'optique d'harmoniser au niveau national la détermination des cours d'eau du territoire français qu'en 2014, le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt et le ministère de l'Écologie de l'époque ont demandé que soit réalisée une cartographie départementale des cours d'eau, à l'échelle nationale. Cette dernière est également l'occasion de statuer sur une définition juridique unifiée répondant aux enjeux de préservation, de propriété et de gestion des cours d'eau.

D'autre part, d'un point de vue juridique, ces petits hydrosystèmes sont considérés comme des rivières « non navigables et non flottables » (notamment du fait de leur gabarit). Cette dénomination a été établie par l'Administration des Eaux et Forêts, puis celle des Ponts-et-Chaussées, dans la Loi de 1898, afin de classer l'ensemble des rivières de France. Elle permet de déterminer la propriété d'un cours d'eau : « la rivière était dans le domaine public si elle portait bateaux. Elle était seigneuriale dans le cas contraire » (Derex, 2004). Ce qui signifiait, notamment que, dès lors, il revenait au seigneur d'accorder la possibilité de prélever de l'eau dans la rivière et d'imposer les curages. Par extension, cette dénomination est devenue « rivière non domaniale », désignant les rivières soumises au régime de Droit Privé, à l'inverse des cours d'eaux domaniaux résultant d'un régime de Droit Public. Selon les articles L215-1 à 6, du Code de l'environnement, les lits des cours d'eaux « non domaniaux » appartiennent aux propriétaires riverains, la limite séparative se situant au milieu du lit de la rivière.

Cependant, ces rivières de petite taille, dépendent d'une multiplicité d'acteurs à caractère privé ou public, propriétaires ou gestionnaires. Depuis la Révolution française, les propriétaires désignés par le Code civil et le Code de l'environnement sont certes des individus privés, mais la gestion de ces espaces revient bien souvent à une multitude d'acteurs, autant privé que public, aux rôles et aux enjeux de gestion différents : agriculteurs, riverains urbains, communes, syndicats de bassin, sociétés de pêche ou intervenants de défense de la nature, Parc Naturel Régionaux, Agences de l'eau et autres institutions qui en dépendent. En effet, les propriétaires sont en charge de l'entretien du lit de la rivière coulant chez eux (loi du 8 avril 1898) mais les travaux sont généralement exécutés après études préalables et autorisations administratives, et réalisés par des institutions compétentes dépendant de l'État : Syndicats

de bassin, Agences de l'eau, collectivités territoriales. Cette multiplicité d'acteurs en fait des objets complexes à appréhender, en particulier dans le contexte des enjeux politiques et environnementaux des lois et directives européennes ou nationales.

Enfin, notre intérêt se porte sur les petites rivières périurbaines d'Île-de-France. Le contexte (partiellement) urbain de ces hydrosystèmes conditionne également de manière particulière les enjeux écologiques, juridiques et politiques de ces objets complexes.

En ville, les enjeux de gestion sont doubles : la maîtrise de la rivière pour lutter contre les risques d'inondations et la « renaturation » des milieux aquatiques. Ces deux composantes de la vision de la rivière apparaissent comme contradictoires, expliquant les tensions entre les usages et les valeurs en places et celles envisagées. Il est en effet difficile de construire une vision commune du cours d'eau entre les équilibres existants des rivières (protection contre les inondations, propriété des riverains, délimitation des berges, stabilité des infrastructures à proximité du lit des rivières) et les états attendus (rétablissement de la libre circulation des espèces aquatiques et des sédiments, l'entretien minime du cours d'eau pour un fonctionnement le plus « naturel » possible, l'espace de liberté nécessaire de la rivière) (Carré et al., 2011).

2. Intérêt et enjeux des petits cours d'eau peu dynamiques du bassin parisien

Outre le besoin nécessaire de combler le manque de connaissance sur les petits cours d'eau de faible énergie compris en contexte périurbain, ces objets d'étude présentent des intérêts et des enjeux scientifiques et écologiques nombreux.

- Ils constituent l'essentiel du chevelu hydrographique. En Île-de-France, ils représentent 70 à 75 % des cours d'eau franciliens (Lefebvre, 2015). C'est également le cas dans d'autres régions françaises, comme l'ouest, notamment en Normandie (Lespez et al., 2016).
- Du fait de leur petit gabarit, ces rivières modestes sont très sensibles et réactives aux conditions hydrologiques de leur bassin versant. Leur fonctionnement hydromorphologique est fortement conditionné par le contexte anthropique, climatique et hydrologique locale.
- Les petits cours d'eau urbains et périurbains sont nombreux en Île-de-France. Depuis un demi-siècle, l'intensification de l'exploitation agricole et le développement massif de l'urbanisation ont exercé des pressions croissantes sur les écosystèmes naturels. Ces derniers sont particulièrement exposés à des pressions de toutes sortes : rejets de polluants, destruction de zones humides, modification des conditions d'écoulement alors même que les capacités de résiliences sont lentes en raison de leur faible énergie. Ces perturbations

sont la cause d'une dégradation écologique importante (qualité physico-chimique, hydromorphologique et, de fait, biologique).

- De ce fait, ce sont des milieux pour lesquels les enjeux de reconquêtes écologiques préconisés par la DCE sont majeurs. Après avoir connu un premier enjeu de maîtrise des inondations, ces petites rivières (péri)urbaines sont des objets en pleine transition pour lesquels un nouveau modèle d'aménagement émerge dans le contexte des préoccupations environnementales de la DCE et des objectifs liés à la continuité écologique.

B. L'anthropisation des petits cours d'eau : pressions et impacts hydromorphologiques

Depuis le Néolithique, l'Homme n'a eu de cesse de modifier son environnement et notamment les cours d'eau le long desquels il s'est implanté de manière systématique (Wittfogel, 1956, cité par Downs et Gregory, 2004 ; Gregory, 2006). L'anthropisation progressive des hydrosystèmes fluviaux est désormais considérée comme un facteur majeur de modification du fonctionnement hydrosédimentaire (modification des variables de contrôle et d'ajustement) des cours d'eau. Son impact s'est fortement accentué au cours des cinq derniers siècles avec le développement des activités hydrauliques, touchant autant les petits hydrosystèmes que les plus imposants (Melun, 2012).

1. Des forçages anthropiques multiples

Les aménagements hydrauliques implantés sur les cours d'eau sont de nature multiple et les différentes générations d'ouvrages témoignent de l'évolution des besoins et des pratiques de la rivière. Par ailleurs, le contrôle de ces hydrosystèmes par l'Homme relèvent d'une double nécessité : (i) d'une part, celle de maîtriser l'eau comme ressources énergétiques, alimentaires et hydriques ; (ii) et d'autre part, celle de se prémunir des dangers et désagréments de la rivière (érosion, inondations) (Downs et Gregory, 2004; Arnaud, 2012; Dépret, 2014). Ainsi, plusieurs générations d'ouvrages hydrauliques se succèdent dans le temps et dans l'espace. Nous en avons considéré deux grandes catégories générales et schématiques : (i) d'une part, les aménagements anciens hérités du temps de l'exploitation de la rivière pour les activités hydrauliques (moulins à eau et ouvrages associés, barrages) ; (ii) et d'autre part, les ouvrages pour une majorité plus récents (construits au XX^{ème} siècle) destinés à lutter contre les caprices de la rivière et les nouvelles conditions d'occupation du sol des bassins versant impliquées par l'urbanisation et le développement des réseaux de transport (bassins d'orage, fossés de drainage, ...). Cependant, il est important de préciser que les petits cours d'eau de faible énergie, sur lesquels se concentre notre propos, n'ont pas été équipés des mêmes ouvrages hydrauliques, ni connu la même

trajectoire chronologique que les grands hydrosystèmes plus dynamiques. Il est en effet peu probable de trouver des barrages de grande taille sur ces petites rivières. Les aménagements hydrauliques implantés dans ces rivières restent des ouvrages modestes (< 3 m). Par ailleurs, ce sont bien souvent les rivières les plus anciennement équipées du fait de leur gabarit plus facile à maîtriser (Melun, 2012). Ainsi, nous présenterons ici uniquement les ouvrages hydrauliques que l'on trouve communément sur les petites rivières de faible gabarit.

Enfin, deux types de pressions anthropiques sont classiquement identifiés : (i) les pressions directes qui affectent le lit mineur et les berges ; (ii) les pressions indirectes qui concernent l'occupation du sol et la structure du réseau de drainage des eaux dans le bassin versant. Ces derniers sont à l'origine de perturbations de la dynamique fluviale des cours d'eau car ils conditionnent les apports liquides et solides aux rivières.

1.1. Les pressions directes : les aménagements hydrauliques

S'il existe plusieurs types d'ouvrages implantés le long ou en travers des cours d'eau de petite taille, la construction d'infrastructures destinées à l'exploitation de l'énergie hydraulique constitue la principale forme d'aménagement des rivières. Le moulin à eau apparaît alors comme le marqueur par excellence de l'anthropisation des petites vallées (Barraud, 2007; Lespez et al., 2005a). Il représente l'essentiel des aménagements présents sur le cours des petits cours d'eau européens depuis le Moyen-Âge. Dans le cas de notre site d'étude, la Mérantaise, 90% des aménagements recensés dans le lit de la rivière dépendent et participent des complexes hydrauliques des moulins à eau. Notons également la présence d'ouvrages considérés comme secondaires : les lavoirs, les ponts et les abreuvoirs, qui eux aussi avaient une emprise à la fois longitudinale et latérale, bien que plus modeste que les moulins. Les moulins à eau ont profondément reconfiguré les paysages des fonds de vallée et les modèlent aujourd'hui encore malgré leur abandon presque systématique. Si les activités hydrauliques ont cessé sur les petits cours d'eau, les infrastructures sont toujours présentes et participent de manière plus ou moins directe aux conditions de fonctionnement hydromorphologique des rivières historiquement aménagées. Comme le rappelle Barraud (2007), les moulins à eau n'ont pas l'emprise réduite que peut laisser supposer la cartographie. Il s'agit, en effet, de complexes hydrauliques dont l'emprise physique sur les milieux aquatiques est importante et concerne plusieurs dizaines, voire centaines de mètres de linéaire de part et d'autre du site d'implantation du moulin. De la même manière, il existe différents types d'implantation de moulins à eau : en dérivation, en chaussée (moulin de berge implanté en prise directe), ou encore sur étang (**Figure 1.2**). Dans le cas de la Mérantaise, notre site d'étude, tous les moulins sont en dérivation.

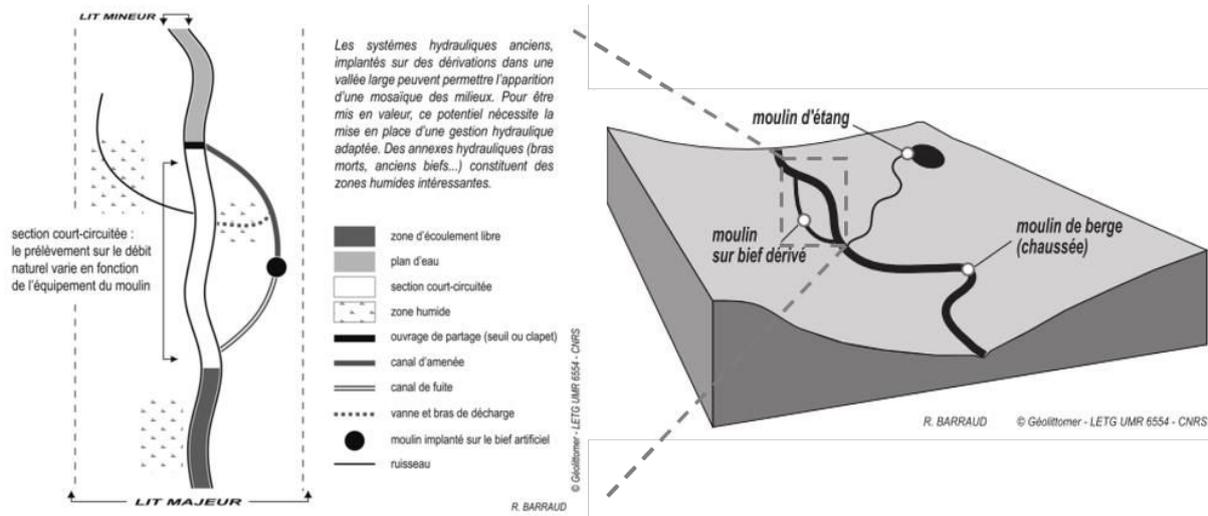


Figure 1.2 : Schéma théorique des types d'implantation des moulins à eau (droite) et détails de l'aménagement d'un moulin en dérivation (gauche) (d'après Barraud, 2007, modifié)

Enfin, trois catégories de pressions anthropiques directes, liées pour l'essentiel aux infrastructures exploitant l'énergie hydraulique de la rivière, sont généralement distinguées (Arnaud, 2012; Barraud, 2007; Melun, 2012) :

- Les ouvrages en travers : seuils, déversoirs, vannes
- Les travaux de chenalisation : rectification, recalibrage, reprofilage, déviation du chenal, ...
- L'entretien du lit et des berges : gestion de la végétation, curage, ...

1.1.1. Les ouvrages en travers : définition et fonction

Les ouvrages en travers désignent tout élément anthropique implanté dans le lit mineur et barrant totalement le chenal (d'une berge à l'autre), d'où son caractère transversal (Melun, 2012). Cette définition permet d'ignorer les ruptures naturelles qui assurent souvent les mêmes fonctions et produisent les mêmes effets sur le fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau. L'inventaire des obstacles à l'écoulement (ROE – Référentiel des Obstacles à l'écoulement), établie et mis à jours chaque année par l'AFB, recensait en France 97 884 ouvrages en travers au 5 octobre 2017, dont 96 912 en Métropole.

S'il existe trois grands types d'ouvrages en travers sur les cours d'eau, sans distinction de taille – les épis, les barrages, et les seuils en rivière – c'est cette dernière catégorie que l'on retrouve sur les hydrosystèmes de petit gabarit. C'est sur les « seuils en rivière » que se concentrera donc notre propos.

Leur définition et désignation diffèrent selon les auteurs dans la littérature scientifique et institutionnelle, que ce soit dans la communauté francophone ou anglophone (Leroy Poff et Hart, 2002 ;

Grier, 2003 ; Degoutte, 2006 ; Malavoi, 2003 ; Cisky et Rhoads, 2010) (**Tableau 1.1**). Nous avons fait le choix de considérer la définition utilisée par Melun (2012) dans sa thèse, à savoir « toute structure anthropique établie au sein du lit mineur d'un cours d'eau, joignant les deux berges sur une faible hauteur, comprise entre 20 cm et 5 m. La hauteur de l'ouvrage n'excède pas celle des berges amont de telle sorte que l'eau est maintenue dans le chenal à pleins bords ». De ce fait, les seuils en rivière se distinguent des barrages qui désignent plus spécifiquement les ouvrages transversaux supérieurs à 5 m, et des épis qui ne barrent que partiellement le lit mineur des rivières.

Source	Termes et définitions
Juracek / USGS (1999)	Overflow dam : Les ouvrages sont déversant et s'étendent sur toute la largeur du chenal. Leur hauteur est typiquement comprise entre 1 et 1,8 m (3 à 6 pieds).
Stanley et Doyle (2002)	Run-of-river : Barrages créant des réservoirs d'une faible capacité de stockage et n'altérant pas le régime hydrologique des écoulements.
EPA (2001)	Run-of-river : Structures hydrauliques en travers caractérisées par une petite hauteur de chute ainsi que par une faible charge hydraulique. Elles permettent la mise en place d'une retenue ayant une faible capacité de stockage, où le temps de résidence est réduit. Ces ouvrages n'ont aucun contrôle sur la quantité d'eau restituée en aval.
Malavoi (2003)	Seuils : Déversoirs en travers du cours d'eau, au-dessus de laquelle l'eau s'écoule. La hauteur de ces structures est généralement comprise entre 35 cm et 5 m. Ils maintiennent en permanence le niveau amont à la cote de leur crête, à laquelle il convient d'ajouter l'épaisseur de la lame d'eau déversante sur le seuil (charge hydraulique).
AASHTO – SCE (2005)	Low-head dam : Ouvrage établi en travers d'une rivière dont la hauteur de chute n'excède pas 7,6 m (25pieds). Run-of-river dam : Ouvrage normalement déversant établi en travers d'une rivière. Il permet la mise en place d'une retenue à faible capacité de stockage. Small dam : Ouvrage en travers dont la hauteur n'excède pas 15 m (50 pieds).
Ashley et al. (2006)	Small dam : Ouvrage en travers dont la hauteur n'excède pas 5 m.
Degoutte (2006)	Seuil en rivière : Ouvrage de faible hauteur construit dans le lit mineur dans le but de rehausser la ligne d'eau et non pas de stocker l'eau. La hauteur de l'ouvrage est généralement comprise entre 1 m et 3 m mais peut atteindre 5 m.
IDNR (2007)	Run-of-river dam : Ouvrage qui barre toute la largeur du chenal sur une hauteur inférieure à 10,6 m (25 pieds) par-dessus lequel l'eau s'écoule en permanence.
SANDRE (2008)	Seuil en rivière : Ouvrage, fixe ou mobile, qui barre tout ou partie du lit mineur.
Doyon (2009) in Csiki et Rhoads (2010)	Run-of-river dam : Ouvrage dont 1) le déversoir est approximativement aussi large que le chenal et 2) l'obstacle n'a qu'une faible capacité de stockage.
Csiki et Rhoads (2010)	Run-of-river dam : Ouvrage établi sur toute la largeur du chenal, qui n'a pas de mécanisme de régulation des débits et dont la hauteur n'excède généralement pas la hauteur des berges. La hauteur de chute est de quelques mètres et le temps de résidence de l'eau stockée est court (quelques minutes ou heures).

Tableau 1.1 : Quelques définitions trouvées dans la littérature pour désigner les seuils en rivière (Melun, 2012)

De la même manière, Melun (2012) identifie trois critères déterminant leur nature et fonction : (i) les seuils en rivière peuvent différer dans leur structure et être construits dans différents matériaux (métal, bois, enrochement, gabions, béton, ...). (ii) Leur géométrie peut également être variable, tant du

point de vue de la hauteur, de l'orientation au courant, que de leur géométrie transversale. Ils peuvent en effet être « plein » ou équipés d'une petite ouverture, souvent centrale, permettant de réguler autrement la lame d'eau déversée. (iii) Enfin, on distingue deux catégories de seuils : les seuils mobiles et les seuils fixes (ex. seuils en rivière et déversoirs). Certains possèdent à la fois une partie fixe et une partie mobile. Les ouvrages mobiles peuvent être des vannes, des clapets, des aiguilles, des hausses, ... Établis sur une base fixe, ils sont généralement manœuvrables manuellement. Le vannage représente le cas le plus courant de structure mobile. Il constitue l'unique forme de composante mobile dans le cas de notre site d'étude.

Melun fait le choix de considérer une unique catégorie regroupant les seuils, les déversoirs et les vannes (**Figure 1.3**). Dans la suite de notre propos, et notamment la présentation des ouvrages historiquement présents sur le cours de la Mérantaise, nous avons plus spécifiquement distingué ces trois types d'ouvrages en travers. Les vannes et les déversoirs sont alors désignés comme des « ouvrages associés » au moulin. Le seuil au droit duquel était implantée la roue du moulin étant considéré comme la structure en rivière constitutive de l'usine.

Enfin, les seuils en rivière présents sur les petits cours d'eau de faible énergie assurent différentes fonctions complémentaires (Grier, 2003 ; Melun, 2008, 2012). Ils permettent de contrôler et gérer les conditions hydrauliques (débits et hauteur d'eau), de produire de l'énergie dans le cas de la meunerie ou de l'hydroélectricité notamment (cette fonction est d'ailleurs la raison première de mise en place des seuils), de dériver les écoulements depuis une prise d'eau. Ils peuvent également permettre la création d'une zone de stockage (bassin) à l'amont des seuils grâce à l'effet retenue de l'ouvrage. Dans une autre mesure, la présence d'un seuil en rivière peut permettre la stabilisation du profil en long par dissipation de l'énergie à l'amont et ainsi limiter l'érosion régressive et l'incision du lit en amont.



Figure 1.3 : Exemple d'ouvrages en travers : a. seuil ; b. vanne mobile ; c. déversoir

1.1.2. Les travaux de chenalisation

Si les seuils en rivière sont des éléments à l'emprise relativement locale, ils sont presque toujours associés à des travaux de chenalisation qui eux marquent significativement des tronçons plus importants du chenal. Ces travaux de chenalisation désignent tout aménagement qui modifie le tracé en plan, la section en travers ou la pente d'une rivière (Brookes, 1985 ; Brookes et Gregory, 1983 ; Wasson et al, 1998 ; Arnaud, 2012 ; Dépret, 2014). Dans le cas des petites rivières non navigables, la chenalisation n'a pas pour but d'améliorer les conditions de navigabilité mais elle assure un rôle de contrôle et de gestion des débits et des flux dans le lit, de fixation des berges, ainsi qu'un rôle de protection des terrains riverains (agricoles ou urbanisés) pour réduire les débordements.

Ces travaux de chenalisation regroupent des actions diverses telles que les rectifications du chenal, le reprofilage du lit et des berges, les dérivations du chenal actif, les protections de berges, ... Ainsi, il est fréquent de trouver des cours d'eau dont le tracé actuel ne correspond plus au tracé originel, avant intervention humaine. Des biefs artificiels pour améliorer les capacités hydrauliques des moulins à eau ont été creusés sur les versants, perchés au-dessus du fond de vallée et ont court-circuité le cours « naturel » de la rivière. Le chenal a été recalibré de manière uniforme et standardisée, notamment sous l'action des ingénieurs des Ponts-et-Chaussées en charge de la gestion des rivières à partir du XIX^{ème} siècle (Rivals, 2000; Barraud, 2007). L'une des actions fréquemment menées à l'occasion de l'implantation d'usines hydrauliques était la rectification par un tracé rectiligne et rétréci gommant les boucles des méandres constitutif du style fluvial des cours d'eau de plaine. Le but était d'augmenter la capacité hydraulique de la rivière par une pente plus forte et une concentration plus importante des débits (Wasson et al., 1998 ; Degoutte, 2006). Les berges ont alors été consolidées à l'aide de structures en gabion, bois, enrochements, ou de murets. Ce type d'aménagement était mis en place en de nombreux endroits des chenaux, au droit de tous les ouvrages hydrauliques (moulins, lavoirs, abreuvoirs) mais aussi dans des sections particulières déconnectées des ouvrages cités *supra*.

1.1.3. L'entretien du lit et des berges

Enfin, le lit et les berges étaient régulièrement entretenus pour assurer le bon fonctionnement des ouvrages hydrauliques, et notamment éviter tout risque de dégradation par la présence d'embâcles, de berges fragilisées, ou de végétation trop invasive.

Ces travaux d'entretien ont toujours été une obligation pour les propriétaires des moulins ou les riverains. Au Moyen-Âge, ils étaient régis par un règlement plus ou moins strict qui les désignait (avec la taxe de mouture, *molta*) par le terme de *servicium* (Pichot, 2002 ; Barraud, 2007). Plus tard, la Police de l'eau a imposé un entretien régulier des lits et des berges des rivières (non navigables dans notre cas) consistant en (i) des curages du fond du chenal et des berges, (ii) un entretien et un maintien des berges,

(iii) un entretien de la végétation rivulaire. Ces aspects seront développés plus longuement dans le chapitre 4, relatif aux aménagements historiques anciens. Nous nous sommes notamment basé sur le « Règlement sur la Police des Eaux, des Moulins et Usines » établie par la Préfecture de l'ancien département de Seine-et-Oise (aujourd'hui disparu) en 1906 (ADY 78 – 7S 3).

L'attention portée jusqu'au XIX^{ème} siècle à l'état de la rivière s'explique par le fait que les moulins consistaient parfois l'unique source d'énergie non musculaire de la vallée et l'un des principaux centres économiques des petits vallées (Cador et Lespez, 2012). Aujourd'hui, l'entretien des lits et des berges des rivières de petit gabarit est bien moins systématique, malgré son caractère toujours obligatoire.

Ainsi, l'aménagement hydraulique des rivières a grandement marqué les paysages des vallées ordinaires (Germaine, 2009; Lespez, 2012). Il a significativement transformé la morphologie et la physionomie des rivières, que ce soit par la présence d'ouvrages en travers, les travaux de chenalisation ou l'entretien du lit et des berges. Par ailleurs, les complexes des moulins façonnent et régissent à la fois le linéaire des rivières et l'ensemble de la vallée dans laquelle ils s'inscrivent (Barraud, 2007, 2004; Barraud et al., 2013; Beauchamp et al., 2017a, 2017b). Après avoir développé les principales pressions anthropiques directes induites par les aménagements hydrauliques des rivières, nous abordons maintenant les pressions considérées comme indirectes sur les hydrosystèmes.

1.2. Les pressions indirectes : l'actuel rôle majeur de l'urbanisation

Les forçages anthropiques peuvent également avoir une incidence indirecte sur les milieux aquatiques par les pratiques et les usages à l'échelle du bassin versant. Ces perturbations sont alors liées aux modes d'occupation des sols et à la gestion des apports solides et liquides dans le bassin versant.

1.2.1. Occupations des sols et structures du réseau de drainage

Si l'intensité et la nature des perturbations anthropiques ont considérablement évolué depuis près de 5 000 ans, le Moyen-Âge en Europe marque une période charnière dans l'évolution des pratiques et usages des sols impactant indirectement les formes et les dynamiques fluviales des hydrosystèmes (Gregory, 2006; Grosprêtre, 2011). En effet, les défrichements conséquents des parcelles forestières au profit du développement de l'agriculture (remontant dans certaines régions à l'Âge de Bronze) sont à l'origine d'une accélération de l'érosion des sols et de la fourniture sédimentaire aux cours d'eau (Allée,

2003 ; Lang, 2003 ; Miras et al., 2004 ; Franc, 2005 ; Gregory, 2006 ; Hooke, 2006 ; Provansal et Leveau, 2006 ; Grosprêtre, 2011). De la même manière, le développement d'une agriculture céréalière sur les plateaux et les versants des petits bassins favorise les ruissellements de surface. Les terres fortement exploitées ont une capacité d'interception et d'infiltration des eaux de pluies moins importantes que les espaces forestiers. Une croûte de battance se développe souvent dans les premières dizaines de centimètres du sol et limite considérablement l'infiltration des eaux de surfaces (Viel, 2012). Au lendemain de la Seconde Guerre Mondiale, la France a connu de profondes mutations qui ont affectées les paysages jusque-là à dominante rurale du territoire. Les surfaces agricoles ont fortement diminué au profit d'autres types d'occupation du sol. D'après les chiffres du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation (dénomination 2018), elles ne représentaient plus que 59% du territoire contre 72% en 1950 (<http://agreste.agriculture.gouv.fr>). La déprise agricole en France a bénéficié au reboisement de certaines parcelles, mais les évolutions les plus significatives sont le doublement depuis les années 1950 des surfaces non agricoles, à savoir principalement les zones urbaines et les réseaux de voiries (Desriers, 2007). Dans le même temps, les surfaces agricoles qui se sont maintenues ont subi une restructuration forte. En effet, la diminution des surfaces agricoles sur le territoire français s'est accompagnée d'une modernisation spectaculaire des moyens techniques. Si les terres agricoles sont moins nombreuses, leur production en sort renforcé. C'est le développement d'une agriculture modernisée et industrialisée (Bouraoui, 2000). Or, la mécanisation de l'agriculture nécessitant moins de mains d'œuvre, la population métropolitaine part s'installer dans les villes. C'est la déprise agricole et l'exode rural pour les villes (Mendras, 1967)⁶.

1.2.2. Urbanisation et périurbanisation

Cependant, l'urbanisation est devenue l'une des principales sources de perturbation anthropique des systèmes fluviaux depuis les années 1950 (Gregory et al., 1992; Chin, 2006; Chin et al., 2013; Grosprêtre, 2011; Navratil et al., 2013; Miller et al., 2014) (**Figure 1.4**). Selon les Nations Unies, la population urbaine mondiale connaît une croissance significative au cours des dernières décennies, franchissant le seuil de 50% en 2007 (Véron, 2007). D'après les projections du service Population de l'ONU, l'urbanisation devrait concerner près de 75 % de la population mondiale en 2030 (Breil et Chocat, 2007).

⁶ L'après-guerre et les Trente Glorieuses transforment profondément la société française. C'est la « *fin des paysans* » (Mendras, 1967) face à une société de plus en plus technique, qui se modernise et va désormais chercher du travail en ville.

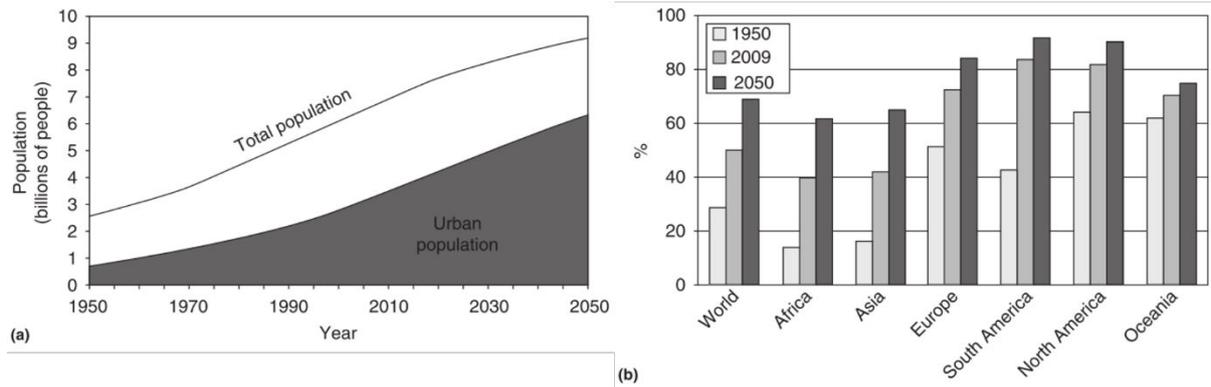


Figure 1.4 : Évolution de la population mondiale entre 1950 et 2050 (projeté). a. part de l'évolution de la population urbaine par rapport à la population mondiale totale ; b. répartition de cette même évolution (population urbaine) sur les grands continents du monde en 1950, 2009 et 2050 (projeté). (d'après Chin et al., 2013) ; Sources : donnée de population issues de l'United Nations Population Division, 2010. Projection de la population urbaine mondiale: révision en 2009 du recensement de la population, United Nations, New York. Disponible en ligne : [http:// esa.un.org/unpd/wup/](http://esa.un.org/unpd/wup/)

Parallèlement, à la périphérie des villes, l'extension de l'urbanisation cause un profond bouleversement dans des paysages initialement ruraux. Traditionnellement dense, les villes désormais s'étalent (*urban sprawl*) et s'éparpillent depuis un demi-siècle (Ascher, 1995 ; Dubois-Taine et Chalas, 1997). Elles ont envahi les campagnes, par un étalement de leurs réseaux de voies de communication et de zones urbanisées, et ont donné naissance à un espace hybride, des marges urbaines (Poulot, 2008). Devenu un véritable objet scientifique pour les géographes, la périurbanisation se caractérise, en effet, par un assemblage d'espaces hétérogènes et discontinus où une partie des terres agricoles et boisées sont progressivement converties au profit de surfaces urbaines imperméables (maisons, parkings, routes, ...). Ces dernières sont raccordées généralement directement à la rivière par un réseau de fossés et de drainage artificiel qui évacuent les eaux pluviales (polluées) des surfaces agricoles et urbaines du bassin versant (Navratil et al., 2013).

Les enjeux de la (péri)urbanisation en termes de pressions anthropiques sur les hydrosystèmes sont majeurs et vont en grandissant du fait du développement urbain à venir. Si le taux d'imperméabilisation des sols des bassins versants périurbains reste limité par rapport au contexte urbain, il est associé à d'autres pressions complémentaires telles que le recul des terres cultivées, la modification du couvert végétal (notamment forestier) et l'extension nécessaire des réseaux de drainages artificiels (fossés et réseaux d'assainissement). Ce sont des espaces pour lesquels la sensibilité des cours d'eau à la modification des flux liquides et solides (variables de contrôle) est exacerbée (Grosprêtre, 2011; Navratil et al., 2013).

2. Les modifications hydromorphologiques liées à l'anthropisation des rivières

Après avoir défini les grands types de pressions anthropiques identifiées par la littérature, les paragraphes suivants seront consacrés à l'impact de ces dernières (aménagements hydrauliques et urbanisation) sur les cours d'eau. Cependant, les modifications hydromorphologiques liées à l'anthropisation des rivières ont essentiellement été renseignées pour les cours d'eau les plus dynamiques et les ouvrages les plus grands. Les rivières de faible énergie sont plus rarement considérées dans la bibliographie. Nous tâcherons tout de même, dans la mesure du possible, de nous concentrer sur les impacts des aménagements hydrauliques (seuils en rivière) et de l'urbanisation sur les petits cours d'eau moins dynamiques.

2.1. Bases théoriques du fonctionnement des cours d'eau : système fluvial, hydrosystème et perturbations anthropiques

La géomorphologie fluviale est animée par deux concepts complémentaires permettant une analyse systémique et multi-scalaire nécessaire pour appréhender la complexité des interactions et des fonctionnements des différents compartiments constitutifs d'un cours d'eau et de son bassin versant. Apparu dès le début des années 1960 dans la littérature scientifique (Hack, 1960 ; Chorley, 1962), le concept de système fluvial a d'abord été formalisé par Schumm (1977). Il définit l'interrelation entre le cours d'eau et son bassin versant dans une dimension principalement longitudinale (amont-aval), conditionnée par le jeu des pentes (**Figure 1.5.a.**). Le système fluvial repose donc sur un découpage en trois secteurs successifs, correspondant à des processus différents :

- La **zone de production** (ou **d'alimentation**), localisée dans le secteur amont des bassins versant, est caractérisée par des pentes fortes et une puissance spécifique élevée. Sous l'effet des processus érosifs importants, elle fournit le reste du bassin versant en sédiments.
- La **zone de transfert** correspond au secteur médian chargé d'assurer le transport des sédiments vers l'aval, alors que la pente y est décroissante mais les flux hydrologiques encore puissants.
- Enfin, la **zone de dépôt** (ou **d'accumulation**) doit son nom au fait que les valeurs de pente y sont plus faible, le lit plus large et l'énergie hydrologique réduite, entraînant ainsi le dépôt et le stockage des sédiments dans ce secteur aval.

Reprenant ce concept initial, celui d'hydrosystème le complète en y développant la dimension latérale et verticale des échanges de matière et d'énergie entre le cours d'eau et sa plaine alluviale et en y ajoutant une dimension temporelle (**Figure 1.5.b.**). Développé par Amoros et Petts (1993),

l'hydrosystème est considéré comme un sous-ensemble à quatre dimensions, complémentaire du concept de système fluvial.

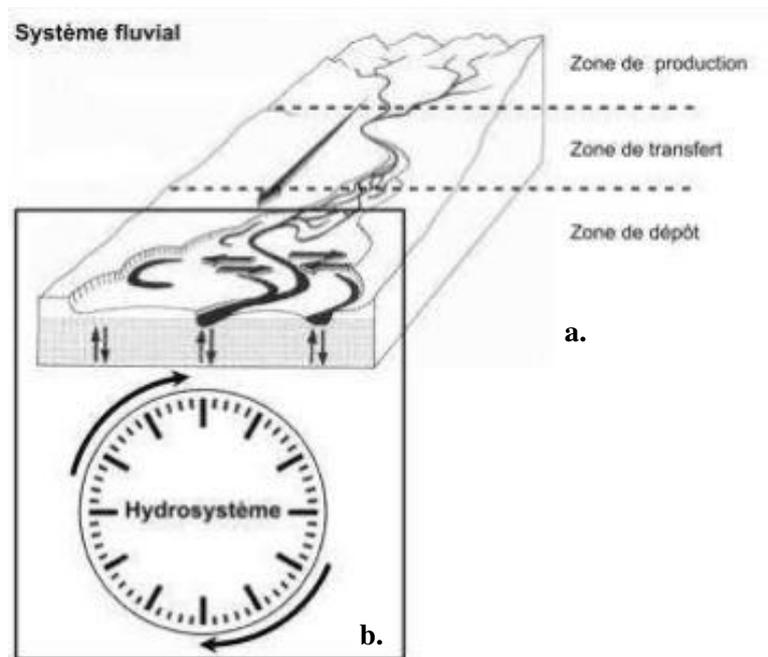


Figure 1.5 : Représentation imbriquée des concepts de système fluvial (a.) et d'hydrosystème (b.) (Melun, 2012 ; d'après Amoros et Petts, 1993, modifié)

Par ailleurs, les cours d'eau sont conditionnés par deux types de variables (Schumm, 1977 ; Bravard et Petit, 2000; Malavoi et Bravard, 2010) :

- Les **variables de contrôle** (ou variables externes), sous influence du climat, de la géologie et de la couverture du sol. Le débit liquide (Q) et le débit solide (Q_s) sont les deux grandes variables de contrôle primaires qui prédominent dans le fonctionnement hydromorphologique des rivières. Les variables de contrôle secondaire ne régulent, quant à elles, que partiellement les processus géodynamiques. On intègre généralement dans cette catégorie la forme et la pente de la vallée, les caractéristiques granulométriques du lit et des berges, la végétation riveraine et la présence éventuelle d'affluents.
- Les **variables de réponse** (ou variables internes) conditionnées par les variables de contrôle. Elles témoignent de l'ajustement local et global de l'hydrosystème à la fluctuation des variables de contrôle, en particulier les flux sédimentaires et hydriques. Il s'agit essentiellement de variables décrivant la géométrie du chenal : largeur, profondeur, longueur d'onde des méandres, sinuosité et pente.

Dans des conditions naturelles, les processus morphologiques (dépôt et érosion du lit et des berges) résultent de la recherche d'un équilibre dynamique entre les variables de contrôle et les variables de réponse, notamment décrit par la balance de Lane (1955, **Figure 1.6.a.**). Knighton (1984) définit l'équilibre dynamique comme un état moyen de stabilité du système fluvial en fonction de la fluctuation des variables de contrôle. Le terme « *dynamique* » rappelle qu'il ne s'agit pas d'un état d'immobilité de la rivière, mais au contraire de réajustements permanents de la morphologie de la rivière.

Cependant, cet équilibre dynamique peut être mis en péril par des perturbations extérieures. Ainsi, l'anthropisation des rivières affecte-t-elle directement ou indirectement toutes les composantes de la balance de Lane (les débits liquides morphogènes, la pente, la quantité et la taille des sédiments, ...) (**Figure 1.6.b.**). Les effets de ces pressions humaines peuvent être durables et irréversibles (Simon et Darby, 1999; Navratil et al., 2013). La réponse des systèmes fluviaux face à aux perturbations dépend de la sensibilité du cours d'eau impacté, de sa capacité de résilience, mais aussi de l'intensité et de la durée des modifications des variables de contrôle par les perturbations (Brunsdén et Thornes, 1979).

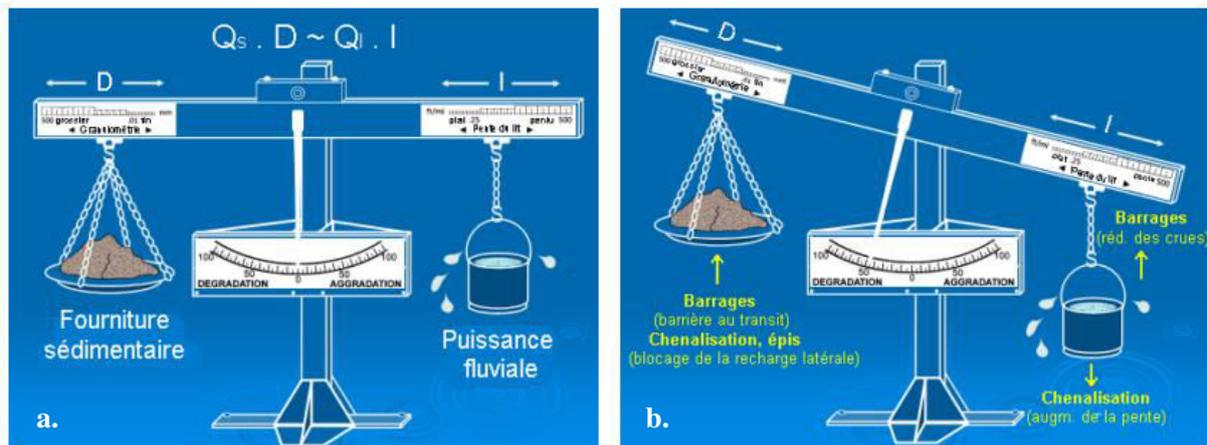


Figure 1.6 : a. Balance de Lane reprise par Borland (1960) ; b. Illustration du déséquilibre de la balance de Lane sous l'effet de l'anthropisation des cours d'eau (aménagement hydrauliques) (d'après Bledsoe, 2010 ; modifié).

2.2. Impacts des aménagements hydrauliques

Les aménagements hydrauliques anciens ou plus récents sont, comme nous l'avons vu, nombreux. Pourtant, alors même qu'ils ont, pour la grande majorité, perdu leur usage initial⁷ (Croze et Larinier, 2007), les infrastructures qui les constituent sont encore présentes dans le chenal et causent des perturbations dans le bon fonctionnement des petits cours d'eau de faible énergie.

⁷ En 2012, 80% de seuils en rivières ont perdu leur usage d'origine suite à l'abandon de l'activité de meunerie. Cette réalité concerne jusqu'à 95 % des petits ouvrages en travers dans le bassin Seine-Normandie (Melun, 2012)

2.2.1. Les travaux de chenalisation et d'entretien du lit et des berges

Les travaux de chenalisation impactent directement la morphologie et le tracé de la rivière puisqu'ils consistent bien souvent en des modifications du parcours du lit et des faciès d'écoulement. Dans le cas des rectifications, le chenal est court-circuité et rendu rectiligne. Il perd donc une partie de sa longueur développée, la pente s'en retrouve augmentée, les forces tractrices et la puissance spécifique accrues et le lit soumis à l'incision (Arnaud, 2012). Cette incision est souvent accentuée par l'artificialisation des berges qui empêchent la recharge sédimentaire par érosion latérale et contraignent le courant éroder verticalement le chenal (Peiry, 2003).

Dans le cas des biefs artificiels perchés sur les versants, le tracé en plan est totalement modifié puisqu'il n'emprunte plus le cours naturel de la rivière en fond de vallée. Ces biefs sont souvent calibrés et consolidés, limitant ainsi toutes évolutions latérales du chenal. Ils sont curés, en théorie régulièrement. La charge solide est donc en partie régulée et gérée par l'homme, de même que les débits liquides modulés en partie par les systèmes de vannages.

Notons cependant que, paradoxalement, l'entretien des rivières et de leurs berges, qui peut apparaître comme invasif et artificiel, garantissaient en réalité une certaine qualité morphologique et écologique de ces milieux. Les biefs des moulins curés « régulièrement » évitaient un engorgement du fond du lit et une homogénéisation des faciès. En effet, les secteurs amont des seuils de moulins sont soumis à l'effet « retenue » provoqué par ces petits barrages et la pente du lit s'en voit diminuée. Les conséquences néfastes sur les conditions d'écoulement liquide et solide (fragmentation du lit), et donc sur la qualité écologique, apparaissent finalement plus importantes maintenant, alors que les politiques de gestions privilégient une gestion plus « naturelle ». Ainsi, les rivières sont moins entretenues, les embâcles laissés dans les lits, la végétation des berges n'est pas recépée et les curages ne sont plus d'actualité. On laisse la nature faire son œuvre. Cette réalité est d'autant plus vraie dans le contexte d'une rivière comme la Mérantaise comprise dans le périmètre d'un parc naturel régional et concerné par la création de Réserves Naturelles et autres périmètres de préservation de l'écosystème local.

2.2.2. Les impacts des seuils en rivière

Les effets des ouvrages en travers sur la dynamique fluviale sont aujourd'hui très bien connus grâce aux multiples études faites sur le sujet (Petts, 1980; Williams and Wolman, 1984; Erskine, 1986; Thorne, 1997; Hadley et Emmett, 1998; Wasson et al., 1998 ; Brandt, 2000a; Brandt 2000b; Leroy Poff et Hart, 2002; Batalla et al., 2004; Petts et Gurnell, 2005; Philipps et al., 2005; Gordon et Meetenmeyer, 2006; Rollet, 2007 ; Melun, 2012). Cependant, celles-ci concernent pour une grande majorité les barrages (> 5 m) et grands barrages (> 15 m), au détriment des seuils en rivières de taille plus modeste.

Ces derniers ont pourtant bénéficié d'un certain intérêt scientifique à partir des années 2000, profitant des nouvelles préoccupations environnementales relatives à la qualité des rivières (DCE) (Juracek, 1999 ; Leroy Poff et Hart, 2002; Grier, 2003; Malavoi, 2005; Barraud, 2009; Jacob-Rousseau, 2009 ; Skalak et al., 2009 ; Csiki et Rhoads, 2010; Mueller et al., 2011 ; Souchon et Nicolas, 2011 ; Germaine et Barraud, 2013 ; Beauchamp et al., 2017a). Les perturbations induites par la présence d'ouvrages en travers touchent dans un premier temps les variables de contrôle, en particulier primaires (débits liquides et solides). Elles sont cependant très variées selon les types d'ouvrages. Quelle que soit sa taille, l'ouvrage transversal constitue un « point dur » dans le chenal qui vient contraindre les écoulements hydriques et sédimentaires.

Concernant les flux liquides, les seuils en rivières sont à l'origine d'une surélévation de la ligne d'eau et la mise en place d'une retenue à l'amont de l'ouvrage (effet plan d'eau). Par conséquent, les vitesses d'écoulement sont fortement réduites à l'amont et ont tendance à stagner dans la retenue (Malavoi, 2003). D'autre part, plusieurs études ont montré l'impact des ouvrages en travers sur la fréquence, l'amplitude et la durée des débits extrêmes : étiage et crue (Petts, 1980; Dynesius et Nilsson, 1994; Brandt, 2000a; Grams et Schmidt, 2002; Assani et Petit, 2004; Assani et al., 2005; Magilligan et Nislow, 2005). Si les seuils en rivière semblent avoir un effet plus limité que les grands barrages sur les variables de contrôle, ils participent pour autant à la réduction de l'amplitude et de la fréquence des débits de crues (événements hydrologiques lissés), à l'augmentation des débits d'étiage, ainsi à un potentiel dérèglement de la saisonnalité du régime hydrologique lorsque celui-ci est contrôlé artificiellement par une alternance de stockage/déstockage des débits de la retenue par un système de vannage (Balland, 2004).

De la même manière, les flux sédimentaires sont eux-aussi contrariés par la présence d'ouvrages en travers. Ils sont responsables d'un piégeage plus ou moins efficace de la charge de fond, d'une part, et de la fraction fine en suspension d'autre part (Petts, 1980 ; Kondolf, 1997). Leopold et al. (1964) estiment jusqu'à 95% de la charge solide bloquée à l'amont des seuils/barrages. La stagnation de l'eau dans la retenue amont de l'ouvrage favorise le dépôt des particules fines par décantation, réduisant jusqu'à 65% du transport de la charge en suspension (Nilsson, 1976 in Petts, 1980).

Les conséquences directes et indirectes du contrôle des variables internes sur la morphologie des rivières sont de différents ordres et répondent encore une fois à une logique spatiale amont-aval. À l'amont des ouvrages, dans la zone d'influence du seuil, les processus hydromorphologiques sont conditionnés par la forte diminution des vitesses d'écoulement. Celle-ci occasionne alors des processus d'accumulation de la charge sédimentaire et un exhaussement régressif du lit qui modifie l'aspect du profil en long. La pente est réduite au sein de la retenue et la granulométrie de la charge de fond respecte un gradient par taille en accord avec la dynamique de l'écoulement : les éléments les plus grossiers sont déposés à l'entrée de la retenue tandis que les particules fines s'accumulent plus en aval (Leopold et

Bull, 1979 ; Sear, 1995). La géométrie du chenal dans la zone d'influence d'un seuil en rivière se caractérise bien souvent par une diminution de la sinuosité et de la profondeur du lit mineur, tandis que la rivière s'élargit latéralement.

À l'aval des seuils en rivière, le piégeage de la charge de fond est à l'origine d'un déficit sédimentaire important. Or, dans le même temps, la chute créée par l'obstacle en travers augmente localement l'énergie des eaux claires, qui s'empressent alors d'éroder et inciser le lit de la rivière en aval du ressaut (**scénario 1, Figure 1.7**), suivant le phénomène d'« *hungry water* » développé par Kondolf (1997). Ce phénomène est toutefois limité lorsque le seuil n'accentue pas le déficit sédimentaire et/ou si le laminage des crues est très significatif et réduit la puissance fluvial (**scénario 2, Figure 1.7**). Cette tendance systématique à l'érosion régressive ou progressive du chenal est préférentiellement verticale (incision) (Petts, 1980 ; Brandt, 2000b), mais peut également avoir une dimension latérale. Ces variations s'expliquent par la puissance de l'écoulement (Leopold et Bull, 1979) ou la granulométrie du lit et des berges (Wolman, 1967). Lorsque la puissance hydraulique est supérieure à la puissance critique d'entraînement des particules, le chenal s'incise. À l'inverse, lorsque la puissance d'écoulement est proche de la capacité critique d'entraînement, l'érosion latérale prédomine (Leopold et Bull, 1979). Le déficit sédimentaire et l'évacuation de la charge de fond par des écoulements hydrauliques impliquent bien souvent la disparition des alluvions de fond et donc une modification de la granulométrie du lit (Kondolf, 1997). Seuls les plus gros éléments dépassant la capacité de transport de la rivière se maintiennent dans le lit. Cette augmentation de la taille moyenne des sédiments à l'aval des ouvrages est soulignée par plusieurs auteurs, y compris pour les seuils en rivière (Ambers, 2007; Tiemann et al., 2007; Skalak et al., 2009; Csiki et Rhoads, 2010). Ce processus d'incision en aval des ouvrages se poursuit généralement jusqu'à ce que le chenal se soit stabilisé par (i) l'atteinte d'un nouvel équilibre dynamique, ou par (ii) un forçage géomorphologique (mise à l'affleurement du substrat rocheux, pavage, rencontre d'un niveau de base tel que l'exutoire de la rivière ou l'entrée dans la zone d'influence d'un ouvrage aval, colonisation végétale).

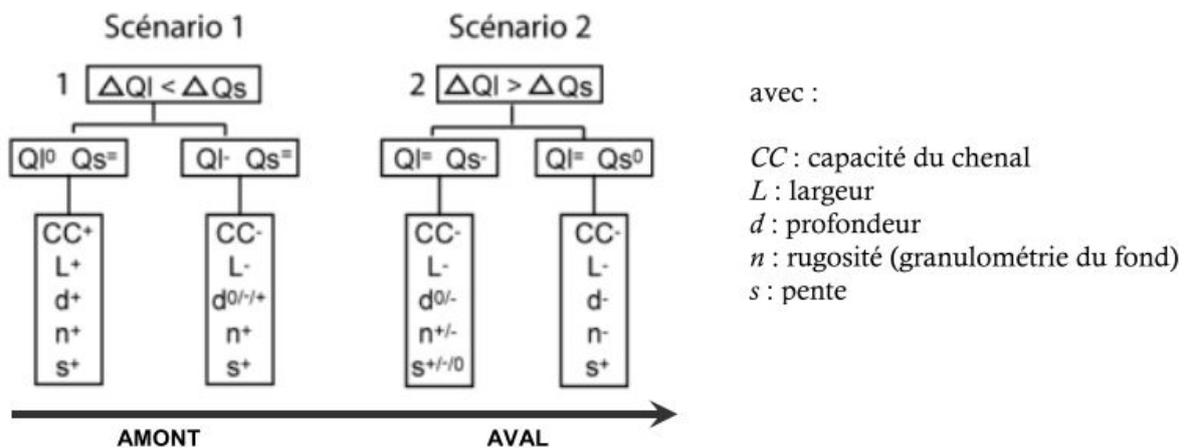


Figure 1.7 : Schéma d'ajustement du chenal à l'aval d'un ouvrage transversal en réponse aux modifications des débits liquides (Q) et solides (Q_s) (Arnaud, 2012 ; d'après Petts et Gurnell, 2005 ; basé sur Schumm, 1969)

Enfin, quelques effets positifs de la présence d'ouvrages en travers peuvent tout de même être identifiés, comme la stabilisation des profils longitudinaux et transversaux réduisant notamment les risques d'érosion régressive vers l'amont.

Par ailleurs, nous n'avons abordé ici que les effets des seuils en rivière sur les variables de contrôle et les conséquences sur la morphologie du chenal impacté. Cependant, ces ouvrages ont également des impacts sur le niveau des nappes alluviales et sur la qualité physico-chimique des eaux.

Sans développer longuement les effets piézométriques des seuils en rivière, notons tout de même que les niveaux limnimétriques du chenal et piézométriques de la nappe sont corrélés et interdépendant, et ce malgré un décalage induit par l'inertie de l'eau infiltrée dans les sols. De ce fait, le maintien d'un niveau d'eau conséquent dans la retenue amont de l'ouvrage s'accompagne d'une surélévation de la nappe alluviale qui favorise une saturation des sols et potentiellement un risque d'inondation (Ashraf et al., 2007 ; Melun, 2012) (**Figure 1.8**). À l'aval, on observe à l'inverse un abaissement de la nappe qui peut s'avérer préjudiciable pour les milieux rivulaires (déconnexion et dépérissement) (Rood et Heinze-Milne, 1989 ; Stromberg, 1996; Degoutte, 2006). Dans le cas des seuils en rivière, cet abaissement au droit de l'ouvrage n'est pas systématique et favorise la recharge de la nappe (**Figure 1.8**).

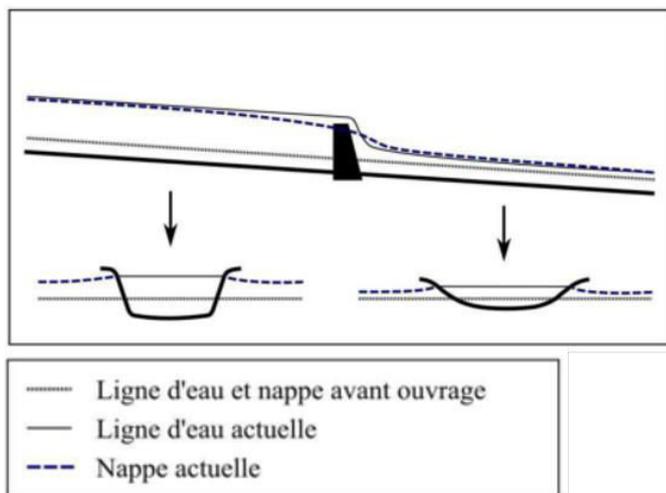


Figure 1.8 : Évolution des niveaux piézométriques sous l'influence d'un seuil en rivière (Melun, 2012, d'après Degoutte, 2006 ; modifiée)

D'autre part, la qualité physico-chimique peut-être fortement dégradée par la présence d'un ouvrage en travers du chenal (Bouloud et al., 2001). En effet, le régime thermique est perturbé par l'augmentation des hauteurs d'eau et le temps de séjour de l'eau à l'amont du seuil. Lorsque la retenue est peu profonde (c'est le cas pour nos contextes d'étude), la température augmente. Dans le même temps, l'apport externe d'intrants polluant issus des rejets urbains et agricoles dégrade également la qualité physico-chimique de l'eau. Or, les retenues en amont des ouvrages constituent de véritables pièges à nutriments. L'eau et les sédiments y sont saturés par un excès de substances nutritives et des contaminants toxiques (métaux

lourds, PCB⁸, arsenic, HAP⁹, phtalates, ...) (Chevreuil et al., 2009). L'enrichissement excessif en éléments nutritifs est à l'origine des phénomènes d'eutrophisation, qui se caractérisent par une efflorescence algale, un développement accéléré des végétaux en surface (macrophytes) et une prolifération de cyanobactéries (Directive 91/271/CEE ; Taoufik et Dafir, 2002, Billen et al., 2009). La présence excessive d'algues en surface empêche toute pénétration de la lumière, limitant la photosynthèse dans les couches inférieures et les échanges atmosphériques. La retenue devient un milieu extrêmement pauvre en oxygène et donc peu propice à la vie aquatique.

2.3. Modifications hydromorphologiques liées à l'urbanisation

Il est désormais acquis que le développement rapide des espaces urbains et périurbains est l'un des facteurs principaux de dégradations physiques des milieux aquatiques (Chin, 2006 ; Navratil et al., 2013). L'urbanisation est souvent associée à des altérations irréversibles du régime hydrologique et des conditions morphologiques modifiées par de nouvelles dynamiques fluviales. Les études relatives à ces questions sont de plus en plus nombreuses depuis quelques décennies et prospectent des contextes physiographiques variés (Gregory et al., 1992; Chin, 2006; Chin et al., 2013 et 2016; Gurnell et al., 2007; Navratil et al., 2013). L'urbanisation modifie significativement les hydrosystèmes au niveau (i) du régime hydrologique, (ii) de la production et du transport sédimentaire, et par conséquent (iii) de la morphologie des rivières. Ce sont ces trois aspects qui seront abordés de manière synthétique dans cette partie.

2.3.1. Seuil(s) de sensibilité et temps de réponse des hydrosystèmes (péri)urbains

Mais, précisons tout d'abord que les hydrosystèmes ne sont pas tous affectés de la même façon par l'urbanisation. L'environnement, la distance et la connexion des surfaces urbanisées au réseau hydrographique peuvent varier et conditionnent le **seuil de sensibilité** à l'urbanisation des cours d'eau. Cette notion de seuil de sensibilité a fait l'objet de plusieurs études qui ont cherché à le déterminer en fonction de la part de surfaces imperméables dans le bassin versant. Ainsi, il est généralement considéré que l'impact de l'urbanisation sur le fonctionnement hydrosédimentaire et la morphologie des rivières est perceptible dès 10% de surfaces imperméables dans le bassin versant (Booth et Jackson, 1997 ; Bledsoe et al., 2001 ; Schueler, 1995 d'après Doll et al., 2002) (**Tableau 1.2**). Ce seuil a également été calculé pour les pressions exercées sur les écosystèmes aquatiques (essentiellement les espèces piscicoles). Il apparaît que ce seuil est beaucoup plus variables, dès 1 ou 2 % jusqu'à 15 % de surfaces imperméables (**Tableau 1.2**).

⁸ Polychlorobiphényle

⁹ Hydrocarbures polycycliques aromatiques

Impact	Surfaces imperméables	Surfaces urbaines	Source
Morphologie :			
déstabilisation du cours d'eau	10-20%		Bledsoe et al. (2001a)
	10%		Booth et Jackson (1997)
	10%		Schueler (1995 d'après Doll et al. 2002)
ajustement des dimensions des chenaux	7-10%		Coleman et al. (2005)
		25%	Morisawa et Laflure (1979)
Biologie :			
diminution de l'abondance des communautés piscicoles	10-15%		Galli (1993 d'après Kauffman et Brant 2000)
		10%	Limburg et Schmidt (1990)
diminution de la diversité des espèces piscicoles	12%		Klein (1979 d'après Chin 2006)
déclin significatif de l' <i>Index of Biotic Integrity</i> qui caractérise les communautés piscicoles	13,8%		Miltner et al. (2004)
diminution de la diversité en macroinvertébrés benthiques	6%		Morse (2001)
	1,2-3,4%		Ourso et Frenzel (2003)
	10%		Schueler et Galli (1992 d'après Kauffman et Brant 2000)
diminution de la diversité et de l'abondance en amphibiens et macroinvertébrés benthiques		8%	Riley et al. (2005)

Tableau 1.2 : Établissement de seuils de sensibilité à l'impact de l'urbanisation sur la morphologie et la biologie des cours d'eau (Grosprêtre, 2011).

Or, cette notion de seuil de sensibilité est étroitement liée à celle du temps de réponse du système impacté, qui intègre le décalage temporel entre la perturbation d'un système et sa réponse (Knighton, 1984 ; Downs et Gregory, 1995). On considère que la réponse générale d'un cours d'eau à une perturbation se décompose en deux temps, celui de la réaction et celui de la relaxation (Graf, 1977) (**Figure 1.9**). S'ensuit alors éventuellement un temps de nouvel équilibre où le système s'est ajusté aux nouvelles conditions (Brunsdén et Thornes, 1979 ; Knighton, 1984).

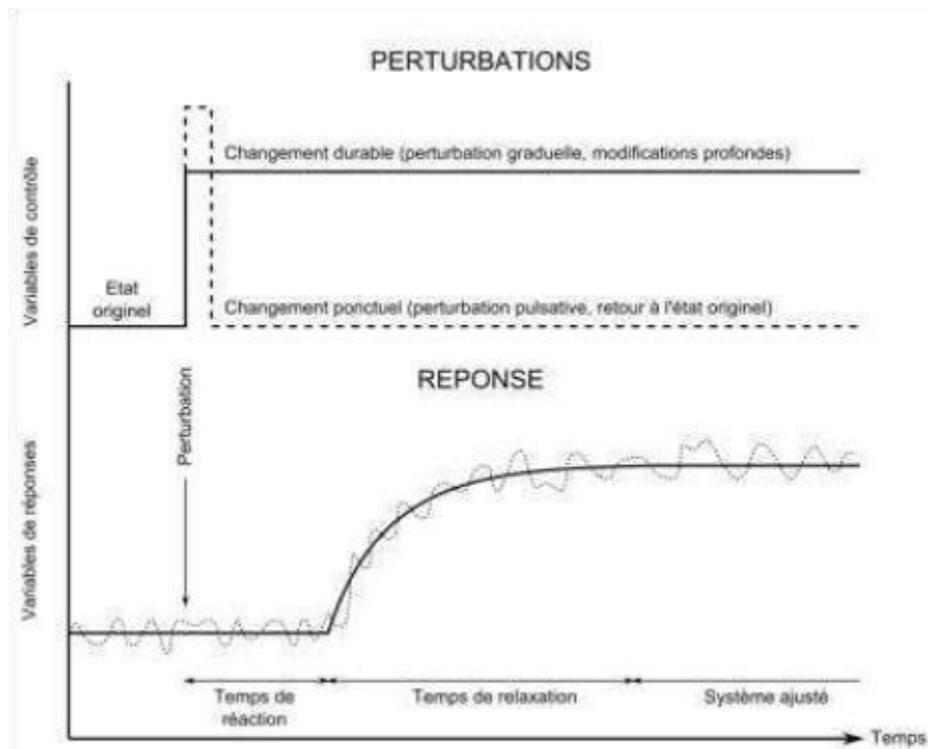


Figure 1.9 : Schéma conceptuel des temps des réponses aux perturbations (durables ou ponctuelles) (Melun, 2012 ; d'après Brundsen et Thornes, 1979 ; Knighton, 1984)

Concernant l'impact de l'urbanisation, Hammer (1972) considère que les effets du développement urbain dans les bassins versants sont perceptibles en moyenne au bout de 4 ans. Les surfaces drainées depuis 15 à 30 ans impactent sensiblement la morphologie des cours d'eau du bassin : les chenaux présentent alors des dimensions nettement plus élevées. Les résultats d'Hammer sont confirmés par d'autres auteurs s'étant penchés sur ces aspects (Wolman, 1967 ; Douglas, 1985).

Par ailleurs, les territoires périurbains sont des espaces spécifiques car de transitions, entre ville et campagne. Ils sont soumis à des dynamiques paysagères et fonctionnelles complexes qui sont parfois difficiles à appréhender (Germaine et al., 2017). De ce fait, les cours d'eau qui s'écoulent dans ces bassins versants périurbains sont à la fois soumis à la capacité d'interception et aux apports des parcelles imperméabilisées (villes et réseau routier), d'une part, et rurales (agricoles, enherbées et boisées), d'autre part. Cependant ces derniers peuvent être de moindre importance car les écoulements, liquides ou solides, issus des surfaces rurales sont bien souvent interceptés par le réseau de drainage artificiel qui conduit directement les ruissellements urbains vers le réseau hydrographique (Grosprêtre, 2011; Chin et al., 2013; Navratil et al., 2013).

2.3.2. Modifications du régime hydrologique (débit liquide)

Les modifications les plus significatives liées à l'urbanisation concernent le régime hydrologique des systèmes fluviaux aménagés. En effet, les territoires sous influence de l'urbanisation, et notamment de l'intensification du réseau de drainage, se caractérisent par **(i) une augmentation des volumes ruisselés, (ii) une accélération des écoulements, (iii) et une modification des distributions temporelles des débits (Figure 1.10).**

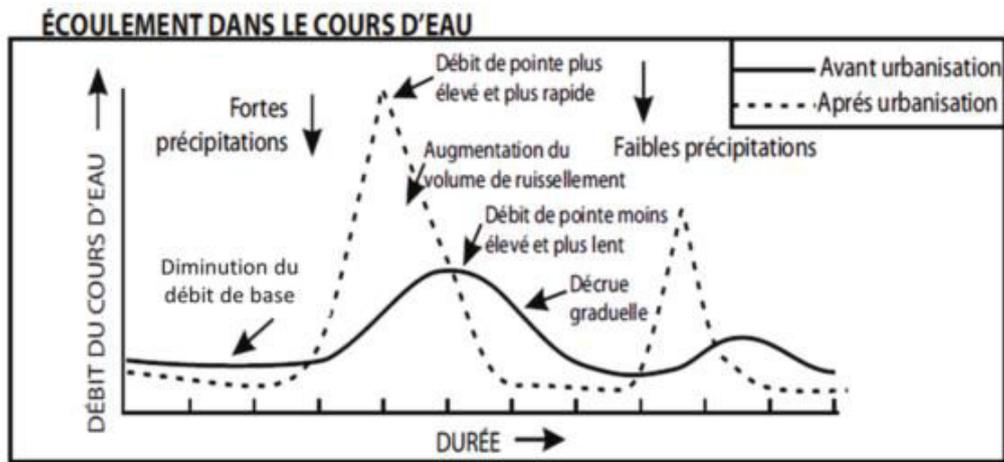


Figure 1.10 : illustration de l'impact de l'urbanisation sur les dynamiques de crues (Fédération canadienne des municipalités et Conseil national de recherche Canada, 2003)

L'**augmentation des volumes ruisselés** est directement imputable aux modifications de l'occupation des sols induites par l'urbanisation : la diminution du couvert végétal, l'augmentation des surfaces imperméables, les sols mis à nu lors de la construction des zones urbanisées, ... Tous ces aménagements réduisent la capacité de stockage, d'infiltration et d'évapotranspiration des sols (Booth et Jackson, 1997 ; Booth, 2000 ; Konrad et al., 2005). Le ruissellement moyen pour une pluie donnée est alors concentré et généralement évacué par un réseau de drainage/d'assainissement chargé d'acheminer les eaux pluviales vers le(s) cours d'eau du bassin, réduisant ainsi drastiquement les écoulement subsurface (Dunne et Leopold, 1978 ; Harned, 1988 ; Burges et al., 1998) (**Figure 1.11**). Des études se sont attachées à déterminer le rapport entre le ruissellement avant urbanisation et après urbanisation, comme dans la ville de Hempstead, Long Island, aux États-Unis (Seaburn, 1969 ; d'après Knighton, 1984) (**Tableau 1.3**).

Précipitation (mm)	Ruissellement (mm)		Rapport de (2) sur (1)
	Pré-urbain (1)	Urbain (2)	
25	1.5	2.2	1.5
50	2.9	6.4	2.2
75	4.2	11.9	2.8
100	5.5	18.5	3.4
125	6.7	26.0	3.9

Tableau 1.3 : Rapport entre le ruissellement avant urbanisation et après urbanisation pour une pluie donnée dans la ville de Hempstead, Long Island, Etats-Unis (Grosprêtre, 2011 ; d'après Seaburn, 1969 d'après Knighton, 1984). L'occupation du sol pré-urbanisé n'est pas connue.

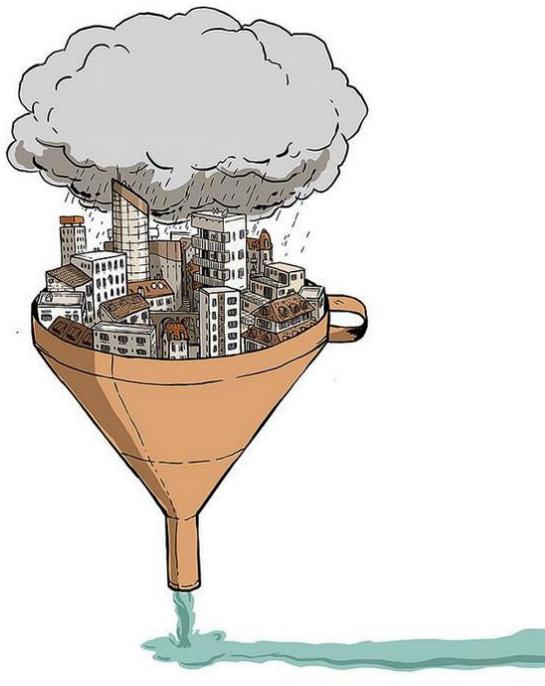


Figure 1.11 : Illustration évocatrice de l'effet de l'urbanisation sur le régime hydrologique (source inconnue, internet)

D'autre part, il a été observé une tendance à **l'accélération de la réponse hydrologique** du bassin versant aux épisodes pluvieux du fait du temps de concentration restreint dans les zones sous influence urbaine par la moindre rugosité des surfaces superficielles et de leur faible capacité d'infiltration et de stockage des eaux précipitées (Leopold, 1968 ; Arnold et al., 1982 ; Wong et Li, 1998 ; Bravard et Petit, 2000 ; Campana et Tucci, 2001). Le ruissellement urbain est généralement géré par un réseau d'assainissement qui concentre les écoulements et les évacuent vers les rivières. Sa densité et ses propriétés hydrauliques (réseaux d'assainissement, fossés, routes) conditionnent en grande partie la réponse hydrologique du bassin versant (Leopold, 1968 ; Sauer et al., 1983 ; Harned, 1988 ; Chocat, 1997 ; Schick et al., 1999), et de fait les ajustements morphologiques des cours d'eau impactés

(Hammer, 1972 ; Whitlow et Gregory, 1989 ; Chin et Gregory, 2001). Ce raccordement à un réseau de drainage artificiel n'est cependant pas systématique. Il est, par ailleurs, intéressant de noter que la majorité des systèmes d'assainissement des eaux pluviales ont été conçus pour évacuer le plus rapidement possible le ruissellement urbain grâce à un tracé direct et des pentes fortes (Chocat, 1997 ; Gregory et Chin, 2002). Mais certains aménagements urbains visent tout de même à réduire et ralentir le ruissellement, notamment dans la conception des Villes-Nouvelles qui privilégie les bassins de rétention (Eleb-Harlé et Barles, 2005).

Enfin, l'un des effets les plus significatifs de la concentration des écoulements urbains sur les régimes hydrologiques des cours d'eau (péri)urbains est **l'occurrence de crues plus intenses et d'étiages plus marqués**. L'urbanisation est responsable de l'accroissement des débits de pointes pour une période de retour donnée, souvent des événements extrêmes en contexte naturel (Desbordes, 1989 ; Chocat, 1997 ; Bravard et Petit, 2000 ; Konrad et al., 2005), mais aussi pour les petites et moyennes crues dont la période de retour est inférieure à 2 ans (James, 1965 d'après Konrad et al., 2002 ; Hollis, 1975). Les débits de pointes peuvent être multipliés par un facteur de 5 à 50, en particulier lorsque les hydrosystèmes ont été canalisés et ajustés morphologiquement (Desbordes, 1989). En Angleterre, des études ont montré qu'une imperméabilisation des sols de 40% d'un bassin versant suivi (urbanisation et réseau de drainage) était à l'origine d'un facteur de multiplication des débits de pointes de 2.2 (Roberts, 1989). L'urbanisation augmente également très fortement les crues morphogènes (période de retour comprise entre 1 et 2 ans, voire moins sur les petits cours d'eau) (Hollis, 1975 ; Petit et Daxhelet, 1989 ; Bravard et Petit, 2000).

À l'inverse, les débits d'étiages entre deux épisodes de crues peuvent être drastiquement diminués, proportionnellement à la surface imperméable des bassins versants (Sawyer, 1963 d'après Konrad et al., 2002 ; Leopold, 1968 ; Rose et Peters, 2001 d'après Chin, 2006 ; Breil et al. 2010 ; Chin et al., 2013). L'exemple d'un bassin versant de 17 km², près de Baltimore, étudié par Brun (2000, d'après Radojevic, 2002) illustre bien cette tendance. Alors que la surface imperméable dans le bassin a augmenté de 2% à 18%, le débit de base a diminué de près de 20%. Cependant, l'implantation de bassins de rétention peut parfois pallier ce phénomène et limiter les effets de l'urbanisation (Konrad et al. 2002).

2.3.3. Une production sédimentaire modifiée par l'urbanisation

Tout d'abord, les **sources de production sédimentaire** des bassins versants urbanisés sont généralement doubles. Si une grande part de cet apport au cours d'eau reste l'érosion des sols et le lessivage des routes, des réseaux d'assainissement et de toute surface urbanisée (Douglas, 1985 ; Nelson et Booth, 2002 ; Chin, 2006 ; Chin et al., 2013), une part non négligeable des sédiments fournis proviennent du ravinement des versants (Bondarev et Gregory, 2002). Pour autant, l'érosion du lit et des

berges des chenaux peuvent également constituer la principale source de sédiments, en particulier dans les lits fortement incisés (Trimble, 1997 ; Simon et Rinaldi, 2006). La part des particules fines lessivée des routes peut aussi être importante et causer un ensablement des chenaux alimentés (Booth et Jackson, 1997 ; Pizzuto et al., 2000 ; Walters et al., 2003).

D'autre part, la production sédimentaire des bassins versants urbanisés répond à une évolution temporelle bien connue depuis les premières études menées sur le sujet aux États-Unis par Wolman (1967) et son modèle d'évolution théorique basé sur l'observation de bassins de la région du Middle Atlantic aux États-Unis (**Figure 1.12**).

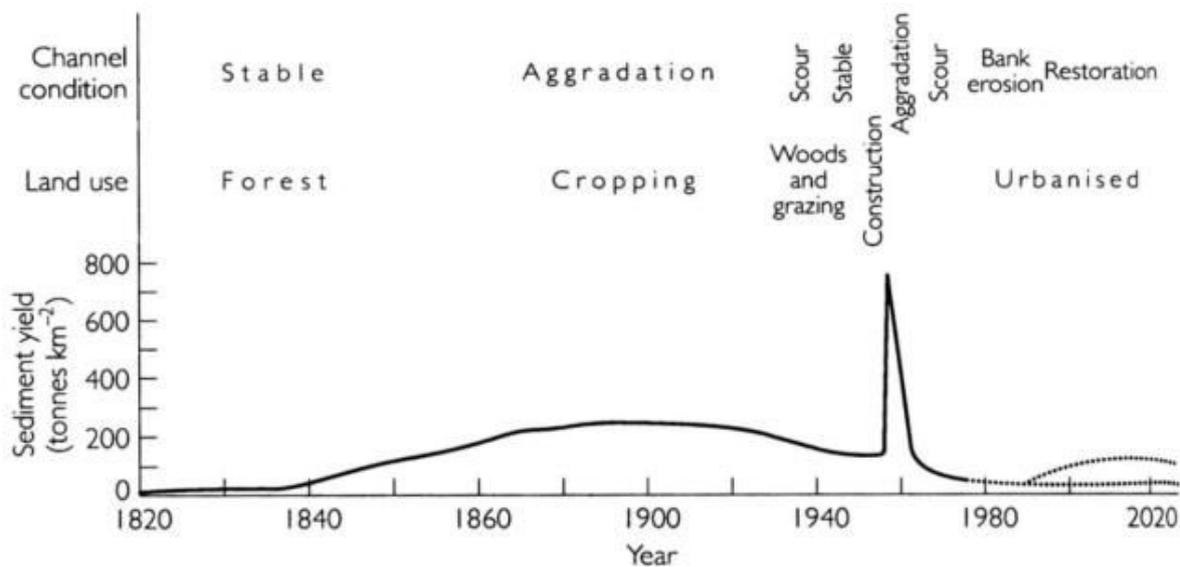


Figure 1.12 : Modèle d'évolution temporelle de la production sédimentaire d'un bassin versant et de la réponse morphologique en fonction de l'occupation du sol (Wolman, 1967 ; modifié d'après Downs et Gregory, 2004)

Wolman y décrit notamment la réaction intense de la production sédimentaire lors de la phase de construction, de développement urbain massif. Ce pic d'apport sédimentaire aux cours d'eau, de l'ordre du millier de $t.km^{-2}.an^{-1}$, s'explique notamment par la mise à nu des sédiments lors des travaux de construction. Le retour à un niveau de production sédimentaire beaucoup moins important, et parfois plus faible que la production de zones boisées, se fait lorsque les sols sont stabilisés. Cependant, cet exemple théorique illustre le cas d'un développement urbain très rapide et massif, avec peu de recul après le début de l'urbanisation. Or, d'autres études réalisées sur des bassins versants urbanisés de longue date témoignent d'une production sédimentaire qui ne faiblit pas (Wasson et al., 1998 ; Nelson et Booth, 2002).

2.3.4. Les effets de l'urbanisation sur la morphologie des cours d'eau

Enfin, les modifications des variables de contrôle (débits liquides et débits solides) imputables à l'urbanisation, comme cela vient d'être évoqué, sont à l'origine d'ajustements plus ou moins drastiques de la géométrie des rivières impactées.

D'une part, les processus d'érosion verticale et latérale sont multipliés du fait de l'augmentation globale de l'intensité et de la fréquence des crues sans apports sédimentaires suffisants (Hammer, 1972 ; Hollis et Luckett, 1976 ; Park, 1977 ; Morisawa et Laflure, 1979 ; Whitlow et Gregory, 1989 ; Gregory et al., 1992 ; Booth et Jackson, 1997 ; Pizzuto et al., 2000 ; Doll et al., 2002 ; Navratil et al., 2005 ; Chin, 2006 ; Navratil et al., 2013). Le lit et les berges sont soumis à des dynamiques fluviales fortes qui aboutissent très souvent à une incision marquée des chenaux. Si les cours d'eau s'ajustent essentiellement de manière graduelle en réponse de l'augmentation progressive des flux hydriques, il arrive que l'incision soit intense et rapide (Booth, 1991 ; Booth et Jackson, 1997 ; Bledsoe et Watson 2001). Il en est de même pour les phénomènes d'élargissement du lit.

Hammer (1972) est notamment à l'origine d'une estimation quantitative de l'effet de l'urbanisation sur les dimensions hydrauliques de cours d'eau : le taux d'agrandissement des chenaux (*Channel Enlargement Ratio, E_r*). Ce taux d'agrandissement établit le rapport entre l'état morphologique (théorique) avant urbanisation et après urbanisation. Hammer s'est notamment basé sur la comparaison des dimensions de chenaux de 50 bassins urbains et 28 bassins ruraux en Pennsylvanie (BV compris entre 2.6 et 15.5 km²) et de leur mode d'occupation des sols. Comme l'illustre le **Tableau 1.4**, ce rapport peut être particulièrement important (jusqu'à 6.79) dans le cas de bassins versants soumis à l'urbanisation. Chin (2006) a également calculé ce taux d'élargissement des chenaux pour plus de 100 cours d'eau sur quatre grandeurs de géométrie hydrauliques : largeur, profondeur, section et débit à pleins bords.

Occupation du sol	E_r
surfaces boisées	0,75
surfaces arbustives et herbacées (catégorie résiduelle)	0,9
terres cultivées	1,29
terrains de golf	2,54
surfaces urbaines :	
surfaces perméables	1,08
surfaces imperméables de moins de 4 ans	1,08
habitations non connectées au réseau d'eaux pluviales (> 4 ans)	1,08
rues non connectées au réseau d'eaux pluviales (> 4 ans)	1,08
habitations connectées au réseau d'eaux pluviales (> 4 ans)	2,19
rues connectées au réseau d'eaux pluviales (> 4 ans)	5,95
autres surfaces imperméables de plus de 4 ans	6,79

Tableau 1.4 : Taux d'agrandissement (E_r) de la section pleins bords en fonction de l'occupation des sols (Grosprêtre, 2012 d'après Hammer, 1972).

D'autre part, les ajustements hydromorphologiques des chenaux ne se fait pas toujours de manière uniforme tout au long du linéaire (Gregory et al., 1992). Répondant à la distribution spatio-temporelle des processus de transports solides, liquides, d'érosion et de dépôt, provoquée par les modifications de l'occupation des sols dans les bassins versants (Chin et Gregory, 2001, 2005)

Enfin, les modifications des conditions d'écoulement à la fois liquides et solides peuvent être à l'origine d'une altération des faciès d'écoulement et de la granulométrie du lit. Dans les cas de modification les plus extrêmes, le tracé en plan peut également être bouleversé (Arnold et al., 1982). Les séquences seuils-mouilles sont souvent lissées et conduisent à l'homogénéisation des faciès. Lorsque les apports sédimentaires sont essentiellement fins, ce phénomène est accentué par un processus d'ensablement des chenaux (Douglas, 1985 ; Trimble, 1997). Les cours d'eau urbains connaissent une diminution systématique de leur sinuosité (Chin, 2006).

Éléments de synthèse

Ainsi, les conséquences de l'urbanisation sur le fonctionnement hydrosédimentaire des cours d'eau périurbains et urbains sont aujourd'hui renseignées par une littérature scientifique importante. Parmi celle-ci, Chin et al., (2013) ont proposé une synthèse de référence sur le sujet intitulée *Urbanization and River Channels*. On y trouve notamment un modèle conceptuel qui illustre, par six scénarii successifs, les différents impacts de l'urbanisation sur le régime hydrologique et les réponses morpho-sédimentaires des systèmes fluviaux (**Figure 1.13**). Le diagramme présente le cas théorique d'un bassin versant fictif pour lequel l'urbanisation concerne directement la partie médiane du linéaire, et impacte indirectement la partie aval par diffusion spatiale des effets. Les évolutions du chenal face à l'urbanisation sont donc présentées dans une dimension spatiale, d'amont vers l'aval. Les éléments responsables des

modifications des variables de contrôle (écoulements liquides et solides) sont représentés par les losanges grisés. Ils permettent d'identifier rapidement les principaux facteurs de contrôle sous influence directe de l'urbanisation (partie médiane du schéma). Les évolutions caractérisant le régime hydrologique (débits et fréquence de débordement) sont représentés par des pointes de flèches arrondies sur fond blanc. Celles caractérisant les conséquences sur la morphologie du chenal sont identifiées par des rectangles blancs. Ces modèles sont le fruit d'une réflexion sur le long terme de Chin et de ses co-auteurs (Chin, 2006 ; Chin et Gregory, 2005, 2009). Chin et al. (2013) identifie 3 principaux scénarii en fonction de l'intensité des effets de l'urbanisation sur le chenal impacté :

- Dans le premier modèle **(a)**, l'urbanisation ne produit pas de changements sur le régime hydrologique ou la morphologie de la rivière. Il s'agit du cas théorique d'un cours d'eau épargné par les effets de l'anthropisation.
- Dans le deuxième scénario **(b)**, les apports contrôlés par le drainage des surfaces imperméabilisées sont suffisants pour modifier le débit de la rivière mais insuffisants pour modifier sa capacité d'ajustements morphologiques de façon significative. En revanche, les effets de l'urbanisation se font sentir en aval de la zone urbanisée: la fréquence de débordement y est modifiée, ce qui pourrait entraîner un ajustement de la morphologie du lit dans cette partie du linéaire.
- Le troisième scénario **(c à g)** implique des ajustements significatifs du chenal à la fois dans la zone sous influence directe de l'urbanisation et dans le secteur aval. Il est, de ce fait, plus complexe. Le changement des caractéristiques sédimentaires et locales **(c)** et de l'hydrologie **(d)** peuvent être à l'origine, d'une part, d'une altération de la morphologie du chenal, comme une incision, un élargissement du lit ou le rapport largeur-profondeur ; et d'autre part, la fréquence de débordement en sera altérée, modifiant à terme les capacités d'ajustement du chenal. Par ailleurs, Chin et al. observent de possibles effets « rétroactions négatives » (Leopold et Maddock, 1954 ; Hirsch, 1977 ; Faulkner, 1998) par adaptation de la morphologie à la capacité morphogène des apports hydrologiques urbains. Celle-ci peut conduire à un élargissement ou un enfoncement du lit qui impliquera une réduction de la capacité de débordement de la rivière, et donc à terme une modération des ajustements morphologiques. Ces évolutions sont essentiellement sensibles dans la partie aval de la zone urbanisée.
- Enfin, ces cinq premiers modèles impliquent également des changements dans le transport des sédiments. Lorsque ces modifications sont suffisamment significatives, un sixième scénario peut être identifié **(g)**. Un déficit sédimentaire sera généralement à l'origine d'une érosion du lit et des berges sous l'effet du phénomène d'*hungry water* décrit par Kondolf (1997). À l'inverse

des apports plus importants que la capacité de transport du chenal sera responsable d'une aggradation du fond du lit. Dans les deux cas, qui ont court *a priori* dans le secteur urbanisé, conduisent à une modification des conditions de fréquence de débordement de la rivière (faible en cas de chenal trop incisé, ou importante lorsque les dépôts ont exhaussé le fond du lit). Encore une fois, ces changements hydrologiques sont ensuite responsables de modifications de la morphologie du chenal et de sa capacité d'ajustement.

Initialement, ce schéma s'applique aux impacts de l'urbanisation sur la morphologie des cours d'eau. Cependant, il pourrait également être réadapté pour décrire l'impact des aménagements hydrauliques anciens ou plus récents sur les conditions hydro-sédimentaires des cours d'eau historiquement aménagés.

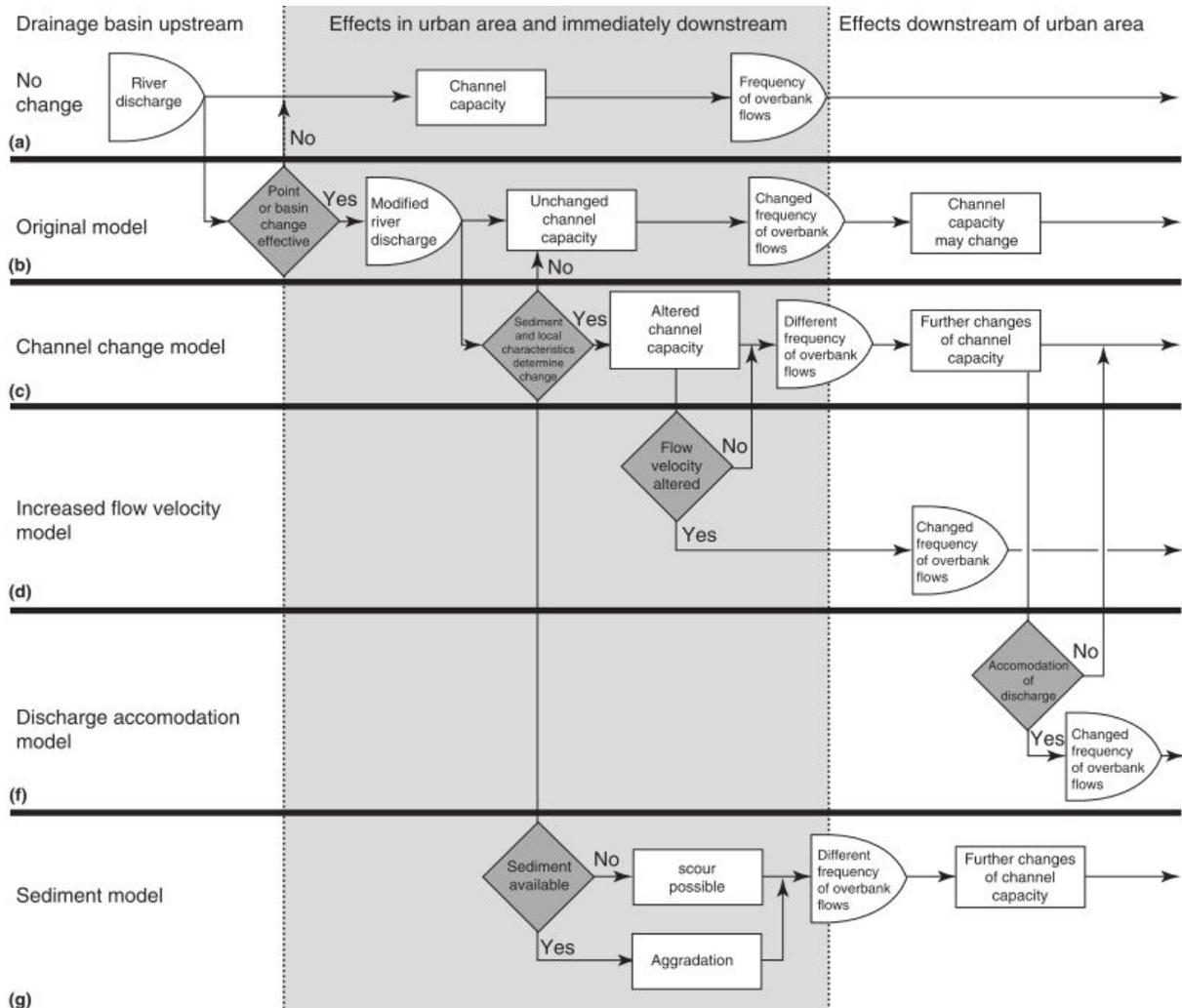


Figure 1.13 : Diagramme représentant six modèles conceptuels de l'impact spatial de l'hydrologie urbaine sur les chenaux des systèmes fluviaux. La zone grisée représente la partie du bassin concernée par l'urbanisation (d'après Chin et al., 2013 ; reproduit de Chin et Gregory, 2009).

Enfin, les perturbations anthropiques que nous avons identifiées, à savoir les aménagements hydrauliques anciens (seuils en rivière, protections de berges, travaux de chenalisation, ...) et l'urbanisation, sont également à l'origine d'impacts écologiques et socio-économiques : dégradation de la qualité des habitats aquatiques, fragilisation de la ripisylve, perte de terres riveraines par érosion latérale, déconnexion des annexes hydrauliques, ... Cependant, ces aspects ne sont pas le sujet de ce travail doctoral et ne seront donc pas développés plus en détail dans cet état de l'art. Nous renvoyons alors le lecteur à l'importante production bibliographique sur le sujet (par exemple : Meehan et al., 1977 ; Booth et Jackson, 1997 ; Andersson et al., 2000 ; Jansson et al., 2000, 2005 ; Bunte, 2004 ; Cumming, 2004 ; Miltner et al., 2004 ; Pollard et Reed, 2004 ; Baumgartner, 2007 ; Principe, 2010 ; Chin et al., 2013).

C. La restauration écologique : définition et évolution du concept

La dégradation des milieux aquatiques est, comme cela a été démontré, la conséquence directe des activités anthropiques. Elle est devenue, depuis les années 2000, un enjeu politique et environnemental majeur de reconquêtes et de gestion à travers la mise en œuvre du concept de restauration écologique. Il s'agit d'un concept ancré, à la fois, dans un contexte législatif et réglementaire mis en application par les gestionnaires de ces milieux, et dans un contexte de recherche questionné par la communauté scientifique. À l'origine, ce concept est issu de la réflexion scientifique et théorique internationale sur le fonctionnement systémique des hydrosystèmes et des écosystèmes initiée dans les années 1960 (Hack, 1960 ; Chorley, 1962) par la double rencontre de la géomorphologie fluviale et l'écologie (Amoros et Petts, 1993). Après l'apparition d'une réglementation et d'une institutionnalisation du concept par les politiques environnementales, les chercheurs se sont réapproprié de la notion de « restauration écologique » comme un objet de recherche à discuter, tant du point de vue des enjeux physiques que du point de vue des enjeux socio-politique qu'il implique (Le Calvez, 2017). Par ailleurs, si le principe de « restauration écologique » relève d'une conception large, il est en particulier régi par celui du rétablissement de la continuité écologique et sédimentaire qui préconise la suppression des ouvrages en travers contraignant à la fois les dynamiques fluviales et les espèces aquatiques (poissons, macro-invertébrés, végétation, ...). De plus, de nombreux seuils en rivière – catégorie qui concentre notre attention – sont devenus inutiles et obsolètes depuis l'abandon des activités hydrauliques sur les petits cours d'eau de faible énergie, au début du XX^{ème} siècle. Ainsi, parmi l'ensemble des acceptations de la restauration écologique, celle de la « continuité écologique » retient plus particulièrement notre intérêt et concentrera notre propos.

1. Un cadre institutionnel pour une amélioration et une préservation des milieux aquatiques

En France, la Loi sur l'eau de 1992 (Loi n°92-3) entérine pour la première fois le terme de « restauration » dans les textes législatifs et réglementaire de la politique française. Elle établit notamment que « [l]'eau fait partie du patrimoine commun de la Nation. Sa protection, sa mise en valeur et le développement de la ressource utilisable, dans le respect des équilibres naturels, sont d'intérêt général ». La « restauration de la qualité des eaux superficielles » y est définie comme un objectif majeur à atteindre. Plus tard, la Loi sur l'eau du 21 avril 2004, retranscription en droit français de la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE 2000/60/CE) du 23 octobre 2000, la Loi sur l'Eau et les Milieux aquatiques (LEMA) de 2006, ou encore les Trames Vertes et Bleues mise en œuvre à l'issue du Grenelle de l'environnement (2009), réaffirment l'importance de ce concept et accélèrent sa mise en œuvre par la création d'institutions en charge de son application : les Agences de l'Eau, l'Office Nationale de l'Eau

et des Milieux Aquatiques (ONEMA, devenue Agence Française pour la Biodiversité depuis sa fusion avec d'autres institutions), ... La DCE constitue donc un cadre institutionnel fondamental qui fixe aux États membres de l'Europe un objectif général de non dégradation et d'atteinte du « bon état écologique » des masses d'eau, soit la préservation et la restauration des milieux aquatiques. Ce « bon état » des rivières implique une continuité écologique, définie ainsi par la DCE : « *La continuité écologique, pour les milieux aquatiques, se définit par la circulation des espèces et le bon déroulement du transport des sédiments. Elle a une dimension amont-aval, impactée par les ouvrages transversaux comme les seuils et barrages, et une dimension latérale, impactée par les ouvrages longitudinaux comme les digues et les protections de berges* »¹⁰. Aussi, ce cadre juridique et réglementaire préconise la suppression partielle ou totale des obstacles à l'écoulement pour rétablir la continuité écologique et sédimentaire des cours d'eau anthropisés. En France, l'inventaire des obstacles à l'écoulement, le ROE (Référentiel des Obstacles à l'Écoulement) recense près de 96912 ouvrages en travers – barrages, écluses, seuils, déversoirs – en 2017¹¹. Il est difficile d'établir combien d'ouvrages ont déjà été supprimés en France car l'inventaire disponible des opérations n'est pas mis à jour régulièrement (Melun, 2012). Cependant, il apparaît qu'en trente ans, plus de 530 seuils ont ainsi été effacés dans le bassin Seine-Normandie (AESN, 2017), notre contexte d'étude. L'effacement de ces ouvrages doit également permettre d'améliorer la qualité de l'eau et des habitats aquatiques par la suppression des plans d'eau créés en amont.

2. La « restauration de la continuité écologique », un concept scientifique en constante évolution

Outre un concept politique et institutionnel, « la restauration de la continuité écologique » est également investie par la sphère scientifique depuis plusieurs décennies. L'analyse du nombre de publications qui ont étudié ce concept a montré un intérêt croissant pour la question depuis les années 2000 (Ormerod, 2004 ; Vigier et Caudron, 2008 ; Roux-Michollet et al., 2013 ; Morandi, 2014). Cependant, ce domaine est encore inégalement investi par les différentes disciplines. En effet, les sciences de la nature (écologie, ingénierie, géomorphologie fluviale) sont les premières avoir questionné ce concept et proposé une bibliographie conséquente. À l'inverse, cela reste un champ encore peu investi par les sciences sociales. Récemment un groupe de chercheurs français, mené par R. Barraud et M.A. Germaine s'est emparé de la question des conflits d'acteurs suscités par les projets de démantèlement (Barraud et Germaine, 2017).

¹⁰ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN_Plan_de_restoration_des_cours_d_eau.pdf (consulté le 26-04-2012, p3)

Article R2 14 – 109 du code de l'environnement définissant un obstacle à la continuité écologique.

¹¹ <http://www.eaufrance.fr/observer-et-evaluer/pressions-sur-les-milieux/alterations-hydromorphologiques/> (consulté en ligne le 11/07/2018)

2.1. « Historique » d'un concept scientifique évolutif

La « restauration » est un terme qui couvre de nombreuses acceptations et actions dont le but reste l'amélioration de la qualité écologique d'un milieu dégradé par les interventions directes et indirectes de l'homme (Dufour et Piégay, 2009). Comme en témoigne Dufour et Piégay (2009), sa définition a connu une évolution épistémologique importante depuis son apparition dans la sphère politique et scientifique, à l'aube des années 80 (**Tableau 1.5**).

Initialement, le concept de restauration des milieux aquatiques prône le « retour complet, structurel et fonctionnel, à un état non perturbé de la rivière » (Cairns, 1991). Ainsi, cette situation idéale, à retrouver, implique de se rapprocher le plus possible du fonctionnement d'une rivière « naturelle ». Les premières opérations de restauration, entrepris en Europe et aux États-Unis durant les années 80 et début des années 90, se basent alors sur un état de référence statique passée, généralement établi à partir de documents cartographiques anciens. Or, cet état de référence est très vite remis en cause par la communauté scientifique car il omettait, d'une part, le caractère dynamique et évolutif par essence des systèmes fluviaux, et ignorait, d'autre part, l'irréversibilité des modifications des variables de contrôle ainsi que des ajustements morphologiques impliqués. Certaines actions se sont d'ailleurs soldées par un échec opérationnel (Kondolf et al., 2001).

Depuis les années 2000, l'émergence de nouveaux enjeux, tel que l'érosion de la biodiversité, et de nouveaux concepts, comme celui de services écosystémiques rendus par la Nature (Costanza et al., 1997 ; Dufour et al., 2010 ; Lespez et al., 2016), réoriente les pratiques et s'accompagne d'un renouvellement de la recherche sur les dynamiques des systèmes fluviaux (Bravard et Petit, 1997 ; Brierley et Fryirs, 2005). La rivière est alors envisagée comme des milieux de vie (Amoros et Petts, 1993) et la meilleure compréhension du fonctionnement des hydrosystèmes permet d'orienter les actions vers une restauration durable des processus (Ward et al., 2001 ; Wohl et al., 2005 ; Kondolf et al., 2006 ; Simon, 2008 ; Dufour et Piégay, 2009 ; Beechie et al., 2010). Par ailleurs, en remettant en cause le principe de réversibilité des ajustements, la restauration écologique a redynamisé le concept de trajectoire temporelle (Dufour et Piégay, 2009). Ce dernier met en lumière le fait que les systèmes fluviaux sont le résultat d'une combinaison complexe d'usages et de pratiques tant à l'échelle du lit que du bassin versant (Lespez, 2013 ; Lespez et al., 2016). Ils évoluent en suivant une trajectoire donnée et propre à chaque contexte (Hughes et al., 2005; Brierley and Fryirs, 2005). Partant de ce principe, il devient donc essentiel de considérer la trajectoire historique et actuelle des rivières lors des projets de restauration pour identifier l'influence à la fois des conditions naturelles et des interventions humaines (Antrop, 2005; Brierley and Fryirs, 2005 ; Wohl, 2005; Lespez et al., 2006 ; Hoyle et al., 2008 ; Lespez et Germaine, 2016; Dufour et al., 2017).

Restoration, rehabilitation...	
River restoration is the process of recovery enhancement. Recovery enhancement should establish a return to an ecosystem which closely resembles unstressed surrounding areas	Gore (1985) cited by Brookes and Shields (1996)
A return 'from a disturbed or totally altered condition to a previously existing natural, or altered condition by some action of man,' but 'for restoration to occur it is not necessary that a system be returned to pristine condition'	Lewis (1990), cited by Henry and Amoros (1995)
The complete structural and functional return to a pre-disturbance state	Cairns (1991) cited by Brookes and Shields (1996)
Restoration is re-establishment of the structure and function of ecosystems.	NRC (1992) cited by FISRWG (1998)
Ecological restoration is the process of returning an ecosystem as closely as possible to pre-disturbance conditions and functions. It is therefore not possible to re-create a system exactly. The restoration process re-establishes the general structure, function and dynamic but self-sustaining behaviour of the ecosystem	
Restoration program should aim to create a system with a stable channel or a channel in dynamic equilibrium that supports a self sustaining and functionally diverse community assemblage	Osborne <i>et al.</i> (1993) cited by Brookes and Shields (1996)
Distinction between restoration and rehabilitation: the latter are suggested when 'thresholds of irreversibility' have been crossed in the course of ecosystem degradation, and when 'passive' restoration to a presumed pre-disturbance condition is deemed impossible	Aronson <i>et al.</i> (1993); Gore and Shields (1995)
Rehabilitation involves the recovery of ecosystem functions and processes in a degraded habitat. Rehabilitation does not necessarily re-establish the pre-disturbance condition	Dunster and Dunster (1996) cited by FISRWG (1998)
Restoration is an action to assist biotic and abiotic components or processes of an ecosystem to allow it to return to its state prior to the degrading actions	Bradshaw (1997)
Restoration is a planned process that aims to regain ecological integrity and enhance human well-being in deforested or degraded forest landscapes	WWF/IUCN (2000)
Assisting the recovery of ecological integrity in a degraded watershed system by re-establishing natural hydrologic, geomorphic and ecological processes, and replacing lost, damaged or compromised biological elements	Wohl <i>et al.</i> (2005)
Ecological restoration is the process of assisting the recovery of an ecosystem that has been degraded, damaged or destroyed to repair ecosystem processes, productivity and services, as well as re-establish the pre-existing biotic integrity in terms of species composition and community structure. Restoration thus consists in correcting multiple changes in various components of the ecosystem (also called rehabilitation by Aronson <i>et al.</i> , 1993)	SER (2004)
Associated notions	
Ecological engineering is 'the design of ecosystems for the benefit of humans as well as the natural environment'	Mitsch and Jørgensen (1989) in van Bohemen (2004)
The leitbild concept is a set of desirable stream properties regarding only the natural potential, not considering the economical and political aspects that influence the realization of the scheme. It is based on three elements: natural stream properties, irreversible changes of abiotic and biotic factors, aspects of cultural ecology	Kern (1992)
The so-called 'Leitbild' (i.e. a target vision) assumes a key role in river restoration and the assessment of ecological integrity in general. An 'ideal situation' is defined that relates to the natural potential of a given water course in the absence of economic or political constraints (pristine, undisturbed condition)	Jungwirth <i>et al.</i> (2002)
Environmental functions are 'the capacity of natural processes and components to provide goods and services that satisfy human needs (directly or indirectly). Human needs may be divided in two main categories: physiological needs (O ₂ , water, food, health) and the psychological needs (opportunities for cognitive and spiritual development, recreation, safe future for both present and future generations)'	De Groot (1992) cited by van Bohemen (2004)
Ecological integrity is perceived as the 'maintenance of all internal and external processes and attributes interacting with the environment in such a way that the biotic community corresponds to the natural state of the type-specific aquatic habitat, according to the principles of self-regulation, resilience and resistance'. The current deviations of ecological integrity is evaluated from undisturbed reference conditions	Angermeier and Karr (1994), cited in Jungwirth <i>et al.</i> (2002)
Ecological integrity: maintaining the diversity and quality of ecosystems, and enhancing their capacity to adapt to change and provide for the needs of future generations. Human well-being: ensuring that all people have a role in shaping decisions that affect their ability to meet their needs, safeguard their livelihoods and realize their full potential	WWF/IUCN (2000)
An environment is healthy when the supply of goods and services required by both human and non-human residents is sustained	Karr (1999) see also Norris and Thoms (1999) Bunn <i>et al.</i> (1999) Vugteveen <i>et al.</i> (2006)

Tableau 1.5 : L'évolution progressive de la définition de restauration/réhabilitation depuis l'émergence du concept dans la littérature scientifique (d'après Dufour et Piégay, 2009 et les références citées)

2.2. Trajectoire temporelle de dégradation et de restauration : durabilité des projets de restauration ?

Partant du constat de la nécessaire prise en compte de la trajectoire des cours d'eau, Dufour et Piégay (2009) ont proposé un modèle illustrant la complexité et le caractère non-linéaire de celle-ci (**Figure 1.14**). Les auteurs rappellent que la trajectoire temporelle est soumise à de multiples processus dynamiques, tant naturels qu'anthropiques, qui rendent continuellement fluctuant, voire temporaires, un certain nombre d'ajustement et de réponses de la biocénose. Se pose alors la question des objectifs réalistes et de la durabilité des projets de restauration. En effet, l'objectif principal des opérations de restauration de la continuité écologique est d'atténuer les perturbations anthropiques sur les milieux aquatiques ; ce qui en fait une action positive et nécessaire *a priori* (Rollet et al., 2013). Cependant, la réussite d'un projet de restauration durable repose sur la formulation d'objectifs de restauration réalistes fondés sur le diagnostic de « ce que nous pourrions avoir » (i.e. *quelles sont les possibilités de restauration compte-tenu de la trajectoire temporelle d'ajustement ?*), et de « ce que nous voulons » (i.e. *quels sont les besoins de la société à satisfaire et en quoi la restauration peut-elle y contribuer ?*) (Dufour et Piégay, 2009 ; Dufour et al., 2010).

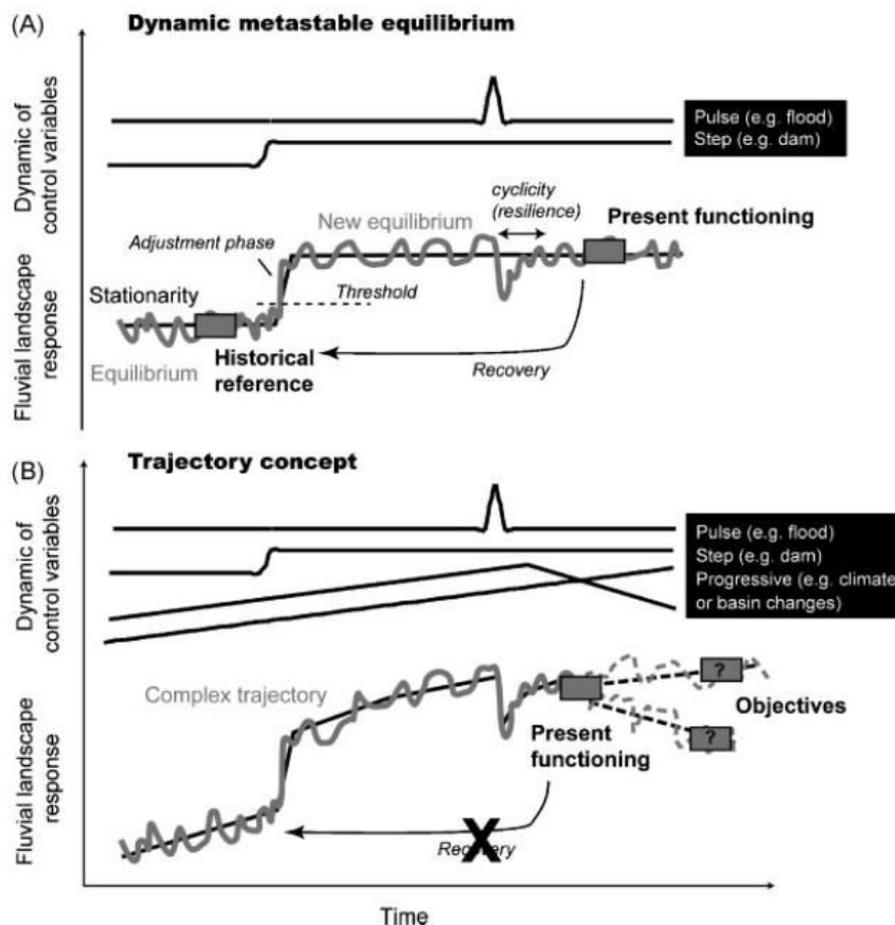


Figure 1.14 : Modèle conceptuel de la trajectoire temporelle proposé par Dufour et Piégay (2009).

En ce sens, ce diagnostic à établir implique une approche multifonctionnelle, multiscalaire et prenant idéalement en compte toutes les composantes caractéristiques de l'hydrosystème à restaurer, à savoir les flux, liquides ou solides, la structure du lit (Habersack et Piégay, 2008). On y ajoute une dimension trop souvent oublié qui est celle des usages et des pratiques à l'échelle du bassin versant. En effet, la durabilité fonctionnelle d'un projet de restauration nécessite la prise en compte de tous les niveaux hiérarchiques, de l'habitat au bassin versant (Gregory, 2008) et l'intégration d'échelles spatiales et temporelles emboîtées. Enfin, il est désormais acquis que la restauration écologique est par ailleurs soumis aux enjeux une acceptation sociétale et donc politique (Barraud et Germaine, 2017; Bouleau, 2017; Flaminio et al., 2015). La trajectoire temporelle et les projets de réhabilitation des cours d'eau sont une construction sociale, dépendante des interactions entre les processus sociaux et les processus biophysiques, ainsi que du rapport à la nature des gestionnaires et des usagers de la rivière (Le Calvez, 2017). La construction d'objectifs et d'opérations de restauration viables est à l'interface de ces quatre dimensions (Dufour et Piégay, 2009 ; Dufour et al., 2010 ; Arnaud, 2012) (**Figure 1.15**)

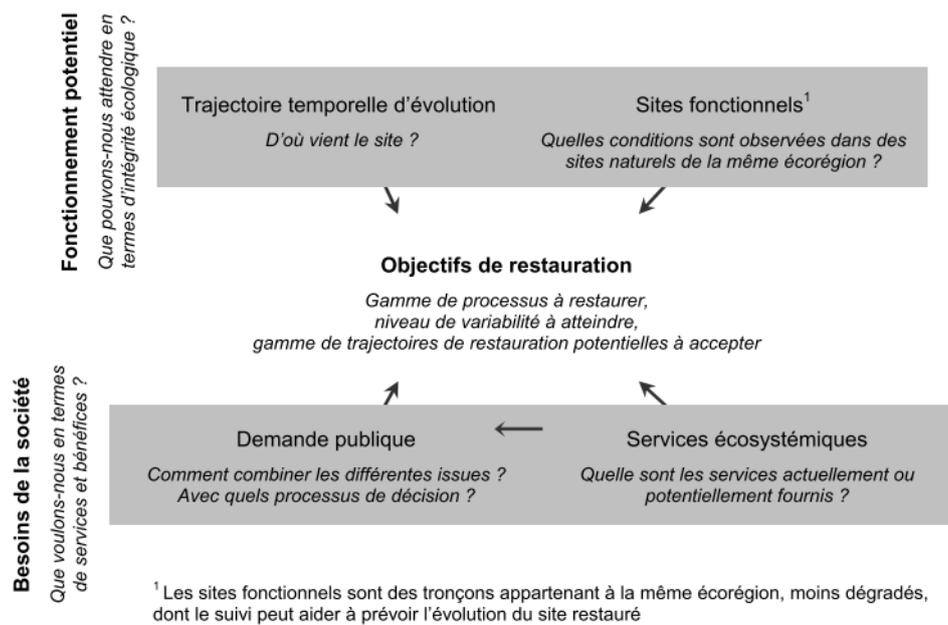


Figure 1.15 : cadre conceptuel pour la définition des objectifs durables de restauration (d'après Dufour et Piégay, 2009 ; Dufour et al., 2010 ; traduit et mis en forme par Arnaud, 2012)

Cette approche est confortée par la conception de la durabilité des projets de restauration, proposée par Woosley et al. (2005, 2007), qui repose sur l'évaluation des contraintes sociales, économiques et environnementales (**Figure 1.16**).

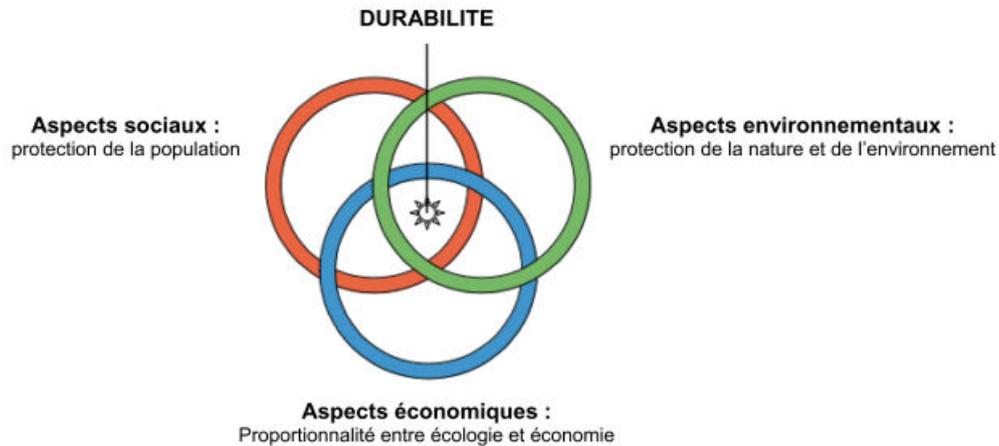


Figure 1.16 : Champs de contraintes de la durabilité (d'après Woosley et al., 2005 ; retranscrit et traduit par Arnaud, 2012)

Ainsi, la réussite d'un projet de restauration écologique nécessite une réflexion et une identification, en amont, des enjeux et des objectifs à fixer en fonction des différents paramètres emboîtés de fonctionnement de la rivière (paramètres internes et externes : hydro-sédimentaires, morphologiques, biologiques, sociaux, économiques, d'occupation du sol, climatique, géologique, ...). Il faut également accepter de mener des efforts sur le long terme et de ne pas toujours voir immédiatement les effets bénéfiques de tels projets. De la même manière que les cours d'eau se sont adaptés et ajustés aux modifications des débits liquides et solides par les activités humaines, il faut laisser le temps à la rivière de retrouver un nouvel équilibre dynamique car il y a un décalage temporel nécessaire entre une perturbation/une modification d'un système et sa réponse (Knighton, 1984 ; Downs et Gregory, 1995). C'est le principe de temps de réaction, suivi du temps de relaxation décrit par Brunson et Thorne, (1979), Knighton (1984) ou Downs et Gregory (1993), déjà présenté *supra* (**Figure 1.9**). Ce temps de réponse évolue selon la taille et le contexte de la rivière restaurée mais il est généralement considéré qu'il faut une bonne dizaine d'année à un cours d'eau pour retrouver un équilibre dynamique, tant du point de vue de l'hydromorphologie que de la biocénose.

D'autre part, l'un des principaux challenges pour la communauté scientifique est de prendre en considération le caractère artificiel des hydrosystèmes actuels et de l'intégrer à la gestion des cours d'eau. Alors même que l'objectif originel est de redonner au maximum un aspect considéré comme naturel à la rivière, il faut en réalité s'absoudre de cette volonté pour faire avec la dimension anthropique des processus dynamiques et des composantes de la rivière. Tout comme il n'existe pratiquement plus de forêts primaires sur la planète, très peu de cours d'eau n'ont échappé d'une façon ou d'une autre à l'influence des activités humaines (Messerli et al., 2000 ; Bravard et Magny, 2002 ; Hoffman et al., 2010 ; Houben et al., 2009).

Enfin, la durabilité d'un projet de restauration se mesure au potentiel de récupération (*recovery potential*, Brierley et Fryirs, 2005) de l'hydrosystème réhabilité. Or, la capacité du site restauré à améliorer les conditions écologiques est une tâche complexe car elle est fortement dépendante d'une multitude de facteurs naturels et anthropiques, actifs à des échelles spatiales et temporelle variées (Brierley et Fryirs, 2005 ; Doyle et al., 2005). Cependant, autant les trajectoires temporelles de dégradation (période d'altération des milieux aquatiques par les activités humaines avant restauration) sont de mieux en mieux connues, autant les trajectoires de restauration sont encore difficiles à prédire (Malavoi et Souchon, 2010). Certains auteurs ont, tout de même, cherché à établir des modèles d'évolution, malgré des outils de modélisation encore limités (Sarr, 2002 ; Doyle et al., 2005 ; Piégay et al., 2005 ; Kondolf et al., 2008 ; Perrow et al., 2008 ; Stewardson et Rutherford, 2008). La **Figure 1.17**, proposée par Doyle et al. (2005) illustre, par exemple, le cas de la trajectoire prédictive théorique de restauration à la suite de la suppression d'un barrage. Ce modèle montre le caractère complexe et extrêmement divers de cette trajectoire, tant pour le compartiment physique que biologique. Le rétablissement partiel ou total des fonctionnalités et de temps de réponse sont en effet multiples (Arnaud, 2012). Beaucoup s'accordent sur le fait que les trajectoires de restauration sont rarement symétriques aux trajectoires de dégradation à cause des variables naturelles et anthropiques déjà évoquées (Kondolf et al., 2006 ; Duarte et al., 2008 ; Palmer, 2009). Par ailleurs, les opérations de réhabilitation peinent à prendre en compte une pluralité d'enjeux et restent très sectorielles (Flaminio et al., 2015). Encore une fois, les retours d'expérience sont encore trop peu nombreux mais nécessaires et à multiplier.

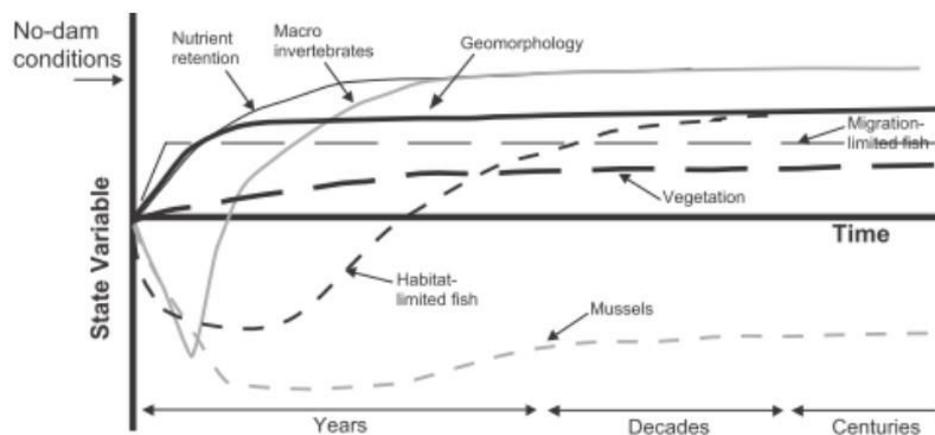


Figure 1.17 : Cadre conceptuel des trajectoires temporelles de restauration des compartiments physique et biologiques à la suite de l'effacement d'un ouvrage en travers (Doyle et al., 2005)

Chapitre 2. CADRE GÉOGRAPHIQUE ET HYDROMORPHOLOGIQUE
DE LA VALLÉE DE LA MÉRANTAISE

A. : Le contexte géologique et géomorphologique	p.80
B. : Le contexte hydro-climatique	p.89
C. : Un bassin versant périurbain : démographie, occupation du sol et contexte écologique	p. 96

Une petite vallée drainant les plateaux d'une marge urbaine

Pour une bonne compréhension des différents enjeux qui concernent notre zone d'étude, il est important d'en connaître le contexte géographique, géomorphologique, hydrologique, géologique, historique et enfin écologique.

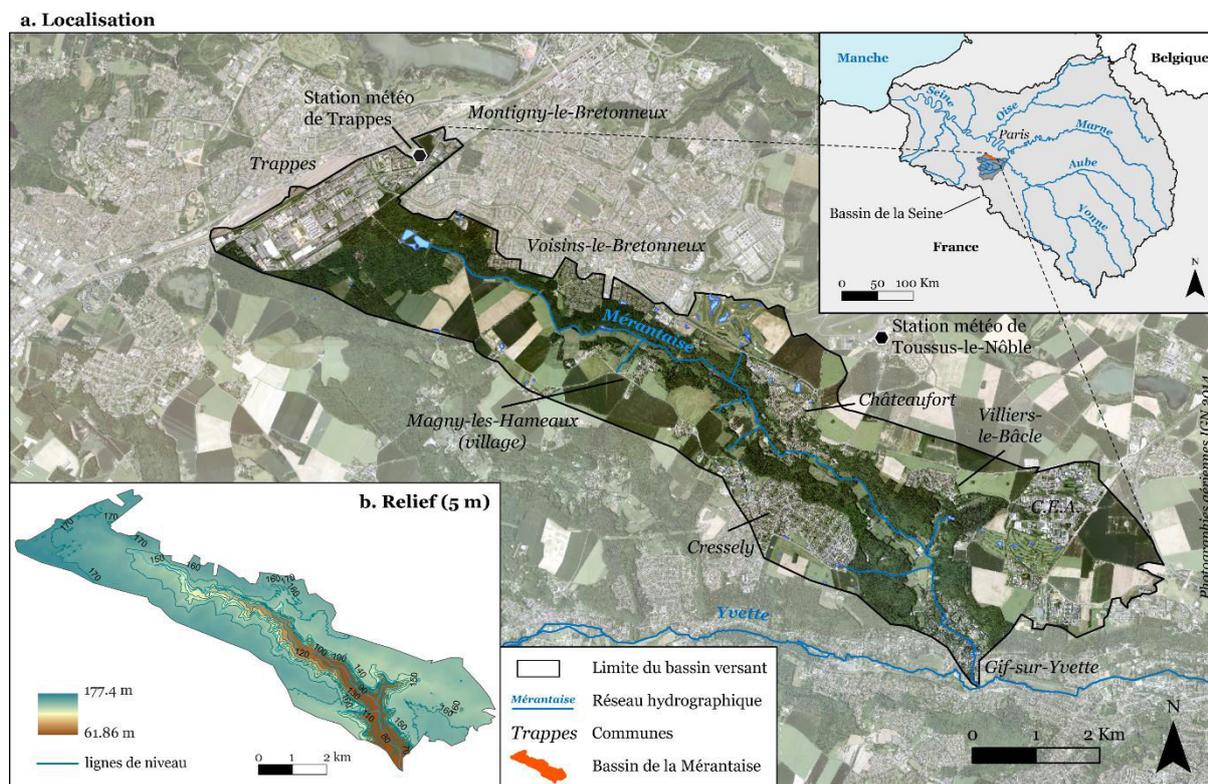


Figure 2.1 : Carte de localisation (a.) de la Mérantaise et du relief de son bassin versant (b.).

La Mérantaise est comprise dans le contexte, très prisé par les riverains et les promeneurs du dimanche, de la vallée de Chevreuse. Située dans le sud-ouest de l'Île-de-France, elle est le dernier affluent en rive gauche de l'Yvette¹² (Figure 2.1). De rang 2 (ordre de Strahler), la Mérantaise prend sa source de manière artificielle aux étangs du Manet, dans la commune de Voisins-le-Bretonneux (78) à environ 160 m d'altitude. Elle parcourt un peu plus de 13.5 km avant de se jeter dans l'Yvette à Gif-sur-Yvette (91), à une altitude de 60 m. La rivière est enterrée sur les 810 premiers mètres et ensuite rejoint l'air libre par deux buses de sortie au droit de Voisins-le-Bretonneux. De par sa position et la taille de son bassin versant, elle peut être considérée comme une rivière de tête de bassin (Lefebvre, 2015). La Mérantaise s'écoule dans une vallée relativement encaissée et dissymétrique, d'orientation sensiblement nord-ouest/sud-est. Son bassin versant est également de petite taille puisque sa superficie est estimée à 36 km². Il est caractérisé par la géologie sédimentaire du centre du bassin de Paris et par des limites

¹² L'Yvette est elle-même un affluent de l'Orge et sous-affluent de la Seine.

artificielles sur lesquelles nous reviendrons plus tard. L'une des raisons de ces limites de bassin versant et de cette source artificialisées est le contexte périurbain de la vallée, qui n'a cessé de se développer depuis la fin des années 1970. Enfin, la Mérantaise est l'un des hydrosystèmes compris dans le territoire du Parc Naturel Régional de la Haute Vallée de Chevreuse. De ce fait, la vallée est restée majoritairement rurale et les enjeux écologiques y sont importants, malgré de fortes pressions liées à l'urbanisation du territoire.

La morphologie et le fonctionnement hydrologique de la Mérantaise sont donc à la fois conditionnés par le cadre morphostructural du Bassin parisien et par l'historique de ses aménagements hydrauliques par les sociétés riveraines.

Plusieurs raisons ont motivé le choix du bassin de la Mérantaise comme terrain d'étude. La première est qu'il s'agit d'un secteur encore assez peu étudié, malgré quelques travaux préexistants essentiellement orientés vers la valeur écologique de la vallée ou bien réalisés par des bureaux d'étude dans le cadre de commandes institutionnelles (projet de restauration, diagnostic environnemental, ...) (Gaudin, 1963 ; Guibert et Maître, 1998 ; Mari, 1998 ; Martin-Dhermont, 2001 ; Azuelos, 2005 ; Valentin, 2011 ; Jugie, 2012 ; Arnal et Kovacs, non publié). Il s'agit pour beaucoup de littérature grise. De nombreux éléments historiques, hydrologiques et géomorphologiques restent encore à mettre en lumière.

D'autre part, la vallée de la Mérantaise est représentative de notre objet d'étude, à savoir les petits rivières périurbaines peu dynamiques. Son étude donne l'occasion de mieux connaître et appréhender la trajectoire évolutive d'un hydrosystème de faible énergie et de petit gabarit, dont le tracé et le fonctionnement hydrosédimentaire sont le résultat d'un aménagement hydraulique ancien et d'un contexte urbain récent et significatif sur son territoire.

Enfin, la Mérantaise fait l'objet de projets de restauration écologique par le PNR de la Haute Vallée de Chevreuse et du SIAHVY (gestion aval), dans le cadre des obligations de la DCE. Qu'elles aient été réalisées ou soient encore au stade prospectif, ces opérations de restauration de la continuité écologique nous permettent d'interroger ce concept au regard de la trajectoire qui définit et modèle la rivière.

Dans ce chapitre, nous présenterons le cadre naturel et anthropique dans lequel s'inscrit la vallée de la Mérantaise : le contexte morphostructural et hydrogéologique, les conditions hydro-climatiques et enfin l'état d'occupation du bassin, entre une anthropisation marquée du territoire et le maintien d'une faune et d'une flore plus ou moins préservées.

A. Le contexte géologique et géomorphologique

1. Une rivière inscrite dans les plateaux du centre du bassin parisien

La vallée de la Mérantaise s'inscrit au cœur du contexte morphostructural plus global du Bassin parisien. La géologie de ce dernier se caractérise par un empilement de formations sédimentaires en auréoles concentriques, s'étageant du début du Secondaire (Trias) au Tertiaire récent (Miocène) (**Figure 2.2**). Elles sont constituées par une succession de calcaires (souvent à meulière), de marnes et d'argiles, et de sables et de craies. Les marges du bassin parisien reposent sur un socle *ante*-triasique ancien et sont délimitées par le massif armoricain à l'ouest, le massif des Vosges à l'est et le bassin de la Loire au sud. Les plateaux du centre du bassin parisien sont, quant à eux, couverts de limons éoliens quaternaires qui constituent des terres de grandes cultures avec de vastes îlots forestiers. La morphologie du bassin parisien a évolué sous l'effet de la tectonique : de l'affaissement progressif de son centre au cours du Secondaire et du Tertiaire, au relèvement de l'ensemble et enfin à l'incision marquée des vallées dans les plateaux sédimentaires au Quaternaire.

L'ensemble du réseau hydrographique de la Seine traverse de part en part ces diverses formations géologiques en « pile d'assiettes », incisant de manière marquée les plateaux sédimentaires du Quaternaire. Les fonds de vallées de la Seine et ses affluents sont donc tapissés d'alluvions quaternaires plus ou moins anciennes, issues d'un système de terrasses étagées (Mégny, 1980).

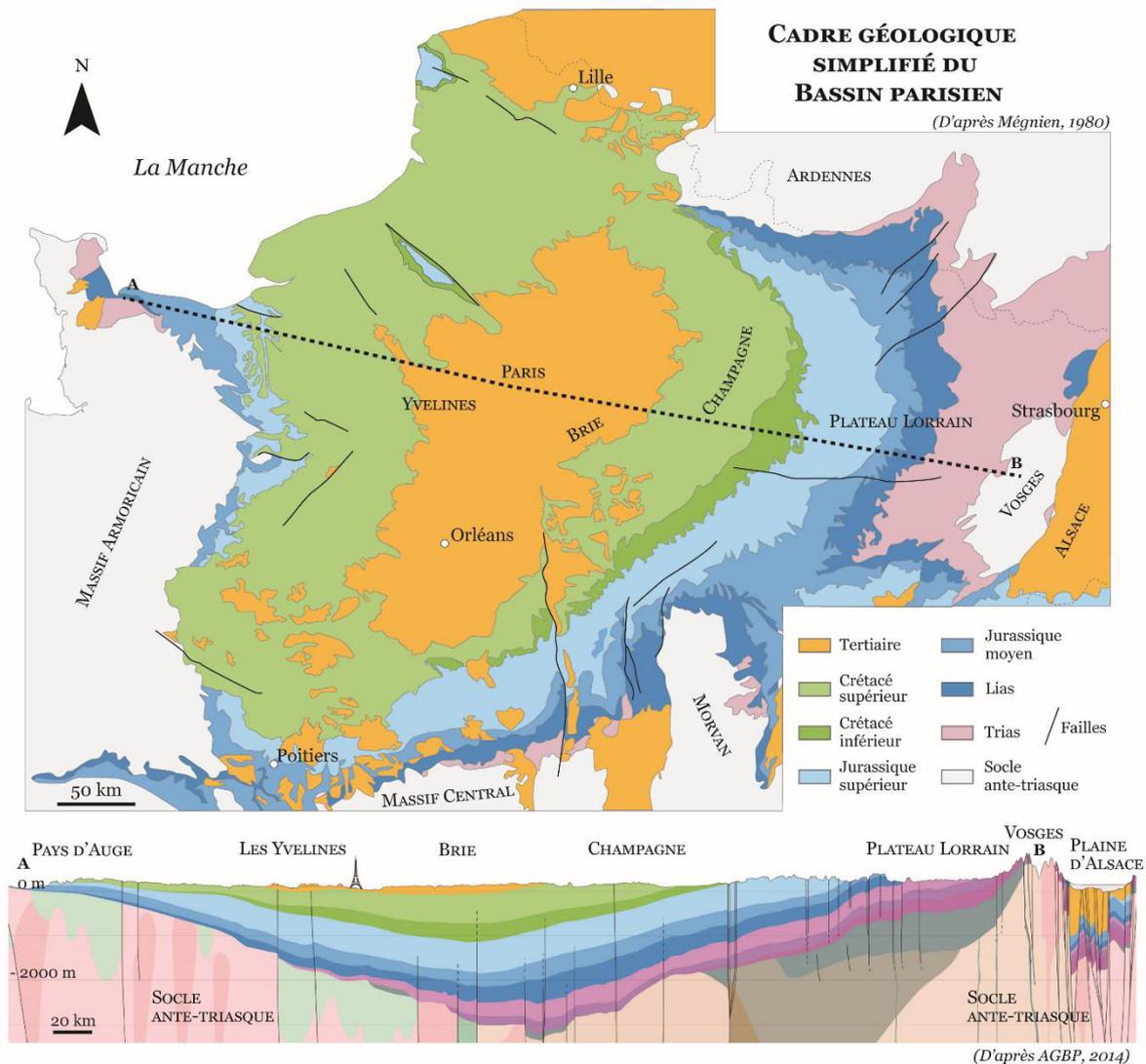


Figure 2.2 : Cadre géologique du Bassin parisien. Carte et coupe géologique. (d'après Mégnien, 1980 ; AGBP, 2014 ; modifiées)

2. Géologie locale du bassin versant de la Mérantaise

La vallée de la Mérantaise, quant à elle, entaille assez profondément les grands plateaux de Saclay et Trappes. Elle recoupe ainsi la couverture de limons quaternaires et la série stampienne (Oligocène) constituée de trois couches sédimentaires (**Figure 2.3**). (i) A la base, les **argiles vertes et supra-gypseuses** du Stampien (Marne verte de Romainville) affleurent dans le lit de la rivière et marquent la limite entre les versants et le fond de vallée dans sa partie aval. Ce niveau imperméable constitue un mur aquifère (Lefebvre, 2015). Dans le fond du lit, ces argiles constituent une assise compacte, assimilable à la roche mère (*bedrock*), et peu incisée depuis que ce niveau est atteint. Cependant, elles n'affleurent que rarement dans le fond de vallée car elles sont recouvertes de colluvions. (ii) Les versants sont principalement façonnés dans les **sables de Fontainebleau** sur une épaisseur de 65 à 70 m. Ils affleurent sur les versants et en fond de vallée dans la partie amont du bassin.

La présence de blocs de grès à l’affleurement, principalement au niveau des versants de Magny-les-Hameaux, constitue des bancs résistants, et localement des amas de blocs en bas de versant (Freytet et al., 1995). Ils correspondent à un rétrécissement local de la vallée. (iii) Les plateaux sont formés de dalles de **Calcaire d’Étampes** (Stampien). Ce niveau est relativement mince et largement meulièrement (**argiles à meulière** de Montmorency) (Thiry, 2012). Les argiles à meulière, relativement compactes, constituent l’armature du plateau en une assise résistante continue et imperméable.

Au-dessus de ces niveaux tertiaires et secondaires, la couverture continue des limons de plateau rassemble des dépôts de loess des dernières phases froide du Quaternaire. Dans ce secteur, elle est épaisse de 1 à 2 m (son épaisseur diminue du sud-ouest au nord-est). Les limons recouvrent des dépôts sporadiques de Sables de Lozère qui résultent de l’altération de matériaux granitiques apportés par la pré-Loire – pré-Seine au Miocène inférieur (BRGM, notice 218 ; Blanc, 1944). Ses propriétés de sol meuble et sa bonne capacité de réserve hydrique est propice à la grande culture. Mais ces matériaux fins sont exposés à l’érosion agricole. Sur les pentes des versants, les colluvions recouvrent les formations tertiaires, alimentées par les sables de Lozère, les limons de plateaux et les argiles à meulière.

Enfin, le fond de vallée est assez classiquement composé d’alluvions limono-argilo-sableuses, caractérisant ainsi la composition des berges de la Mérantaise. Par ailleurs, nos sondages ont localement révélé la présence de tourbe dans la plaine alluviale, proche du chenal.

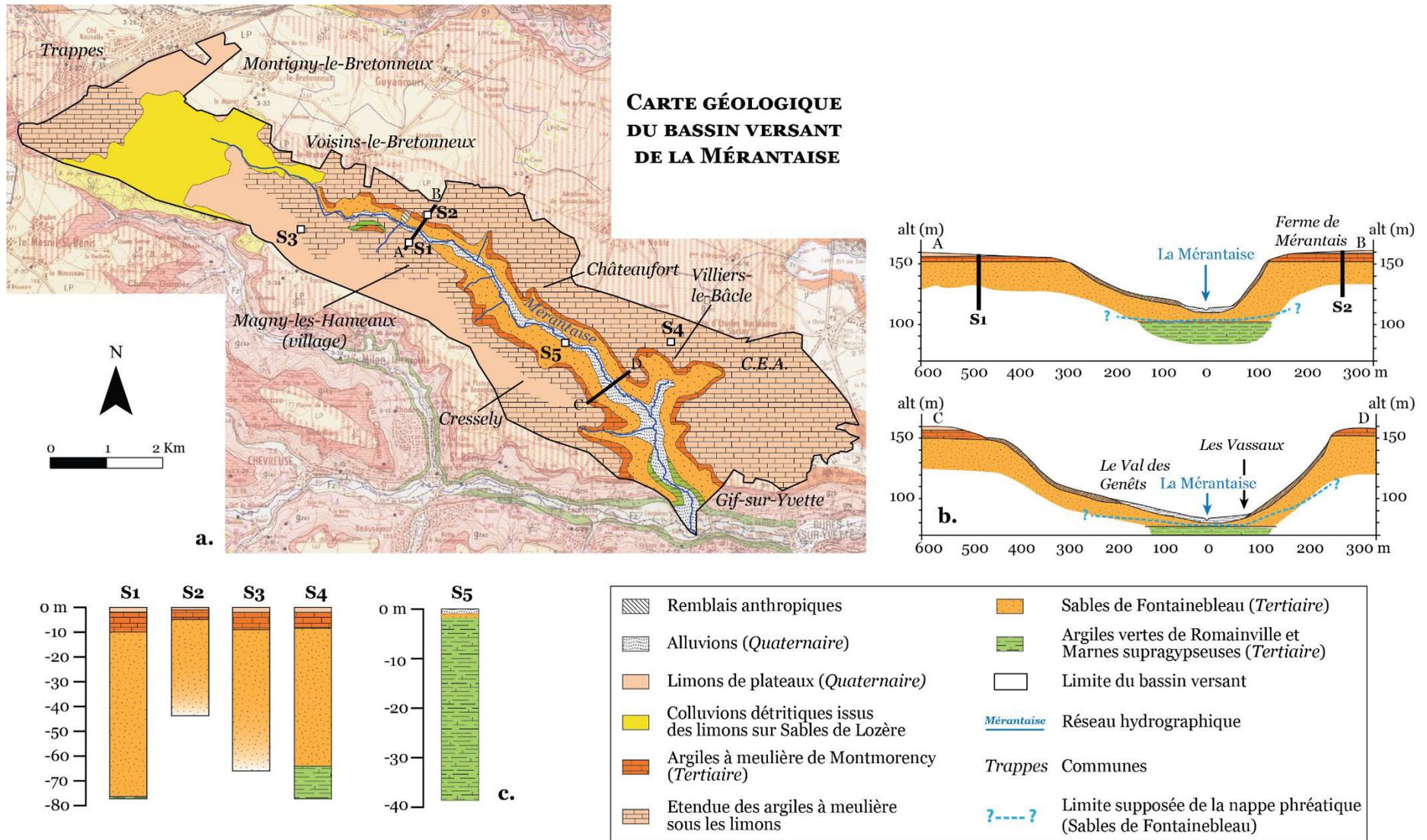


Figure 2.3: Géologie de la Mérantaise : (a.) carte géologique proposée à partir de la carte géologique au 1/50 000° du BRGM ; (b.) deux coupes géologiques de la vallée de la Mérantaise (d'après le SIAHUY, modifié) ; (c.) logs détaillant l'organisation en sous-sol de la géologie du bassin versant.

3. Morphométrie de la vallée de la Mérantaise

Le contexte géologique du bassin versant de la Mérantaise est responsable de la morphologie de la vallée. Celle-ci est notamment caractérisée par un encaissement fort dans les plateaux de Trappes et de Saclay, jusqu'à la confluence avec l'Yvette (**Figure 2.4**). Les pentes de la vallée présentent des dénivelés d'environ 30 m au niveau de Brouëssy, s'accroissent au niveau de Châteaufort (≈ 50 m de dénivelé), et atteignent plus de 80 m dans la partie aval de la vallée, un peu avant la confluence de la Mérantaise avec l'Yvette.

La vallée est relativement étroite de la tête de bassin à Châteaufort, avec des largeurs entre les sommets des versants comprises entre 300 m et 550 m. Elle s'élargit ensuite sensiblement dans les parties médiane et aval, avec des largeurs de vallée comprises entre 700 m et 850 m, pour atteindre de plus de 1000 m de large au niveau de Gif-sur-Yvette (**Figure 2.4**).

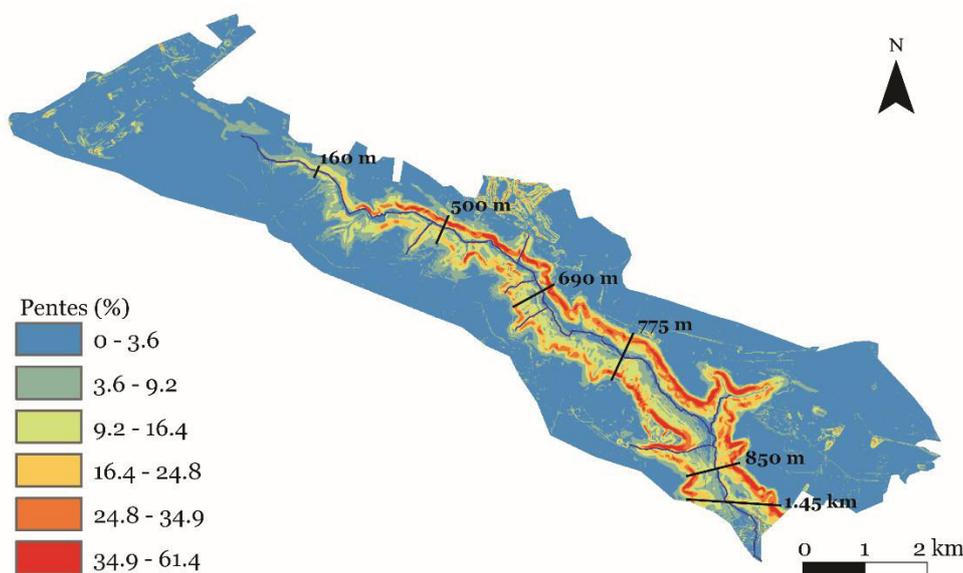


Figure 2.4 : Pentés et largeurs du lit selon les secteurs de la vallée (a.). Illustration de la dissymétrie des versants (b.).

D'autre part, les versants sont caractérisés par une dissymétrie topographique assez marquée (**Figure 2.4**). Le versant nord est caractérisé par une pente assez forte de 20% en moyenne, avec des pentes pouvant aller parfois jusqu'à plus de 30%. A l'inverse, la pente du versant sud est moins forte (environ 10%). Cette différence topographique entre les deux versants s'explique, dans un premier temps, par une dissymétrie héritée résultant probablement de mouvements de solifluxions lors des périodes froides quaternaires. Dans un second temps, elle s'explique par des dynamiques de versants différentielles, résultant à la fois de la pente, des formations superficielles, du couvert végétal mais aussi des pratiques sociales et agro-pastorales. Ce schéma de dissymétrie des versants est également observable sur l'Yvette et ces affluents, tous orientés sensiblement nord-ouest/sud-est (Robaglia, 2009).

Du fait de cette morphométrie ainsi identifiée, trois unités de site composent la vallée de la Mérantaise (**Figure 2.5.a**):

- 1) La vallée amont, au nord-ouest de Châteaufort est composée de coteaux boisés ou de prairies et d'un fond de vallée plutôt boisé. Cette partie de la vallée est directement dominée par la ville nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines.
- 2) La vallée « médiane » à l'est de Châteaufort est plus resserrée entre les coteaux boisés et le fond de vallée large d'environ 500 m et occupé par des prairies humides. Une partie de ces dernières sont aujourd'hui exploitées pour l'élevage de chevaux. Certains secteurs sont entretenus par le PNR de la Haute Vallée de Chevreuse grâce à la présence de quelques bovins (Highlands Cattle).
- 3) La vallée « aval » est plus large et étalée ; les coteaux et une partie du fond de vallée sont boisés. Ce secteur est idéal pour l'implantation d'activités hydrauliques comme le prouve la présence de nombreux hameaux et d'anciens moulins.

Par ailleurs, la Mérantaise présente une pente moyenne générale d'environ 0.7%¹³, ce qui représente un dénivelé déjà important pour ce type de rivière. La vallée relie, en effet, les plateaux de Trappes (160 m NGF) au fond de vallée de l'Yvette, à 60 m d'altitude. Cet encaissement, de l'ordre de 100 m et à commande aval, est déterminé par le niveau de base local de l'Yvette à la confluence avec la Mérantaise. Cependant, il est possible d'identifier des indices de pente variables selon les secteurs du linéaire (**Figure 2.5.b**). En effet, les pentes moyennes sont comprises entre 0.4% et 2.4% en fonction des tronçons considérés. Les pentes sont plus conséquentes dans les parties amont et médiane du linéaire et plus faibles, à l'exception du secteur du bassin de la Mérantaise à Gif-sur-Yvette (2.4 %).

¹³ La pente de la vallée a été déterminé sous ArcGis, grâce au MNT de résolution 5m (IGN)

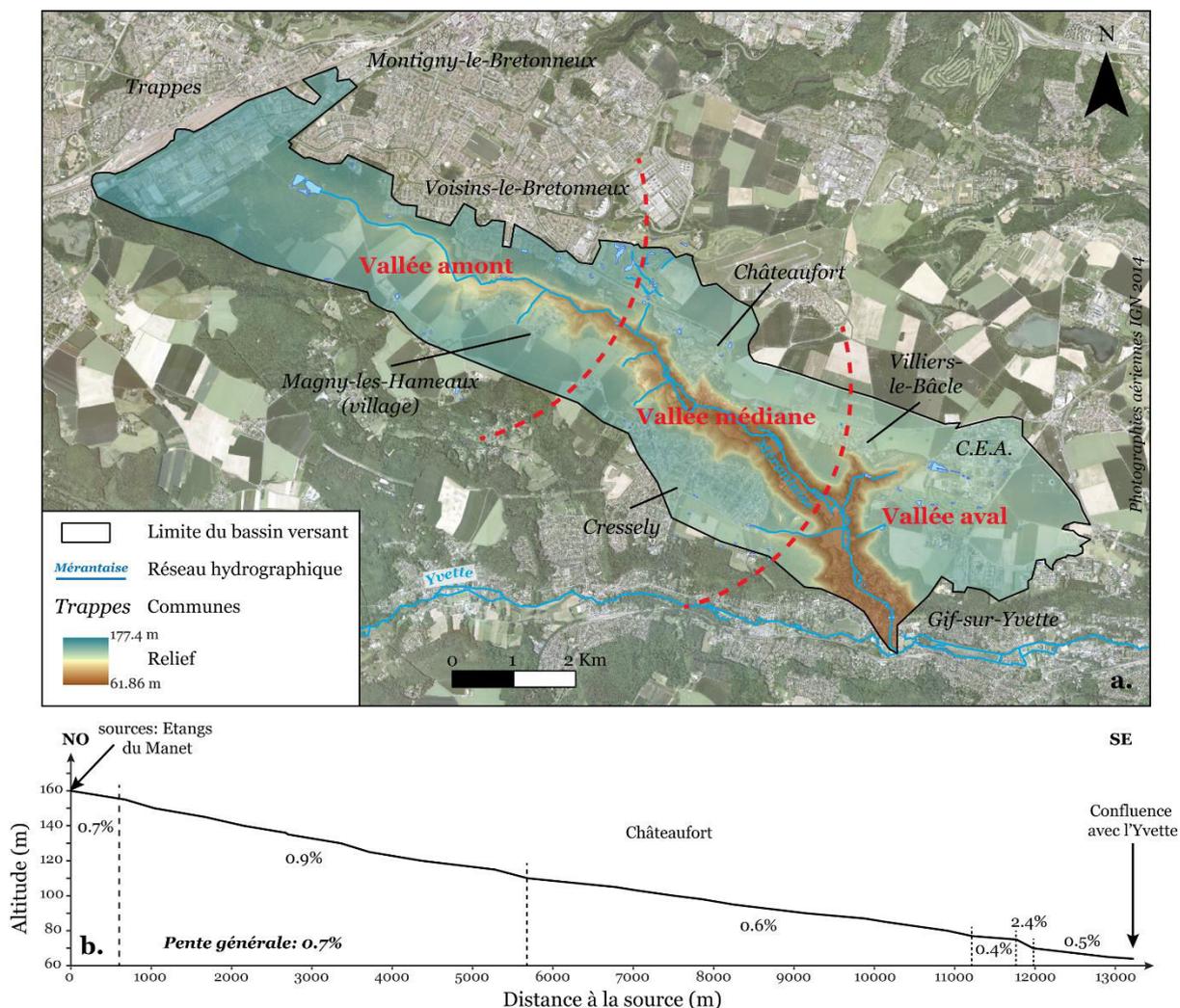


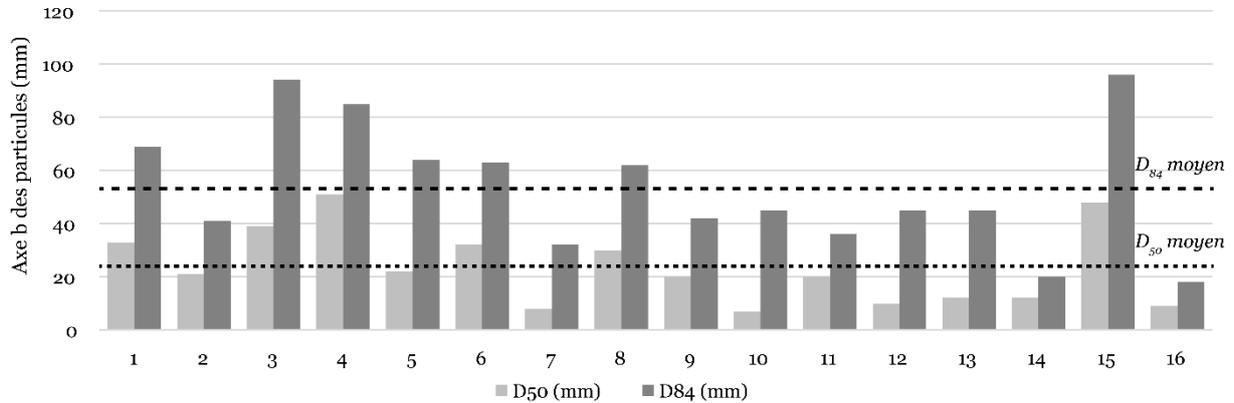
Figure 2.5 : Les trois unités morphométriques et paysagères composant la vallée de la Mérantaise (a.) et la pente générale de la rivière (b.).

4. Caractéristiques du substrat et de la charge sédimentaire disponible

La charge sédimentaire et le substratum de la Mérantaise sont directement conditionnés par la géologie locale et les dynamiques de versant du bassin. La charge sédimentaire disponible est essentiellement caractérisée par des sables et des graviers. Les sables (< 2 mm) constituent l'unique part de la charge solide transportée par le courant. Ils sont notamment alimentés par les apports de versants lors du ruissellement des eaux de pluie (ruissellements urbains et agricoles). Plusieurs tronçons ensablés ont été identifiés dans le lit de la Mérantaise, généralement au droit des buses (exutoires du réseau de drainage artificiel et fournisseur conséquent en fraction fines), dans les secteurs de faible pente (comme à Magny-les-Hameaux ou en amont de la Geneste) ou encore à la confluence avec l'Yvette.

La charge grossière est principalement composée d'éléments de taille modeste (D_{50} moyen : 23.38 mm ; D_{84} moyen : 53.56 mm ; **Figure 2.6**). Celle-ci est très peu, voire pas du tout, mobilisée par

le courant, et est vraisemblablement héritée d'une période ancienne, lorsque la rivière avait une capacité de transport effective.



Distance à la source des radiers prospectés
pour les relevés granulométriques

1: 3 280 m	5: 7 957 m	9: 8 760 m	13: 9 264 m
2: 5 243 m	6: 8 356 m	10: 9 026 m	14: 9 569 m
3: 7 860 m	7: 8 621 m	11: 9 099 m	15: 10 087 m
4: 7 910 m	8: 8 721 m	12: 91 134 m	16: 12 959 m

Figure 2.6: Caractéristiques granulométriques de la Mérantaise. Les valeurs ont été par détermination granulométrique sur radier (surface), suivant la méthode de prélèvement de Wolman (1954)

Quelques gros blocs jalonnent le cours de la Mérantaise par endroit. Les raisons de leur présence dans le lit mineur peuvent être multiples : ils sont peut-être également hérités d'une période ancienne pour laquelle les débits étaient suffisamment puissants pour les mobilisés ; ils ont été arrachés aux versants ; ou bien encore, ils ont été artificiellement injectés dans le chenal pour augmenter localement les débits et les remous (**Figure 2.7.a., b. et c.**). Cette dernière hypothèse repose notamment sur la connaissance de pratiques piscicoles et de gestion consistant à recréer des petits seuils artificiels et des zones de remous depuis de nombreuses générations. Ils peuvent également être issus de murets de protection de berges tombés en ruine et réutilisés comme blocs pour les seuils par les pêcheurs.

D'autre part, on observe à de nombreux endroits un affleurement du substratum, une argile très compacte, difficilement érodable par le courant (**Figure 2.7.d**). Cette argile est principalement visible dans la partie médiane du linéaire de la Mérantaise, entre Châteaufort et les Vassaux. Ce substrat, potentiellement identifiable comme la roche-mère du cours d'eau, est très lisse et ne permet pas le maintien de radiers de charges grossières. La charge de fond y a été totalement évacuée faute de rugosité pour la maintenir. Seuls quelques gros blocs s'y maintiennent par endroit.



Figure 2.7 : Exemple de substrat et de charge sédimentaire rencontrés dans le chenal de la Mérantaise. a. blocs, sur substratum argileux compact ; b. et c. blocs constitués artificiellement en seuil, issus d'un muret effondré (c.) ; d. argile très compact à l'affleurement ; e. charge solide composant l'essentiel des radiers du chenal, charge immobile ; f. ensablement à l'aval de la Mérantaise. (Crédits photo : M. Jugie)

Enfin, une partie de la charge sédimentaire en transit dans le lit de la Mérantaise, sous forme de matières en suspension (MES) (**Figure 2.7.f.**) est déstockée des berges. L'analyse de la composition des berges au niveau de 6 sites, répartis le long de tous le linéaire, fait apparaître une part importante des sables et des limons (entre 56 et 78% selon les sites), puis dans une moindre mesure des argiles (de 4 à 8%)¹⁴. Cette charge fine est directement héritée des sables de Fontainebleau, des plateaux limoneux et des argiles constituant la géologie du bassin de la Mérantaise. Elle est fournie à la rivière lors de l'érosion des berges.

B. Le contexte hydro-climatique

1. Le climat

De la même manière que pour la géologie, le contexte hydro-climatique de notre terrain d'étude est celui du Bassin parisien. Il est soumis à l'influence d'un climat océanique dégradé à nuances continentales. Les variations saisonnières des précipitations et des températures sont peu marquées et constantes (Joly et al., 2010). Le climat est caractérisé par des hivers doux à frais, avec une température moyenne de 3.6°C; et des étés assez chauds surtout aux mois de Juillet et Août, avec des températures moyenne de 18°C¹⁵. Les précipitations sont réparties de manière relativement égale toute l'année (**Figure 2.8**). Elles sont fréquentes et plutôt modérées. Les normales annuelles des précipitations cumulées, calculées sur les 30 dernières années (1981-2010), se situent au environ de 695 mm (mesurées à la station météorologique de Trappes) et les lames d'eau précipitées à l'échelle mensuelle évoluent de 50 mm pour le mois de février et de 68.8 pour le mois d'octobre. Il a été estimé qu'environ 75% des précipitations annuelles des plateaux de l'Yvette ont été évapotranspirées, ne laissant à la nappe qu'une faible recharge comprise entre 100 et 150 mm.an⁻¹ (Corcho Alvarado et al., 2007 ; Lefebvre, 2015). Le nombre moyen de jours de pluie (précipitations ≥ 1 mm) calculé à Trappes est de 118.5 jours par an. Pour des précipitations supérieures ou égales à 10 mm, le nombre moyen de jours de pluie est de 16. On compte ainsi 7 à 12 jours de pluie par mois (en théorie minimum en été et maximum en hiver)¹⁶. Au

¹⁴ Le détail de cette analyse de la composition des berges est disponible dans l'article Jugie et al (2018), intégré dans la chapitre 7 (Partie 2).

¹⁵ Valeurs relevées à la station météorologique de Trappes, au nord du secteur d'étude. Cependant, une partie des données de précipitations utilisées dans la thèse sont également issues de la station météorologique de l'aérodrome de Toussus-le-Noble. Des variations, à épisodes pluvieux identiques sont à signaler, posant la question des sources à prendre en compte.

¹⁶ Météo France – station de Trappes ; *Études techniques et environnementales. Rapport B11 volume 1 : diagnostique environnemental*, 2011-2012, étude commandée par Réseau ferré de France pour la ligne nouvelle Paris <>Normandie.

regard des observations faites durant les campagnes de terrain, de nombreux orages, parfois violents, ont pu avoir eu lieu l'été, de manière très localisée.

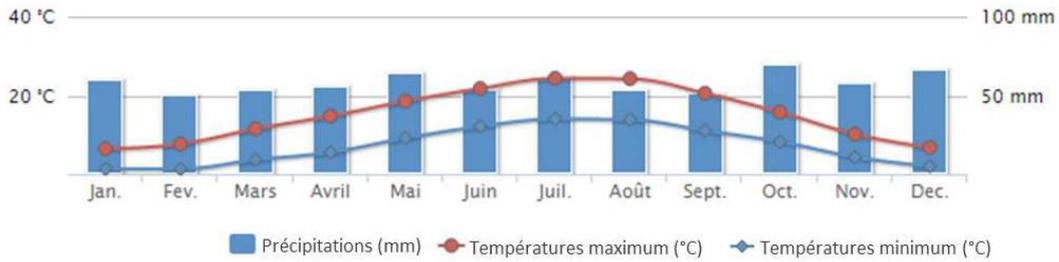
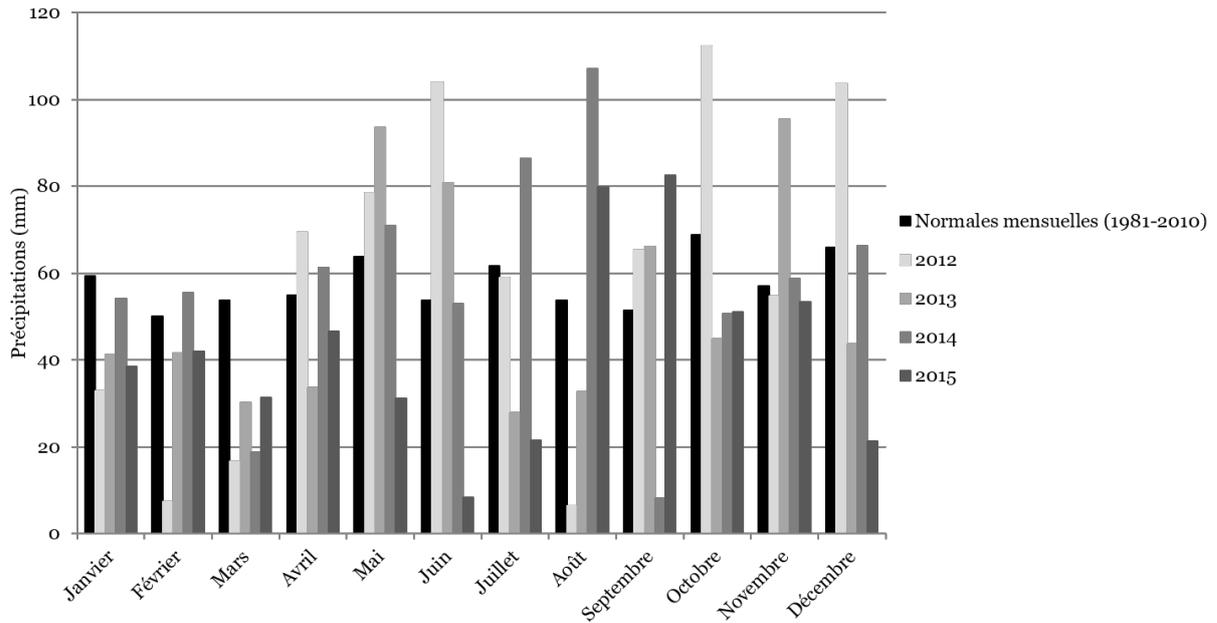


Figure 2.8 : Normales annuelles des précipitations et températures sur la période 1981-2010 (source : Station météorologique de Trappes, Météo France)

Les données météorologiques présentées ici sont issues des relevés de la station météorologique de Trappes, gérée par Météo-France et située à 1.5 km au nord de la tête de bassin de notre zone d'étude (les étangs du Manet). Cependant, une deuxième station météorologique, située à l'aérodrome de Toussus-le-Noble a également été exploitée (**Figure 2.1**). Localisée sur les plateaux de Saclay, au droit de la partie aval de la Mérantaise, les valeurs de précipitations qui y sont enregistrées quotidiennement apparaissent plus faibles qu'à la station météorologique de Trappes. Aussi, cette différence des conditions météorologiques aux deux stations peut-elle être liée au matériel de mesures ou aux mesures elles-mêmes, ou bien encore reflète-t-elle la réalité d'une disparité climatique locale. Quelles qu'en soient les raisons, une question se pose : les conditions hydro-climatiques extra-locales aux abords d'un petit bassin versant réactif peuvent-elles avoir des conséquences sur le fonctionnement hydrologique de celui-ci ? Nous tenterons d'y répondre dans la suite de la réflexion.

Par ailleurs, durant ce travail de thèse, les conditions climatiques ont été suivies de 2012 à 2015. La comparaison des données de pluviométrie entre les normales mensuelles et annuelles calculées sur les 30 dernières années (1981-2010) et celles des trois années suivies pendant la thèse fait apparaître à la fois une certaine cohérence dans les valeurs obtenues (cumul annuel des pluies) mais aussi une certaine disparité mensuelle entre les années (**Figure 2.9**).



	Normales 1981-2010	2012	2013	2014	2015
Somme (mm)	694.2	710	631.9	691	507.5
Maximum (mm)	68.8	112.3	95.5	107	82.5
Minimum (mm)	50	6.4	27.9	8.2	8.4

Figure 2.9 : Comparaison des valeurs de précipitation entre les normales des 30 dernières années (1981-2010) et des années de suivi durant la thèse.

Les moyennes établies sur 30 ans montrent une répartition des pluies assez homogène au cours de l'année. Cependant, les cumuls mensuels hivernaux traduisent la succession de pluies associées au régime dépressionnaire – à la fois régulières et sans forte intensité. En revanche, les moyennes estivales ne font pas apparaître les forts abats d'eau provoqués par les épisodes orageux, générateurs de crues rapides.

Au regard des données établies durant ce travail de recherche, l'année 2012 connaît un cumul de pluie (710 mm pour 695 mm), ainsi qu'un maximum mensuel de précipitation (112 mm en Octobre 2012) plus importants que la moyenne des normales sur la période 1981-2010). A l'inverse, l'année 2013 est une année moins pluvieuse. Cette réalité climatique s'est ressentie sur les mesures et observations de terrain effectuées principalement durant cette année 2013. Il faudra donc avoir un regard critique sur les données obtenues pour cette période-là. L'année 2014 a connu un cumul des pluies relativement conforme à celui mesuré durant les 30 dernières années, de même que pour les valeurs mensuelles. L'année 2015 a, quant à elle, été la moins pluvieuse de nos années de suivis. Les données de terrain pour cette période sont un peu moins nombreuses, mais il sera aussi nécessaire d'avoir en tête ce différentiel dans les valeurs climatiques obtenues avant des donner des conclusions trop hâtives.

2. Le régime hydrologique

Il n'existe malheureusement pas de station hydrologique renseignée par la DRIEE via la Banque Hydro sur la Mérantaise. En revanche, l'Yvette est équipée d'une station à Villebon-sur-Yvette, à environ 7.5 km à l'aval de la confluence de la Mérantaise avec l'Yvette, et drainant alors un bassin versant de 224 km². Ainsi, le régime hydrologique de l'Yvette et de ses affluents, directement influencé par le climat océanique dégradé, est de type pluvio-évaporal (Lefebvre, 2015) (**Figure 2.10**). Les périodes de hautes eaux surviennent en hiver, entre décembre et mars, et principalement en février. Les niveaux d'étiage sont essentiellement atteints à la fin de l'été, entre août et septembre.

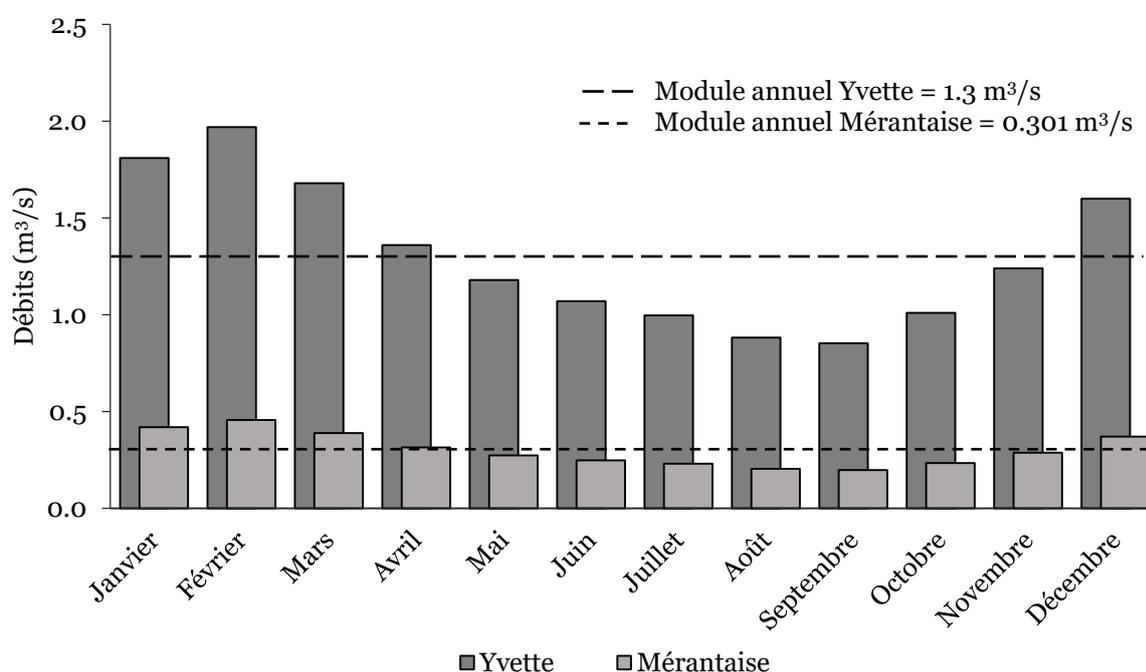


Figure 2.10 : Débits mensuels de l'Yvette à la station à Villebon-sur-Yvette (1968-2017) et ceux estimés de la Mérantaise pour la même période (sources : Banque Hydro. Station H4243010)

Les données disponibles sur la Banque Hydro (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>) à Villebon-sur-Yvette permettent également d'estimer le régime hydrologique de la Mérantaise (**Figure 2.10**), considérant que les affluents à forte pente de l'Yvette devaient avoir un fonctionnement hydrologique similaire. Les débits de la Mérantaise ont ainsi été estimés grâce à la formule proposée par Bravard et Petit (2000), permettant comparer deux bassins proches de dimensions différentes :

$$q = Q \left(\frac{a}{A} \right)^{0.8}$$

où q est le débit recherché, Q est le débit connu à la station de référence, A la superficie du bassin versant de la station (km²) et a la superficie du bassin versant étudié pour lequel on recherche le débit.

Avec un ratio de 1 à 10 par rapport à celui l'Yvette, le module annuel de la Mérantaise est de $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$. Les débits moyens mensuels les plus importants ont été enregistrés en février avec $0.456 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la période 1968-2017, tandis que les débits d'étiage ont lieu en septembre ($0.198 \text{ m}^3/\text{s}$). Cependant, des épisodes orageux estivaux peuvent également être responsables de crues plus ou moins fortes entre mai et septembre. Le détail du fonctionnement hydrologique de la Mérantaise sera développé ultérieurement (Partie 3).

La Mérantaise est une rivière qui déborde rarement car les débits y sont assez faibles et les berges généralement trop hautes. Malgré ces conditions hydromorphologiques, la rivière peut être sujette aux inondations en cas de fortes précipitations. Les fonds de vallée ont notamment subi des inondations significatives en 1973, 1978, 1981 et 2007 (*Étude du bassin de la Mérantaise*, 2008-2010) (**Figure 2.11**). Cinq arrêtés interministériels de catastrophe naturelle liés à des crues ont été publiés au cours des 15 dernières années (*Mensuel municipal de Gif-sur-Yvette – Septembre 2013*, n°390). L'un des derniers épisodes d'inondation particulièrement marquant pour la vallée fut celui d'avril 2007. En effet, un orage survenu le 29 avril 2007 a occasionné l'inondation de nombreuses habitations en divers lieux du bassin versant ainsi qu'un important ravinement des versants. Les secteurs concernés furent principalement la partie aval de la vallée, soit les trois communes de Châteaufort, Villiers-le-Bâcle et Gif-sur-Yvette.

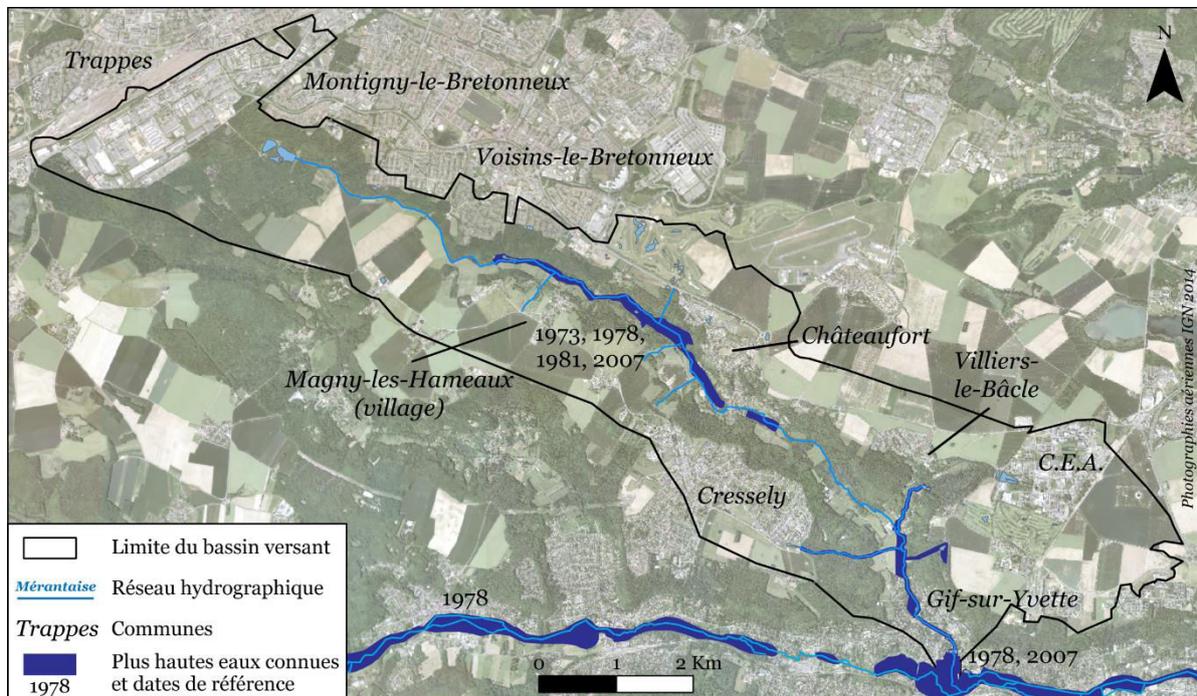


Figure 2.11 : Cartographie des plus hautes eaux connues suite à une série d'inondations dans la vallée de l'Yvette et de la Mérantaise (sources : DRIEE, 2011 ; *Étude hydrologique et hydraulique du bassin de la Mérantaise*, 2010)

3. La réponse hydrogéologique du bassin versant de la Mérantaise

Le fonctionnement hydrogéologique de la Mérantaise, en réponse au contexte climatogéologique local, est partiellement connu grâce à la thèse de Karine Lefebvre (2015) sur la distribution et la dynamique des flux nappe-rivière de la vallée de l'Yvette amont (202 km² de bassin drainé) et de ses affluents. Son travail de recherche a notamment mis en évidence qu'environ 2/3 des écoulements de l'Yvette et de ses affluents sont issus de la nappe d'eau souterraine tandis que le tiers restant est imputable aux stations d'épuration (STEP) ou aux étangs. Ces derniers assurent alors la fonction de source sur un certain nombre de cours d'eau de tête de bassin. La nappe souterraine qui contrôle les écoulements de la vallée de l'Yvette et de ses affluents est comprise dans les Sables de Fontainebleau (**Figure 2.3.b.**). Elle évolue entre 90 et 150 m NGF, suivant des gradients qui respectent la topographie locale (plus importants dans les versants que sur les plateaux ou les fonds de vallée). Les marnes vertes de Romainville en forment le mur.

D'un point de vue hydrodynamique, le contexte géomorphologique homogène du territoire de la Vallée de Chevreuse assure une dynamique globalement similaire entre les différentes rivières du réseau hydrographique, avec des épisodes de crues très courts (de l'ordre de quelques heures) et des épisodes d'étiages marqués, quelle que soit la saison.

Aussi, dans le cas de la Mérantaise, le réseau hydrographique est semble-t-il soutenu par la nappe pour les 2/3 aval du chenal, entre Magny-les-Hameaux (village) et la confluence avec l'Yvette (**Figure 2.12**). A l'inverse, la partie amont est, quant à elle, alimentée par les étangs du Manet qui lui assurent alors un écoulement pérenne, de manière artificielle. Cette disparité dans l'alimentation du cours d'eau par la nappe et le déficit hydrique à l'amont s'expliquerait par la répartition en sous-sol des infiltrations des eaux de pluie dans la nappe de Fontainebleau. En effet, l'étude de la carte piézométrique de ce niveau aquifère (Rampon, 1965 ; d'après Corcho Alvarado et al., 2007) montre qu'une partie des précipitations tombant sur l'amont du bassin s'infiltrer jusqu'à la nappe des Sables de Fontainebleau et va se décharger au niveau du bassin du Rhodon au détriment de la Mérantaise (**Figure 2.13**). Ce déficit hydrique de l'amont du bassin est également mentionné dans les archives historiques. Les monographies des communes de Magny-les-Hameaux¹⁷ et de Trappes¹⁸ mentionnent un manque d'eau sur les plateaux et la nécessité pour les agriculteurs de creuser des mares artificielles, profitant du niveau aquifère formé localement par la présence des argiles à meulière imperméables.

¹⁷ 1T mono 8/5 (ADY)

¹⁸ 1T mono 12/6 (ADY)

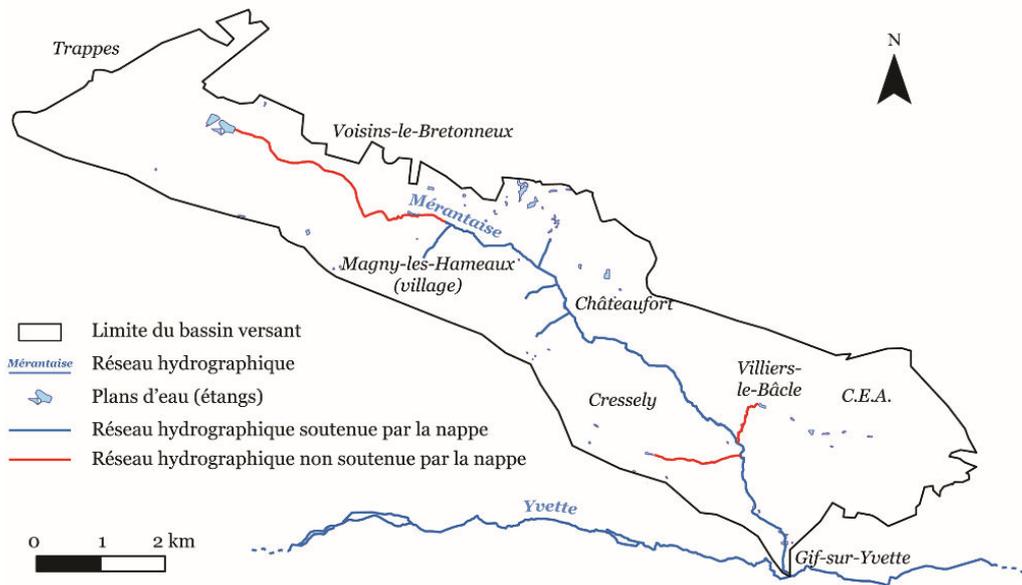


Figure 2.12 : Section de la Mérantaise alimentée ou non par la nappe des Sables de Fontainebleau (données d'après Lefebvre, 2015 ; modifié)

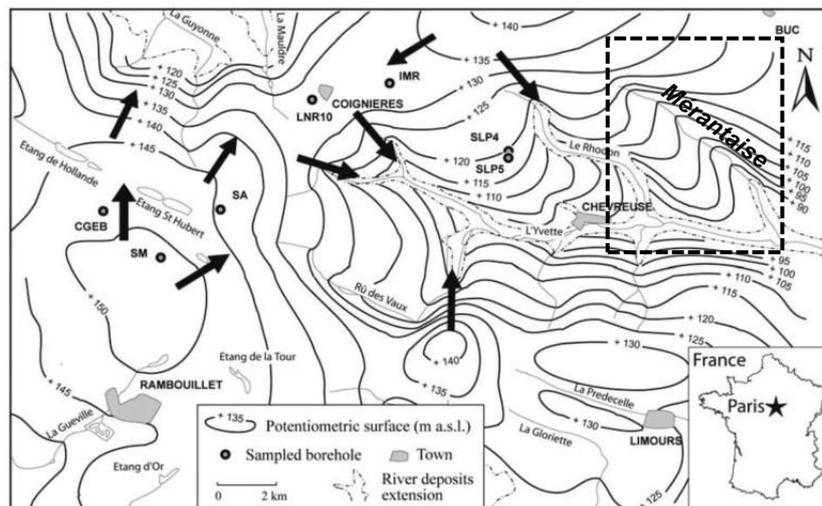


Figure 2.13 : Carte piézométrique de l'aquifère Oligocène contenue dans les Sables de Fontainebleau et écoulements régionaux présumés, modifiée à partir de celle de Rampon, 1965 (Corcho Alvarado et al., 2007, modifié). En encadré, le secteur de la Mérantaise pour lequel on observe l'absence d'écoulement vers la rivière de la nappe des Sables de Fontainebleau.

C. Un bassin versant périurbain : démographie, occupation du sol et contexte écologique

1. Démographie, une augmentation rapide et récente

Le bassin versant de la Mérantaise compte huit communes urbaines sur son territoire : Trappes, Montigny-le-Bretonneux, Voisins-le-Bretonneux, Magny-les-Hameaux (appartenant, toutes trois, à la communauté d'agglomération de Saint Quentin-en-Yvelines), Châteaufort, Villiers-le-Bâcle, Saint-Aubin et Gif-sur-Yvette (**Figure 2.1**). Trappes, Montigny-le-Bretonneux, Voisins-le-Bretonneux, Magny-les-Hameaux et Gif-sur-Yvette ne sont comprises que partiellement dans le périmètre du bassin versant de la Mérantaise. À titre d'exemple, seule la zone d'activité de Trappes-Élancourt (3.8 km²) y est drainée. Par ailleurs, le Centre d'Études Nucléaires (CEA) de Saclay, construit en 1945, est également présent sur le territoire. Ces deux secteurs ne sont pas à proprement parler des zones d'habitations, mais ce sont des surfaces fortement imperméabilisées (bâtiments et voirie) et donc productrices de ruissellement urbain.

Du point de vue démographique, la population du bassin versant de la Mérantaise a connu une augmentation spectaculaire dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle (**Figure 2.14** et **Tableau 2.1**). Avant les années 1960-1970, la population des communes du bassin versant était relativement stable depuis le XIX^{ème} siècle, et ce probablement pour les siècles antérieurs. Avec moins de 700 habitants par commune comprise dans le bassin versant jusqu'à la fin des années 1950, la vallée de la Mérantaise restait peu peuplée et essentiellement rurale.

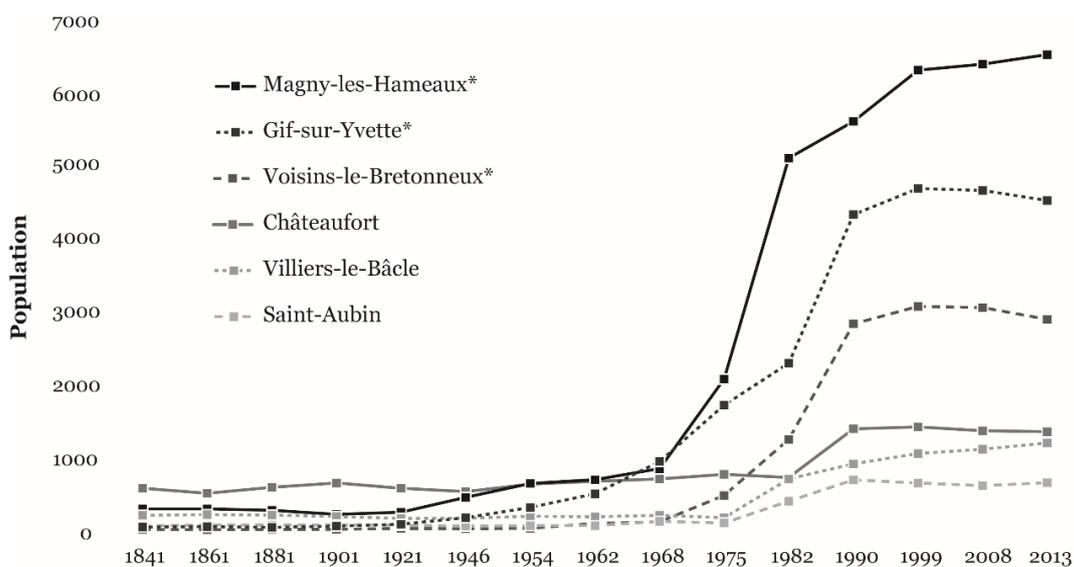


Figure 2.14 : Évolutions de la population des communes du bassin versant de la Mérantaise entre 1841 et 2013. (Sources : données *ante-1968* : LdH/EHESS/Cassini, monographies communales ADY ; données *post-1968* : INSEE, 2017). (*Populations calculées au *pro rata* de la superficie des communes comprises dans le bassin versant)

	Bassin de la Mérantaise	Yvelines (78)	Essonne (91)	St-Quentin- en-Yvelines	France
Recensement					
1968	3 222	854 382	673 325	24 866	49 723 072
1975	5 562	1 082 255	923 063	49 777	52 600 000
1990	15 878	1 307 150	1 084 824	128 663	56 577 000
2013	17 244	1 418 484	1 253 931	227 137	63 697 865
Croissance					
1968-1975	+72.6 %	+26.7 %	+37.1 %	+100.2 %	+5.8 %
1975-1990	+185.5 %	+20.8 %	+17.5 %	+158.5 %	+7.6 %
1990-2013	+8.6 %	+8.5 %	+15.6 %	+ 76.5 %	+12.6 %

Tableau 2.1 : Évolutions démographiques comparatives du bassin de la Mérantaise, des Yvelines, de l'Essonne, de la Ville-Nouvelle de St-Quentin-en-Yvelines et de la France (métropolitaine), entre 1968 et 2013 (sources : INSEE, 2017)

Les années 1960 marquent, en revanche, un tournant en termes de croissance démographique et d'occupation du territoire. Alors que ces changements restent plus mesurés à l'échelle nationale (croissance de + 5.8% entre 1968 et 1975), ils sont significatifs en région parisienne et en particulier au niveau des centres urbains alors en pleine expansion (+100.2% entre 1968 et 1975 à Saint-Quentin-en-Yvelines) (**Tableau 2.1**). Dans le cas de notre terrain d'étude, ces évolutions se sont renforcées à partir des années 1975-1990, époque de l'implantation de la Ville-Nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines, construite pour désengorger Paris et sa banlieue proche (cf. *paragraphe suivant, 2.*). Comme l'illustre le **Tableau 2.1**, la population des communes de la vallée de la Mérantaise a augmenté de +185.5%, passant de 5 562 habitants en 1975 à 15 878 habitants en 1990. Cette évolution a lieu sous l'impulsion de la construction de Saint-Quentin-en-Yvelines qui a, elle, connu un accroissement de 158.5% de sa population urbaine. À l'échelle de chaque commune, ce sont d'ailleurs essentiellement les villes intégrées à Saint-Quentin-en-Yvelines qui connaissent la plus forte augmentation de population (**Figure 2.14**). La population du bassin de la Mérantaise a désormais tendance à se stabiliser avec une croissance inférieure à 10%.

Ces évolutions démographiques ont également été observées dans d'autres agglomérations françaises, comme à Lyon, autour de laquelle a aussi été implantée une Ville-Nouvelle, L'Isle-d'Abeau. Après une très forte augmentation de la population des communes les plus proches du centre de l'agglomération lyonnaise à partir des années 60 (+183% entre 1962 et 1975), l'actuelle couronne périurbaine, plus en périphérie, a connu une croissance de +426% entre 1975 et 1989 (Grosprêtre, 2011).

2. D'une vallée rurale à un contexte périurbain

Ce contexte démographique se comprend au regard de l'évolution récente du mode d'occupation du sol dans le bassin versant de la Mérantaise. Ses paysages ont progressivement perdu leurs dynamiques rurales et agricoles pour des espaces de plus en plus urbanisés (**Figure 2.16**). La vallée de Chevreuse se trouvant à proximité de Paris, elle participe du développement massif et rapide de l'urbanisation du territoire francilien, initiée dès les années 1960 par les politiques de planification urbaine menées par les services de l'État. Le mode d'occupation du bassin versant de la Mérantaise se retrouve ainsi significativement modifié par le phénomène de périurbanisation¹⁹.

En effet, pour faire face à un accroissement démographique important, d'une part, et à l'arrivée massive de populations abandonnant les campagnes au profit des centres urbains comme Paris (Mendras, 1967), d'autre part, les politiques décident de la mise en place des Villes-Nouvelles. Neufs sites ont été choisis en France, dont cinq en Île-de-France. En région parisienne, Paul Delouvrier, l'un des artisans du remodelage du territoire français pendant les « Trente Glorieuses » et délégué général au District de la Région de Paris de 1961 à 1969, reçut directement du Président de Gaulle l'autorité de « mettre de l'ordre dans ce désordre » (la formule employée par de Gaulle à l'époque n'était semble-t-il pas aussi neutre). Cette politique des Villes-Nouvelles a contribué à la sortie de terre, pratiquement ex-nihilo, de centres urbains très importants s'étendant sur plusieurs centaines de km².

Décidée dès 1965, la Ville-Nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines (78) voit le jour au début des années 1970, mais connaît un pic de construction à partir des années 1980-1990 (**Figure 2.15**). Quatre communes de Saint-Quentin-en-Yvelines se trouvent sur le territoire du bassin versant de la Mérantaise : Trappes (sa zone d'activité), Montigny-le-Bretonneux, Voisins-le-Bretonneux et Magny-les-Hameaux, toutes situées en tête de bassin et sur les plateaux (**Figure 2.1**). C'est à partir du développement de la Ville-Nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines que ce territoire a gagné son caractère périurbain. Cependant, les autres communes du bassin versant (Châteaufort, Villiers-le-Bâcle, Saint-Aubin et Gif-sur-Yvette) ont également bénéficié de cette dynamique. C'est ainsi près d'un quart du territoire qui est aujourd'hui urbain.

¹⁹ La *périurbanisation* est définie comme « le mode de développement périphérique des agglomérations, [qui] grignote peu à peu l'espace rural (mitage) en s'appuyant sur les noyaux habités préexistants (villages, bourgs) et sur les grands axes de communication qui la relie aux espaces urbains initiaux » (sources : <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/périurbanisation>, consulté le 20/10/2017)

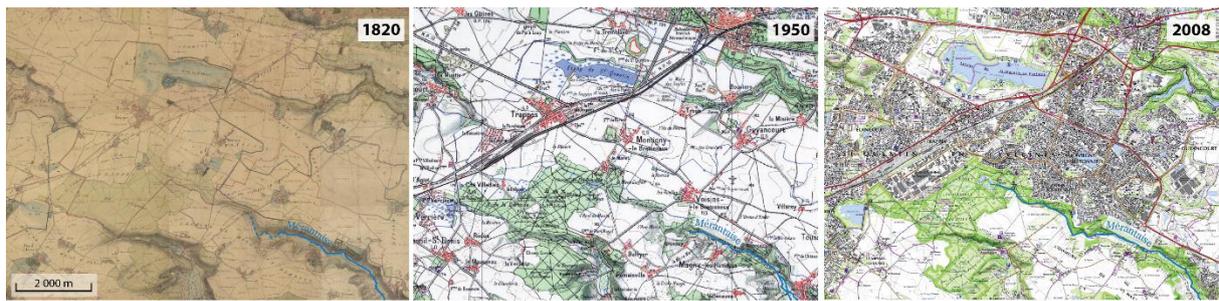


Figure 2.15 : Illustration par une comparaison diachronique de cartes anciennes du développement massif et rapide de l'urbanisation en tête de bassin de la Mérentaise. Construction effective de la Ville-Nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines à partir des années 1980. (Sources : IGN)

Parallèlement, la surface agricole représente 30% du bassin (**Tableau 2.2**). Elle est concentrée sur les plateaux, et fonctionne désormais sur un modèle intensif, à l'image des plateaux de Saclay (Meybeck et al., 1998 ; Bouraoui, 2000). Les prairies et les zones humides concernent moins de 20% du territoire et ont été progressivement absorbées par l'urbanisation de la zone d'activité de Trappes et des communes de Magny-les-Hameaux. Enfin, les surfaces boisées couvrent 28% du bassin, principalement dans le fond de vallée et sur les versants. Aussi, cette part importante des espaces agricoles et forestiers montre que le bassin versant de la Mérentaise a conservé son caractère rural sur une partie significative de son territoire.

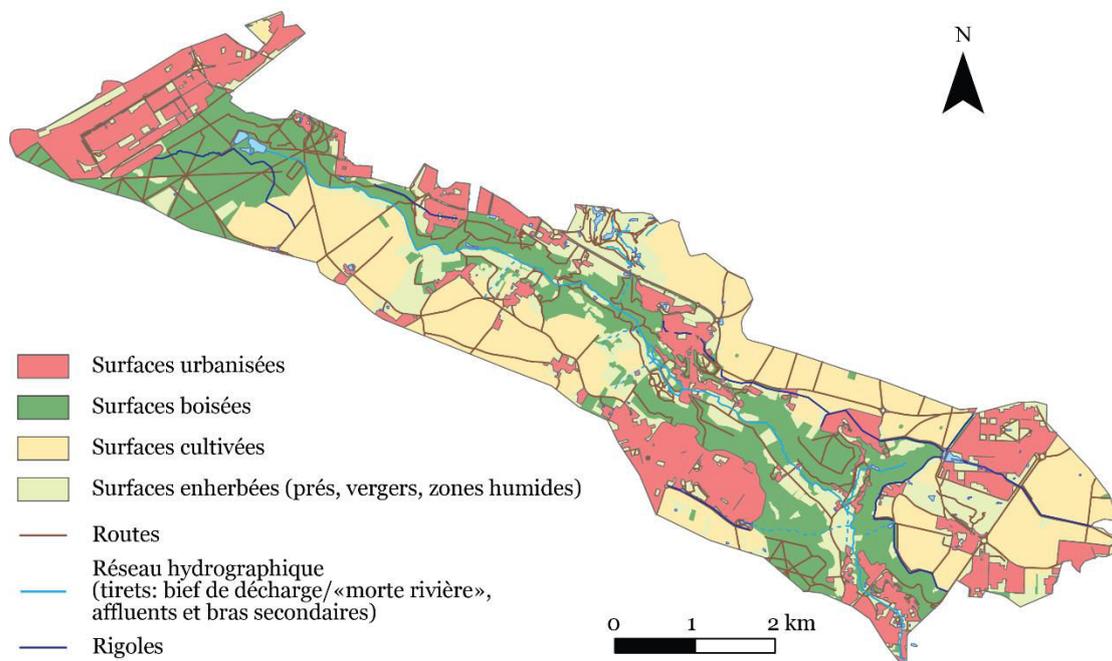


Figure 2.16 : Mode d'occupation du sol actuel dans le bassin versant de la Mérentaise. État en 2014 (source : photographies aériennes IGN 2014. Digitalisation D. Fekih, 2015, modifiée)

Surfaces urbanisées	8.25 km ²	23 %
Surfaces boisées	10.12 km ²	28 %
Surfaces cultivées	10.58 km ²	30 %
Surfaces enherbées	6.83 km ²	19%

Tableau 2.2 : Répartition en chiffre du mode d'occupation du sol du bassin versant de la Mérantaise, d'après la digitalisation des photographies aériennes IGN 2014.

3. Une vallée à fort caractère patrimonial et écologique

Le bassin de la Mérantaise est certes en position périurbaine mais il reste en partie préservé grâce, notamment, à son ancrage dans le territoire du Parc Naturel Régional de la Haute Vallée de Chevreuse (**Figure 2.18**). Créé en 1985, ce dernier assure une préservation et une restauration du potentiel écologique de la vallée reconnu par tous les gestionnaires en charge de ce territoire. En témoigne également le classement juridique et intentionnel de la vallée en ZNIEFF²⁰ type II, Zone Natura 2000, et autres zonages réglementaires.

Quatre sites sont considérés comme particulièrement remarquables en termes d'intérêt biologique et écologique et sont classés en ZNIEFF de type I : (i) le domaine d'Ors et la vallée de la Mérantaise à Châteaufort, (ii) les ravins forestiers à Magny-les-Hameaux et la roselière de Mérançy, (iii) le parc du CNRS à Gif-sur-Yvette et (iv) les mares de la plaine de Chevincourt. Les coteaux boisés et les fonds de vallée humides y concentrent une diversité et une richesse de milieux et d'espèces, ainsi que le témoignage patrimonial de l'activité humaine passée qui en font des secteurs clés de la gestion des espaces naturels par le PNR HVC et les autres acteurs de ce territoire (SIAHVY, SYB, ...). Les zones humides, désormais considérées comme des éléments essentiels à la préservation et à la garantie d'un bon état écologique des milieux aquatiques pour leur potentiel épurateur, sont très présentes dans le fond de la vallée de la Mérantaise. Elles couvrent près de 4 % du bassin versant et sont le refuge de plusieurs centaines d'espèces végétales et animales. De la même manière, la Mérantaise est considérée comme un réservoir biologique, notamment pour sa population remarquable de truites *fario* qui profitent d'une relative diversité des faciès d'écoulement et des espaces de frayères (**Figure 2.18**). Aussi, ce zonage réglementaire implique-t-il des contraintes d'aménagement et une gestion particulière du territoire.

²⁰ Zone Naturelle d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique : lancé en 1982, l'inventaire des ZNIEFF a pour objectif d'identifier et de décrire des secteurs à fortes capacités biologiques et en bon état de conservation. Deux types de ZNIEFF sont distingués : les ZNIEFF de type I de grand intérêt biologique et écologique, et les ZNIEFF de type 2 qui comprennent plus largement les grands ensembles naturels riches et peu modifiés, offrant des potentialités biologiques importantes. (sources : <https://inpn.mnhn.fr/programme/inventaire-znieff/presentation> ; consulté le 07/12/2017)

Dans une démarche écologique, les plaines alluviales du domaine d'Ors appartenant à la commune et directement gérées par le PNR HVC sont désormais occupées par des vaches Highland, chargées d'entretenir les fonds de vallée humides (**Figure 2.17**).



Figure 2.17 : Highlands broutant dans les Prés Bicheret.

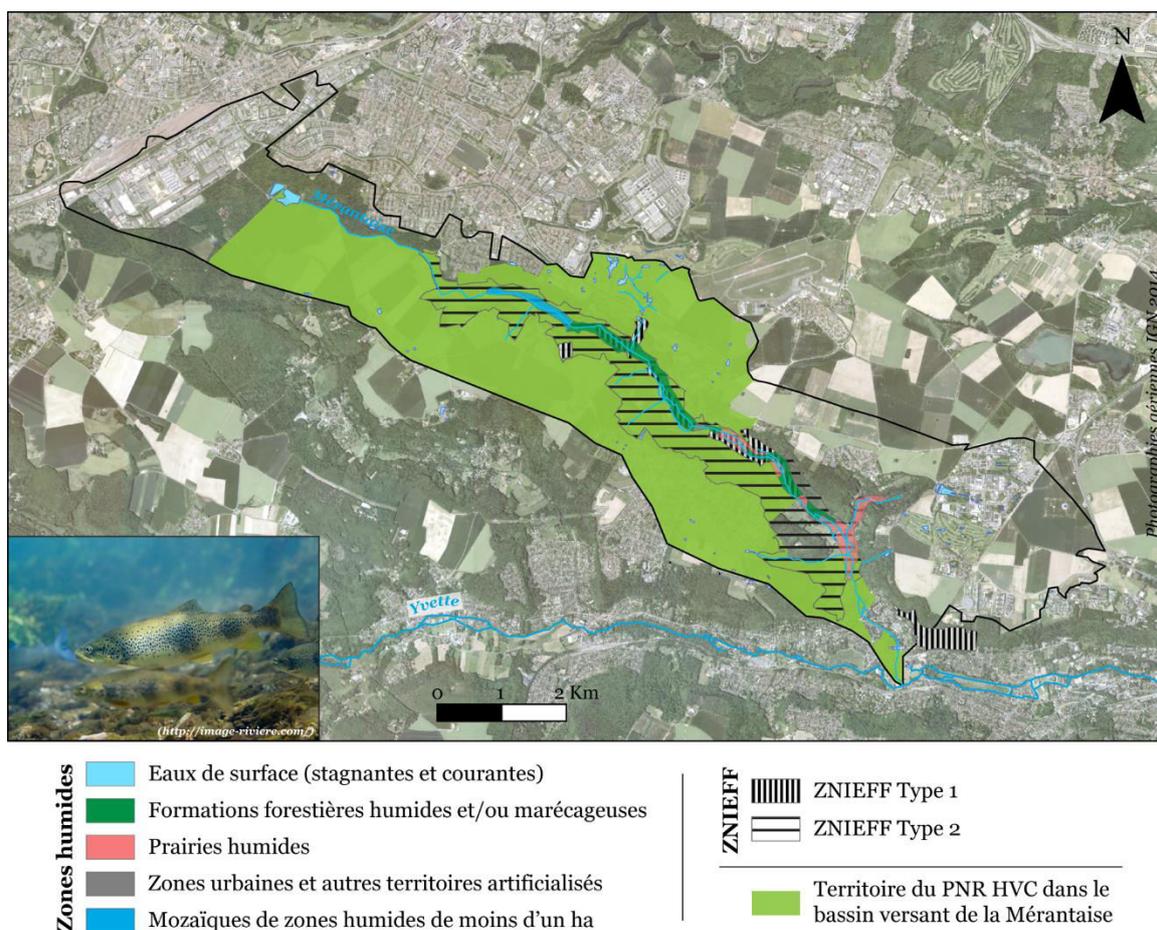


Figure 2.18 : Contexte écologique (cadre institutionnel) du bassin versant de la Mérantaise.

D'autre part, au-delà de l'aspect écologique, la vallée de la Mérantaise regorge d'un patrimoine architectural intéressant. Bien que modestes, les maisons rurales, les lavoirs, les fermes, les pigeonniers, les anciens moulins, les parcs et les murs d'enceinte en vieilles pierres constituent un petit patrimoine remarquable qui donne son caractère à la vallée. Certains sites sont inscrits ou classés monuments historiques pour leurs valeurs patrimoniales. C'est notamment le cas des murs de clôture et du parc du

Domaine de Brouëssy et des élévations et toitures de la Porte de Mérantais, à Magny-les-Hameaux²¹. L'ancien parc du domaine d'Ors, quant à lui, possède encore quelques vestiges de son passé, lorsque l'ancien château d'Ors était encore debout : le Pont Galerie, les enrochements ornementaux, les communs, la chapelle, et d'autres bâtiments conservés et partiellement restaurés.

De la même manière, le bassin versant de la Mérantaise est parcouru par un réseau de rigoles hérité du XVII^{ème} siècle, lorsque Louis XIV décide de faire drainer le plateau de Saclay pour alimenter le château de Versailles (voir Partie 2, Chapitre 5). Le territoire est notamment traversé par les rigoles de Châteaufort et de Saint-Aubin, toujours actives grâce au travail de restauration et de réhabilitation du Syndicat de l'Yvette et de la Bièvre (SYB), en charge de leur gestion et de leur entretien.

Enfin, si le bassin de la Mérantaise a su conserver un caractère rural sur une importante partie de son territoire, la rivière qui le parcourt a, quant à elle, perdu son caractère « naturel » depuis de nombreux siècles. En effet, elle a été historiquement aménagée pour profiter de son énergie hydraulique. Aujourd'hui abandonnés ou reconvertis, les moulins et leurs ouvrages associés (vannes, déversoirs, biefs de dérivation), les ponts et les lavoirs marquent encore le fond de la vallée et plus particulièrement son chenal. Cet aspect sera développé et analysé dans la partie suivante, relative à l'évolution historique des aménagements du chenal et du bassin versant.

²¹ https://www.parc-naturel-chevreuse.fr/sites/default/files/media/sites_monuments_inscrits_classes.pdf (consulté le 24/01/2018)

Chapitre 3. CADRE ET OUTILS D'ANALYSE : LE CHOIX DES MÉTHODES

A. : Approches et échelles d'analyse	p.105
B. : Sources, acquisition des données et méthodes de traitement	p. 108

Introduction

L'un des objectifs de la thèse est d'apporter une meilleure connaissance et compréhension de la trajectoire évolutive des petits cours d'eau franciliens en contexte périurbain, à travers l'exemple précis de la Mérintaise (Yvelines-Essonnes). Il s'agit, d'une part, d'identifier les aménagements historiques qui ont façonné et défini la rivière et son bassin versant dans l'espace et dans le temps ; et d'autre part, de caractériser le fonctionnement hydrosédimentaire actuel de la rivière, partant du constat que celui-ci était le résultat de cet héritage historique. Aussi, une approche interdisciplinaire et multiscale a été privilégiée, croisant étude géohistorique et étude hydromorphologique (Valette et Carozza, 2010). L'approche géohistorique appliquée aux hydrosystèmes permet de replacer la rivière dans une évolution conjointe des déterminants naturels et sociaux ayant façonné les espaces et les territoires (Carcaud, 2004 ; Castanet, 2008 ; Burnouf, 2009). Elle permet également d'expliquer les dynamiques actuelles et de mettre en évidence leurs éventuelles dépendances vis-à-vis des conditions passées (Liébault, 2003 ; Wohl, 2006).

Cependant, choisir de travailler sur un terrain d'étude comme celui-ci, à savoir une petite rivière de faible énergie, c'est se confronter à un double problème d'ordre méthodologique : (i) d'une part, les données sont souvent peu nombreuses, lacunaires et dispersées, que ce soit d'un point de vue historique ou hydromorphologique ; (ii) d'autre part, les méthodes classiquement utilisées en hydrogéomorphologie pour caractériser la dynamique fluviale d'une rivière ne sont pas toujours adaptées à l'accessibilité et à la nature de notre terrain d'étude. Reposant sur des relevés de terrains et des suivis de paramètres hydrologiques et géomorphologiques, il a souvent fallu être inventif et recourir à des protocoles d'analyses adaptés à un contexte de vallée boisée, de petit gabarit, à l'accessibilité parfois limitée. De la même manière, les documents cartographiques anciens ne sont, bien souvent, pas à la bonne échelle pour les petits cours d'eau. Lorsque ceux-ci sont cartographiés, la marge d'erreur est alors trop importante par rapport aux dimensions du cours d'eau.

La Mérintaise n'a pour le moment pas fait l'objet d'études scientifiques poussées, à l'exception de quelques rapports de bureau d'étude et travaux universitaires (Valentin, 2011 ; Jugie, 2012 ; Fekih, 2016 ; Vanneste, 2017 ; de Milleville, 2017, 2018). Elle reste donc assez peu documentée, ou tout du moins de manière partielle. Par ailleurs, du fait de son statut de rivière non-domaniale, les abords de la Mérintaise dépendent en grande partie de propriétés privées, ce qui ne rend pas toujours aisée l'accessibilité à la rivière sur le terrain (**Figure 3.1**).

Ce chapitre présente la cadre méthodologique global mis en place dans ce travail de thèse. Après avoir rappelé les approches et les échelles d'analyse considérées, nous développerons le choix des sources et des outils d'analyse privilégiés.

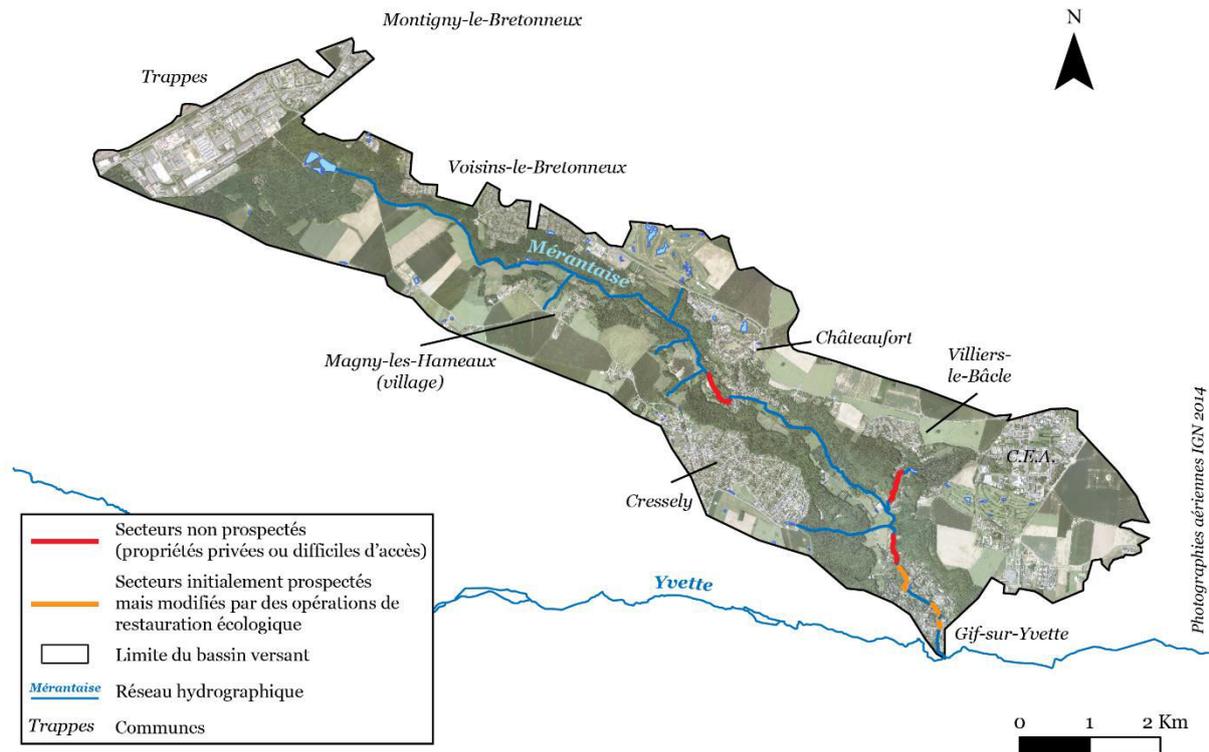


Figure 3.1 : Localisation des secteurs prospectés et non prospectés.

A. Approches et échelles d'analyse

1. Une approche multiscalaire et interdisciplinaire

Les rivières sont des systèmes complexes dont les différents compartiments fonctionnels et unités spatiales sont emboîtés et reliés entre eux par des flux solides et liquides (concept de *l'hydrosystème* : Roux, 1982 ; Amoros et al., 1987, 1988 ; Amoros et Petts, 1993 ; Bravard et Petit, 2000). Les processus dynamiques qui régissent ces différentes entités sont déterminants à des pas de temps variés. De ce fait, une approche systémique s'impose, à l'image de l'essentiel des travaux en géomorphologie fluviale. Cette appréhension globale, nécessaire à la reconstitution de la trajectoire historique et fonctionnelle de la Méranaise, permet de prendre en compte les évolutions historiques du cours d'eau sur un temps plus ou moins long et des échelles spatiales variées, du point de mesure spécifique au bassin versant.

Ce travail doctoral se base donc sur une démarche interdisciplinaire croisant les approches historiques et les approches hydrogéomorphologiques. Les données et les corpus documentaires exploités ici sont le reflet de cette démarche méthodologique aux dimensions spatiales et temporelles multiples (**Figure 3.2**).

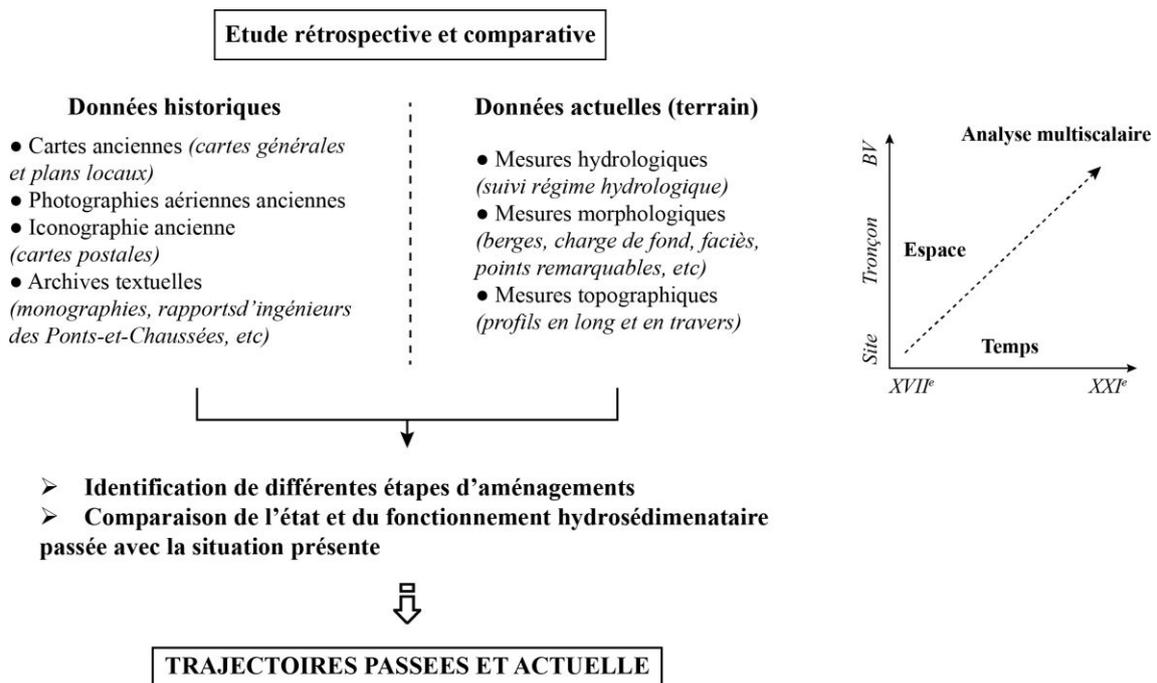


Figure 3.2 : Démarche méthodologique générale de la thèse

2. Des échelles variées et complémentaires

2.1. Échelles spatiales

Quatre niveaux emboîtés d'échelles spatiales ont été pris en compte :

- **Échelle du transect**, qui permet d'appréhender quantitativement les ajustements morphologiques de la rivière à l'échelle du point de mesure. La multiplication de ces transects permet ensuite une vision plus globale en moyennant les valeurs observées.
- **Échelle du site et de la station**, qui permet d'appréhender les facteurs locaux, particulièrement structurant pour les petits hydrosystèmes.
- **Échelle du linéaire**, qui permet de prendre en considération les variables de contrôle et de réponse à l'échelle de la rivière et d'analyser les dynamiques spatiales de l'amont à l'aval.
- **Échelle du bassin versant**, qui permet d'appréhender les variables de contrôle et de réponse (débits liquides et solides) à une échelle globale. Elle assure une prise en compte de l'occupation

du sol de toute la vallée et des versants qui conditionne les apports hydrologiques et sédimentaires au cours d'eau.

2.2. Échelles temporelles

Fort de la nécessité de reconstituer la trajectoire historique et fonctionnelle de la Mérantaise pour questionner les objectifs actuels de la restauration écologique (Antrop, 2005 ; Brierley and Fryirs, 2005 ; Wohl, 2005; Lespez et al., 2006 ; Hoyle et al., 2008 ; Dufour et al., 2017), notre analyse comprend plusieurs échelles temporelles, dont les deux derniers niveaux s'appliquent plus spécifiquement aux aspects actuels :

- **Échelle séculaire et pluriséculaire**, qui permet d'appréhender l'évolution historique de l'occupation du chenal de la Mérantaise et de son bassin versant. Les données historiques sont alors souvent exploitées dans une approche diachronique et comparative.
- **Échelle annuelle ou pluriannuelle**, qui permet d'identifier des tendances d'évolution à court terme ou des variabilités temporelles (saisonniers, annuelles, pluriannuelles) concernant les modifications hydrologiques, morphologiques et le rôle des différents facteurs de contrôle. La rivière n'ayant jusque-là pas fait l'objet d'études scientifiques ou opérationnelles développées, un certain nombre de paramètres ont été suivis à l'occasion de ce travail de thèse, soit sur des périodes de trois à quatre ans.
- **Échelle événementielle**, qui permet d'analyser les réponses morphologiques du lit et des berges de la Mérantaise à un événement hydrologique particulier.

Nous précisons tout de suite au lecteur que le cadre historique considéré dans ce travail doctoral se concentre sur les 5 derniers siècles, du XVII^{ème} au XIX^{ème} siècle. Cette délimitation temporelle est arbitraire et dépendante de la ressource documentaire disponible. Les archives et la littérature grise qui concerne notre site d'étude ne remontent peu, voire pas, au-delà du XVII^{ème} siècle. Les données renseignant les évolutions antérieures de la rivière sont peu nombreuses et difficile à vérifier par ailleurs. Nous avons donc préféré les ignorer. Il ne s'agit donc pas ici de reconstituer la trajectoire historique et fonctionnelle de la Mérantaise sur le temps long (Holocène) mais de se concentrer sur les périodes historiques « récentes ».

B. Sources, acquisition des données et méthodes de traitement

Les données exploitées pour ce travail de thèse sont de deux types. On distingue ainsi, selon leurs origines :

- **les données dites « de seconde main », provenant de sources variées et diverses**, constituées, pour une majorité, d'entre elles, par des producteurs externes et indépendamment des objectifs de la thèse. Ce type de données compose essentiellement le corpus de documents historiques (cartes anciennes, iconographie, archives textuelles, ...). Mais il est également constitué de données plus récentes et en particulier des mesures de terrains (des profils en travers, profils en long, détermination du mode d'occupation du sol, ...). Les producteurs des données peuvent être les maîtres d'ouvrages d'opérations de diagnostics, de suivis (SIAHVY, PNR HVC, bureaux d'études, ...).
- **Les données dites « primaires », produite par nous-même et essentiellement constituées de mesures et relevés de terrain**. De ce fait, ces données ont été construites pour répondre aux problématiques de la thèse et notamment la caractérisation de la dynamique actuelle et récente du chenal (lit et berges). Il s'agit donc de relevés topographiques, granulométriques, hydrologiques ou de localisation des structures anthropiques et de points remarquables dans le lit ou à l'échelle du bassin versant.

D'autre part, ce travail de thèse relevant à la fois d'une approche historique et d'une approche géomorphologique, nous présentons ici les différentes données, sources d'informations et traitement propre à chaque approche.

1. La documentation historique

Notre démarche géohistorique, destinée à appréhender la paléo-géographie du bassin versant de la Mérintaise, s'inscrit dans une tradition scientifique désormais établie (Gregory, 1995; Bravard et Magny, 2002; Gurnell et al., 2003; Valette et Carozza, 2010). Elle repose sur le recours à des sources diverses de données anciennes : cartographiques, photographiques, iconographiques et textuelles, essentiellement issues de fonds d'archives conservés (en France) aux Archives communales, Départementales, Nationales, mais aussi par des institutions et services détentrices d'une partie de la documentation. Comme tout document utilisé à des fins scientifiques, ces sources historiques doivent être vérifiées et contextualisées (Trimble et Cooks, 1991 ; Valette et Carozza, 2010). C'est ce que nous nous efforcerons de faire à la présentation des différents types de documents historiques exploités. Enfin,

la littérature grise, des anciens travaux universitaires ou encore internet peuvent aussi fournir des informations précieuses sur les évolutions passées.

Dans ce travail doctoral, quatre principaux types de documents historiques ont été exploités pour notre étude rétrospective : (i) les **cartes anciennes**, (ii) les **photographies aériennes**, (iii) l'**iconographie ancienne**, essentiellement des cartes postales, (iv) et enfin les **archives textuelles**.

1.1. Les documents cartographiques

Ces données permettent la reconstitution et la compréhension des évolutions du tracé en plan et verticale du chenal de la Mérantaise, ainsi que des évolutions du mode d'occupation du sol dans son bassin versant. Deux formats de plans anciens ont été utilisés et confrontés : (i) les **cartes générales** et (ii) les **plans locaux**.

Les objectifs de réalisation, la qualité de l'information relative à notre objet d'étude et la résolution de ces différents documents cartographiques ont conditionné leur utilisation pour ce travail de thèse. En effet, certaines cartes anciennes ont pu être exploitées de manière pleine et entière, permettant de localiser, identifier et caractériser assez précisément les multiples aménagements (moulins, travaux de chenalisation et autres ouvrages ou pratiques dans la vallée et le bassin). D'autres documents plus lacunaires dans leur représentation ont été simplement consultés et ont permis de vérifier certaines informations ou de remonter plus en amont dans le temps afin de compléter le contenu d'autres documents historiques. Nous présenterons séparément les cartes générales et les plans locaux en s'efforçant d'identifier les apports et les limites de chacun ainsi que le traitement qui leur a été réservé.

1.1.1. Les cartes générales

Les **cartes générales** permettent, comme leur nom l'indique, une vision globale de tout le territoire de la vallée de la Mérantaise à des échelles variées (1/10 000^e à 1/88000^e) (**Tableau 3.1**). La carte consultée la plus ancienne, la *Carte particulière des environs de Paris* de l'Académie Royale des Sciences, date de 1678, et la plus récente, la *Carte topographique au 1/25 000^e* (IGN) date de 2008. Ce corpus documentaire couvre 4 siècles d'intenses mutations des usages et de paysages de la vallée. La plupart de ces documents cartographiques ont été consultés et fournis par les différents services d'archives, dont le département des Cartes et Plans des Archives Nationales, les Archives Départementales des Yvelines ou encore la cartothèque de l'IGN.

Nom du document	Date d'édition	Auteur	Échelles	Feuille	Sources
<i>Carte particulière des environs de Paris</i>	1678	« Messrs de l'Académie royale des sciences en l'année 1714 ; gravée par F. de la Pointe »	≈ 1/88000 ^e	Feuille 5	BNF-Gallica AN
<i>Carte générale des environs de Versailles</i>	17..(?)	-	≈ 1/86400 ^e ?	-	BNF-Gallica
<i>Carte des seigneuries de Chevreuse, Magny-l'Essart, Châteaufort</i>	1702	Geoffroy de la Genestz	-	-	ADY (D1470)
<i>Carte des environs de Paris (levée et gravée par M. l'Abbé Delagrive)</i>	1740	M. l'Abbé Delagrive	≈ 1/17280 ^e	Feuille V (SO)	IGN AN BNF
<i>Carte de Cassini</i>	1756	-	≈ 1/86400 ^e	Feuille 1	IGN
<i>Carte topographique des environs de Versailles, dite Carte des Chasses du Roi</i>	1764	-	≈ 1/28000 ^e	Feuille 8	IGN Géoportail
<i>Carte d'État-Major (Dessins-minutes)</i>	1819-1821	-	1/10000 ^e	Feuilles 2b, 2, 10 et 11b	IGN Géoportail
<i>Carte topographique du domaine des eaux de Versailles</i>	1819-1920	-	-	-	ADY (2Q 146)
<i>Plan de la rivière de l'Yvette et de ses affluents avec indications des usines qui sont situées sur leur cours</i>	1823	-	≈ 1/50000 ^e	-	ADY (7S 94)
<i>Carte topographique –environs de Paris type 1901</i>	1906	IGN	1/50000 ^e	Feuille de Rambouillet 22 15	IGN Géoportail
<i>Cartes topographiques de Rambouillet</i>	1963, 1972, 1980, 1985, 2001	IGN	1/50000 ^e	Feuille de Rambouillet 22 15	IGN
<i>Scan 25</i>	2008	IGN	1/25000 ^e	0620_6860 0620_6850 0630_6860 0630_6850	IGN

Tableau 3.1 : Liste des cartes anciennes utilisées pour l'étude rétrospective. Les lignes grisées correspondent aux cartes géoreférencées à partir de la carte IGN Scan 25 (2008).

1.1.2. Les plans locaux

Les **plans locaux**, réalisés à des échelles bien plus fines, sont issus de différents fonds d'archives et émanent de divers services administratifs anciens. Ils sont souvent disponibles en ligne, en version numérisée. Les principaux plans locaux exploités sont les **plans d'intendance** (**Figure 3.3**) ou plans de paroisse et les **cadastres communaux napoléoniens**, couvrant le XVII^{ème} et le début du XIX^{ème} siècle (**Tableau 3.2**). D'autres plans locaux sont aussi extraits des dossiers administratifs des ingénieurs des Ponts-de-Chaussées. Relatifs à des travaux d'ingénierie sur les ouvrages hydrauliques présents sur le cours de la Mérantaise et dressés pour des besoins très précis, ils accompagnent des rapports écrits (présentés ultérieurement). Quelques plans locaux sont parfois même complétés par des profils en long et en travers. Certains relèvent plutôt du croquis levé en vitesse dans la marge.

Du fait de leur nature, le traitement de tous ces documents est essentiellement visuel et comparatif. Cependant, ils sont une source primordiale d'information car il offre une véritable « synthèse visuelle » de l'occupation des sols et des usages dans la vallée aux XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècle (M. Touzery, 1995). Tandis que les cartes générales réduisent bien souvent le moulin à eau à son implantation ponctuelle, les plans locaux représentent plus en détail l'espace fonctionnel qui constitue le complexe « moulin » : les retenues en amont ou en aval, les différents biefs d'amenée et de décharge, ou encore les ouvrages associés à l'usines (seuils, vannes, déversoirs) (Barraud et al., 2013).



Figure 3.3 : Plan d'intendance de la commune de Magny-les-Hameaux (78) (C2/47 ; Archives en ligne des Archives Départementales des Yvelines).

Nom du document	Date d'édition	Auteur	Échelle	Feuille	Sources
			1/6909 ^e	Magny-les-Hameaux	ADY : C2/47
<i>Plan d'intendance, ou Plan des Paroisses de la Généralité de Paris</i>	1780-1789	A la demande de Louis Berthier de Sauvigny, intendant de la Généralité de Paris	1/6932 ^e	Châteaufort	ADY: C1/49
			≈ 1/7200 ^e	Gif-sur-Yvette	ADE : C2/4
			≈ 1/7200 ^e	Villiers-le-Bâcle	ADY : D1548 /ADE: C3/88
<i>Cadastrés communaux, dits Cadastre napoléoniens</i>	1819	—	1/50000 ^e (TA) 1/25000 ^e	Magny-les-Hameaux	ADY : 3P 2/198/01 à 13
	1809			Châteaufort	ADY : 3P 2/95/01 à 04
	1809			Gif-sur-Yvette	ADE : 3P 0803 à 0808
	1808			Villiers-le-Bâcle	ADE : 3P 1874 à 79

Tableau 3.2 : Listes des plans principaux locaux institutionnels consultés : plans d'intendance et cadastre napoléoniens.

1.1.3. Apports, limites et traitements des cartes anciennes

En France, la création de l'Académie des Sciences en 1666 par Colbert marque le début de la cartographie scientifique. Le rôle prépondérant de Paris et de sa région explique l'attention particulière portée à l'Île-de-France, qui fut le terrain d'essai des grandes séries cartographiques qui ont plus tard couvert l'ensemble de la France. La carte de Cassini ou celle des Chasses du Roi au XVIII^{ème} siècle, le cadastre parcellaire depuis Napoléon ou encore la carte d'État-Major au XIX^{ème} siècle comptent parmi les principaux documents cartographiques qui ont directement profité de cette volonté scientifique de l'Académie des Sciences.

L'une des difficultés d'interprétation des cartes générales anciennes est qu'elles sont souvent imprécises concernant le tracé ou l'activité des usines hydrauliques. En effet, il arrive que les bâtiments soient indiqués, mais que la mention « moulin », présumant d'une activité des lieux, ne le soit pas. De la même manière, il arrive que les moulins ne soient pas ou mal représentés, alors même que d'autres sources historiques attestent de leur activité. Un croisement des informations est donc souvent nécessaire pour s'assurer de la réalité des situations. Ces imprécisions peuvent être dues aux objectifs de réalisation des cartes et à l'absence de vérifications systématiques des informations sur le terrain. D'autre part, la Mérantaise est un cours d'eau de petit gabarit dont la représentation cartographique du tracé se limite généralement à un trait (bleu), plus ou moins fin (**Figure 3.4.b**). Seule la première version de la carte d'État-Major (1820) détaille de manière plus poussée la largeur de la rivière (**Figure 3.4.a**), mais avec quelle part de réalisme ? Cette simplification du tracé empêche de connaître les variations géométriques du lit de la Mérantaise à la seule lecture des cartes générales.

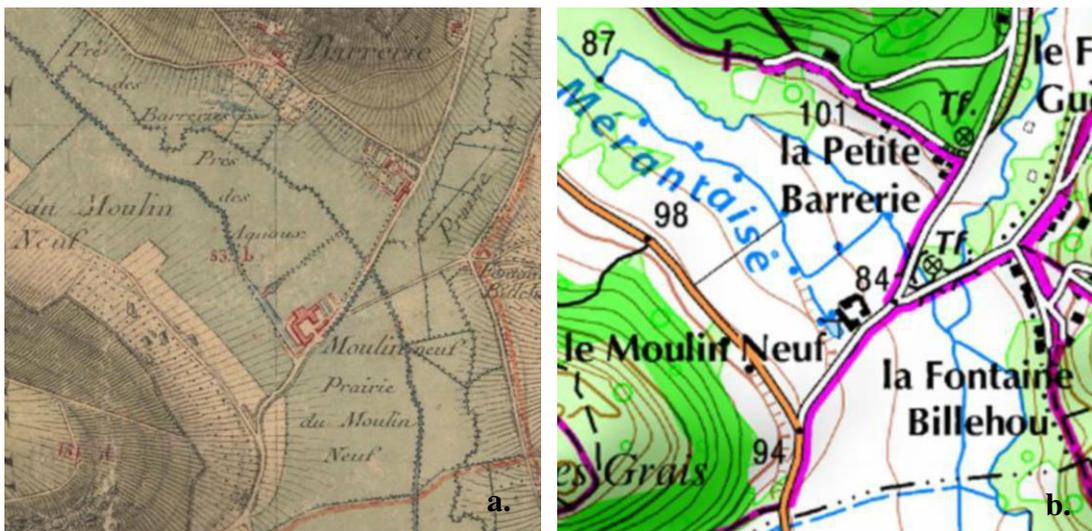


Figure 3.4 : Exemple de représentation du tracé de la Mérantaise sur le secteur du Moulin Neuf. a. Extrait de la carte d'État-Major de 1820 : le tracé du lit mineur est assez large (IGN). b. Extrait de la carte topographique au 1/25 000^e (IGN) : le tracé est simplifié à un trait aux dimensions uniques.

Deuxièmement, le tracé de la rivière était souvent déterminé à partir des cartes générales antérieures, sans vérifications systématiques sur le terrain. De ce fait, un problème d'actualisation du tracé de la rivière peut apparaître. C'est le cas de la carte topographique au 1/25000^e de l'IGN dont le tracé cartographié ne correspond pas à la réalité aujourd'hui. La **Figure 3.5** illustre cette erreur de cartographie du tracé de la Mérantaise au niveau des moulins d'Ors (a.) et Neuf (b.). Sur la carte topographique de l'IGN (à droite), le tracé emprunte les anciens biefs d'amenée d'eau des moulins alors que ceux-ci ne sont plus actifs depuis le début du XX^{ème} siècle, avec l'abandon des moulins. Aujourd'hui, la Mérantaise s'écoule par ce qui fût le bras de décharge (bras coudé) et qui correspond au talweg de la vallée.

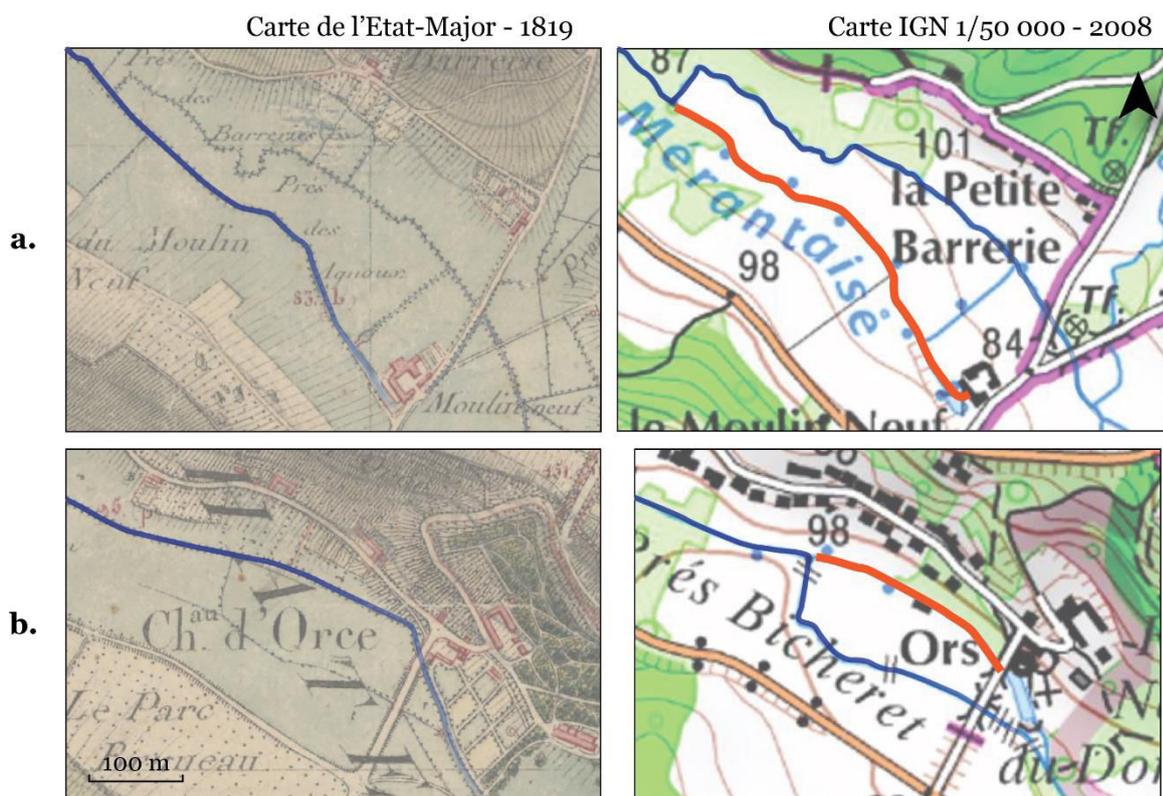


Figure 3.5 : Exemples d'erreur de cartographie sur les cartes IGN récentes. Le trait bleu met en évidence le tracé effectif de la Mérantaise selon les époques (XIX^{ème} et XX^{ème} siècle) ; le trait rouge correspond au linéaire cartographié alors que l'eau ne coule plus dans les fossés. a. Moulin d'Ors (Châteaufort) ; b. Moulin Neuf (Villiers-le-Bâcle).

D'autres cartes générales de l'Ile-de-France existent mais n'ont pu être utilisées à cause d'un problème de représentation de notre secteur d'étude. C'est le cas de l'Atlas de Trudaine, couramment utilisé comme outil de restitution historique, mais qui ne cartographie pas la vallée de la Mérantaise (**Figure 3.6**). Cela s'explique par l'objectif de représentation de cet atlas, réalisé entre 1745 et 1780 sur ordre de Charles Daniel Trudaine, administrateur des Ponts et Chaussées, qui était de cartographier le réseau routier du royaume de France au XVIII^{ème} siècle. Les axes fluviaux les plus importants, utilisés comme réseau de communication et de transport, ont généralement fait l'objet d'une cartographie plus

précise, mais à l'inverse les petits cours d'eau (non navigables), géographiquement isolés ou n'ayant pas un intérêt économique suffisant, ont été ignorés.

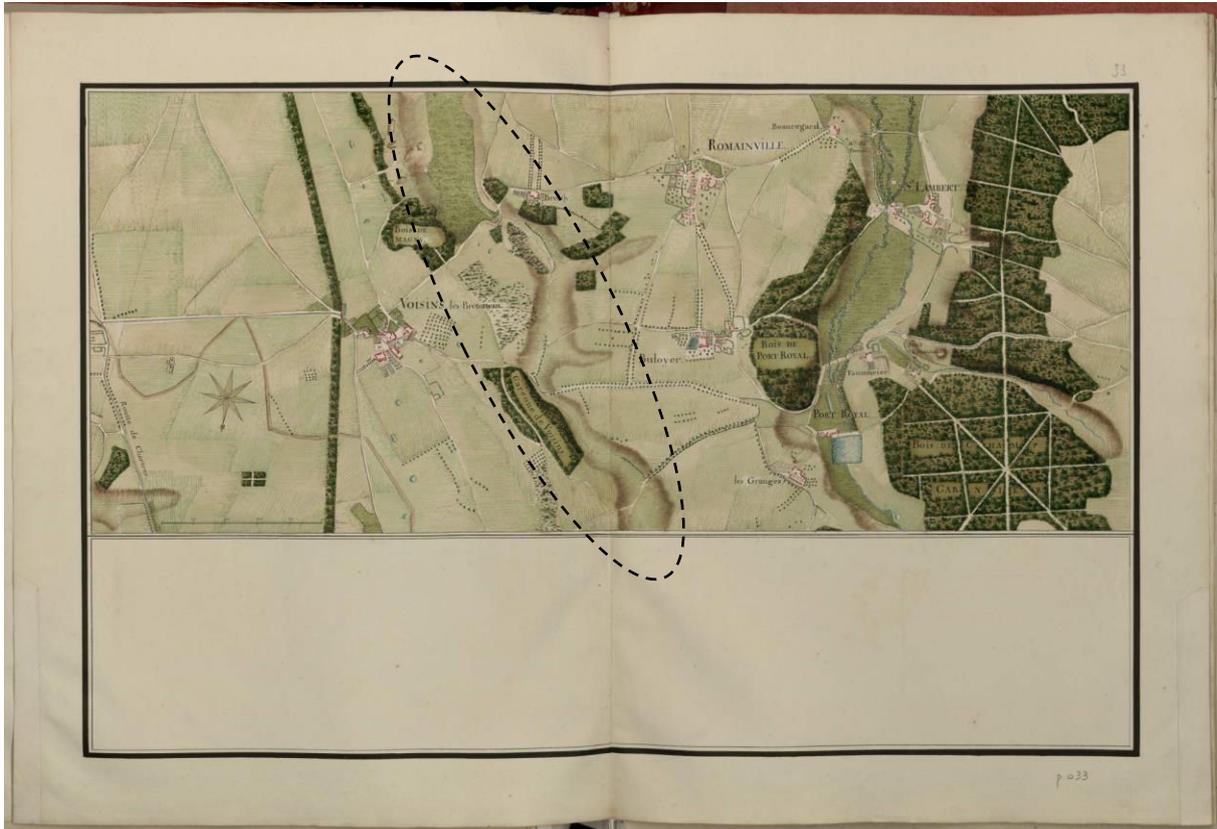


Figure 3.6 : Extrait de l'Atlas des routes de France dits Atlas de Trudaine, représentant une partie de notre secteur d'étude. Le relief de la vallée de la Mérantaise est cartographié (cercle noir en pointillé) mais le réseau hydrographique a été ignoré. Généralité de Paris, Vol. VI – Versailles II, 1745-1780, au 1/8584°. Cote : CP/F/14/8448 (notice ZZ000254). Consultation en ligne de la version numérisée (http://www.culture.gouv.fr/Wave/image/archim/trudaine/frdafanchat_8448p033r01-p.jpg, 14/03/2016)

La Carte des environs de Paris, levée et gravée par l'Abbé Delagrive (1740), est également un document cartographique de l'Île-de-France souvent utilisé mais pour lequel la vallée de la Mérantaise est malheureusement représentée en grande partie sous le cartouche ornémenté précisant le titre, l'auteur, le commanditaire, la date d'édition du document (**Figure 3.7**). Ce très beau plan n'est donc exploitable que pour une toute petite portion de la Mérantaise pour notre étude historique des évolutions de la vallée.

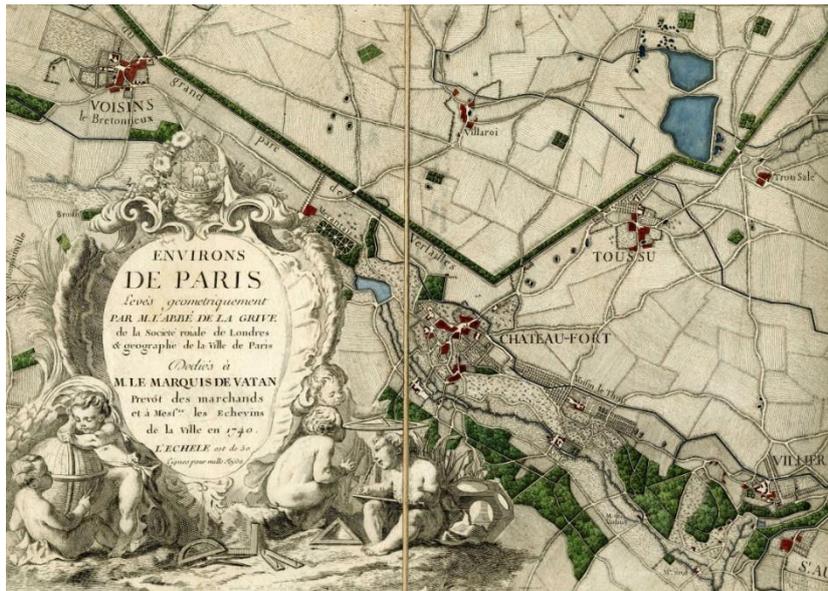


Figure 3.7 : Extrait de la Carte des environs de Paris, levée et gravée par l'Abbé Delagrive (1740). Feuille V, Sud-Ouest. (Sources : IGN)

Notons l'existence d'une carte intéressante, inventoriée sous le titre de *Carte de la plaine de Saclay, entre Palaiseau et Trappes : villages, bois, chemin, pré, puits*, et retrouvée dans un carton du fond O¹²² (*Maison du Roi sous l'Ancien Régime ; 1601-1800*) (Figure 3.8). Elle accompagnait une série de documents écrits issues des archives privées de la Couronne et, semble-t-il, datés du XVII^{ème} ou XVIII^{ème} siècle). Il s'agit *a priori* d'un brouillon de plan, réalisé à l'encre brune et amené à terme à être reproduit au propre par des arpenteurs. L'échelle est inconnue et l'objectif de sa réalisation n'a pu être clairement identifié, mais elle est l'une des rares représentations de la vallée de la Mérantaise avant le XIX^{ème} siècle, à cette échelle de précision et focalisée sur notre site d'étude.



Figure 3.8 : Extraits de la carte trouvée dans le fond O¹ 1740² (AN)

²² O¹ 1740², dossier n°19, notice 2771

Le traitement de ces documents cartographiques a comme objectif principal une visualisation concrète des évolutions du tracé de la Mérantaise, de ses aménagements et des pratiques à l'échelle du bassin versant, mais aussi quantification de ces évolutions. Les cartes anciennes ont donc été intégrées au sein d'un Système d'Information Géographique (logiciel ArcGis 10.2). La première étape a consisté à géoréférencer les cartes historiques en les calant par rapport au Scan IGN au 1/25000^e de 2008 déjà référencée en RGF Lambert 93. Puis, les cartes ont été digitalisées afin d'individualiser le tracé de la Mérantaise, les complexes hydrauliques (moulins, travaux de chenalisation et ouvrages associés) et le mode d'occupation du sol du bassin versant à différentes périodes de leur histoire. Le géoréférencement et la digitalisation des cartes anciennes peuvent être à l'origine d'incertitudes inhérentes à la méthode employée (Gaeuman et al., 2003; Valette et Carozza, 2010; Dépret, 2014;). De par leurs imprécisions et leur ancienneté, les marges d'erreur spatiales des cartes historiques sont variables. Il est apparu que les cartes antérieures à 1819 (carte d'État-Major) n'obtiennent pas un calage satisfaisant avec des erreurs RMSE souvent supérieures à 10m. Ainsi, seules les cartes ayant une marge d'erreur type RMSE inférieur à 5 ont été retenues pour les opérations de digitalisation (Tableau 3.3). Une exception a été faite pour la carte des Chasses du Roi (1764) qui a été acceptée avec une valeur de RMSE de 9.90. Les autres cartes plus anciennes ont principalement été exploitées comme document visuel à valeur qualitative. Cet indicateur est certes imparfait (Hughes et al., 2006; Dépret, 2014). Une erreur de digitalisation peut également avoir lieu. Elle est généralement liée au report des éléments sur la couche vectorisée par l'opérateur, en l'occurrence nous-même. Cette erreur n'a pu être estimée mais elle est considérée comme probable.

	<i>Carte des Chasses du Roi [1764]</i>	<i>Carte d'État- Major [1819-1821]</i>	<i>Cartes topographiques 1/50 000^e [1963-2001]</i>	<i>Cadastré napoléonien [1809-1819]</i>
Erreur RMSE	9.90	4.50	2.96	4.66

Tableau 3.3 : Tableau récapitulatif des erreurs RMSE inhérentes au calage des cartes et plans locaux anciens géoréférencés

1.2. Les photographies aériennes

L'IGN met à disposition, *via* son site de consultation en ligne Géoportail et sa cartotheque, une série de photographies aériennes. Celles qui couvrent notre zone d'étude sont disponibles de 1933 à 2008. Cependant, seuls les clichés déjà géoréférencés par l'IGN de 1947 (pour les Yvelines)/1949 (pour l'Essonne), de 1965 et de 2015 ont été retenus (**Tableau 3.4**). Ces photographies aériennes ont été utilisées dans une approche paysagère, pour analyser l'évolution du mode d'occupation du sol dans le bassin versant, en particulier le développement massif et rapide de l'urbanisation à partir des années

1980. Les photographies n'ont, en revanche, pas été exploitées pour l'analyse de l'évolution du tracé de la Mérantaise car la ripisylve empêche toute visualisation du chenal.

Dates	Références de la mission	Échelle approximative	Type de cliché
1947 (Yvelines)/ juin 1949 (Essonne)	C2515-0051_1949_F2215-2515	1/25019	Argentique
Mars 1965	C2214-0611-CDP6243	1/7862	Argentique
2014	BD ORTHO BDO_RVB_5M00_JP2-E100_LAMB93_D78-2014	5 m de résolution	Numérique

Tableau 3.4 : Listes des photographies aériennes utilisées, présentées par mission (source : IGN). La campagne de 1949, grisée, a été géoréférencées par l'IGN et intégrée aux SIG

1.3. Les documents iconographiques : les cartes postales

Les archives départementales en lignes des Yvelines et de l'Essonne mettent à disposition un corpus de documents iconographiques et en particuliers des fonds de cartes postales anciennes permettant de visualiser concrètement les paysages passés de la vallée de la Mérantaise. Ces cartes postales sont consultables dans les fonds suivants : 2Fi pour les Archives Départementales de l'Essonne et 3Fi 52 pour les Archives Départementales des Yvelines. Dans cette étude, elles ont été exploitées comme témoins iconographiques du mode d'occupation et des pratiques dans la vallée à la fin du XIX^{ème} et au début du XX^{ème} siècle.

1.4. Les données et archives textuelles

Enfin, si les cartes et les plans anciens sont des sources majeures pour la reconstitution diachronique des trajectoires des rivières, il convient néanmoins de les croiser et de les conforter avec la documentation textuelle. Les différentes sources écrites sont essentiellement issues des archives départementales, nationales ou communales. Le fond le plus riche et le plus important, indispensable à la consultation pour notre étude, est la série S « Travaux publics et transports » (séries période moderne, 1790-1940)²³, provenant de la Préfecture (archives administratives des Ponts et Chaussées) et conservé aux archives départementales. La série S devient série W pour les documents datés d'après 1945. C'est en particulier la sous-série 7S relative aux « rivières non-navigables ni flottables » qui a fourni l'essentiel

²³ <http://www.archivesportaleurope.net/> (consulté le 18/06/2017)

des données historiques. Elle correspond pour beaucoup au fond F10,²⁴ F14 et F20 des Archives Nationales. La sous-série 7S rassemble l'ensemble de la documentation concernant l'implantation d'usines ou de moulins utilisant la force motrice, l'utilisation de l'eau pour l'irrigation, et plus largement, le contrôle des rivières, du libre cours des eaux et de la salubrité par l'administration²⁵. La sous-série 7S est composée de 4 sections²⁶ :

(i) en tête, se trouvent les dossiers généraux, référencés sous le terme de « généralités », relatifs à la réglementation des rivières.

(ii) Suivent les dossiers relatifs aux syndicats de rivière (budget, fonctionnement, règlement, personnel, ...).

(iii) On trouve ensuite les dossiers de chaque rivière, qui comportent eux-mêmes trois parties distinctes : les opérations de faucardement et de curage, lesquelles donnent lieu à rapports, arrêtés, réclamations, pétitions et états de dépenses ; puis, classé par commune traversée et nom de pétitionnaire ou de propriétaire, l'ensemble des pièces découlant de l'exercice de tutelle exercée par l'administration des cours d'eau (construction ou travaux d'usine, ponts, barrages, vannes, ...) ; enfin, les éventuels articles de la tutelle administrative qui s'exerce sur le fonctionnement des syndicats de rivière.

(iv) Pour finir, se trouve en fin de sous-série les dossiers relatifs aux ruisseaux, marais, canaux et autres fossés, ravins, trous et vallons, pour lesquelles la documentation est comparable à ce qui précède²⁷.

Ce fond témoigne de la grande activité qui régnait sur les cours d'eau, petits et grands, et de leur rôle déterminant dans le processus d'industrialisation du pays. On y trouve de nombreux dossiers se rapportant à des travaux de défense contre les inondations de protection des rives, de curage, à la réglementation des barrages, des prises d'eau et des moulins eux-mêmes. Toute demande de construction d'un moulin, lavoir, abreuvoir, passerelle, muret, ou de travaux sur un ouvrage utile à l'activité hydraulique nécessitait une autorisation après examen du dossier par le préfet, l'ingénieur ordinaire et l'ingénieur en chef des Ponts et Chaussées de l'arrondissement. En effet, l'originalité des

²⁴ F10 5706 à 5775 : statistique des cours d'eau non navigables ni flottables (répertoire numérique rédigé par Ph Du Verdier et P. Cézard, en 1971. 183 p.)

²⁵ Répertoire numérique de la sous-série 7S par Magalie Lachèvre, Archives Départementales des Yvelines, 2011.

²⁶ Cette présentation de la sous-série 7S est valable pour toutes les archives départementales de France. Son classement est harmonisé à l'échelle nationale, comme tous les fonds d'archives conservés au niveau départemental.

²⁷ Ce descriptif est tiré du répertoire numérique de la sous-série 7S des Archives départementales de la Seine-Maritime, rédigé par A. Deparde, en 1994.

cours d'eau non navigables, et donc non domaniaux, réside dans le fait que quoiqu'appartenant à des particuliers, ils demeurent sous le contrôle de l'État. Les conflits permanents entre propriétaires des moulins et des eaux, de l'industrie et de l'agriculture, sont arbitrés et légiférés par l'État en la personne de l'ingénieur hydraulique. D'autre part, la gestion de cet ensemble de règles et d'obligations administratives démontre la nécessité d'une législation efficace et à jour ainsi qu'une administration bien rôdée de la part de l'État. Une histoire éminemment locale sous l'égide de l'administration nationale montrant, une fois encore, l'importance des petits cours d'eau dans le projet économique et sociétal du pays (Barraud, 2007). Cependant, malgré la richesse apparente de ce fond d'archives, les données concernant la Mérintaise restent sommaires. Pour autant, elles apportent une multitude d'informations aussi bien sur les aménagements de la rivière que sur sa morphologie, ou encore à son fonctionnement hydrologique. Cette documentation est particulièrement abondante jusqu'au Second Empire, témoignant de l'apogée de l'utilisation de la force motrice des cours d'eau. Malgré un intérêt évident de ces sources d'information, la gestion hydraulique passée de ces systèmes agro-industriels et leurs conséquences sur les écoulements sont aujourd'hui encore paradoxalement trop négligés par la communauté scientifiques et des gestionnaires. Difficulté de la démarche scientifique et d'approche des documents historiques ou méconnaissance de l'apport des recherches historiques en hydromorphologie ? Le constat fait par Jacob-Rousseau et al. (2016) interroge.

1.4.1. Les rapports d'ingénieurs des Ponts et Chaussées

Les **rapports d'ingénieurs des Ponts et Chaussées**, déjà évoqués *supra*, constituent une part importante de notre corpus archivistique. Ils sont le résultat d'une procédure de réglementation bien précise, aménagée à plusieurs reprises par l'administration nationale (1798, 1817, 1834, 1851 et 1898) et conditionnant les usages et pratiques des rivières sur l'intégralité du réseau hydrographique. Si l'on se réfère à la circulaire « Magne » de 1851, cette procédure réglementaire se fait en différentes phases d'instruction (**Figure 3.9**) (cf. Barraud, 2007, p.112 à 117, pour plus de détail). La documentation technique est également produite selon des règles très précises et standardisées (*ibid.*). Les différents documents d'un même dossier peuvent donc paraître redondants et un travail de lecture attentif permet d'en extraire les informations utiles à la problématique de recherche ; à savoir, les données de géométrie du lit et de fonctionnement hydrologique liés à l'activité des usines. Ces éléments de compréhension se glanent généralement dans la section strictement technique de l'instruction qui consiste en un état des lieux des aménagements existants. Des relevés de la disposition et du dimensionnement des ouvrages, ainsi que du niveau d'eau par rapport à un repère provisoire sont réalisés sur le terrain en vue d'établir des plans, des profils et des calculs nécessaires à l'ingénieur pour la constitution de ces propositions futures. Il s'agit des plans locaux décrits précédemment (cf. 1.1.2. *Les plans locaux*). Les nombreux documents de ce type retrouvés dans les archives témoignent d'un certain niveau de conflictualité qui règne dans la vallée de la Mérintaise et de son fort niveau d'aménagement de son cours.

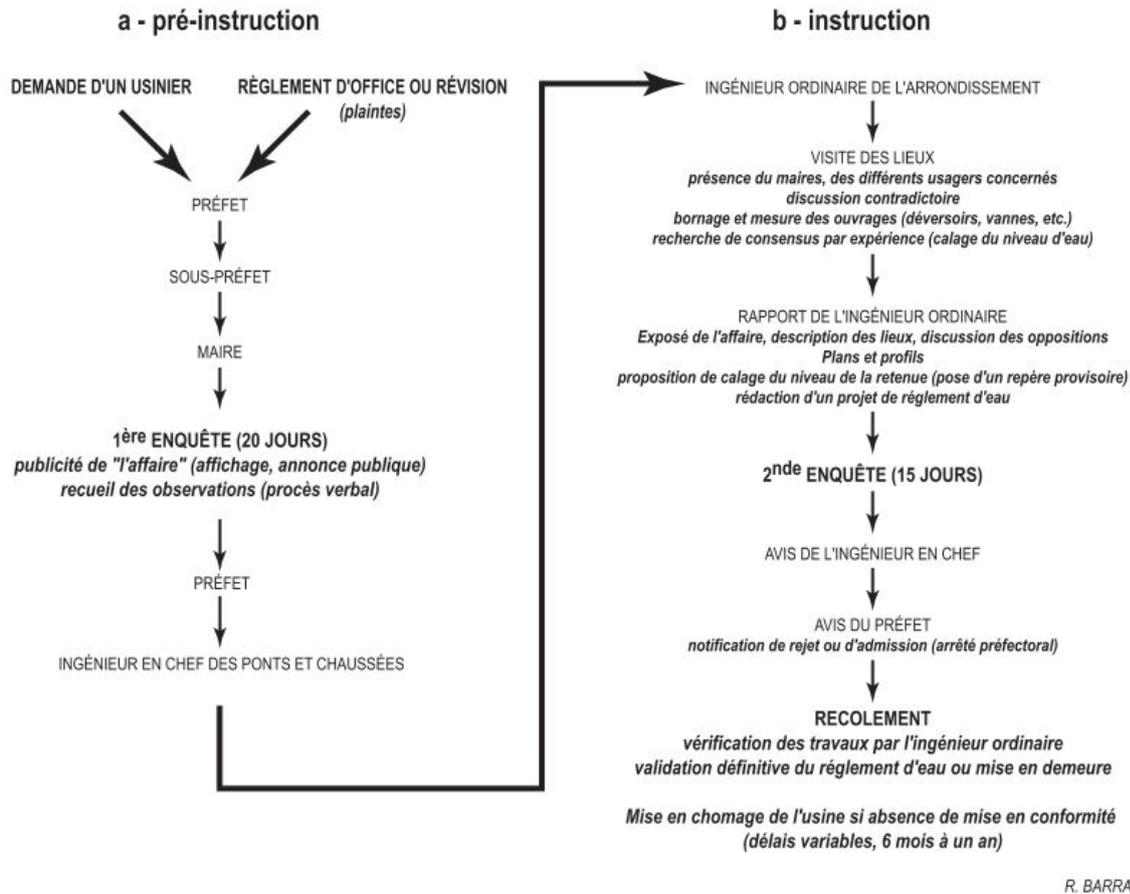


Figure 3.9 : Procédure de réglementation des usines hydrauliques d'après la circulaire "Magne" (1851) (d'après Barraud, 2007)

1.4.2. Les enquêtes statistiques

Le deuxième type de documents d'archives exploités dans cette démarche rétrospective est les grandes « **Enquêtes statistiques** » du XIX^{ème} siècle. La première enquête statistique considérée comme une source exhaustive et fiable pour une approche à petite échelle est celle de 1809. Les enquêtes statistiques se composent de deux volets, l'un relatif aux cours d'eau eux-mêmes, dont les plus grands sont sectorisés en tronçons (tableau A), et l'autre relatif aux « irrigations et usines [présents] sur les cours d'eau non navigables ni flottables » (tableau B). Elles renseignent, d'une part, sur la morphologie moyenne des rivières : longueur (m), largeur moyenne (m), profil mouillé (= périmètre mouillé, en m²), pente totale (m) et la surface du bassin versant (hectares). D'autre part, sur les conditions hydrauliques de la rivière et au droit des usines : volume (m³/s) des « eaux ordinaires » (=module), des « eaux d'étiages », et des « grandes eaux », pour la rivière ; chute en eaux ordinaire (m), force brute et utilisée (chevaux-vapeur) pour les usines hydrauliques.

Les *Atlas des cours d'eau* (Tableau A des enquêtes statistiques) fournissent des valeurs de modules identifiés sous le terme de « eaux ordinaires ». Jacob-Rousseau et al. (2016) considère que

« dans l'état actuel de [leurs] recherches les conditions d'obtention de ces valeurs ne sont pas clairement établies ». Les auteurs de l'article supposent qu'elles ont été obtenues par les ingénieurs des Ponts et Chaussées à partir de calcul de la pente longitudinale et de la section mouillée, en se fondant pour cette dernière sur des critères morphologiques ou sur des enquêtes orales. Le rapport écrit de l'ingénieur ordinaire des Ponts et Chaussées du département de Seine-et-Oise (arrondissement sud) accompagnant les tableaux des statistiques concernant la Juine, l'Orge, la Rémarde et leurs affluents respectifs nous renseignent mieux sur la manière dont ces données hydrologiques ont été collectées. Ainsi, on y apprend que les débits y sont déterminés par jaugeages, opérés en 1885, sur différentes rivières. L'ingénieur soulève le problème que les jaugeages « *ne sont pas en nombre suffisant pour en déduire rigoureusement le débit des cours d'eau par tous les temps* ». Se pose alors la question de l'établissement d'une courbe de tarage fiable. Il précise également que « *les variations constantes de l'écoulement des eaux [selon la hauteur des eaux] ne permettent pas d'assurer que les chiffres [donnés] soient l'expression de la réalité, d'autant plus que l'été a été très sec et que la plupart des moulins ne marchent que par écluses.* » Le voilà donc « *réduit à donner des chiffres moyens* ». Cependant, il tempère son propos en ajoutant que ceux-ci ne s'éloignent semble-t-il peu de la réalité rapportés « *aux dires généralement concordant des usiniers* ». Il n'est évidemment pas précisé le sort des valeurs de débit de la Mérantaise.

De 1879 à 1897, le service des Ponts et Chaussées a procédé à la révision des statistiques antérieures, conformément aux instructions du Ministère des Travaux publics du 4 août 1878. Une « note statistique sur la production des eaux douces françaises » de CHARPY, inspecteur des forêts, datée de 1941, propose une synthèse sur les enquêtes statistiques relatives aux cours d'eau français de la fin du XIX^{ème} siècle. Il y précise qu'en 1898, M. Levy-Salvador, lui-même inspecteur des Ponts et Chaussées à l'époque, comptabilise 258 574 km de cours d'eau non navigables et non flottables en France métropolitaine²⁸.

1.4.3. Les monographies communales

Enfin, le troisième et dernier type de documents consultés en archives est les **monographies communales**, disponibles en ligne sous format numérisé. Souvent moins riches quant au réseau hydrographique lui-même, les monographies communales fournissent d'intéressantes informations sur les paysages présents dans le bassin versant à travers la description des usages et les pratiques. Il existe une section « Hydrographie » dans chaque monographie. Les monographies communales sont des sources d'informations ponctuelles sur la vallée (rubriques « Hydrographie » et « Nature du sol »). Elles renseignent de manière un peu plus complète sur le mode d'occupation du sol du bassin versant, par les rubriques consacrées aux cultures. Elles ont été réalisées entre 1888 et 1900 à la demande du Ministère

²⁸ M. Levy-Salvador, 1898, *Traité d'hydraulique Agricole*, Paris, Dunod. Tome I, p.6

de l'Instruction publique pour la préparation des expositions universelles de 1889 (instruction générale du 29 décembre 1887) de 1900 (instruction générale du 29 décembre 1898) et rédigées par les instituteurs de la République. Pour ce qui est des Yvelines et de l'Essonne, la demande de l'Inspecteur d'Académie de la Seine-et-Oise a été faite en 1899, pour l'exposition universelle de 1900. Les monographies communales consultées sont donc toutes datées de 1899. Nous y avons eu accès via les archives en ligne des Archives Départementales des Yvelines et de celles de l'Essonne.

1.4.4. Travaux de synthèse d'érudits locaux

En parallèle de ces données historiques conservées dans les différents services d'archives, le corpus documentaire a été complété par quelques travaux de synthèses d'historiens locaux et de rares études précédentes sur la Mérançaise ou les territoires de l'Yvette.

Nous citerons ainsi les travaux de quelques érudits locaux tels que ceux de Robert Ligonnière, auteur d'une *Histoire de Gif-sur-Yvette*, au début des années 1990. Il faut cependant lire ces écrits d'un œil critique car ils témoignent bien souvent d'un certain parti pris, d'une vision subjectivement magnifiée des lieux qu'ils illustrent. Ainsi est-il fréquent d'y trouver des formules telles que « *Notre Yvette ! Voyez comme est élancée et montre, à la façon d'une femme du vieux statuaire, des lignes flexibles, délicates, ainsi qu'elles, se fait voir étendue paresseusement dans la plaine, entre deux belles rives ! (...)* ». Ces ouvrages rédigés par des érudits locaux sont souvent l'occasion de mettre en avant leur région et de louer leur « beauté et conditions de vie idéales ».

L'ouvrage de synthèse de l'abbé Lebeuf, *Histoire de la ville et de tout le diocèse de Paris* ; tome 3, apparaît également comme une source documentaire incontournable lorsque l'on travaille sur l'Histoire du bassin de Paris. La première édition a été publiée entre 1754 et 1757, mais c'est la version rectifiée et complétée par Fernand Bournon en 1890-1895 qui est disponible en ligne sur le catalogue numérisé de la BNF, Gallica. Pour autant, la description faite de la vallée de la Mérançaise renseigne sur son état au XVIII^{ème} siècle, ce qui correspond à l'une des plus anciennes visions de la vallée que l'on est pu retrouver.

Quelques informations éparses sur notre terrain d'étude ont pourtant pu y être relevées, de même que dans des travaux de recherches antérieurs (Evrard, 1933 ; Gaudin, 1963 ; Stephan, 2007 ; Robaglia, 2009 ; Valentin, 2011 ; Fekih, 2016 ; Vanneste, 2017)

1.5. Regard critique sur la documentation historique

Si les documents historiques que nous avons utilisés dans notre étude couvrent une période large, du XVII^{ème} au XX^{ème} siècle, une grande majorité d'entre eux concernent le XIX^{ème} siècle et le début du XX^{ème} siècle. Le caractère prolix de cette période pose question. Il faut être prudent et critique vis-à-vis de la production des données historiques de cette époque car leur nombre plus important pourrait laisser penser qu'il reflète uniquement un essor de l'exploitation hydraulique des petites rivières non navigables. Il est plus probable que le manque de données antérieures soit plutôt le fait de problèmes de conservation et de transmission de ces dernières qu'à une réelle absence de production de la donnée. Cette production plus importante pour le XIX^{ème} siècle témoigne de deux aspects : (i) une volonté nationale de maîtriser la ressource en eau, d'en contrôler les usages sur l'intégralité du réseau hydrographique (Barraud, 2007; Cador et Lespez, 2012). C'est durant cette période que les rivières ont été réglementées, imposant ainsi une procédure réglementaire concernant l'entretien du lit et des berges, les conditions d'écoulement et l'exploitation des usines hydrauliques. (ii) En résulte une bureaucratisation exacerbée, avec une production plus importante de documents, mais aussi une ambition de conserver et d'archiver ceux-ci. Les rapports des ingénieurs sont ainsi recopiés en plusieurs exemplaires et envoyés pour conservation à différents services de l'État (Préfecture, mairie, ministère de tutelle).

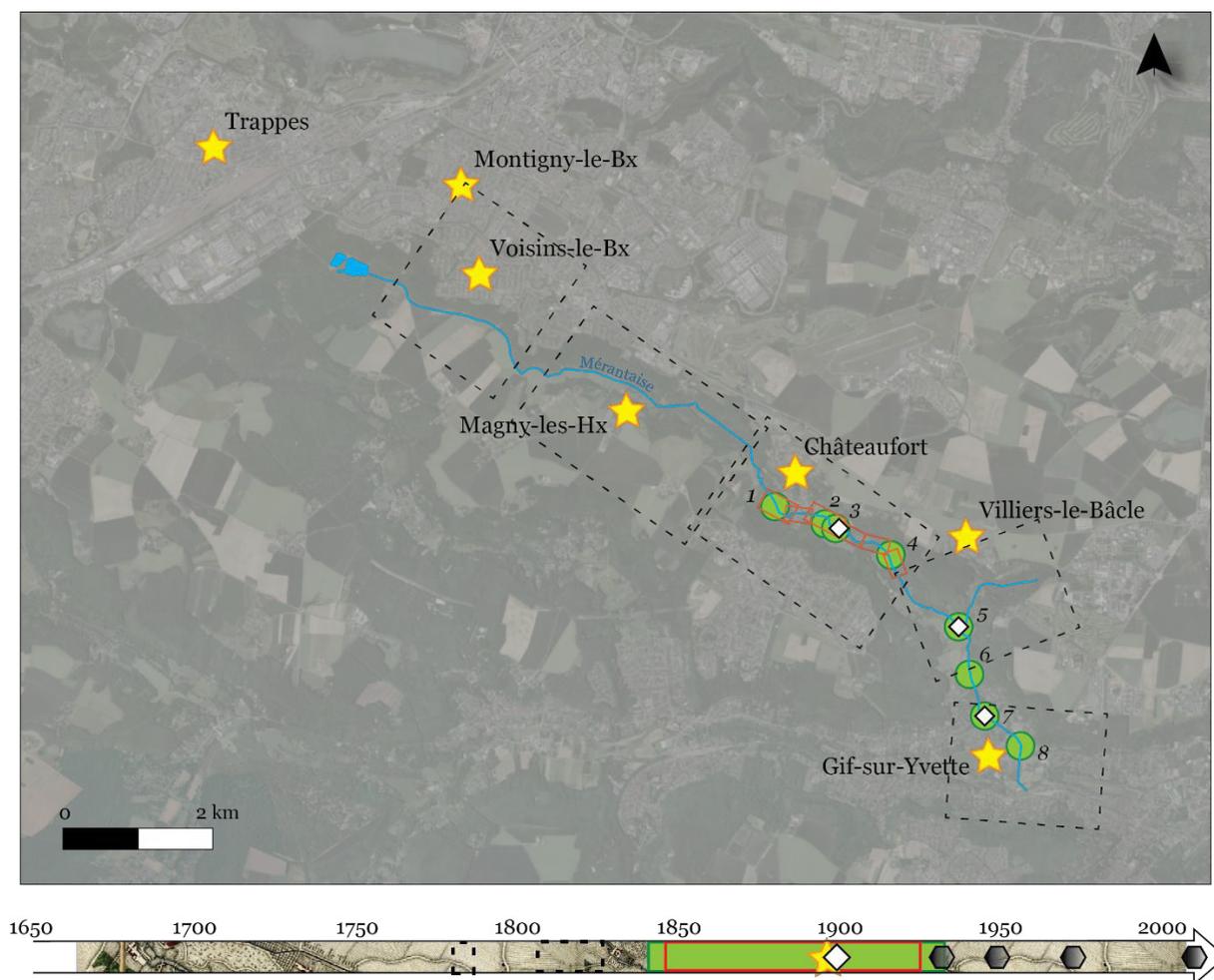
Par ailleurs, le caractère lacunaire de la documentation historique est en partie dû aux conditions de conservation des archives. En effet, dans le cas de notre site d'étude, un certain nombre des documents historiques (renseignant bien souvent de petits travaux menés localement) a disparu, été jeté ou détruit car ne représentant pas d'intérêt à être conservé à l'époque. C'est le cas des archives détenues par le SIAHVY qui ont, pour partie, été jetées lors d'un rangement (communication privé par le service milieu naturel et prévention des inondations). De la même manière, des documents détenus par le PNR HVC ont été perdus à l'occasion du déménagement des services du Parc, du moulin d'Ors à Châteaufort au Château de la Madeleine à Chevreuse. Enfin, la ville de Châteaufort a fait le choix de conserver ses archives communales et de ne pas les déposer aux Archives Départementales des Yvelines. Pourtant, leur accessibilité est très limitée voire impossible car elles sont en cours de récolement, inventaires et rangements depuis plusieurs années, sans possibilité de consultation. Il existe donc sûrement des documents auxquels nous n'avons pu avoir accès durant ce travail de thèse et qu'il serait intéressant d'exhumer une fois ce travail d'inventaire et de classement effectué par l'archiviste de la commune.

1.6. Éléments de synthèse sur la documentation historique

Ainsi, le corpus documentaire utilisé pour l'analyse quantitative et qualitative de la trajectoire historique de la Mérantaise et de son bassin versant se compose de données de nature et d'origines

variées : cartes anciennes générales, plans locaux, profils topographiques, photographies aériennes, diagnostics anciens, issus tantôt des services administratifs de l'état, tantôt d'études anciennes. Les différentes sources historiques ont été croisées, comparées, vérifiées les unes par rapport aux autres afin d'identifier les différentes phases d'occupation du chenal et du bassin versant de la Mérantaise.

La carte suivante (**Figure 3.10**) propose une synthèse des différents documents historiques exploités dans ce travail de recherche et les replace chronologiquement les uns par rapport aux autres.



Données cartographiques

-  Cartes anciennes
-  Cadastres napoléoniens et plans d'intendances
-  Plans locaux (en partie issus des dossiers administratif des Ponts-et-Chaussées)
-  Campagnes de photographies aériennes

Sources écrites

-  Monographies communales
-  Dossier administratifs des Ponts-et-Chaussées (rapports, enquêtes statistiques, ...)
-  Cartes postales anciennes

Figure 3.10 : Localisation des données historiques locales disponibles et consultées renseignant sur les aménagements de la Mérantaise et de son bassin versant. Ne sont localisés sur la carte que les plans locaux. Les cartes générales et les photographies aériennes recouvrant toute la zone d'étude. Les numéros correspondent aux aménagements cités dans les archives administratives des Ponts et Chaussées 1. Moulin de la Geneste ; 2. Moulin d'Ors ; 3. Domaine d'Ors ; 4. Moulin des Vassaux ; 5. Moulin Neuf ; 6. Moulin Aubert/de la Tuilerie ; 7. Moulin de Chamort ; 8. Moulin de Gibeciaux. La frise permet de resituer la chronologie et la nature des documents disponibles.

2. Caractérisation de l'état hydromorphologique actuel de la Mérintaise

Outre la trajectoire passée de la Mérintaise, nous avons cherché à caractériser son état morphologique et son fonctionnement hydrosédimentaire actuels. Ces aspects ont été essentiellement abordés grâce un travail conséquent de relevés de terrain. Des mesures systématiques permettant d'identifier et caractériser les conditions hydromorphologiques de la rivière ont été effectuées durant 3 ans de suivi, de 2012 à 2015. Une partie non négligeable des relevés de terrain à consister à établir l'état des lieux des conditions hydromorphologiques actuelles de la Mérintaise (géométrie, obstacles à l'écoulement, contraintes latérales, ...). Par ailleurs, une approche comparative entre les données historiques et les données de terrain a également été menée pour quantifier les évolutions récentes des ajustements morphologiques de la Mérintaise.

2.1. Établissement d'un état des lieux des conditions hydromorphologiques de la Mérintaise

Le chenal de la Mérintaise a été arpenté d'aval en amont, sur la quasi-totalité du linéaire (Figure 3.1) afin de relever de manière systématique la **géométrie du lit**, les **faciès d'écoulement**, le **substrat**, les **marques d'incision et d'érosion**, et tout **point remarquable** participant du fonctionnement hydrosédimentaire actuel de notre site d'étude (apports latéraux, protections de berge et obstacles à l'écoulement).

Chaque élément notable a été relevé au GPS à main (GARMIN – GPSMAP 64). La localisation des points GPS est à relativiser avec une marge d'erreur moyenne de 3 à 5 m, du fait du caractère boisé de la vallée. Une meilleure précision de localisation (de 2 à 3 m en moyenne) a été possible dans les secteurs à découvert (une partie du ru de la Gironde, les Prés Bicheret, la Garenne, la Petite Barrerie, le domaine de la Tuilerie, une partie de Gif-sur-Yvette). L'identifiant du point GPS a été scrupuleusement noté et le détail de ce à quoi il se rapportait précisé systématiquement. Les données de géométrie du lit, les dimensions des ouvrages ou des différents éléments spécifiques (longueur des protections de berges, ...) ont été mesurées à l'aide d'un bâton de 2 m, gradué tous les dix centimètres

2.1.1. Géométrie du lit : marques d'incision, d'érosion latérale et marques d'affouillement des berges ou des ouvrages latéraux

Il s'agissait principalement de faire l'inventaire des secteurs pour lesquelles une incision, une érosion latérale du chenal ou encore un affouillement d'ouvrages étaient remarquables. Ces paramètres ont été identifiés visuellement. La géométrie du lit a été mesurée à chaque changement de faciès d'écoulement, lorsque le chenal changeait de dimension (largeur, profondeur) et que le fond du lit

changeait de contexte (zone de blocs, d'alternance seuils et de mouilles, d'ensablement). L'érosion des berges a été relevée dès que des traces de mobilisation de la berge, fraîches ou plus anciennes, étaient identifiables. Des « cicatrices » apparentes de la berge et des blocs de matériaux érodés tombés en pied de berge, des racines d'arbres apparentes, des arbres déstabilisés, une banquette de végétation qui surplombe la rive sont autant de marques témoignant d'une érosion potentielle. D'autre part, nous avons distingué ce qui semblait relever d'une érosion active ou potentielle des berges, selon l'état et les traces d'érosion observés (**Figure 3.11.a. à d.**). La rive, ou les rives, concernée(s) ainsi que la longueur de l'érosion active ou potentielle des berges ont été systématiquement identifiées par un point GPS amont et un point GPS aval. Lorsque l'érosion était locale, un seul point GPS était relevé.

Les marques d'affouillement²⁹ des berges ou des ouvrages latéraux ont été identifiées et localisées selon les mêmes procédés (**Figure 3.11.e.à h.**). Ces affouillements sont les témoins d'une dynamique d'incision et d'élargissement du lit.

²⁹ Nous considérons comme affouillement toute trace de creusement au niveau d'une structure (berge ou ouvrage latéral) se produisant sous l'action du courant et pouvant la déstabiliser.



Figure 3.11 : Exemples de traces d'érosion de berge active (a., b.) ou potentielle (c., d.) ; ainsi que d'affouillement de berge (e.) ou d'ouvrages latéraux (f., g., h.). (Crédits photo : M. Jugie)

2.1.2. Les protections de berges

Les protections de berges sont une source importante de perturbations du fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau car elles contraignent partiellement le phénomène naturel d'érosion des berges. Pour chaque protection de berge, quatre informations ont été relevées : (i) le type et l'état de la protection de berges, (ii) la rive concernée (rive droite ou rive gauche), (iii) la hauteur de la protection (en cm), et enfin (iv) la position du début et de la fin de la structure lorsque celle-ci est mesurée plus d'un mètre de long. Deux types de protection de berge ont été identifiés :

- Les protections de berges anthropiques : elles sont particulièrement contraignantes vis-à-vis des dynamiques fluviales. Elles peuvent se trouver sous différentes formes : enrochements (gros blocs ou petits blocs, comme les gabions) ; murets, généralement cimentés ; protections en bois, en plus ou moins bon état ; en enfin les protections de berges en tôle (**Figure 3.12. a à d**).
- Les protections de berges « naturelles » : elles correspondent à une forte végétalisation des berges ou à la présence de racines d'arbres riverains empêchant toute érosion latérale (**Figure 3.12. e. et f.**).



Figure 3.12 : Exemples de protections de berges anthropiques (a. blocs, b., muret et bois, c., gabions, d. tôle) et « naturelles » (e., racines, f. végétation dense). (Crédits photo : M. Jugie)

2.1.3. Les affluents, les buses et les drains des rejets du réseau de drainage artificiel

Deux principales sources d'apports latéraux (liquides et solides) à la rivière ont été identifiées. Il s'agit d'une part des « affluents » (**Figure 3.13, a à c**) : soit, les rares affluents de la Mérantaise dont l'origine n'est pas toujours naturelle ou tout du moins une conséquence de forts ruissellements de versant (ravines), les ruissellements de sources (nombreuses au niveau des versants nord), ou encore des affluents alimentés par les bassins de rétentions (comme le Canal en rive gauche, s'écoulant depuis le bassin d'orage de Villiers-le-Bâcle, ou le rû de l'Aigrefoin alimenté en rive droite par le bassin du Buisson drainant le quartier du Cressely).

D'autre part, les buses et les drains artificiels, exutoire du réseau de rejets urbains et agricoles du bassin versant, sont une deuxième source d'apports latéraux (**Figure 3.13, d. à g.**). Ils permettent une continuité hydraulique entre le réseau de drainage artificiel et la rivière. Nous avons ainsi distingué les buses en bétons, constituant généralement la sortie du réseau d'assainissement des eaux pluviales rejetées dans la Mérantaise ; les tuyaux de jardins, drainant les jardins dans les parties urbanisées du fond de vallée, souvent de petits diamètres et en plastique ; et les drains agricoles actifs drainant principalement les zones humides du fond de vallée.

Pour chaque buse ou drains identifiée, quatre informations ont été relevées : le type de buse/drain, la rive d'implantation des buses (droite ou gauche), l'état de la buse (en état ou obstruée), et enfin le diamètre de la buse (en cm).



Figure 3.13 : Exemples d'affluents (a. fossé ; b. ruissellement de sources des versants ; c. ravines) et de buses et drains artificiels (d. et f. exutoires du réseau de drainage des eaux pluviales urbaines ; e. tuyaux de jardin ; g. buse obstruée). (Crédits photo : M. Jugie)

2.1.4. Les obstacles à l'écoulement

Enfin, les obstacles à l'écoulement constituent la dernière catégorie de paramètres relevés durant cet état des lieux des conditions hydromorphologiques de la Méranlaise. Nous avons fait le choix de ne considérer que les ouvrages anthropiques, les seuils en rivière, qui composent les obstacles les plus évidents. Il s'agit bien souvent d'ouvrages hydrauliques tels que les anciennes chutes de moulin, de lavoir et de vannes, les fonds des ponts ou autre ouvrage en travers qui ont été bétonnés et qui sont surélevés par rapport au fond du lit (**Figure 3.14**). Ils peuvent être constitués de différents matériaux : béton, pierres, gros bloc ou bois. Outre la nature de la construction des seuils, le critère de « franchissabilité » des ouvrages en travers par les sédiments ou les espèces piscicoles est renseigné à chaque fois. Elle reste indicative pour les espèces piscicoles (truites *Fario* sur la Méranlaise) car notre propos se concentre essentiellement sur les enjeux hydromorphologiques des obstacles à l'écoulement. Les trois seuils de franchissabilité des ouvrages considérés ici sont précisés dans le **Tableau 3.5**.

Hauteur du seuil incriminé	Critère de « franchissabilité »
<50 cm	Franchissable
Entre 50 et 100 cm	Partiellement franchissable
>100 cm	Infranchissable

Tableau 3.5 : Critères de « franchissabilité » d'un seuil retenu, selon la hauteur de l'ouvrage en travers



Figure 3.14 : Exemples d'obstacles à l'écoulement. a. chute du moulin d'Ors à Châteaufort ; b. système de vannage dans le parc du CNRS de Gif-sur-Yvette ; c. petit seuil anthropique constitué de blocs de pierres ; d. Section du collecteur d'eaux usées de la vallée de la Méranlaise traversant la rivière. (Crédits photo : M. Jugie)

2.1.5. Synthèse des éléments relevés lors de l'état des lieux des conditions hydromorphologiques de la Mérantaise

L'ensemble des données localisées par GPS durant cet état des lieux a été intégré dans un système d'information géographique (SIG), sous formes de base de données. Les SIG ont notamment permis une visualisation des données à différentes échelles d'analyse. Certaines données chiffrées ont permis de quantifier les modifications récentes et les traces d'altération du chenal de la Mérantaise. Le tableau suivant (**Tableau 3.6**) récapitule les différents paramètres relevés de manière systématique dans le lit de la rivière lors de l'état des lieux des conditions hydromorphologiques actuelles de notre site d'étude.

Paramètres généraux	Catégories	Format SIG	Sous-catégories 1	Sous-catégories 2	
Géométrie du lit	Incision	Polyligne	Largeur à plein bord (cm)	Rapport largeur/profondeur	
			Profondeur à plein bord (cm)		
	Changements de faciès	Polyligne	Alternance seuil/mouille		
			Zones de blocs ou d'ensablement		
Érosion de berge et affouillements	Érosion de berge et affouillement des berges ou d'ouvrages latéraux	Polyligne	Érosion active		
			Érosion potentielle		
			Berge affouillée		
			Ouvrage latéraux affouillés	profondeur affouillement	
			Rive	Rive droite Rive gauche	
Apports latéraux	« Affluents »	Point	Ruisseau	Observations (origine : sources, bras secondaires, ... ; granulométrie, ...)	
			Ruissellement		
			Ravines		
	Buses	Point	Type de buse	Buse	
				Tuyaux jardin	
				Drain agricole	
				Drain agricole ancien	
				État de la buse	En état Buse obstruée
				Diamètre de la buse (cm)	
			Rive des apports latéraux	Rive droite Rive gauche	

<u>Protections de berge</u>	Protections de berge	Polyligne	protections naturelles	Végétation
				Racines
			Protections anthropiques	Enrochement
				Gabions
				Muret
				Bois
				Tôle et divers
			Rive	Rive droite
				Rive gauche
			Début/fin protection	Début protection
Fin protection				
Hauteur protection (cm)				
<u>Obstacles à l'écoulement</u>	Obstacles à l'écoulement (soit obstacles en travers)	Point	Seuil anthropique	Pierres ou blocs
				Béton
				Bois
			Effet retenue en amont du seuil	
			hauteur du seuil (cm)	
			Franchissabilité du seuil, par les poissons et par les sédiments	Franchissable
				Partiellement franchissable
infranchissable				

Tableau 3.6 : Tableau de synthèse récapitulant les différents paramètres relevés lors de l'état des lieux du fonctionnement hydromorphologique de la Mérantaise

2.2. Méthodes de mesures et quantification des évolutions morphologiques

Différents paramètres caractéristiques de la géométrie hydraulique et des évolutions morphologiques de la rivière ont été analysés : la largeur et la profondeur du lit, témoins d'éventuelles dynamiques d'incision et d'érosion latérale.

La géométrie du lit a été déterminée à partir d'une centaine de profils en travers, en partie réalisés par nous-même au télémètre laser (Trimble LaserAce 1000) ou d'un tachéomètre (topcon, GPT 9003A). La majorité d'entre eux nous a été fournie par le SIAHVY et ont été réalisés en 2010 par un bureau d'étude, à l'occasion d'une étude des conditions hydrologiques de la Mérantaise, commandée après l'épisode d'inondations de 2007 qui a profondément marqué les esprits. Par ailleurs, une analyse

diachronique entre deux profils en long (et 31 profils en travers), l'un des années 80 (fourni par le SIAHVY) et l'autre relevé en 2015 par des étudiants géomètres de l'ESGT (École Supérieure des Géomètres et Topographes), a permis de quantifier les évolutions verticales et latérales de la géométrie du chenal de la Mérantaise sur plus de 2 km, entre Châteaufort et le moulin Neuf. Le détail de ces données et de leur traitement sera développé dans le chapitre 7 de ce manuscrit, consacré aux conditions morphologiques actuelles de la rivière et de leurs évolutions récentes.

Un suivi de l'érosion des berges a également été mené au niveau de six sites répartis tout le long du linéaire. Ce travail a fait l'objet d'un article publié en juin 2018 dans la revue *Journal of Hydrology* (Jugie et al., 2018). Là encore nous renvoyons le lecteur au chapitre 7 pour le détail de la méthode et des approches utilisées.

2.3. Méthodes de mesures et quantification du fonctionnement hydrosédimentaire

2.3.1. Analyse du régime hydrologique

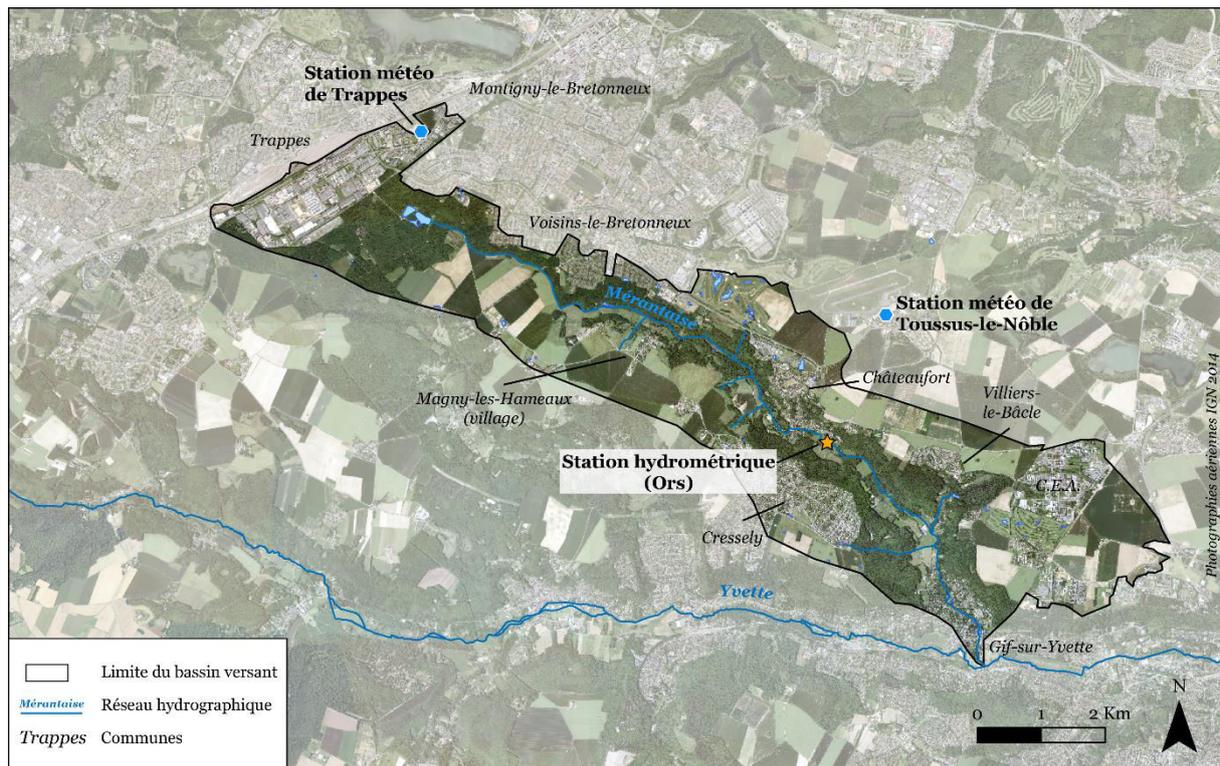


Figure 3.15 : localisation de la sonde hydrométrique implantée à Ors et les stations météorologiques de Trappes et Toussus-le-Nôble.

Le régime hydrologique est l'un des facteurs de contrôle des ajustements morphologique observés dans le bassin versant. Les débits de la Mérantaise ne faisaient jusque-là l'objet d'aucun suivi

précis en continu et n'a pas été équipée d'une station de mesure des hauteurs d'eau du réseau national suivi par les DREAL. La station hydrométrique la plus proche se trouve en aval, sur l'Yvette, à Villebon-sur-Yvette, dans un contexte beaucoup plus urbain.

Afin de palier ce manque de données hydrologiques, une sonde de hauteurs d'eau a été implantée par nos soins dans la partie médiane du linéaire, à Ors (**Figure 3.15**). Cet équipement est constitué d'une sonde Mini-DIVER immergée (DI501, par Schlumberger) mesurant la pression de la colonne d'eau au-dessus d'elle et la température de l'eau, et d'une sonde Baro-DIVER (DI500) nécessaire pour la compensation barométrique des données de pression enregistrées par la sonde Mini-DIVER immergée (**Figure 3.16**). Le dispositif enregistre les hauteurs d'eau de la Mérantaise tous les quart d'heure, depuis mars 2012.

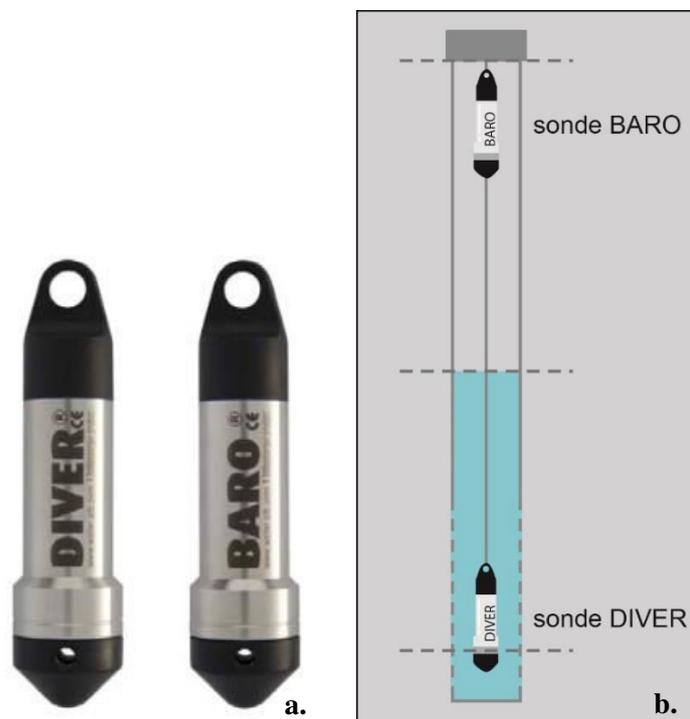


Figure 3.16 : Sondes Mini-Diver et Baro utilisées pour l'enregistrement des données de hauteur d'eau (a.) et illustration du dispositif (b.)

Les conditions météorologiques (précipitations et températures) ont été également suivies et examinées durant notre travail de terrain. Elles ont été fournies gratuitement par les services de Météo France, à pas de temps horaire. Nous avons principalement exploité les données climatiques de la station de l'aérodrome de Toussus-le Nôble, située sur le plateau de Saclay à 2.5 km au nord de la Mérantaise, au droit de Châteaufort (**Figure 3.15**). Il existe également une station météorologique à Trappes, au nord-ouest de la tête de bassin de la Mérantaise. Cependant, après observations sur le terrain et des données climatiques, cette station nous a semblé moins représentative des conditions météorologiques de la vallée de la Mérantaise. Concernant les valeurs de températures, celles enregistrées dans le fond

de vallée sont un peu différentes de celles relevées à la station météorologique de Toussus-le Nôble. Nous les avons donc considérées avec précautions lors de leur exploitation.

2.3.2. Détermination de la capacité de transport de la charge sédimentaire.

La capacité de transport de la charge sédimentaire de la Mérantaise a également été déterminée afin de mieux comprendre le fonctionnement hydrosédimentaire de la rivière. Nous avons concentré notre analyse sur le transport potentiel de la charge grossière grâce l'utilisation de traceurs sélectionnés *in situ* et représentatifs de la distribution granulométrique des sédiments en place sur les seuils naturels (*riffle* ou radier selon la classification de Malavoi, 1989) et de la dynamique de transport solide du cours d'eau (Billi et Paris, 1992). Plus d'une centaine de particules ont été prélevées afin de minimiser les pertes inévitables d'une partie des particules. Ces traceurs ont été échantillonnés dans le lit de la rivière sur 6 radiers après une caractérisation de la distribution granulométrique de surface du fond du lit selon la méthode de Wolman (*grid sampling*, 1964). Ils ont été prélevés, mesurés (axe b), puis peints et réinjectés sur leur seuils de prélèvement (**Figure 3.17**. Seules les particules ayant une taille suffisante pour être visuellement détectables ont été prélevées.

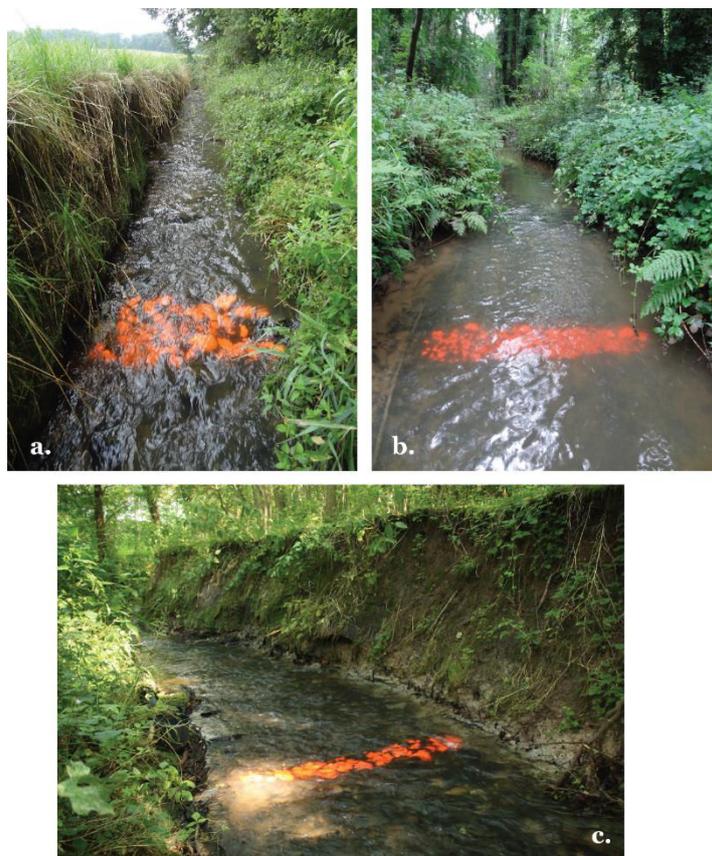


Figure 3.17 : Trois exemples de sites de suivi de la mobilisation de la charge de fond de la Mérantaise (a. Site 1 ; b. Site 2 ; c. site 6). Réinjection et calage des particules après avoir été peintes.

Un suivi de la mobilisation de ces particules a ensuite été effectué après quasi chaque épisode de crues, entre 2013 et 2014. Les traceurs peints étaient systématiquement recherchés, leur diamètre et la distance parcourue par les particules mobilisées ont été relevés quand cela était possible (**Figure 3.18**).

Cette technique est très souvent utilisée par les scientifiques en hydromorphologie, malgré le fait qu'elle surestime légèrement la mobilisation de la charge de fond et déstructure les radiers au moment du prélèvement des particules à peindre. Lors de la réinjection des cailloux, malgré un effort de reconstitution d'un effet de pavage, la structure du substrat reste faussée.



Figure 3.18 : Suivi de la mobilisation de la charge de fond sur un des sites équipés. a. au moment de la réinjection ; b. à l'occasion du relevé de la mobilisation des traceurs.

Partie 2. HISTORIQUE DES AMÉNAGEMENTS ET « DÉSAMÉNAGEMENTS » DE LA MÉRANTAISE

Chapitre 4 : Phase 1 : le temps fort des aménagements hydrauliques (XVII ^{ème} -XIX ^{ème} siècle)	p.145
Chapitre 5 : Phase 2 : Déprise de la petite hydraulique et réponses du bassin versant (fin XIX ^{ème} -début XX ^{ème} siècle)	p.197
Chapitre 6 : Phase 3 : Une urbanisation massive et récente (1950-2015)	p.215
Synthèse : Reconstitution de la trajectoire historique de la Mérantaise. Héritages des différentes phases d'aménagements	p.229

Les paysages et le fonctionnement de la vallée de la Mérantaise sont marqués par une histoire ancienne qui a progressivement, mais profondément transformé le territoire en fonction des pratiques et usages des sociétés riveraines.

Ainsi, trois grandes phases d'aménagements, caractérisant la trajectoire historique de la Mérantaise, ont été identifiées :

- (1) La première période, courant du XVII^{ème} siècle à la fin du XIX^{ème} siècle, est marquée par la multiplication des aménagements hydrauliques en tout genre – moulins, lavoirs, ponts, ... – avec une concentration des activités en fond de vallée. Cette première époque est considérée comme le « l'âge d'or » de la meunerie³⁰ (Barraud, 2007; Melun, 2012).
- (2) De la fin du XIX^{ème} siècle à la première moitié du XX^{ème} siècle, on assiste à une déprise hydraulique précoce de la Mérantaise qui se caractérise par l'abandon progressif des ouvrages hydrauliques du chenal. Le bassin versant commence petit à petit à évoluer en réaction à la fin de cette activité meunière, mais sans changements significatifs dans un premier temps.
- (3) Enfin, à partir de la seconde moitié du XX^{ème} siècle, et plus particulièrement des années 70-80, d'importants changements dans le mode d'occupation du sol viennent bouleverser les paysages du bassin versant et le fonctionnement du fond de vallée. En effet, cette troisième période est notamment marquée par un développement massif et rapide de l'urbanisation en réponse aux politiques publiques d'aménagement du territoire (Villes-Nouvelles). Cette expansion urbaine se fait au détriment des surfaces agricoles qui se retrouvent réduites mais où l'activité devient intensive. De plus, elle s'accompagne d'une intensification du réseau de drainages artificiels, avec toutes les modifications sur le régime hydrologique que cela peut entraîner : accélération et concentration du ruissellement urbain, augmentation de la fréquence et de l'intensité des crues morphogènes (Gregory et al., 1992; Chin, 2006; Salavati et al., 2015; Schmitt et al., 2016).

Nous précisons tout de suite au lecteur que nous désignons chaque phase comme une étape « d'aménagement » de la rivière, y compris la deuxième phase marquée plutôt par un délaissement des ouvrages hydrauliques et une déconnexion des biefs artificiel perchés sur les versants. Nous considérons, en effet, que toutes les opérations anthropiques sur le cours de la rivière participent d'une logique d'aménagements, répondant à des besoins sociétaux spécifiques à une époque donnée.

³⁰ Il s'agit en réalité du deuxième « âge d'or » de la meunerie puisque la première phase de développement important des aménagements hydrauliques remonte à la période médiévale, entre le XI^{ème} et le XIII^{ème} siècle (Melun, 2012).

Intérêt et enjeux d'une étude rétrospective

Le postulat de départ de notre réflexion est que le fonctionnement hydrosédimentaire actuel de la Mérintaise est la conséquence du forçage anthropique induit par plusieurs générations d'aménagements hydrauliques (Barraud, 2004; Gregory, 2006; Lespez et al., 2017). Exploitée pendant plusieurs siècles pour son énergie, sa valeur paysagère et sa valeur agricole, les formes et les processus que l'on observe aujourd'hui dans la vallée sont le reflet de cet héritage passé. C'est d'ailleurs l'abandon des infrastructures hydrauliques et les volontés de restauration de la continuité écologique qui, dans une certaine mesure, mettent en évidence l'importance de leur impact sur les dynamiques hydrosédimentaires des cours d'eau (Beauchamp et al., 2017b).

Dans cette perspective, il s'agit ici de mieux connaître le passé de la rivière, et en particuliers l'histoire des aménagements anciens qui ont laissé une trace indélébile aussi bien dans le chenal que dans le bassin versant. Leur emprise spatiale a changé au cours du temps et leurs conséquences en termes de dynamiques hydrosédimentaires se sont imprimées en couches successives, tel un palimpseste.

S'inscrivant dans la lignée de nombreux travaux cherchant à reconstituer sur le long terme, ou le temps historique, la trajectoire évolutive des rivières (Arnaud, 2012; Beauchamp et al., 2017b, 2017a; Gregory, 2006; Gurnell et al., 2003; Lespez, 2012; Melun, 2012; Rollet, 2007), nous proposons ici une étude rétrospective de l'histoire de la vallée de la Mérintaise. En effet, la compréhension des dynamiques fluviales passées et actuelles permet d'avoir une vision intégrée du fonctionnement hydromorphologique de la rivière étudiée ; ce qui est essentiel lorsque des projets de restauration de la continuité écologique sont envisagés (Walter et Merritts, 2008; Wohl et al., 2015, 2005; Wohl et Merritts, 2007).

Nous avons, par ailleurs, délibérément choisi de nous appuyer en partie sur les recherches scientifiques effectuées dans le contexte ouest-français, par certains auteurs clés, à savoir Régis Barraud, Laurent Lespez et Marie-Anne Germaine. Leurs travaux de synthèse sur la détermination de la trajectoire évolutive des vallées « ordinaires », historiquement aménagées, font en effet référence dans le domaine (Barraud et Germaine, 2017; Lespez, 2012; Lespez et al., 2015, 2005). De plus, malgré une évolution différenciée pour les périodes les plus récentes, le contexte normand présente de fortes similitudes avec celui de la Mérintaise.

Rappel des échelles d'analyse

Du fait de son caractère géohistorique, la présente étude a été faite à des échelles spatiales et temporelles multiples. Par définition, l'analyse du fonctionnement passé de la Mérintaise se mène dans le temps. Cependant, la délimitation temporelle considérée dans ce travail doctoral est arbitraire puisque

les premiers aménagements hydrauliques et les usages identifiés dans le bassin de la Mérintaise sont évidemment antérieurs au XVII^{ème} siècle. Elle correspond, en réalité, à la période la plus lointaine pour laquelle nous avons pu recueillir des données historiques suffisamment précises et fiables. Ainsi, la chronologie choisie ici s'inscrit dans une Histoire récente, mettant sciemment de côté les aspects concernant le temps long (Holocène). Il s'agit de se concentrer sur les époques modernes et contemporaines, qui sont d'une part les mieux documentées, et d'autre part les plus significatives en termes d'aménagements hydrauliques de la rivière. Par ailleurs, ce choix chronologique permet d'interroger le devenir de systèmes techniques et de production révolus mais hérités dans les paysages actuels des vallées ordinaires (Le Cœur et Gautier, 2005; Barraud et al., 2013).

La reconstitution de l'évolution historique des aménagements et des paysages anciens a été menée à l'aide d'un corpus documentaire varié, regroupant des cartes ou plans anciens, des archives textuelles ou encore des données iconographiques (Chapitre 3). Bien que de nombreux éléments historiques aient été retrouvés, ils n'ont permis de combler que partiellement une connaissance jusque-là très lacunaire sur le passé de la vallée de la Mérintaise.

Enfin, nous n'oublions pas non plus qu'il s'agit en premier lieu d'une recherche en géographie. Aussi, notre objet d'étude relève-t-il également d'une dimension spatiale :

- **À l'échelle du tronçon**, afin d'identifier et caractériser l'implantation de chaque aménagement présent dans le chenal, puis à terme d'établir leurs conséquences sur le fonctionnement hydrosédimentaire passé de la Mérintaise ;
- **À l'échelle du linéaire**, afin d'avoir une vision d'ensemble des aménagements présents le long de la rivière et appréhender des tendances générales d'évolution, tant spatiales que temporelles ;
- **À l'échelle du bassin versant**, pour comprendre et analyser les tendances d'évolution du paysage en réponse aux pratiques et aux usages sur le territoire.

Organisation des chapitres

Cette deuxième partie s'organise autour de trois chapitres. Chacun d'entre eux explore l'une des trois grandes phases d'aménagements constitutives de la trajectoire historique récente de la Mérintaise. Ils permettent de mettre en parallèle les évolutions spécifiques au chenal et au bassin versant, mais aussi de mieux comprendre les liens nécessaires entre ces deux objets. Une synthèse clôturera cette deuxième partie. Elle sera l'occasion de mettre en parallèle les trois grandes phases historiques identifiées et d'interroger l'évolution du bassin de la Mérintaise au regard d'autres contextes géographiques, plus ou moins similaires (Normandie, Bourgogne, région lyonnaise).

Chapitre 4. PHASE 1 : LE TEMPS FORT DES
AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES (XVII^{ÈME}-XIX^{ÈME} SIÈCLE)

A. : Les aménagements hydrauliques, symboles de la maîtrise de l'eau	p.146
B. : Un bassin versant rural déjà fortement exploité	p. 186

Introduction

Comme tous les hydrosystèmes franciliens et plus généralement français, la Mérintaise n'a pas échappé à l'exploitation hydraulique de son cours par les sociétés riveraines. Bien que l'anthropisation de la rivière se soit accélérée et intensifiée au cours du XIX^{ème} siècle, les périodes précédentes sont tout autant marquées par un aménagement systématique des fonds de vallée, quoi que plus modeste. Ainsi, cette première phase correspond à un « âge d'or » de l'anthropisation de la Mérintaise. C'est au cours de celle-ci que la grande majorité des ouvrages ont été implantés et que son énergie hydraulique a été le plus exploitée. Cependant, comme nous le verrons, la fin de cette phase s'avère complexe car la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle est marqué par le déclin précoce de la petite industrie hydraulique (Barraud, 2007; Barraud et al., 2013).

Aussi, pendant des siècles, l'essentiel de la vie des habitants des communes traversées par la Mérintaise se concentre dans les fonds de la vallée, les plateaux et les versants étant réservés la culture céréalière ou à l'élevage de chevaux dans le bas des versants (Ligonnière, 1991). C'est cette histoire de la vallée que nous tâcherons de reconstituer dans ce chapitre, à l'échelle du chenal dans un premier temps (A.), puis du bassin versant dans un deuxième temps (B.).

Pour cette « première » phase d'aménagements, courant – au moins – du bas Moyen-Âge au XIX^{ème} siècle, nous avons principalement exploité des documents textuels ainsi qu'un corpus important de cartes générales anciennes et de vieux plans locaux. Par ailleurs, certaines informations permettant de reconstituer le passé des aménagements de la Mérintaise ont été trouvées sur internet. Cependant, il manque bien souvent les sources pour les vérifier.

A. Les aménagements hydrauliques, symboles de la maîtrise de l'eau

Les premières traces d'aménagements hydrauliques dans le chenal de la Mérintaise remontent très certainement au début du Moyen-âge. Cependant, les premiers témoignages de leur présence à notre disposition remontent de manière fiable au XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles. Il est donc difficile de proposer une chronologie clairement établie pour les siècles antérieurs, faute de données. En effet, aucune archive ou autres éléments historiques retrouvés n'attestent de la date précise de construction des moulins ou encore de leurs éventuelles transformations pour les besoins de la modernisation des techniques hydrauliques. Seuls certains documents récents (XIX^{ème}-XX^{ème} siècles) permettent de connaître la fin de l'exploitation des moulins. Il en est donc de même pour le fonctionnement géomorphologique historique. Pour autant, l'étude croisée de différentes sources historiques permet de proposer une

évolution des aménagements présents dans le fond de vallée, du tracé de la rivière et du bassin versant de la Mérantaise.

Les aménagements hydrauliques recensés dans le chenal de la Mérantaise sont en grande majorité de modestes moulins implantés en dérivation. Ils suivent, en cela, le motif bief-moulin-seuil distingué par certains auteurs et qui constitue une véritable matrice paysagère de fond de vallée dans le contexte des rivières d'Europe de l'Ouest (Barraud, 2007; réadaptation du motif bief-moulin-chaussée). Ce sont donc des ouvrages complexes ne se limitant pas aux uniques bâtiments dédiés à la meunerie (bâtiment des machines). Ils sont également constitués d'ouvrages associés : les seuils, les vannes et les déversoirs. De la même manière, leur implantation dans le lit mineur des cours d'eau de petits gabarits a nécessité de nombreuses interventions sur le linéaire lui-même, d'où des travaux de chenalisation multiples : dérivation, rectification, protection de berges, ... Par ailleurs, les usines hydrauliques ne sont pas les seuls ouvrages présents dans le lit des rivières. D'autres infrastructures aux fonctions différentes, tels que les lavoirs ou les ponts sont également autant d'obstacles à l'écoulement à prendre en compte. Aussi ces différents types d'aménagements présents sur le cours de la Mérantaise seront donc présentés thématiquement comme suit :

- (1) les moulins, usines hydrauliques sur la Mérantaise, et leurs ouvrages associés ;
- (2) les ponts et les lavoirs
- (3) les travaux de chenalisation et d'entretien du lit et des berges ;

1. Les moulins de la Mérantaise et leurs ouvrages associés

1.1. Bref historique des moulins de la Mérantaise

Huit moulins à eau ont été successivement implantés sur le cours de la Mérantaise (**Figure 4.1**). Après avoir présenté chacun de ces ouvrages sous forme de brèves monographies en respectant leur répartition spatiale, d'amont en aval. (1.1.), nous détaillerons la mise en place chronologique de ces usines hydrauliques, sans oublier les ouvrages associés : seuils, vannes, déversoirs et chaussées (1.2. et 1.3.).

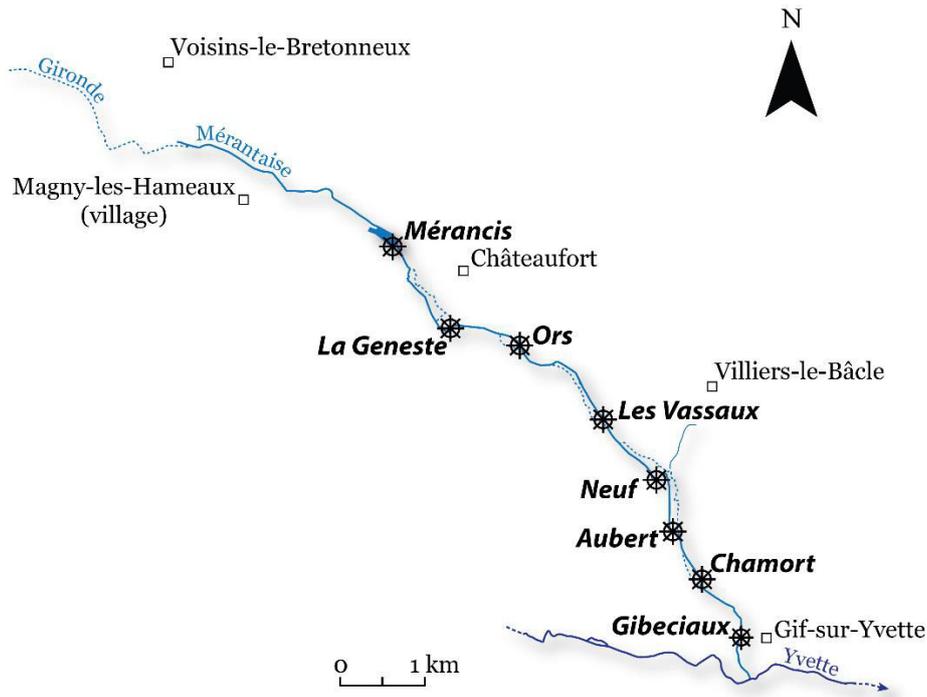


Figure 4.1 : Localisation des huit moulins de la Mérantaise

1.1.1. Moulin de Mérencis (ou Mérantaïs) (*commune de Magny-les-Hameaux*)

Il s'agit du moulin construit le plus en amont sur le cours de la Mérantaise (Figure 4.1), et certainement le moins connu car il n'en subsiste quasiment aucune trace dans le paysage du fond de vallée ou dans les archives.



Figure 4.2: Moulin de Mérencis, cartographié sur les minutes de la carte d'État-Major (1819-1821 ; Feuille 10 bis)

Pratiquement jamais représenté dans la documentation cartographique, seul un court article d'un historien local, Édouard Stephan, daté de 1989, témoigne de son existence passée. Aussi, bien qu'aucun document ne permette de faire remonter l'origine du moulin au-delà du début du XVII^{ème} siècle, l'auteur pose l'hypothèse que cette usine hydraulique a très certainement bénéficié de la restauration d'un des quatre étangs établis dans le fond de vallée au XVI^{ème} siècle (Stephan, 1989). En effet, jusqu'à l'abandon de la paroisse de Mérantaïs (ou Mérencis) au milieu du XV^{ème} siècle (lors de la Guerre de Cent ans), le

Le fond de vallée de Mérency était historiquement occupé par six étangs successifs probablement maintenus par des digues, entre « Vieil Brouessy et Mérency ». Ces derniers furent certainement les premiers aménagements implantés dans le fond de la vallée. En 1521, quatre étangs sont remis en état, tandis que les deux derniers sont devenus des pâturages et des bois³¹. Le moulin de Mérency a probablement été implanté au débouché d'un de ces étangs restaurés (**Figure 4.3**). La mention, semble-t-il, la plus ancienne du moulin remonte à 1645 et rapporte la « prisée » du moulin établie à l'occasion de l'entrée en fonction du nouveau meunier, Germain Button³². À cette occasion, le mécanisme du moulin y est décrit et notamment celui de la roue. Elle est alimentée par au-dessus (roue à augets) et mesure 3.20m de diamètre sur 56.7 cm de large. Une mention du moulin en 1655 précise que le moulin en fond de vallée fait partie du fief de Mérentais, possédé par « Messire Guillaume Le Roy, Abbé de Hautefontaine », au même titre qu'un hôtel seigneurial et deux fermes de 140 et 90 arpents. La propriété reste aux mains de notables et seigneurs de Mérency et Mérentais durant le XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècle, qui ont toujours loué le moulin à des meuniers (cf. registres paroissiaux). Aucun document n'atteste précisément de la fin d'activité du moulin. Cependant un descriptif du domaine daté du début de l'année 1802 prouve qu'il continuait à être loué et moudre jusqu'à 8 quintaux de blé par jour. Le meunier, M. Herzant, travaillait alors pour les particuliers de la région. Pourtant, le moulin ne figure plus dans l'état des moulins du canton établi par la Préfecture en 1809.

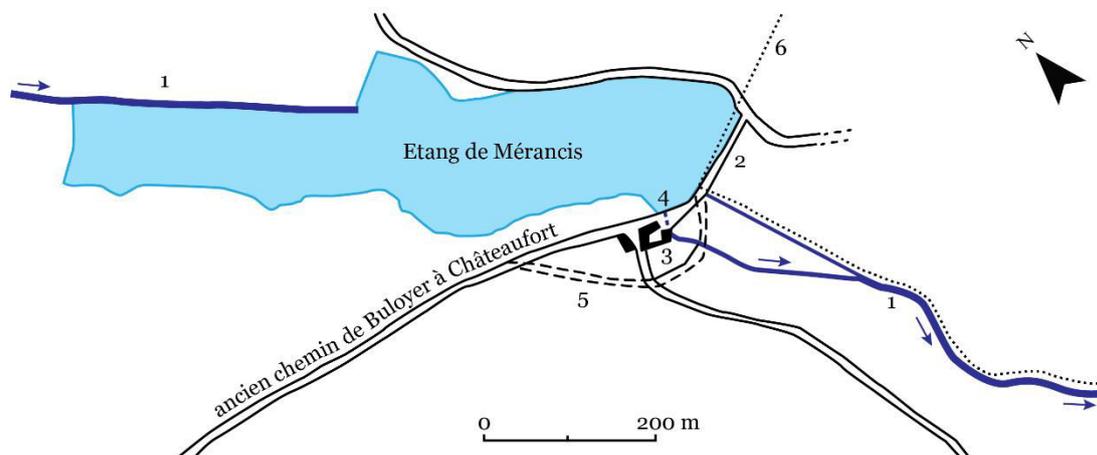


Figure 4.3 : Plan de situation du moulin et de l'étang de Mérencis en 1787, d'après le plan d'intendance de Magny-les-Hameaux (C247 ADY) (d'après Stephan, 1989, modifié). 1 : La Mérentaise ; 2. Chaussée de l'étang, dernier élément hérité encore perceptible dans le paysage aujourd'hui ; 3. Moulin et dépendances ; 4. Canal d'alimentation de la roue ; 5. Chemin actuel ; 6. Limites du finage entre Magny-les-Hameaux et Châteaufort.

Sa représentation cartographique assez rare témoigne peut-être de l'intérêt précocement limité de cette petite usine hydraulique dans l'histoire économique de la vallée. Le bâtiment du moulin est uniquement cartographié sur les minutes de la carte de l'État-Major de 1819 (**Figure 4.2**), sans que cela

³¹ D'après O. Tulipe, 1934. L'habitat rural en Seine-et-Oise. Essai de géographie du peuplement, Paris, page 82.

³² ADY. E6801 – n°93

n'assure de l'activité du moulin à cette époque. D'ailleurs, contrairement aux moulins dont l'activité est avérée pour cette époque, la roue de l'usine n'est pas figurée. L'étang semble, quant à lui, avoir perduré jusqu'au début du XX^{ème} siècle, avant de devenir une zone humide protégée. Aujourd'hui, seule la digue et le marais se distinguent sur le terrain au niveau du Bois des Roches, uniques héritages de ce moulin totalement disparu.

1.1.2. Moulin de la Geneste (*commune de Châteaufort*)

Le moulin de la Geneste fait partie du domaine du même nom (**Figure 4.4**). Il s'agit aujourd'hui de l'un des rares sites préservés de la vallée, dont on peut dater les origines à 1339 grâce à un acte de propriété aux noms d'un couple de bourgeois parisiens, Jacques Lenormand et Jacqueline Lemire³³. La première mention du moulin est, quant à elle, plus tardive puisque ce dernier est cité dans un acte notarial daté de fin 1554. À cette époque, le moulin existait déjà (mais depuis quand ?). Identifié sur tous les documents cartographiques, soit dès 1678, les fonds d'archives disponibles aux ADY pour le moulin de la Geneste courent de 1844 à 1860. Il est identifié sous deux noms différents : tantôt appelé moulin de la « Geneste », « Genète » ou « Genète », tantôt « moulin de la Maladrerie » (carte d'État-Major, 1819). Il a été réglementé par décret le 18 août 1850 (ADY – 7S 16).

Construit en dérivation sur le versant sud, le moulin est implanté sur l'une des rares sections de la Mérintaise aujourd'hui encore court-circuitées. Il est difficile de dater la fin d'exploitation du moulin. Cependant, l'« État statistique des établissements possédant des moteurs hydrauliques », daté du 31 décembre 1926 et qui est l'un des derniers inventaires d'activité des moulins, référence le moulin de la Geneste comme producteur d'électricité. Ainsi, après avoir été un moulin à blé pendant plusieurs siècles, il semble que celui-ci a été reconverti en petite usine hydro-électrique au début du XX^{ème} siècle. Un document daté du 9 septembre 1930 mentionne le moulin de la Geneste comme usine en activité. Pour autant, le bâtiment du moulin où se trouvait la roue n'existe plus. La résolution des clichés aériens de 1933 laisse planer le doute quant à sa destruction du bâtiment au début des années 1930. Il n'est en tout cas plus visible sur la série de photographies aériennes de 1949. L'« État statistique des irrigations et des usines sur les cours d'eau non navigables ni flottables » de 1885 précise que le moulin est alors détruit mais que la chute a été conservée.

³³ <http://domainedelageneste.com/fr/homepage/du-domaine/> et <https://www.parc-naturel-chevreuse.fr/le-parc-aire-protgeee/un-territoire-preserve-les-51-communes-du-parc/chateaufort> (consultés le 10/07/2017)

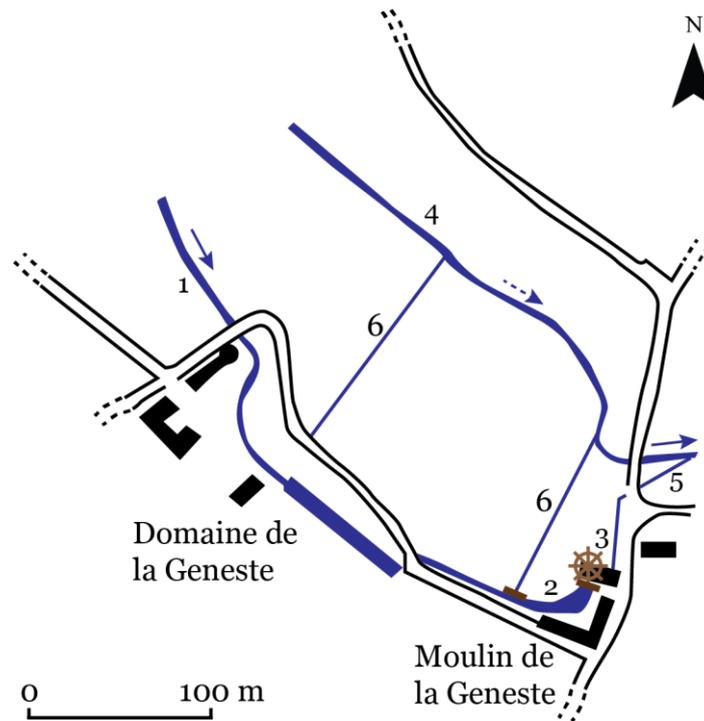


Figure 4.4 : Plan de situation du moulin et domaine de la Geneste (d'après la carte d'État-Major, 1819). 1. Bief perché ; 2. Canal d'amenée ; 3. Moulin (bâtiment des machines) ; 4. « Morte rivière », talweg ; 5. Canal de fuite ; 6. Bras de décharge alimentant la « morte rivière ».

1.1.3. Moulin d'Ors (*commune de Châteaufort*)

Il s'agit probablement du moulin le plus important de la Mérentaise car il constituait l'une des principales sources d'emplois de la vallée³⁴. Il est intimement lié au domaine du même nom auquel il appartient et dont il tire son toponyme. Ce domaine était situé sur le territoire de la puissante seigneurie de Châteaufort, dont il fut le plus imposant fief³⁵. De ce fait, la documentation historique – en particulier les sources textuelles – issue des archives départementales des Yvelines, y est plus abondante que pour les autres usines hydrauliques de la vallée. Pourtant, une partie des archives qui le concernent sont actuellement conservées dans les locaux de la mairie de Châteaufort et à la maison du PNR HVC mais n'ont pu être consultées, laissant présumer du potentiel encore exploitable en terme de connaissances sur le moulin et le domaine d'Ors. Par ailleurs, plusieurs études historiques existent déjà sur ces lieux (Stephan, 2007 ; Valentin, 2011 ; Dransart, 2013). Nous rapportons les lecteurs à ces travaux pour de plus amples informations concernant le domaine d'Ors. Quant à nous, nous nous intéresserons plus particulièrement au complexe du moulin comme héritage de l'aménagement hydraulique de la vallée de la Mérentaise (Figure 4.5).

³⁴ <http://www.siahvy.org/vallee-de-yvette/patrimoine-paysages/item/120-moulin-dors> (consulté le 10/07/2017)

³⁵ https://www.versaillesgrandparc.fr/uploads/tx_estiondoc/domainedors.pdf (consulté le 10/07/2017)

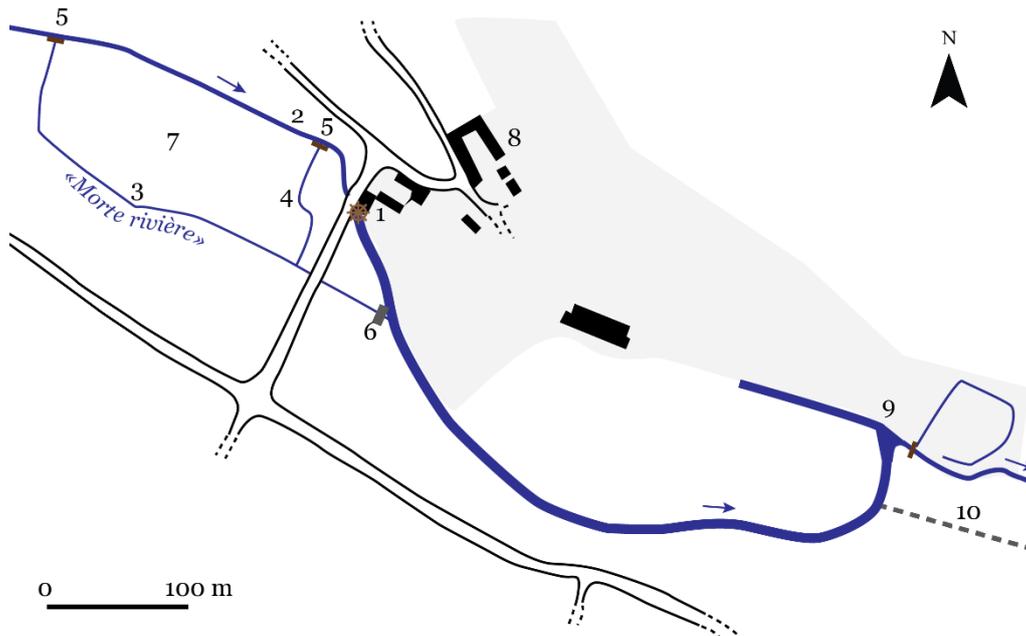


Figure 4.5 : Plan de situation du moulin et du domaine d'Ors (d'après la carte d'État-Major, 1819) 1. Moulin ; 2. Bief d'aménée du moulin, perché sur le versant ; 3. Bras de décharge, « Morte rivière » ; 4. Canal de décharge ; 5. Vannes de décharge ; 6. Seuil d'Ors ; 7. Prairie humide ; 8. Château (et jardins en grisé) ; 9. Pièce d'eau ; 10. Voûte (la « morte rivière » a été enterrée).

C'est un bail de location daté du 25 septembre 1651 qui mentionne pour la première fois le moulin à eau d'Ors. Les registres paroissiaux et quelques documents d'archives attestent de l'activité du moulin au XVIII^{ème} siècle et précisent qu'il assure un revenu au propriétaire de l'époque, Guillaume Desmoulins (Stephan, 2007). Une prisée datée du 12 janvier 1685 permet de savoir que la roue du moulin mesurait alors 3.41 m de diamètre (« dix pieds et demi ») et 0.65 m de largeur (« deux pieds ») et que le canal d'aménée était doté d'un déversoir (Dransart, 2013). Le moulin d'Ors est réglementé par décret le 9 octobre 1850. Les enquêtes statistiques sur les usines hydrauliques des petites rivières non navigables de 1885 et les plans contemporains des ingénieurs des Ponts et Chaussées décrivent la roue avec un diamètre de 4.04 m à la fin du XIX^{ème} siècle. Ce qui laisse présumer du changement du mécanisme du moulin à l'époque de l'industrialisation de la vallée (fin XVIII^{ème} – XIX^{ème} siècle), bien qu'aucun document retrouvé n'en fasse mention. En 1802, le moulin était exploité par un meunier, J.F. Gerles, qui pouvait moudre en moyenne 3 sacs de blé par jours, soit 500 kg de farine, et alimentait les particuliers de la région (AN – F20 294). Passé dans la main de différents propriétaires ayant chacun exécuté un certain nombre de travaux (vannes, déversoir, consolidation de berges, ...), il est acheté en 1850 par le Comte de la Roche-Lambert qui y fait installer une pompe d'arrosage (ADY-7S 114 ; AN – F10 5768), mais conserve sa paire de meules et la roue à augets pour la production de farine. Il semble que le propriétaire suivant Alexandre Lemaire ait cessé d'utiliser le moulin comme meunerie puisqu'aucun meunier n'est connu après 1866. En 1868, Lemaire vend son moulin devenu une résidence pour le jardinier du domaine (ADY – 10Q 4/3181). Enfin, en 1921, le moulin d'Ors est désaffecté à la demande de son propriétaire, M. Bertrand (fils). Ce dernier s'engage alors, par la même occasion à abandonner le

bief perché qui l'alimente pour remettre en eau la « morte rivière » s'écoulant dans les prés Bicheret (ADY – 7S 114).

Les représentations cartographiques semblent être cohérentes avec la réalité de la disposition du moulin décrite par les sources textuelles. Cependant, il est intéressant de noter que le plan de la seigneurie de Chevreuse de 1702 représente le moulin d'Ors alimenté par un étang en amont (**Figure 4.6. a**). C'est la seule fois que cette pièce d'eau est mentionnée. Il est vrai que la présence d'une digue formée par la route d'Ors laisse supposer la présence d'un étang en amont de l'usine hydraulique, à l'image de ce qui existait au moulin de Mérancis ou plus loin de l'Abbaye de Port-Royal (vallée du Rhodon). Cependant, aucun autre document d'archives, textuelles ou cartographiques, ne relatent ce plan d'eau. Seule la représentation d'un chenal plus large en amont de l'ouvrage sur la *Carte [colorisée] des environs de Paris*, de l'abbé Delagrive en 1750 rappelle cette présence éventuelle d'un plan d'eau en amont du moulin d'Ors (**Figure 4.6. b**). Aujourd'hui, un plan d'eau a remplacé le canal de fuite du moulin, à l'aval de l'ouvrage.

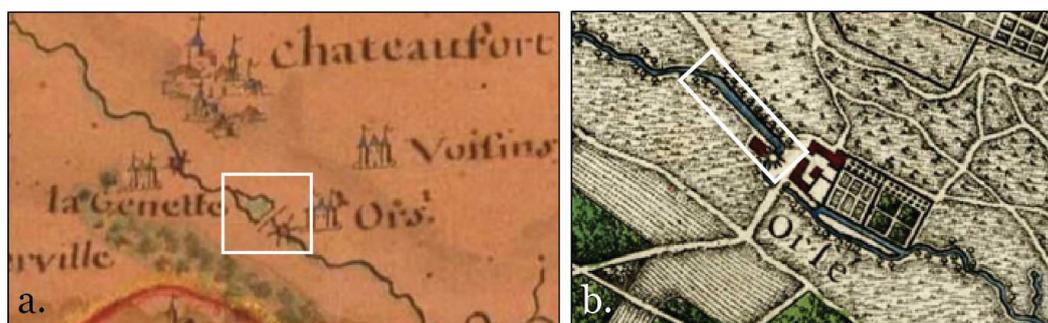


Figure 4.6 : Cartographie d'un plan d'eau en amont du moulin d'Ors. a. extrait du Plan de Seigneurie de Chevreuse, 1702 (ADY – D1470), sur lequel un étang et une digue sont clairement identifiés ; b. extrait de la *Carte des environs de Paris* de l'abbé Delagrive (IGN, version colorisée, 1750)

Aujourd'hui, l'ouvrage emblématique du moulin est le seuil d'Ors (**Figure 4.7**). Il s'agit d'un ouvrage imposant composé de 3 grandes « marches » en grès (Dransart, 2013), implanté initialement sur l'ancien bras de décharge du moulin (« morte rivière »). Uniquement représenté sur la carte d'État-major de 1819 et totalement absent des plans locaux ou des autres cartes historiques avant 2008, sa présence pose question. Les cartes aériennes ne permettent pas non plus d'attester de son existence bien qu'il soit fort probable que le seuil soit caché par le couvert forestier. Or, les raisons de son implantation et la date précise de sa construction ne sont pas connues. Au regard du bon état de construction de l'ouvrage aujourd'hui, il semble avoir été restauré récemment, certainement à l'occasion de la réhabilitation du moulin d'Ors par le PNR HVC en 1999. Il est aujourd'hui surmonté d'un petit pont de pierre sans connexion à un chemin, et faisant plutôt penser à une « folie » purement esthétique. Deux hypothèses sont proposées pour expliquer sa présence sur ce tronçon de la Mérantaise. Ce seuil a probablement été implanté sur le bras de décharge du moulin au XIX^{ème} siècle, au plus fort de l'exploitation hydraulique, pour redynamiser le débit et activer le moteur hydraulique du moulin en aval,

le moulin des Vassaux. Mais il est également possible que l'ouvrage en travers ait été implanté pour palier le risque d'érosion régressive du chenal. Les deux hypothèses peuvent par ailleurs être complémentaires.



Figure 4.7: Le seuil d'Ors dans son état actuel. Vue depuis l'aval.

Enfin, le domaine d'Ors était constitué de différents éléments d'agrément à l'aval du moulin, dont un plan d'eau facilement identifiable sur les documents cartographiques du XIX^{ème} et XX^{ème} siècle. Cette pièce d'eau a probablement été construite au tout début du XIX^{ème} siècle, à en croire le courrier, daté de juin 1853, d'un garde rivière à un ingénieur des Ponts et Chaussées à l'occasion d'un projet de travaux dans ce secteur (ADY – 7S 113-115) :

« D'après les renseignements que j'ai obtenu d'un ancien de Châteaufort il paraîtrait que cette pièce d'eau a été construite en 1802 ou 1803 et sans doute la gril[le] a été posée en même temps ».

Le domaine d'Ors, dont la majorité des bâtiments historiques (château et dépendances) ont été définitivement rasés en 1951, après avoir été occupé pendant la Seconde Guerre Mondiale et laissé en ruine à la Libération (Stephan, 2007 ; Valentin, 2011), est classé en 1976, racheté par la commune de Châteaufort en 1989 puis confié en 1995 au tout nouveau Parc Naturel Régional de la Haute Vallée de Chevreuse. La Réserve naturelle volontaire du domaine d'Ors est créée en janvier 1996 et la réhabilitation des bâtiments du moulin achevée en juin 1999. Le moulin a accueilli un temps la maison du PNR HVC avant que celle-ci soit déménagée au château de Chevreuse.

1.1.4. Moulin des Vassaux (*commune de Villiers-le-Bâcle*)

Connu depuis 1399, le moulin des Vassaux (**Figure 4.8**) se situe sur la commune de Villiers-le-Bâcle, en aval du lieu-dit des Ponts-de-Pierre, marquant par ailleurs la limite amont de la propriété, suivant celle du domaine d’Ors.

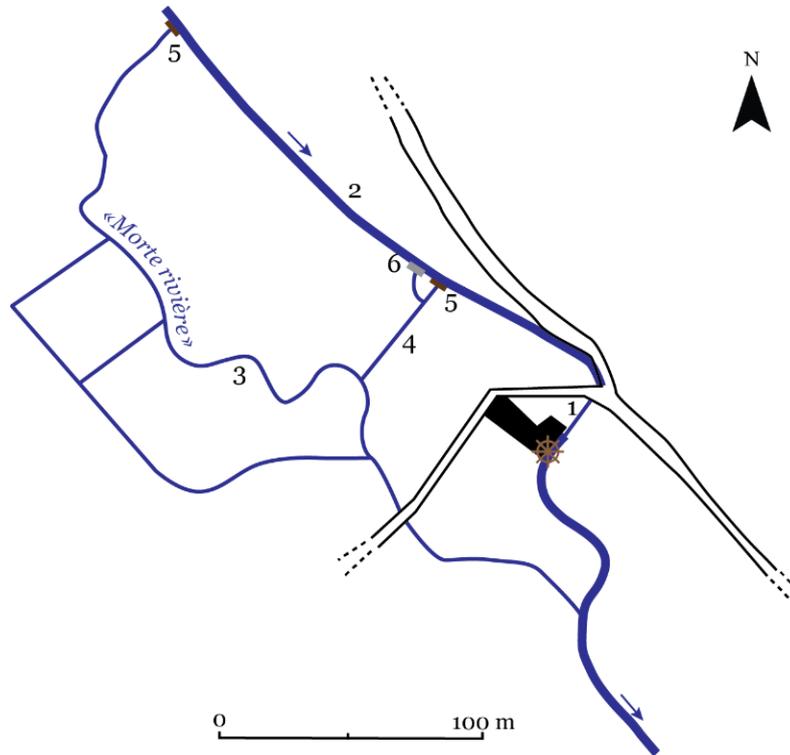


Figure 4.8 : Plan de situation du moulin des Vassaux (d’après la carte d’État-Major, 1819). 1. Bâtiment du moulin ; 2. Bras d’amenée, bief perché sur le versant ; 3. Bras de décharge, « morte rivière » ; 4. Canal de décharge ; 5. Vannes de décharges ; 6. Déversoir.

Le domaine du moulin est décrit dans un acte notarial de 1521, à l’occasion de son rattachement à la seigneurie de Magny-l’Essart (i.e., Magny-les-Hameaux) : il était alors équipé d’une écurie attenante au moulin, d’une maison, d’étables à porcs et d’une grange, répartis sur un pré clos par des haies³⁶. Le moulin a été réglementé par décret le 3 janvier 1850 (ADY – 7S 16). Encore présent dans l’inventaire et sur l’atlas associé de 1823, recensant les usines situées sur le cours de l’Yvette et de ses affluents, il est indiqué comme « ancien moulin » sur la carte topographique « type 1900 » des environs de Paris.

C’est une des rares usines hydrauliques pour laquelle la date de fin de fonctionnement est connue. En effet, le fond d’archives 7S 114 (ADY) contient une chemise de documents datés de 1934 qui concernent des travaux et le déclassement du moulin des Vassaux. Lors de sa demande initiale de déclassement du moulin, le propriétaire, M. Bertrand (fils) y précise dans son courrier du 16 avril au

³⁶ <http://fr.topic-topos.com/moulin-des-vasseaux-villiers-le-bacle> (consulté le 14/04/2016)

Préfet que « le moulin n'est plus en activité depuis plus de 30 ans » en 1934, soit en 1888 selon ses dires. Il signale également que le moulin ne fonctionne plus depuis cette année 1888 car « un mur épais empêche tout eau du bief d'arriver au moulin [...] à quelque 300 mètre en amont du moulin », privant ce dernier d'une force tractrice suffisante. Un plan local issu d'un dossier antérieur daté de 1889 confirme ses propos. Par ailleurs, il semble que l'ancienne retenue amont du moulin ait servi un temps de pêcherie personnelle au XIX^{ème} siècle.

Désormais abandonné et isolé, le bâtiment du moulin existe toujours, bien que la salle des machines (mécanisme de meunerie) ait été démontée à la fin du XIX^{ème} siècle (Figure 4.9). Il ne constitue plus un obstacle à la continuité écologique car le bief d'amenée, perché sur le versant, a été abandonné à partir de 1935, déconnectant définitivement l'ancien moulin à la Mérantaise.



Figure 4.9 : Le moulin des Vassaux désormais abandonné (clichés de 2014). a. vue du moulin depuis l'ancien bief perché ; b. vue de l'ancienne salle des machines ; c. extrait d'un plan local illustrant le fonctionnement du complexe du moulin des Vassaux au XIX^{ème} siècle (sources : ADY 7S 115).

1.1.5. Moulin Neuf (commune de Villiers-le-Bâcle)

La mention la plus ancienne du moulin (Figure 4.10) date probablement de 1403³⁷. Propriété du seigneur de Villiers-le-Bâcle, il a connu une activité discontinue au cours des siècles. Longtemps sans activité pendant la guerre de Cent ans, il est remis en service au XVI^{ème} siècle, puis se trouve de nouveau en mauvais état durant la Fronde (XVII^{ème} siècle). De ce fait, le moulin a subi de multiples modifications et constructions successives jusqu'au XIX^{ème} siècle. Le moulin a été réglementé par décret le 15 mars 1850 (ADY – 7S 16). À partir de 1890, le moulin est désaffecté et sert de maison de repos aux vieux chevaux des omnibus de Paris (Figure 4.11). Il garde de cette transition sa fonction de haras puisqu'il accueille aujourd'hui encore des chevaux en gardiennage. Comme trois autres moulins, le moulin neuf est identifié comme actif dans la « liste des industriels aménageant ou utilisant l'énergie hydraulique » en septembre 1930.

Au XIX^{ème} siècle, la roue du moulin est remplacée par un système de béliet hydraulique, inventé par Joseph de Montgolfier en 1796. Ce système permettait de pomper l'eau de source du moulin pour la

³⁷ <http://www.ville-villierslebacle.fr/fr/information/94044/le-moulin-neuf> (consulté le 10/07/2017)

remonter jusqu'au réservoir situé sur le plateau et d'alimenter le château de Villiers-le-Bâcle à proximité. Spécifique au Moulin Neuf, ce bélier hydraulique n'est plus en état de fonctionner car le bief perché qui l'alimentait a été abandonné au début du XX^{ème} siècle. Cependant, un projet de réhabilitation du système est aujourd'hui envisagé par les propriétaires des lieux.

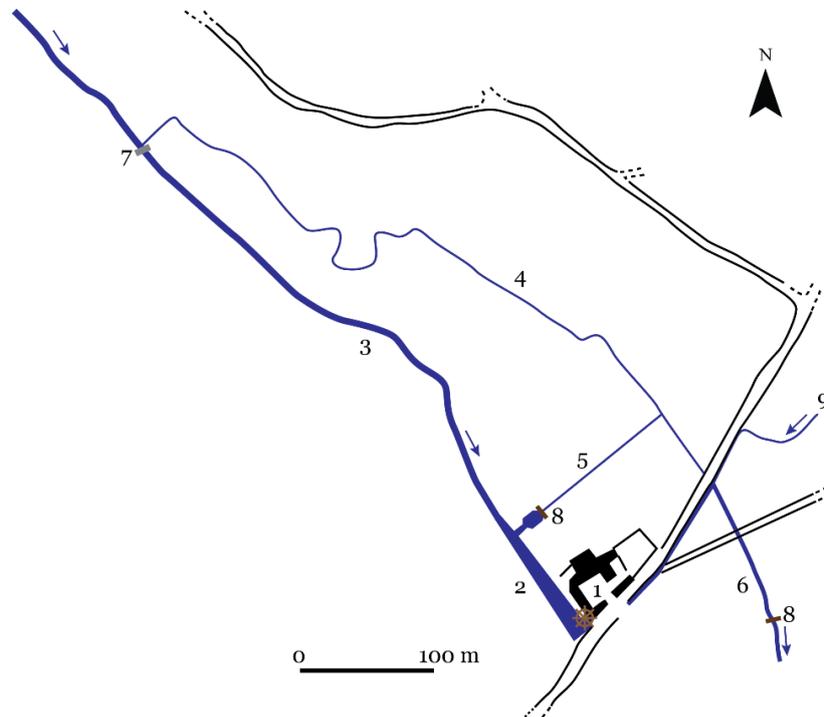


Figure 4.10 : Plan de situation du moulin Neuf. 1. Moulin ; 2. Retenue du moulin ; 3. Canal d'aménée, bief perché sur le versant ; 4. Bras de décharge ; 5. Canal de décharge ; 6. Canal de fuite ; 7 déversoir ; 8. Vannes de décharge ; 9. Affluent, en rive gauche, venant de Villiers-le-Bâcle.



Figure 4.11: Vue sur le moulin Neuf et le fond de vallée de la Mérantaise, à la fin du XIX^{ème} siècle. Carte postale (ADE 2Fi 038)

1.1.6. Moulin Aubert/de la Tuilerie (commune de Gif-sur-Yvette)

Il s'agit là du moulin le plus connu de la vallée grâce à ses propriétaires de 1952 à 1973. Il a, en effet, appartenu au Duc et à la Duchesse de Windsor³⁸ qui en ont fait leur maison de campagne jusqu'en 1973 et y ont effectué plusieurs travaux. Ils ont notamment fait construire un petit barrage sur la Mérantaise pour éviter les crues qui inondaient épisodiquement le domaine. Initialement appelé Moulin Aubert jusqu'au début du XX^{ème} siècle, il est par la suite désigné sous le nom de « moulin de la Tuilerie ».

Datant, semble-t-il du début du XVI^{ème} siècle, le moulin est reconstruit en 1742 et 1763. Il fut actif jusqu'en 1908, époque à partir de laquelle il est transformé en résidence. Il a été réglementé par décret le 14 janvier 1852 (ADY – 7S 16).

Comme la majorité des ouvrages hydrauliques anciens de la Mérantaise, le moulin n'est plus directement connecté à la rivière (**Figure 4.12**).

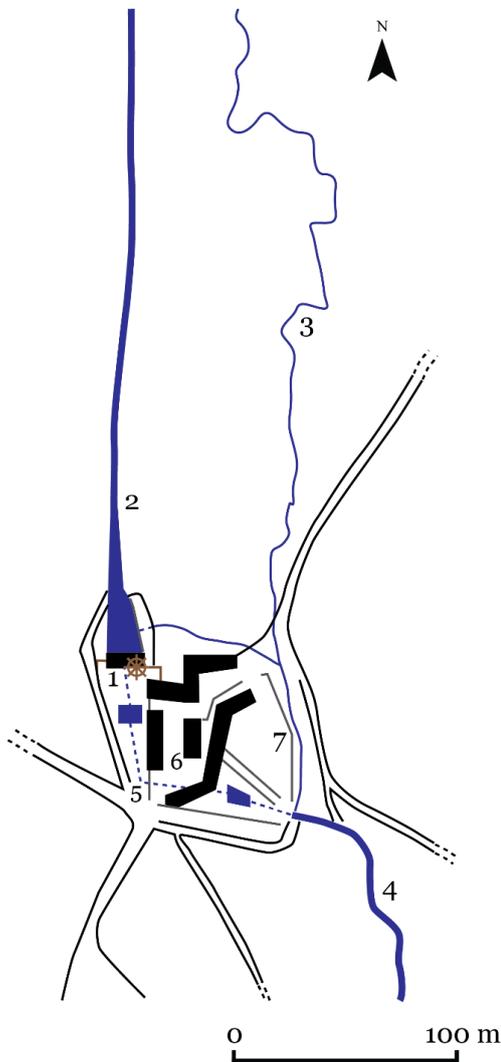


Figure 4.12: Plan de situation du moulin Aubert, devenu moulin de la Tuilerie. 1. : Retenue du moulin et canal d'amené (bief perché) ; 3. : Bras de décharge (talweg, « morte rivière ») ; 4. : canal de fuite ; 5. : canal de fuite souterrain ; 6 : dépendances du moulin ; 7. : limites de propriété longé par un canal de décharge.

³⁸ Il s'agit d'Edward Albert Christian George Andrew Patrick David, plus connu sous le nom de roi d'Angleterre, Édouard VIII, avant son abdication en 1936, et son épouse Wallis Simpson.

1.1.7. Moulin de Chamort (*commune de Gif-sur-Yvette*)

Peu documentée, l'existence de ce moulin (**Figure 4.13** et **Figure 4.14**) est principalement renseignée par la cartographie ancienne. Quelques archives de seconde main fournissent également de rares éléments de connaissance sur ce moulin. Situé en amont du moulin de Gibeciaux et en aval du moulin de la Tuilerie, ce moulin a très certainement une existence ancienne. Le propriétaire d'avant la Révolution française est connu, M. Boisselet. Cependant, au regard de la cartographie historique, le moulin n'est représenté qu'à partir de la carte de Cassini (1756). Il est absent de la carte particulière des environs de Paris (1678), des environs de Versailles (17 ??) ou des seigneuries de Chevreuse, Magny-l'Essart, Châteaufort (1702), recensant les usines hydrauliques de la vallée de l'Yvette. Le moulin a été réglementé par ordonnance royale le 12 janvier 1846 (ADY – 7S 16).

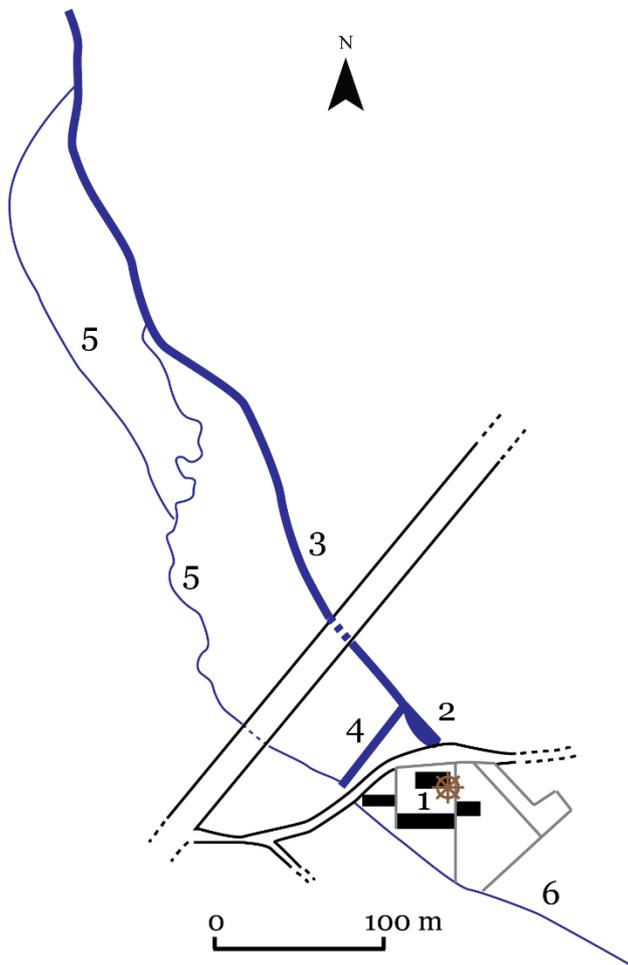


Figure 4.13 : Plan de situation du moulin de Chamort. 1. : Moulin et dépendances ; 2. : Retenue amont ; 3 canal d'aménée (bief perché) ; 4. : canal de décharge vers le fond de vallée ; 5. : Bras de décharge (talweg, « morte rivière ») ; 6. : Canal de fuite.

La date de fin d'exploitation du moulin n'est, semble-t-il, pas connue mais peut être envisagée à la fin du 19^{ème} ou au début du 20^{ème} siècle. Il est identifié comme actif sur les cartes de l'État-Major de 1821 et topographique « Type 1900 » (édition de 1906). Réhabilité en usine hydro-électrique d'après l'« État statistique des établissements possédant des moteurs hydrauliques », daté du 31 décembre

1926³⁹, l'usine est identifiée comme active dans la « liste des industriels aménageant ou utilisant l'énergie hydraulique » établie en septembre 1930. Aujourd'hui, le bâtiment est encore visible mais totalement déconnecté du réseau hydrographique. Il fait désormais partie du domaine du CNRS à Gif-sur-Yvette et a été reconverti en logements.



Figure 4.14 : Cartes postales représentant le moulin de Chamort à la fin du XIX^{ème}-début XX^{ème} siècle (?) (Source : www.delcampe.net)

1.1.8. Moulin de Gibeciaux (*commune de Gif-sur-Yvette*)

Construit au lieu-dit « les Gibeciaux », il est le dernier moulin construit de la vallée de la Mérantaise (**Figure 4.15** et **Figure 4.16**). Il voit le jour en 1815, en aval du moulin de Chamort et à quelques centaines de mètres de la confluence avec l'Yvette. Gif-sur-Yvette devient alors la commune la mieux équipée en moulins du bassin de l'Yvette (Ligonnière, 1991). La documentation historique ne s'accorde pas sur le nom exact du moulin. Il est désigné par différents toponymes : « Gibeciaux », « Gibéciaux », « Jubéciaux » ou encore « Jubiciaux ».

Doté d'une chute d'eau de 3.51 m, il se trouve au centre du village de Gif-sur-Yvette, à proximité du lavoir et des prairies. De ce fait, la municipalité impose au nouveau propriétaire, le meunier Lanoix, originaire de Sèvres, la consolidation des berges de la Mérantaise entre le site du moulin et le confluent avec l'Yvette et le remplacement du pont de bois reliant le village aux prairies des « Grands prés » par un robuste petit pont de pierre. Le moulin n'a semble-t-il connu qu'une courte période d'activité en tant que moulin à blé. Réglementé par décret le 7 octobre 1851⁴⁰, il est considéré comme usine au chômage et transformé en pièce d'eau d'agrément dans « l'état statistique au 31 décembre 1926 des établissements possédant des moteurs hydrauliques ». Pourtant, la « liste des industriels de nationalité française aménageant ou utilisant l'énergie électrique », établie en application du décret du 14 août 1930 (Loi sur les monuments naturels et les sites, mai 1930), identifie le propriétaire du moulin de Gibeciaux, M.

³⁹ (ADY – 7S 16)

⁴⁰ (ADY – 7S 16)

Aprin, comme tel. Il est donc possible que les eaux de la Mérantaise alimentaient encore les lieux au XX^{ème} siècle. Aujourd'hui le bâtiment du moulin est encore présent et son bief d'amenée d'eau toujours alimenté bien que le domaine ait été restauré dans une démarche de rétablissement de la continuité écologique de la Mérantaise en 2015.

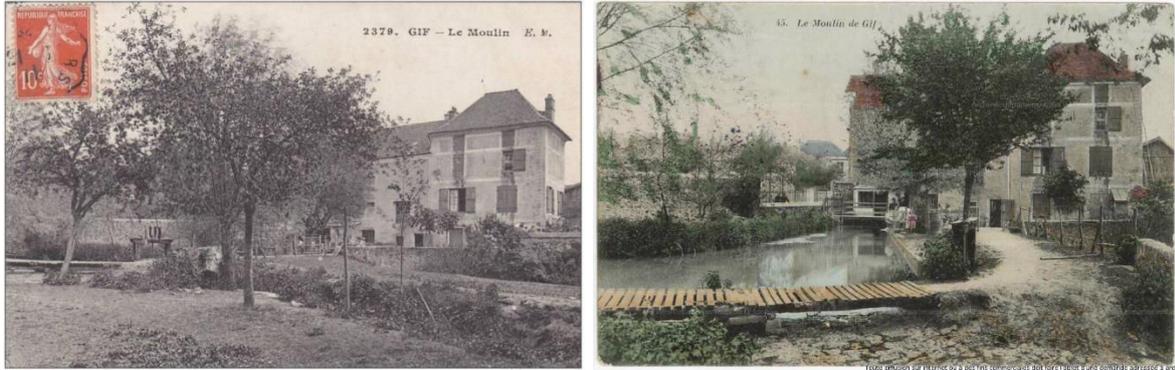


Figure 4.15 : Le moulin de Gibeciaux au début du XX^{ème} siècle. (source : www.delcampe.net et ADE – 2Fi 081)

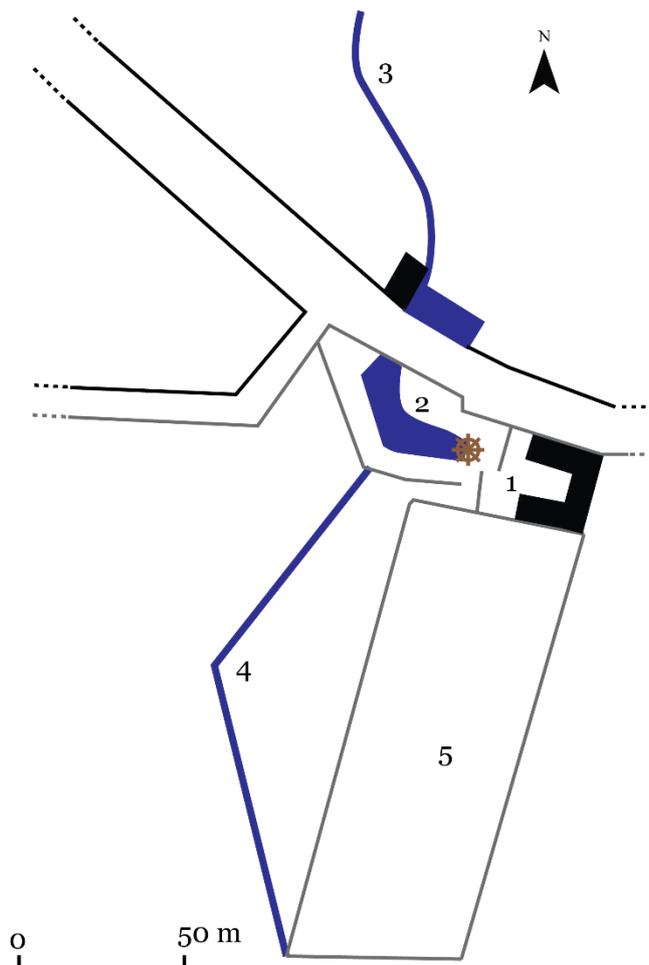


Figure 4.16 : Plan de situation du moulin de Gibeciaux. 1. : Moulin et dépendances ; 2. Retenue à l'amont du déversoir ; 3. : Canal d'amenée d'eau (bief perché) ; 4. Canal de fuite ; 5. : Jardins de la propriété.

1.2. Généralités et évolutions spatio-temporelles des moulins durant la phase 1

1.2.1. Fonctionnement et mode d'alimentation des moulins

Les usines hydrauliques installées sur la Mérentaise durant cette première phase d'aménagement sont tous de petits moulins à eau. Et bien que leur usage ait pu évoluer au XIX^{ème} et XX^{ème} siècle, ce sont tous initialement des moulins « à blé », produisant donc de la farine. Le lit mineur de la rivière étant d'une largeur assez faible, il s'agit d'ouvrages barrant complètement le lit. Les moulins de la Mérentaise restent des infrastructures rurales modestes en cohérence avec le bâti alentour. Ils sont ainsi construits à l'aide de matériaux locaux, le plus souvent en moellons de meulière⁴¹. Ce schéma assez classique est également celui observé, par exemple, en Bourgogne par Jacob-Rousseau et al. (2016), sur les bassins de l'Arroux, de la Grosne et de la Petite Grosne. Ces auteurs dénombrent ainsi 96 moulins à farine sur les 115 usines hydrauliques recensées en 1881, soit 83% des effectifs. Dans les bassins des deux Grosnes plus spécifiquement, le ratio est sensiblement le même, avec 80% des moulins destinés aux céréales (65 moulins sur 81 usines).

D'un point de vue technique, les moulins de la Mérentaise sont équipés d'une roue à augets, c'est-à-dire que l'eau arrive par-dessus, à l'aide d'un bief perché (**Figure 4.17**). Les roues en-dessus sont considérées comme étant les récepteurs hydrauliques les plus puissants. On estime que la force transmise par les roues en-dessus est équivalente aux $\frac{3}{4}$ de la puissance du courant. Étant donné la faible énergie de la rivière, cette alimentation par le haut des roues apparaît comme la plus efficace. Cependant, précisons ici que le descriptif des moulins correspond à leur état au XIX^{ème} siècle, illustré par les archives les plus récentes. Ainsi, il tient potentiellement compte des grandes mutations qui caractérisent la minoterie au XIX^{ème} siècle, à savoir la transformation des mécanismes et des roues, la fonte remplaçant le bois ; et les transformations des bâtiments pour s'adapter au perfectionnement technique (Stephan, 2007).

⁴¹ <https://www.parc-naturel-chevreuse.fr/parc-protected-area/un-territoire-preserve-patrimoine-historique/inventaire-des-moulins-du-parc> (consulté le 30/05/2017)

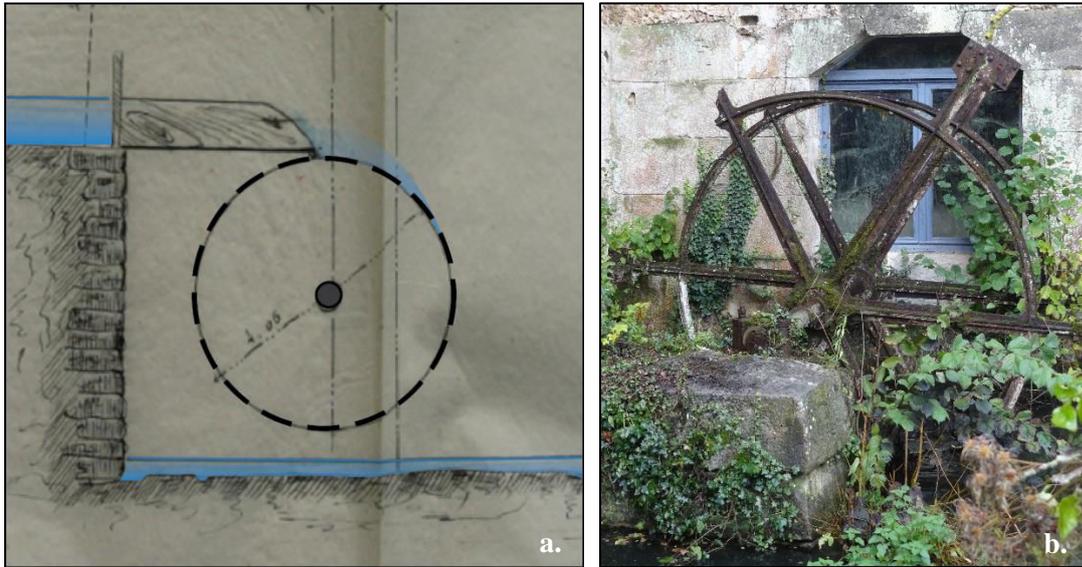


Figure 4.17 : Illustration d'une roue à augets dont tous les moulins de la Mérantaise sont équipés. a. Extrait de la coupe du bief à Ors, établie en 1849 par un ingénieur des Ponts et Chaussées (ADY – 7S 112-115 ; modifié) ; b. État actuel de la roue du moulin d'Ors, désormais élément « décoratif » du moulin d'Ors réhabilité (05/11/2013).

Les informations disponibles sur les conditions hydrauliques passées des moulins sont malheureusement peu nombreuses. Pourtant, l'« *état statistique des irrigations et des usines sur les cours d'eau non navigables ni flottables* », publié en 1885 par les services administratifs du département de la Seine-et-Oise, permet de s'en faire une idée. Retranscrit dans le tableau suivant (**Tableau 4.1**), cet inventaire rend compte des conditions de fonctionnement des moulins à la fin du XIX^{ème} siècle. Il apparaît, tout d'abord, que les moulins étaient équipés d'une à deux paires de meules, témoignant du caractère modeste des « usines ».

Les hauteurs de chutes connues pour les moulins de la Mérantaise au XIX^{ème} siècle varient entre 3.51 m (à Gibeciaux) et 6.38 m (à Aubert/Tuilerie), avec en moyenne 5.12 m de hauteur. La taille des roues associées à ces seuils est uniquement connue pour Ors et la Geneste, grâce à des plans de nivellement des complexes des « moulin », réalisés par les ingénieurs des Ponts et Chaussées lors de demande d'intervention sur les ouvrages. La roue du moulin d'Ors mesurait 4.04 m (au XIX^{ème} siècle ; **Figure 4.17**), quand celle du moulin de la Geneste en mesurait 4.06 m.

Nature	Désignation	Nombre de paires de meules de moulins	Volumes des eaux motrices (m ³)	Chute en eaux ordinaire (m)	Nature du moteur hydraulique	Force brute en chevaux-vapeur (CV)	Force utilisée en CV
Moulin à blé	de la Geneste	1	0.037	5.21	à augets	2.57	2.06
Pompe d'arrosage*	d'Orce	1	0.037	5.62	id.	2.76	2.06
Moulin à blé	des Vassaux	1	0.037	5.59	id.	2.74	2.19
Moulin à blé	Neuf	2	0.037	3.90	id.	1.92	1.54
Moulin à blé	Aubert**	2	0.037	6.38	id.	3.14	2.51
Moulin à blé	de Chamort	2	0.037	5.62	id.	2.77	2.12
Moulin à blé	de Gibeciaux***	2	0.037	3.51	id.	1.73	1.38

Tableau 4.1 : Retranscription des caractéristiques des usines hydrauliques présentes sur le cours de la Mérentaise recensées dans « l'enquête statistique des irrigations et des usines sur les cours d'eau non navigables ni flottables » publiée en 1885 (ADY – 7S 16 ; modifié). * fonction du moulin d'Ors à la fin du XIX^{ème} siècle. Initialement il s'agissait également d'un moulin à blé ; ** le moulin Aubert est appelé moulin de la Tuilerie au XX^{ème} siècle ; * nom modifié pour harmonisation. Moulin désigné sous le nom de « Jubéciaux » dans la source primaire.**

Les puissances utilisées pour entraîner les meules des moulins de la Mérentaise restent assez faibles avec des valeurs de force utilisée entre 1.38 et 2.51 CV, soit entre 1.01 kW et 1.84 kW. Pour établir une comparaison, Lespez et al. (2005) observent, pour les rivières aménagées de l'Ouest français, des puissances brutes de 4 à 14 chevaux-vapeur (3 à 10 kW), alors suffisantes pour faire fonctionner les moteurs hydrauliques qui consomment de manière effective entre 2 et 6 CV (1.5 à 4.5 kW). C'est le double voire le triple des valeurs mesurées sur la Mérentaise. Par ailleurs, l'analyse du rapport entre les débits disponibles et utilisés pour faire fonctionner les moulins nous apprend que la quasi-totalité des débits étaient exploités par les activités hydrauliques. Entre 75 et 80% de la force hydraulique disponible étaient affectées à l'activité des moulins (**Tableau 4.2**) En effet, nous avons recalculé ces débits grâce aux données de forces brutes et utilisées, ainsi que les hauteurs de chute, spécifiées par l'enquête statistique de 1885. Ces débits reconstitués ont été estimés à partir de l'équation suivante :

$$P = H \times Q \times g \times \alpha$$

où P : la puissance (en kW), H : la hauteur de chute (m), Q : débit (en m³/s), g : accélération de la pesanteur (9.81 m/s²) et α : un coefficient de friction (0.75 pour le XIX^{ème} siècle)

Il apparaît ainsi que module disponible lors de l'activité des moulins, au XIX^{ème} siècle, était en moyenne de 0.05 m³/s et correspond au module actuel de la Mérentaise. D'autre part, le fait que la quasi-

totalité des eaux de la rivière ait été affectée aux activités hydrauliques (moulins) explique l'absence d'étangs piscicoles dont la présence aurait un peu plus contraint et limité les débits. Cela justifie également que l'ensemble des débits ait été dérivé (biefs perchés). Cela explique certainement aussi le terme de « morte rivière » pour désigner le talweg délaissé, utilisé occasionnellement comme bras de décharge et à sec une partie du temps. On imagine que ces conditions hydrologiques ne laissaient *a priori* que peu de possibilité d'utiliser les eaux de la Mérantaise pour d'autres activités.

	Puissance brute disponible (kW)	Puissance utilisée par les moulins (kW)	Chutes d'eau (m)	Débits disponibles (m ³ /s)	Débits utilisés par les moulins (m ³ /s)	Part de la force utilisée pour le fonctionnement des moulins (%)
Moulin de la Geneste	1.89	1.51	5.21	0.0493	0.0395	80
Moulin d'Ors	2.03	1.51	5.62	0.0491	0.0366	75
Moulin des Vassaux	2.01	1.61	5.59	0.0490	0.0391	80
Moulin Neuf	1.41	1.13	3.90	0.0492	0.0394	80
Moulin Aubert	2.31	1.84	6.38	0.0492	0.0393	80
Moulin de Chamort	2.04	1.56	5.62	0.0492	0.0377	77
Moulin de Gibeciaux	1.27	1.01	3.51	0.0492	0.0393	80

Tableau 4.2 : Reconstitution des débits disponibles et utilisés pour le fonctionnement des moulins, à partir des données de « l'enquête statistique des irrigations et des usines sur les cours d'eau non navigables ni flottables » publiée en 1885 (ADY – 7S 16).

Par ailleurs, l'exploitation des moulins implantés sur les rivières de faible énergie n'était pas continue toute l'année. Leur activité était régie par les conditions hydrologiques, d'une part et l'approvisionnement en matière première, d'autre part (Barraud, 2007). Si cette deuxième réalité ne peut être vérifiée, les témoignages historiques font état de temps d'usages alternés, entre périodes activités et de chômage. Les étiages estivaux pouvaient en effet être l'origine d'épisodes de chômage plus ou moins long. Les réservoirs établis au niveau du Bois des Roches (moulin de Mérancis) et possiblement dans les près Bicheret (à Ors) permettaient de pallier partiellement à ces périodes de basses eaux.

1.2.2. Forte densité de moulins et périodes de fonctionnement

Aussi, sans distinction temporelle, c'est en tout huit moulins qui ont été implantés, d'amont en aval, sur le cours de la Mérantaise (**Figure 4.18**). Cela correspond en moyenne à une usine tous les 850 m, soit plus d'un moulin par kilomètre dans les secteurs équipés, entre Magny-les-Hameaux et Gif-sur-

Yvette. Il y a pourtant une variabilité spatiale selon les secteurs de la Mérantaise. Le secteur aval, entre le moulin des Vassaux et celui de Gibeciaux est particulièrement soumis aux activités humaines puisque l'écart moyen entre les usines recensées est de 700 m. Certains ouvrages n'y sont séparés que de 550 m environ. Le secteur amont a, quant à lui, toujours été plus épargné par les activités hydrauliques du fait des plus faibles débits de ce tronçon en tête de bassin. Les quelques usines présentes dans ce secteur y sont distantes les unes des autres de près d'un km en moyenne. Tout le linéaire n'a donc pas subi la même intensité d'anthropisation.

Ainsi, l'inventaire des usines hydrauliques présentes sur le cours de la Mérantaise témoigne de la forte densité d'ouvrages et de la prédominance des activités de meunerie. Cette dynamique d'occupation des fonds de vallées est assez semblable à celles observée dans d'autres contextes, notamment normand (Barraud et al., 2013; Lespez, 2012; Lespez et al., 2005a, 2006) et bourguignon (Jacob-Rousseau et al., 2016). Jacob-Rousseau et al. (2016) recensent sur l'Arroux et les Grosnes (Bourgogne) un moulin tous les 1.8 km et 2 km, avec une variation locale jusqu'à un moulin tous les 1 à 1.25 km dans la vallée de la Petite Grosne. En revanche, lorsque l'on rapporte le nombre de moulins à la superficie du bassin versant, on observe une densité plus forte sur la Mérantaise que sur les cours d'eau normands et bourguignons. Alors que Lespez et al. (2012) ont mis en évidence une moyenne de 0.65 moulins pour 10 km², et que Jacob-Rousseau et al. (2016) comptabilisent 0.77 moulins pour 10 km² sur l'Arroux et 1.37 moulins pour 10 km² sur les deux Grosnes, la Mérantaise atteint près de 2.5 moulins pour 10 km², soit un rapport de 1.8 jusqu'à 3.8 par rapport aux exemples normands et bourguignons.

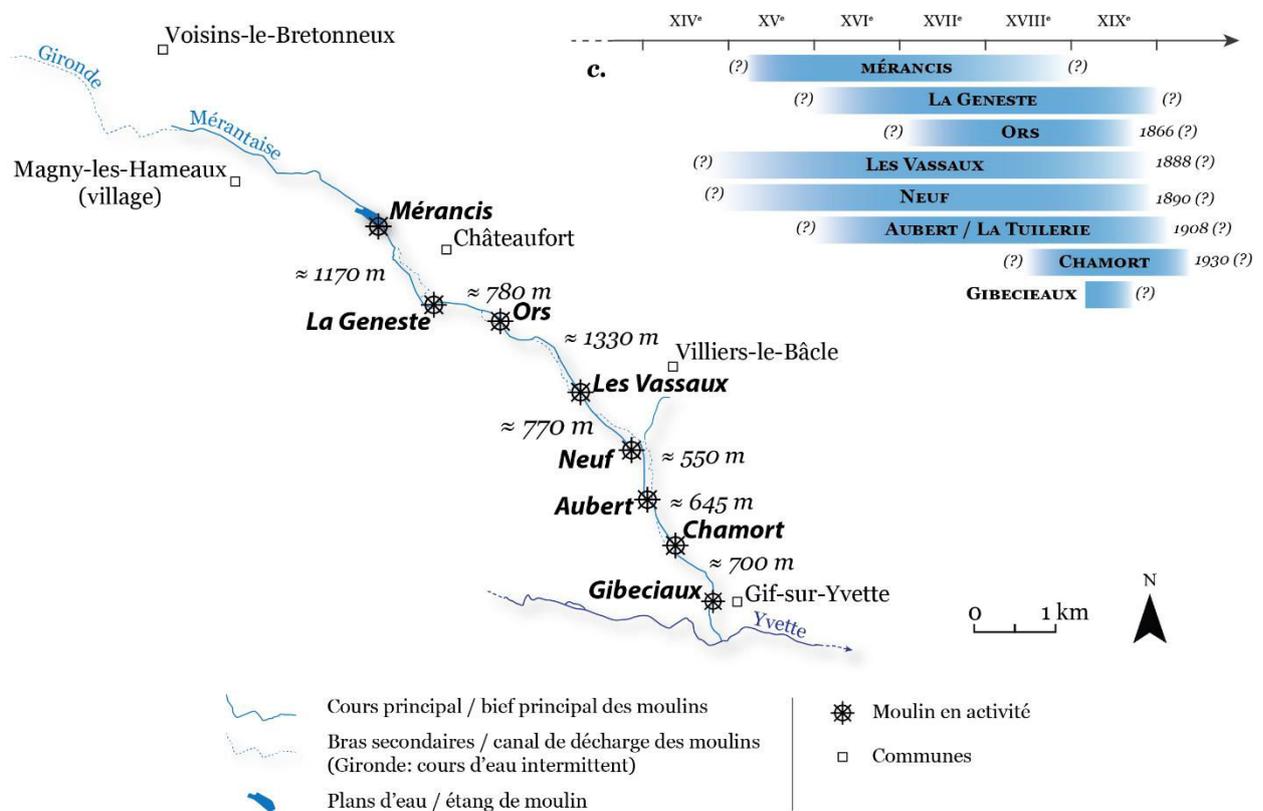


Figure 4.18 : Répartition des moulins et état du chenal durant la phase 1 (XVIIe-XIXe s.). (a). b. Ratio entre la part chenalisée et « préservée » du lit de la Mérantaise ; c. Chronologie de l'activité des moulins.

Cependant, tous les moulins n'ont pas été actifs aux mêmes moments et ils se sont succédé dans l'espace et dans le temps (**Figure 4.18.c.**). Les cas les plus emblématiques sont les moulins de Mérancis et de Gibeciaux, puisque le premier disparaissait au début du XIX^{ème} siècle lorsque le second était construit. Au regard des données historiques disponibles, il apparaît que les usines se concentrent dans un premier temps dans la partie médiane du linéaire, entre les moulins de Mérancis et Aubert (ou Tuilerie, dans un second temps). 5 à 6 moulins sont recensés entre le XVII^{ème} et le début du XVIII^{ème} siècle. À partir de la deuxième moitié du XVIII^{ème} siècle, les moulins passent au nombre de 7 avec l'apparition du moulin de Chamort, dans le nord de Gif-sur-Yvette. Enfin, la concentration des moulins, toujours au nombre de 7, se déplace vers l'aval, avec l'abandon et la disparition du moulin de Mérancis, au profit de celui de Gibeciaux, implanté en 1815-1816 à Gif-sur-Yvette, à \approx 450m de la confluence de la Mérantaise avec l'Yvette.

1.3. Les ouvrages hydrauliques associés au moulin : seuil en rivière, vannes et déversoirs.

Enfin, outre le bâtiment des machines (roue et meules), les complexes des moulins sont également constitués, de manière systématique, par une série de seuils, de vannes et de déversoirs. Ce sont ces ouvrages, destinés à relever la ligne d'eau, qui contrôlent directement les écoulements solides et liquides en barrant complètement le lit actif de la rivière. De ce fait, au regard des enjeux de la continuité écologique, ce sont précisément ces équipements, qui constituent les **obstacles à l'écoulement**, dégradent les conditions de libre circulation latérale et longitudinale, et que la DCE préconise de supprimer. Dans le cas de la Mérantaise, chaque moulin possède en moyenne :

- (i) un seuil en rivière, qui constitue généralement la chute d'eau alimentant la roue,
- (ii) 2 à 3 vannes de décharge mobiles permettant de concentrer les écoulements dans le bief d'aménagé ou au contraire de relâcher le trop plein d'eau dans les bras de décharge. Elles étaient essentiellement implantées latéralement au lit principal et perpendiculairement aux bras de décharges.
- (iii) et un déversoir à l'amont, qui écoule également les eaux du bief perché dans le bras de décharge, puis dans le fond de vallée.

Le **Tableau 4.3** recense ces ouvrages pour chaque moulin. L'inventaire a été établi à la fois grâce aux cartes générales anciennes, mais également grâce aux archives textuelles et aux plans locaux associés à ces dernières, lorsqu'ils existaient. Cependant, il s'agit d'une valeur estimée car seules certaines usines ont été cartographiées avec précision (les moulins de la Geneste, d'Ors, et des Vassaux). Pour les autres aménagements, l'existence des vannes, des seuils et des éventuels déversoirs associés aux moulins ont été supposés à partir du schéma des moulins détaillés et de la cartographie générale.

	Seuils	Vannes	Déversoir
Moulin de Méraney	1 (?)	2 ou 3 (?)	1 (?)
Moulin de la Geneste	1	2	1
Moulin d’Ors	2	2	0
Moulin des Vassaux	1	3	1
Moulin Neuf	1	2 (?)	1
Moulin Aubert	1	2 (?)	1 (?)
Moulin de Chamort	1	3 (?)	1 (?)
Moulin de Gibeciaux	1	2 (?)	1 (?)
TOTAL	9 (?)	18 ou 19 (?)	7 (?)

Tableau 4.3 : Inventaire estimé des ouvrages hydrauliques des moulins de la Mérintaise

2. Ponts et lavoirs, les autres ouvrages en travers de la vallée

Outre les moulins et leurs ouvrages hydrauliques associés (vannes, protection de berge, ...), la vallée de la Mérintaise est également équipée de ponts, de passerelles et de lavoirs-abreuvoirs. Ces derniers sont, eux aussi, autant d’obstacles potentiels ou effectifs à la libre circulation des espèces piscicoles et des sédiments à cause des tapis des ponts qui contraignent le fond du lit, des consolidations des berges au niveau des ouvrages qui empêchent l’érosion latérale, et des vannes des lavoirs qui conditionnent les écoulements. Ce patrimoine hydraulique vernaculaire classique participe donc également de la trajectoire évolutive de la rivière en contraignant le lit de la rivière.

2.1. Les lavoirs-abreuvoirs de la vallée

Trois anciens lavoirs, datant tous du 19^{ème} siècle, ont été implantés dans le lit de la Mérintaise (**Figure 4.19**). Le lavoir le plus à l’amont se trouve au niveau de Magny-les-Hameaux. Construit en rive gauche, le long du chemin, sa chute d’eau est actuellement de 1.20 m et barre totalement le lit mineur. Le deuxième lavoir présent est celui de la Trinité à Châteaufort, entre le domaine de la Geneste et celui d’Ors. Avec des hauteurs de chute plus modestes (15 à 45 cm), il était initialement équipé de vannes mobiles, aujourd’hui disparues. Enfin, le dernier lavoir identifié est celui de Gif-sur-Yvette, au niveau de l’Avenue du Général Leclerc. Construit en 1805, le lavoir-abreuvoir de la Mérintaise, appelé « lavoir de Gibeciaux », se trouve juste à l’amont du moulin du même nom. Alors que tous les lavoirs de Gif-sur-Yvette, implantés sur l’Yvette, ont disparu par volonté des autorités dans les années 1960, lavoir de Gibeciaux est le seul lavoir de la commune à avoir subsisté. Consolidé en 1817, puis rénové en 1904, il a fait l’objet d’une opération de restauration et d’aménagement en 2015-2016, en vue de rétablir la

continuité écologique de la rivière⁴². Les deux autres lavoirs de la Mérantaise sont également encore présents sur le cours de la Mérantaise bien qu'ayant perdu toute fonction. Notons également la présence d'un lavoir déconnecté de la Mérantaise à Magny-les-Hameaux et alimenté par une source en rive gauche.

Par ailleurs, chaque lavoir possède un système de vannage d'une à deux vanne(s), assurant le maintien d'un niveau d'eau suffisant dans les bassins, ainsi qu'un seuil en rivière pour les mêmes raisons (**Tableau 4.4**). C'est en tout 3 seuils en rivière et 5 (?) vannes qui conditionnent les écoulements hydrauliques et sédimentaires au niveau des trois lavoirs de la Mérantaise. Le seuil du lavoir de Mérantais est le plus haut, avec 1.20 m de chute. Les seuils des lavoirs de Châteaufort et de Gibeciaux sont plus modestes, avec 40 à 50 cm de hauteur.

	Seuil	Vanne(s)
Lavoir de Mérantais	1	1
Lavoirs de Châteaufort	1	2
Lavoir de Gibeciaux	1	2 (?)
Total	3	5 (?)

Tableau 4.4 : Inventaire des seuils et vannes des trois lavoirs de la Mérantaise.

Les lavoirs communaux, tels que nous les connaissons (aménagés, couverts et fonctionnels) sont des ouvrages que l'on peut qualifier de récents car ce n'est qu'après 1850 qu'ils firent vraiment leur apparition, grâce à la loi du 3 février 1851 sur les lavoirs publics. La création des lavoirs est en effet le résultat d'une prise de conscience collective au XIX^{ème} siècle de l'importance de la salubrité publique face aux problèmes répétés d'eaux des rivières, fontaines ou mares communales souillées par les savons et les germes malsains véhiculés par le linge sale. Le XIX^{ème} siècle est notamment marqué par des épidémies ravageuses de choléra, de variole et de typhoïde⁴³. Les lavoirs ont perdu leur usage dès les années 1960 à l'arrivée des machines à laver électriques et à la généralisation de l'eau courante dans les maisons. Ce fût le cas pour les trois lavoirs implantés sur le cours de la Mérantaise.

⁴² <http://www.ville-gif.fr/cadre-de-vie/histoire-et-patrimoine/patrimoine/anciens-lavoirs/> (consulté le 14/05/2017)

⁴³ <http://www.omignon.fr/Lavoirs/LavoirsHist.htm> (consulté 14/05/2017)

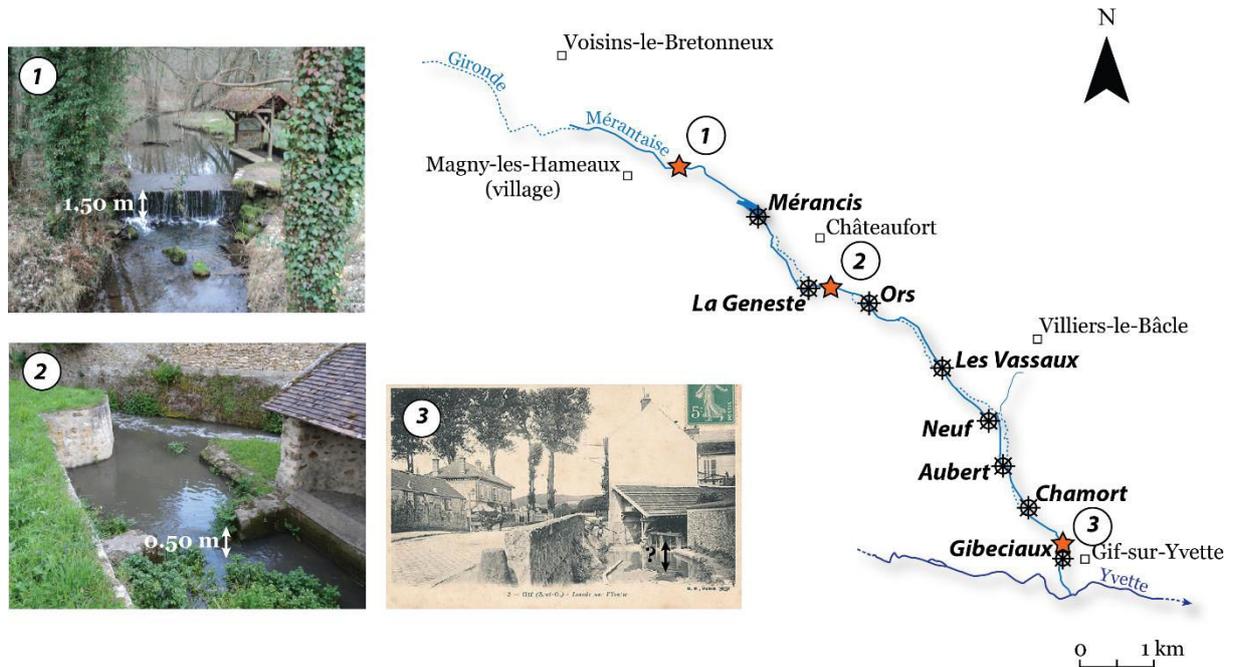


Figure 4.19 : Localisation et hauteurs des chutes des lavoirs de la Mérantaise. 1. Lavoir de Magny-les-Hameaux ; 2. Lavoir de Châteaufort ; 3. Lavoir de Gibeciaux (crédits photo : M. Jugie ; sources lavoirs de Gibeciaux : ADE 2Fi)

2.2. Les ponts et passerelles

Enfin, plusieurs ponts et passerelles ont été construits pour traverser le lit de la Mérantaise et sont pour la plupart toujours présents aujourd'hui (Figure 4.21). 31 ponts ont été recensés à partir de la carte d'État-Major de 1819-1821. Ils constituent autant d'obstacles partiels à l'écoulement et contraignent les dynamiques hydrosédimentaires latérales et longitudinales. En effet, les ponts étaient très souvent équipés d'un seuil qui tapissait le fond du lit et limitait ainsi les écoulements et la capacité d'érosion de la rivière. Nous en avons trouvé témoignage dans un document d'archives daté de 1862, émanant d'un rapport d'un ingénieur ordinaire des Ponts et Chaussées, à l'occasion d'un projet de construction d'un pont sur le « chemin de grande communication n°6 », soit l'actuel D 938 qui traverse la Mérantaise à Châteaufort. Il est ainsi spécifié que « *le pont aura une largeur de 2^m00 entre pied droits et une hauteur sous clefs de 2^m00. Le radier de ce pont sera établi au niveau du fond du lit de la rivière préalablement curée à vif fond* ». Le rapport est accompagné d'un croquis dont l'observation montre aisément l'impossibilité de la rivière à éroder le fond de son lit au droit du radier du pont (Figure 4.20).

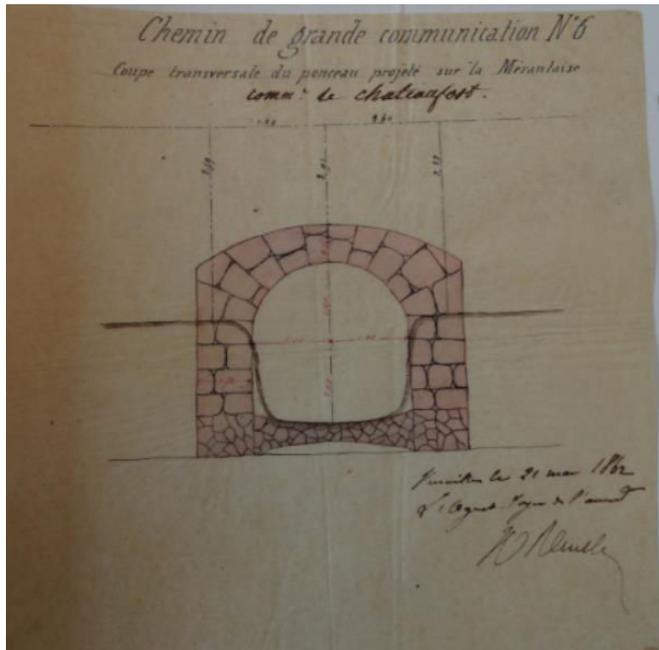


Figure 4.20: Croquis pour le projet de construction d'un pont sur le "chemin de grande communication N°6" (actuel D 938). La géométrie du lit de la Mérantaise est représentée à l'aide d'un trait marron. (Sources : ADY 7S 113)

De la même manière, les culées des ponts implantées dans les rives empêchent les dynamiques latérales. Initialement en bois pour une partie d'entre eux, les ponts ont été remplacés par des structures en pierres et rénovés au cours du temps. Sur la Mérantaise, seuls les ponts de pierres situés au lieu-dit du même nom, en amont des Vassaux ont été détruits (par la rivière ?). Il subsiste, cependant, toujours une partie des blocs constituant les deux ponts, effondrés dans le lit de la rivière, devenant de ce fait des obstacles partielles à l'écoulement et aux dynamiques latérales.

Les passerelles n'ont, quant à elles, aucun impact sur l'hydromorphologie du lit car il s'agit de constructions simples, implantées en haut de berge, sans culées ou seuil pouvant contraindre les dynamiques latérales et verticales de la rivière. En revanche, elles sont plus vulnérables aux érosions des berges.



Figure 4.21 : Exemple de ponts et passerelles présents tout le long de la Mérantaise. a. pont de la D938 à Châteaufort ; b. ruines des « Ponts de Pierre », en amont des Vassaux ; c. pont de la route d'Ors ; d. pont au fond de Mérencis ; e. vieux pont à l'aval du moulin Neuf ; f. passerelle vestige du domaine d'Ors (XIX^{ème}-XX^{ème}). (Crédits photos : M. Jugie)

3. Les travaux de chenalisation des eaux de la Mérantaise

La chenalisation est le terme général pour désigner tout aménagement modifiant le tracé en plan, en travers ou la pente d'une rivière et qui permet une augmentation des vitesses d'écoulements (Wasson et al., 1998 ; Arnaud, 2012). Elle désigne donc différents types d'interventions dans le chenal et le fond de vallée. Il peut s'agir de recalibrage, rectification, reprofilage, mais aussi de protection de berges, d'endiguement, ou encore d'entretien de la végétation et de curage (Brookes, 1988).

Aussi, malgré son petit gabarit, la Mérantaise a fait l'objet de différents travaux de chenalisation dans le but d'améliorer les conditions hydrauliques des usines présentes sur son cours, aussi modestes soient-elles. Dans le même temps, ces travaux ont également eu un rôle dans la maîtrise et la lutte contre les risques liés à l'eau.

Nous distinguons ici les principaux types d'opérations de chenalisation réalisés sur la Mérantaise :

- (i) les travaux de dérivation du lit sur les versants, qui entraînent alors la requalification du talweg « naturel » en fond de vallée comme bras de décharge, appelé « morte rivière » (3.1.);
- (ii) les travaux de rectification, de recalibrage et de consolidation des berges (3.2.) ;
- (iii) et enfin, l'entretien du lit et des berges (3.3.).

3.1. Dérivation du lit en pied de versant

Les dérivations du lit principal sur les versants sont les modifications du tracé de la Mérantaise les plus significatives car elles ont profondément transformé les paysages du fond de la vallée. Elles ont laissé des traces visibles dans l'hydrographie du bassin (Cador et Lespez, 2012). De par leur nature, ces aménagements ont impliqué des travaux conséquents et témoignent des compétences d'ingénierie développées pour les réaliser (Barraud, 2007).

3.1.1. Des moulins implantés en dérivation

À l'exception du moulin (d'étang) de Mérancis, les moulins de la Mérantaise sont tous construits en dérivation. Ils étaient implantés sur des biefs perchés en pied de versants, à quelques dizaines de mètres au-dessus du fond de vallée naturel (**Figure 4.22**). Cette configuration systématique des complexes hydrauliques de la Mérantaise s'explique par les faibles débits et les pentes modestes de la rivière. Les écoulements étaient concentrés dans les biefs artificiels grâce aux systèmes de vannes présentés *supra*. Les eaux de la rivière étaient déviées à partir de la prise d'eau et restituées à la sortie de l'usine. Ainsi, sur la dizaine de kilomètres qui constitue le chenal principal durant cette première phase d'aménagement, près de 7 km correspondent aux tronçons court-circuités par les dérivations.

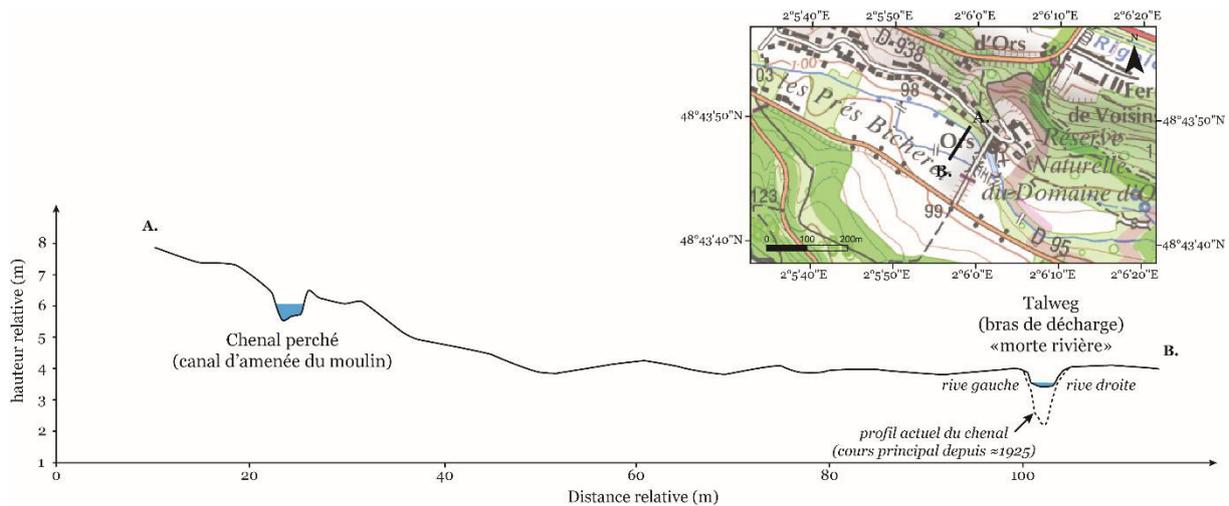


Figure 4.22 : Exemple de bief perché sur les versants, ici à Ors.

La distinction entre dérivation longue ou courte varie selon les auteurs (Barraud, 2007; Jacob-Rousseau et al., 2016), cependant, dans notre cas, la longueur des biefs artificiel en dérivation est en moyenne supérieure à 1 km et peut donc être considérée comme importante. En Normandie, les longueurs moyennes par ouvrage sont de 750/800 m, avec des biefs pouvant parfois atteindre 1 à 2 km (Cador et Lespez, 2012). Les dérivations sont d'autant plus longues qu'elles s'étendent parfois de manière continue sur plusieurs moulins, voire sur la quasi-totalité, au point qu'il soit difficile de distinguer les sections dérivées spécifiques à chaque usine. C'est le cas entre les moulins de Mérencis et de la Geneste, ou les moulins d'Ors et des Vassaux (**Figure 4.23**), ou encore entre les moulins des Vassaux et de Chamort entre lesquels le lit principal s'écoule presque exclusivement dans des biefs en dérivation, sans retour dans le talweg. Cette succession d'ouvrages a également été observée dans les moyennes vallées normandes (Cador et Lespez, 2012; Lespez et al., 2017). Les recherches effectuées dans le territoire de la Seulles montrent que la densité de moulins est telle que les remous de l'ouvrage aval atteignent le pied de l'ouvrage à l'amont.

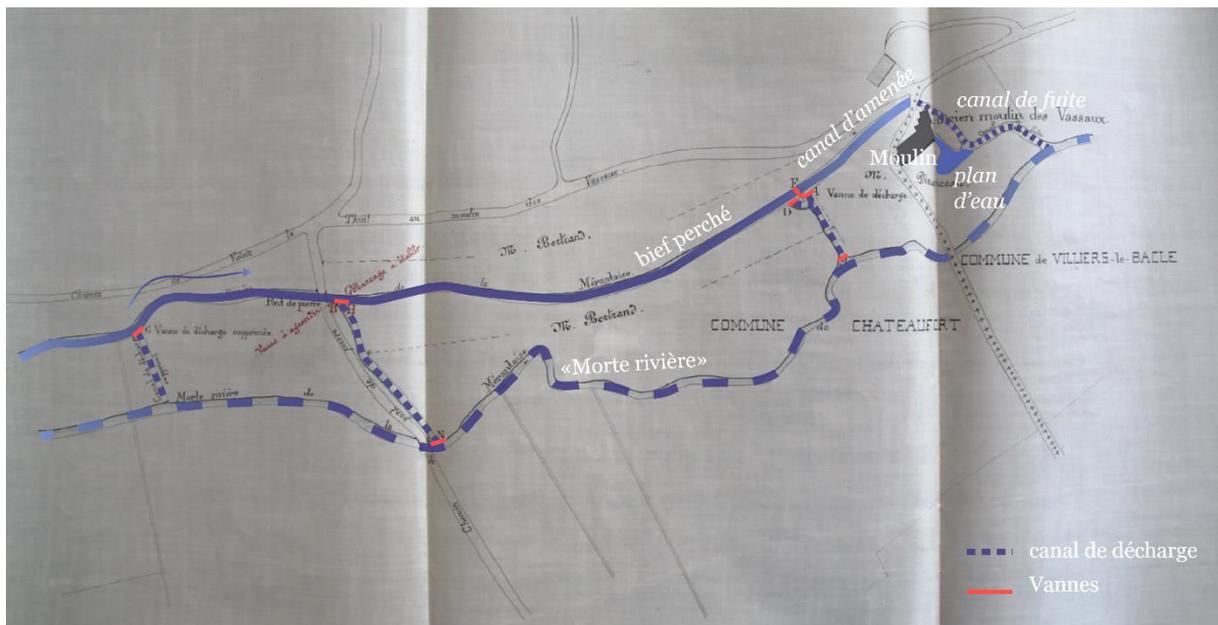


Figure 4.23 : Extrait d'un plan local illustrant le tracé de la Mérantaise dans le secteur du moulin des Vassaux. Distinction entre le bief perché appelé « Mérantaise » et le bras de décharge « Morte rivière » (sources : ADY 7S 115).

3.1.2. La « morte rivière », destin d'un fond de vallée naturel face à la chenalisation

Alors que les biefs perchés constituaient le lit actif principal par lequel circulait l'essentiel des débits de la Mérantaise (« rivière vive »), le talweg naturel était utilisé comme bras de décharge pour recevoir le trop plein d'eau des biefs principaux. Le fond de vallée était alors rebaptisée « morte rivière », témoignant par cette désignation du caractère secondaire, voire intermittent de cette partie du chenal (Figure 4.23 et Figure 4.22). En Normandie, Cador et Lespez (2012) ont relevé des toponymes similaires pour désigner d'anciens tracés de rivières délaissés en fond de vallée : « Fausse Rivière » (sur le Don), « Morte Eau » (sur la Muance), « la Morte » (sur la Calonne), ou la surprenante « Morte-Vie » (sur la Vie).

La « Morte rivière » était alimentée par des canaux de décharge et les écoulements étaient maîtrisés par les vannes implantées à l'amont de ces canaux. Aussi, le talweg naturel était-il partiellement déconnecté du lit actif. Melun (2012) observe le même phénomène de déconnexion partielle du fond de vallée sur les secteurs aménagés de l'Yerres. Ainsi, la « morte rivière » constituait, au début du XIX^{ème} siècle, un peu plus de 3 km de rivière sur les 6 km considérés comme bras secondaires et recevant le trop plein d'eau du lit principal.

3.1.3. Déversoirs et dérivations annexes

Outre les aménagements du chenal imputables aux moulins, aux ponts et aux lavoirs, la Mérintaise a également été déviée et rectifiée dans sa partie amont, au niveau de Mérintais. Les raisons précises de ces aménagements ne nous sont pas connues car aucune archive textuelle n'en fait mention. Mais ils apparaissent clairement dessinés sur les cartes anciennes (**Figure 4.24**). Bien que l'origine et les objectifs de ces aménagements du chenal restent flous, il est très probable qu'il s'agisse, ici encore, d'améliorer les conditions d'écoulement de la rivière au profit des usines. La seconde hypothèse qui se dessine est celle de biefs en partie alimentés par les sources très nombreuses en rive gauche et raccordés artificiellement au chenal. De la même manière que pour les moulins et les lavoirs, ces dérivations étaient contrôlées par un système de vannes et de déversoirs.

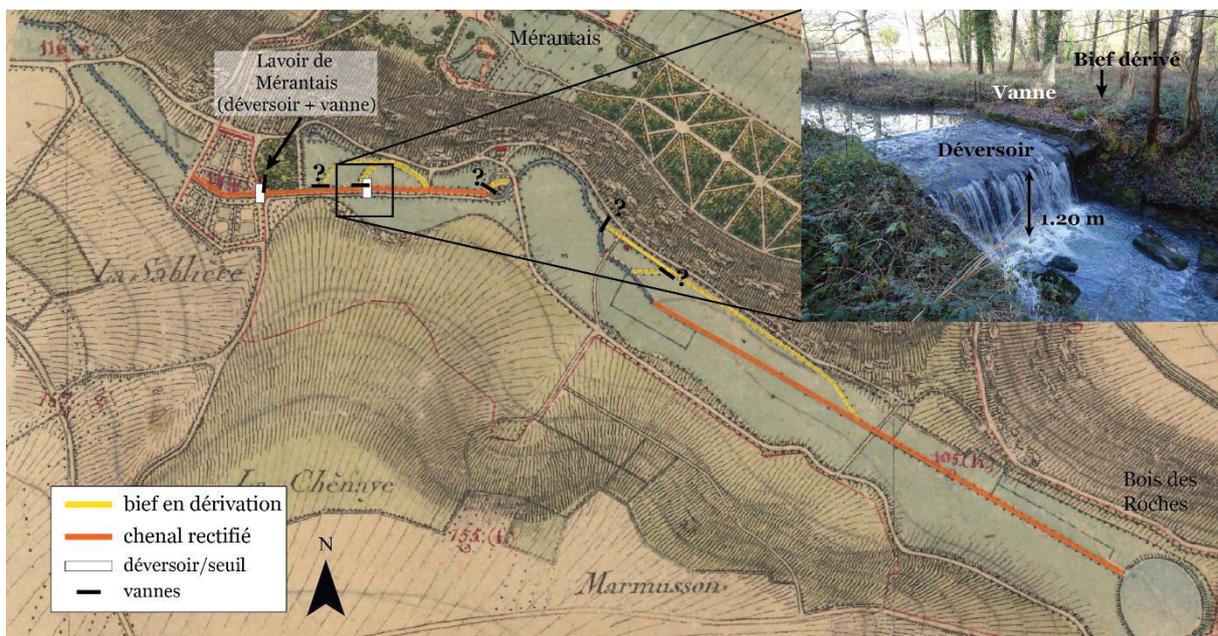


Figure 4.24 : Extrait de la carte d'État-Major (feuille 10 bis) illustrant le chenal rectifié et dérivé dans le secteur amont de la Mérintaise. Encart : photographie actuelle annotée du déversoir cité.

3.2. Un chenal rectifié et des protections de berge

Le lit de la Mérintaise a également fait l'objet de rectification, de calibration et de consolidation des berges au niveau des ouvrages. La rectification, ou reprofilage, du lit consiste à « corriger » la géométrie du lit des rivières selon des dimensions voulues. Il s'agissait bien souvent de court-circuiter les méandres et donner une dimension rectiligne au chenal pour accélérer les écoulements. Ces interventions directes sur le tracé du chenal étaient également l'occasion de le calibrer et d'imposer des largeurs et des profondeurs optimales pour les activités hydrauliques.

Au XIX^{ème} siècle, la mainmise des services de l'État sur la gestion des cours d'eau a conduit à la rectification et à la standardisation systématique des chenaux. Barraud, (2007) y voit la mise en place d'un « véritable paysage normatif » dans les fonds de vallée par « les prescriptions règlementaires et la science de l'hydraulique » des ingénieurs des Ponts et Chaussées.

3.2.1. Rectification et reprofilage

Une partie non négligeable de la Mérantaise a été rectifiée et bien souvent reprofilé. Ce fut en particulier le cas des biefs de dérivation des moulins perchés sur les versants et creusés de façon à avoir un tracé rectiligne dès leur conception. De dimensions plus ou moins modestes, les reprofilages étaient notamment une injonction établie par le « Règlement sur la Police des Eaux, des Moulins et des Usines » (Préfecture du département de Seine-et-Oise). En effet, dans l'article III du Titre II relatif aux « Rivières non navigables, Ruisseaux et Canaux », il est spécifié aux riverains, qu'à l'occasion du curage, ils devront « [rendre] aux rivières toute leur largeur » et « les [rétablir] dans la ligne la plus droite possible, en coupant en talus toutes les accrues qui forment des sinuosités ». Si ce type de modification a surtout été réalisé au niveau des tronçons artificiels (biefs perchés), le talweg (bras de décharge) n'a pas été épargné. Si ces travaux de chenalisation sont peu documentés par les textes historiques, les cartes anciennes (**Figure 4.24**) et les traces qui subsistent dans le paysage actuel du fond de vallée (**Figure 4.25**) en témoignent. La rectification et le reprofilage du lit de la Mérantaise a été recensé sur plus de 7 km de chenal, concernant autant les 11.5 km de lit actif (talweg) et que les 6 km de bras secondaires.



Figure 4.25 : Exemples de sections chenalisées du lit de la Mérantaise encore visibles aujourd'hui.

3.2.2. Calibration artificielle de la géométrie du lit

Par ailleurs, ces travaux ont été l'occasion de calibrer le chenal actif de la Mérentaise (essentiellement des biefs perchés de dérivation) et donc de définir artificiellement la géométrie du lit mineur. Les dimensions verticales et horizontales du chenal pouvaient notamment être fixées par un arrêté préfectoral et à l'occasion de la réglementation des rivières. Dans le cas de la Mérentaise, un arrêté préfectoral du 22 octobre 1833 a, par exemple, fixé la largeur moyenne de la Mérentaise à 2 m. Ces valeurs sont également confirmées par le document de réglementation de l'Yvette et de ses affluents (7S 97, s.d.). De la même manière, les berges étaient elles aussi soumises à une calibration de leurs dimensions. Ainsi, le règlement sur la Police des Eaux, des Moulins et Usines, émanant de la préfecture du département de la Seine-et-Oise précise, dans l'article VII du Titre II relatif au « *Curage des Rivières [non navigables], Ruisseaux et Rigoles, et entretien des Berges* » :

« [Les propriétaires] auront également soin que les berges aient un mètre un tiers de platte-forme sur deux mètres au moins d'[empatement], et de les tenir en tout temps de trente-tois centimètres plus élevées que le dessus des déversoirs des moulins. »

Ces modifications ont évidemment essentiellement concerné les biefs perchés constituant le cours principal de la rivière à l'époque. Mais le fond de vallée utilisé comme bras de décharge pouvait lui aussi faire l'objet d'une recalibration à l'occasion de l'entretien systématique de la rivière. Ces modifications de la « morte rivière » étaient généralement réalisées au droit des ouvrages hydrauliques.

Ainsi, on dispose d'un certain nombre de sources historiques plus ou moins complètes et fiables permettant d'appréhender, de manière globale, la géométrie de la Mérentaise et parfois de préciser quelques variations locales. Deux types de sources issues des archives ont été exploitées : (i) les résultats d'une enquête statistique sur les « rivières et les cours d'eau non navigables » du département de Seine-et-Oise, réalisée en 1838 (**Tableau 4.5**) et (ii) des informations éparses tirées de différents rapports et procès-verbaux à l'occasion de plaintes ou de travaux sur la Mérentaise.

L'enquête statistique a été soumise aux différentes communes traversées par les rivières du département, puis synthétisée en une fiche par rivière. Cependant, dans le cas de la Mérentaise, les enquêtes de seulement trois communes nous sont parvenues (Châteaufort, Villiers-le-Bâcle et Gif-sur-Yvette). Aucun document d'archive concernant les communes amont n'a été retrouvé. Il s'agit donc de renseignements partiels. Pour autant, on y apprend que le chenal principal (= les biefs perchés) avait une largeur moyenne de 2.5 m et que le chenal était en moyenne plus étroit à l'amont qu'à l'aval.

Commune	Largeur moyenne (m)
Châteaufort	2 m
Villiers-le-Bâcle	≈ 2 m (« Six pieds environ » = 1.83 m)
Gif-sur-Yvette	3 m
Synthèse pour la Mérantaise	2.5 m

Tableau 4.5 : Retranscription des largeurs moyennes de la Mérantaise dans les communes soumises à l'enquête de 1838 sur les « Rivières et cours d'eau non navigables » (ADY, 7S 15). Dans le fond d'archives consulté, l'enquête est disponible pour ces trois seules communes.

Plus localement, un rapport d'ingénieur, daté du 21 avril 1867 et concernant une demande d'autorisation d'implanter deux grilles mobiles dans le lit de la Mérantaise entre le moulin d'Ors et celui des Vassaux, nous renseigne indirectement sur la géométrie du bief perché. Il est, en effet, précisé que les grilles seront installées sur la « rivière vive », au droit de deux petits ponts. Il est ensuite spécifié que « ces ponts ont chacun un mètre cinquante de largeur entre pied-droit ». Ainsi, il est possible d'en déduire que la rivière mesurait environ 1.50 m de large à cet endroit.

De la même manière, les hauteurs des berges nous sont localement connues grâce aux quelques profils en long et en travers accompagnant les rapports des ingénieurs des Ponts et Chaussées. C'est par exemple le cas en amont du moulin d'Ors, probablement dans la retenue, où le levé topographique du bief perché indique des hauteurs de berges d'1.10 m (Figure 4.26).

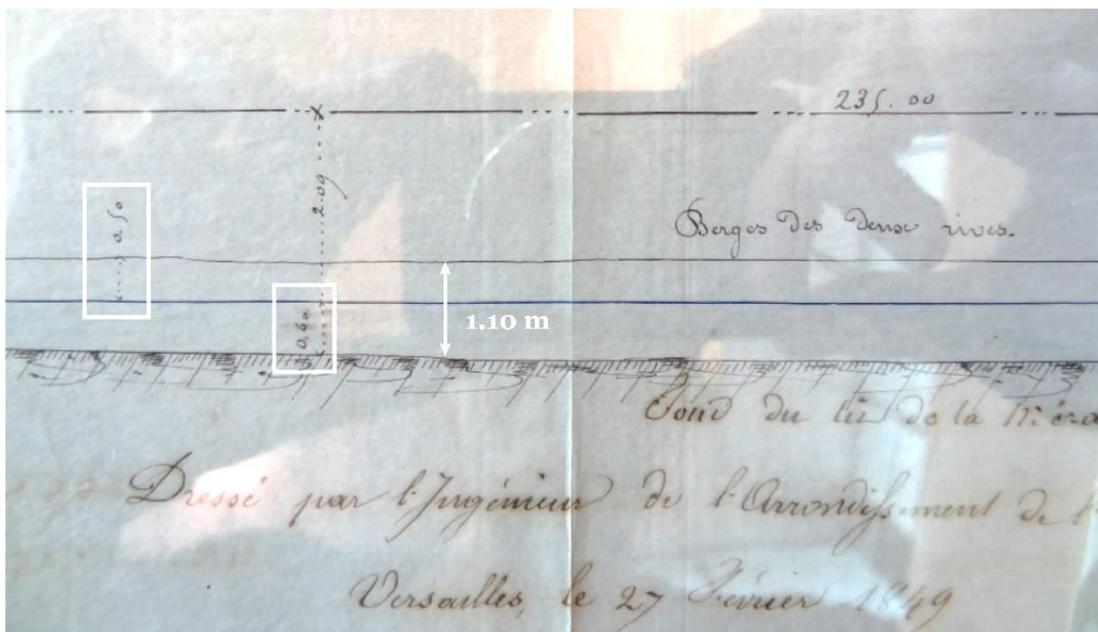


Figure 4.26 : Extrait du profil en long du canal de la Mérantaise en amont du moulin d'Ors, levé par un ingénieur des Ponts et Chaussées en 1849. (Sources : ADY 7S 115)

En 1853, le propriétaire du domaine de la Geneste, à l'époque M. Steenhosser, avait souhaité réaliser quelques travaux sur le chenal de la Mérantaise traversant le domaine. Aussi, l'ingénieur des Ponts et Chaussées, venu vérifier de la faisabilité des travaux, écrit dans son rapport que « *dans la propriété, la rivière à une largeur de deux mètres (2^m.00) et les berges ont de soixante centimètres (0^m.60) à un mètre de hauteur (1^m.00) au-dessus des eaux* ». En considérant que celles-ci étaient certainement modestes, les berges ne devaient pas excéder 1.20 m ou 1.50 m.

Les exemples peuvent être multipliés car d'autres éléments ponctuels peuvent ainsi permettre de reconstituer la géométrie de la rivière. Nous avons présenté les principaux.

La géométrie de la « morte rivière » est également renseignée localement, de manière plus sporadique, grâce à la documentation historique. Ainsi, les quelques informations qui nous sont parvenues laissent supposer un bras de décharge de petit gabarit, environ 1.50 m de large et des hauteurs de berges n'excédant pas les 1.25 m.

1.1.1. Consolidation des berges

De la même manière, les berges étaient consolidées pour endiguer l'eau, protéger les ouvrages et lutter contre les éventuels risques d'inondation de la Mérantaise. Ces préoccupations sont notamment relayées par l'article VI, Titre II, du « règlement sur la Police des Eaux, des Moulins et Usines » du département de la Seine-et-Oise :

« Les propriétaires et tenanciers riverains seront tenus d'entretenir et fortifier les berges, dans toutes les parties qui en auront besoin ; et dans celles où les rivières et ruisseaux ne sont pas suffisamment encaissés, on y emploiera les immondices provenant du curage, et on les maintiendra de manière que les eaux ne puissent sortir de leur lit, ni passer à travers les berges pour se répandre dans les prés et terres adjacentes ».

Si dans cet extrait, décrivant l'entretien du lit et des berges à l'occasion de curages, il ne s'agit pas nécessairement de protection en dur des berges, les abords des ouvrages hydrauliques (en particulier les moulins et les lavoirs) étaient consolidés par des murets ou des enrochements.

Dans les faits, la présence de ces protections de berges sur le cours de la Mérantaise durant l'essor des aménagements historiques n'est pas connue de manière formelle. Elle peut l'être épisodiquement et localement par le témoignage laissé dans la documentation historique. L'un des rares exemples de consolidation de berge retrouvé dans les fonds d'archives est celui d'une demande de construction d'un mur de berge au droit d'un jardin en rive droite, datant de 1853 (**Figure 4.27**). Certaines protections de berges recensées aujourd'hui dans le chenal de la Mérantaise datent probablement de cette époque, cependant, nous n'en n'avons pas la certitude quand d'autres ont été

remplacées par des constructions plus récentes. Ainsi, leur présence a-t-elle été supposée au droit de chaque élément des complexes hydrauliques (moulins, seuils, vannes, ponts, lavoirs) et reportée à partir de la carte d'État-Major de 1820.

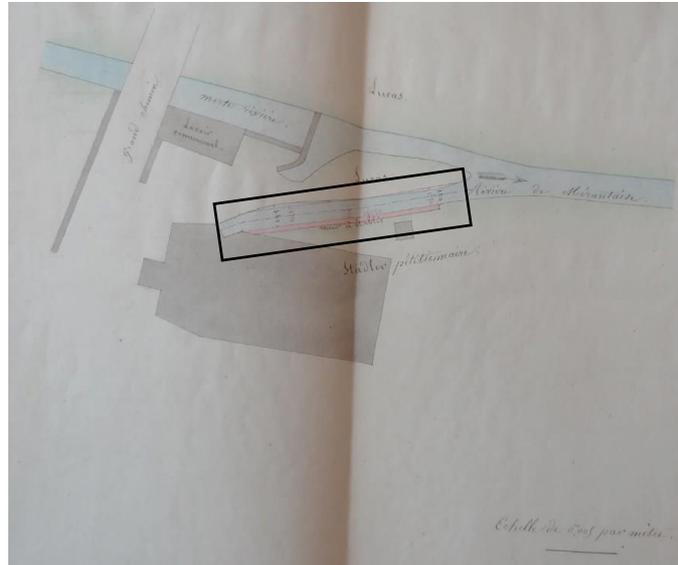


Figure 4.27 : Exemple de représentation de murets de protection de berge (construits ou à construire) le long de la Mérantaise (encadré). Extrait d'un plan simplifié local, cartographiant les abords du lavoir de Châteaufort, à l'occasion d'un projet de construction d'un muret en rive gauche sur le canal de fuite du moulin de la Geneste, situé juste à l'amont. (ADY, 7S 113)

Notons, enfin, la présence d'une portion de la Mérantaise couverte par une voûte, à l'aval du moulin d'Ors. La « morte rivière » a été couverte sur 150 m, entre la confluence avec la pièce d'eau du domaine d'Ors et le premier canal de décharge du moulin des Vassaux. La date de création et de disparition de cette voûte ne sont pas connues mais cette dernière est représentée sur plusieurs plans locaux, entre 1855 et 1904 (Figure 4.28).

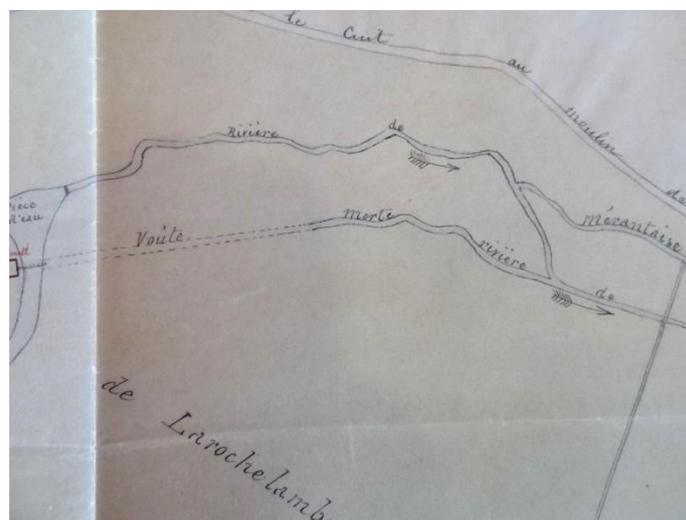


Figure 4.28 : Extrait d'un plan local représentant la section sous voûte de la « morte rivière », entre le moulin d'Ors et celui des Vassaux, réalisé en 1855 (ADY, 7S 113)

3.3. Un entretien nécessaire du chenal

Enfin, jusqu'au XIX^{ème} siècle, les moulins, même les plus modestes, constituent bien souvent la seule source d'énergie non musculaire disponible de la vallée. C'est certainement pour cette raison que la population rivulaire accorde autant d'importance à la bonne gestion de ses cours d'eau et de leurs usines hydrauliques. Au même titre que les usines présentes sur son cours, le lit de la rivière fait l'objet d'une réglementation juridique et administrative des pratiques et usages de leurs berges et de leur fond. Les obligations d'entretien des eaux du département de Seine-et-Oise sont rapportées par le « Règlement sur la police des eaux, des moulins et usines » disponible dans le fond 7S 2 des Archives Départementales des Yvelines. C'est notamment le titres III « *Curage des Rivières, Ruisseaux et Rigoles, et entretien des Berges* », qui régit ces aspects. L'entretien de la rivière comporte ainsi plusieurs volets :

3.3.1. Le curage à « vieux fond-vieux bords »

Le lit de la rivière doit notamment être curé chaque année à « vieux fonds » et « vieux bords »⁴⁴, « sur toute sa largeur » (Art. I et III). Il s'agissait principalement de débarrasser le lit de la vase qui s'accumulait dans les chenaux. « *Les immondices provenant du curage seront relevées sur les deux rives, de manière à ne pas retomber dans les canaux* » (Art. IV). Aucune trace de ces opérations de curage et de dépôt des matériaux curés n'est visible aujourd'hui. Aucun merlon pouvant témoigner de ces pratiques sur la Mérentaise n'a été retrouvé. Seules les archives nous permettent de savoir que ces travaux d'entretien étaient réalisés occasionnellement.

3.3.2. L'entretien et maintien des berges

Par la même occasion, les « *propriétaires et tenanciers riverains seront tenus d'entretenir et fortifier les berges, dans toutes les parties qui en auront besoin (...)* ». Cet article VI du règlement témoigne de la conscience des populations de l'importance de l'entretien de tous les aspects du lit, pas selon le fond du chenal. Il est conforté par l'article VII qui enjoint aux propriétaires ou usiniers d'ouvrages hydrauliques de s'assurer de la stabilisation et hauteurs des berges au niveau des déversoirs de moulins.

⁴⁴ Cette terminologie initialement juridique (article 114 du code rural, à l'origine), qui n'a jamais fait l'objet d'une quelconque définition, désigne les dimensions « naturelles » du cours d'eau à retrouver par ces opérations de curage du lit. (sources : Armengaud et al., 2003)

3.3.3. L'entretien de la végétation

Enfin, la ripisylve doit également être entretenue, tout comme la végétation présente dans le chenal de la rivière. Les souches, les plantes et les arbustes qui nuisent au libre cours de l'eau doivent être arrachés ; les arbres qui se trouveraient plantés dans le lit ou trop près des berges de la rivière et qui ralentissent le cours doivent être arrachés (Article III).

Ainsi, l'Yvette et ces affluents – dont la Mérantaise – ont été réglementés par ordonnance royale le 18 septembre 1832. La mise à jour du document, en 1852, par les administrations de Louis-Napoléon Bonaparte, stipule qu'en vertu du décret de décentralisation du 25 mars 1852, la surveillance des curages et des faucardements est presque exclusivement confiée aux syndicats de rivière ou bien aux maires des communes et aux gardes champêtres. Les principales dispositions énoncées sont que le cours d'eau doit être curé « tous les ans en septembre ». Ces travaux sont à la charge des usiniers « *sur l'étendue du remous de chaque usine* » et à la charge des riverains pour « *toutes les autres parties du cours d'eau* », et ce « *sous l'inspection de l'ingénieur ordinaire et du maire de la commune* ».

Les formulaires envoyés à chaque commune traversée par les cours d'eau non navigables ni flottables, en vue de la grande enquête statistique du XIX^{ème} siècle, permettent d'envisager la réalité de la mise en place de ces dispositions d'entretien pour le lit de la Mérantaise. Le point 16 demande en effet de préciser « *à quelle époque le cours d'eau est-il curé et dans quel état est dans ce moment le curage ?* ». Il apparaît alors que l'entretien du fond du lit de la Mérantaise laisse à désirer au XIX^{ème} siècle, du moins sur une partie du linéaire. En effet, il est spécifié que le curage est fait entre septembre et octobre, selon les communes, mais qu'il « *mal fait* » et en « *mauvais état* ». Seul le petit affluent de la Mérantaise travers Villiers-le-Bâcle semble être en « *[bon] état* » (7S 2).

Ce problème d'entretien du fond du lit est également relayé par le témoignage de procès-verbaux établis à l'encontre de certains propriétaires de la Mérantaise. C'est par exemple le cas de M. de Rély, à Magny-les-Hameaux, accusé de ne pas avoir fait le curage à vif fond de la Mérantaise dans son domaine, en 1836 (ADY – 7S 115). Ce à quoi l'intéressé a répondu (i) que le garde-rivière lui avait demandé de ne s'occuper que de faucher les herbes des berges ; (ii) que la somme demandée pour le curage était trop élevée et (iii) que « *si quelconque travaux pour faciliter un cours d'eau ne doivent pas se refuser, ils ne doivent jamais être demandés avec violence (...)* ». Quelle qu'en soit la raison et les conditions de réalisation, le curage ne semble pas être fait de manière systématique, au risque de provoquer d'éventuels débordements en cas de fortes eaux.

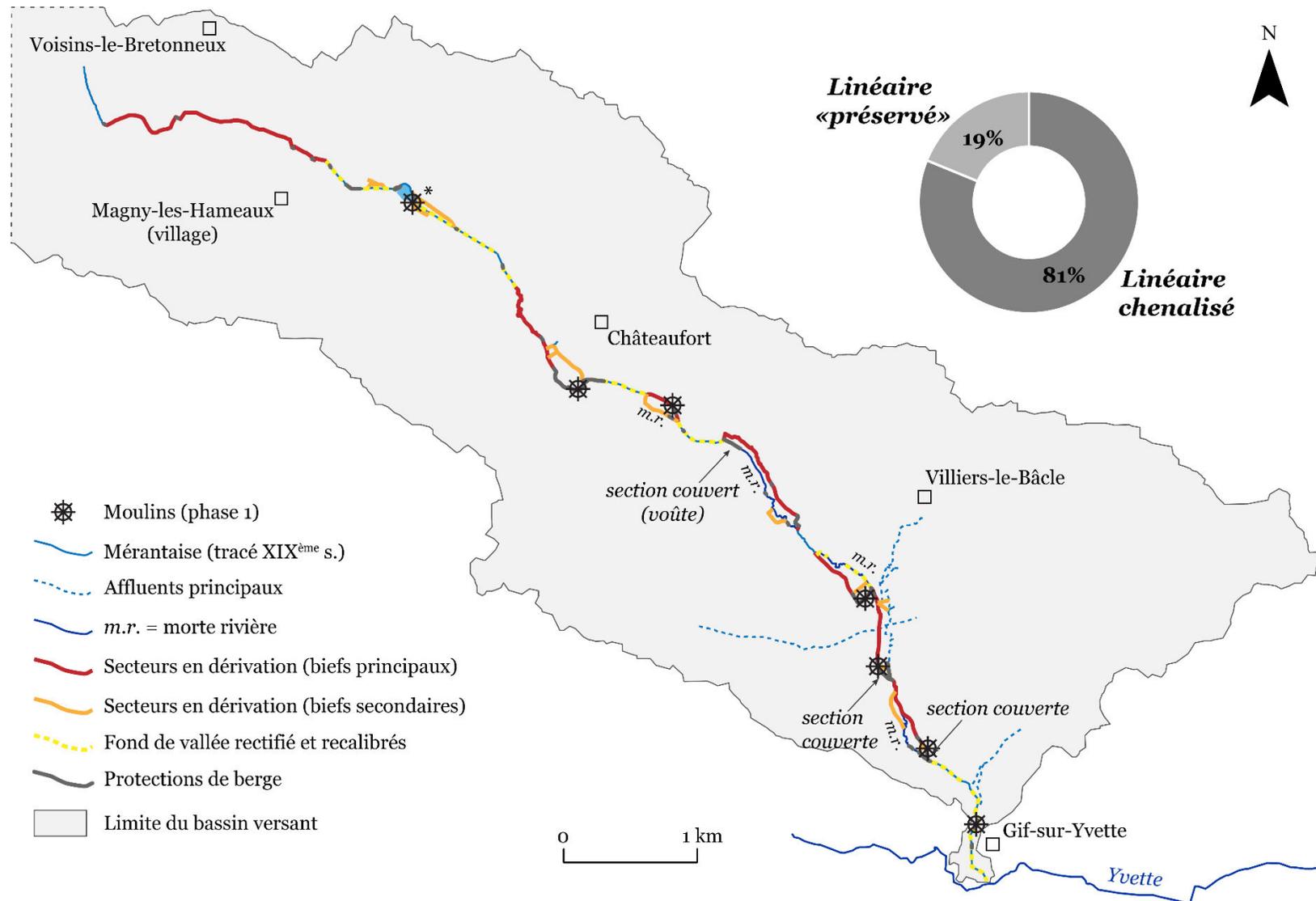
L'entretien du lit permet également de limiter les embâcles et de les supprimer avant qu'ils ne deviennent un problème pour les écoulements. Sur une rivière aménagée, les embâcles peuvent se constituer sur les ouvrages construits en travers telles que les grilles. Plusieurs sont recensées au niveau des moulins, en amont ou en aval des complexes hydrauliques. Or ces grilles nécessitent un entretien fréquent au risque de générer des embâcles, comme en témoigne un rapport d'ingénieur daté du 21 avril 1867 relatif à la pose de deux grilles mobiles en amont du moulin des Vassaux (ADY- 7S 113-115). Il est y ainsi spécifié que ces deux vannes devront être « *fréquemment visitées et débarrassées des herbes ou autres corps étrangers qui pourraient gêner le libre écoulement des eaux* ».

L'entretien des berges et de la végétation est quant à lui peu renseigné. Mais l'on imagine pourtant qu'il devait être assuré régulièrement, étant donnée l'importance d'avoir des berges stables et en bon état. Les faibles largeurs et profondeurs de la Mérentaise devaient également justifier une attention particulière à porter aux berges.

4. Une rivière qui a perdu sa liberté (Synthèse)

Ainsi, la quantification du linéaire chenalisé montre que plus de 80% du lit actif de la Mérentaise à cette époque est en réalité artificiel. Seul 19% du chenal reste « préservé » des travaux de chenalisation, qu'il s'agisse de dérivation, rectification du lit ou consolidation des berges (**Figure 4.29**). Dans un sens, la rivière au fonctionnement et au tracé originel, *ante* aménagements, n'existe plus depuis cette période d'intense développement des activités hydrauliques. Ce constat est d'ailleurs exprimé en 1885, par les ingénieurs des Ponts et Chaussées, à l'occasion de l'enquête nationale sur les rivières et les cours d'eau non navigables. Dans le rapport concernant les cours d'eau de Seine-et-Oise, les auteurs précisent :

« [Le lit de ces rivières] (à savoir, Juine, Orge, Rémarde et leurs affluents), en général, n'est plus à l'état naturel, il est formé par une série continue de biefs de 1 500 m de longueur moyennement chacun (bien qu'il y en ait de plus longs). La pente générale entre chaque usine se trouve ainsi complètement transformées, car, quel que soit le débit, l'eau est généralement tenue au niveau du déversoir de chaque usine. »



1

2 **Figure 4.29 : Les différents travaux de chenalisation de la Mérantaise durant la Phase 1. * le moulin de Mérancis n'est plus actif dès le début du XIX^{ème} siècle.**

Si l'on regarde le détail des différentes formes de chenalisation du lit actif de la Mérentaise durant cette phase d'intense équipement, il apparaît que plus de la moitié du chenal a été dérivé sur les versants et 41% du linéaire ont été rectifiés et calibrés (**Tableau 4.6**). 12 % des berges de la Mérentaise ont été consolidées, essentiellement au niveau des ouvrages (moulins, seuils, déversoirs, vannes, ponts et lavoirs). Mais cette valeur est certainement une estimation à minima car le manque de données sur les ouvrages latéraux (protection de berge) présents dans le lit de la rivière durant cette première phase d'aménagement ne permet de reconstituer que partiellement cette valeur.

Les moulins ne sont pas les seuls équipements concernés par ces opérations de chenalisation. Certains secteurs, hors périmètre des moulins ont connu le même traitement.

		Dérivation	52%*
Lit chenalisé	81 %	Rectification	41%*
		Protection des berges	12%*
Écoulements	19%	« Morte rivière »	18%*
« naturels »		Lit principal en fond de vallée	1%*

Tableau 4.6 : Répartition entre la part du lit actif chenalisé et celle « préservée ». * Ces pourcentages sont calculés en considérant l'ensemble des ≈ 17 km de linéaire actif, dérivations secondaires compris.

La saturation des réseaux hydrographiques par l'équipement de l'hydraulique est certes antérieure à notre période (entre le XI^{ème} et le XVI^{ème} siècle) (Lespez et al., 2017), mais l'essor des constructions au XIX^{ème} siècle, en particulier sur les petites rivières non navigables ni flottables, est étroitement lié au tournant libéral que prend l'exploitation hydraulique, libérée des carcans de l'Ancien Régime.

B. Un bassin versant rural mais déjà fortement exploité

Durant cette première phase d'aménagement, le bassin versant de la Mérentaise est presque exclusivement rural. Cependant, l'emprise anthropique marque déjà fortement l'ensemble du territoire. Il est difficile de parler d'évolution des pratiques dans le bassin versant pour cette première période car nous n'avons pu reconstituer un état intérieur à comparer, faute de sources historiques suffisantes et fiables. Il s'agit donc plutôt de décrire un « état de référence » pour les XVII^{ème}, XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles, qui permettra, par la suite, d'analyser des évolutions des paysages entre les trois grandes phases d'aménagement identifiées. Nous sommes cependant conscients de décrire un paysage qui est déjà le résultat d'une exploitation millénaire du bassin versant.

1. Un bassin versant agricole et boisé

1.1. Les paysages de la vallée

Les témoignages écrits des XVII^{ème}, XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles sur les pratiques et les usages dans le bassin de la Mérantaise sont peu nombreux mais généralement bien renseignés à partir de la toute fin de notre période (1880-1900). Ils sont, par ailleurs, confortés par les documents cartographiques qui permettent d'identifier visuellement les paysages de la vallée (**Figure 4.30**). Ainsi, l'une des plus anciennes descriptions de notre terrain d'étude est celle proposée par l'Abbé Lebeuf dans le volume 3 de son *Histoire de la ville et de tout le diocèse de Paris* (1764). Voici la description qu'il donne de la vallée aux abords de Magny-les-Hameaux :

« La plaine est en labourages, et les coteaux de la profondeur sont couverts de vergers ou de jardinages, et de petits bois et broussailles, [en sorte] que la vigne n'y est point connue [...]. »

Il existait donc une répartition différenciée des activités et des pratiques entre les plateaux, les versants et le fond de vallée.

De la même manière, les monographies communales (1899-1901) décrivent, avec plus de précision, un territoire agricole et fertile sur les plateaux, boisé sur les versants. Les témoignages sont assez similaires entre les différentes monographies communales, montrant l'homogénéité des pratiques et des usages des sols dans le bassin versant. On y apprend que les terres arables des plateaux, « *épaisses de 25 à 30 cm* » (monographie de Trappes), sont réparties entre les grandes exploitations et les petits cultivateurs. Ces derniers sont quelques dizaines dans le bassin versant et font face à une agriculture devenu industrielle depuis le XVIII^{ème} siècle. Ce constat est notamment révélé par les auteurs des deux monographies de Trappes. L'un d'eux écrit que le plateau de Trappes « *est un pays de grandes cultures (une petite Beauce) et de cultures industrielles* ». L'auteur de la deuxième monographie confirme ces propos en ajoutant que la « *grande concentration des exploitations agricoles, commencée au XVII^{ème} siècle, [s'est] accentuée au XVIII^{ème} siècle et surtout au XIX^{ème} siècle* ». Il s'agit semble-t-il d'une particularité des plateaux de Trappes et de Saclay qui ont pu profiter d'une nature de sol et d'une maîtrise de la ressource en eau idéales pour l'agriculture. Ce dernier aspect sera développé plus loin (B.2.)

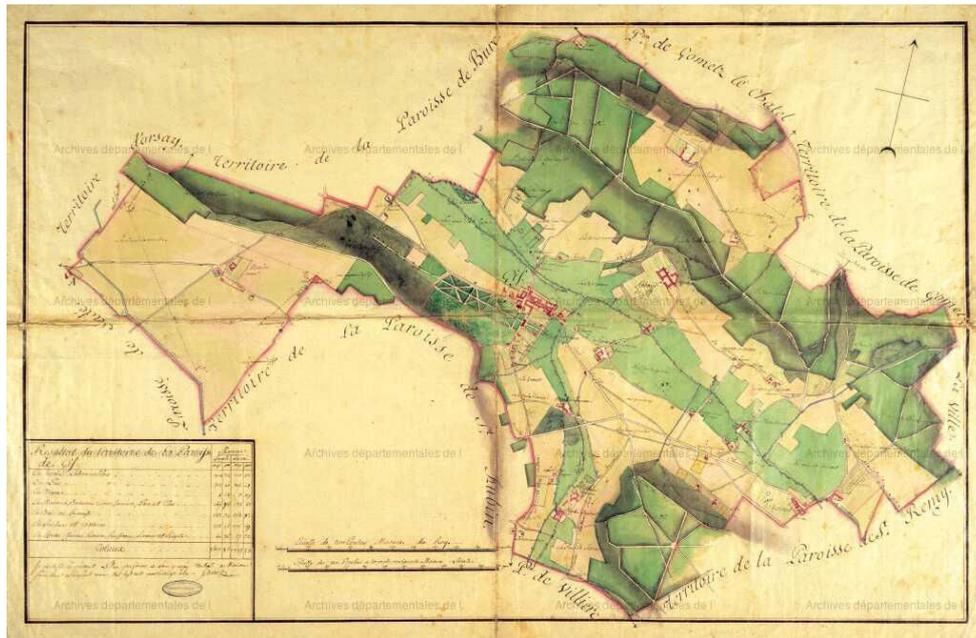


Figure 4.30 : Plan d'intendance de la paroisse de Gif-sur-Yvette, 1786 (ADE, C2/4), illustrant localement l'usage agricole du bassin de la Mérentaise. Les surfaces en jaune correspondent aux espaces de culture, les surfaces en vert clair aux prairies, en vert foncé aux espaces boisés et les constructions (urbanisation) sont représentées en rouge.

1.1.1. Les principales cultures

Les sources historiques détaillent les principales cultures et l'utilisation des espaces ruraux que l'on trouve dans la vallée de la Mérentaise :

« Toutes ces terres [...] [, situées sur le plateau,] donnent chaque année des récoltes abondantes. Le blé, l'avoine, les betteraves sont les principales cultures. [...] Outre ces trois cultures dominantes, citons encore comme production importante le foin que l'on retire des prairies situées dans la vallée [...] et le bois produit sur les coteaux environnants. » (Monographie communale de Villiers-le-Bâcle⁴⁵)

D'autres monographies complètent cette liste de cultures avec la pomme de terre, les haricots et les arbres fruitiers comme le pommier et le poirier. À Saint-Aubin, « une partie des terres se prête favorablement à la culture du fraisier ». Comme « la récolte de la fraise se fait à une époque où les travaux des champs sont peu importants, la plupart des ouvriers agricoles du pays exploitent chacun environ un hectare de fraise pour leur propre compte. » et l'auteur de poursuivre : « Cette culture spéciale, facilitée par le voisinage de Paris, a créé du travail aux femmes et aux enfants ».

⁴⁵ Archives Départementales de l'Essonne, en ligne (consulté le 02/03/2018)

Les bois essentiellement situés sur les versants et en fond de vallée était composés d'essences variées. Ainsi, en trouve-t-on le détail dans la monographie communale de Saint-Aubin :

« Les bois sont composés de : chênes, bouleaux, acacias, peu de charmes et de sapins, beaucoup de châtaigniers. C'est cette dernière essence qui paraît le mieux s'accommoder du sol. Les arbres croissent rapidement droits et offrent à la fabrication du treillage une matière qui avant la généralisation de l'emploi du grillage en fil de fer assurait une valeur à son propriétaire. Aujourd'hui, son bois est déprécié, rejeté pour le chauffage. [...] ».

La ressource en bois dépendait donc en grande partie de l'arboriculture. Les habitants de la vallée l'exploitaient comme bois de chauffe, parfois de construction ou pour l'artisanat local.

1.1.2. L'élevage

Concernant les animaux élevés sur le territoire, les espèces et le mode d'élevage pouvaient varier selon les communes ; sans doute en raison des conditions locales de la vallée. Ainsi, à Villiers-le-Bâcle le bétail est important et les animaux représentés sont nombreux : bœufs, cheval (de travail), vaches à lait, moutons et toutes sortes de volailles. Dans le même secteur sud-est de la vallée, à Saint-Aubin, « l'élevage du bétail est nul ».

« Les chevaux sont particulièrement employés aux livraisons des produits agricoles à Paris, à Versailles ou au chemin de fer. Quelques-uns assurent la culture des champs concurremment avec des bœufs nivernais. On ne compte que quelques vaches dont le lait sert exclusivement à la consommation quotidienne. Pas de fabrication de beurre, ni de fromage, pas de moutons. On ne trouve dans les basses-cours que : coqs, poules, canards, lapins domestiques, peu de pigeons ; le tout est consommé sur place et n'est pas produit en vue du commerce. » (Monographie de Saint-Aubin, ADE)

Sur les plateaux de Trappes (Trappes, Montigny-le-Bretonneux et Voisins-le-Bretonneux), on trouve également des chevaux (de travail et de luxe), des bœufs, des vaches et un certain nombre d'animaux de basse-cour (lapin, volailles, ...).

De manière générale, l'élevage dans la vallée de la Mérintaise était destiné à une consommation locale, comme il est précisé dans plusieurs sources textuelles. Cependant, une partie était, tout de même, exportée dans le pays, au même titre que les productions agricoles.

1.1.3. Autres activités : carrières, distilleries

Outre l'agriculture, la vallée de la Mérintaise était exploitée pour sa production minérale, en particulier les pavés et les pierres meulières extraits des carrières situées généralement en haut de versants. La plupart des communes possédaient une ou plusieurs carrières sur leur territoire. L'extraction de matériaux minéraux est ancienne dans le bassin et participait de l'activité industrielle du territoire de la Mérintaise.

Par ailleurs, nous pouvons noter la présence de distilleries à alcool alimentées par l'importante culture de la betterave. La distillerie de Montigny-le-Bretonneux, adjointe à la ferme du Manet, était semble-t-il l'une des plus importantes de la région et employait une grande partie de la main d'œuvre de la commune, avec la ferme⁴⁶.

2. Le réseau d'étangs et de rigoles du plateau de Saclay

D'autre part, l'une des grandes particularités du bassin de la Mérintaise est la présence sur son territoire d'une partie d'un vaste réseau hydraulique artificiel qui alimentait de manière ingénieuse les jardins et fontaines du Château de Versailles. Mis en place à partir du XVII^{ème} siècle, le réseau de rigoles et d'étangs du plateau de Saclay constitue un aménagement hydraulique déconnecté du cours de la Mérintaise mais qui participait, participe aujourd'hui encore, au fonctionnement hydrologique de la vallée.

L'histoire de ce réseau de rigoles et d'étangs du domaine des Eaux de Versailles est aujourd'hui bien connue. Les publications scientifiques ou d'historiens amateurs sont nombreuses et faciles d'accès. Il ne s'agira donc pas de réécrire ici une nouvelle fois l'histoire de ce vaste système hydraulique, mais d'en proposer une brève synthèse au regard de notre questionnement autour de la trajectoire évolutive d'une rivière de faible énergie fortement aménagée.

⁴⁶ Monographie de Montigny-le-Bretonneux, ADY : 1T mono 9/18.

2.1. Bref historique du réseau d'étangs et de rigoles des Eaux de Versailles

Lorsque Louis XIV décide de faire du château de Versailles sa nouvelle résidence royale, il y entreprend, dès 1661, des travaux titanesques pour agrandir et embellir ce château, alors modeste, légué par son père Louis XIII. Il fait notamment aménager de majestueux jardins et jeux d'eaux qui participent, aujourd'hui encore, à la notoriété du domaine. Cependant, l'alimentation en eaux des fontaines du château de Versailles pose très tôt problème. En effet, les eaux fournies jusque-là par les étangs, les petits cours d'eau (rus de Gally et de Clagny) et les sources des collines alentour ne suffisent bientôt plus à satisfaire les besoins toujours plus importants des agrandissements du domaine. Les demandes d'eau accrues nécessitant des sources supplémentaires, Louis XIV désigne Jean-Baptiste Colbert, surintendant des Bâtiments, pour mettre en œuvre un certain nombre de travaux d'alimentation (canalisation de la Bièvre, pompe du moulin de Launay, ...). Après un projet avorté de détournement des eaux de la Loire en 1674, il est décidé de récupérer les eaux des plateaux environnants. C'est ainsi que le réseau des étangs et rigoles des Eaux de Versailles voit le jour, grâce, à l'origine, aux relevés de l'abbé Picard⁴⁷.

Ce réseau, drainant le ruissellement de l'eau de pluie, est en réalité constitué de deux sous-systèmes, celui dit « des étangs supérieurs » et celui des « étangs inférieurs », alimentant respectivement les parties hautes et basses du parc du château de Versailles par l'unique force gravitaire (**Figure 4.31**).

⁴⁷ C'est lors des nivellements menés par l'abbé Picard pour vérifier la faisabilité du projet de détournement de la Loire de Pierre-Paul de Riquet, que le plateau de Trappes s'avère être sensiblement plus élevé que le château de Versailles et donc propice à un projet de recueil des eaux de pluie qui ruissellent sur ce plateau. En revanche, le projet de Riquet est irréalisable. (SYB : http://www.s-y-b.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=29:le-systeme-hydraulique-du-plateau-de-saclay&catid=16&Itemid=133, consulté le 12/03/2018).

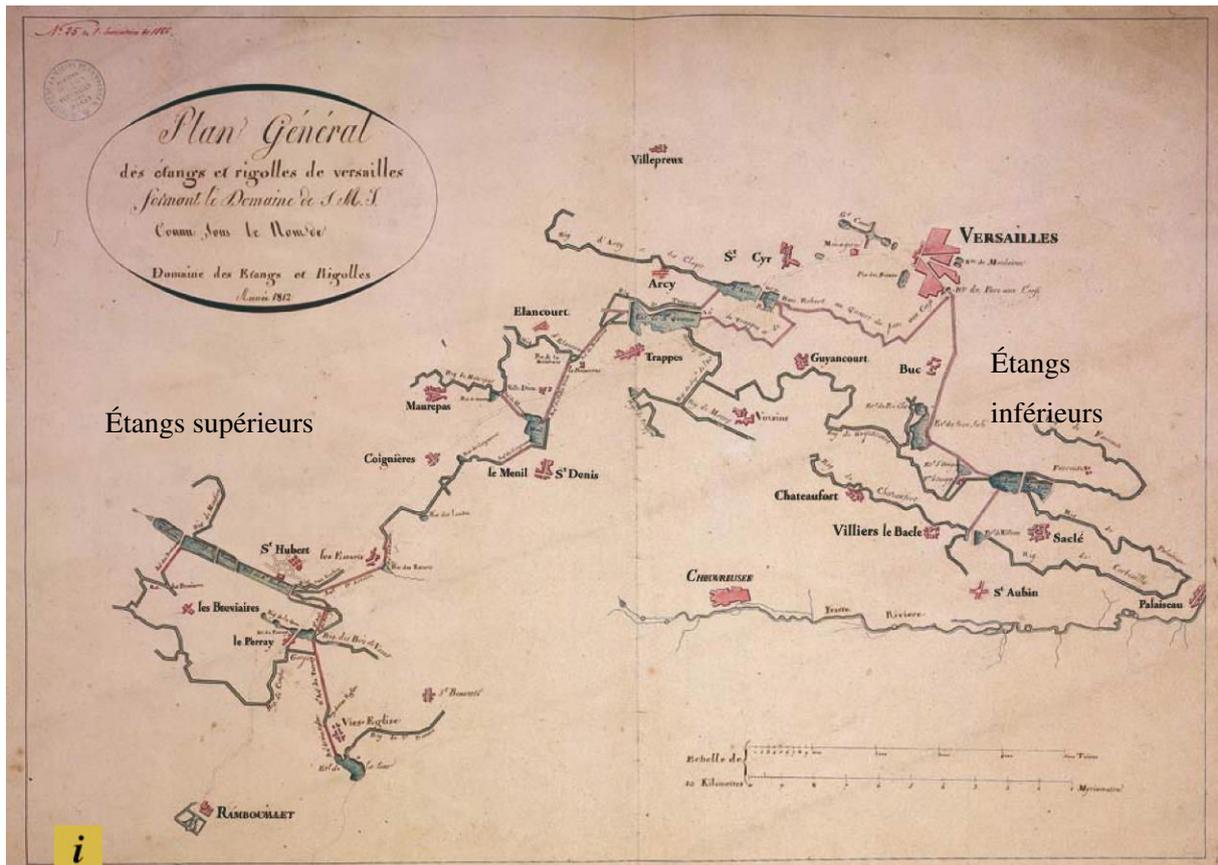


Figure 4.31 : Plan général des étangs et rigoles de Versailles (1812), (sources : Service archéologique départementale des Yvelines).

Aussi, dans un premier temps (1677-1685), les étangs inférieurs sont créés sur le plateau de Saclay. Les étangs de Trappes (actuel étang de Saint-Quentin-en-Yvelines), Bois-d’Arcy, Bois-Robert (tous deux asséchés en 1807) et un premier réseau de rigoles sont creusés en 1677 et 1678. Puis, entre 1679 et 1685, Thomas Gobert, ingénieur et intendant des Bâtiments, termine la mise en place du réseau inférieur en agrandissant ou construisant les étangs du plateau de Saclay (Étang-Vieux, Étang-Neuf, Pré-clos, Orsigny, Trou-Salé et Villiers), ainsi que le réseau de rigoles et aqueducs acheminant les eaux de pluie recueillies.

Dans un deuxième temps, à partir de 1684, le réseau des étangs supérieurs est étendu au plateau de Rambouillet, avec notamment, la construction des étangs de Hollande et de celui du Mesnil-Saint-Denis, ou encore la rigole de Maurepas. Cet ensemble constitue « la Rivière Royale ». En 1688, les deux réseaux gravitaires (supérieur et inférieur) sont liés par la rigole de Guyancourt. Cette dernière sert de trop-plein d’un réseau sur l’autre pour une bonne gestion de la ressource en eau.

Du XVIIIème au XXème siècle, le réseau des étangs et rigoles du Plateau de Saclay a été entretenu et maintenu par les Services des Eaux et Fontaines du Château de Versailles.

2.2. Description et fonctionnement des étangs et de rigoles du plateau de Saclay sur notre zone d'étude

Le réseau de rigoles du plateau de Saclay eut un rôle essentiel dans la mise en valeur du plateau de Saclay, et en particulier de son potentiel agricole. En effet, grâce à ce dernier, la couverture de limon qui rendait jusque-là le sol du plateau de Saclay pratiquement imperméable, a pu être drainée et a permis d'exploiter la très grande fertilité de 5 000 hectares de terres agricoles.

Le bassin de la Mérantaise fait donc partie du réseau inférieur du plateau de Saclay (**Figure 4.32**) qui comprend, en tout :

- 62 km de rigoles
- 6 étangs
- 10 km d'aqueducs souterrains
- 2 aqueducs aériens
- draine plus de 6 100 ha
- la pente moyenne des rigoles est de 0.3 mm/m.

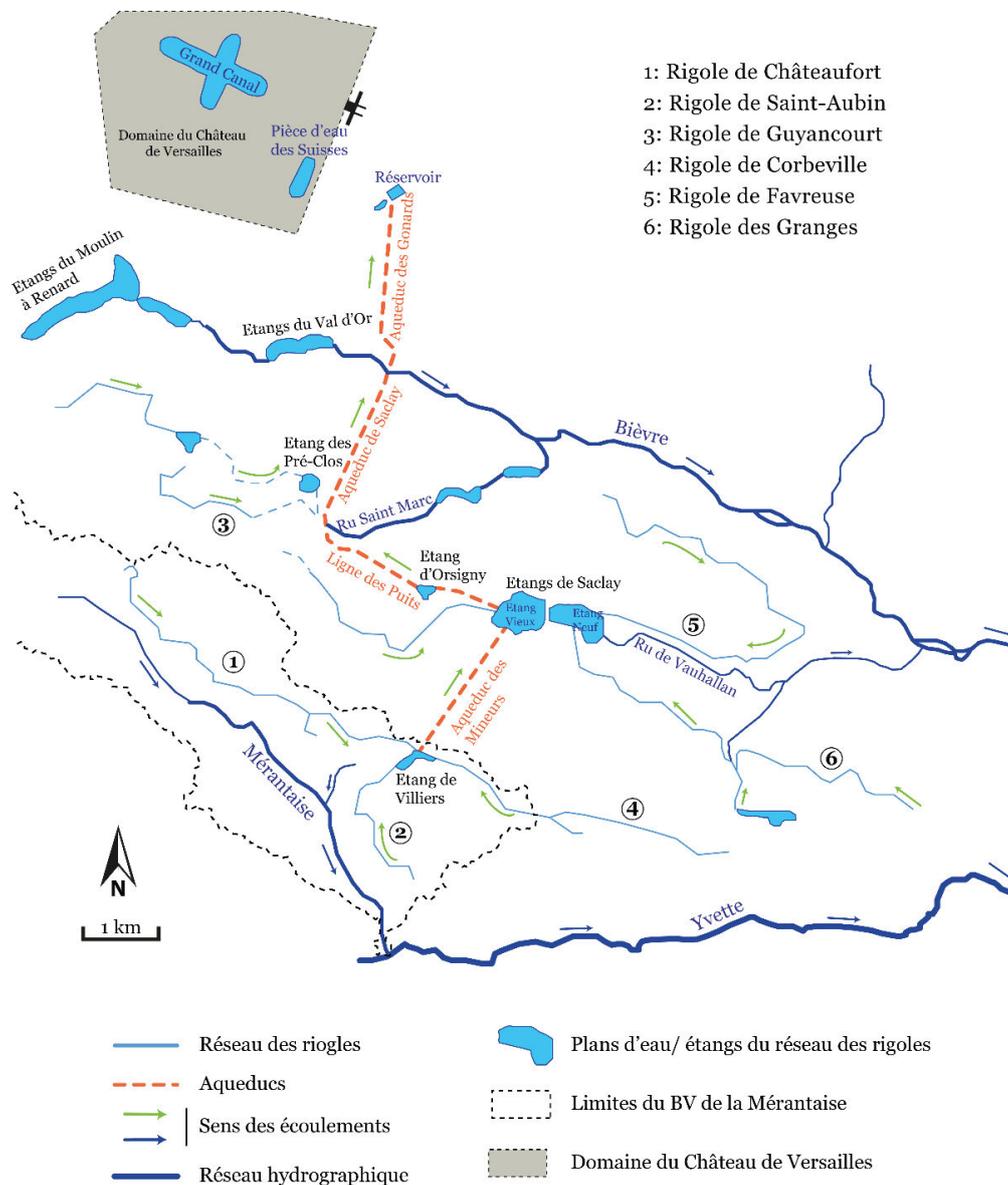


Figure 4.32 : Réseau des rigoles et étangs inférieurs du plateau de Saclay (sources : SIAHVY).

Aucun étang n'est compris dans le bassin versant de la Mérantaise, en revanche plusieurs rigoles traversent le territoire. Ces dernières étaient à la fois alimentées par le ruissellement des eaux de pluie et le drainage des plateaux agricoles par des drains en poterie. Nous laissons la description physique des rigoles aux sources historiques : il s'agit de « *tranchées de deux à trois mètres de largeur et d'un à deux mètres de profondeur* » (monographie communale de Villiers-le-Bâcle). Le fonctionnement hydrologique est, quant à lui, détaillé dans la monographie de Saint Aubin, confirmant ce que nous avons décrit plus *supra* :

« L'eau de pluie est recueillie dans des mares et des puits ou entraînée par une pente naturelle insensible vers la vallée et rejoint superficiellement, soit à l'aide de fossés ouverts ou de drainage, les rigoles qui se déversent dans les étangs approvisionnant Versailles. »

Le bassin de la Mérantaise est ainsi traversé par 7 rigoles, dont 3 sont entièrement comprises dans notre zone d'étude (**Tableau 4.7**). Celles-ci interceptent les précipitations et le ruissellement avec environ 20.5 km de linéaire compris dans le bassin versant. Aujourd'hui ces réseaux subsistent en partie et font l'objet de réhabilitation notamment par le Syndicat de l'Yvette et de la Bièvre (SYB).

Nom	Longueur (m)	Surface (km ²)	Pente (%)
Rigole de Châteaufort	6 045	9.11	0.11
Rigole de St Aubin	3 100	4.49	0.36
Rigole de Corbeville*	5 850	9.66	/
Rigole de Voisins*	2 700	3.50	/
Rigole de Guyancourt*	17 400	28.61	/
Rigole des Granges*	2 600	2.94	/
Rigole du Manet	950	2.78	/
Total	38 645**	61.09**	

Tableau 4.7: Description des rigoles du réseau des étangs inférieurs compris dans le bassin de la Mérantaise, d'après la Carte topographique du domaine des Eaux de Versailles divisé en quatre arrondissements, levés en 1819 et 1920 et complétée en 1914 (sources : ADY 2Q 146). Les pentes ont été déterminées par le SIAVHY (2010) * rigoles partiellement comprises dans le bassin versant. ** le total de linéaire de rigole compris dans le bassin de la Mérantaise est d'environ 20.5 km, soit 32 km².

3. Répartition du mode d'occupation du sol durant la Phase 1 (synthèse)

Ainsi, la documentation historique écrite témoigne de pratiques et d'usages des ressources du territoire essentiellement tournés vers l'agriculture et la meunerie. La production de l'agriculture (cultures et élevage) était destinée, à la fois à la consommation quotidienne locale et à la commercialisation vers Paris, Versailles et autres centres urbains proches. La production de céréales sur les terres arables des plateaux du bassin versant était en grande partie destinée à la meunerie présente en fond de vallée, le long de la Mérantaise. En effet, les paysages du bassin versant sont étroitement liés aux besoins de la meunerie du fond de vallée. Les moulins étaient en position d'interface entre, d'une part, les plateaux et les versants producteurs des céréales à moudre et, d'autre part, les centres urbains plus ou moins proches, consommateurs de la farine produite au moulin (Lespez et al., 2005a, 2006; Barraud, 2007).

La cartographie ancienne et en particulier les Minutes de la Carte d'État-Major (1819-1821) nous a permis de reconstituer la répartition de l'occupation du sol dans le bassin de la Mérantaise. Quatre principaux postes d'occupation du sol ont été déterminés :

- (i) le boisement,
 - (ii) les labours,
 - (iii) les surfaces enherbées, soit les prairies, les vergers et les jardins potagers,
 - (iv) et les surfaces urbaines ;
- auxquels s'ajoutent les plans d'eau, les rigoles et les routes.

Ainsi, les espaces agraires représentaient 63% de la superficie du bassin versant, auxquels s'ajoutaient les 10% de prairies (parfois zones humides) et de vergers également réservés à l'agriculture et à l'élevage (**Figure 4.33**). Par ailleurs, un quart du bassin versant est boisé, principalement en fond de la vallée et en tête de bassin. Le caractère artificiel des prairies est explicitement spécifié dans les sources textuelles anciennes. Car l'aspect rural de la vallée ne signifie pas qu'il s'agissait d'un espace naturel, bien au contraire.

En revanche, les zones urbaines sont encore très peu développées et se concentrent sur les hauts de versants et les plateaux: Châteaufort, Villiers-le-Bâcle, Magny-les-Hameaux et Gif-sur-Yvette. Elles représentent à peine 2% du territoire. Les quelques constructions présentes en fond de vallée sont les moulins, les ponts, les lavoirs et leurs ouvrages associés.

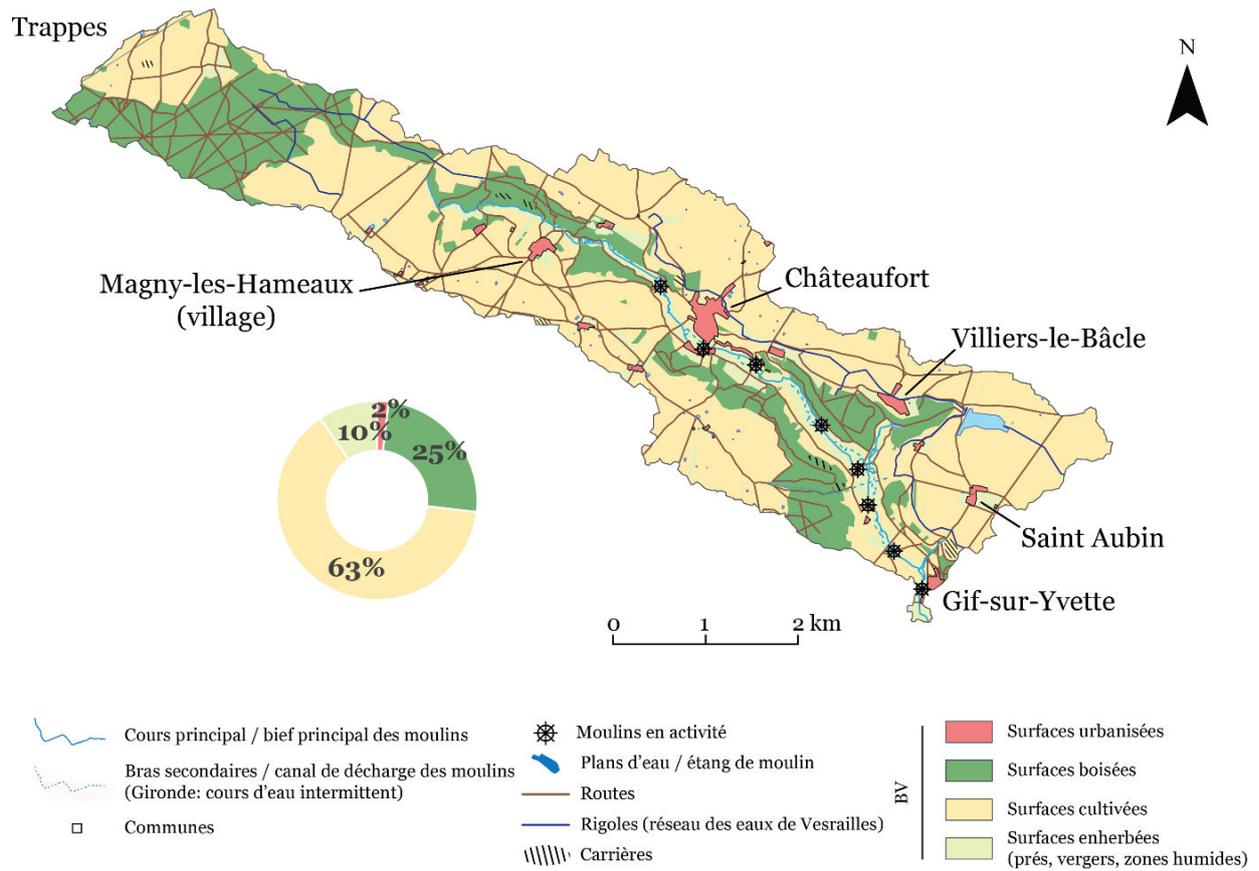


Figure 4.33 : Mode d'occupation du sol durant la phase 1 (XVII^{ème}-XIX^{ème} siècle). MOS Reconstitué à partir de la Carte d'État-Major de 1819-1820 et complété à partir des données historiques textuelles.

Chapitre 5. PHASE 2 : DÉPRISE DE LA PETITE HYDRAULIQUE
ET RÉPONSES DU BASSIN VERSANT (FIN XIX^E-DÉBUT
XX^E SIÈCLE)

A. : Le déclin précoce de la petite hydraulique	p. 200
B. : Une réponse mesurée du bassin versant	p.210

Introduction

Entre 1830 et 1880, l'exploitation hydraulique des petites rivières était à son apogée sous l'influence des différents processus de fonctionnalisation des cours d'eau (Guillerme, 1983; Barraud, 2007) (cf. Chapitre 4). La période qui suit (1890-1950) se caractérise, quant à elle, par le déclin de la petite hydraulique, essentiellement contenue sur les cours d'eau ordinaires de faible énergie. À l'échelle nationale, un tournant majeur dans l'évolution du nombre de moulins en activité a été identifié aux alentours de 1890 (Rivals, 2000, Barraud, 2007). D'après les inventaires statistiques qui nous sont parvenus, plus de la moitié des usines hydrauliques (moulins) ont cessé toute activité entre 1850 et les premières années du XX^{ème} siècle (Barraud, 2007). En Normandie, la quasi-totalité des ouvrages hydrauliques a été abandonnée dans le premier tiers du XX^{ème} siècle (Lespez et al., 2017). Cette chronologie coïncide avec les évolutions identifiées sur notre terrain d'étude. En effet, dans le cas de la Mérantaise, la décennie 1890 marque également le début de nouveaux usages et pratiques à l'échelle de la rivière comme du bassin versant. Ainsi, la période **1880-1945** correspond à la **deuxième grande phase « d'aménagement » de la Mérantaise** ; bien que, dans un sens, il s'agirait plutôt de parler de « **désaménagement** » de la rivière (Lespez et Germaine, 2016).

Ce chapitre propose donc d'analyser l'évolution de la Mérantaise au cours de cette deuxième phase. Celle-ci s'inscrit dans une temporalité courte de quelques décennies. Après s'être d'abord intéressé au déclin en deux temps du système hydraulique, en interrogeant les processus et les facteurs responsables (A.), il s'agira d'identifier les réponses des usages et des pratiques à l'échelle du bassin versant. Celles-ci semblent mesurées, mais montrent pour autant une adaptation des sociétés riveraines (B.).

Pour identifier et comprendre ces évolutions, nous avons encore une fois eu recours à une documentation historique multiple et variée, issue essentiellement des différents services d'Archives consultées et de la littérature grise : documents textuelles, cartes générales et plans locaux anciens, travaux d'érudits locaux, ... le croisement systématique des données permet de tirer une vision à la fois locale et globale du fonctionnement de la Mérantaise et de son bassin versant, entre 1880 et 1945.

A. Le déclin précoce de la petite hydraulique

Le XIX^{ème} siècle est une période paradoxale car il concentre, en moins d'un siècle, à la fois l'« âge d'or » et le déclin de la petite hydraulique en France. Sous l'impulsion d'une modernisation nécessaire des usines hydrauliques, le progrès technique dans le domaine est en partie responsable du déclin des moulins les plus modestes et de la déprise paysagère des petits cours d'eau ordinaires. Ce processus a été qualifié de manière équivoque de « Révolution Terminale » par le sociologue Claude Rivals (2000).

1. Les facteurs de déclin des moulins à eau et reconversion

La Révolution industrielle et économique que connaît la France au XIX^{ème} siècle marque la fin des activités hydrauliques sur les cours d'eau peu dynamiques (Barraud, 2007; Lespez et al., 2006, 2017). Ces petites rivières à faible énergie, précocement maîtrisées et exploitées du fait de leur modeste gabarit, sont les premières pour lesquelles les activités hydrauliques ont été abandonnées.

1.1. Une industrialisation de l'hydraulique au détriment des moulins les plus modestes.

En effet, la concentration capitaliste puis les révolutions énergétique (vapeur, moteur à gazogène, ...) et technique (turbines, ...) sont les principaux facteurs du déclin de la petite hydraulique. La Révolution industrielle impose notamment à l'activité hydraulique une modernisation de ses infrastructures pour augmenter les rendements et la rentabilité de ces usines. Les innovations internes (outillage du moulin) et externes conduisent à une révolution de l'énergie et des transports sur tout le territoire, qui s'accélère à partir des années 1890 (Barraud, 2007). Or, la saturation spatiale des petits cours d'eau en ouvrages hydrauliques, au début du XIX^{ème} siècle, l'incapacité des moulins les plus modestes à se moderniser, ajouté aux faibles débits et aux périodes récurrentes de manque d'eau, ont conduit à un essoufflement conjoncturel de la petite hydraulique sur les cours d'eau d'ordre 1 à 2. En effet, au-delà des conséquences des changements des droits d'eau post-révolutionnaires, ce sont les nouvelles contraintes techniques qui pèsent le plus sur les petits moulins hérités du système technique précédent. La modernisation des usines comprenait notamment l'introduction de moteurs hydrauliques plus performants mais consommant d'avantage d'eau (Barraud, 2007). Un report systématique de l'usage de la force hydraulique sur les sites les plus performants s'opère au détriment des sites les plus en difficulté. Incapables de se moderniser et de faire face à la concurrence, les petites usines hydrauliques qui avaient profondément transformé les milieux des fonds de vallées sont progressivement désaffectées et souvent reconverties (Barraud, 2007; Barraud et al., 2013).

De plus, l'amélioration des conditions d'échanges, terrestres (chemin de fer, grandes routes) ou fluviales, profite aux nouveaux grands axes de communication compris sur les plateaux ou aux abords

des centres urbains, isolant un peu plus les petites vallées ordinaires et leurs usines hydrauliques devenues obsolètes. À l'échelle nationale, les mutations énergétiques font peu à peu perdre aux vallées ordinaires leur pouvoir de fixation des activités manufacturières. Les derniers petits moulins à blé finissent par définitivement disparaître au cours de la première moitié du XX^{ème} siècle (Lespez et al., 2017).

1.2. La deuxième vie des ouvrages hydrauliques

Les usines hydrauliques présentes sur les cours d'eau ordinaires ont connu, de manière générale, deux grands types de reconversion. Les établissements qui bénéficiaient des potentiels énergétiques les plus importantes, grâce à des apports en eau suffisamment puissants et des chutes d'eau importantes, ont pu se moderniser et continuer à exploiter l'énergie hydraulique sous d'autres formes. Ils ont généralement été reconvertis en microcentrales hydroélectriques. Une vingtaine d'ouvrages de ce type a ainsi été recensé dans le contexte bas-normand (Barraud et al., 2013). Cependant, une part importante des anciens ouvrages hydrauliques ne parvient pas à se moderniser et se transformer pour maintenir une quelconque activité industrielle. Ainsi, cette deuxième catégorie, majoritaire sur les petits cours d'eau peu dynamiques, est reconvertie en résidence, en guinguettes ou en fermes. Dans les vallées sud armoricaines, Barraud et al. (2013) ont observé que près de 75% des anciens moulins sont désormais caractérisés par une fonction résidentielle.

Les résultats des recherches menées dans l'ouest français offre donc des éléments de comparaison avec le contexte francilien où les petits cours d'eau de faible énergie forment une majorité du réseau hydrographique. Dans le cas de la Mérintaise, la chronologie et les évolutions d'usages des ouvrages hydrauliques répondent aux mêmes dynamiques, et de manière relativement concomitante.

2. Le « (dés)aménagement » en deux temps de la Mérintaise

Ainsi, notre terrain d'étude connaît une déprise précoce de son système hydraulique dès la fin du XIX^{ème} siècle. La Mérintaise fait partie de cette catégorie de petites rivières pour lesquelles aucun des moulins présents sur leur cours n'a su se maintenir. L'activité de meunerie a totalement disparu et seuls quelques ouvrages hydrauliques ont continué un temps d'utiliser l'énergie hydraulique de la rivière.

Par ailleurs, cette déprise se fait progressivement et en deux temps selon les éléments des complexes meuniers. Dans un premier temps, les moulins sont abandonnés, tandis que les ouvrages associés (biefs de dérivation et vannes) sont maintenus. Ces derniers ne sont délaissés que dans un deuxième temps, quelques années, voire une dizaine d'années, plus tard. La fin de la petite hydraulique est en réalité complexe car il faut distinguer, d'une part, (i) l'abandon de l'activité initiale de meunerie (production

de farine), mais qui pouvait être suivi d'une éventuelle reconversion en tant qu'usine hydraulique pour d'autres besoins (hydro-électricité) ; et d'autre part, (ii) l'abandon effectif et total de l'activité hydrauliques des moulins qui étaient alors généralement reconvertis en résidence. À ce stade, l'alimentation en eau des ouvrages relève plus de la patrimonialisation que de l'intérêt économique.

2.1. Abandon précoce de l'activité hydraulique des moulins

Dans le cas de la Mérintaise, le tout premier moulin à perdre son activité de meunerie est celui de Mérencis. Bien que la date précise de son abandon ne soit pas connue, il n'est plus exploité dès la fin du XVIII^{ème} siècle. Le bâtiment lui-même a, semble-t-il, été très tôt abandonné car il n'est quasiment jamais représenté dans la cartographie ancienne post-XVIII^{ème} siècle (à l'exception de la carte d'État-Major). Il s'agit cependant d'un cas particulier d'abandon précoce, probablement dû à des raisons propres à ce complexe hydraulique, comme une rentabilité économique trop faible pour justifier le maintien de son activité de meunerie (si tant est que ce fut son usage). En effet, la majorité des moulins de la Mérintaise a perdu sa fonction d'usines hydrauliques entre 1866 (?) et 1930 (?). Ils ont pour la plupart été réhabilités en résidence au début du XX^{ème} siècle. Pour autant, avant cette reconversion finale, l'énergie hydraulique de certains moulins a encore un temps été exploitée.

Ainsi, la chronologie, plus ou moins précise, de l'évolution historique de l'usage des moulins de la Mérintaise a pu être établie grâce à différents recensements des usines en activité ou au chômage réalisés au cours de la seconde moitié du XIX^{ème} et du début du XX^{ème} siècle. Trois enquêtes statistiques, réalisées entre 1869 et 1930, sont à la base de cet inventaire :

> 1861-1869 : « *État statistique des irrigations et des usines sur les cours d'eau non navigables ni flottables* ».

> 1885 : « *État statistique des irrigations et des usines sur les cours d'eau non navigables ni flottables* », Tableau B.

> 1926-1930 : « *État statistique au 31 décembre 1926 des établissements possédant des moteurs hydrauliques* » ; tableau 1 : « *Usines en activité* », tableau 2 : « *Usines au chômage* ».

Par ailleurs, d'autres sources historiques également issues des différents fonds d'archives ont complété ces informations et permis de préciser les dates de fin d'activité ou de nouveaux usages des moulins.

La **Figure 5.1** illustre donc l'évolution des usages des 7 moulins présents à l'époque le long de la Mérintaise. Ainsi, à la fin des années 1860, toutes les usines hydrauliques⁴⁸ étaient en activité et

⁴⁸ Sauf le moulin de Mérencis qui est déjà abandonné à cette époque

produisaient de la farine. Plus tard, l'enquête statistique de 1885 enregistre encore une majorité de moulins en activité. Seul le moulin d'Ors a perdu son usage initial pour être reconverti en pompe d'arrosage et en résidence. En revanche, l'enquête de 1926 témoigne du changement significatif d'usage des moulins de la Mérantaise qui a commencé dans les années 1890. Elle montre, d'une part, la fin définitive des activités de meunerie des moulins de la Mérantaise, et d'autre part, leur reconversion systématique vers d'autres usages. Seuls deux moulins semblent encore exploiter l'énergie hydraulique de la rivière : la Geneste (Châteaufort) et Chamort (Gif-sur-Yvette). Ces deux complexes ont été transformés en petites usines produisant de l'hydro-électricité. Les moulins Neuf et de Gibeciaux sont recensés comme usines au chômage, dont les retenues sont désormais utilisées comme « *pièces d'eau d'agrément* ». Enfin, le sort des trois autres moulins (Ors, Les Vassaux et Aubert) n'est pas précisé, mais on sait par ailleurs que les bâtiments ont été reconvertis en résidence dès la fin du XIX^{ème} siècle. L'enquête de 1869 signale une rectification postérieure, malheureusement non datée, précisant à propos des Vassaux, que le « *moulin [est] détruit, [mais la] chute conservée* ». Le croisement des résultats des enquêtes statistiques avec d'autres sources historiques a permis de préciser cette chronologie et ainsi de déterminer le tournant de la fin de la petite hydraulique des années 1890, observé à l'échelle nationale (Rivals, 2000).

Pour finir, la dernière étape du déclin des activités hydrauliques qui concerne plus spécifiquement les bâtiments des moulins est celle de leur désaffectation ou déclassement. Celle-ci intervient souvent plusieurs dizaines d'années après l'abandon des moulins en tant qu'usines hydrauliques. Les dossiers de désaffectation des moulins n'ont pas été retrouvés pour tous les ouvrages de la Mérantaise, cependant ceux des moulins d'Ors, des Vassaux et Neuf nous sont parvenus. Ainsi, le premier a fait l'objet d'une désaffectation à la demande de son propriétaire de l'époque, en avril 1921, suite au renoncement formel de ses droits sur la rivière. Le déclassement du moulin est demandé alors que l'usine ne fonctionne plus depuis la seconde moitié du XIX^{ème} siècle. En effet, un document historique assure que plus aucun meunier n'est connu au moulin d'Ors après 1866. De la même manière, le déclassement du moulin des Vassaux est demandé en février 1934, alors que le « *moulin ne fonctionne plus depuis plus de 30 ans* ». Le propriétaire précise, dans l'un de ses courriers pour le dossier de déclassement du moulin, que celui-ci « *ne fonctionne plus comme moulin depuis 1888 et qu'un mur épais à quelques 300 m en amont empêche toute eau du bief d'arriver au moulin* »⁴⁹. Enfin, la ferme du moulin Neuf, a semble-t-il été désaffectée précocement dans les années 1890⁵⁰. Nous verrons dans le point suivant, relatif à l'abandon des chenaux perchés, les enjeux de cette désaffectation des moulins sur l'ensemble du fonctionnement de la rivière et les modifications des paysages de fond de vallée.

⁴⁹ ADY, 7S 114

⁵⁰ <http://www.ville-villierslebacle.fr/fr/information/94044/le-moulin-neuf> (consulté le 16/03/2018)

Ainsi, à la fin de notre deuxième période, tous les moulins de la Mérantaise ont été reconvertis. Les moulins d'Ors, Aubert et Gibeciaux sont devenus des résidences. Le sort du moulin des Vassaux est plus flou car il est parfois mentionné comme détruit, mais est, dans le même temps, identifié comme la propriété d'une comtesse. La salle des machines est certes laissée à l'abandon, le reste des bâtiments du moulin a probablement été, au moins un temps, réhabilité comme résidence. De la même manière, les machineries des moulins de le Geneste et de Chamort sont encore exploitées jusqu'au début du XXème siècle, mais il est possible que les bâtiments aient, pour autant, fonction de demeure pour les propriétaires des lieux. Enfin, le moulin Neuf a été, quant à lui, reconverti en haras et fut notamment une maison de repos pour les vieux chevaux à la retraite des omnibus des Postes de Paris. Aujourd'hui encore, le moulin Neuf accueille une pension pour chevaux.

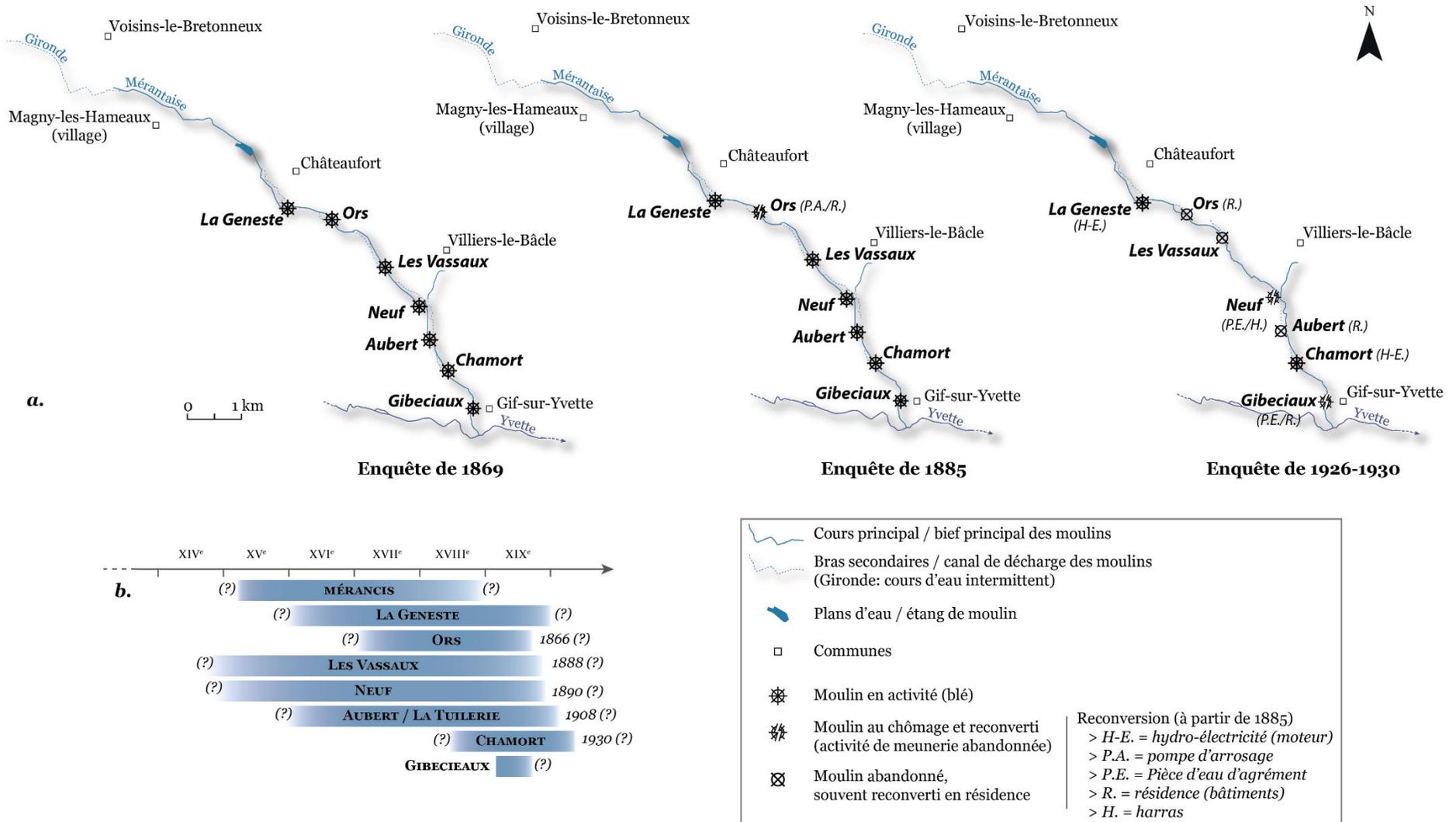


Figure 5.1 : Évolutions de l'usage des moulins de la Mérantaise reconstituée à partir des enquêtes statistiques de 1869, 1885 et 1926-1930 (Sources : ADY 7S 15, 7S 16). a. cartographie des évolutions d'usages des moulins ; b. frise chronologique de l'activité des moulins (rappel).

2.2. L'abandon en différé des chenaux en dérivation

2.2.1. Fin XIX^{ème} siècle : maintien des biefs perchés

Les moulins et le chenal connaissent un déclin hétérochrone. Dans un premier temps, tandis que les moulins perdent progressivement toute activité liée à l'eau, les chenaux des complexes hydrauliques sont maintenus en eau. Les biefs perchés sont ainsi actifs, pour une grande majorité d'entre eux, jusqu'au début du XX^{ème} siècle. Cependant, leur usage a bien souvent évolué avec celui des moulins dont ils dépendent.

Leur maintien est encore un temps nécessaire alors que certains moulins sont transformés en usines produisant de l'hydro-électricité. Pour les autres ouvrages, de nouveaux usages sont mis en place. Ainsi, aux Vassaux, un document daté de 1888 mentionne une demande du propriétaire, M. Bertrand, de pouvoir maintenir les petits barrages implantés en amont du moulin (bief perché), afin de conserver « *la retenue des Vassaux et utiliser le canal d'amenée de l'usine comme bassin pour l'élevage de poissons* ». De la même manière, les retenues des moulins Neuf et de Gibeciaux ont été maintenues pour en faire des pièces d'eau d'agrément.

Par ailleurs, des travaux de chenalisation avaient toujours cours à cette époque. Il s'agissait très souvent d'entretenir le lit et les berges pour respecter les obligations du règlement sur la Police des Eaux, des Moulins et Usines. Mais certaines opérations étaient également à l'origine de nouveaux aménagements et de modification du tracé. Les demandes de création de nouveaux aménagements ou de restauration d'anciens sont nombreuses dans les sources historiques.

Pour ne présenter que deux exemples, en 1869, le propriétaire du domaine d'Ors, M. Lemaire, a demandé l'autorisation « *de fermer par une grille [mobile] l'aqueduc donnant passage à la rivière morte de la Mérentaise, sous le chemin de grande communication* ». Sa demande fut acceptée et aujourd'hui encore la grille est présente au droit du pont. Elle ne barre cependant plus la rivière pour lutter contre les embâcles. En deuxième exemple de ces aménagements, concernant cette fois le tracé de la rivière : une archive de 1868-1870 relate un projet de « *déviations du cours de la Mérentaise et [de] construction de 3 ponts* » au droit du chemin de la Geneste, dans la commune de Châteaufort. On y apprend qu'à l'occasion de ces travaux de déviation de la Mérentaise, le lit sera (re)calibré. Il est notamment précisé que « *le nouveau lit de la rivière doit avoir une largeur moyenne de 2.m00 supérieure à celle de 1.m00 fixé par l'arrêté préfectoral sus visé [du 22 octobre 1833] et qu'une largeur de 1.m50 au plafond avec talus de 45° est suffisante pour l'écoulement des eaux* ». Et de poursuivre : « *Le fond du lit [...] se raccordera à chaque extrémité avec l'ancien lit de manière à présenter ni jarret ni ressaut nuisible à l'écoulement des eaux.* »

Dans la plupart des procès-verbaux établis à l'occasion d'opérations d'aménagement, la condition nécessaire à leur réalisation est l'assurance de libre circulation des écoulements. Pour autant,

les préoccupations concernent exclusivement la libre circulation des eaux. Le problème de la fragmentation du cours d'eau au détriment des espèces aquatiques présentes ou encore le piégeage des sédiments dans les retenues des ouvrages n'était pas une préoccupation identifiée à l'époque.

2.2.2. Début XXème : la remise en eau de la « Morte Rivière »

Ce n'est donc que dans un second temps que les dérivations sont à leur tour abandonnées, déconnectant définitivement certains anciens complexes hydrauliques de la Mérantaise. Ce processus a généralement eu lieu à l'occasion du déclassement des moulins, soit à partir du début du XXème siècle. Il est principalement renseigné dans les archives par les rapports des ingénieurs des Ponts et Chaussées en charge de la désaffectation du moulin.

L'un des exemples les plus significatifs dans le corpus historique est celui du moulin d'Ors. Le rapport établi à la suite de la demande de désaffectation du moulin par son propriétaire de l'époque, M. Bertrand (fils), que :

« le pétitionnaire est autorisé dans sa demande et devra se conformer aux dispositions spéciales suivantes : 1°) le cours de la rivière sera rétabli dans son ancien état ; 2°) La vanne la plus à l'amont (A du croquis) sera supprimée et la maçonnerie sera démolie de façon à assurer à l'écoulement des eaux un débouché de 1^m ; 3°) La morte rivière sera remise en état, au moyen d'un curage à vif fond et à vieux bords, et il lui sera donné la largeur de 1^m. » (Article premier).

Le rapport est accompagné d'un croquis, réalisé dans la marge par l'ingénieur des Ponts et Chaussées, pour illustrer ses propos (Figure 5.2).

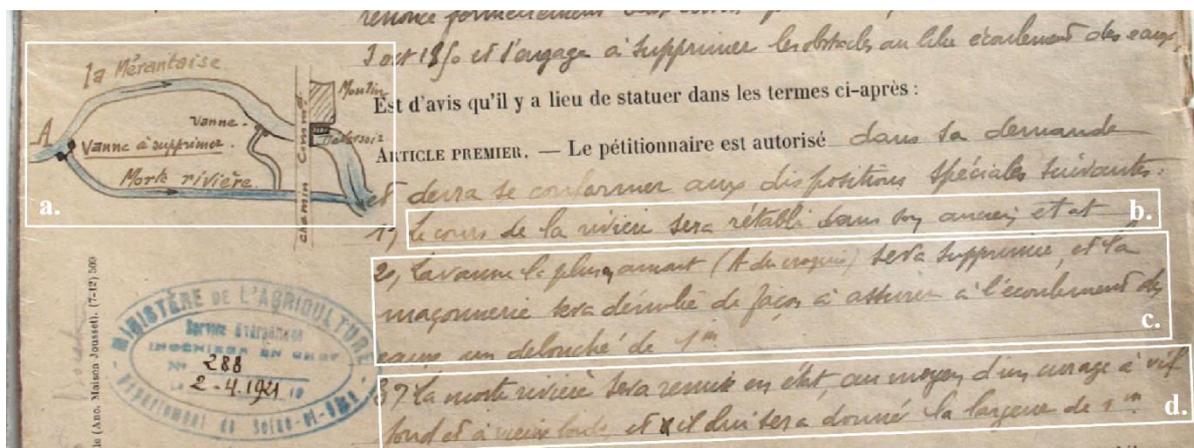


Figure 5.2 : Extrait du rapport des Ponts et Chaussées à l'occasion de la demande de désaffectation du moulin d'Ors par son propriétaire de l'époque, M. Bertrand (fils), en 1921. (Sources : ADY – 7S 114).

Les mêmes obligations sont imposées à l'occasion du déclassement du moulin des Vassaux, en 1934, soit près de 50 ans après la fin d'exploitation de l'usine (fin d'activité en 1888). Il est également demandé au propriétaire du moulin de supprimer « *la vanne la plus en amont, située immédiatement en aval du Pont de Pierre [...] de façon à assurer l'écoulement des eaux [...]* » et de remettre en état « *au moyen d'un curage approprié* » le canal de décharge faisant suite à cette vanne, « *de façon à ce que les eaux puissent gagner, sans obstacle, la morte rivière* ». Soit d'abandonner et déconnecter le bief perché pour remettre en eau le talweg en fond de vallée.

2.3. Un nouvel équilibre entre chenal artificiel et chenal préservé

Ainsi, la fin de la petite hydraulique sur le cours de la Mérentaise est la conséquence du changement de paradigme économique et industriel qui touche l'ensemble du territoire français. Il s'explique localement par des débits trop modestes et donc une puissance trop faible pour alimenter des moulins déjà au chômage une partie de l'année. La fin de l'exploitation hydraulique des petits cours d'eau ordinaires est également responsable de la fragilisation progressive des aménagements des siècles précédents (Lespez et al., 2017). Dans le cas de la Mérentaise, la déliquescence des infrastructures hydrauliques se fait vite sentir, à l'image du complexe hydraulique du moulin des Vassaux que la documentation historique décrit comme détruit. Le canal de fuite du moulin est notamment déconnecté et plus alimenté à la fin du XIX^{ème} siècle. Il tombe alors assez vite en ruine faute d'entretien.

Par ailleurs, la déprise progressive des aménagements hydrauliques de la Mérentaise a conduit à un nouvel équilibre entre la part du linéaire artificialisé et celle du linéaire « préservé » (**Figure 5.3**). Durant cette deuxième phase « d'aménagement » du chenal, la part de linéaire artificialisé représente 68% du lit de la rivière pour 32% de linéaire « préservé ». Comme nous avons pu le constater, ce changement est en réalité effectif à partir des années 1920-1940, soit à la fin de cette deuxième phase d'aménagement de la Mérentaise lorsque les canaux dérivés sont à leur tour abandonnés et déconnectés du chenal actif de la rivière. Les évolutions les plus significatives en ce sens se situent entre les moulins d'Ors et Aubert, où quatre complexes hydrauliques ont été abandonnés et déconnectés du chenal actif. À cet endroit, c'est un peu plus de 3 km de rivière qui ont retrouvé un écoulement en fond de vallée, partiellement libérés des contraintes exercés par les biefs perchés et les ouvrages associés (vannes, déversoirs).

Pour autant, comme nous l'avons vu précédemment, les travaux de remise en eau de la « morte rivière », le fond du talweg naturel, était bien souvent l'occasion d'un reprofilage des sections concernées. La géométrie du lit était alors dictée par les ingénieurs des Ponts et Chaussées en charge du dossier de démantèlement des moulins. De la même manière, il était parfois demandé de renforcer localement des berges, ce qui entraînait alors de nouveaux travaux de chenalisation pour maintenir les berges potentiellement fragilisées.

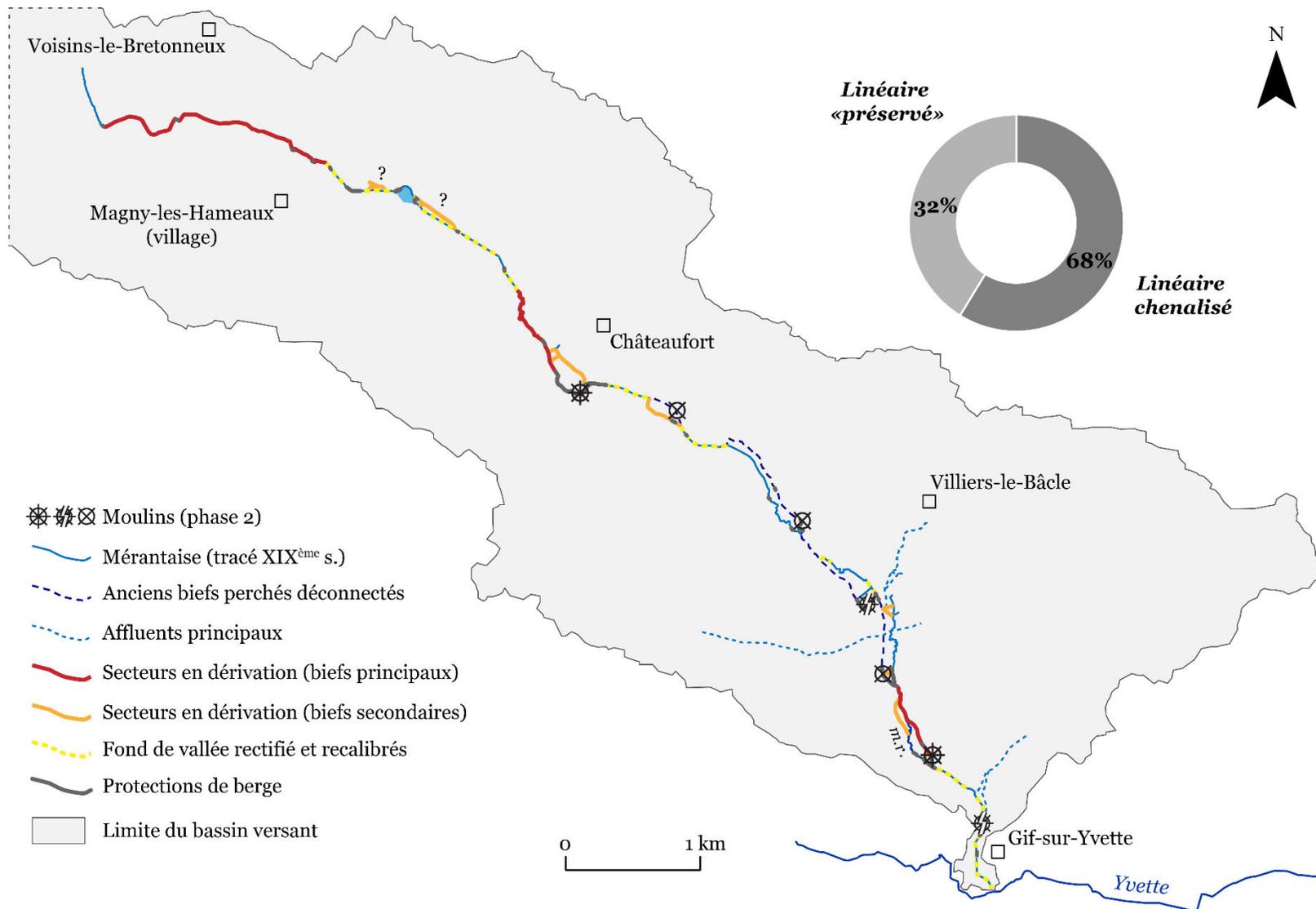


Figure 5.3 : État de la chenalisation du linéaire de la Mérantaise durant la Phase 2, correspondant essentiellement à un abandon et un désaménagement du lit de la rivière.

B. Des évolutions mesurées à l'échelle du bassin versant

Parallèlement au déclin puis à l'abandon quasi systématique des petites usines hydrauliques de la Mérintaise, l'occupation du sol dans le bassin versant a lui aussi évolué en réponse aux changements d'usages du fond de vallée. En effet, la fin des systèmes hydrauliques dans les petites vallées de faible énergie s'accompagne généralement d'une déprise paysagère des fonds de vallée qui profite alors aux zones de plateaux agricoles (Lespez et al., 2006; Barraud, 2007; Cador et Lespez, 2012). Cependant, ces changements restent mesurés dans le bassin versant de la Mérintaise entre 1880 et 1945.

1. Déprise paysagère du fond de vallée et revalorisation des plateaux

Avec la déprise des moulins, les vallées perdent peu à peu leur pouvoir centralisateur des activités industrielles (Barraud, 2007 ; Lespez, et al, 2012). Celles-ci sont bien souvent regroupées autour des centres urbains ou des axes de communication principaux (chemin de fer, rivières navigables, grandes routes). Ces évolutions d'usages ont des conséquences directes en termes de répartition de l'occupation des sols dans les bassins versants concernés.

En effet, le déclin puis l'abandon quasi systématique des petites usines hydrauliques ont conditionné un recul des surfaces agricoles puisque les besoins de l'activité de meunerie ne sont plus à satisfaire. Celles-ci restent tout de même majoritaires dans le bassin de la Mérintaise, durant toute la deuxième phase. Ce sont tout d'abord les secteurs les plus difficiles à mettre en valeur, à savoir les versants à pentes fortes, qui ont perdu leur caractère agricole (Lespez et al., 2006). Dans le cas de notre site d'étude, les versants agricoles ont laissé place à des bois, fermant un peu plus les paysages de la vallée. Une reconstitution des évolutions du mode d'occupation du sol dans le bassin versant de la Mérintaise a pu être établie à partir des photographies aériennes de 1947 (Yvelines)-1949 (Essonne) et est présentée dans la **Figure 5.4**. Étant donné les dates des prises de vue, elle propose un état des lieux pour la fin de notre deuxième phase. Cependant, après vérification préalable avec des cartes topographiques levées entre 1906 et 1922, il apparaît que l'occupation du sol a peu évolué entre le début et la moitié du XX^{ème} siècle.

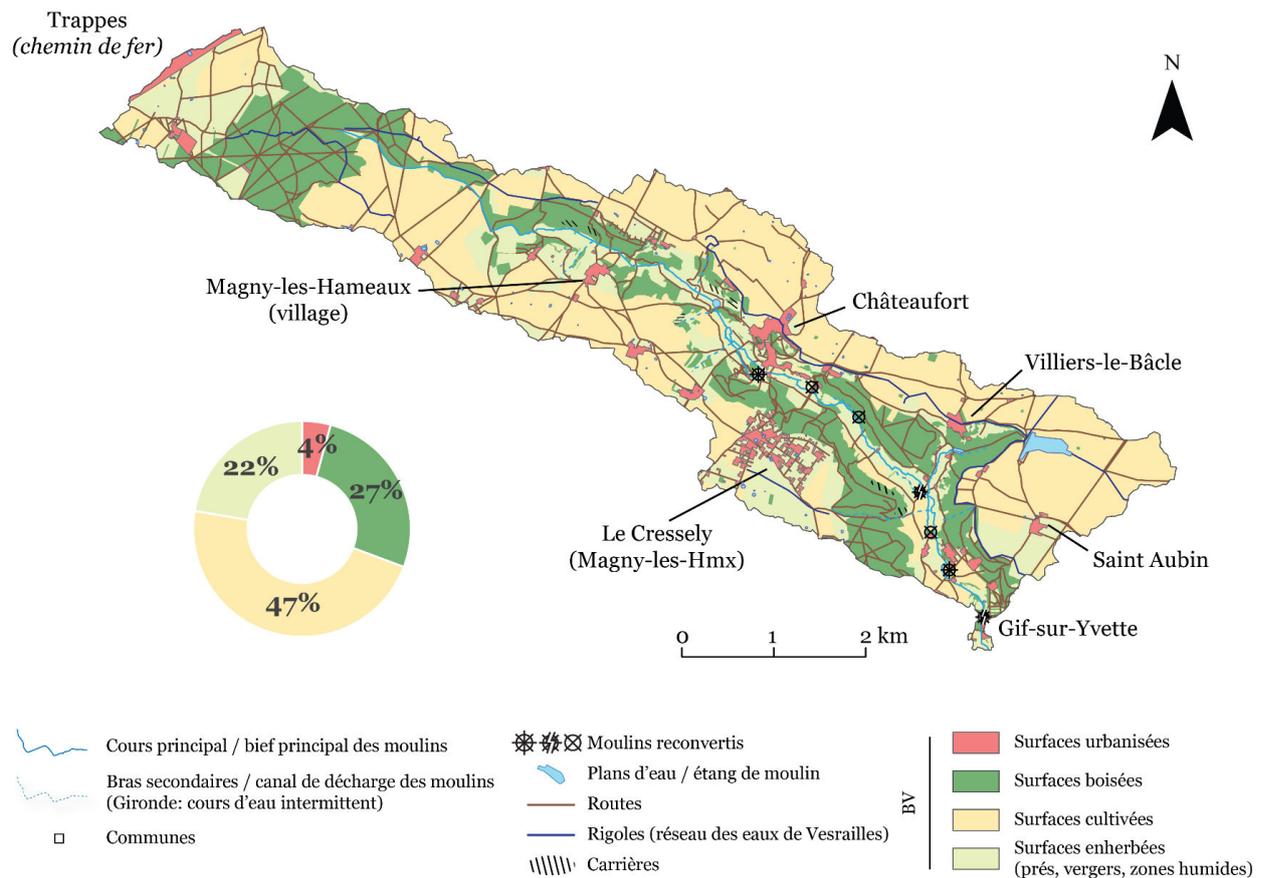


Figure 5.4 : Répartition du mode d'occupation du sol durant la deuxième phase (1880-1950). (d'après les photographies aériennes de l'IGN, campagnes de 1947-1949).

Ainsi, durant notre deuxième phase, les labours ne représentent plus que 47 % du territoire et se concentrent en haut de versant et sur les plateaux. Par ailleurs, l'agriculture sur le plateau de Saclay commence à devenir intensive, au sens productiviste du terme, grâce aux évolutions technologiques (modernisation du matériel et des techniques agricoles) et aux choix politiques de développement menés sur ces espaces franciliens dès la première moitié du XX^{ème} siècle. En effet, ces terres agricoles sont très fertiles, et reconnues parmi les plus productives de la région francilienne, depuis au moins trois siècles (Bouroui, 2000).

Les surfaces boisées ont, quant à elles, augmentées de 2%, passant ainsi de 25 à 27% du territoire. Cette dynamique s'explique certainement par le caractère encaissé de la vallée de la Mérantaise et des versants nord abrupts, peu propices aux cultures. Précisons, cependant, que les forêts étaient en grande partie exploitées pour leur bois.

D'autre part, les prairies et les vergers sont également en forte augmentation, atteignant 22% du territoire. Les prairies se concentrent essentiellement en fond de vallée, où l'humidité est la plus importante. L'élevage a pratiquement disparu, seul l'élevage équin persiste. Les prairies du moulin Neuf (Villiers-le-Bâcle), transformé à partir de 1890 en haras, accueillait, par exemple, les vieux chevaux des omnibus de Paris, désormais à la retraite (Figure 5.5). La littérature grise des années 1940-60 évoque notamment des conditions trop humides du fond de vallée pour permettre le maintien de troupeaux de

moutons. Quelques vaches subsistent tout de même et partagent leurs pâturages avec les chevaux. Sur les plateaux, les vergers sont nombreux et principalement localisés à proximité des nouveaux pôles urbains, comme au Cressely (commune de Magny-les-Hameaux) et de la ligne de chemin de fer Paris-Chartres. Cette augmentation témoigne peut-être d'une réappropriation de terres de culture par des particuliers modestes pour une consommation locale et/ou personnelle. Mais, il peut également s'agir de productions maraîchères industrielles.

Enfin, cette deuxième phase n'est pas encore celle des profonds bouleversements qu'a connus plus tard le bassin versant. La France reste encore très rurale et agricole, l'exode rural n'a pas encore eu lieu. De même, les zones urbaines ne connaissent encore qu'une faible augmentation de 2% à 4% (**Figure 5.4**). Ce chiffre est notamment conditionné par le développement de la ligne de chemin de fer passant à Trappes, en tête de bassin.

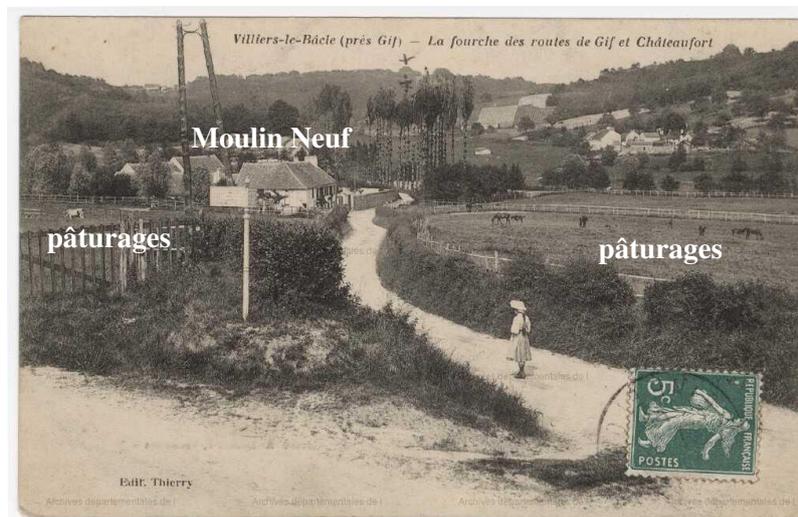


Figure 5.5: Le haras du moulin Neuf au début du XX^{ème} siècle. Chevaux et vaches y partagent les pâturages de la prairie humide en fond de vallée. (Sources : ADE, 2Fi 192)

2. Du paysage productif du fond de vallée au paysage productif des plateaux (plateau de Saclay)

Ainsi, cette deuxième phase d'aménagement correspond en réalité plutôt à une dynamique de désaménagement de la vallée de la Mérintaise. Les ouvrages hydrauliques sont progressivement abandonnés et leur activité initiale de meunerie totalement délaissée. Aussi, les conséquences sur les pratiques et les usages à l'échelle du bassin versant sont de deux ordres.

D'une part, le fond de vallée, qui concentrait jusque-là une grande partie de l'activité économique du territoire grâce aux moulins, perd son caractère productif qui le définissait depuis de nombreux siècles (Barraud, 2007). Cela se traduit, localement par une déprise paysagère du fond de vallée au droit des anciens complexes hydrauliques, et plus globalement à l'échelle de la vallée. Les espaces agricoles

(essentiellement des prairies humides) en fond de vallée ne sont plus drainés et entretenus de manière systématique. Les friches hydrauliques et agricoles se multiplient alors à la fin de notre deuxième phase, soit à partir des années 1930. Ce ne sont pas tant les anciens moulins reconvertis que le reste du réseau hydraulique qui constitue ces friches hydrauliques (Le Cœur et Gautier, 2005). Les biefs perchés et leurs ouvrages associés (vannes et déversoirs) sont peu à peu déconnectés des écoulements principaux et tombent en ruine faute d'entretien. De la même manière, les espaces de labours en fond de vallée disparaissent pour laisser place à des prairies humides où aucune agriculture/élevage n'est plus envisageable. Pourtant, ce processus ne concerne que la fin de la période 1890-1950. Nous reviendrons donc ultérieurement sur le sujet (cf. Chapitre 6)

D'autre part, on observe un transfert du caractère productif des paysages du fond de vallée de la Méranlaise vers les plateaux. En effet, si le bassin versant reste essentiellement rural et agricole, l'agriculture industrielle marque de manière durable l'identité paysagère du plateau de Saclay. Bien que ce processus fut entamé par les décisions politiques post 1789, et en particulier par la nationalisation des biens et des terres, la céréaliculture se développe, se renforce et se modernise à partir de 1850 (Bouraoui, 2000). L'installation d'un nouveau réseau de drainage en tuyaux de poterie, en 1880, améliore encore la qualité des sols du plateau.

Comme le rappelle Bouraoui (2000), deux types d'agriculture se partagent inégalement les riches terres saclaysiennes : celle des grandes exploitations, de plus en plus importantes et modernes, implantées au centre du plateau, et celle des petits exploitants installés sur les pentes dont les techniques demeurent traditionnelles. On y produit, outre les cultures céréalières (les plus cultivées), des cultures fourragères (foins, luzerne et trèfle), de betteraves à sucre et de pommes de terre. La fin du XIX^{ème} siècle voit également l'arrivée de la culture de la fraise, qui fait durant quelques décennies la richesse des petits et des grandes exploitations, avant sa disparition à cause des maladies. Cette région fut même désignée « *la vallée des fraises* » par le journaliste Victor-Eugène Ardouin-Dumazet, auteur d'une soixantaine de guides touristiques publiés, entre 1893 et 1907, sous le nom de *Voyage en France*⁵¹. La betterave à sucre et les distilleries du bassin de l'Yvette qu'elles alimentaient (Saint-Aubin, Orsigny, Guyancourt) disparaissent également dans les années 1930.

Les cultures pratiquées à l'époque sur le plateau relèvent ainsi d'une agriculture industrielle dont la production est destinée à Paris et sa région. À partir de l'entre-deux guerres et pour répondre à une demande toujours plus grande des consommateurs et pallier les prix de plus en plus élevés du fermage, les cultivateurs du plateau de Saclay intensifient leur production, grâce à la modernisation des machines agricoles, la réduction de la main-d'œuvre et le recours aux engrais (Bouraoui, 2000).

⁵¹ V.E. Ardouin-Dumazet, 1907. *Voyage en France*, 45^e série, région parisienne : IV, Sud-Ouest, Versailles et le Hurepoix. Berger-Levrault & Cie, Editeurs, Paris, p.203.

L'agriculture traditionnelle est progressivement remplacée par une nouvelle agriculture moderne et puissante, basée sur l'intensification des cultures et la suppression de la jachère.

Enfin, un dernier aspect de l'agriculture saclaysienne se met en place dès le début du XX^{ème} siècle : l'implantation d'établissements de recherches agronomiques qui développe une « agriculture scientifique » (Bouraoui, 2000). Il s'agit alors des ancêtres des actuels organismes tels que l'Institut National Agronomique Paris-Grignon (INA-PG), l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages (ITCF), ou encore l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA), et bien d'autres. Ils cherchent à améliorer les productions et la rentabilité des graines de semences (céréales, betteraves, graines fourragères, ...

Enfin, durant toute la période, le réseau des étangs et rigoles du plateau de Saclay est maintenu et reste actif. Il assure donc toujours un rôle de drainage et d'interception des ruissellements des eaux sur les versants. Les rigoles continuent de contrôler les écoulements qui alimentent la Mérantaise. Pourtant, les deux guerres mondiales fragilisent ce système hydraulique. Celui-ci n'est plus entretenu à partir de 1945.

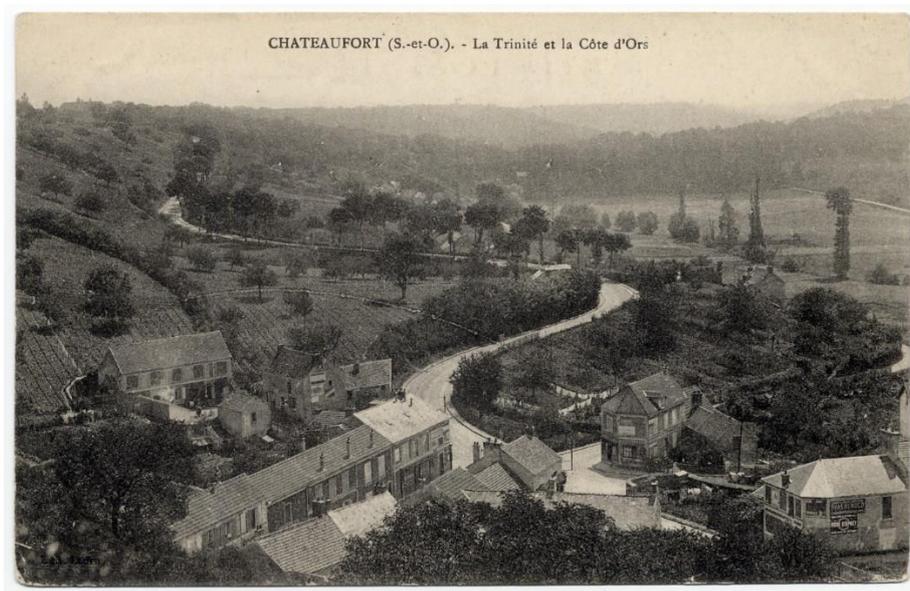


Figure 5.6 : Vue des paysages du bassin versant de la Mérantaise en 1913 (sources : ADY, 3Fi 52 9)

Chapitre 6. PHASE 3 : UNE URBANISATION MASSIVE ET RÉCENTE
(1950-2015)

A. : Un bassin versant devenu périurbain	p.217
B. : Un linéaire hérité, désormais conditionné par les aménagements dans le bassin versant	p.224

Introduction

La troisième et dernière phase caractérisant la trajectoire historique et fonctionnelle de la Mérentaise concerne la seconde moitié du XX^{ème} siècle. Il s'agit d'une période courte, comme la précédente, caractérisée par des changements significatifs et extrêmement rapides. **Les paysages du bassin versant perdent en effet partiellement leurs dynamiques rurales et agricoles pour des espaces de plus en plus urbanisés.** Ces grandes évolutions du bassin de la Mérentaise illustrent une tendance à l'échelle nationale. La vallée de Chevreuse étant située à proximité de Paris, elle participe du développement massif et rapide de l'urbanisation du territoire francilien, initiée dès les années 1960 par les politiques de planification urbaine menées par les services de l'État. Le mode d'occupation du bassin versant de la Mérentaise se retrouve ainsi significativement modifié par le phénomène de périurbanisation⁵². Cependant, notons que la vallée de la Mérentaise se trouve dans un contexte particulier. Elle se retrouve en effet dans un double processus de maintien de l'agriculture et de développement (péri)urbain massif, du fait de sa position proche de Paris, et la présence du plateau de Saclay, qui fait l'objet d'une politique spécifique de maintien de l'agriculture.

Parallèlement, le chenal de la Mérentaise a fini de se stabiliser dans le tracé qu'on lui connaît aujourd'hui. Son état actuel est le résultat, d'une part, de l'héritage des aménagements hydrauliques passés et, d'autre part, des nouvelles conditions d'écoulement imposées par le développement massif de l'urbanisation dans le bassin.

Ce chapitre sera donc l'occasion de retracer les évolutions récentes du bassin de la Mérentaise, qui concernent cette fois ci en premier lieu les pratiques et usages à l'échelle du bassin versant. Nous nous intéresserons, tout d'abord, à la mise en place du processus de périurbanisation, en particulier en tête de bassin (A.). Nous verrons ensuite comment le cours de la Mérentaise s'est adapté aux nouvelles conditions hydrologiques établies en à peine trois décennies (3.).

Les données exploitées dans ce chapitre sont encore une fois issues de différents types de sources (plans anciens, photographies aériennes, archives textuelles). Cependant, une part importante des informations exploitées a été tirée de rapports et de diagnostics contemporains de cette période. La littérature grise, certains sites et blogs internet spécialisés ont ainsi grandement permis la documentation de cette époque riche et récente. Nous nous sommes notamment appuyés sur un rapport complet, daté de 2005 et émanant du Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement et de la Mer⁵³, dans le

⁵² La *périurbanisation* est définie comme « le mode de développement périphérique des agglomérations, [qui] grignote peu à peu l'espace rural (mitage) en s'appuyant sur les noyaux habités préexistants (villages, bourgs) et sur les grands axes de communication qui la relie aux espaces urbains initiaux » (sources : <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/periurbanisation>, consulté le 20/10/2017)

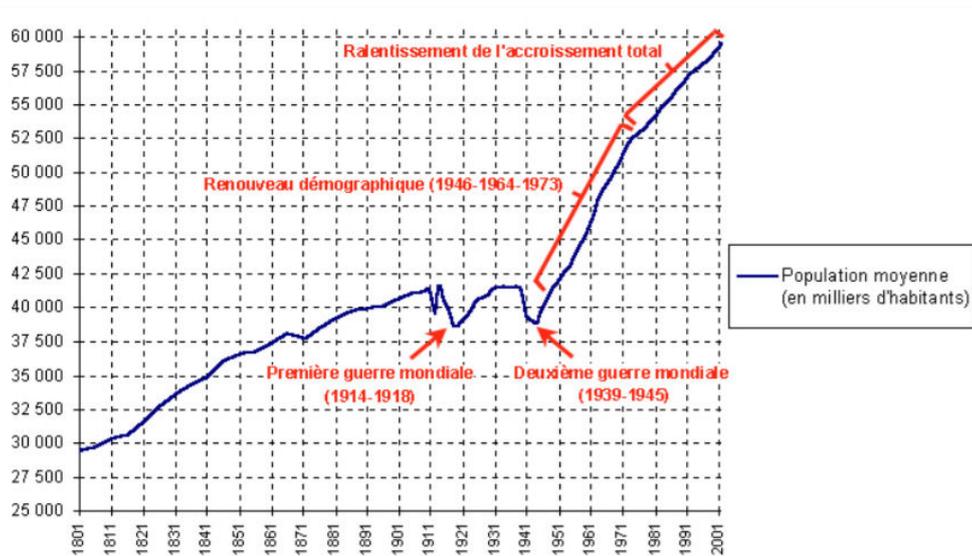
⁵³ Nom du ministère en 2005.

cadre du « Programme interministériel d'Histoire et d'évaluation des Villes Nouvelles Françaises ». Intitulé « *Hydrologie et Paysages urbains en Villes Nouvelles. Morphologie et logiques de conception. Le Val Maubuée, secteur II de Marne-la-Vallée et le Centre ville de Saint-Quentin-en-Yvelines (1970-1990)* », il a été dirigé scientifiquement par Nicole Eleb-Harlé et Sabine Barles (Laboratoires IPRAUS et TMU-UMR 7136).

A. Un bassin versant devenu périurbain

La seconde moitié du XX^{ème} siècle est marquée par un double processus démographique et sociétal qui touche les espaces ruraux et urbains français. La période de l'après-guerre est en effet celle d'un renouveau démographique particulièrement spectaculaire, initié dès 1946 avec le baby-boom (**Figure 6.1**). Parallèlement, le déclin des industries rurales et de l'agriculture se généralise à tout le territoire français et marque le début d'un exode rural massif vers les villes. Lié à la révolution industrielle, l'exode rural français est tardif si on le compare à d'autres pays d'Europe occidentale (Angleterre, ...) ou d'Amérique du Sud. Il débute, certes, au XIX^{ème} siècle mais n'affecte, au départ, que les terroirs les plus difficiles à exploiter (sud de la France et régions montagneuses). Après la Seconde Guerre Mondiale, les campagnes françaises se vident et les industries sont délocalisées dans et à proximité des centres urbains. Alors que la France comptait près de 44% de personnes vivant de la terre au recensement de 1906, cette population ne représente plus que 31% des français en 1954, et 8.2% en 1985 (Frémont, 1997).

À ce constat s'ajoute l'instauration d'une agriculture intensive, plus productive et pour laquelle la surface agricole utile (SAU) concerne encore la moitié du territoire français en 1985. L'agriculture n'a donc pas délaissé les campagnes, bien au contraire, mais elle demande désormais moins de main-d'œuvre, à l'inverse de l'industrie dans les villes. L'après-guerre et les Trente Glorieuses transforment profondément la société française. C'est la « *fin des paysans* » (Mendras, 1967) face à une société de plus en plus technique, qui se modernise et va désormais chercher du travail en ville.



© Gérard-François Dumont - Chiffres Insee métropole.

Figure 6.1: Évolution de la population de la France métropolitaine entre 1801 et 2002 (d'après Dumont, 2002 ; sources INSEE)

Aussi, pour faire face, d'une part, à un accroissement démographique important et, d'autre part, à l'arrivée massive de populations abandonnant les campagnes au profit des villes, le gouvernement de l'époque décide de la création des Villes-Nouvelles. Neufs sites ont été choisis en France, dont cinq en Île-de-France. En région parisienne, Paul Delouvrier, l'un des artisans du remodelage du territoire français pendant les « Trente Glorieuses » et délégué général au District de la Région de Paris de 1961 à 1969, reçut directement du Président de Gaulle l'autorité de « mettre de l'ordre dans ce désordre » (la formule employée par de Gaulle à l'époque n'était semble-t-il pas aussi neutre). La création de ces nouveaux centres urbains est issue du Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Parisienne, en 1965. Les objectifs à long terme visaient à restructurer la grande banlieue grâce à la construction de pôles urbains équipés de tous les aménagements nécessaires aux populations locales. En rapprochant l'habitat et toutes les commodités de l'emploi, il s'agissait également de limiter les migrations quotidiennes (Eleb-Harlé et Barles, 2005). Cette politique des Villes-Nouvelles a contribué ainsi à la sortie de terre, pratiquement ex-nihilo, de centres urbains très importants s'étendant sur plusieurs centaines de km².

1. La Ville-Nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines

1.1. Création et développement de Saint-Quentin-en-Yvelines

Décidée dès 1965, la Ville Nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines (78) voit le jour au début des années 1970, mais ne connaît son pic de construction qu'à partir des années 1980-1990. Le choix de son implantation fut motivé par plusieurs éléments. Tout d'abord, la localisation de la vallée de Chevreuse, proche de Paris et déjà prisée par les Parisiens, en faisait un site privilégié. La proximité de la préfecture de Versailles, celle de l'autoroute de l'Ouest (A13) et la desserte du chemin de fer Paris-Rambouillet conforte sa localisation. D'autre part, il s'agissait d'un secteur déjà dynamique, depuis l'après-guerre, d'un point de vue urbanistique, notamment dans sa partie Est (Trappes).

Trois communes de Saint-Quentin-en-Yvelines se trouvent sur le territoire du bassin versant de la Mérantaise : Trappes (sa zone d'activité), Voisins-le-Bretonneux et Magny-les-Hameaux, toutes situées en tête de bassin et sur les plateaux (**Figure 6.2**). C'est à partir du développement de la Ville Nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines que ce territoire a gagné son caractère périurbain. Cependant, les autres communes du bassin versant (Châteaufort, Villiers-le-Bâcle, Saint-Aubin et Gif-sur-Yvette) ont également bénéficié de cette dynamique. C'est ainsi près d'un quart du territoire qui est devenu urbain (**Figure 6.4**).

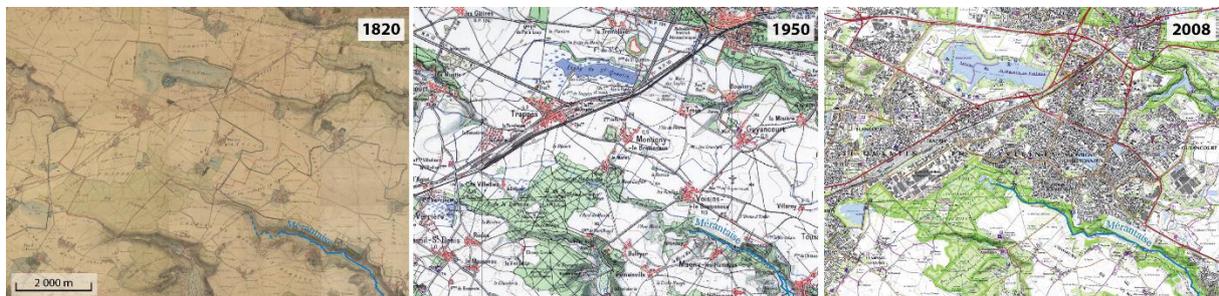


Figure 6.2 : Illustration par une comparaison diachronique de cartes anciennes du développement massif et rapide de l'urbanisation en tête de bassin de la Mérantaise. Construction de la Ville-Nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines à partir des années 1980.

1.2. Une innovation dans la gestion des eaux de ruissellement urbain

Les Villes Nouvelles, telle que Saint-Quentin-en-Yvelines, font par ailleurs preuve de grande innovation en terme de gestion des eaux de ruissellement urbain et de dimensionnement des réseaux d'assainissement (Eleb-Harlé et Barles, 2005). Depuis les débuts de densification urbaine, les principes d'assainissement prônaient une évacuation la plus rapide possible des écoulements. Or, les années 60 et la création des villes nouvelles marquent un changement de paradigme : à l'inverse des objectifs initiaux d'évacuation rapide, il s'agit maintenant de retenir et ralentir les écoulements urbains afin de réduire les

quantités d'eau apportées aux réseaux lors des fortes pluies (Eleb-Harlé et Barles, 2005). C'est donc à cette époque et pour la création des Villes Nouvelles françaises que se développent les bassins d'orage, des ouvrages de rétention pensés pour stocker un temps toute ou partie des eaux de ruissellement, avant de les restituer au réseau/cours d'eau grâce à un débit de fuite maîtrisé. Les choix de techniques alternatives de recueil des eaux pluviales n'a pas tant relevé de contraintes techniques que d'une véritable volonté politique, une condition incontournable à la mise en place de ces nouveaux centres urbains.

Par ailleurs, la ville nouvelle de SQY fut pensée dans un objectif de créer « une ville à la campagne ». En effet, malgré une urbanisation dense, SQY s'inscrivait également dans un cadre naturel d'exception qu'il fallait préserver (Eleb-Harlé et Barles, 2005). De la même manière, les aménagements hydrauliques anciens qui drainaient depuis le XVII^{ème} siècle le plateau, avaient une valeur patrimoniale à respecter et constituaient déjà une base pour la gestion du ruissellement urbain. Ce contexte a donc justifié la mise en place de bassin d'orage et d'un réseau d'assainissement dans la ville de SQY, mais aussi dans les vallées alentour, comme celle de la Mérentaise.

Le bassin versant de la Mérentaise d'étude est équipé de 7 bassins de rétention : les étangs du Manet (**Figure 6.3**), des Gravieres, le bassin de Brouëssy, Gomberville, Chevincourt et du Buisson. Initialement, quatre d'entre eux ont été conçus pour être en eau toute l'année, et deux à sec, remplis au moment des épisodes pluvieux. Aujourd'hui, tous les bassins sont en eau de manière permanente, faute d'entretien.



Figure 6.3 : Les étangs du Manet (étang aval). Prise de vue depuis la digue (crédit photo : Jugie, 2012)

Nous verrons, cependant, plus tard (cf. B. et Chapitre 8, Partie 3) que malgré cette conception en apparence respectueuse du patrimoine naturel et historique de ce territoire, le calibrage de ces équipements hydrauliques semblent être responsable d'une modification des écoulements hydrologiques dans le bassin de la Mérentaise. Le fonctionnement hydrosédimentaire de la rivière depuis trois ou quatre décennies semble directement imputable à la présence de SQY en tête de bassin.

2. Évolution des autres postes d'occupation du sol

En conséquence de cet accroissement urbain significatif, la surface agricole a fortement diminué et ne représente plus que 30% du bassin (**Figure 6.4**). Elle se concentre désormais sur les plateaux, notamment de Saclay et est devenue intensive (Meybeck et al. (Eds), 1998, Bouraoui, 2000). Pour autant, l'agriculture reste le poste d'occupation du sol majoritaire dans le bassin de la Mérantaise. Elle bénéficie, en effet, de l'importance régionale, voire nationale, du plateau de Saclay dans l'agriculture du XX^{ème} siècle (Bouraoui, 2000).

À l'inverse, les surfaces boisées continuent d'augmenter (28%), profitant certainement de la gestion environnementale du Parc Naturel Régional de la Haute Vallée de Chevreuse créé en 1995 et de la Réserve Naturelle Régionale qui couvrent une partie de la vallée. La part des prairies se maintient à 19% mais ne couvre plus systématiquement les mêmes surfaces du bassin : les espaces anciennement enherbés en tête de bassin et au niveau de Cressely ont été absorbés par l'urbanisation de la zone d'activité de Trappes et des communes de Magny-les-Hameaux. Les prairies se concentrent aujourd'hui dans le fond de vallée humide. Elles ne sont pas drainées dans la partie amont et sont donc devenues des zones humides que le PNR de la Haute Vallée de Chevreuse protège et entretient partiellement. Seules les prairies du secteur aval, lorsque la vallée s'élargit, sont occupées par quelques élevages de chevaux et de poneys. Certaines, enfin, constituent des jardins et espaces verts dans les parties urbanisées (à Gif-sur-Yvette et Villiers-le-Bâcle principalement). Les vergers et autres surfaces maraîchères ont pratiquement disparu de la vallée de la Mérantaise.

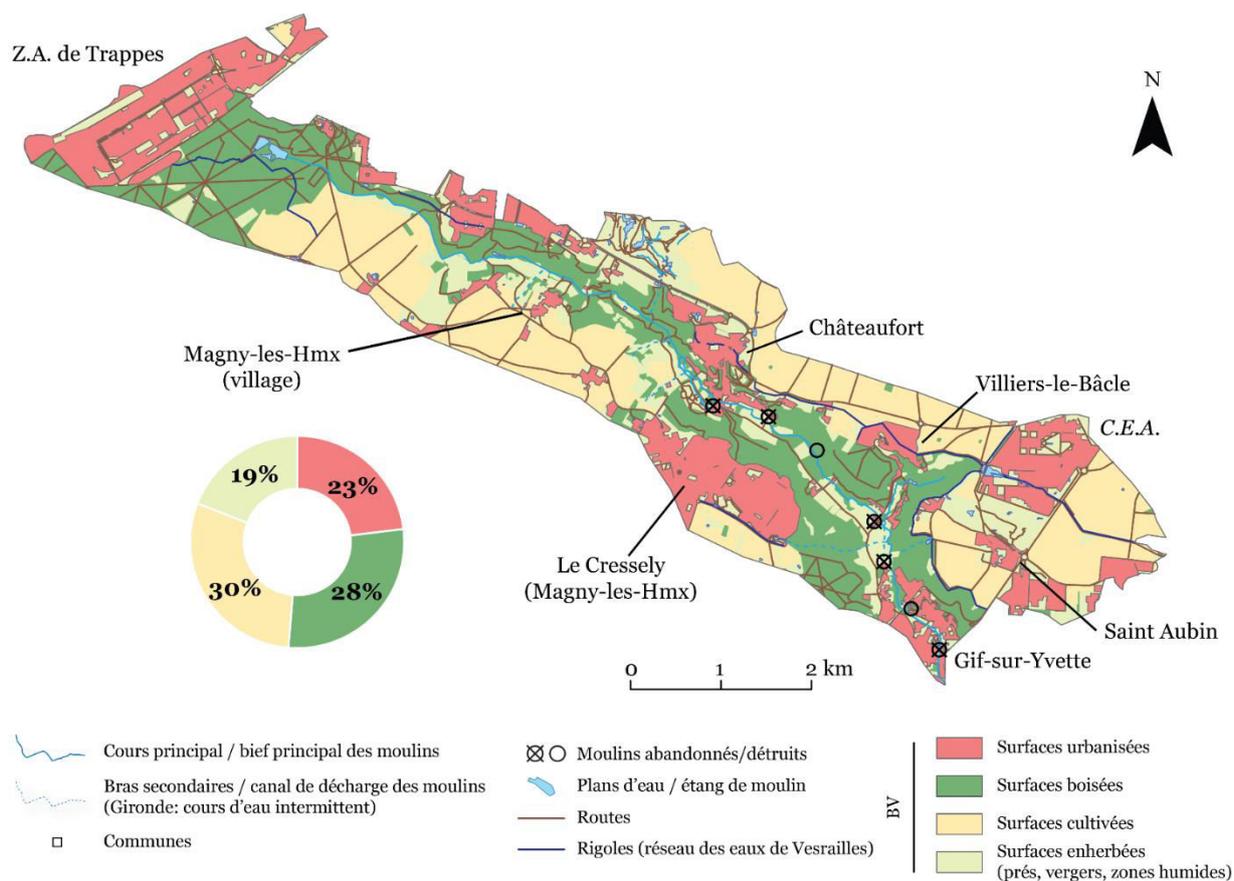


Figure 6.4 : Répartition du mode d'occupation du sol durant la troisième phase (1950-2015). (D'après les photographies aériennes de l'IGN, campagne de 2014)

3. Les nouvelles limites artificielles du bassin versant

Par ailleurs, comme le lecteur l'aura peut-être remarqué, les limites du bassin versant actuel ne correspondent pas à celles du bassin considéré dans les périodes précédentes. En effet, aujourd'hui, une grande part des écoulements hydrologiques ont comme origine le ruissellement urbain (surfaces imperméabilisées en tout genre : villes et réseaux de route associés), mais aussi agricoles du fait du plateau de Saclay. Or, la forte augmentation de ce ruissellement a nécessité, comme nous l'avons vu précédemment, une réorganisation du réseau d'assainissement du territoire. Les écoulements sont donc concentrés et contraints via un vaste réseau d'assainissement des eaux pluviales et usées des différentes communes du bassin versant. Ils sont en grande majorité évacués dans la rivière par l'intermédiaire d'ouvrages de lutte contre le ruissellement. Détournés artificiellement, les ruissellements urbains et agricoles ont ainsi été répartis en direction de différents bassins de rétention. Pour ne donner que quelques exemples, les eaux météoriques tombant sur une grande partie de la zone d'activité de Trappes ruissellent « artificiellement » vers le bassin des étangs du Manet et alimentent les eaux de la Mérantaise. A l'inverse, une partie des eaux tombant sur les quartiers résidentiels sud de Voisins-le-Bretonneux est

évacuée dans le bassin de Sourderie à Montigny-le-Bretonneux pour rejoindre la rigole de Guyancourt, et ne rejoignent pas la Mérantaise comme la topographie des lieux le supposerait (Figure 6.5).

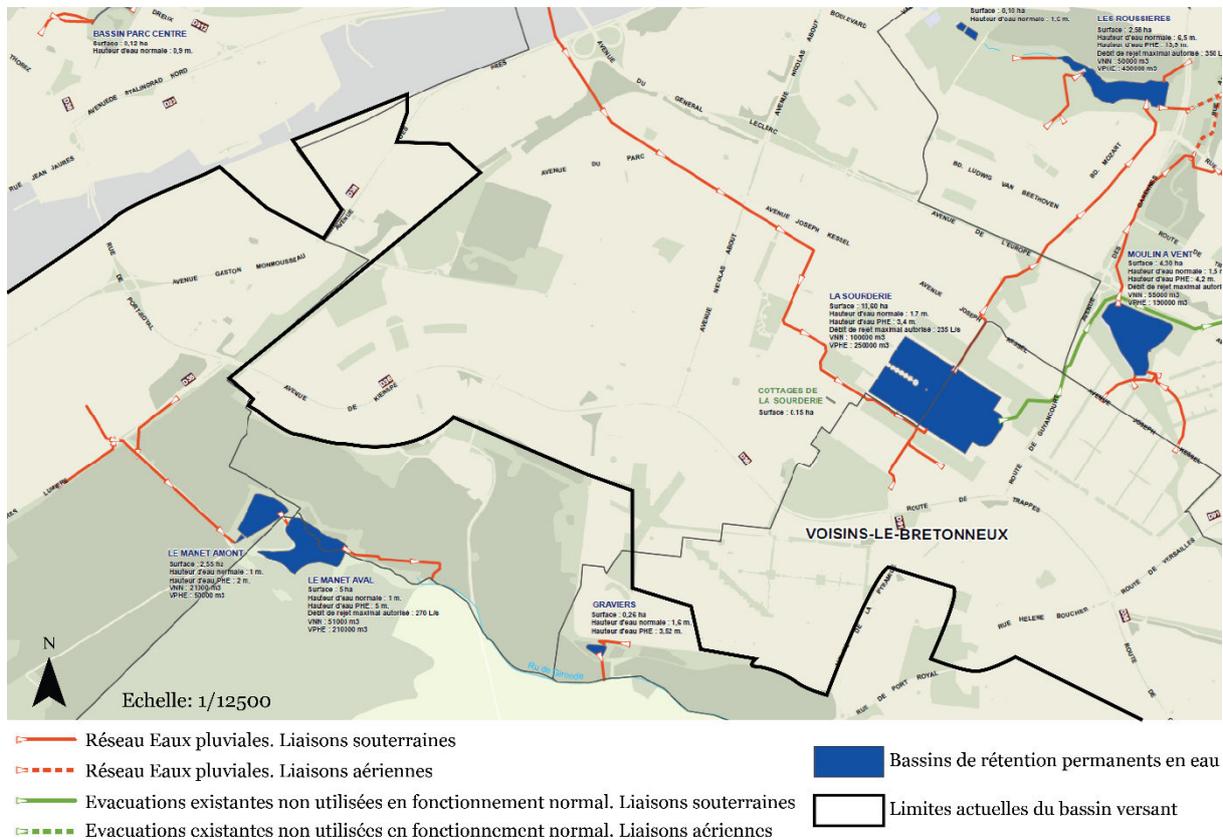


Figure 6.5 : La répartition des eaux pluviales en tête de bassin de la Mérantaise (Ru de la Gironde). Extrait du Plan hydrologique de la CASQY, en charge des eaux pluviales de Saint-Quentin-en-Yvelines (CASQY, 2012, modifié)

Ainsi, le réseau d'assainissement des eaux pluviales ne suit-il pas nécessairement la topographie « naturelle » de la vallée de la Mérantaise. Au contraire, les limites actuelles de son bassin versant s'avèrent artificielles et conditionnées par la réalité de l'aménagement urbain et agricole du territoire depuis trois ou quatre décennies. Les délimitations actuelles de ce bassin versant ont été définies par une étude approfondie commandité par le SIAHVY et réalisée en 2008-2009 par Pöry Environnement (*Étude hydraulique et hydrologique du bassin versant de la Mérantaise. Phase 1 et 2*). Aussi, le bassin versant actuel fait 36 km² alors que le bassin topographique en fait 32.9 km², soit une augmentation de 8.6% (Figure 6.6).

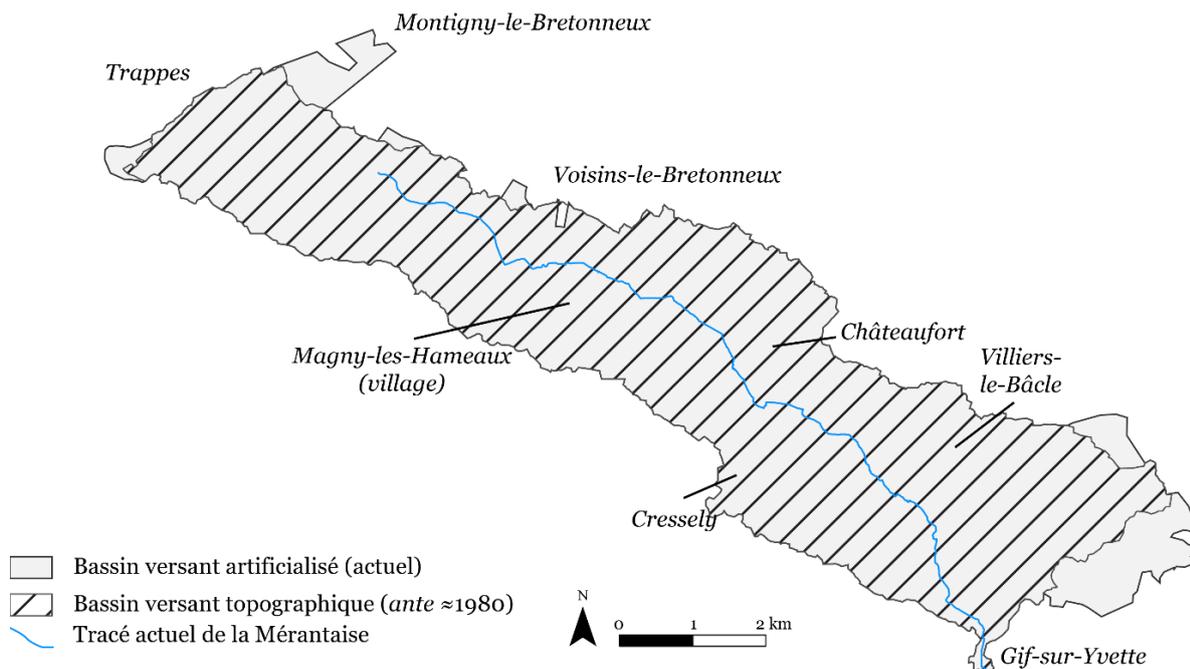


Figure 6.6: Comparaison des limites et du territoire des bassins versants topographie (avant 1980) et artificiel (actuel).

B. Un linéaire hérité, désormais conditionné par les aménagements dans le bassin versant

1. Les conséquences de l'urbanisation sur le tracé de la Mérantaise

Lors de cette troisième phase, le chenal de la Mérantaise a fini de se stabiliser dans le tracé qu'on lui connaît aujourd'hui. Tous les moulins ont été abandonnés en tant qu'usines hydrauliques et seuls les moulins de la Geneste et de Gibecieux sont encore actuellement alimentés par leur bief perché, sans véritables enjeux hydrauliques (**Figure 6.7**). En revanche, aucun des moulins ne présente de systèmes moteurs fonctionnels. Les dérivations au droit des moulins ont pratiquement toutes été délaissées pour remettre en eau le fond du lit naturel, quand cela était possible. Pour autant, le rapport entre la part de linéaire « préservé » et la part de linéaire artificielisé reste respectivement de 35 et 65%, illustrant la très forte empreinte de l'anthropisation des rivières. Ce fort taux d'artificialisation du linéaire de la Mérantaise s'explique par la part encore importante des tronçons historiquement chenalés et empruntés par les écoulements actuels. C'est en particulier le cas des sections qui furent rectifiées et dont la géométrie a été modifiée lors de la remise en eau de l'ancienne « morte rivière ». Cela concerne encore près de 6 km sur les 14 km de rivière, soit 41% du linéaire considéré comme anthropique. Les déviations sont, quant à elles, moins systématiques du fait de l'abandon généralisé des biefs. Mais, on observe, pour autant, le maintien de certains tronçons en positions perchés, comme c'est le cas au niveau du moulin de la Geneste (**Figure 6.7**)

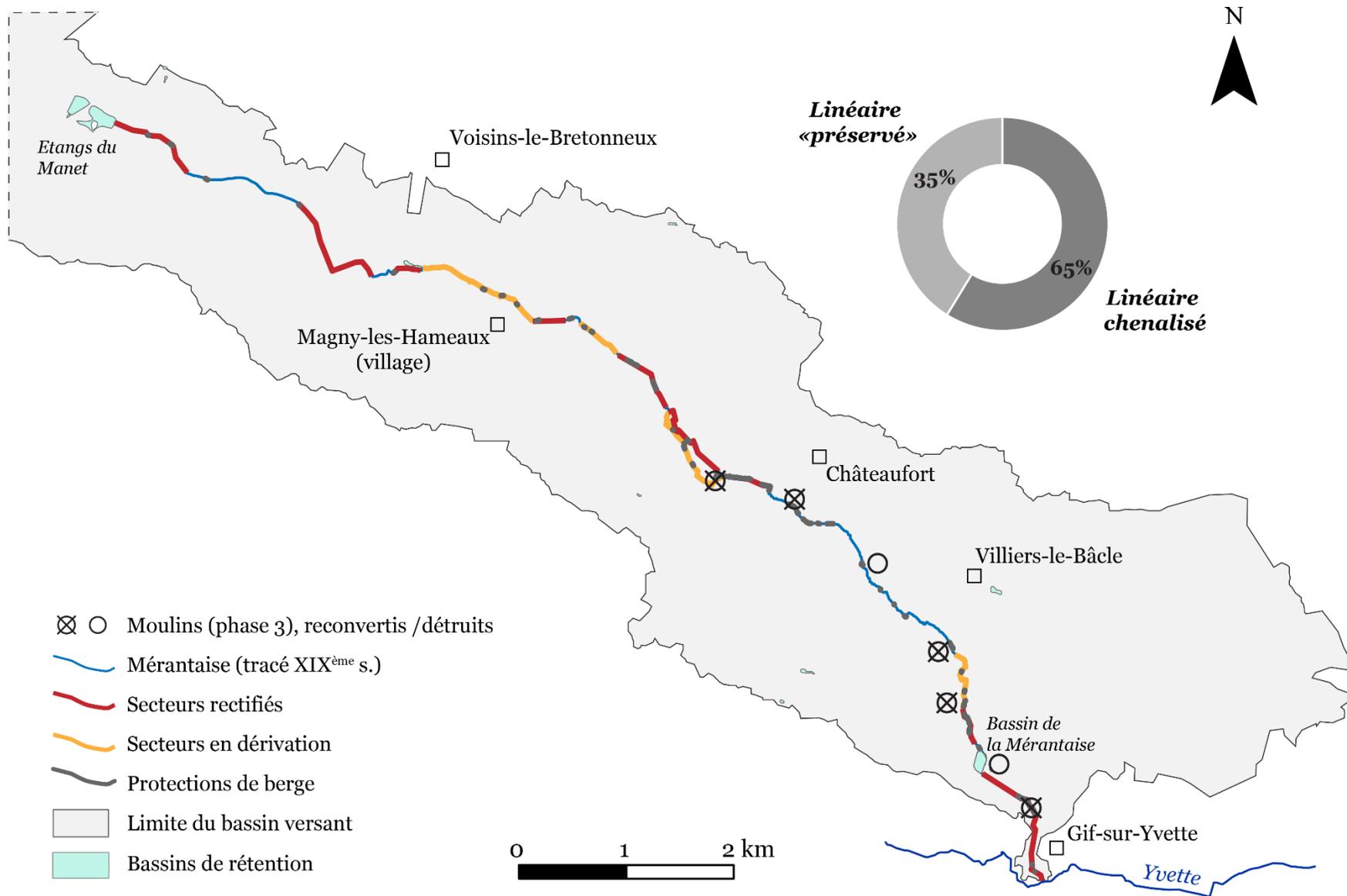


Figure 6.7: État de la chenalisation du linéaire de la Mérantaise durant la Phase 3. Seuls 2 moulins sur les 7 sont encore connectés à la rivière.

Les grandes modifications qui concernent le lit de la Mérantaise sont, en réalité, imputables au développement urbain important de la tête de bassin (Z.A. de Trappes et Voisins-le-Bretonneux). En effet, la multiplication des surfaces imperméabilisées et ruisselantes a nécessité la mise en place d'ouvrages de gestion des eaux pluviales, à savoir les sept bassins d'orages, créés à partir de la fin des années 1970. Deux d'entre eux sont directement implantés sur le cours de la Mérantaise : le bassin de la Mérantaise en amont de Gif-sur-Yvette et les étangs du Manet, en tête de bassin (**Figure 6.7**). Ce n'est donc plus seulement le tracé de la rivière qui est grandement artificialisé, mais aussi sa source. Les étangs du Manet constituent désormais la source de la rivière, court-circuitant ainsi la source naturelle plus en aval de la Mérantaise. Ils alimentent alors de manière pérenne les écoulements dans la partie amont du cours de la Mérantaise (ru de la Gironde) par le soutien du niveau d'étiage. Son linéaire se voit augmenté de plus de 5 km, alors que jusque-là, cet affluent amont de la Mérantaise fonctionnait de manière intermittente, lors des épisodes de fortes pluies (**Figure 6.7**).

2. Les friches hydrauliques

L'abandon des ouvrages de la Mérantaise a conduit à la multiplication des friches hydrauliques (Le Cœur et Gautier, 2005; Lespez, 2012; Lespez et al., 2005, 2015; Lespez et Germaine, 2016). En effet, malgré la restauration de la plupart des bâtiments des moulins en résidence, les biefs et vannes associées sont aujourd'hui dans un état de délabrement plus ou moins avancé car ils ne sont plus entretenus. Ainsi, sur les huit moulins historiquement implantés sur le cours de la Mérantaise, cinq ont connu une seconde vie en tant qu'habitation et 3 sont désormais abandonnés et en ruine (Mérancis, les Vassaux et Chamort) (**Figure 6.7** et **Figure 6.8.a**). En revanche, les $\frac{3}{4}$ des biefs et ouvrages associés sont aujourd'hui totalement délaissés. Les vannes sont pour la plupart relevées, et les biefs déconnectés des écoulements actuels de la rivière. Les vannes tombent en ruine et les biefs s'encombrent, s'ensavent et se bouchent (**Figure 6.8.b. à d.**). Seul les tronçons des moulins de la Geneste et de Gibecieux ont été partiellement maintenus et restent entretenus. Pourtant, malgré leur abandon, leurs traces sont encore visibles, de manière plus ou moins discrète, dans le paysage du fond de vallée, témoignant de cet héritage pas si lointain. Les roues qui se délitent rappellent, en effet, le passé de moulin des bâtiments (**Figure 6.8.c**).



Figure 6.8 : Exemples de friches hydrauliques sur la Mérantaise. a. moulin des Vassaux abandonné ; on y aperçoit l'ancienne salle des machines et un ancien bief perché. b. ancienne vanne levée en amont du moulin de la Tuilerie (Aubert). c. ancienne roue du moulin d'Ors. d. ancien bief comblé entre le moulin d'Ors et le moulin des Vassaux, laissant une trace presque imperceptible de sa présence. (Crédit photo : M. Jugie, 2013-2014)

3. Les rigoles à l'abandon

Enfin, le réseau des rigoles est progressivement laissé à l'abandon à partir de 1945. Comme pour beaucoup d'ouvrages patrimoniaux français, les deux guerres mondiales du siècle dernier, et en particulier la deuxième dans notre cas, ont conduit au délaissement forcé du réseau des étangs et rigoles alimentant le Château de Versailles, faute de main-d'œuvre pour l'entretien. Les efforts humains se sont reportés sur d'autres préoccupations du moment. Le comblement d'étangs (le Trou Salé en 1943) et la mise hors service de certains aqueducs (celui de Buc en 1950), puis la déconnection en 1977 du système hydraulique et du réseau des étangs supérieurs du plateau de Saclay à l'occasion de la construction de la SQY marquent la fin d'exploitation de ce vaste réseau hydraulique.

Les rigoles présentes sur le territoire de la Mérantaise ne sont pas épargnées. Elles s'ensavent et se comblent durant la deuxième moitié du XX^{ème} siècle. Elles ne sont pratiquement plus opérationnelles

à la fin du siècle, faute d'entretien. Cependant, depuis une dizaine d'années, les rigoles font l'objet d'opération de restauration pour qu'elles retrouvent leurs fonctions originelles de collecte et régulation des eaux pluviales. Le transport effectif des eaux jusqu'au domaine du château de Versailles n'est pas encore opérationnel mais fait partie des enjeux à atteindre pour le Syndicat de l'Yvette et de la Bièvre (SYB), en charge de leur gestion. Elles ont, enfin, un rôle écologique car elles constituent des réservoirs pour la biodiversité des zones humides (Lefebvre, 2015).

Les rigoles de Châteaufort (**Figure 6.9**) et de Saint-Aubin, les deux principales du réseau comprises dans le bassin de la Mérantaise, ont déjà été localement rénovées mais restent en partie encombrées (**Figure 6.9.b.**).



Figure 6.9 : Vues de la rigole de Châteaufort (Crédit photo : M. Jugie, 2013).

SYNTHÈSE : RECONSTITUTION DE LA TRAJECTOIRE HISTORIQUE DE LA MÉRANTAISE. HÉRITAGES DES DIFFÉRENTES PHASES D'AMÉNAGEMENTS

Il est désormais acquis que les rivières, notamment celles de faible énergie, ont été profondément et durablement transformées par l'action des sociétés humaines, dans le temps et dans l'espace (Brown, 1997 ; Walter et Merritts, 2008 ; Lespez et al, 2008, 2015, 2016 ; Notebaert et Verstraeten, 2010 ; Brown et al, 2013, 2018). L'évolution des cours d'eau est marquée par différentes phases de pratiques et d'usages, tant à l'échelle du chenal qu'à celle de son bassin versant. Qu'ils soient implantés directement dans le lit de la rivière ou qu'ils participent du mode d'occupation de son bassin, les aménagements sont responsables de modifications hydromorphologiques dans le chenal. Les trois grandes phases d'aménagement (au sens large) de la Mérintaise répondent à des besoins spécifiques des sociétés riveraines vis-à-vis de la rivière. Leur répartition temporelle correspond à une réalité propre à l'histoire de la vallée de la Mérintaise, mais aussi à celle du contexte historique français.

La figure suivante (**Figure Synthèse.0.1**) propose une synthèse des évolutions de la trajectoire historique et fonctionnelle de la Mérintaise. Elle met en perspective, les unes par rapport aux autres, les différentes phases d'aménagement de la rivière et de son bassin versant et permet d'identifier les tendances générales de la trajectoire passée de notre site d'étude.

Phase 1 : Une rivière contrainte par les équipements hydrauliques

Durant la première phase (**Figure Synthèse.0.1.a.1.**), comprise entre le XVII^{ème} et la fin du XIX^{ème} siècle, la Mérintaise était un cours d'eau fonctionnel (Guillaume, 1983), exploité pour son énergie hydraulique et largement contraint par les nombreux ouvrages hydrauliques qui parcouraient son lit. L'artificialisation du lit de la rivière concernait plus de 80% du linéaire : le chenal était dérivé sur plus de 50% de son cours et rectifié sur 30%. Par ailleurs, un entretien, quasi systématique, était assuré pour un bon fonctionnement des écoulements et le maintien de bonnes conditions hydrauliques pour les usines. Les moulins étaient des complexes modestes, tous destinés à la meunerie. Les données historiques décrivent une rivière calibrée, d'en moyenne 2.50 m de large pour 1 à 1.50 m de profondeur. Il est difficile de reconstituer le régime hydrologique de la rivière, cependant, les quelques témoignages qui subsistent décrivent un débit relativement faible mais constant, soumis aux variations saisonnières. Le débit était presque exclusivement capté par les biefs pour alimenter les usines hydrauliques. La rivière débordait peu, généralement à l'occasion de forte pluies (orages). L'entretien du lit permettait d'assurer le maintien de ces conditions d'écoulement, mais n'était pas toujours bien réalisé. Plusieurs plaintes à ce propos ont été retrouvées. Parallèlement, le bassin versant est presque exclusivement réservé aux activités agricoles alimentant les moulins en matière première, avec une part non négligeable de surfaces boisées (**Figure Synthèse.0.1.b.1.**).

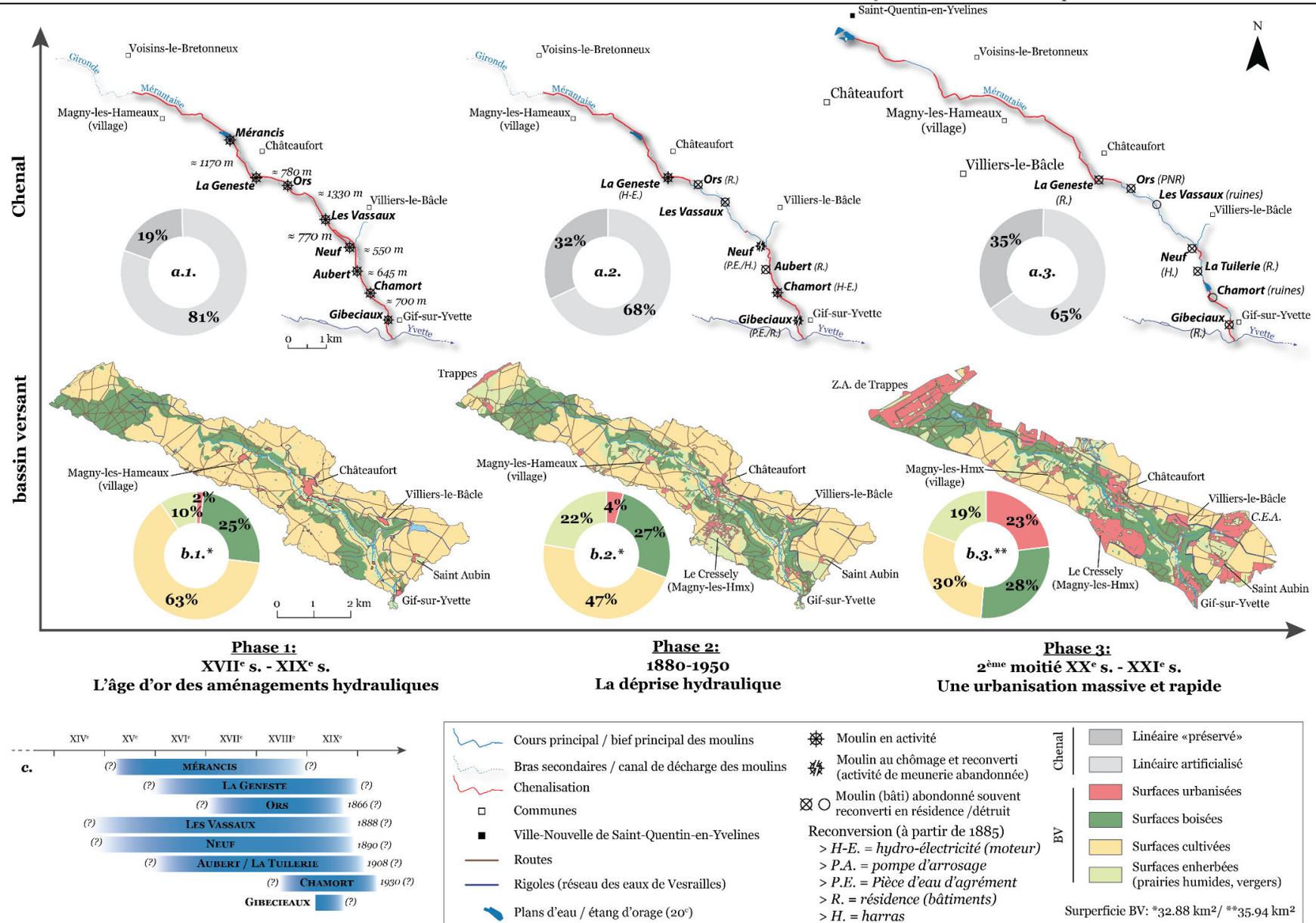


Figure Synthèse.0.1 : Synthèse des évolutions comparées du chenal et du bassin versant de la Mérantaise à travers les trois grandes phases d'aménagements de la vallée

Phase 2 : Un « désaménagement » progressif de la rivière sans réponses significatives des conditions hydromorphologiques

La phase 2 est caractérisée par un « désaménagement » progressif des moulins et de leurs ouvrages associés (biefs, vannes, seuils) (**Figure Synthèse.0.1.a.2.**). Elle correspond à une période durant laquelle la rivière perd son caractère fonctionnel pour devenir une rivière d'agrément. Les bords de la Mérantaise sont arpentés par les promeneurs, on s'y repose et les chevaux du haras du moulin d'Ors en apprécient la fraîcheur. Cette période coïncide avec « l'avènement des loisirs » décrit par Corbin (1995) et peint par Renoir (*Le déjeuner des canotiers*, 1881) ou Manet (*Le déjeuner sur l'herbe*, 1863). Il s'agit d'une phase de transition très courte entre la phase 1 et la phase 3 durant laquelle les évolutions dans le chenal et dans le bassin versant sont limitées. Parallèlement, le bassin versant reste encore grandement agricole, profitant des choix politiques concernant le plateau de Saclay (**Figure Synthèse.0.1.b.2.**). Ainsi, cette deuxième phase ne semble pas marquée par d'importantes évolutions hydromorphologiques car malgré l'abandon d'une partie des ouvrages hydrauliques, le régime hydrologique n'a pas connu de modification notable.

Phase 3 : Les grands changements d'occupation du sol : l'urbanisation du bassin versant

La troisième phase marque, en revanche, un tournant important dans l'évolution de la trajectoire de la Mérantaise par l'essor significatif de l'urbanisation (**Figure Synthèse.0.1.b.3.**). Près d'un quart du bassin versant est devenu urbain depuis les années 80. De moins en moins agricole, le bassin reste tout de même rural. La rivière se retrouve alors dans un contexte de périurbanisation, à l'image de nombreux petits cours d'eau de plaine en Île-de-France ou du reste de l'Hexagone comme l'Yzeron en région lyonnaise : (Grosprêtre, 2011; Navratil et al., 2013; Flaminio et al., 2015). Son tracé s'est stabilisé pour un temps et correspond à celui qu'on lui connaît aujourd'hui. Si les secteurs chenalisés ne représentent « plus que » 65% du linéaire total, la rivière reste encore fortement contrainte par les diverses pressions humaines qui s'exercent de plus en plus à l'échelle du bassin versant avec tous les effets induits par cette position de marges urbaines (**Figure Synthèse.0.1.a.3.**).

**Partie 3. ÉTAT DES LIEUX ET COMPRÉHENSION DES
AJUSTEMENTS HYDROMORPHOLOGIQUES
RÉCENTS DE LA MÉRANTAISE**

Chapitre 7 : Le fonctionnement hydrosédimentaire actuel de la Mérantaise	p.235
Chapitre 8 : Un régime hydrologique et des ajustements morphologiques sous influence de l'urbanisation	p.327
Chapitre 9 : Quel(s) projet(s) de restauration pour les petits cours d'eau périurbain ? Éléments de discussion	p.375

Chapitre 7. CARACTÉRISATION DU FONCTIONNEMENT
HYDROMORPHOLOGIQUE ACTUEL DE LA MÉRANTAISE

A. : Caractérisation morphologique du lit de la Mérentaise	p.237
B. : Évolutions spatiales et temporelles des ajustements morphologiques de la Mérentaise	p.263

Introduction

Si la modification des variables de contrôle a longtemps été expliquée par les fluctuations de l'unique facteur hydro-climatique, il est désormais acquis que l'anthropisation progressive des systèmes fluviaux a profondément modifié les apports liquides et solides à la rivière (déforestation, mise en culture, urbanisation, assainissement, protection, fragmentation du linéaire, ...) (Brown et al., 2018). Effectifs à des degrés divers depuis le Néolithique, ces forçages anthropiques se sont accentués depuis le XIX^{ème} siècle et ont façonné les rivières en conséquence. La dynamique fluviale des rivières et les formes associées sont désormais le fait d'un contrôle climato-anthropique (Volcot, 1998 ; Melun et Passy, 2007), voire quasi-exclusivement anthropique (Lescure et al, 2011 ; Melun, 2012). Après avoir identifié la trajectoire historique et fonctionnelle passée de la Mérintaise dans la partie précédente, nous consacrons celle-ci aux évolutions actuelles du chenal et du bassin versant, c'est-à-dire à celles des quatre dernières décennies marquées par développement rapide et massif de l'urbanisation dans le bassin versant (= Phase 3 de la trajectoire de la Mérintaise).

Le chapitre 7 a le double objectif (i) d'établir un état des lieux détaillé des conditions hydromorphologiques du lit et des berges de la Mérintaise, et (ii) de proposer un diagnostic sur les dynamiques fluviales actuelles de la rivière. Cet état des lieux se base principalement sur des relevés de terrain effectués entre 2012 et 2015 et complétés par des données réalisées par d'autres opérateurs que nous-même, parfois dans d'autres contextes et objectifs que celui de la thèse (diagnostic environnemental, ...). Notre discours s'organise-t-il en deux temps :

Dans un premier temps (A.) nous avons choisi, de concentrer notre analyse sur les variables d'ajustement de la morphologie de la rivière qui définissent la géométrie du lit, à savoir la largeur et la profondeur (à plein bord). En effet, ces dernières sont intégratrices des différents processus et facteurs de la dynamique fluviale : les variables de contrôle élémentaires (débits solides et liquides), la composition granulométrique du lit et des berges, les marques de contrôle anthropiques, le rôle de la végétation, l'occupation du sol dans le bassin versant, ... Elles témoignent de manière significative de l'impact des interventions humaines directes (chenalisation et implantation d'obstacles en travers) et indirectes (modifications des écoulements hydrologiques) sur le lit mineur des cours d'eau.

D'autre part, dans la continuité de notre réflexion sur la trajectoire de la rivière, nous nous interrogerons, dans un second temps (B.), sur les évolutions à la fois spatiales et temporelles de ces ajustements hydromorphologiques, à la verticale puis en plan.

A. Caractérisation morphologique du lit de la Mérintaise

La largeur et la profondeur sont les variables de réponses les plus significatives pour caractériser la morphologie du lit des rivières. Ces paramètres relatifs à la géométrie du chenal sont intéressants pour 3 aspects principaux :

- (1) Tout d'abord, d'un point de vue hydromorphologique, la largeur et la profondeur à pleins bords – et le rapport entre les deux – sont des indicateurs essentiels pour caractériser l'activité géodynamique d'un cours d'eau (Malavoi et Bravard, 2010; Grosprêtre, 2011; Melun, 2012; Gob et al., 2014).
- (2) Dans un deuxième temps, ces deux principales variables d'ajustement illustrent de manière significative la sensibilité de la rivière aux éventuelles modifications anthropiques du tracé (chenalisation) et aux conditions d'écoulement, en particulier en réponse au contexte urbain du bassin versant (Hammer 1972, Hollis et Luckett 1976, Park 1977, Morisawa et Laflure 1979, Whitlow et Gregory 1989, Gregory et al. 1992, Booth et Jackson 1997, Pizzuto et al. 2000, Doll et al. 2002, Navratil et al. 2005, Chin 2006).
- (3) Enfin, étroitement lié à l'hydrologie et au substrat minéral, l'« état » géomorphologique du lit participe grandement aux conditions d'accueil des espèces aquatiques. Il régit la présence ou l'absence d'habitats, de conditions d'abris, de frayères, du maintien ou la fragilisation du corridor rivulaire et de la ripisylve (Dunham et al, 2002 ; Pasternack et al, 2008 ; Hauer et al, 2011).

Ces paramètres de géométrie hydraulique ont été appréhendés de deux manières différentes : (i) un état des lieux des conditions morphologiques du chenal a tout d'abord été établi à partir d'une centaine de profils en travers relevés tout le long du linéaire et d'indicateurs visuels préalablement choisis (marque d'incision et d'érosion latérale). Pour cette approche, les valeurs exploitées sont en absolue mais permettent d'envisager une évolution sur tout le tracé. (ii) Dans un deuxième temps, les variables de géométrie du lit de la Mérintaise ont été appréhendées à l'échelle de cinq stations hydromorphologiques considérées comme représentatives de tronçons homogènes et proposant un état des lieux précis et moyenné. La précision de mesures n'est pas la même en fonction de ces deux approches.

1. État des lieux des conditions morphologiques du chenal et des berges (observations de terrain)

Les conditions morphologiques du chenal et des berges de la Mérintaise ont tout d'abord fait l'objet d'un état de lieu sur le terrain. Différents indices visuels et topographiques révélateurs d'ajustements morphologiques pouvant s'apparenter à une altération du lit de la rivière ont été mis en évidence lors du parcours du linéaire de la Mérintaise : morphologie du chenal (profondeur à pleins bords importante, forme du chenal), brusque augmentation des dimensions du lit, affouillement des berges et déstabilisation de la ripisylve ou des ouvrages riverains. Les relevés de terrain ont été réalisés entre 2012 et 2015.

1.1. Les marqueurs d'ajustement verticaux du chenal

Plusieurs indicateurs visuels mettent clairement en évidence le caractère incisé du lit de la Mérintaise : la profondeur marquée du chenal à certains endroits et la présence d'ouvrages transversaux ou latéraux fortement affouillés.

1.1.1. Un chenal aux berges hautes

Tout d'abord, lorsqu'on se promène le long de la Mérintaise, on est surpris par les dimensions souvent disproportionnées du chenal au regard des modestes écoulements dans le lit de la rivière (quelques dizaines de centimètres d'eau au niveau des radiers) (**Figure 7.2**). Les mesures des hauteurs de berges, présentées dans le **Tableau 7.1**, confirment ce sentiment. Les hauteurs de berges, rive droite et rive gauche, sont en moyenne et respectivement de 1.38 m et 1.50 m. La berge la plus haute, relevée en rive gauche sur le transect n°1 est de 2.13m. La berge la plus haute en rive droite est de 1.88 m au niveau du transect n°9. 16 berges (rive droite et rive gauche confondues) sur 32 mesures effectuées présentent des profondeurs maximales supérieures ou égales à 1.50 m. Les berges les plus hautes sont comprises entre 1.50 m et 2.13 m et une majorité d'entre elles sont supérieures à 1.70 m, témoignant donc bien d'une incision, certes plus ou moins localisée, du chenal de la Mérintaise.

Nous utilisons ici les résultats de mesures de terrain réalisées en 2012 au droit de 16 transects, entre Châteaufort (D938) et les Vassaux (**Figure 7.1**). Les profils ont été relevés à chaque changement notable de faciès des 2.4 km de linéaire prospecté. Il s'agit d'un secteur clé pour illustrer l'altération des conditions hydromorphologiques de la Mérintaise car il est particulièrement concerné par l'incision du chenal. D'autre part, son intérêt est double car il s'agit du seul secteur de la rivière où vivent les truites *fario* qui font l'objet d'une préservation dans le cadre de la restauration de la continuité écologique.

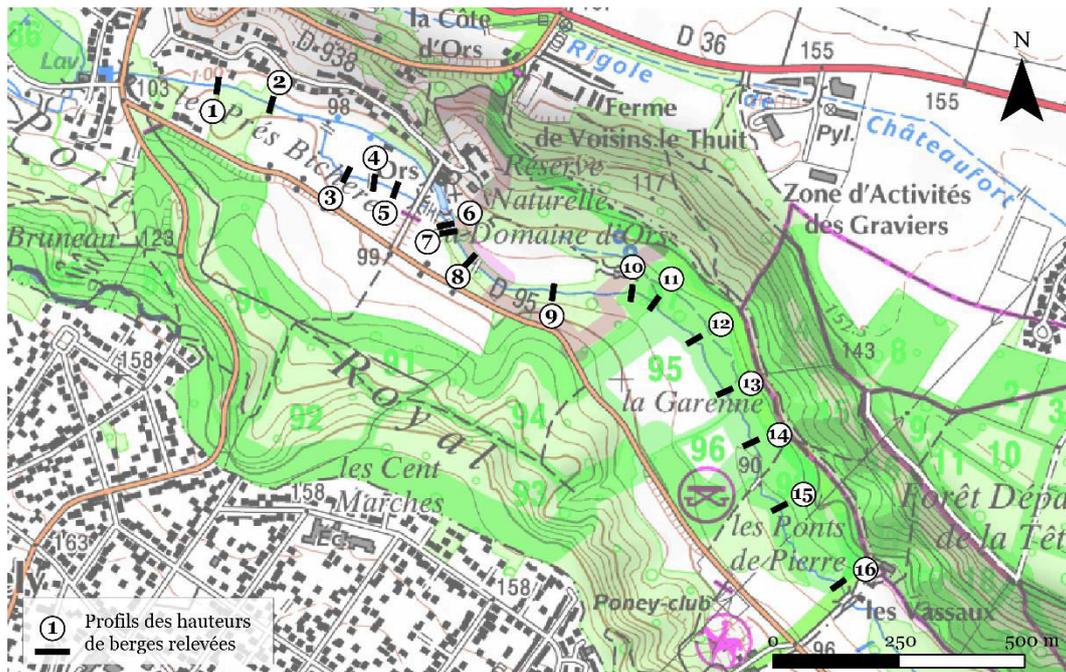


Figure 7.1: Localisation des profils en travers où les hauteurs de berge ont été mesurées.

Transects	Hauteurs de berges (m)	
	Rive gauche	Rive droite
1	1.62	2.13
2	1.24	1.67
3	1.70	1.71
4	1.76	1.78
5	1.64	1.83
6 (seuil d'Ors)	1.30	1.19
7	1.12	1.37
8	1.38	1.20
9	1.88	1.50
10	1.81	1.68
11	1.79	1.58
12	1.28	1.64
13	0.43	1.38
14	0.61	1.18
15	1.30	0.76
16	1.19	1.32

Tableau 7.1 : Hauteurs d'eau relevées au droit de 16 transects entre Châteaufort et les Vassaux, à l'aide d'un télémètre laser (Jugie, 2012). Les transects sont présentés d'amont (1) en aval (16). Les berges supérieures à 1.50 m sont en gras.



Figure 7.2: Exemples de hauteurs de berges importantes sur le cours de la Mérantaise (Crédits photo : M. Jugie).

1.1.2. Des marques d'incision sur les ouvrages présents dans le chenal

Parmi les éléments visuels porteurs de marques d'incision, les ouvrages anthropiques implantés transversalement, mais surtout latéralement, témoignent précisément d'un enfoncement du lit mineur. La plupart des ouvrages présents dans le lit de la Mérantaise a été recensée sur le terrain durant l'état des lieux. C'est en tout *a minima* 36 ouvrages qui sont concernés, de manière plus ou moins marquée, par un affouillement de leur structure.

Deux types d'ouvrages, prouvant l'incision du lit de la Mérantaise, ont été identifiés :

- Les ouvrages transversaux, notamment les sections du collecteur d'eaux usées des communes du bassin versant qui traversent à plusieurs reprises le lit de la rivière. Mis en place à la fin des années 1970, début des années 1980, ces canalisations ont été implantées à minima au raz du fond du lit. Or, aujourd'hui, elles se retrouvent exhaussées par rapport au fond du chenal et constituent de petits seuils de 20 à 50 cm de hauteur. Ainsi, en plus d'être le témoin d'une incision rapide du lit de la Mérantaise, ces petits seuils artificiels sont également responsables

d'une incision locale, au droit de ces structures. En effet, le ressaut hydraulique créé par l'ouvrage en surplomb est la cause d'une incision en aval (**Tableau 7.2** et **Figure 7.3**).

Canalisations	Incision amont	Incision aval
1	- 15 cm	- 37 cm
2	- 52 cm	- 40 cm
3	- 40 cm	- 40 cm

Tableau 7.2: Inventaire de l'incision amont et aval au droit des sections du collecteur d'eau usées de la vallée de la Mérantaise traversant le chenal (Cherruault et al, 2015 ; ESGT).



Figure 7.3: Exemple du surplomb du collecteur d'eau usées de la vallée de la Mérantaise (canalisation 2).

Outre le collecteur d'eaux usées de la vallée de la Mérantaise, la plupart des ouvrages transversaux recensés dans le lit principal portent les marques d'un affouillement du pied de leur structure. En effet, la plupart des seuils en rivière sont fragilisés à leur base, comme le seuil d'Ors illustré ci-dessous (**Figure 7.4**). Les buses implantées au milieu du chenal présentent elles-aussi ce type de cicatrices (**Figure 7.5**).



Figure 7.4: Marques d'affouillement des piles du seuil d'Ors



Figure 7.5: Buse implantée transversalement au lit de la Mérantaise (amont), portant des marques d'affouillement et d'incision.

- D'autre part, les ouvrages latéraux témoignent eux aussi d'une incision du lit de la Mérentaise. Celle-ci se manifeste par la surélévation de plusieurs dizaines de centimètres, voire jusqu'à 1 m, des infrastructures par rapport au niveau actuel du fond du lit (**Figure 7.6**). Les ouvrages latéraux sont de différents types : il peut s'agir de protections de berge (murets, gabions, enrochement), de culées de ponts ou de buses de rejets anthropiques (rejets urbains ou agricoles). Au moins 25 ouvrages latéraux érodés ont été recensés le long du linéaire.

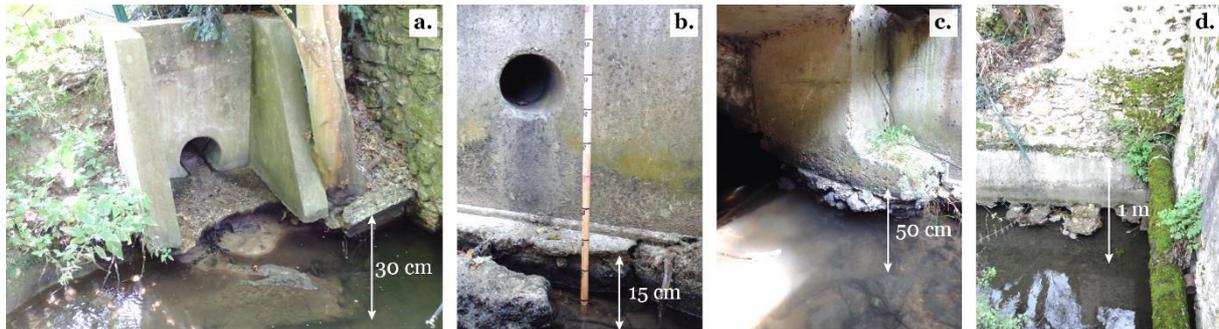


Figure 7.6 : Exemples d'ouvrages latéraux présentant des marques d'incision du lit de la rivière.

1.1.3. Une capacité de transport quasi nulle de la charge de fond

Parallèlement à ces indicateurs visuels, nous avons cherché à connaître la capacité de transport et la mobilité potentielle de la charge grossière de la rivière. Pour ce faire, des marquages à la peinture d'éléments caractéristiques de la fraction grossière des sédiments présents dans le chenal ont été réalisés en 2013 et suivi jusqu'en 2015 (cf. développement méthodologique dans le Chapitre 3). Les particules marquées ont été prélevées sur 6 radiers de granulométries différentes comprises entre 20 mm et 48 mm (radier graveleux à caillouteux) (**Figure 7.8**). Plus d'une centaine d'éléments ont été marqués afin de maximiser les chances de les retrouver à chaque suivi.

Réinjectés entre novembre 2014 et avril 2014, la grande majorité des sites sont caractérisés par une absence de mobilité de la charge grossière, même lors de crues les plus importantes ($2.85 \text{ m}^3/\text{s}$). Seul le dispositif du site 4 a enregistré une faible et ponctuelle mobilisation des particules peintes (entre 1 et 4m) après réinjection sur le radier (**Figure 7.7**). Cependant, cette mobilisation est semble-t-il à relativiser car elle correspond plus probablement à un déplacement de la charge grossière réinjectée dans le lit et pas encore calée et pavé, à l'image du reste des radiers à charge grossière de la Mérentaise.

Si un suivi quasi systématique de la mobilisation de la charge de fond peinte a été effectué, autant que faire ce peu, après chaque épisode de crue (pour l'année 2013-2014), nous n'avons pas observé de mobilisation significative de la charge sédimentaire. Au contraire, les particules ont très vite été fixées et emprisonnées dans un pavage solide, colmaté par des particules fines. Un biofilm s'est par ailleurs rapidement développé sur de nombreux éléments, rendant leur repérage parfois difficile. Nous

avons donc eu confirmation que seul la fraction la plus fine (sables, limons, argiles) était transportée et transitait dans le lit de la Mérantaise.



Figure 7.7 : Unique mobilisation de la charge grossière peinte observée au site 4. (a) à la réinjection des éléments peints ; (b.) suivi

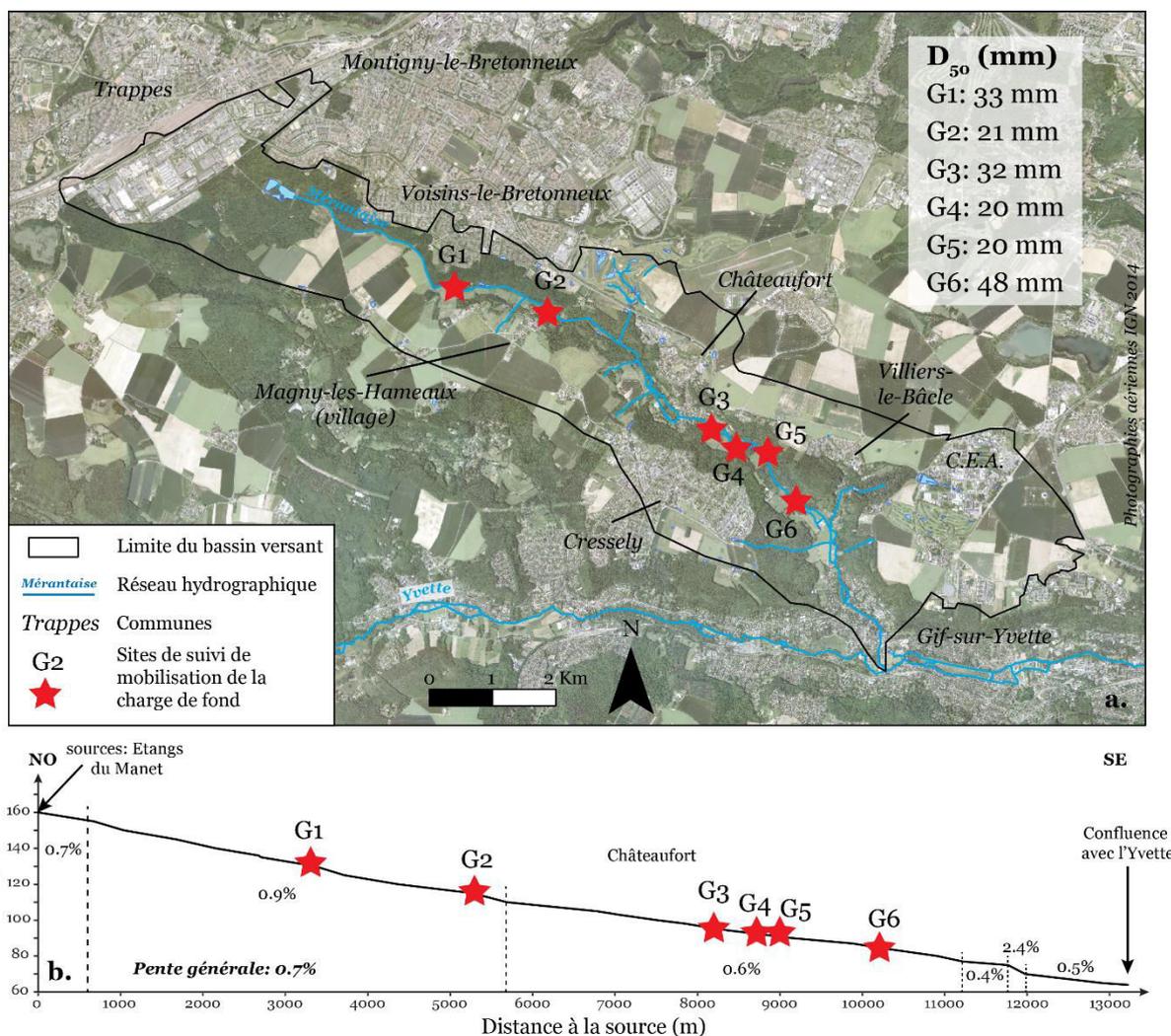


Figure 7.8 : Localisation et caractéristiques principales des sites de suivis de la mobilisation de la charge de fond.

1.2. État des lieux de l'érosion latérale

D'autre part, la Mérantaise présente également des traces d'érosion latérale, participant des ajustements dynamiques de la rivière et conditionnant la géométrie transversale du chenal. En effet, de nombreuses « cicatrices » d'érosion des berges ont été relevées durant l'état des lieux des conditions hydromorphologiques de la rivière (**Figure 7.9**). L'érosion des berges de la Mérantaise touche plus de 25 % du linéaire, rive droite, rive gauche ou les deux rives confondues, dans les secteurs « à nu », sans protections de berge anthropiques (murets, gabions, ...) ou végétation. En effet, 48.5% des 13.5 km de linéaire sont végétalisés, lorsque 46.2% sont « dénudés » et potentiellement érodables. Les 5.3% de linéaire restant sont des secteurs dont les berges sont protégées par des structures latérales (Jugie et al., 2018). Par ailleurs, comme l'illustre la **Figure 7.9**, l'essentiel de cette érosion est localisé dans la partie médiane et aval du chenal, épargnant partiellement les secteurs amont, au-delà de Magny-les-Hameaux.

Nous avons ainsi distingué différentes formes d'érosion latérale : (1) tout d'abord, les marques d'érosion potentielle ou active des berges ; (2) mais également, l'affouillement à la base des ouvrages latéraux qui se retrouvent potentiellement déstabilisés. Sur les 179 relevés relatifs aux traces d'érosion latérale, 19 concernent des affouillements d'ouvrages latéraux, 77 présentent des traces d'érosion considérée comme active et enfin 83 présentent au moins la marque d'une érosion passée et potentielle.

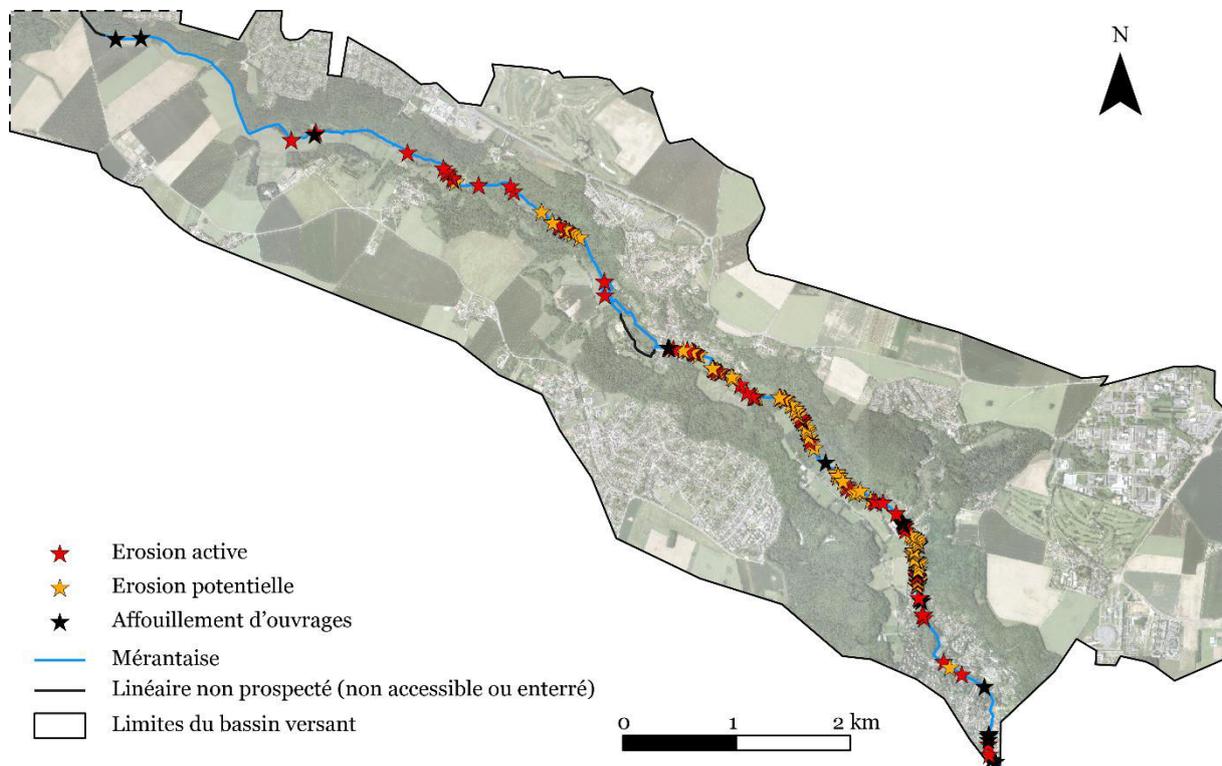


Figure 7.9 : Localisation des traces d'érosion latérale des berges de la Mérantaise.

1.2.1. Les marques d'érosion active ou potentielle

Le premier type d'érosion relevé concerne les berges de la rivière. Certains secteurs témoignent d'une érosion « fraîche » des berges, c'est-à-dire que la paroi de la berge portait des cicatrices récentes de décapage et/ou que des dépôts étaient présents en pieds de berges (**Figure 7.10** et **Figure 7.11**). De ce fait, ils ont été considérés comme actifs. Sur d'autres tronçons, il était plus difficile d'identifier une érosion présentement active mais les berges portaient la trace d'érosion potentielle ou au moins passée (**Figure 7.10** et **Figure 7.12**). Ces marques d'érosion latérale se répartissent tous le long du linéaire et sont généralement visibles sur toute la hauteur de la berge. Mais parfois l'érosion semble se limiter au bas de berge. On parle également d'affouillement de berge lorsque celle-ci présente un creusement en pied de berge.



Figure 7.10 : typologie de l'érosion des berges.

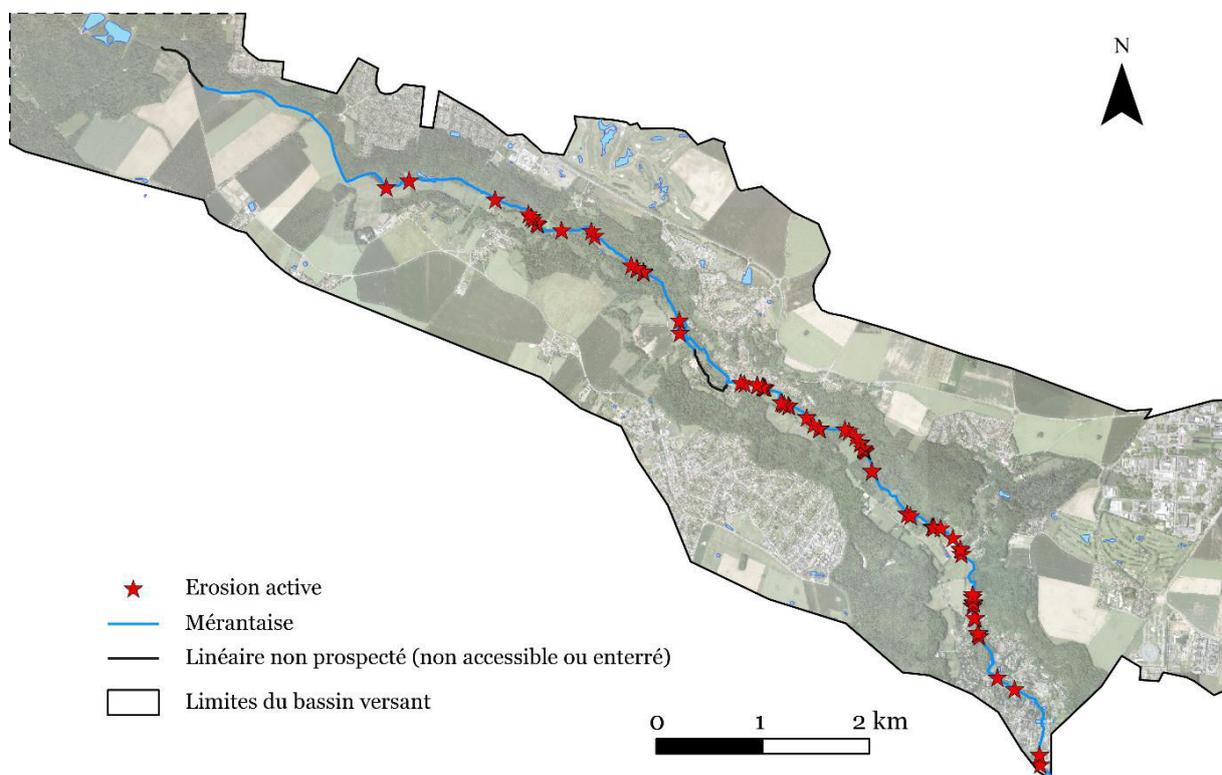


Figure 7.11: Localisation des marques d'érosion considérée comme active.

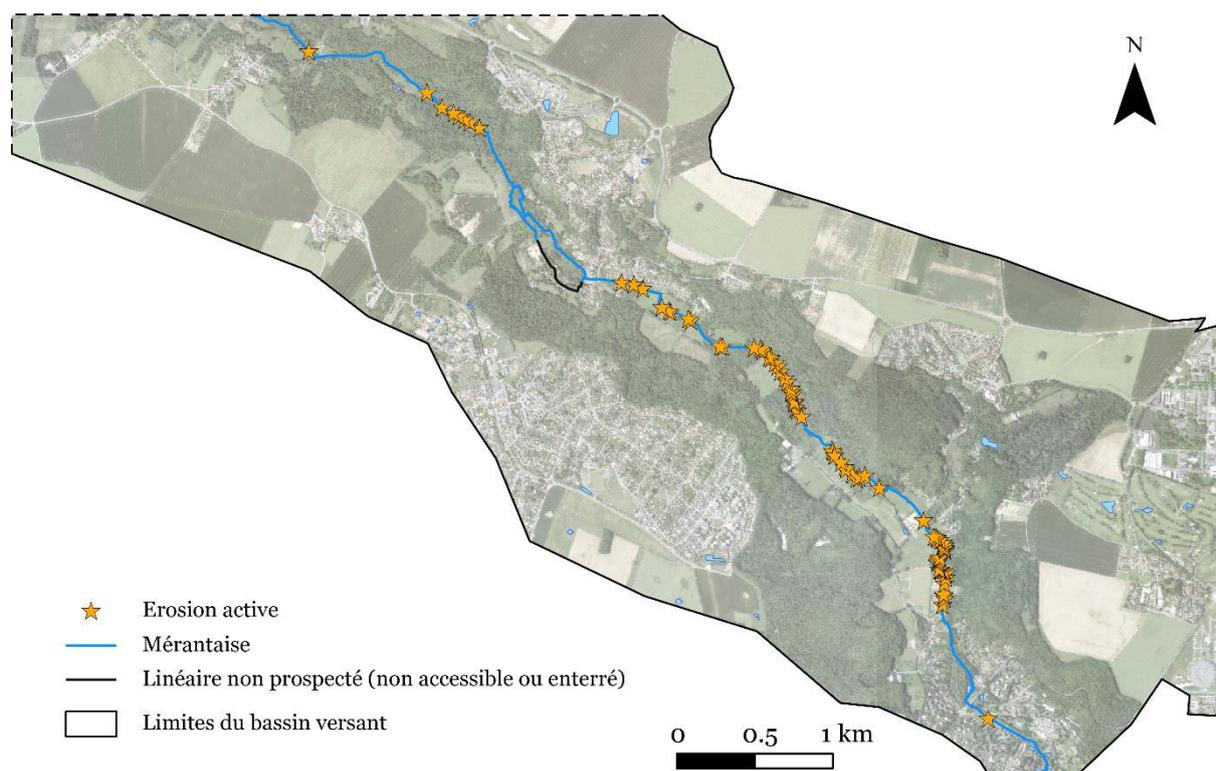


Figure 7.12 : Localisation des marques d'érosion potentielle (ou passée).

1.2.2. Affouillement des ouvrages latéraux

De la même manière que les aménagements implantés en travers du chenal, les ouvrages latéraux, déjà présentés pour certains pour identifier l'incision du lit de la rivière, témoignent également d'une certaine activité latérale du cours d'eau (**Figure 7.13**). En effet, la plupart de ces infrastructures (culées de ponts, les fondations des murets de protection, buses...) ont été initialement implantées au ras de la berge. Or, aujourd'hui, elles sont pour une grande majorité affouillées à leur base et potentiellement déstabilisées.

Les ouvrages affouillés se trouvent principalement dans la partie aval de la Mérintaise, dans les secteurs les plus urbanisés, où les rejets urbains, les ponts et les protections de berges de terrains riverains occupés par l'homme sont les plus nombreux : au niveau des communes de Villiers-le-Bâcle et Gif-sur-Yvette, et aussi plus en amont à Châteaufort.

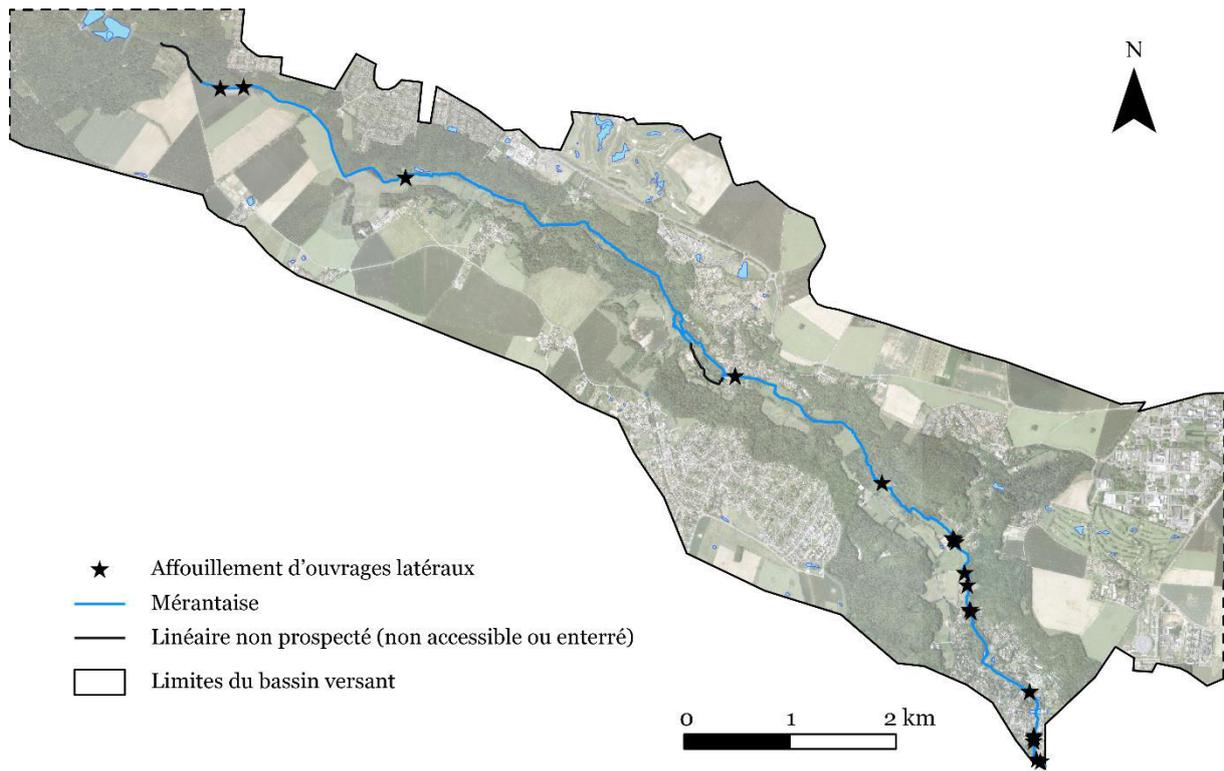


Figure 7.13 : Localisation des marques d'affouillement des ouvrages latéraux.



Figure 7.14 : Exemples d'ouvrages latéraux porteurs de marques d'incision. a. culées de ponts ; b. muret ; c. buses.

Ainsi, ces différents indicateurs visuels témoignent de dynamiques fluviales effectives. De nombreux secteurs de la Mérintaise portent les marques d'une incision significative et d'une érosion latérale du chenal. Suite à ce constat établi grâce à des indices de terrain, et nous avons cherché à comparer la géométrie du chenal de la Mérintaise par rapport à des modèles de référence permettant d'identifier un éventuel état d'altérations morphologiques de la rivière. Le paragraphe suivant (2.) propose donc une analyse de différents paramètres caractérisant la géométrie des rivières à l'échelle de stations hydromorphologiques

2. La géométrie du chenal à l'échelle de stations hydromorphologiques

Cinq stations hydromorphologiques (SH) ont été utilisées pour cette première étape de l'analyse (**Figure 7.15**). Elles ont été relevées dans des cadres différents, à l'occasion d'études scientifiques réalisées sur le territoire de la Mérintaise (Jugie, 2012 ; de Milleville, 2017), de projets de restauration de la continuité écologique de la Mérintaise ou de suivis post-opérations (SIAHVY). Aussi, trois d'entre elles, SH1, SH4 et SH5, ont fait spécifiquement l'objet d'un relevé selon le protocole **CarHyCE**⁵⁴, développé à l'initiative de l'AFB grâce à une expertise technique et scientifique pour quantifier l'altération hydromorphologique des cours d'eau et orienter les mesures de gestion des cours d'eau à restaurer (Gob et al., 2014 ; Tamisier et al., 2018). Les deux autres, SH2 et SH3, ont été réalisées en 2011, soit quelques temps avant la mise en place effective de ce protocole institutionnel. Elles ont été relevées par un protocole précurseur quelque peu différent (Gob et al., 2010; Rapport AESN - Phase 1, 2010). De ce fait, leurs données ne sont pas toutes à fait conformes au protocole de mesure, mais restent très proches et suffisent à notre analyse.

⁵⁴ La méthode CarHyCE (Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau) est un protocole d'évaluation à l'échelle stationnelle des caractéristiques hydromorphologiques des cours d'eau, prospectables à pieds. L'outil IED Carhyce (<http://lgp.cnrs.fr/carhyce>, consulté le 03/02/2018) permet l'exploitation des données issues de ce protocole. Il a été développé par le Laboratoire de Géographie Physique du CNRS (UMR8591) et de l'Université de Panthéon-Sorbonne, en collaboration avec le Ladyss (UMR 7533, l'ESGT du CNAM et l'IRSTEA, et en partenariat avec l'Agence Française pour la Biodiversité (AFB).

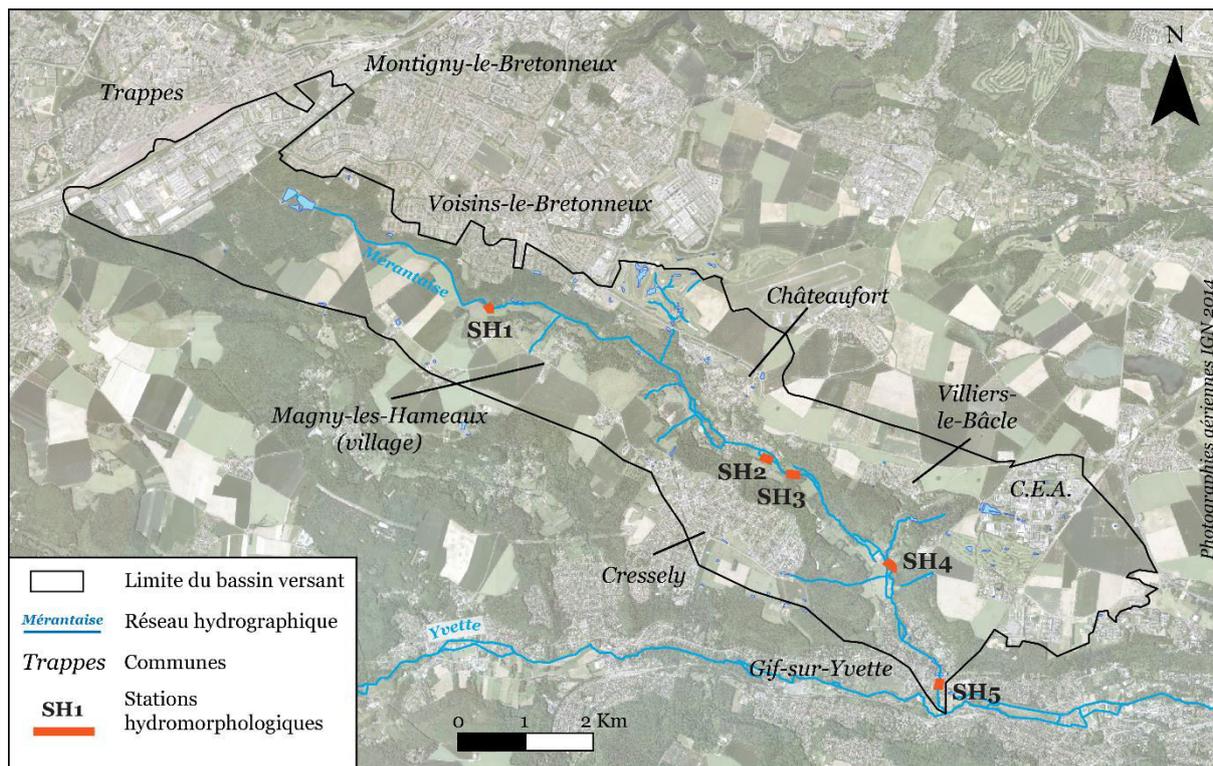


Figure 7.15: Localisation des stations hydromorphologiques présentes le long de la Mérantaise.

2.1. CarHyCE : un modèle de référence pour caractériser l’hydromorphologie des rivières

Le protocole CarHyCE a été initialement mis en place pour répondre aux exigences de la DCE en termes de construction de référentiels pour fournir une aide à l’identification et à la quantification des altérations potentielles des cours d’eau (Gob et al., 2014). Il propose ainsi un indice morphologique qui permet de mettre en évidence un éventuel écart à une situation de référence. Il ne s’agit pas ici de présenter dans le détail le protocole CarHyCE et nous renvoyons pour cela le lecteur à l’article des concepteurs et auteurs de cette approche, s’il souhaite obtenir plus de précisions : Gob et al., 2014 ; Tamisier et al., 2018.

La partie du protocole de mesure qui nous intéresse est celle relative aux données acquises pour reconstituer la morphologie de la rivière. La géométrie du lit mineur est ainsi établie par la réalisation de 15 transects équidistants et perpendiculaires, au droit desquels sont mesurées la largeur plein bord, la profondeur plein bord et la pente de la ligne d’eau (mesurée entre le premier et le dernier transect). Par la suite, certaines données sont calculées *a posteriori*, notamment, la largeur et la profondeur moyenne de la station, le rapport entre les largeurs et les profondeurs, la surface mouillée à plein bord.

Ces différents paramètres de géométrie du chenal sont ensuite analysés au regard d'un modèle de référence préétabli à partir d'un jeu de stations CarHyCE considérées comme peu ou pas modifiées par l'homme (compartiment physique). Dans le cas de la Mérintaise, les stations hydromorphologiques relevées ont été comparées au modèle de l'hydro-écorégion « tables calcaires », se rapprochant le plus de notre contexte d'étude car elle couvre une large part du bassin parisien (Wasson et al., 1998). Ce modèle comporte 34 éléments de référence (= rivières/stations non altérées) utilisés pour comparaison. Il est construit sur la base d'équations qui définissent des relations d'équilibre entre les paramètres hydromorphologiques et certaines caractéristiques du bassin versant (ex. : taille du BV). Il est en effet acquis qu'il existe un équilibre dynamique entre les variables de contrôle à l'échelle du bassin versant et les variables de réponses ou d'ajustement (longueur, profondeur, surface mouillée, ...), à l'échelle de la station (Schumm, 1977 ; Gob et al., 2014). Les auteurs du protocole ont notamment choisi de modéliser cette relation par l'équation suivante permettant de définir une situation d'équilibre et quantifier un écart à cette situation de référence (Leopold et Maddock, 1953 ; Petit et al., 2005 ; Johnson et Fecko, 2008 ; Gob et al, 2014) :

$$y = aA^b \text{ ou } y = cQ^d$$

où y est une dimension du tronçon (largeur, profondeur), A la surface du bassin versant, Q le débit liquide, a , b , c et d des constantes (Gob et al., 2014).

Enfin, un indicateur morphologique global (IMG) est calculé à partir de ces paramètres de géométrie du lit mineur pour caractériser les éventuelles altérations de la rivière étudiée. Essentiellement à vocation visuelle, il permet d'appréhender par une lecture rapide les écarts de la stations/rivière à ceux de référence (Tamisier et al., 2018). Il est ainsi établi à partir des valeurs des résidus standardisés, par rapport au modèle (

Figure 7.16). Plus ces valeurs sont grandes, plus l'écart au modèle de référence pour une variable donnée est important. Les auteurs de cet indicateur préviennent tout de même les utilisateurs que, comme tout modèle, il doit être utilisé avec précaution et éviter toute conclusion hâtive, en particulier dans le cadre d'opérations de restauration écologique des milieux aquatiques.

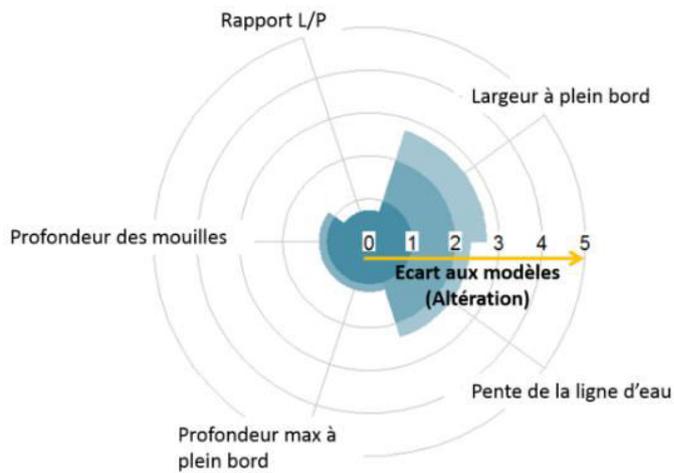


Figure 7.16: Illustration de l'indicateur morphologique global (IMG) disponible sur la base de données CarHyCE. L'intervalle [0 ;1] comprend 68% des valeurs des résidus des stations de référence ; l'intervalle [0 ;2] 95% et l'intervalle [0 ;3], 99%. (Gob et al., 2014)

Les modèles de références régionaux (HER) et l'IMG permettent d'établir et quantifier des écarts aux situations de référence régionale. Celui-ci traduit la réponse de la rivière étudiée à des pressions anthropiques ou naturelles (chenalisation, implantation d'ouvrages dans le lit, changement d'occupation du sol, modifications des débits liquides ou solides, ...). Cependant, les auteurs et concepteurs de l'outil d'analyse CarHyCE précisent que s'il est pensé comme un outil d'aide à la décision pour les acteurs de l'eau en France, les modèles régionaux utilisés comme référence ne doivent en aucun cas être considérés comme un abaque immuable, en particulier dans le cadre d'une opération de restauration. Aussi, restons-nous prudent quant à toute conclusion hâtive.

2.1.1. Description et localisation des stations hydromorphologiques de référence (CarHyCE)

Avant de procéder concrètement à l'analyse de comparaison de nos stations avec le modèle de référence de l'HER « Table Calcaire », il est nécessaire de regarder quelles sont les stations CarHyCE de référence considérées et où elles sont situées.

Aussi, 34 stations CarHyCE de référence sont disponibles pour l'HER 9 (« Tables Calcaires ») (**Tableau 7.3**). Si elles font partie d'une région homogène d'un point de vue climatique, géologique et géomorphologique à l'échelle nationale, elles couvrent des situations et des contextes variées à une échelle plus locale. Les bassins versants de ces stations sont compris entre 3.1 km² et 987.8 km², pour une moyenne de 197.4 km² ; les largeurs entre 1.3 m et 28 m, pour une moyenne de 9.4 m ; et les profondeurs entre 0.3 m et 6 m, pour une moyenne de 1.5 m. La charge de fond (D₅₀ de l'axe b) de ces rivières, estimée à partir de la méthode de granulométrie établie par Wolman (1954), est comprise entre 6.5 mm et 65.5 mm pour une moyenne de 30.1 mm. Ce sont donc des rivières au substrat graveleux et caillouteux

ID	Localisation station de mesure	Cours d'eau	BV (km2)	L _{pb} (m)	P _{pb} (m)	Rapport L/P	S _{m_{pb}} (m2)	S _{pb} (‰)	D ₅₀ (mm)
1	4 L'ESCAUT RIVIERE à CREVECOEUR SUR ESCAUT	L'Escaut	399.65	13.06	2.17	6.05	15.993	3.2	65.5
2	27 LA SUPERBE à MARIGNY	La Superbe	320.24	10.88	1.40	8.144	11.295	0.96	6.5
3	42 L' AISNE à LISLE-EN-BARROIS	L' Aisne	42.17	9.99	1.83	5.513	12.602	6.3	46.5
4	43 LE PETIT THERAIN à ACHY	Le Petit Therain	153.15	13.21	1.49	9.018	13.858	2.0	26.5
5	91 ESVES à LIGUEIL	L'Esves	44.19	7.35	1.27	6.054	6.704	1.5	32.5
6	380 LA SEMOIGNE à VERNEUIL	La Semoigne	46.85	6.26	1.69	3.831	7.481	2.71	11.5
7	390 GRANDE SAULDRE à NOYER (LE)	La Sauldre	55.15	8.97	1.48	6.147	9.606	3.08	18.5
8	400 LA BARBUISE à POUAN-LES-VALLEES	La Barbuise	199.1	7.21	1.06	6.962	5.179	0.77	8.7
9	406 MASSE OU AMASSE à SOUVIGNY-DE-TOURAINES	L'Amasse	126	6.91	1.16	6.285	5.715	2.4	39
10	408 BOULON à MAZANGE	LeBoulon	141.6	7.12	1.37	5.37	7.236	0.92	27.5
11	410 NOTREURE à CERNOY-EN-BERRY	Notreure	81.41	8.06	1.13	7.587	6.413	3.13	28
12	411 ROUMER à LANGEAIS	Roumer	110.83	7.24	1.03	7.057	5.267	2.7	31.5
13	552 LE VRIN à LA FERTE-LOUPIERE	Le Vrin	87.29	7.25	0.72	10.711	3.757	3.2	17.5
14	565 PETITE SAULDRE à MENETREOL-SUR-SAUDRE	La Petite Sauldre	323.2	11.21	1.09	10.84	8.203	2.46	39
15	566 L'OUANNE à SAINT-MARTIN-SUR-OUANNE	L'Ouanne	255.25	10.26	1.37	7.614	10.901	1.47	32
16	593 LE THOLON à CHAMPVALLON	Le Tholon	132.45	7.12	1.38	5.265	7.561	1.67	32.5
17	624 LE PERON à MESBRECOURT-RICHECOURT	Le Peron	145.09	9.39	2.10	4.491	12.585	2.7	31.5
18	638 L'OISE à ERLOY	L'Oise	762.37	27.95	2.23	12.929	37.05	3.2	47
19	656 CORBIONNE à BRETONCELLES	Corbionne	113.78	7.90	1.80	4.422	10.086	3.8	38.8
20	850 LA VOULZIE à JUTIGNY	La Voulzie	280.53	11.31	2.82	4.051	22.415	4.28	20
21	857 L'AVRE à MOREUIL	L'Avre	642.24	11.34	1.54	7.516	12.691	2.06	41.5
22	941 LA PAQUINE à HERMIVAL-LES-VAUX	La Paquine	63.29	6.14	1.25	5.036	5.297	3.14	21
23	943 LA TOUQUES à SAINT-MARTIN-DE-LA-LIEUE	La Touques	278.28	12.33	1.81	6.802	15.48	1.6	34.5

ID	Localisation station de mesure	Cours d'eau	BV (km ²)	L _{pb} (m)	P _{pb} (m)	Rapport L/P	Sm _{pb} (m ²)	S _{pb} (‰)	D ₅₀ (mm)
24	953 LA SAIRE À BRILLEVAST	La Saire	50.61	7.98	1.03	8.229	5.336	4.6	40.5
25	975 INDRE À SAINT-MAUR (CHATEAUROUX)	L'Indre	987.8	15.94	1.69	9.803	18.989	4.04	27.5
26	1000 LA CHEE À MERLAUT	La Chée	468.19	21.95	2.21	10.494	31.064	1.0	11.45
27	1010 SEVRE NIORTAISE À EXOUDUN	La Sèvre niortaise	160.16	9.17	0.90	11.314	5.468	1.03	25
28	1106 FRESNAY OU FENDERIE À VIBRAYE	Fresnay	3.11	1.28	0.28	4.964	0.241	14.75	25.5
29	1181 LA BELLE À SÉCONDIGNÉ-SUR-BELLE	La Belle	78.1	7.51	1.10	7.225	5.834	1.9	16
30	1184 PETITE SAULDRE À IVOY-LE-PRE	La Petite Sauldre	64.43	7.14	0.96	7.95	4.386	9.59	58
31	1185 LE LAYON À IVOY-LE-PRE	Le Layon	3.58	3.27	0.47	7.429	1.028	5.49	25.5
32	1457 LA BELLE À MONTIGNÉ	La Belle	48.28	6.51	0.74	8.918	3.37	1.93	47
33	1781 LA COURTONNE À COURTONNE-LA-MEURDRAC	La Courtonne	17.63	4.32	1.05	4.10	2.27	6.48	29.5
34	1782 LA MONNE À LES AUTELS-SAINT-BAZILE	La Monne	25.96	5.00	0.987	5.258	3.25	3.2	21
		MAX	987.8	28	2.8	12.9	37.1	14.8	65.5
		MIN	3.1	1.3	0.3	3.8	0.2	0.8	6.5
		MOYENNE	197.4	9.4	1.4	7.2	9.8	3.3	30.1

Tableau 7.3 : Liste et description 34 stations hydromorphologiques de référence du modèle CarHyCE. BV : surface du bassin versant (km²), L_{pb} : largeur moyenne à plein bord (m), P_{pb} : profondeur maximale à plein bord (m) ; L/P : rapport largeur/profondeur à plein bord ; Sm_{pb} : surface mouillée à plein bord (m²) ; S_{pb} : pente de la ligne d'eau à plein bord.

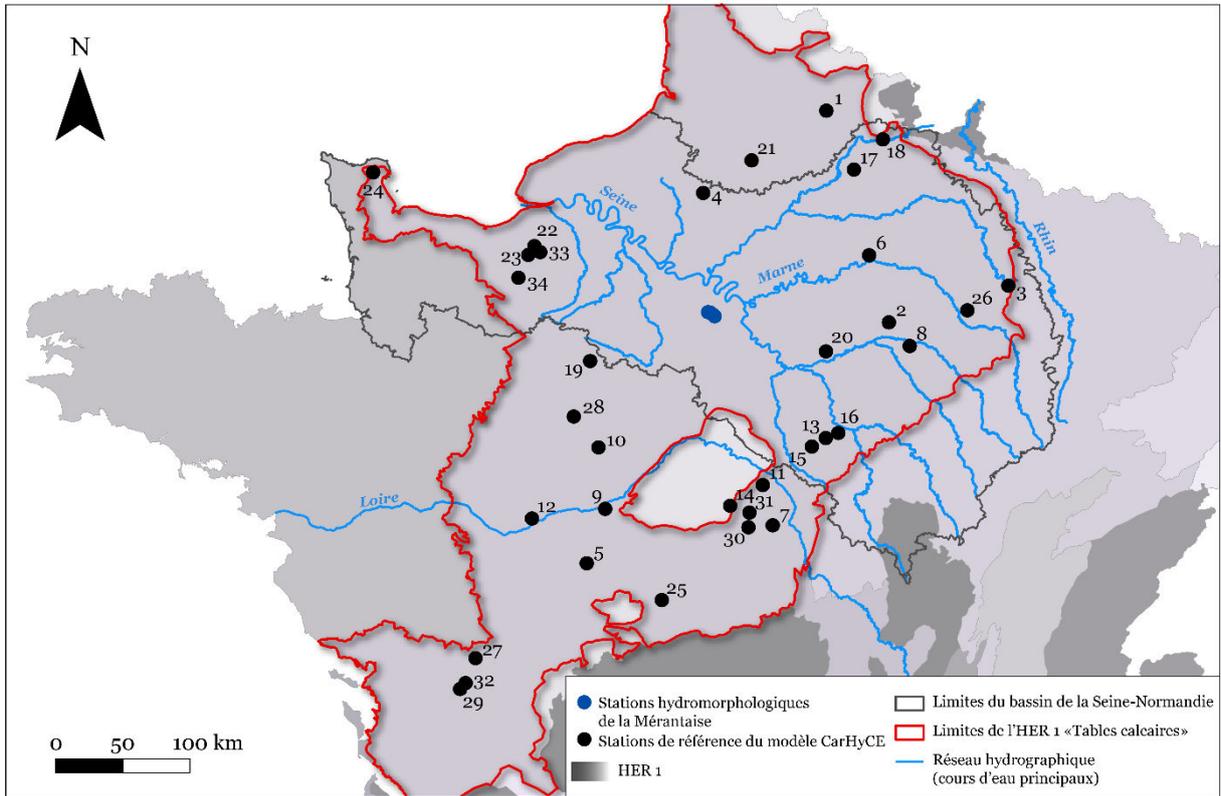


Figure 7.17: localisation des stations de référence et de la Mérantaise dans l'HER type 1, « Tables calcaires ».

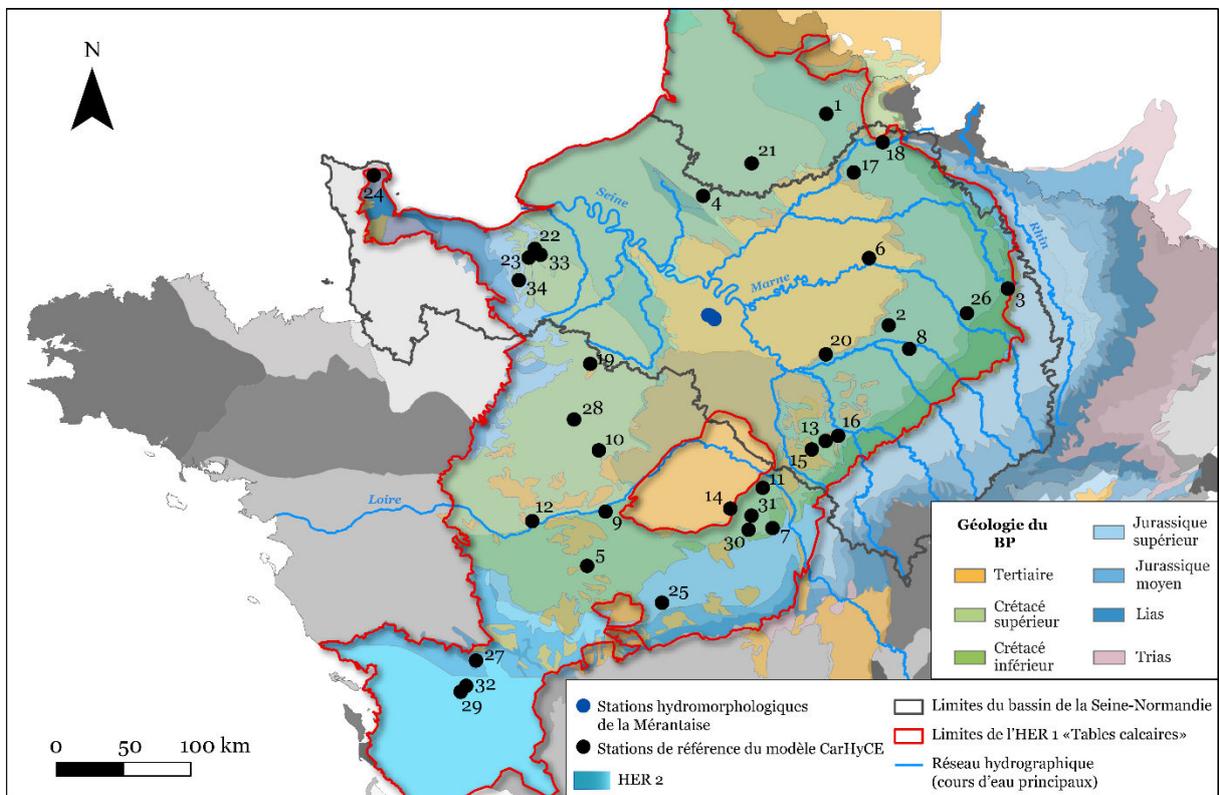


Figure 7.18 : Détails des HER type 2, au sein de l'HER 9, type 1.

D'un point de vue géographique, les 34 stations CarHyCE de références utilisées dans notre étude sont toutes situées de l'Hydro-éco-région « Tables Calcaires » (HER 9). C'est une très grande HER qui correspond en grande partie au Bassin parisien (**Figure 7.17**). Il s'agit même d'une des plus vastes HER de type 1. Les HER ont été pensées et délimitées comme des grandes unités spatiales théoriquement cohérentes en termes de géologie, de relief et de climat (principaux facteurs de contrôles globaux du fonctionnement écologique des cours d'eau). Dans les fait, on observe facilement des disparités parfois importantes et une forte variabilité au sein même des HER de type 1. L'HER « Tables calcaires » comprend ainsi 11 sous HER de type 2 dont les contextes hydro-climatiques et géologiques, parfois très diverses, influencent différemment le fonctionnement hydrologique et écologiques des cours d'eau (**Figure 7.18**).

Aussi, du point de vue géologique, la grande majorité des stations de référence (30 sur 34) sont, comprises dans les terrains du Crétacé supérieur, caractérisés par un sous-sol crayeux et très influencé par la nappe qui tamponne les crues. Du fait de l'importance des apports souterrains, les cours d'eau de la craie présentent une très faible densité de drainage. Ces cours d'eau sont souvent caractérisés par des capacités d'ajustement moins importantes (Gob et al., 2010). Trois stations de référence (3, 18 et 26) sont, quant à elles, situées sur les marges du Bassin parisien, dans des terrains du Crétacé inférieur caractérisé par une forte perméabilité des sols et pour lesquels la nappe est moins influente que dans les secteurs de craie.

2.1.2. Description et localisation des stations hydromorphologiques de la Mérintaise

Les cinq stations hydromorphologiques présentes le long de la Mérintaise se distribuent d'amont en aval, de la confluence du Ru de la Gironde et de la Mérintaise (SH1) jusqu'à la confluence avec l'Yvette (SH5) (**Figure 7.15**).

Précisons tout de suite que les stations SH4 et 5 ont été commanditées par l'AESN au bureau d'étude Hydrosphère, à la suite d'opérations de restauration de la continuité écologique réalisées entre 2015 et 2016 au niveau du parc du CNRS. La station SH4 est celle considérée comme station de référence par rapport à la station SH5 où ont été réalisés les travaux de restauration écologique. Elle est établie dans un secteur que l'on peut qualifier de relativement « préservé » au vue des pressions directes sur le cours d'eau (liberté de mobilité, absence de contrainte latérale et longitudinale, diversité des faciès d'écoulement). Cette station « de référence » proche du site restauré ne fait pas partie du réseau de stations de référence de CarHyCE. Il s'agissait pour le maître d'ouvrage (le SIAHVY) d'établir une station aux conditions moins dégradées pour la comparer à la station à restaurer, avant et après les travaux. Le terme « préservé » a ainsi un sens très relatif au vue du caractère tout de même très influencé de la Mérintaise. La station SH5 présente un état « restauré » de la rivière, un an à deux ans après les travaux d'aménagement. Ces derniers consistaient à rétablir une continuité longitudinale et latérale, de

redonner un espace de liberté à la rivière et un aspect plus « naturel » (reméandrage). À l'inverse, les trois autres stations situées plus en amont sont situées dans des secteurs non restaurés, partiellement ou potentiellement altérés. Les stations SH2 et SH3 ont notamment été réalisées à l'occasion d'un état des lieux précédent le projet d'effacement du seuil d'Ors (jamais finalisé). Il s'agissait d'établir l'état hydromorphologique initial des tronçons amont et aval de l'obstacle. Le projet n'a pour l'instant pas abouti à des travaux de restauration et les conditions morphométriques du chenal mesurées en 2012 alors sont toujours valables aujourd'hui.

Les caractéristiques de chaque station sont résumées dans le **Tableau 7.4**. En première analyse, les cinq stations hydromorphologiques présentent des caractéristiques globalement similaires. Les paramètres de géométrie du chenal des stations ne présentent pas de variabilité significative. Les largeurs moyennes à plein bord sont comprises entre 4.95 et 6.46 m. Les profondeurs sont comprises entre 1.21 et 1.74 m de hauteur à plein bord du lit mineur. Les pentes sont plutôt faibles, mais témoignent tout de même d'un dénivelé non négligeable pour un cours d'eau de faible énergie (de 0.43% à 1.45%, lorsque les cours d'eau de faible énergie francilien et normand possèdent des pentes moyennes de 0.007% (Viel, 2012 ; Michler, 2017)). La charge grossière, mesurée (D50 de l'axe b) sur des seuils naturels en suivant la méthode Wolman (1954), est comprise entre 21 mm et 55.5 mm, pour une valeur moyenne de 40.2 mm. La taille moyenne des particules caractérisant la charge solide de la Mérintaise est donc un peu plus élevée que celle des stations de référence CarHyCE de l'HER « Tables calcaires » auxquelles elles sont comparées.

Enfin, les cinq stations hydromorphologiques de la Mérintaise se trouvent dans la partie centrale du bassin parisien, dans les couches sédimentaires du Tertiaire (**Figure 7.15**). La nappe des Sables de Fontainebleau y contrôle partiellement les écoulements et les conditions de drainage du réseau hydrographique francilien. Cependant, on observe aussi, qu'il n'y a pratiquement aucune station de référence située à proximité des stations de la Mérintaise. Une seule station, celle de la Semoigne à Verneuil (n°6) se trouve dans un contexte hydro-géologique (même HER 2) et géographique proche (**Figure 7.18**). Il s'agit d'un premier biais qu'il sera nécessaire de garder en mémoire au cours de notre analyse.

Tableau 7.4 : Caractéristiques des cinq stations hydromorphologiques implantées le long de la Mérantaise. PK : distance à la source (km) ; BV : surface du bassin versant en km² L_{pb} : largeur moyenne à plein bord (m), P_{pb} : profondeur maximale à plein bord (m) ; L/P : rapport largeur/profondeur à plein bord ; Sm_{pb} : surface mouillée à plein bord (m²) ; S_{pb} : pente de la ligne d'eau à plein bord. La station en grisé correspond à un état après opération de restauration des conditions écologiques.

ID	Opérateur (année)	Localisation	PK (km)	BV (km ²)	D ₅₀ (mm)	L _{pb} (m)	P _{pb} (m)	L/P	Sm _{pb} (m ²)	S _{pb} (m/m)
SH1	de Milleville, IRSTEA (2017)	Au lieu-dit « Le Cèdre »	2.90	10.49	54	5.48	1.21	4.52	3.95	0.0142
SH2	Jugie, IRSTEA (2012)	Châteaufort, station amont	8	20.62	32	5.97	1.74	3.43	5.75	0.0043
SH3	Jugie, IRSTEA (2012)	Châteaufort, station aval	8.5	21.56	21	5.98	1.45	4.14	6.21	0.0072
SH4	Hydrosphère, SIAHVY (2015)	Villiers-le- Bâcle	10.5	27.95	38.5	4.95	1.32	3.8	3.80	0.0145
SH5	Hydrosphère, SIAHVY (2016)	Gif-sur- Yvette	12	31.05	55.5	6.46	1.44	4.55	5.09	0.0056

2.2. Indicateur Morphologique Global (IMG) des stations de la Mérintaise

La première étape de notre analyse à l'échelle des stations hydromorphologiques est l'étude de l'Indicateur Morphologique Global (IMG) établi à partir des écarts au modèle. La valeur de l'IMG de chaque paramètre correspond à la somme des résidus standardisés, en valeur absolue. Celle-ci est précisée pour chaque paramètre sous le graphique (Figure 7.19). Les résidus standardisés sont calculés à partir des résidus des paramètres des stations et des résidus des paramètres des stations de références :

$$\text{résidus standardisés} = \frac{\text{résidus station} - \text{moyenne (résidus stations ref)}}{\sum(\text{résidus stations ref})}$$

Alors que CarHyCE propose initialement six paramètres (Figure 7.16), seuls cinq ont été conservés pour cette analyse :

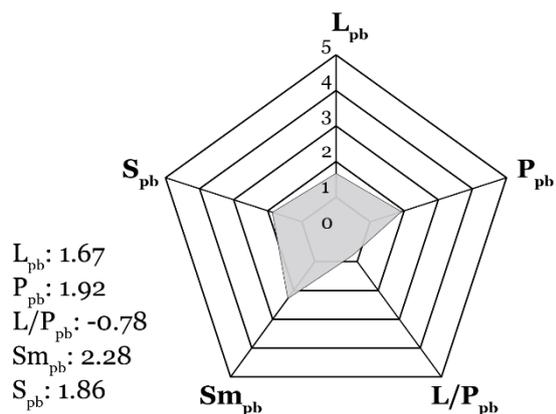
- La largeur à plein bord (m)
- La profondeur maximale à plein bord (m)
- Le ratio entre ces deux paramètres géométriques
- La surface mouillée à plein bord (m²)
- La pente de la ligne d'eau (m/m)

Le paramètre décrivant la profondeur des mouilles et considéré comme un bon indicateur de l'altération hydromorphologique des rivières (Gob et al., 2010) n'a pas été retenu dans notre analyse car il n'a pas été relevé ou calculé systématiquement pour toutes les stations.

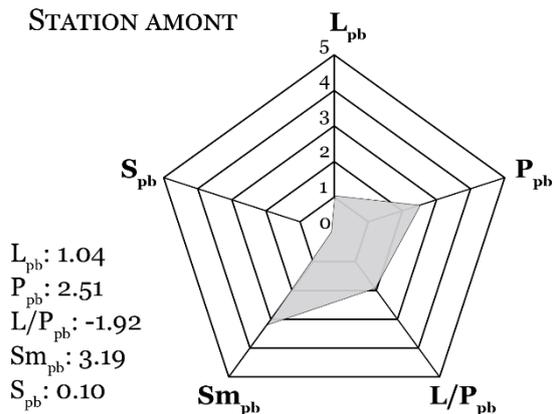
À la lecture de ces graphiques, il apparaît tout d'abord que les écarts au modèle (« tables calcaires ») sont tous positifs, à l'exception du rapport L/P (Figure 7.19). Cela signifie donc qu'ils présentent, dans tous les cas, des valeurs plus importantes que celles indiquées par le modèle, proportionnellement à la taille du bassin versant. Par ailleurs, ces écarts au modèle sont assez faibles car les valeurs de résidus standardisés sont essentiellement contenues entre les intervalles [0 ;1] et [0 ;3] qui comprennent 99% des valeurs de résidus des stations de référence. Les stations hydromorphologiques de la Mérintaise présentent donc des conditions morphologiques qui restent proches du cadre de référence.

Pour autant, si ces résultats ne surprennent pas pour les stations les plus à l'aval (SH4 et SH5) qui, comme nous l'avons déjà évoqué, présentent un chenal peu altéré (SH4) et restauré (SH5), les stations les plus à l'amont (SH1 à 3) présentent des écarts au modèle plus importants pour les paramètres de surfaces mouillées et de profondeurs du chenal. On relève ainsi des valeurs d'écart au modèle comprises entre 2.28 (SH1) et 3.58 (SH3) pour les surfaces mouillées ; et des valeurs de résidus standardisés comprises entre 1.87 (SH3) et 2.51 (SH2) pour les profondeurs à plein bord.

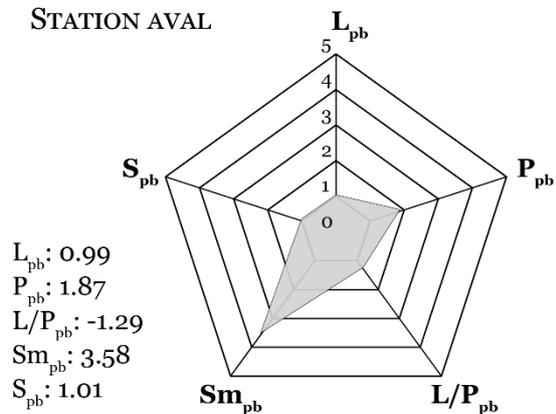
SH1: LA MÉRANTAISE AU LIEU-DIT LE CÈDRE



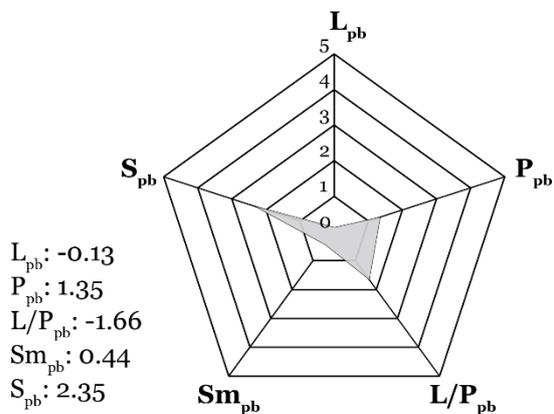
SH2: LA MÉRANTAISE À CHATEAUFORT STATION AMONT



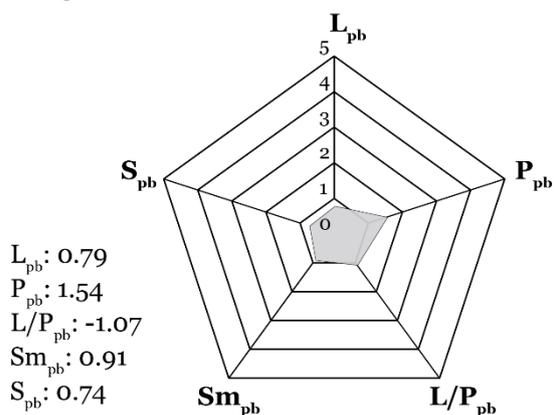
SH3: LA MÉRANTAISE À CHATEAUFORT STATION AVAL



SH4: LA MÉRANTAISE À VILLIERS-LE-BÂCLE



SH5: LA MÉRANTAISE À GIF-SUR-YVETTE



Valeurs des résidus standardisés

- L_{pb} : Largeur moyenne à pleins bords
- P_{pb} : Profondeur maximale à pleins bords
- L/P_{pb} : ratio largeur et profondeur à pleins bords
- Sm_{pb} : Surface mouillée à pleins bords
- S_{pb} : Pente de la ligne d'eau

Figure 7.19: Indicateurs morphologiques globaux des 5 stations hydromorphologiques de la Mérantaise.

2.3. Géométrie du chenal de la Mérintaise : écarts au modèle de référence CarHyCE

Durant cette deuxième phase d'analyse à l'échelle des stations hydromorphologiques, on regarde plus spécifiquement les écarts des valeurs de géométrie du lit au modèle de référence. Les résultats de cette mise en perspective sont présentés dans la figure ci-dessous (**Figure 7.20**).

Il en ressort, une fois encore, que les valeurs déterminant la géométrie du chenal de la Mérintaise sont relativement proches du modèle attendu mais se trouvent tout de même systématiquement au-dessus (à l'exception du rapport L/P), témoignant du caractère étroit et profond de la rivière. Les stations les plus à l'amont (SH1 à 3) sont celles qui se distinguent généralement le plus de la courbe de tendance du modèle de référence.

Si les largeurs plein bord est le paramètre le moins discriminant, la profondeur, la surface mouillée et la pente de la ligne d'eau le sont plus. Pour ce qui est de ce dernier paramètre, précisons que les stations SH1 et SH4 se démaquent particulièrement du modèle pour des raisons propres à leur localisation. Elles sont, en effet, situées dans des secteurs plus pentus de la rivière, au niveau de ruptures de pente du fond du lit, certes modestes mais marquées (1.42% pour SH1 et 1.45% pour SH4). Comme le montrait déjà l'IMG, ce sont les stations non restaurées qui s'écartent le plus des modèles de référence.

Cependant, ces observations doivent être discutées par rapport aux modèles de référence utilisés. En effet, deux biais peuvent être identifiés. Tout d'abord, comme nous l'avions évoqué lors de la présentation des stations de référence, il existe une variabilité certaine entre ces stations du fait des situations géologiques, hydro-climatiques et de drainages au sein même de l'hydro-éco-région des « Tables Calcaires » (HER 9). Le sous-découpage en 11 HER de type 2 de l'HER 9, notamment basé sur une distinction géologique et de relief, illustre bien ces différences qui peuvent exister entre toutes les stations de référence considérées. Aussi est-il nécessaire de regarder dans le détail comment se répartissent les stations en fonction de leur contexte environnemental et de la taille de leur bassin versant. Les stations qui se trouvent la plupart du temps dans la partie supérieure du nuage de points sont principalement les stations des marges du Bassin parisien (ex : stations 3, 17, 18 et 26 ; **Figure 7.17**, **Figure 7.18**, **Figure 7.20**), soit celles comprises dans des terrains faiblement influencés par la nappe. Les apports hydrologiques sont d'autant plus morphogènes que les crues ne sont pas tamponnées par la nappe. À taille de bassin versant égale, les lits de ces rivières sont donc plus larges et moins profonds que les autres rivières de l'HER. À l'inverse, les stations dont le bassin versant est situé majoritairement dans les terrains crayeux du Crétacé supérieur (ex : stations 8, 21, 28 ; **Figure 7.17**, **Figure 7.18**, **Figure 7.20**) ont, comme l'ont montré Gob et al. (2010) des lits moins larges et moins profonds. Les crues étant fortement atténuées par le rôle de tampon joué par les nappes de la craie. Dans le cas de la Mérintaise, la nappe des Sables de Fontainebleau, très perméable, jouant partiellement un rôle tampon sur les crues de la rivière (Lefebvre, 2015), on s'attendrait à observer un écart au modèle inversé, où les points

correspondant aux stations de mesures de la Mérintaise se trouvent sous la courbe de tendance des modèles de référence. Cependant, il faut se rappeler que le bassin versant de la Mérintaise a connu un développement massif de l'urbanisation sur son territoire et qu'il semble que ce contexte anthropique influence tout particulièrement les apports liquides (et partiellement solides). Cet aspect sera approfondi plus tard.

Il manque malheureusement, dans ces modèles de référence, des stations de référence qui seraient représentatives du contexte des 5 stations de la Mérintaise. En effet, seules deux stations (n°33 et 34) ont des tailles de bassins versants relativement proches de celles de la Mérintaise, et une seule station (n°6) est comprise dans le même contexte géologique (Tertiaire) et proche géographiquement. Ces trois stations « non altérées » sont assez proches de nos 5 stations, mais se situent à chaque fois plus bas dans le modèle que ces dernières. À l'exception du paramètre de pente de la ligne d'eau, la station 6 (La Semoigne à Verneuil) suit à peu près la même tendance que la Mérintaise. Elles confirment et témoignent de la présence de surlargeurs et de surprofondeurs dans le chenal de la Mérintaise.

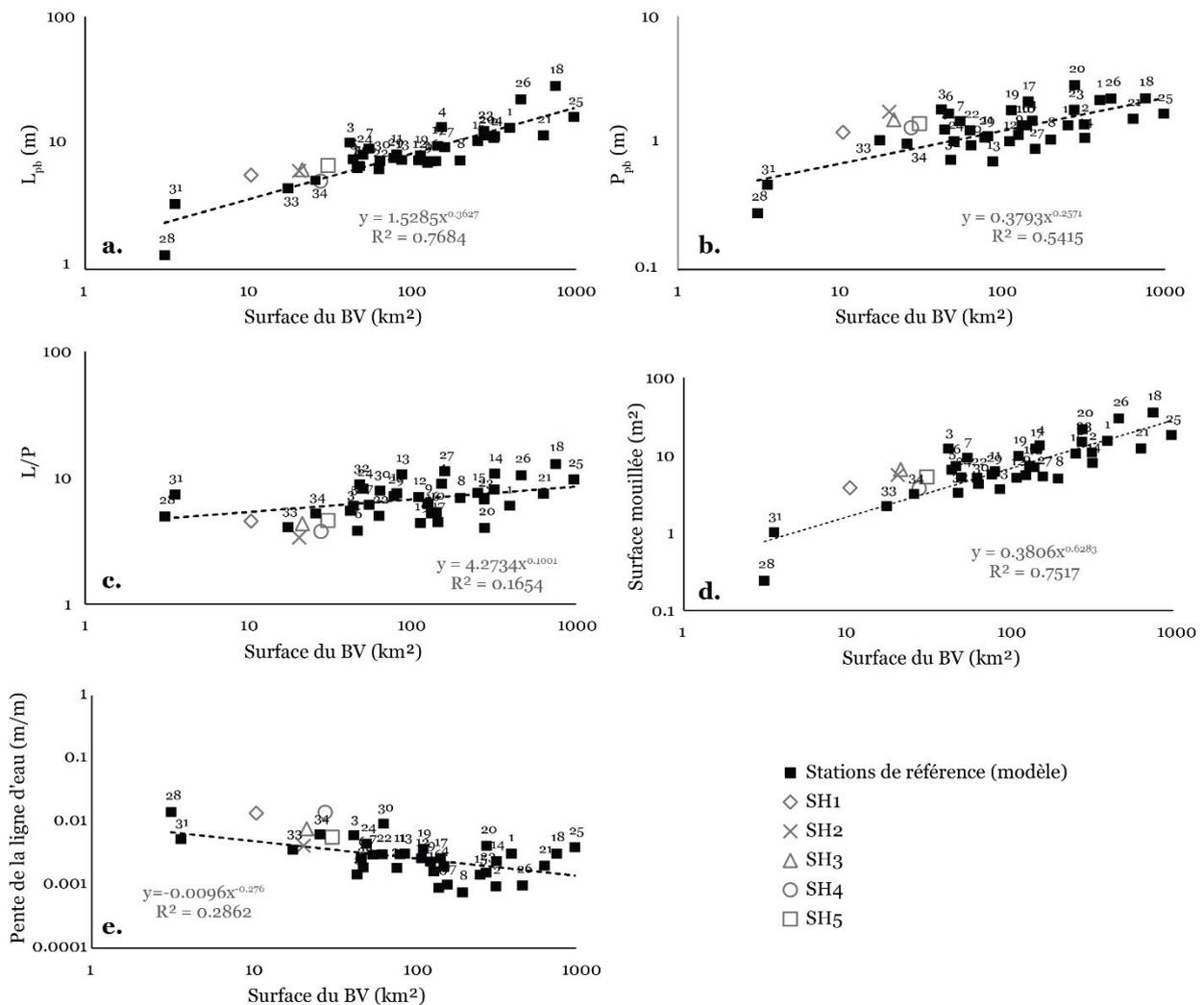


Figure 7.20: Écarts des stations hydromorphologiques de la Mérintaise au modèle de référence.

B. Évolutions spatiales et temporelles des ajustements morphologiques du chenal de la Mérentaise

Après avoir caractérisé les grandes tendances morphologiques du lit de la Mérentaise et notamment identifié des marques d'incision et d'érosion latérale du chenal, le deuxième temps de cette réflexion est consacré aux questions de répartitions spatiales et d'évolutions temporelles de ces altérations partielles. Deux interrogations se posent alors :

- (i) De quelle manière les largeurs et les profondeurs se distribuent-elles le long du linéaire ?
- (ii) Depuis quand et dans quelles conditions se sont-elles mises en place et évoluées ?

Pour respecter la chronologie des ajustements hydromorphologiques du chenal lors de l'évocation de leurs évolutions temporelles, nous nous intéresserons dans un premier temps à cette incision marquée de la rivière, puis à ce qui semble constituer la dynamique actuelle de la Mérentaise, à savoir l'élargissement du lit par érosion latérale.

1. Répartition spatiale des largeurs et des profondeurs du chenal à l'échelle de transects

La première phase d'analyse basée sur cinq stations hydromorphologiques a permis une appréciation générale de l'état hydromorphologique de la rivière à l'échelle du bassin versant, partant du principe que celles-ci étaient représentatives de tronçons homogènes. Cependant, nous avons voulu préciser ces observations en multipliant les points de mesures de la géométrie du chenal tout au long du linéaire. Si les valeurs utilisées durant cette étape sont des valeurs absolues qui décrivent un état précis à un endroit spécifiquement établi (au droit des transects) et donc non moyennées, cette approche permet tout de même d'envisager une évolution spatiale sur tout le tracé. La variabilité naturelle des résultats y est forcément beaucoup plus importante mais cette approche permet de spatialiser et quantifier les secteurs soumis à un ajustement morphologique plus prononcé.

Ainsi, la géométrie du lit (largeurs et profondeurs plein bord) a-t-elle été analysée au droit de plus de 90 transects répartis tout le long du linéaire (**Figure 7.21**). L'essentiel de ces profils (77 transects) ont été réalisés en 2010 par un bureau de géomètres à l'occasion d'une étude commanditée par le SIAHVY, suite aux fortes inondations d'avril 2007. Ces derniers ont été complétés par une vingtaine de nos propres relevés réalisés entre 2012 et 2015.

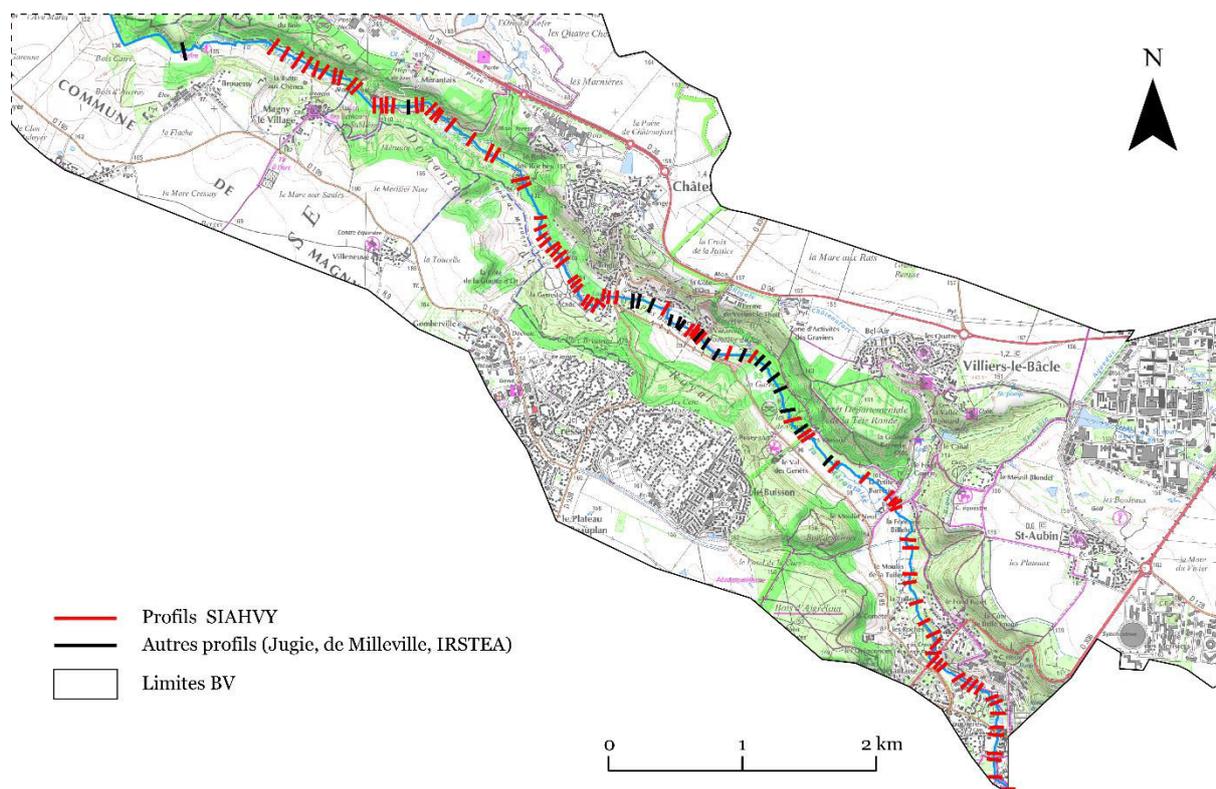


Figure 7.21 : Localisation des profils en travers utilisés pour déterminer les largeurs et les profondeurs spécifiques de la Mérantaise.

1.1. Distribution des largeurs et profondeurs spécifiques au droit des transects

Notons, tout d’abord, que les largeurs et les profondeurs spécifiques mesurées au droit des transects présentent une forte hétérogénéité et une grande variabilité dans les valeurs (**Figure 7.22**, **Figure 7.23**, **Figure 7.24**, **Figure 7.25**). Les largeurs spécifiques sont ainsi comprises entre 1.51 m et 13.73 m, pour une moyenne de 5.58 m de large. Il y a donc un ratio de presque 10 entre les largeurs les plus faibles et les plus importantes. Plus de 25% de l’effectif total sont des largeurs comprises entre 4.50 m et 5.50 m (**Figure 7.22**). Un quart sont comprise entre 3.50 et 4.50 m ou encore entre 6.50 m et 7.50 m. Si l’on se réfère au modèle CarHyCE utilisé précédemment, les largeurs moyennes attendues pour ce type de rivières devraient être comprises entre 3.2 m et 5.3 m (**Figure 7.20**). Aussi cette distribution et cet écart au modèle témoignent-ils déjà de largeurs non négligeables et partiellement surcalibrées.

De la même manière, les profondeurs se distribuent aussi de façon relativement hétérogène. Elles sont comprises entre 0.33 m et 2.5 m pour une valeur moyenne de 1.35 m. Cette fois, c’est un rapport de 1 à 7.6 qui définit la variabilité des profondeurs spécifiques de la Mérantaise. 30 transects présentent des hauteurs de berges supérieures à 1.50m, soit près d’1/3 du total des profils considérés. 10% des profondeurs sont supérieurs à 2 m de berges. Encore une fois, si l’on compare ces valeurs aux modèles de référence établi grâce à l’outil d’analyse CarHyCE, les profondeurs moyennes attendues pour ce type de rivières sont comprises entre 0.5 et 1 m de hauteur de berge (Figure 7.20). L’écart à un

état de référence « non altéré » *a priori* est donc encore plus remarquables avec ces valeurs d'enfoncement du lit de la Mérantaise.

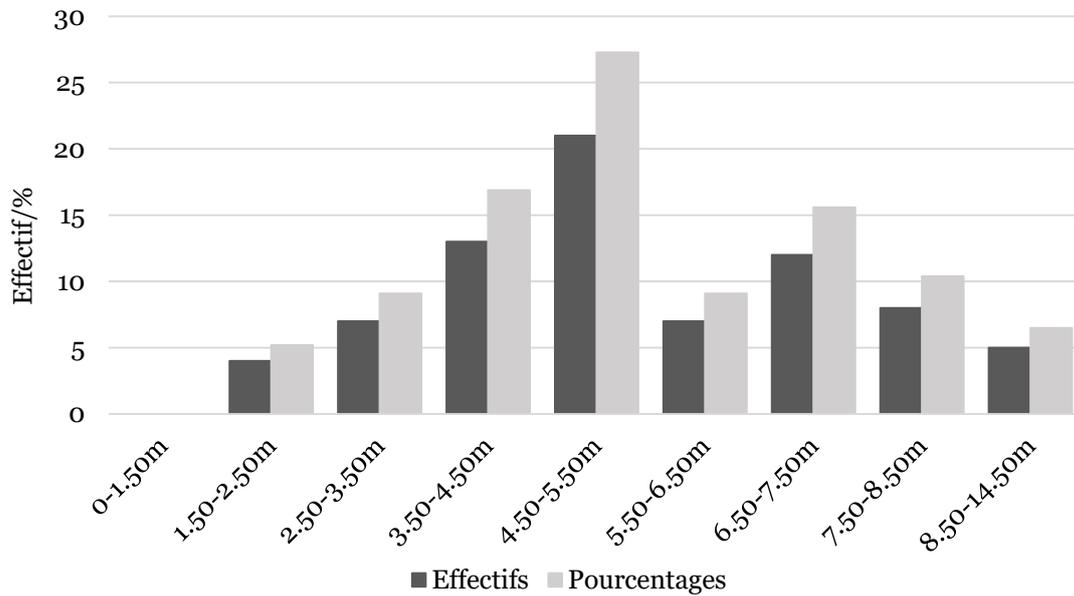


Figure 7.22 : Distribution des largeurs en 9 classes (effectifs et pourcentages)

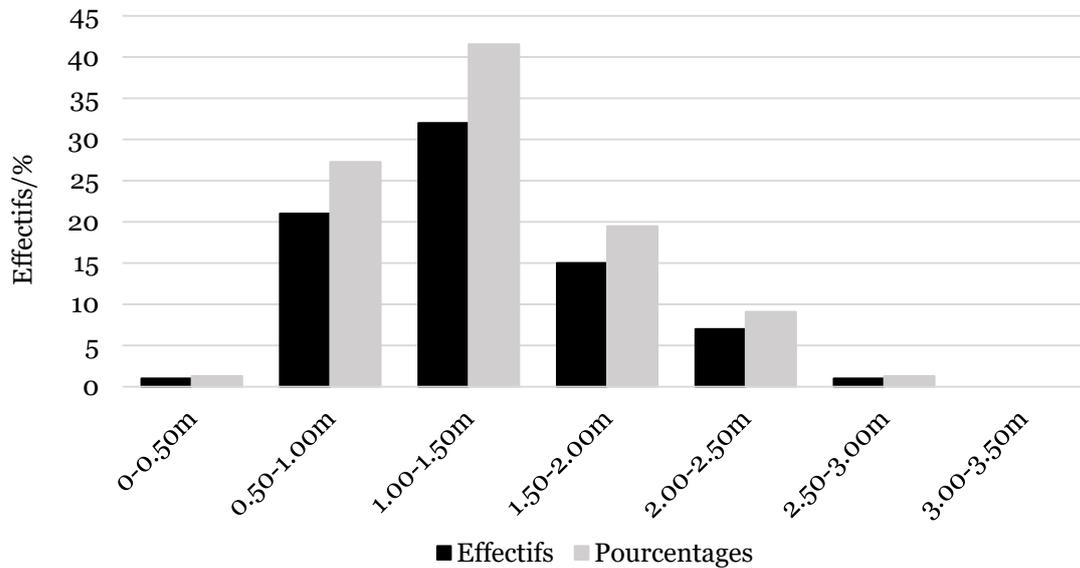


Figure 7.23 : Distribution des profondeurs en 7 classes (effectifs et pourcentages)

Concernant la répartition spatiale des largeurs et des profondeurs spécifiques de la Mérantaise, une première manière simple de l'analyser est de regarder leur distribution par rapport à leur distance à la source (Figure 7.24). On observe, ainsi, dans un premier temps, que celle-ci suit un schéma logique, à savoir que les largeurs les plus faibles se trouvent essentiellement à l'amont et que le lit de la rivière s'élargit vers l'aval (Figure 7.24.a.). Les profondeurs, quant à elles, s'organisent également grossièrement de l'amont vers l'aval, avec tout de même une plus forte variabilité tout au long du linéaire

(Figure 7.24.b.). Les profondeurs les plus importantes, aux alentours de 2 m, se trouvent dans la partie médiane de la Mérintaise, à partir de 6 km de la source et jusqu'à 12 km de la source.

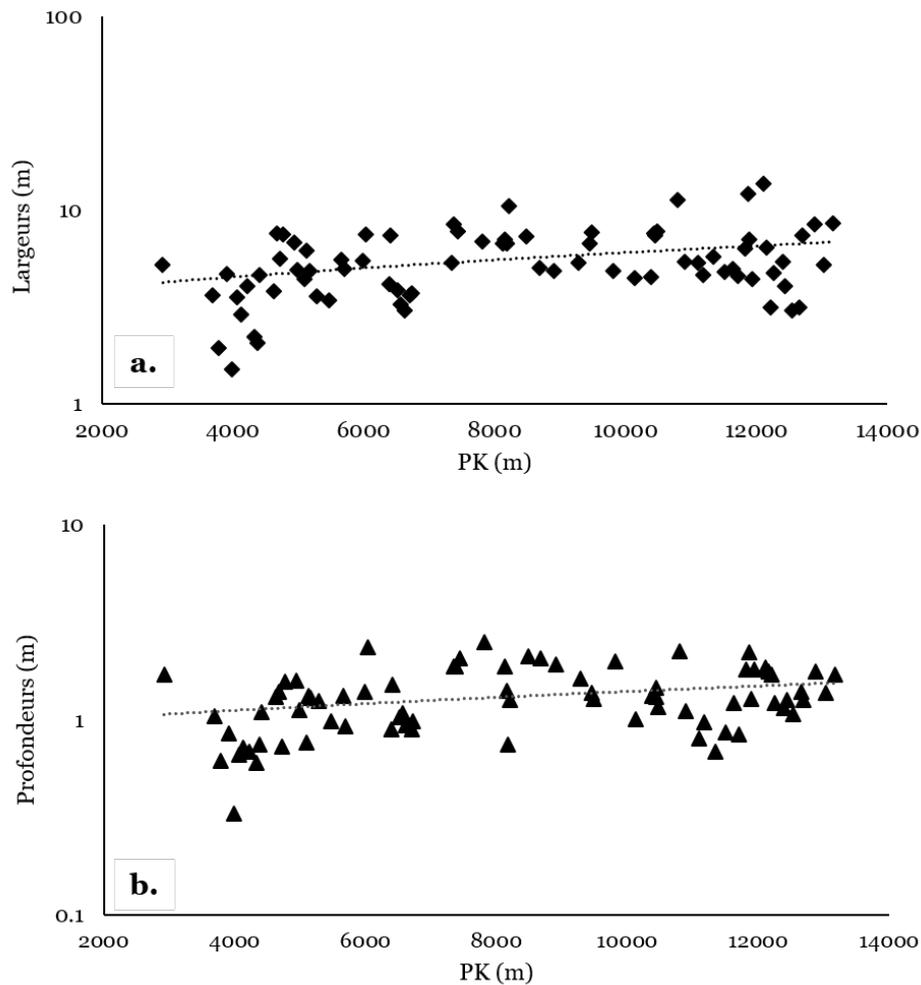


Figure 7.24 : Distribution spatiale des largeurs (a.) et des profondeurs (b.) le long du linéaire de la Mérintaise

Or, cette façon d'analyser les paramètres de géométrie de la rivière n'a qu'un sens relatif car elle ne permet pas réellement d'identifier d'éventuelles variations spécifiques locales et donc de préciser les secteurs potentiellement sous l'influence de pressions contrôlant le fonctionnement hydromorphologique de la rivière. En effet, il est logique d'obtenir des largeurs et des profondeurs plus importantes à l'aval qu'à l'amont du fait des débits qui augmentent en s'écoulant vers l'aval. Il est donc nécessaire de faire abstraction de l'effet de la taille du bassin versant et de regarder cette même distribution rapportée à celle-ci. En contexte naturel, ou tout du moins peu influencé par des pressions anthropiques, l'évolution du rapport L ou P/BV le long d'un gradient longitudinal devrait être nulle. À l'inverse, un hydrosystème (in)directement influencé par un forçage anthropique présentera des variations locales de la géométrie du chenal témoignant d'un dysfonctionnement hydromorphologique.

Aussi, les variables de géométrie de la rivière ont-elles été rapportées à la taille du bassin versant à chaque point de mesure. Les résultats sont présentés dans les graphiques suivants (**Figure 7.25**).

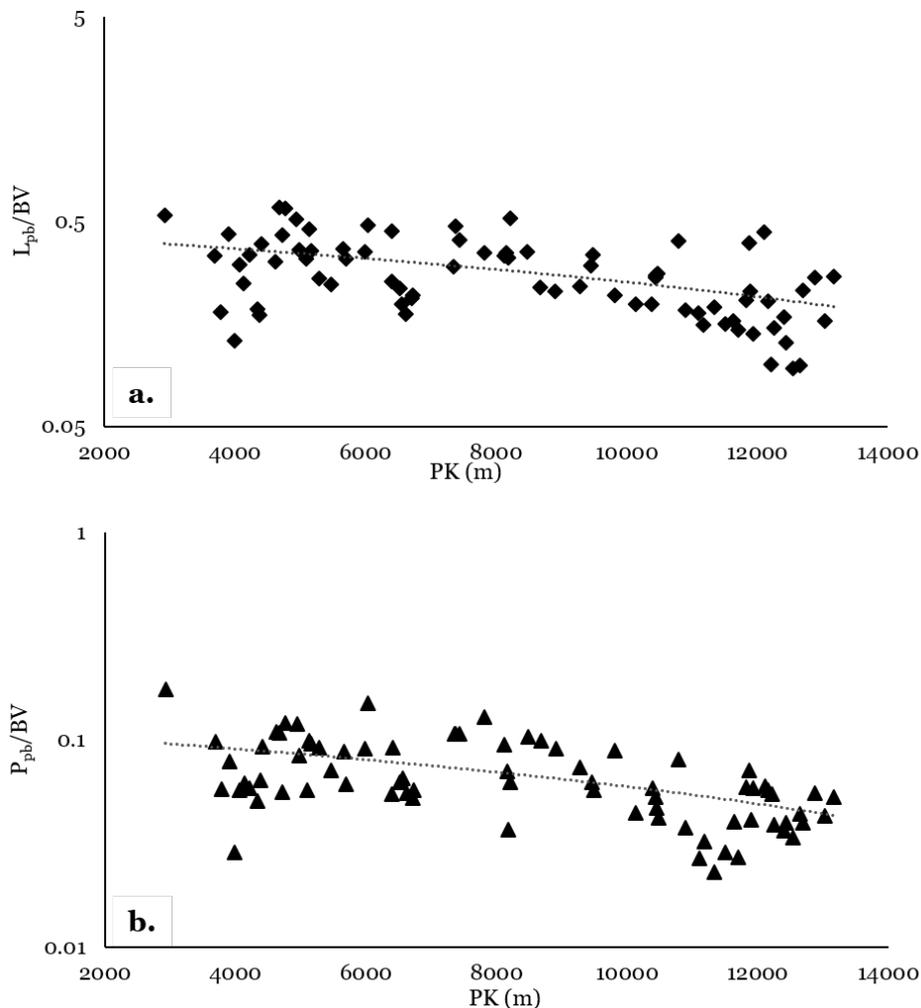


Figure 7.25: Distribution spatiale des largeurs (a.) et des profondeurs (b.) de la Mérintaise pondérée par la taille du bassin versant.

D'une part, les deux graphiques montrent, encore une fois, la relative hétérogénéité des valeurs de largeurs et de profondeurs mesurées le long de la Mérintaise ($r^2 < 0.3$). La variabilité de la géométrie du chenal est d'ailleurs plus importante dans la partie amont du bassin, en particulier pour les profondeurs à plein bord. Aussi, il semble en apparence difficile d'identifier de véritable tendance évolutive de la géométrie du chenal à l'échelle du linéaire. Pourtant, on observe que proportionnellement à la taille du bassin versant, les largeurs et les profondeurs les plus importantes se trouvent à l'amont du linéaire. Sans chercher pour le moment à identifier plus en détail le rôle des différents facteurs de contrôle responsables de la géométrie actuelle du lit de la Mérintaise, il est d'ores et déjà possible de proposer une première hypothèse à ce constat proportionnellement à la taille du bassin versant. Il est probable que les profondeurs et les largeurs les plus fortes se trouvent dans l'extrême partie amont car la principale alimentation en eau de la rivière se fait par sa source artificielle, les étangs du Manet. Ce

sont eux qui apportent l'essentiel des débits liquides au chenal. Les quelques affluents et rejets urbains présents le long du linéaire ne complètent que partiellement les apports liquides à la rivière. De ce fait, ils ont un impact morphogène proportionnellement plus fort dans la partie amont et moindre en progressant vers l'aval. Ils ne sont redynamisés que de façon secondaire par des apports latéraux conséquents.

D'autre part, une deuxième hypothèse pourrait expliquer cette distribution : la partie aval du chenal de la Mérantaise traverse la commune de Gif-sur-Yvette où les berges sont bien plus fréquemment consolidées par des protections de berges réduisant les possibilités d'érosion du chenal.

Pour conclure, deux constats ont été établis durant cette analyse :

(i) d'une part, il n'existe pas de véritable tendance et la géométrie du lit ne dépend pas systématiquement de la taille du bassin versant.

(ii) En revanche, il semble y avoir une certaine logique spatiale répondant aux usages dans le bassin versant. C'est cet aspect que nous allons maintenant développer, après avoir au préalable regardé les écarts au modèle CarHyCE des largeurs et des profondeurs spécifiques de la Mérantaise.

1.2. Les écarts au modèle CarHyCE des largeurs et des profondeurs de la Mérantaise

Après avoir étudié la distribution des largeurs et de profondeurs plein bord à l'échelle de plus de 90 transects et avant de discuter leur localisation, nous avons voulu une nouvelle fois vérifier de quelle manière ces valeurs s'ajustent au modèle de référence. Les résultats sont présentés dans les graphiques suivants (**Figure 7.26**), permettent de visualiser la répartition des paramètres de géométrie du chenal de la Mérantaise rapportés à la taille du bassin versant au regard du modèle de référence établi par CarHyCE. Rappelons tout de même que le modèle CarHyCE utilise des valeurs moyennes tandis que nous utilisons, ici, des valeurs absolues.

L'analyse des trois graphiques ci-dessous nous apprend que :

- Les largeurs et les profondeurs à plein bord de la Mérantaise ont une plus forte variabilité que les valeurs du modèle CarHyCE.
- Si la tendance des largeurs et des profondeurs de la Mérantaise reste proche de celle du modèle de référence, ces dernières sont une fois de plus décalées vers le haut du modèle. Ce constat est plus marqué pour les profondeurs que pour les largeurs, ce qui est cohérent avec nos observations d'une rivière au chenal souvent profond et par endroit relativement étroit.

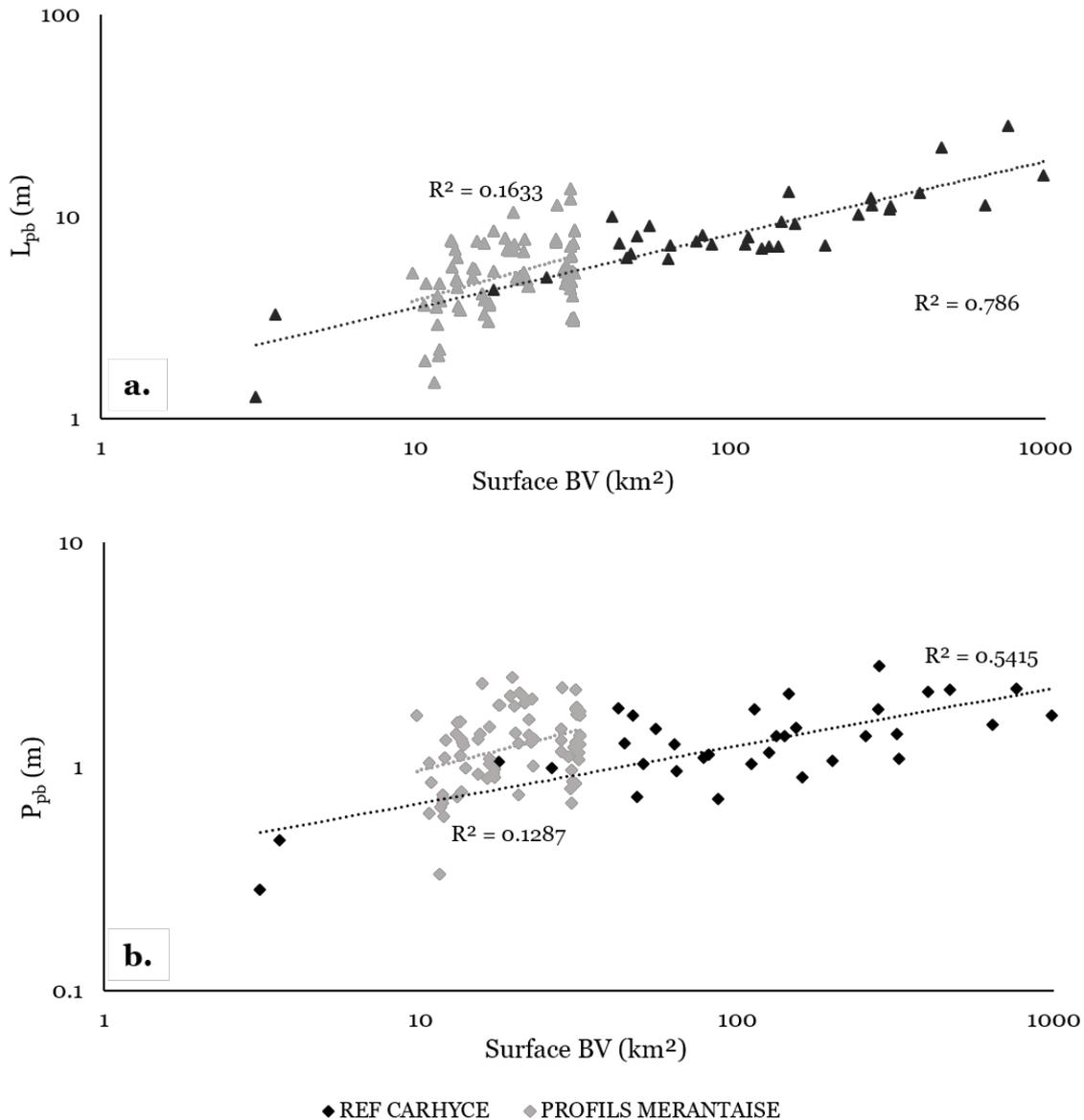


Figure 7.26 : Écarts au modèle des largeurs à plein bord (a.), des profondeurs à plein bord (b.) de la Mérintaise.

2. Des ajustements morphologiques récents.

Après avoir analysé les évolutions spatiales des ajustements morphologiques de la Mérintaise, les points suivants sont consacrés à leurs évolutions temporelles. Le postulat de départ était que l'état hydromorphologique actuel n'était que partiellement hérité des phases 1 (XVII^{ème}-fin XIX^{ème} siècle) et 2 (première moitié du XX^{ème} siècle) puisque le linéaire emprunté depuis la fin de l'exploitation hydraulique de la rivière est sensiblement différents. Pratiquement tous les biefs perchés qui constituaient historiquement le chenal principal de la Mérintaise ont été abandonnés au profit du fond de vallée remis en eau définitivement durant la phase 2. Les ouvrages hydrauliques qui y étaient implantés transversalement et latéralement n'impactent de fait plus le fonctionnement hydromorphologique actuel.

Aussi, notre hypothèse principale est-elle que l'état et les dynamiques morphologiques identifiés sont essentiellement le résultat de l'évolution des usages et des pratiques en cours dans le bassin versant depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle, à savoir un développement massif et rapide de l'urbanisation sur près d'un quart du territoire drainé par la Mérentaise. Les questionnements sont alors les suivants : est-il possible d'identifier les périodes de mise en place de l'incision, d'une part, puis de l'élargissement du lit, d'autre part ? Existe-t-il une ou des étape(s) charnière(s) dans l'évolution des pratiques et usages à l'échelle du bassin versant qui expliqueraient ces évolutions rapides de la morphologie de la rivière ?

Plusieurs éléments et sources de données ont été mobilisés pour dater le début de l'incision et de l'élargissement du chenal. Outre le relevé d'indices historiques sur les ouvrages présents dans le lit de la rivière, l'étude diachronique de profils en long et en travers anciens (années 1980) et récents (2010 et 2015) ont permis de mener l'enquête.

2.1. Comparaison diachronique des profils en long (années 80 – 2015)

2.1.1. Présentation de la démarche générale

La recherche de documents anciens porteurs d'informations sur l'état passé de la Mérentaise dans les archives des organismes chargés de son entretien et de sa gestion (SIAHVY essentiellement) ont permis de mettre à jour un plan du chenal de notre site d'étude levé, semble-t-il, au début des années 1980 et détaillant la physionomie du lit de la rivière sur près de 3 km (côte 1Fi 2 ; **Figure 7.34** et **Figure 7.35**). Ce plan topographique est, en effet, non daté mais le recoupement des informations des inventaires des archives du SIAHVY, dont il est issu, ont permis de déduire qu'il a été établi à l'occasion du projet ou de la mise en place du collecteur du réseau d'eau usées de la vallée de la Mérentaise. L'inventaire relatif au plan précise que le plan date des « années 1980 ». Par ailleurs, l'inventaire d'un deuxième fond associé au plan mentionne notamment le projet et les travaux de construction de ce réseau d'assainissement. Malheureusement, ce fond n'est pas communicable avant 2025.

Si le plan est incomplet (perte et destruction du secteur amont et aval de la rivière), il nous renseigne pour autant sur la partie médiane du linéaire, entre le lavoir de Châteaufort et l'ancien moulin Neuf, soit un secteur particulièrement concerné par ces dynamiques d'incision et d'érosion latéral du chenal (**Figure 7.27**). Les enjeux de restauration écologique y sont importants du fait de la présence de truites *fario* et de zones humides à préserver. Enfin, l'un des intérêts principaux de ce plan est qu'il présente l'état du chenal de la Mérentaise au début des années 80, soit au tout début du développement de l'urbanisation massive qu'a connu par la suite le bassin versant. La Ville-Nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines sort tout juste de terre et est encore loin de son expansion spatiale actuelle. Il nous permet donc de considérer la morphologie de la rivière avant et après urbanisation. En effet, si le plan ancien a

été établi à une période déjà concernée par le développement urbain du bassin, celui-ci était encore bien modeste et ses effets sur la morphologie du chenal ne devaient pas encore se faire sentir. Hammer (1972) a démontré que les surfaces urbaines de moins de 4 ans n'ont pas d'effet significatif apparent et que les réponses morphologiques des cours d'eau (pennsylvaniens) en contexte (péri)urbain ne sont pas immédiates. Il faut souvent attendre une quinzaine d'années pour observer des chenaux aux dimensions nettement plus élevées (Hammer, 1972; Grosprêtre, 2011). Ces résultats ont, par la suite, été confirmés par d'autres études qui, elles aussi, montrent un ajustement significatif des dimensions des chenaux à partir de 12 à 15 ans (Leopold, 1973 ; Douglas, 1985 ; Chin, 2006 ; Chin et al., 2013).

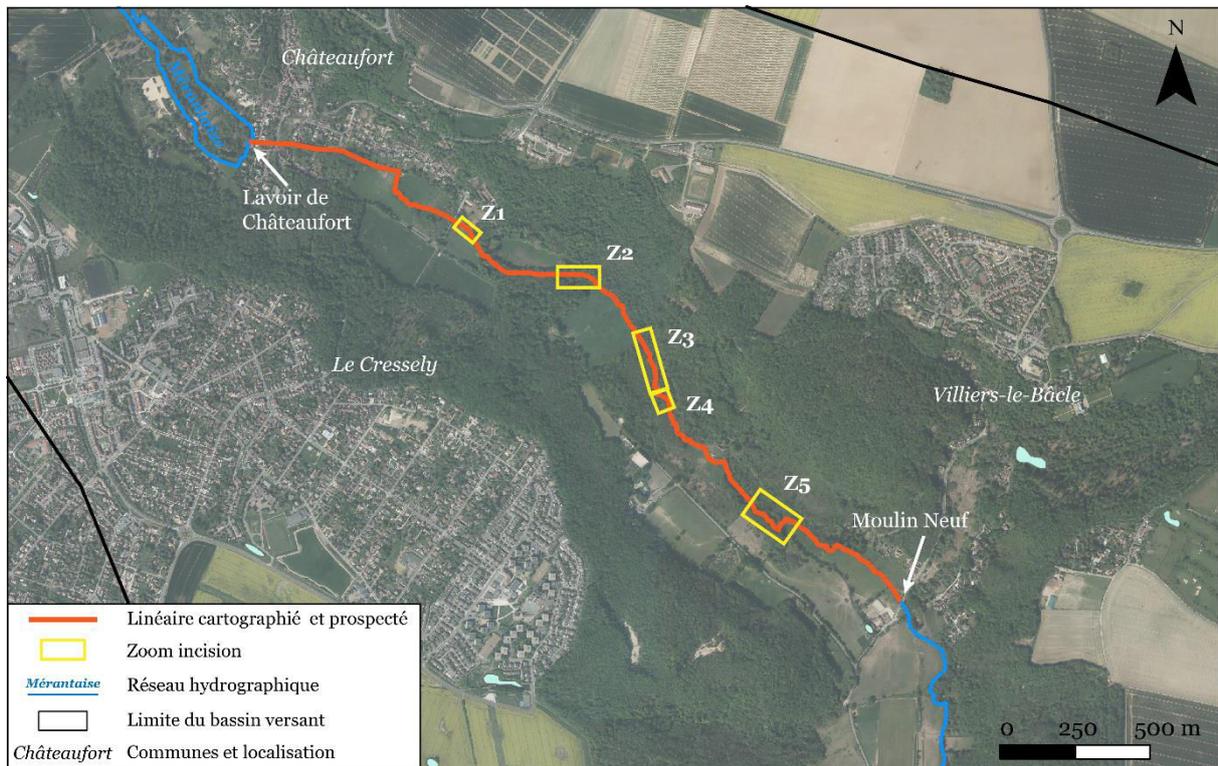


Figure 7.27 : Localisation du tronçon d'étude pour la comparaison du chenal entre 1980 et 2015 (linéaire couvert par le plan des années 80 + levés topographiques de 2015). Localisation des secteurs détaillés pour la quantification de l'incision du lit de la Mérantaise.

L'exploitation de cette donnée a été faite en trois temps, avec le concours d'étudiants géomètres de l'ESGT, l'École Supérieure des Géomètres et Topographes (CNAM) du Mans, à l'occasion d'un projet de fin d'étude en 2015.

Dans un premier temps, il a fallu géoréférencer et digitaliser le plan de 1980 pour à terme pouvoir le comparer aux relevés topographiques actuels. Le géoréférencement du plan a été réalisé sous Autocad par le biais du calage d'Helmert. Il a été calé à partir de points fixes cartographiés sur le plan historique et encore en place aujourd'hui sur le terrain : tampons du réseau d'assainissement, ponts et bâtiments existants. L'écart moyen quadratique (m) du géoréférencement du plan est de 0.44 m et a été considéré comme satisfaisant car inférieur à 50 cm. Ce seuil d'acceptabilité de la marge d'erreur

maximale a été établi arbitrairement en prenant en compte les différentes imprécisions liées au document d'archives et celles liées aux mesures de terrain. Suite au calage du plan, les points cartographiés correspondant au chenal (centre ou point le plus bas ?) ont alors été digitalisés pour établir le profil en long de la Mérantaise. Cependant, pour pallier à l'absence de points dans certains secteurs stratégiques (méandres notamment), des points interpolés ont été créés en suivant l'axe du cours d'eau pour compléter l'information (**Figure 7.28**). Les étudiants géomètres ont pris le parti de considérer une pente constante de la rivière entre ces points du fait de la faiblesse de la pente du lit.

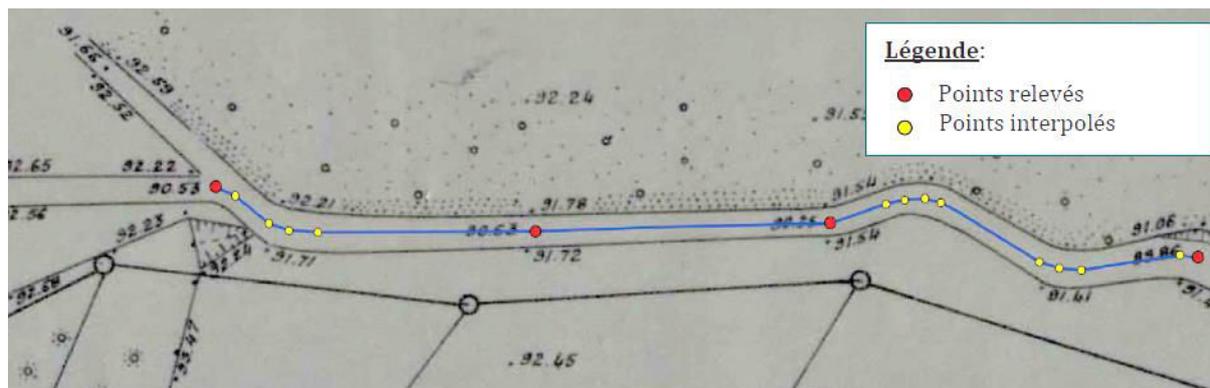


Figure 7.28 : Répartition des points existants et interpolés suivant l'axe du chenal (extrait) (Cherruault et al, 2015, ESGT)

Dans un deuxième temps, les étudiants géomètres de l'ESGT ont levé sur le terrain le profil en long actuel (2015) de la Mérantaise dans le système de référencement national en vigueur (RGF 93), à l'aide de deux appareils topographiques (2 tachéomètres : Leica TS 06+ ; Trimble S6). Ils ont obtenu une précision du profil actuel inférieure à 5 cm grâce au rattachement planimétrique et altimétrique de leurs relevés par mesures GNSS cinématiques de type NRTK qui permet d'obtenir des altitudes avec une précision de quelques millimètres. Le détail de leur démarche est disponible dans leur rapport final (Cherruault et al., 2015) et nous n'en proposons ici qu'une synthèse et les résultats finaux.

Enfin, la dernière étape et objectif final de cette analyse a consisté à comparer les deux profils en longs de « 1980 » et 2015. Le premier ayant été reconstitué à l'aide des données topographiques disponibles sur le plan des années 80 et le second étant le résultat d'un relevé topographique précis sur le terrain. Avant toute conclusion sur l'évolution planimétrique et altimétrique entre les années 80 et aujourd'hui, les étudiants géomètres ont vérifié la marge d'erreur altimétrique maximale entre les deux profils en long. Celle-ci correspond à la combinaison quadratique des précisions altimétriques obtenues à partir de visées réciproques non simultanées et de visées unilatérales :

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$$

où σ_1 correspond à la précision sur la visée unilatérale entre 2 points définis du profil en long et σ_2 correspond à la précision sur la visée réciproques non simultanées.

Il s'avère qu'il y a une marge d'erreur finale de 7.1 cm entre les deux plans, imputable à la fois aux problèmes de levés topographiques sur le terrain et de report sur les plans. Aussi a-t-on considéré une précision d'au moins 8 cm. De ce fait, toute valeur d'incision inférieure à 8 cm n'est pas prise en compte car comprise dans la marge d'erreur altimétrique.

2.1.2. Une incision plus ou moins marquée à la comparaison diachronique des deux plans

Si l'analyse quantitative sur l'ensemble du tronçon étudié est difficile à mener car les tracés en plan des deux profils diffèrent par moment (problème de cartographie ou réelle migration latérale) et que le calage précis des profils est impossible sur la totalité du profil en long (**Tableau 7.5**), elle était possible localement. Ainsi, il a été choisi de se concentrer sur cinq secteurs pour lesquels la comparaison planimétrique et altimétrique était localement significative.

Longueur totale des profils en long (m)		
Années 1980	2015	Δ 2015-1980
3 055.2	3098.2	43

Tableau 7.5 : Illustration des écarts entre les deux profils en long avec l'exemple de la longueur totale respective des profils de « 1980 » et 2015.

Les cinq secteurs sont répartis tout au long du profil en long prospecté pour cette étude diachronique (**Figure 7.27**). Ils présentent tous des marques d'incision du chenal bien que celles-ci soient plus ou moins significatives. Les zooms 1 et 3 sont ceux pour lesquels l'incision est la plus forte (jusqu'à 1.50m, Z1). Les zooms 4 et 5 présentent quant à eux une incision plus modérée (jusqu'à 65 cm, Z5). Rappelons également qu'une marge d'erreur de 8 cm sur les évolutions altimétriques a été estimée. De ce fait, les valeurs d'incision inférieures à 8 cm sont à considérer avec précaution.

Le premier zoom présente une incision forte en particulier dans sa partie aval (**Figure 7.29**). Il est situé au niveau du seuil d'Ors. Un premier biais apparaît alors sur ce tronçon car le profil des années 80 ne rapporte pas, ou mal, la présence de ce seuil d'Ors pourtant déjà présent il y a 40 ans ; il n'a donc pas pu être matérialisé dans la topographie du chenal dans les années 80. Les différences d'altitudes, alors obtenues par soustraction des deux profils en long, laissent sous-entendre une incision très forte en aval du seuil. Si ces résultats doivent être modérés puisqu'il s'agit essentiellement d'une erreur de représentation du profil le plus ancien au droit du seuil, la suite aval du profil en long témoigne tout de même d'un enfoncement du lit à l'aval du seuil d'Ors. La partie à l'amont ne porte évidemment pas de trace d'incision puisqu'il s'agit de la zone de retenue de l'ouvrage (secteur de piégeage des sédiments).

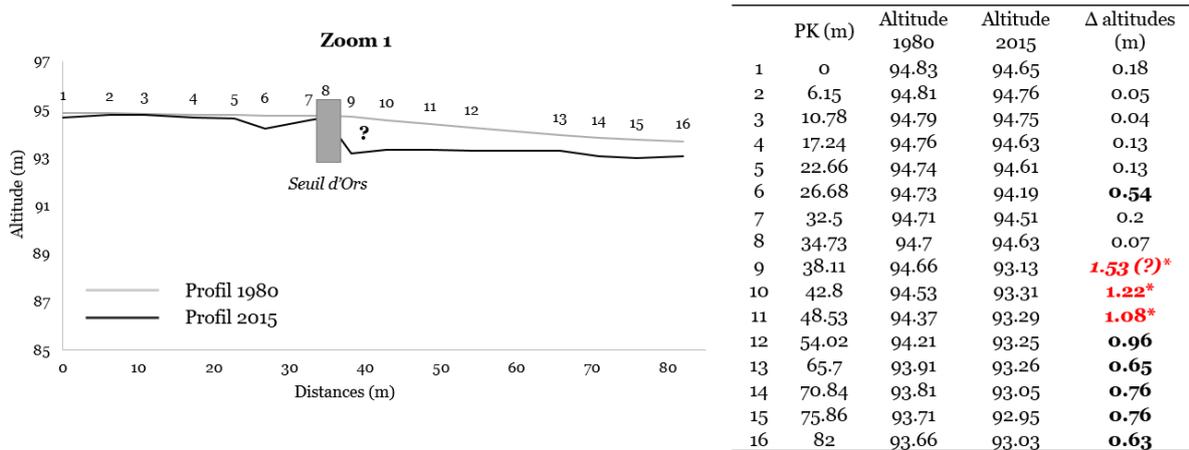


Figure 7.29 : Différences d’altitudes entre les profils de « 1980 » et 2015 au zoom 1. * Malgré l’existence du seuil dans les années 1980, il n’a pas été reporté dans la topographie du chenal des années 1980 et n’a pas pu être matérialisé dans ce schéma. Il faut donc être prudent avec les résultats obtenus au droit du seuil.

Le zoom 2 témoigne lui aussi d’une incision significative du lit de la Mérantaise entre les années 1980 et 2015 (Figure 7.30). Celle-ci atteint plus d’un mètre entre la canalisation et la passerelle à l’aval et est supérieure à ≈ 50 cm sur près de 90 m. Ce résultat est confirmé par les profils en travers, notamment celui présenté dans la Figure 7.30 au droit de la tabulation n°20. À cet endroit, les berges de la rivière sont de 2.00 m de haut.

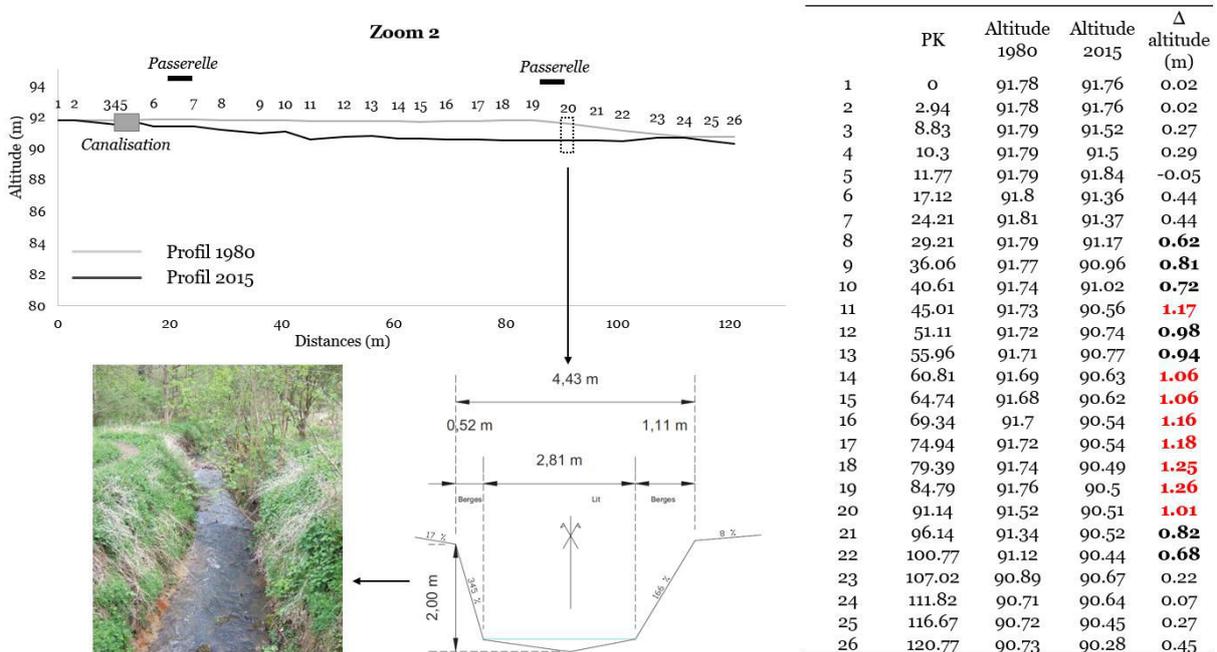


Figure 7.30 : Différences d’altitudes entre les profils de « 1980 » et 2015 au zoom 2 et profil en travers actuel (tabulation n°20 ; ESGT) illustrant l’incision du lit

Les 3 zooms suivants (Figure 7.31, Figure 7.32 et Figure 7.33), situés plus à l'aval présentent une incision beaucoup moins forte : inférieure à 0.85 m et en moyenne de 0.25 m. Pour autant, ils témoignent encore une fois, d'un enfoncement du lit depuis le début des années 1980.

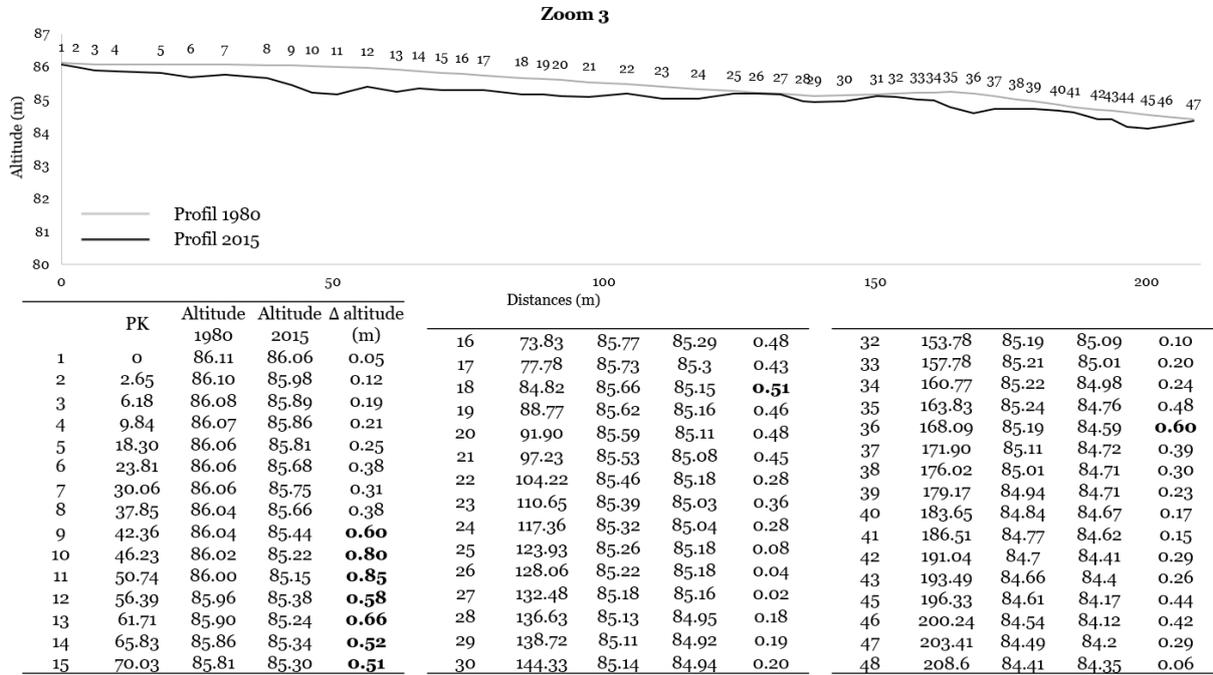


Figure 7.31 : Différences d'altitudes entre les profils de « 1980 » et 2015 au zoom 3

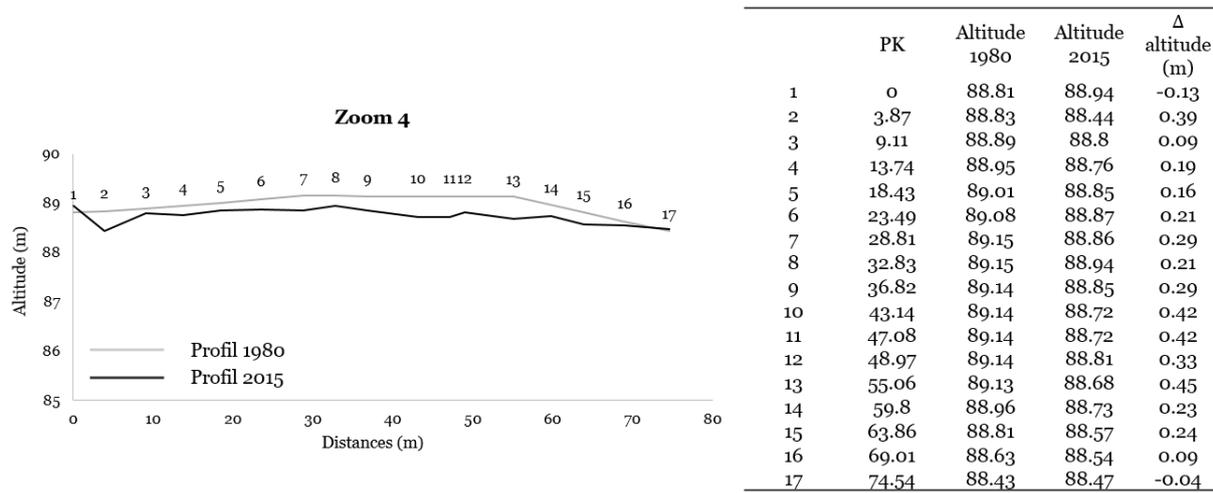


Figure 7.32: Différences d'altitudes entre les profils de « 1980 » et 2015 au zoom 4.

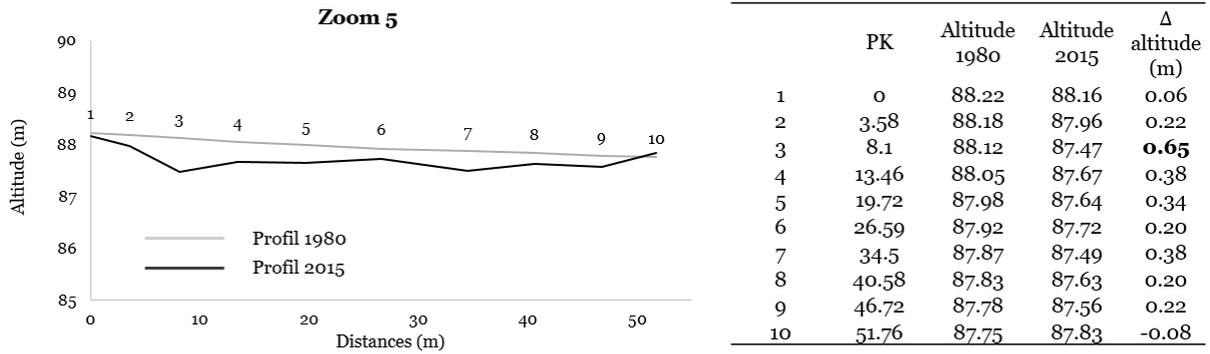


Figure 7.33 : Différences d'altitudes entre les profils de « 1980 » et 2015 au zoom 5.

Ainsi, s'il est difficile de généraliser quantitativement l'incision du lit de la Mérantaise depuis une quarantaine d'années, nous pouvons tout de même affirmer qu'il y a eu une tendance générale à l'incision du chenal et que celle-ci peut être importante (> 1.25 m en aval du seuil d'Ors). Les secteurs amont présentent un enfoncement du fond du lit plus fort que les secteurs aval et, à eux cinq, les zooms cumulent une moyenne d'incision de 41 cm, ce qui est loin d'être négligeable (Tableau 7.6). Il faut cependant rester prudent avec ce résultat puisqu'il s'agit de petits tronçons localisés et que l'incision du lit n'est pas significative sur l'ensemble du chenal.

Moyenne de l'incision (m)	
Zoom 1	0.56 (sur 82 m)
Zoom 2	0.66 (sur 121 m)
Zoom 3	0.33 (sur 207 m)
Zoom 4	0.23 (sur 75 m)
Zoom 5	0.26 (sur 52 m)
	0.41 m

Tableau 7.6: Moyennes des incisions entre Châteaufort et le moulin Neuf (d'après les données de Cherruault et al, 2015, ESGT)

2.2. Comparaison diachronique des profils en travers

Le plan des années 80 renseigne également sur les dimensions latérales de la Mérintaise car y figurent l'altitude du fond du lit et des berges au niveau de 75 transects. Pour les comparer aux profils en travers que nous avons pour l'état actuel (2010 : SIAHVY et 2015 : ESGT), nous avons sélectionné les 31 profils en travers pour lesquels nous disposons d'informations sur les altitudes des berges et du fond du lit pour les deux périodes (**Figure 7.34** et **Figure 7.35**). 23 profils se sont avérés complets (largeurs et profondeurs), mais 9 profils ne renseignaient que sur l'évolution des profondeurs à plein bord de la rivière. Cette distinction s'explique par notre choix de ne considérer que les valeurs positives d'évolution de la largeur à pleins bords de la rivière témoignant d'un élargissement du lit et d'écarter les valeurs négatives synonymes d'une réduction du chenal entre les années 80 et 2010. Il apparaît, en effet, peu probablement que le lit se soit rétréci aux endroits concernés. Il aurait pu s'agir de secteurs où le chenal a été artificiellement rétréci (protection de berge, remblaiement, ...) mais après vérifications sur le terrain cette hypothèse s'est avérée fautive a priori. D'autre part, il y a une incertitude sur les largeurs à pleins bords estimées pour les années 80 du fait (i) de la méthode utilisée pour déterminer le niveau à pleins bords et (ii) de la qualité difficilement vérifiable des relevés topographiques réalisés par les professionnels de l'époque. En effet, pour déterminer les largeurs à plein bord de la Mérintaise sur le plan ancien des années 80, nous avons tout d'abord relevé les dimensions des ponts cartographiés, encore présents aujourd'hui et qui n'ont a priori pas changé entre les deux périodes. Connaissant leur dimension réelle (terrain) et celles présentes sur le plan des années 80, une règle de trois a permis de déterminer les largeurs à pleins bords pour les années 80.

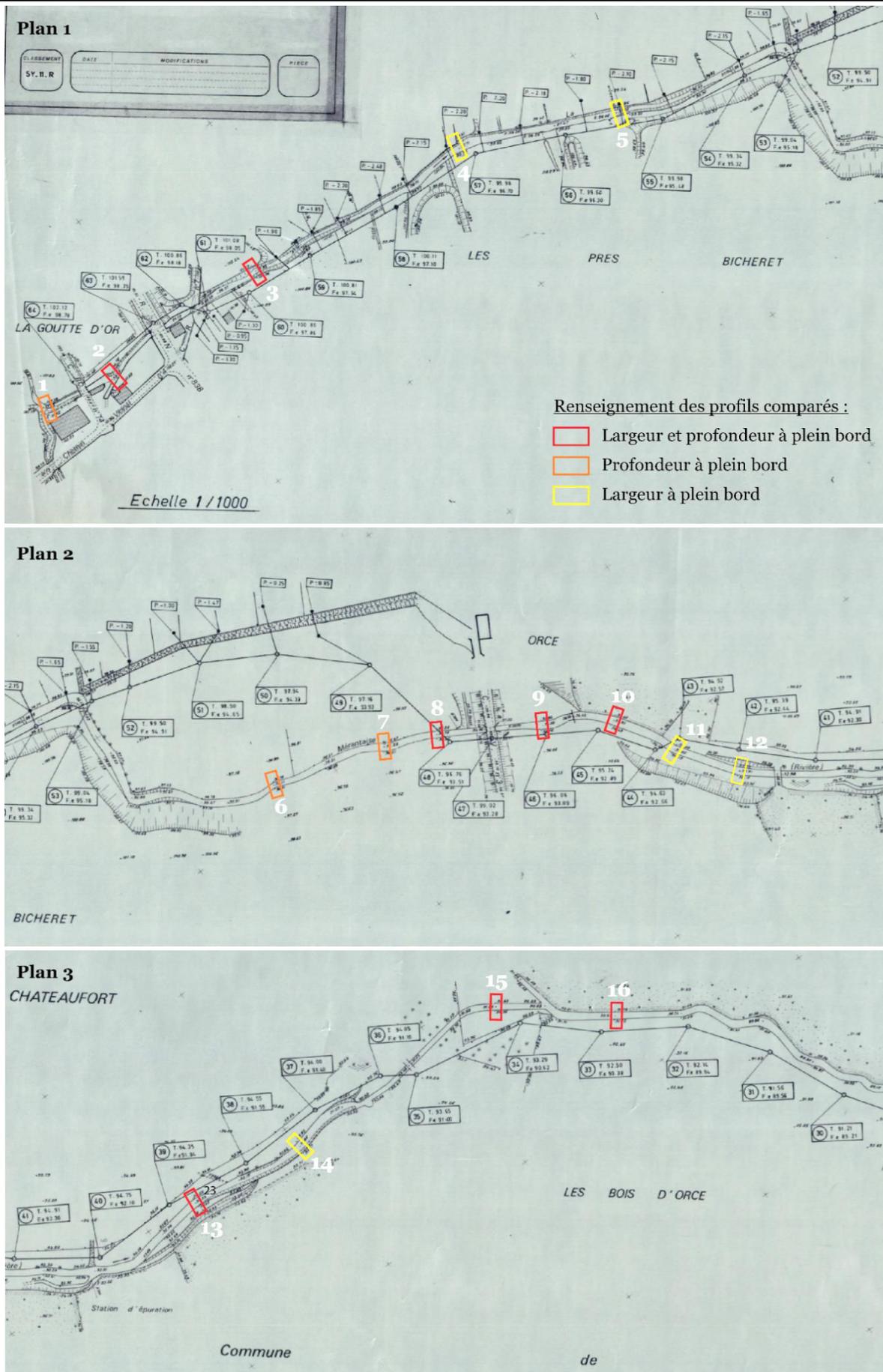


Figure 7.34 : Localisation des profils en travers utilisés pour comparés la géométrie du chenal entre les années 1980 et 2010/2015. Plan 1 à 3 (fonde carte : plan SIAHVY).

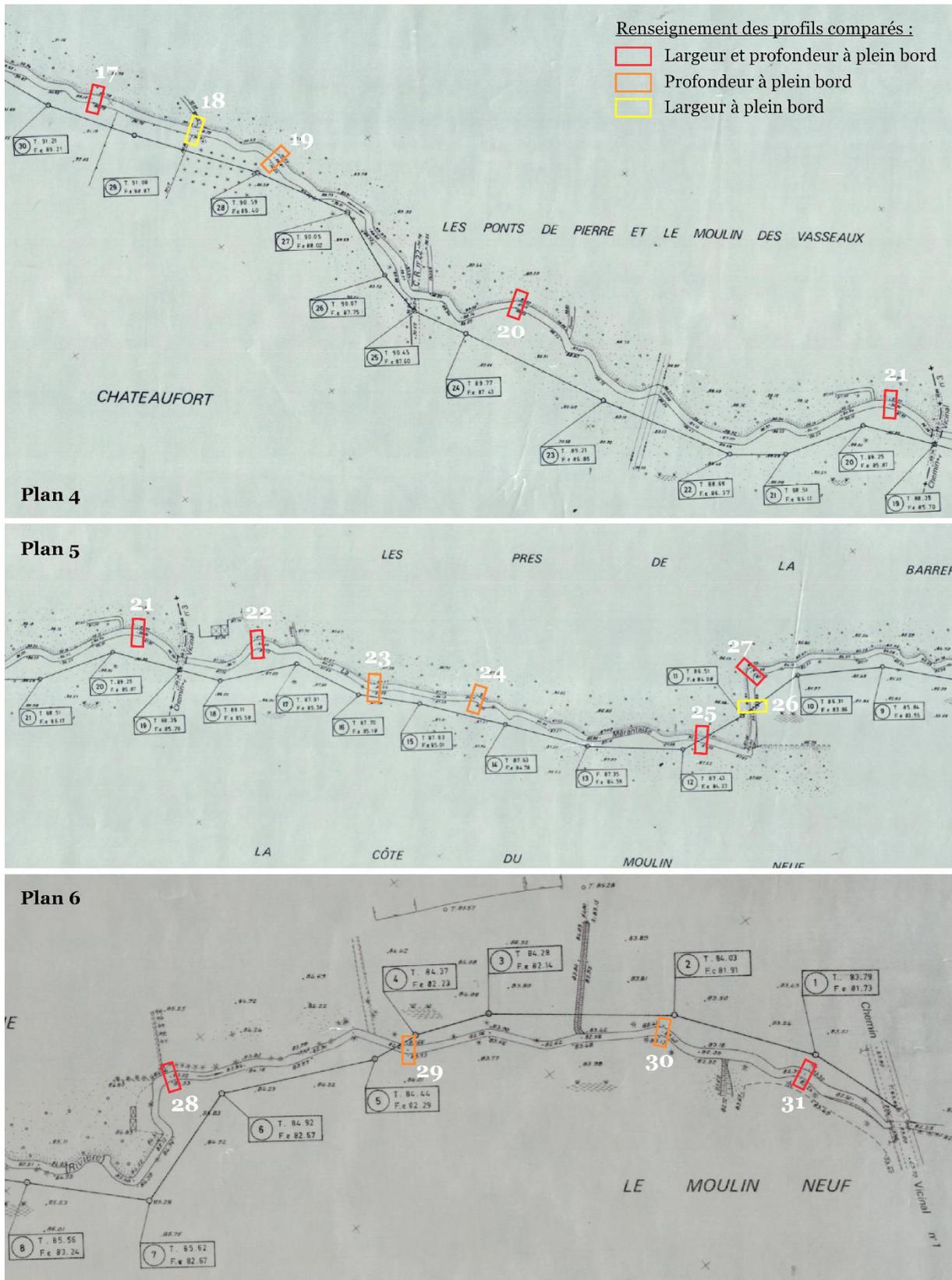


Figure 7.35 : Localisation des profils en travers utilisés pour comparés la géométrie du chenal entre les années 1980 et 2010/2015. Plan 4 à 6 (fonde carte : plan SIAHVV)

Les évolutions de largeurs et de profondeurs à pleins bords du chenal de la Mérantaise sont présentées dans le tableau suivant (**Tableau 7.7**) :

Tableau 7.7 : Évolutions des largeurs et des profondeurs à pleins bords du chenal de la Mérantaise entre les années 80 et 2010, au droit de 31 transects. *valeurs potentiellement surestimées en raisons d'un problème de relevé initial des géomètres de l'époque ou d'une erreur de mesure de notre part ; ** les évolutions négatives ont été conservées, partant du principe qu'elles pouvaient témoigner d'un exhaussement du lit.

N° de profils	L _{pb} (m) 1980's	L _{pb} (m) (2010/2015)	P _{pb} (m) 1980's	P _{pb} (m) (2010/2015)	Δ L _{pb} (m) 2010's- 1980's	Δ P _{pb} (m) 2010's- 1980's
1	7.14		1.29	1.89 (2010)		0.60
2	4.55	8.44 (2010)	1.67	1.89 (2010)	3.89	0.22
3	7.60	7.68 (2015)	2.03	2.06 (2015)	0.08	0.03
4	7.85	9.54 (2015)	1.70*	1.30 (2015)	1.69	-0.4**
5	6.67	7.78 (2015)	1.81*	1.60 (2015)	1.11	-0.21**
6	3.66		0.70	0.72 (2015)		0.02
7	5.85		1.25	1.78 (2015)		0.53
8	4.75	6.74 (2010)	1.53	1.87 (2010)	1.99	0.34
9	6.10	6.74 (2010)	1.18	1.19 (2015)	0.64	0.01
10	5.58	7.35 (2015)	0.55	1.35 (2015)	4.91	0.80
11	5.65	7.74 (2015)	1.14*	0.96 (2015)	2.09	-0.18**
12	4.96	5.60 (2015)	1.19*	0.64 (2010)	0.64	-0.06**
13	5.10	7.69 (2015)	0.99	1.21 (2015)	2.59	0.22
14	7.42		1.71	2.07 (2010)		0.36
15	3.73	5.01 (2010)	1.07	2.07 (2010)	1.28	1.00
16	4.08	5.06 (2015)	1.09	1.64 (2015)	0.98	0.55
17	4.82	5.03 (2015)	1.68	1.92 (2010)	0.21	0.24
18	4.62	4.64 (2015)	1.35*	1.22 (2015)	0.02	-0.13**
19	6.40		1.61	1.63 (2015)		0.02
20	4.02	4.21 (2015)	1.16	1.23 (2015)	0.19	0.07
21	4.65	6.69 (2010)	1.19	1.38 (2010)	2.04	0.19
22	5.11	5.83 (2015)	1.03	1.41 (2015)	0.72	0.38
23	4.78		1.05	1.60 (2015)		0.55
24	3.91		1.17	1.30 (2015)		0.13
25	4.30	4.87 (2010)	1.80	2.00 (2010)	0.57	0.20
26	3.65	5.02 (2015)	0.90	0.71 (2015)	1.37	-0.19**
27	3.35	4.79 (2015)	1.33	1.37 (2015)	1.44	0.04
28	4.25	4.46 (2010)	0.73	0.82 (2015)	0.21	0.12
29	4.48		1.05	1.31 (2015)		0.26
30	4.35		0.73	0.82 (2015)		0.09
31	4.30	4.50 (2010)	0.85	1.33 (2010)	0.20	0.48
Moyenne					1.31	0.20
Max					4.91	1.00
Min					0.02	-0.40

2.2.1. Évolution des largeurs et des profondeurs à pleins bords depuis le début de l'urbanisation du bassin versant

Les évolutions en plan de la Mérintaise témoignent d'un élargissement moyen plus ou moins importants selon les transects depuis les années 1980. Avec un chenal plus large en moyenne de 1.31 m, le détail des évolutions montrent une certaine variabilité selon les secteurs. 7 transects sur 22 présentent des élargissements du lit significatifs supérieurs à 1.60 m ; et 12 d'entre eux présentent une augmentation des dimensions latérales du lit mineur \geq à 1m, soit plus de 50% des transects

Parallèlement, l'évolution temporelle des profondeurs à pleins bords semble moins importante mais est tout aussi significative. Les transects exploités ici ne correspondent pas nécessairement aux points des profils en long comparés précédemment. C'est pour cette raison que la valeur d'incision maximale obtenue ici n'est que d'un mètre, et non supérieure à 1.25 m. Le **Tableau 7.7** montre une incision moyenne de 20 cm pour le tronçon compris entre Châteaufort et le moulin Neuf. Six transects rapportent un enfoncement du lit \geq à 50 cm Ces résultats sont cohérents avec nos observations présentées précédemment lors de la comparaison diachronique des deux profils en long. Mais surtout, ces évolutions concomitantes de la mise en place de la Ville Nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines, et plus largement du développement de l'urbanisation du bassin versant de la Mérintaise, laissent donc bien supposer d'un impact des surfaces imperméabilisées et du ruissellement urbain sur les dynamiques fluviales et morphologique de la rivière.

2.2.2. Évolutions entre 1849 et 2015

Pour compléter et justifier, une fois encore, la chronologie de la mise en place des ajustements hydromorphologiques observés aujourd'hui dans le lit de la Mérintaise, un dernier indice a été analysé. Il s'agit d'un transect pour lequel un profil en travers du lit a été retrouvé sur un plan datant de 1849. Ce profil avait été levé sur une section de dérivation du chenal (canal d'amenée), en amont du moulin d'Ors, encore actif aujourd'hui. Il s'agit d'une opportunité assez rare car les relevés topographiques anciens qui nous sont parvenus cartographiaient essentiellement les biefs actifs de la rivière exploitée par les activités hydrauliques, soit les biefs perchés. Or depuis le début du XX^{ème} siècle, ces biefs ne sont plus empruntés par les eaux de la Mérintaise puisqu'abandonnés avec la fin de la meunerie (Phase 2 de la trajectoire de la rivière). Archive donc presque unique, ce profil en travers permet de connaître la géométrie du chenal en plein âge d'or de l'hydraulique de la Mérintaise et de le comparer avec l'état actuel (**Figure 7.36**). S'il faut rester prudent avec ces relevés anciens, le profil en travers n'en reste pas moins cohérent avec ce que devait être le chenal à l'époque. Il est assez probable que le lit mesurait effectivement 2.50 m en amont du moulin d'Ors, comme l'indique le document retrouvé. La **Figure 7.36** montre l'impressionnante modification du chenal en un peu plus d'un siècle. Alors que le lit de la

rivière mesurait 2.50 m de large pour 1.20 m de profondeur, il est désormais d'environ 7 m de large pour plus de 2 m de hauteur de berge. Il n'a malheureusement pas été possible de comparer ce profil avec les dimensions du chenal au début des années 1980 car aucun relevé n'existe à l'endroit même du profil de 1849. Cependant, une estimation faite sous ArcGIS permet de déduire que le chenal devait mesurer entre 4 m et 5 m de large à la fin du XX^{ème} siècle dans ce secteur.

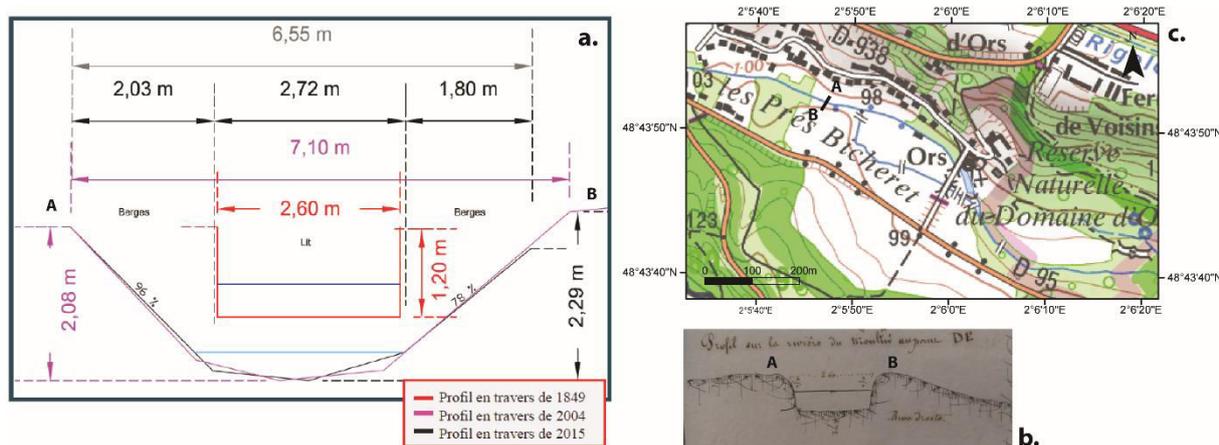


Figure 7.36 : Comparaison de la géométrie du chenal entre 1849 (ADY, 7S 115) et 2015.

2.2.3. Mise en perspective de nos résultats avec ceux obtenus sur le Morbras

Un travail similaire de comparaison diachronique de profils en travers a été réalisé en 2017 sur le Morbras (affluent de la Marne) par une étudiante de Master 2, Leïla Ali (Ali, 2016 et 2017). Le Morbras est un petit cours d'eau francilien de faible énergie dont les conditions hydromorphologiques et l'environnement sont assez proches de ceux de la Mérentaise. Il s'écoule sur 17 km et son bassin versant couvre 55 km². Il traverse sept communes et se situe plutôt en contexte urbain. La vallée du Morbras a également connu un développement massif et rapide de l'urbanisation sur son territoire, bien que celui-ci soit plus ancien que pour le bassin de la Mérentaise (dès l'entre-deux guerres et accéléré par les « Trente Glorieuses »). La géologie du bassin du Morbras est sensiblement la même que celle de notre site d'étude (formations sédimentaires du bassin parisien), malgré l'absence des Sables de Fontainebleau. Ali (2017) observe également de nombreuses et significatives traces d'incision et d'élargissement du lit du Morbras. Elle a pu, elle aussi, quantifier les évolutions latérales et en plan de la rivière en comparant de la géométrie de sections du chenal entre 1964 et 2017 sur 5 tronçons, grâce à l'étude d'un plan ancien daté de 1964 et similaire à notre plan des années 1980. Nous proposons ici de comparer rapidement ses résultats aux nôtres. Précisons qu'Ali (2017) utilise des valeurs moyennées sur chaque tronçon, tandis que nous utilisons des valeurs absolues par transects.

L'auteur a observé des incisions comprises entre 20 cm et 1.70 m selon les tronçons et des largeurs comprises entre 50 cm et 2 m (**Tableau 7.8**). Le secteur 5 (Ru de la Fontaine de Villiers, affluent du Morbras) est le plus soumis à un ajustement des conditions morphologique du chenal mais l'auteur précise que la méthode utilisée pour ce tronçon est plus aléatoire puisque les valeurs passées ont été estimées d'après des documents d'archives iconographiques. Si l'on se concentre sur les stations établies sur le Morbras (1 à 4), les valeurs obtenues sont plutôt inférieures à 50 cm pour l'incision et inférieures à 85 cm pour l'élargissement du lit.

	Tronçons	Incision	Élargissement
	1	20-30 cm	/
	2	30-40 cm	85 cm
	3	25-30 cm	57 cm
	4	50 cm	0 cm
	Zone 1	40-60 cm	50 cm
5	Zone 2	150-170 cm	150-200 cm
	Zone 3	80-100 cm	200 cm

Tableau 7.8 : Retranscription de la quantification de l'incision et élargissement du lit du Morbras entre 1964 et 2017 (Ali, 2017 ; modifié)

Ainsi, dans un contexte géographiquement proche du Morbras, celui de la Mérantaise, nous avons obtenus des valeurs relativement similaires pour ce qui est de l'incision du lit (en moyenne 20 cm avec un maximum de 1m) (**Tableau 7.7**). En revanche, notre terrain d'étude présente des élargissements du lit sensiblement plus importants que ceux relevés sur le Morbras. En effet, ce dernier a augmenté latéralement son gabarit de moins d'un mètre (à l'exception de la zone 5 dont les mesures sont à considérer avec précaution) lorsque la Mérantaise s'est élargie de plus d'1.30 m en moyenne.

2.3. Des ajustements récents confirmés par la fragilisation des ouvrages transversaux et latéraux

Enfin, un dernier élément de preuve du caractère récent des ajustements morphologiques de la Mérantaise est la date de mise en place de certains ouvrages transversaux et latéraux dans le chenal. En effet, plusieurs générations d'aménagements ont vu le jour depuis les débuts de l'exploitation hydraulique de la rivière. La dernière (ou avant-dernière) génération de ces ouvrages est plus ou moins concomitante avec le développement de l'urbanisation des plateaux et des versants de la vallée, soit une quarantaine d'année tout au plus. Il s'agit, de manière générale, de buses de rejets urbains ou agricoles, de ponts, de protection de berges.

Aussi, lors de l'état des lieux, deux types d'ouvrages ont été distingués en fonction leur ancienneté :

- (i) les ouvrages antérieurs à 1970-1980 (époque de la mise en place de la Ville-Nouvelle de SQY), pour la plupart hérités de « l'âge d'or » de l'exploitation de la rivière pour les activités hydrauliques ;
- (ii) et les ouvrages les plus récents, contemporains ou postérieurs au développement urbain massif dans le bassin versant. C'est évidemment cette deuxième catégorie qui a retenu notre attention pour cette phase de réflexion (**Figure 7.37**).

Les ouvrages récents sont facilement identifiables de par leur structure et bien souvent leur fonction. En effet, il s'agit de constructions en béton à l'allure « moderne », se différenciant ainsi de celles en pierre de meulière typiques des ouvrages anciens. De la même manière, si les protections de berge, les seuils en rivière et les ponts sont des constructions communes aux deux périodes, les ouvrages de rejets des eaux pluviales caractérisent les infrastructures de deuxième génération. En effet, ces derniers sont liés au réseau d'assainissement mis en place dans le bassin de la Méranlaise à partir des années 1980 pour gérer les ruissellements des villes et du réseau routier en pleine expansion (SIAVHY). Il en va de même pour les ouvrages implantés de manière transversale dans le lit de la rivière : les buses, les ponts en béton ou le collecteur d'eaux usées de la vallée de la Méranlaise.

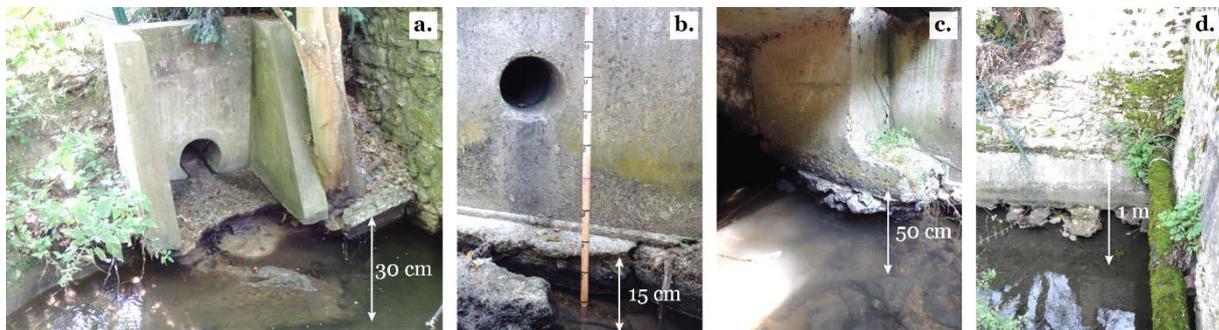


Figure 7.37 : Exemples d'ouvrages latéraux récents présentant des marques d'affouillement prononcées. a. buses de rejets urbains ; b. et c. culées de ponts ; d. muret de protection.

Ainsi, il a été observé que pratiquement tous les ouvrages considérés comme récents (années 70-80 au plus tôt) portent des traces d'affouillement et de déstabilisation de leur structures. Seules quelques buses, situées principalement en aval, à Gif-sur-Yvette sont ensablées et ne portent pas de traces d'incision ou d'érosion. Ce constat permet donc de postuler que les ajustements hydromorphologiques identifiés sur le cours de la Méranlaise ont très certainement commencé dans les années 1980, soit de manière concomitante avec la sortie hors de terre de la Ville-Nouvelle de SQY et du développement massif et rapide de l'urbanisation dans le bassin versant. S'il semble y avoir une relation entre la présence de ces ouvrages récents de gestion des écoulements dans le bassin de la Méranlaise et les dynamiques d'ajustements actuelles identifiées dans ce chapitre, l'hypothèse de

l'influence significative de l'urbanisation sur le fonctionnement hydrologique de la rivière semble donc se préciser.

2.4. Affleurement du *bedrock* témoin de l'arrêt des dynamiques d'incision

L'incision du lit de la Mérentaise semble aujourd'hui stabilisée comme en témoigne l'affleurement de roche-mère à de nombreux endroits du chenal (Assani et al., 2004). Cette argile apparente très compacte conditionne désormais la capacité d'incision de la rivière (**Figure 7.38**). Le cours d'eau a atteint un niveau géologique de roche dure qu'il lui est pratiquement plus possible de creuser, ou tout du moins à une vitesse très faible.

En revanche, l'érosion latérale semble, quant à elle, bien active aujourd'hui et constitue l'essentiel des dynamiques fluviales identifiées sur le terrain. Ce sont désormais principalement les processus d'érosion des berges qui fournissent le lit en matériaux solide.



Figure 7.38 : Exemples d'affleurement d'une argile très compact (*bedrock*) qui contraint désormais fortement l'incision du lit.

3. Mesures de l'activité érosive des berges de la Mérintaise

3.1. Contexte et introduction à l'article

L'étude des dynamiques latérales sur le cours de la Mérintaise a permis de mettre en évidence une activité certaine de l'érosion des berges. Suivie à l'aide de deux techniques de mesures complémentaires (barres d'érosion et Structure-from-Motion), l'érosion des berges de la rivière a été caractérisée et quantifiée pendant deux ans (2013 et 2014). Le résultat de ce travail a fait l'objet d'un article proposé à *Journal of Hydrology*, publié en juin 2018, et présenté dans le point suivant.

3.2. Characterizing and quantifying the discontinuous bank erosion of a small low energy river using Structure-from-Motion Photogrammetry and Erosion pins

Marion Jugie*¹, Frédéric Gob¹, Clément Virmoux¹, Daniel Brunstein^{1,2}, Vincent Tamisier¹, Charles Le Cœur¹, Delphine Grancher¹

¹ Université de Paris 1 Panthéon Sorbonne, Laboratoire de Géographie Physique, UMR 8591 CNRS, Meudon, France

² Université de Corse Pascal Paoli, LISA UMR6240 CNRS, Corte, France

* Correspondence to: M. Jugie, Laboratoire de Géographie Physique UMR 8591, Bâtiment Y, 1 place Aristide Briand, 92195 Meudon, France. E-mail: marion.jugie@lgp.cnrs.fr [mailto:](mailto:marion.jugie@lgp.cnrs.fr)

Abstract

River bank erosion is controlled by a complex combination of factors and processes that play a main role in fluvial dynamics. However, the role played by lateral erosion in small low energy rivers functioning still needs to be better understood. This study deals with the characterization and the quantification of the bank erosion of a small low energy river of the Seine Basin (France) in periurban catchment where urbanization had led to an incision and widening of the bed in the past decades, using adapted monitoring surveys: erosion pins and Structure-from-Motion Photogrammetry. The paper provides an opportunity to compare reach-scale flux estimates using both techniques. Spatial and temporal variations in river bank rates were quantified over 16 months and the causes and controls of riverbank erosion were identified. The estimated morphological activity rate ranges from 117cm/yr to 1cm/yr, illustrating the very heterogeneous spatio-temporal pattern of bank erosion observed on the Mérintaise River. Whereas a number of studies consider subaerial processes as the dominant processes, fluvial erosion was found to be the most significant causal process, and in particular the mean discharge of floods. However, the high local variability of the bank erosion of the studied river appears to be controlled by very local factors such as the bank angle, the presence of a berm at the bank-toe (providing

protection against fluvial erosion), lateral supply (outlet of rainwater pipes) and deflected flow in the direction of the bank.

Keywords: riverbank erosion, bank retreat, erosion pins, Structure-from-Motion Photogrammetry, low energy river

1. Introduction

Bank erosion plays a main role in the fluvial dynamics of alluvial rivers. It controls the formation and migration of meander bends, the lateral migration and adjustment of the channel's geometry, and lateral sediment supply (Hickin and Nanson, 1984; Lawler, 1986; Lawler et al., 1997; Couper and Maddock, 2001; Laubel et al., 2003; Larsen et al., 2006; Henshaw et al., 2012; Dépret et al., 2015). Bank erosion should be considered in river management because it may be responsible for land loss, damage to structures adjacent to the river channel, and many kinds of alterations to the river bed and floodplain (Hooke, 1979; Grosprêtre, 2011; Henshaw et al., 2012; Hamel et al., 2013; Marteau et al., 2016). It is also a necessary ecological process conditioning many aspects of ecosystem diversity (Piegay et al., 1997; Laubel et al., 2003).

River bank retreat is a complex process of geomorphological dynamics occurring through a combination of three primary mechanisms (Throne, 1982; Hooke, 1995 ; Lawler, 1992; Lawler et al., 1997; Laubel et al., 2003): mass failure (Hooke, 1979; Thorne and Tovey, 1981; Thorne, 1982; Darby and Thorne, 1996; Rinaldi and Darby, 2007; Luppi et al., 2009), fluvial erosion (Hooke, 1979; Thorne, 1982; Julian and Torres, 2006; Rinaldi and Darby, 2007; Darby et al., 2007, 2010) and subaerial weakening and weathering (Throne and Osman, 1988; Thorne, 1990; Couper and Maddock, 2001; Couper et al., 2002; Wynn et al., 2008; Wallemacq et al., 2011; Hamel et al., 2013). Furthermore, subsurface processes, as seepage erosion (Fox et Felice, 2014; Fox et al., 2007; Masoodi et al., 2018; Samadi et al., 2013), can be associated to the later. The first two types of processes are considered as the dominant processes whereas the third type, involving subaerial and subsurface processes, is often viewed as a "preparatory" process (Lawler, 1993; Prosser et al., 2000; Couper and Maddock, 2001; Luppi et al., 2009). These three bank erosion mechanisms operate at different levels of magnitude and frequency, occurring over different time and spatial scales.

Bank erosion has been extensively studied on large rivers and on torrential streams because they are quite dynamic and are subject to frequent and significant hydromorphological adjustments (Surian, 1999; Dapporto et al., 2003; Rinaldi, 2003; Lespez et al., 2015). Small low energy rivers are much less energetic and, though still relatively unknown, are commonly considered as immobile and subject to only minor hydromorphological adjustments (Corbonnois et al., 2016). These types of rivers, however, are a key area of concern from an ecological and river management perspective, and the role played by lateral erosion in their functioning still needs to be better understood. This is especially true in a

periurban context, where catchments are often subject to recent land use changes related to rapid urbanisation, leading to noticeable hydromorphological changes in the channel (Chin, 2006; Navratil et al., 2012; Braud et al., 2013).

One of the reasons why bank erosion of low energy rivers has still been largely neglected is probably related to the difficulty of assessing weak and spatially discontinuous lateral erosion. However, a range of new remote-sensing techniques allow weak topographical adjustments that were hardly noticeable using traditional techniques to be measured and quantified (Tarolli, 2014). Among these new methods are techniques based on Photo-Electronic Erosion Pin (PEEP) sensors (Lawler, 1991, 1993, 2008), Laser Scanners (TLS) (Picco et al., 2013), aerial Light Detection and Ranging (LIDAR) (Cavalli et Tarolli, 2011), High Resolution GPS and Structure-from-Motion Photogrammetry (Carbonneau et al., 2003; Heritage and Hetherington, 2007; Alho et al., 2009; Notebaert et al., 2009; Brasington, 2010; Höfle and Rutzinger, 2011; Hohenthal et al., 2011; Westoby et al., 2012; Fonstad et al., 2013; Dietrich, 2014). However, some of these high-functioning techniques are still difficult to apply in small lowland rivers because of the limited locations, rough topography and afforestation in the bottoms of valleys (Bird et al., 2010).

Nevertheless, two methods seem better adapted to this particular topographical context: (i) erosion pin surveys (a well-known technique) and (ii) Structure-from-Motion Photogrammetry, a method developed over recent decades.

The principal aims of this paper are: (i) to hydromorphologically characterize and quantify the bank erosion of a small periurban river; i.e. measure the bank erosion, and identify the determining factors that control bank erosion in this kind of low energy river (bank protection, hydrological conditions and geological context, other local factors); (ii) to technically assess two viable methods that are well-adapted to the difficult field conditions and are user-friendly (inexpensive and easy to use): erosion pins and Structure-from-Motion Photogrammetry. Finally, this paper will be an opportunity to compare reach-scale flux estimates based on these two complementary techniques, and validate them.

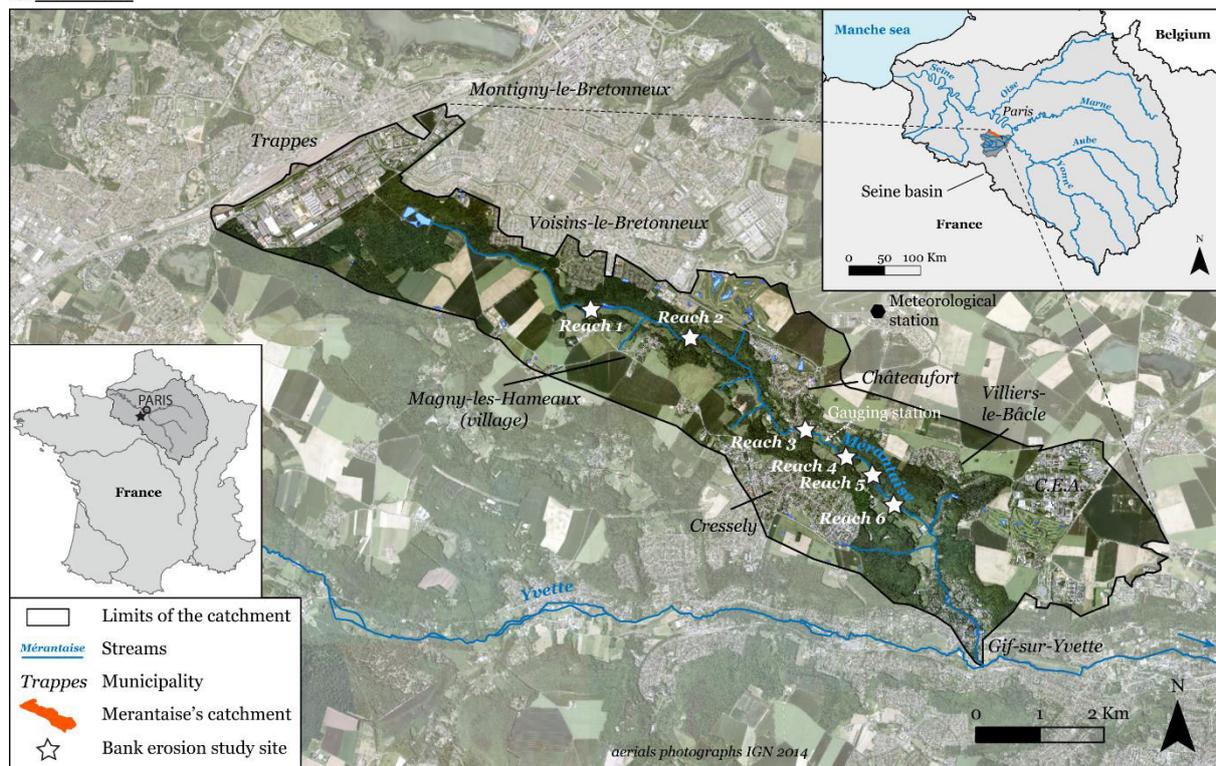
2. Study site

2.1. Location and description of the Merantaise River

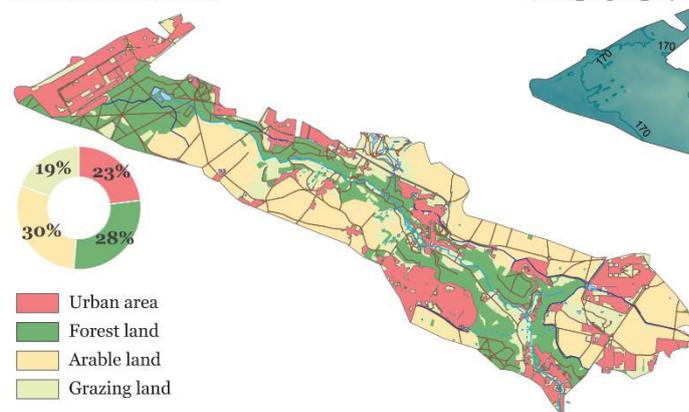
The Merantaise River is a small stream (13 km long) draining a catchment area of 36km² in the southern suburbs of the French city of Paris (Figure 7.39). The hydro-climatic context relies on a rather constant rainfall distribution throughout the year (mean annual precipitation of 700 mm/yr) and a mainly pluvial and seasonal contrasted hydrological regime. High flows occur in winter and flood flushes related to heavy rains or thunderstorms may occur from the autumn to spring seasons and occasionally in summer. The inter-annual mean discharge (2011-2014) registered at the gauging station (21 km²) (Figure 7.39) is around 0.05 m³/s, with a significant distinction between the winter mean discharge of

0.07 m³/s and the summer mean discharge of 0.03 m³/s. The maximum peak discharge measured since 2012 is 2.85 m³/s. Table 1 summarizes the hydrological and morphological characteristics of the river. It is a river with a moderate slope (0.7%), though rather high for the region, and the grain size of its bed ranges from sand to gravel (mean D₅₀= 19 mm). The Merantaise catchment is situated in the center of the Paris basin (Meso-Cenozoic sedimentary basin) and its valley is incised in the Fontainebleau sands (Middle Oligocene) which constitute an important part of the geological underground of the region and provide the sandy fraction of the river bed material. Gravels stem from the Montmorency cavernous silicified limestone (upper Oligocene) layer that stands directly above the thick Fontainebleau sand layer.

a. Location



b. Land use (2014)



c. Topography (5 m)

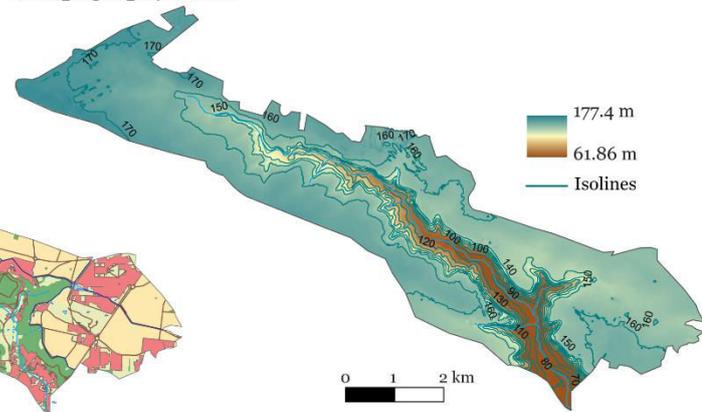


Figure 7.39 : Location of Merantaise catchment and bank erosion measurement reaches.

Table 1 : Morphological and hydrological characteristics of the Merintaise River. * Bankfull discharge (m³/s) extrapolated but not reached during the study

Morphological properties	
Mean width (m)	4
Mean bed slope (%)	0.7
Bed material grain size, D ₅₀ (mm)	19
Riverbank material grain size, D ₅₀ (µm)	19-141
Flow parameters (measured at the gauging station)	
Mean discharge (m ³ /s)	0.05
Estimated bankfull discharge (m ³ /s)	9.3*
Maximum of observed peak discharges, Q _{max} (m ³ /s)	2.8

The Merintaise River channel has been artificialized through historical engineering following several centuries of industrial and agricultural uses. Mills, dams, diversion gates, wash-houses and channelization of the river course have modified the stream morphodynamics and its hydrological regime for centuries. More recently, the Merintaise catchment has been subject to a new type of disturbance through the modification of its catchment's land use. Recent decades have indeed been marked by a rapid and massive urbanisation of the catchment. As shown in numerous studies in France (Bravard and Petit, 2000; Grosprêtre, 2011; Navratil et al., 2013) urban impervious surfaces have been multiplied by more than 10 in the last decades (e.g. from 3% to 32% on the Merintaise catchment between 1947 and 2015), decreasing the rain interception and infiltration rate and increasing flood occurrence and magnitude. The consequences of these changes on the river correspond to a general incision and a widening of the channel. Comparison of cross-sectional and longitudinal profiles from the 80's show an average incision of 50 cm and a widening up to 2 m over the past three decades. Vertical erosion is now limited, either because the bedrock outcrops (compact clay) have been cleared by incision and/or because the bed has been locally armoured. Lateral erosion seems, on the contrary, to be still quite active especially since vertical adjustments are impossible (Assani and Petit, 2004).

2.2. Location and characterization of the study reaches

Bank erosion was assessed at six reaches distributed along the 13 km of the river course (Figure 7.39 and Table 2). They were selected in order to have a wide range of erosion situations in terms of bank stability, state of erosion, height and slope of the banks and potential dynamics of the erosion processes (Wallemacq et al., 2011). Table 2 and Figure 7.40 summarize the characteristics of the six studied reaches: single-thread channels, with alluvial gravel/sand material, 1.20 to 2.40 m high and 2.5 to 8 m in width depending of the reaches, with different local hydromorphological contexts such as

riffles or pools, linear or concave banks and large or straight channels. Small but representative sections (4.5 to 10 m long) were generally considered because of the relative homogeneity of the local hydromorphological context at each study reach. A larger window of observation (25 m long) was considered for Reach 4 because of the importance of the active and differential erosion observed.

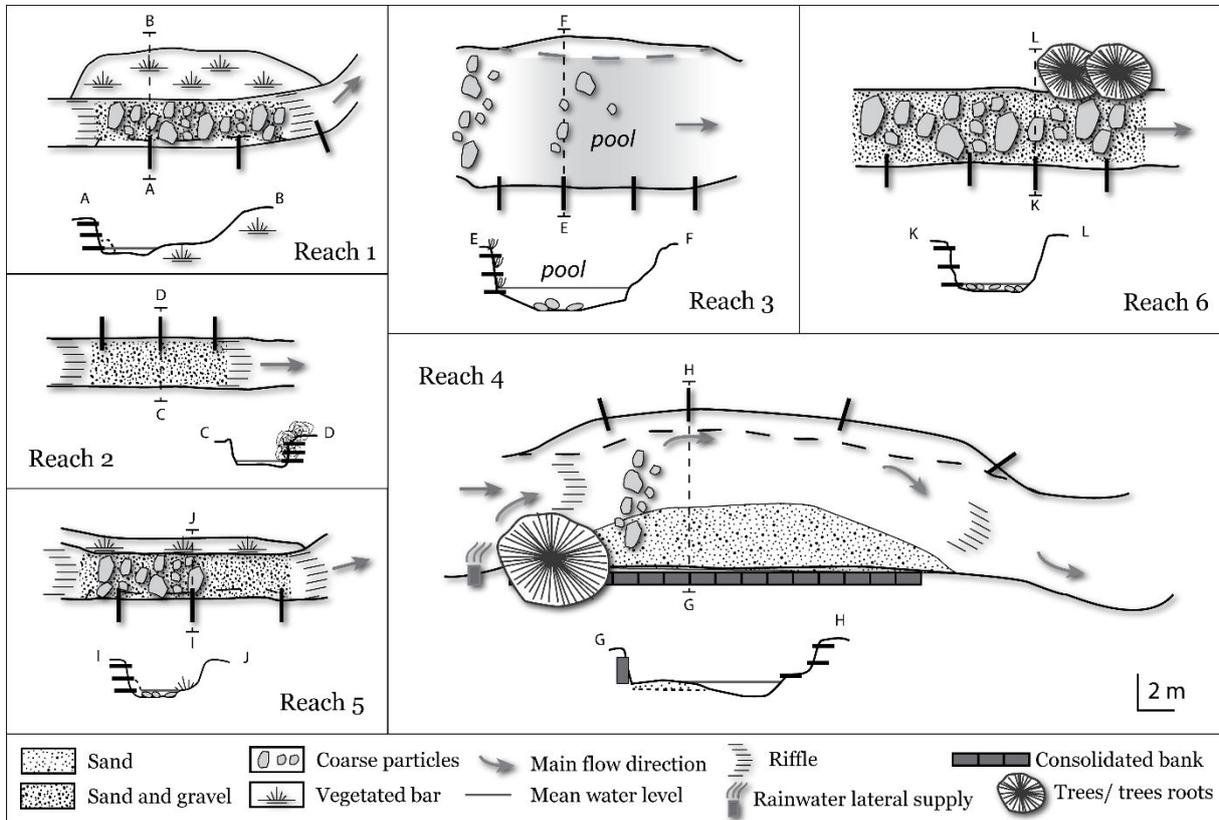


Figure 7.40 : Description of the characteristics and local context of the six studied reaches.

Table 2 : Characteristics of the six studied reaches distributed from upstream to downstream.

	Length (m)	Mean height (m)	Mean width (m)	Mean bank slope (°)	Number of lateral profiles	Bank side	Vegetation cover (%)	Composition of the bank	Local hydromorphological context	Channel slope (%)
Reach 1	10	1.70	2-3	80°	3	Right	5%	Sand (20%) Silt (72%) Clay (8%)	Riffle / D ₅₀ : 33 mm / concave bank	0.7
Reach 2	6	1.20	2.5	90°	3	Left	60%	Sand (38%) Silt (56%) Clay (6%)	Riffle / D ₅₀ : 21 mm / linear bank	0.3
Reach 3	10	2.40	8	85°	4	Right	40%	Sand (66%) Silt (30%) Clay (4%)	Pool / large bed / sand-silt- clay / concave bank	0.7
Reach 4	25.5	1.70	8	65°	4	Left	5%	Sand (66%) Silt (29%) Clay (5%)	Riffle / large bed / D ₅₀ : 8 mm / concave bank	0.4
Reach 5	10	1.80	2.5	80°	3	Right	10%	Sand (11%) Silt (78%) Clay (11%)	Riffle / D ₅₀ : 20 mm / linear bank	0.5
Reach 6	10	2.40	3.5	80°	4	Right	10%	Sand (29%) Silt (63%) Clay (8%)	Riffle / D ₅₀ : 48 mm / linear bank	0.6

The river banks are mainly composed of sand and silt (>90%), with clay making up only ten percent of the bank. The banks may be considered as homogenous over their vertical profiles as only very few stratigraphical variations were observed.

The Mérintaise banks are either entirely or partially covered by vegetation (grass, scrub or tree roots) or completely bare from the bottom to the top of the bank. 48.5% of the 13 km studied may be considered as having vegetated banks and 46.2% of banks are free of vegetation and potentially erodible. The remaining 5.3% consists of riverbank protections preventing bank erosion. As an initial approach the vegetated reaches were considered as stable and the bare reaches were considered as potentially erodible and thus dynamic. Moreover, some features, such as failed bank materials or overhanging vegetation cover gave indications of the lateral erosion intensity. Four out of the six selected reaches (1, 4, 5 and 6) were almost entirely free of vegetation and thus potentially dynamic. Only reaches 2 and 3 were highly vegetated, with respectively 60% and 40% vegetation cover, suggesting a weaker erodibility of the bank. We chose to equip two sites with many recent erosion scars (reaches 1 and 4), two moderately scarred reaches (5 and 6), one poorly marked reach (3) and one reach with no visible erosion marks (reach 2)

3. Materials and methods

The aim of this paper is to characterise and quantify the bank erosion of a small low energy river. The river in question is generally subject to weak and discontinuous erosion that is difficult to assess (Corbonnois et al., 2016). Two main categories of methods to measure bank erosion (at the front of the bank) are usually identified: on the one hand methods which record punctual information, such as erosion pins surveys and PEEP (Photo-Electric Erosion Pins) (Lawler, 1991, 1992, 2008); on the other hand, methods which continuously record data such as Structure-from-Motion Photogrammetry (Westoby et al., 2012; Fonstad et al., 2013; Dietrich, 2014) or Terrestrial Laser Scans (TLS) (Picco et al., 2013)

3.1. Erosion pin surveys

The lateral mobility of the bank on the Mérintaise River was monitored with the widely-used erosion pins technique (e.g. Wolman, 1959; Slaymaker, 1972; Hill, 1973; Thorne and Lewin, 1979; Thorne and Tovey, 1981; Hooke, 1979, 1980; Gardiner, 1983; Hagerty et al, 1983; Murgatryod and Ternan, 1983; Lawler, 1986, 1997, 1999; Ashbridge, 1995; Stott, 1997, 1999; Couper and Maddock, 2001; Luppi et al., 2009; Wallemacq et al., 2011; Henshaw et al., 2012). Though Lawler (1993) recommended the use of 0.25 or 0.5 m long pins in his comprehensive review of the advantages and disadvantages of the method, we chose to insert metal rods of 1m long and 8 mm in diameter into the bank. Couper and Maddock (2001) stated that short pins could be lost through erosion when longer ones

may contribute to the stabilization of soil blocks. But in our case, knowing the erosion potential of the Merantaise River through prior field observations, using 1 m long metal rods seemed to be the most suitable option (Hooke, 1979). Depending on the length of the reach, between 9 and 12 pins were set down on each site along 3 or 4 vertical profiles, placed 2 to 3 m apart. The pins were ‘benchmarks’ against which bank erosion could be measured (Haigh, 1977; Lawler, 1978, Couper et al., 2002). Each vertical profile contained 3 pins, in order to monitor the top (TB), the middle (MB) and the bottom (BB) of the bank. As demonstrated by numerous authors, these three parts of the bank do not necessarily evolve simultaneously and may respond to different erosion processes (Darby et al., 2007; Hamel et al., 2013; Luppi et al., 2009). For instance, the roots of floodplain vegetation generally ensure protection against erosion of the top of the bank (Laubel et al., 2003; Wallemacq et al., 2011); the top and the middle parts of the bank are subject to greater weathering, weakening and mass-wasting; and the bottom part is the one that is directly concerned by fluvial erosion.

Bank retreat was assessed by measuring the length of the pins exposed beyond the bank at frequent intervals and after every flood event (Lawler et al., 1997). The measurements were considered as morphological activity from 1 cm, in order to exclude a potential error due to the readings of the pins. In the most dynamic banks, the pins had to be pushed back into the bank when it was exposed by more than 50 cm (Stott, 1997).

It should be noted that when the bank retreat measurement was very small, we observed that it did not always correspond to effective erosion but rather to slight and very local scouring in the immediate vicinity of the erosion pins, already identified as “pin craters” by Lawler (1993) (Stott, 1997). The survey of the erosion pins lasted 15 months, from September 2013 to December 2014, for reaches 1, 2, 3, 5 and 6; and 18 months, from June 2013 to December 2014 for reach 4. All pins were surveyed on 31 occasions (35 for R4), which represented more than 2000 individual pin readings.

3.2. Structure-from-Motion photogrammetry survey (SfM)

The second method used for the bank erosion study is Structure-from-Motion Photogrammetry (SfM). This survey technique permits a continuous and greater surface observation and quantification of riverbank erosion, according to the local context. It has only been used for the modelling survey of reach 4, as a complementary method to erosion pins. Bank erosion in reach 4 by SfM was monitored over 18 months, from June 2013 to December 2014.

The Structure-from-Motion Photogrammetry method is a photogrammetric methodology for collecting low-cost, high spatial resolution, three-dimensional data for topographic or surface modelling, allowing the generation of 3D point clouds from randomly acquired photosets (Förstner, 1986; Harris and Stephens, 1988; Lowe, 1999, 2004; Javernick et al., 2014). Considering the number of SfM papers that have been published (Westoby et al., 2012; Dietrich, 2014, 2016; Micheletti et al., 2015; Prosdocimi et al., 2015; Marteau et al., 2017), this technique seems to be becoming more popular.

For image acquisition, the bank was cleared of non-fixed vegetation (dead leaves and hanging roots). Approximately ten Ground Control Points (GCPs) (survey marking nails) were then randomly positioned on the bank and surveyed with a Trimble S6 total station operated on a local coordinate system (Figure 7.41.A). Due to the bank instability (mass failure and fluvial erosion), the survey nails were systematically removed after each SfM campaign and repositioned for the next one. The total station was always repositioned at the exact same place and its location was verified before and after each fieldwork measurement, using control points placed on fixed features in the studied area (total station error was systematically < 1 cm at each SfM campaign). Finally, a large set of overlapping oblique photographs (around one hundred) taken with a Canon EOS 1000D was collected. They provided images with a 70 % to 80 % side overlap. The photographs were taken approximately 2 m to 6 m from the bank, predominantly opposite and at an angle to the target. The set of images was then processed using the VisualSfM free software (Changchang Wu, 2007, 2011; Changchang et al., 2011), that gathers photographs from features present in multiple images despite the changes in viewpoints, scales or settings, by running the Scale Invariant Feature Transform (SIFT) algorithm from Lowe (1999, 2004) (Snavely, 2008; Westoby et al., 2012) (Figure 7.41.B). The point-cloud obtained is then downloaded from VisualSfM and run on CloudCompare v.2.5.5.2 software (Girardeau-Montaut, 2014). Given the small study area, extraneous points that were clearly errors were manually removed from the point-cloud (for example, the top vegetated part of the bank or the bottom part of the bank in the water, i.e. 10 to 20 cm depending on the reaches) (Prosdocimi et al., 2015). The point cloud was then georeferenced in our local coordinate system with the GCPs previously surveyed on the field. We verified the georeferencing of the point clouds in CloudCompare, comparing the positioning of the GCPs to the values of GCP surveying with the total station. RMSE errors of the different SfM campaigns are compiled in Table 3. They never exceeded 8 mm.

Table 3 : The margin of error of georeferencing point clouds by Cloud Compare (verification of the proper referencing of the GPC in CloudCompare, compared to Total Station GPC values).

SfM Campaign	Margin of error of the GCP georeferencing (m)		
	X	Y	Z
12/06/2013	0.004	0.004	0.002
17/09/2013	0.003	0.003	0.004
13/11/2013	0.002	0.004	0.007
19/02/2014	0.004	0.005	0.002
29/04/2014	0.004	0.003	0.003
13/06/2014	0.005	0.006	0.002
28/07/2014	0.006	0.004	0.003

28/08/2014	0.006	0.004	0.003
19/11/2014	0.008	0.007	0.002
19/12/2014	0.007	0.006	0.001

At the end of the process, we obtained a series of point clouds corresponding to the 3D image of the bank, showing the bank situation at different dates. To quantify the changes between two dates, we used the Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2) method from Lague et al. (2013), implemented on CloudCompare v.2.5.5.2 software (Girardeau-Montaut, 2014) (Figure 7.41C). M3C2 is an algorithm that measures the distance between two point clouds assuming that they correspond to successive surveys of the same object. M3C2 generates a new point cloud with these point-cloud-to-point-cloud distances and provides a confidence interval for each distance measurement depending on the point cloud roughness and registration error (Lague et al., 2013). After M3C2 transformation, the new point cloud is processed in ArcGis 10.2 to generate a DEM in order to measure erosion and deposition volumes (Fonstad et al., 2013; Javernick et al., 2014; Rumsby et al., 2008; Wheaton et al., 2009).

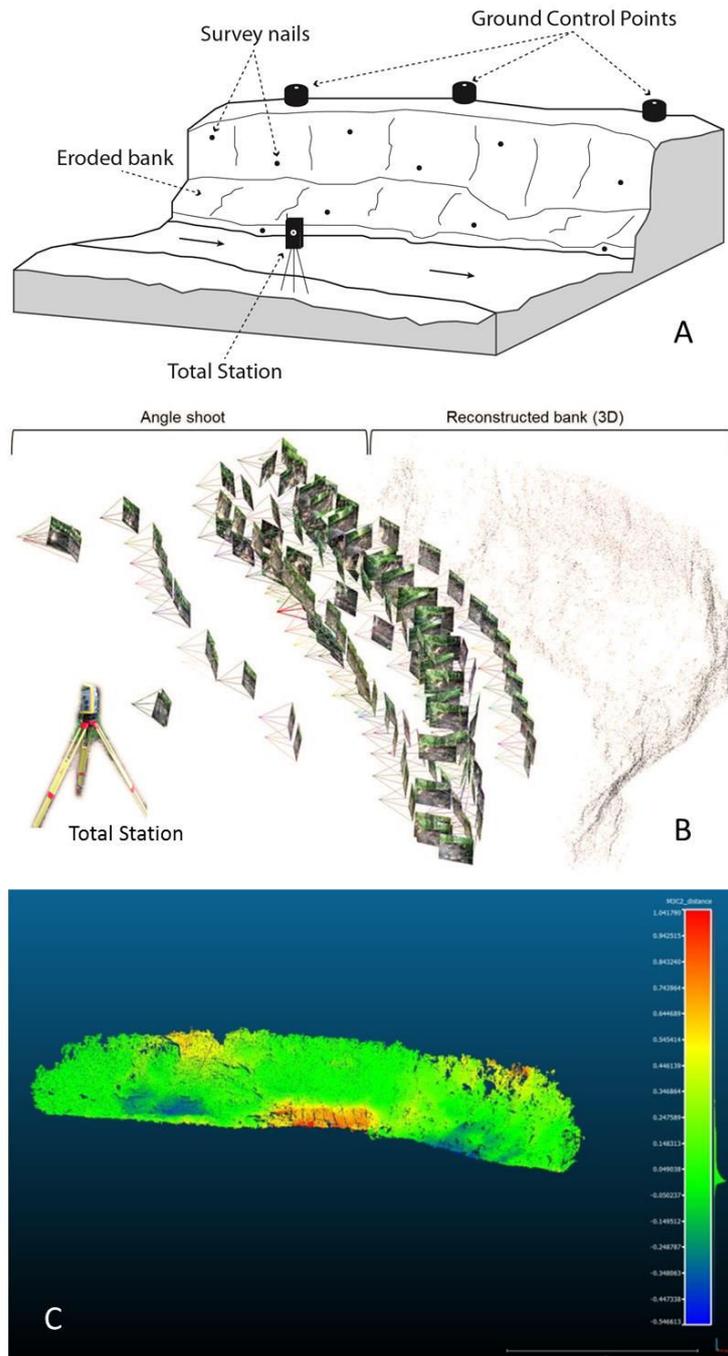


Figure 7.41: Structure-from-Motion Photogrammetry methodology used at Reach 4. A: diagram of the Structure-from-Motion photogrammetry survey; B: example of different angle shoots for photogrammetry survey, reconstruction of the Point Cloud by VisualSfM; C: example of comparison point cloud between two periods by CloudCompare, M3C2 plugin (Lague et al., 2013).

3.3. Discrepancy between Erosion pins and SfM Photogrammetry

This paper presents an opportunity to compare the two techniques used and verify the relevance of the widely used erosion pins method. Numerous studies try to validate and compare the SfM Photogrammetry technique to other high-resolution techniques used to characterised geomorphical changes, such as TLS (Prosdocimi et al., 2015; Smith and Vericat, 2015; Marteau et al., 2016) or LIDAR

(Corbonnois et al., 2016). But there is not yet a comparison and validation of SfM Photogrammetry and erosion pin monitoring. We chose therefore to test our results on reach 4, where pins and SfM were both used, to assess the accuracy of the pins to the high resolution results from SfM Photogrammetry and the proper georeferencing of the SfM point clouds. In a first approach, we compared the bank retreat values for a maximum of available common points (about fifty identifiable erosion pins on SfM point clouds for the nine monitoring campaigns) The average deviation was always lower than 3 cm with an average discrepancy was 0.5 cm (Figure 7.42).

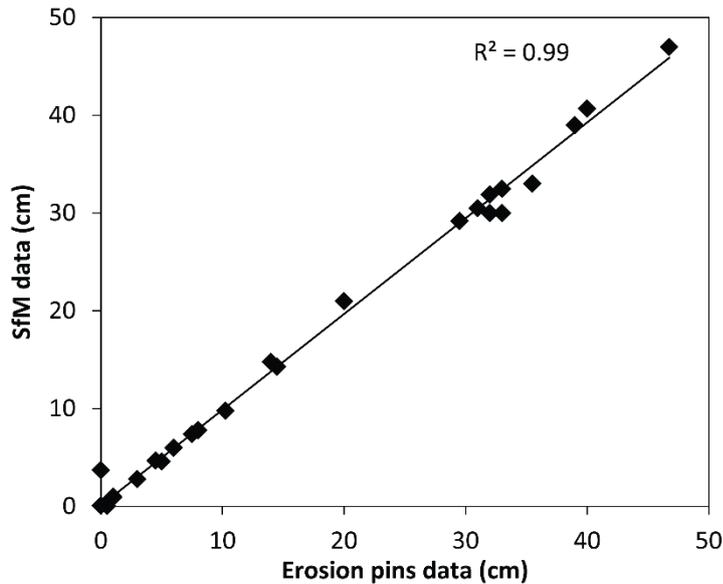


Figure 7.42 : Comparison of erosion values between erosion pins and SfM survey.

The eroded volume calculated from erosion pins (interpolated from bank retreat at each pin location) were then compared to that calculated with SfM Photogrammetry in a common window and for each period. The SfM layer was then considered as the reference. As a reminder, 12 pins were installed on an empirical basis on reach 4 on a grid of 0.50 m of vertical spacing and 2 m of horizontal spacing. Simulations of erosion pin grids were generated from the SfM (M3C2) point clouds in order to estimate the pins' density that best represent bank erosion retreat. Two types of grids were tested (symmetrical and random ones) in order to verify the potential interest of one or the other (Figure 7.43). The grids were generated from the semivariogram established on ArcGIS 10.2 associated with the interpolation (Kriging). Semivariogram shows indeed the maximum of variance of point clouds and allows to identify the maximum spacing between the erosion pins needed to take account the bank erosion variability. This spacing and half of this spacing were then used to generate the pins grids that were compared to the reference SfM points cloud.

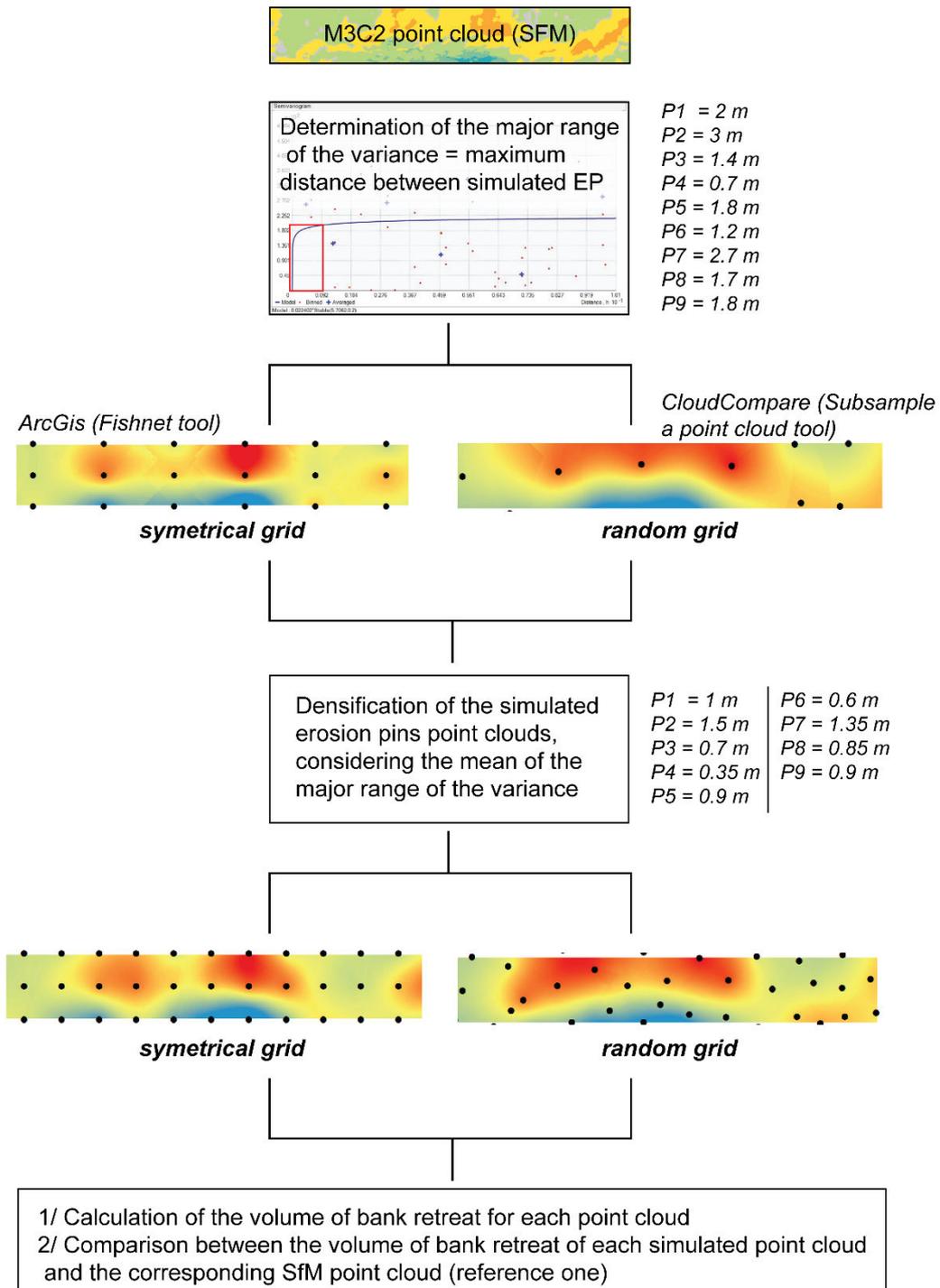


Figure 7.43 : Schematic illustration of the workflow for the construction of the point clouds needed for the comparison of the two methods.

3.3. Hydrological survey

During the 18 months of the survey, the hydrological and climatic conditions were monitored (Figure 7.44). The meteorological conditions (rainfall and temperature) were registered using the meteorological station at Toussus-le-Noble (located 2.5 km away from the study reach) (Figure 7.39). The water level was recorded at 15 min intervals using a water pressure sensor (mini Diver DI501 sensor by Schlumberger) installed between reaches 3 and 4 (Figure 7.39). Due to the relatively small size of the river, we consider the hydrological data at the gauging station to be representative of the entire length of the river course. Mean daily discharge was $0.04 - 0.05 \text{ m}^3/\text{s}$, while the maximum peak discharge measured during the period of investigation was $2.85 \text{ m}^3/\text{s}$. Fourteen peak discharges (higher than $0.115 \text{ m}^3/\text{s}$) occurred during the study period, mainly during autumn and winter (2013-2014). The water level never exceeded 60 cm during high flow, covering only the lower part of the banks in every study site. The bank full stage is indeed no longer attained due to the extent of incision. Three descriptors frequently used in the literature were considered in characterizing the hydrological context: peak discharge, the number of flood events and their duration (Wolman, 1959; Hooke, 1979; Knighton, 1973; Dépret et al., 2015). In this study, flood events were defined as events that exceeded the smallest peak discharge recorded (i.e. $0.115 \text{ m}^3/\text{s}$).

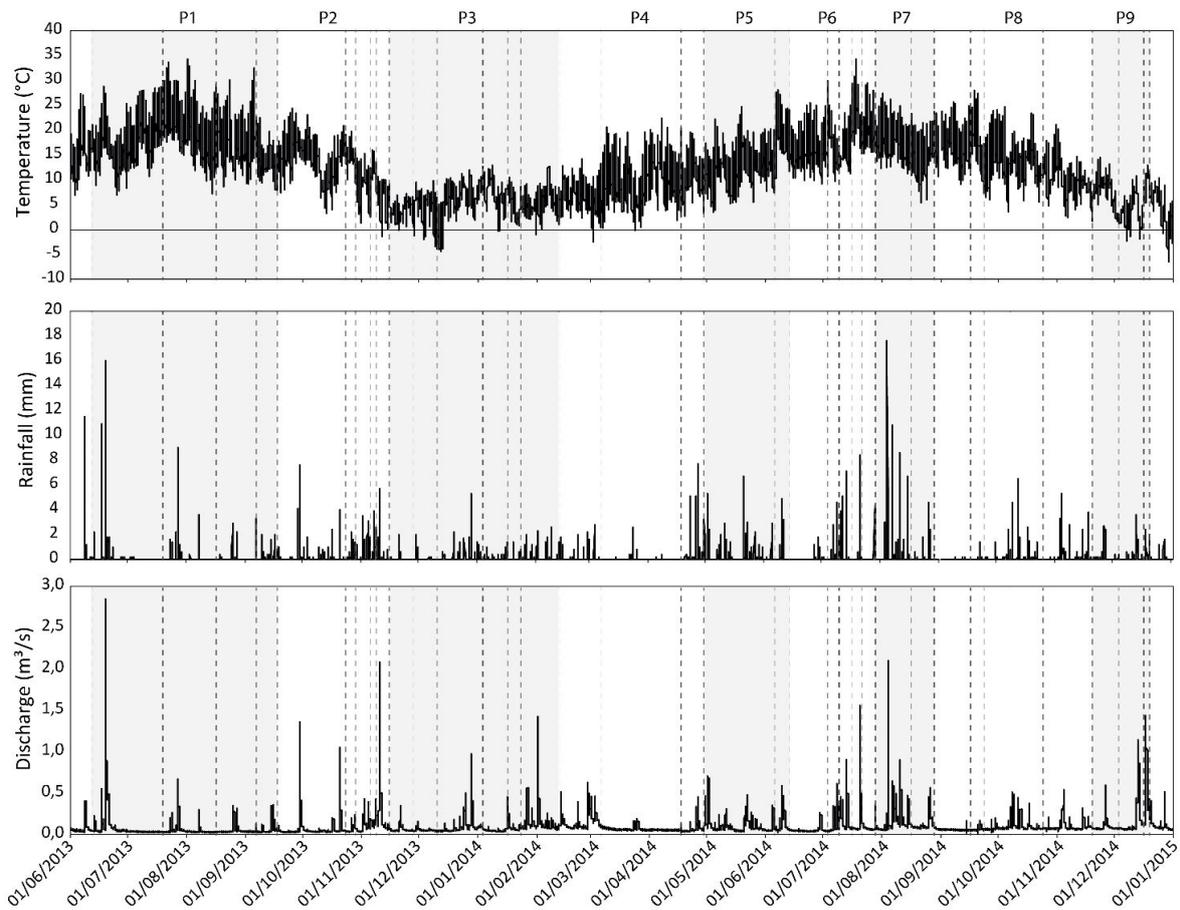


Figure 7.44 : Rainfall, temperature (air) and discharge over the study period. The dotted lines represent the erosion pin readings. The grey-white bands represent the 9 periods of the SfM Photogrammetry survey (P1 to P9).

4. Results

4.1. Differential erosion in bank removal assessed with the erosion pins

Erosion pin surveys allowed the morphological activity of the bank during each measurement period to be identified and measured, in terms of erosion and deposition, as well as spatial and temporal variations. 8.7 % of the erosion pins recorded a morphological activity. However this is a conservative estimate due to the lack of data on buried erosion pins. The majority of the values were positive and corresponded to bank retreat (91 % of the moving pins). But, during the 16 months of monitoring, 9 % of the morphological activity corresponded to deposition (negative values, i.e. a decrease in the length of pin exposed), at 3 out of the 6 reaches. These negative recordings interfere with the estimation and interpretation of the bank retreat (Couper et al., 2002). Stott (1999) recognized the implications of negative readings for subsequent data analysis, and identified three potential methods of dealing with this data: (1) include all negative readings in the calculation of mean erosion; (2) ignore all negatives and treat them as 'missing data'; (3) replace all negatives with zero. We chose to quantify the bank retreat in two different ways: (i) by ignoring the negative data (missing data) thus strictly considering the bank retreat (total retreat expressed in cm in Table 4) and (ii) by considering both positive and negative values for the characterisation of the morphological activity (rate expressed in cm/yr in Table 4) (Hooke, 1979; Lawler, 1986; Stott, 1997; Couper and Maddock, 2001; Henshaw et al., 2012).

Table 4 : Total bank retreat and morphological activity registered at each of the most dynamic profiles at each reach (from September 2013 to December 2014, for reaches 1, 2, 3, 5 and 6; from June 2013 to December 2014 for reach 4). n = number of readings. Total corresponds to the total retreat (excluding the negative readings). Rate corresponds to the morphological activity (considering both positive and negative readings).

*R4 = estimation *a minima* of erosion values, occulting deposition phases without available data (particularly occurred on BB). The two negative values measured were adjusted as absolute values (positive) in order to consider them as morphological activity

	R1 – profile 3		R2 – profile 1		R3 – profile 2		R4 – profile 3*		R5 – profile 3		R6 – profile 3	
	Total (cm)	Rate (cm/yr)	Total (cm)	Rate (cm/yr)	Total (cm)	Rate (cm/yr)	Total (cm)	Rate (cm/yr)	Total (cm)	Rate (cm/yr)	Total (cm)	Rate (cm/yr)
All pins												
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maximum	35.5	27.8	4	3.1	6	4.67	36.5	24	40	31	9	7
Mean	2.2	1.8	0.06	0.05	0.16	0.12	4	3	0.92	0.72	0.3	0.2
% readings with erosion	23 % (n = 74)		2 % (n = 96)		5.2 % (n = 96)		34 % (n = 73)* 24 % (n = 105)		14 % (n = 96)		5 % (n = 96)	
Top of the bank												
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maximum	35.5	27.8	0	0	0	0	35.5	23.3	40	31	0	0
Mean	2.2	1.8	0	0	0	0	2.4	1.6	1.25	0.95	0	0
% readings with erosion	16 % (n = 25)		0 % (n = 32)		0 % (n = 32)		20 % (n = 35)		3 % (n = 32)		0 % (n = 32)	
Middle of the bank												
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maximum	31.5	24.7	0	0	0	0	33	22	24	18.6	0	0
Mean	2.6	2.1	0	0	0	0	3	2	0.89	0.69	0	0
% readings with erosion	16 % (n = 25)		0 % (n = 32)		0 % (n = 32)		22 % (n = 17)* 11 % (n = 35)		12 % (n = 32)		0 % (n = 32)	
Bottom of the bank												
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maximum	19.5	15.3	4	3.1	6	4.67	36.5	24	7	5.3	9	7
Mean	2.4	1.8	0.2	0.16	0.5	0.36	7	5	0.63	0.49	0.8	0.7
% readings with erosion	36 % (n = 25)		6 % (n = 32)		16 % (n = 32)		70 % (n = 20)* 40 % (n = 35)		25 % (n = 32)		16 % (n = 32)	

During our field investigation, the negative readings generally occurred on the lower erosion pins when soil from the upper parts of the bank fell down. But it also happened sparingly in the upper part of the bank, probably caused by the expansion of the soil mass due to increased moisture (Henshaw et al., 2012), seepage processes (Samadi et al., 2013; Masoodi et al., 2018), or due to compaction of the soil by walkers along the bank.

Spatial variation in morphological activity shows a great heterogeneity when considering the cumulative activity over the 16 months of the survey (Figure 7.45). Effective erosion of the bank occurred in relation to 63 % of the erosion pins. 33 % of the 21 vertical profiles were subject to morphological activity on the 3 layers of the bank (bottom of the bed (BB), middle of the bed (MB) and top of the bed (TB)) whereas 67 % were subject to partial mobilisation of the bank. Six profiles (29 %) had two active layers and seven profiles (33 %) had only one active layer (mostly BB). Only one profile was completely inactive in terms of bank retreat (profile 2 at reach 2). The highest recorded morphological activity rate at an individual erosion pin location was 117 cm/yr (R4-P3-BB), while the minimum recorded morphological activity rate was below 1 cm/yr (mostly at TB and MB).

Three reaches (R1, R4 and R5) experienced a significant retreat of their banks with the rate of retreat ranging from 25 to more than 100 cm/yr (Figure 7). Every vertical profile was eroded in these reaches and the entire height of the bank retreated. The three other reaches (R2, R3 and R6) were less dynamic with low bank erosion and even the absence of erosion at the location of some erosion pins. Furthermore, fieldwork observations suggest that bank erosion recorded at the bottom layer at R2, R3 and R6 could result from the disruptive role of the metal rods hammered into the bank for the erosion pins survey (Barker et al., 1997; Henshaw et al., 2012). On these less dynamic reaches, one may moreover note the vertical heterogeneity of the erosion rate. The erosion occurred mainly at BB and TB when MB recorded no bank retreat.

On the six reaches, activity of the medium and upper part of the bank evolves rather conjointly, since a stepwise regression made between bank retreat at TB and MB shows a 90 % correlation. Conversely, the upper part of the bank is rather independent of the evolution of TB and MB. The bottom of the bank (BB) was clearly the most dynamic part in terms of the percentage of pins that recorded erosion.

The great heterogeneity of the bank erosion may also be examined through the total bank retreat and the morphological activity registered at the most active profiles of the 6 reaches (R1-P3, R2-P1, R3-P2, R4-P3, R5-P3 and R6-P3) (Table 4). Three out of six profiles registered significant bank erosion activity: R1-P3 (23%), R4-P3 (34%) and R5-P3 (14%). The three others (R2-P1, R3-P2 and R6-P3) experienced very weak morphological activity with a maxima of 5% of the readings recording erosion, a mean bank retreat below 0.8 cm and no activity on the middle and top of the bank.

The maximums of bank retreat may be considered as relatively important for this small low-energy stream, with 35 to 40 cm of material lost between two surveys of the pins (corresponding to a few weeks). However, when considering the mean values of bank retreat, this high erosion rate has to be weighted. When considering all reaches, the mean morphological activity between two surveys was indeed between 0.05 cm/yr (R2-P1) and 3.0 cm/yr (R4-P3).

The most dynamic profile was R4-P3, with 34 % of readings recording bank evolution (erosion and/or deposition). This high rate of morphological activity is still a conservative estimate because proper readings of the evolution of the bank along the pins were often complicated due to frequent depositions at the bank-toe (i.e. buried pins). Though very active, R4-P3 did not register the most important bank retreat (absolute values), which occurred at the top of the bank (TB) on R5-P3. There, 40 cm of bank were eroded in one go. However, this was the only movement of the bank observed during the entire survey (= 3% of morphological activity).

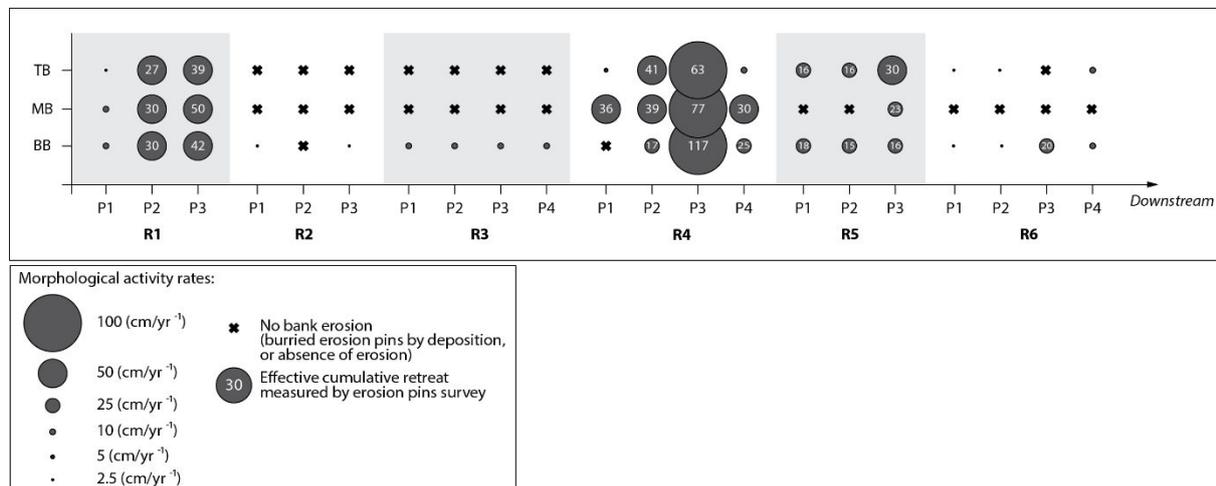


Figure 7.45 : Schema of the spatial variation in morphological activity rates (MAR) detected by erosion pins in the Merantaise River. The MAR data was calculated considering exclusively the effective bank retreat (cumulative retreat) detected by erosion pins after 16 month of survey (at December 2014).

4.2. The causal mechanisms of bank erosion

The causal mechanisms and hydrometeorological parameters potentially responsible for the bank erosion were examined through statistical analysis (regression and correlation tests). All pins at all reaches were considered in a first stage. The particularities of the different reaches were then examined reach by reach. Finally, regarding the small morphological activity at certain sites, analyses were focused on the two most dynamic reaches.

Three bank erosion variables were compared with independent variables by Spearman or Pearson correlation analysis and simple regressions: the effective bank retreat measured for each period and each reach at TB (=E_{TB}) and BB (=E_{BB}) and the maximum effective bank retreat registered at the profiles, all levels combined (=E_{max}). MB was not considered because it was too correlated with TB. The erosion

bank values were \log_e -transformed prior to statistical analysis when the corresponding data set distributions were not normal. Pearson correlation coefficients were then calculated. If the data distribution did not remain normal after the transformation, the Spearman correlation coefficients were calculated. Simple and multiple regressions were also made in order to propose causal relationships between the variables. The latter was established only on the data set gathering R1 and R4 data and using only significant variables (i.e. p -value < 0.05) (Laubel et al., 2003). As depositions were not included in the quantitative analysis, the results presented consider only effective erosion data.

A selection of factors likely to control erosion are listed in table 5 and have been chosen on the basis of those commonly used in literature (Wolman, 1959; Knighton, 1973; Hooke, 1979; Couper and Maddock, 2001; Couper, 2003; Julian and Torres, 2006; Henshaw et al., 2012; Dépret et al., 2015) .

Though commonly considered as erosion factors, seepage, freeze-thaw and moisture of the soil have not been considered in this study (Wolman, 1959; Twidale, 1964 ; Hooke, 1979; Prosser et al., 2000 ; Couper and Maddock, 2001; Hamel et al., 2013; Masoodi et al, 2018). One may indeed consider that no significant freezing conditions occurred during the study. Wallemacq et al. (2011) suggested that the action of freezing on erosion (as a preparatory factor) requires temperatures below -5°C , over several consecutive nights, to be effective. During the 16 months of the survey, only 20 freezing days and nights were recorded (corresponding to 130 effective hours of freeze), rarely below -5°C (Figure 7.44). Besides, no evidence of needle ice on the banks, as described by Wallemacq et al. (2011), was noticed. Considering soil moisture and seepage erosion, it was unfortunately not possible to carry out direct measurements on the Merantaise River. This parameter was consequently approached through the precipitation descriptors (R_{sum} , R_{max} , R_{moy} , R_{int}) (Table 5).

Table 5 : Hydrometeorological indices used in bivariate analyses

Hydrological parameters	Q_{\max}	The maximum discharge value recorded during the period (= Magnitude) (m^3/s)
	Q_{vol}	Volume of water flowed during the period (m^3)
	$Q_{\text{moy_fl}}$	Mean discharge of floods recorded during the period (m^3/s)
	No_fl	Number of floods during the period (= Frequency) reported over the duration of the period.
	$\%_fl$	Percentage of high flow (%)
	D_fl	Duration of the floods (= Duration) (h)
Meteorological parameters	R_{sum}	Amount of rainfall during the period (mm)
	R_{max}	Maximum rainfall intensity recorded during the period (mm/h)
	R_{moy}	Mean rainfall recorded during the period (mm)
	R_{int}	Rainfall intensity during storm events (mm/h)
Morphological parameters	SCI	Silt and clay index (%) – silt and clay content of the bank
	Veg.Cov	Vegetation cover (%) of the bank

The morphological parameters (*Silt and Clay Index* and vegetation cover) were treated independently. They were measured for all of the profiles at each of the reaches, but only once at the beginning of the study. They were therefore the same for each period.

The Spearman (for all reaches) and Pearson (for R1 and R4) correlation coefficients between the bank retreat and the hydrometeorological control parameters are presented in Table 6 A and B, respectively.

(i) While considering all the reaches, the first table (Table 6 A.) shows the predominance of the fluvial parameters in controlling bank erosion. This is the mean discharge of floods registered during the considered period ($Q_{\text{moy_fl}}$) that is most correlated to bank erosion variables. It is particularly true for the top of the bank (TB) where $r = 0.81$ ($p\text{-value} < 0.0001$) was reached. The peak discharge (Q_{max}) also seems significantly correlated to bank erosion for the TB and the maximum erosion. In contrast, the subaerial processes illustrated by the meteorological parameters are poorly correlated to bank erosion. The spearman correlation coefficients are very low and the $p\text{-values}$ show no significant correlations.

(ii) While considering R1 and R4 (i.e. most active reaches), the same independent variables are highlighted and no additional correlations may be identified (Table 6.B.).

Table 6.A: Spearman correlation coefficient (r values) between the three dependent variables (bank erosion) and the hydrometeorological parameters for all the reaches (R1 to R6). *p-value* : (0.0001; 0.001; 0.01; 0.05) = (**;***;**,*)**

Characteristic	Independent variable	Bank erosion variable		
		E _{max} n = 115	E _{TB} n = 30	E _{BB} n = 96
Hydrological parameters	Q _{max}	0.21*	0.58****	0.10
	Q _{vol}	0.11	0.41*	0.00
	Q _{moy_fl}	0.47****	0.81****	0.29**
	No _{fl}	0.00	0.00	0.01
	% _{fl}	0.12	0.42*	0.04
	D _{fl}	0.1	0.30	0.03
Meteorological parameters	R _{sum}	0.03	0.03	0.03
	R _{max}	0.11	0.00	0.13
	R _{moy}	0.19*	0.41*	0.11
	R _{int}	0.17	0.17	0.18

Table 6.B: Pearson correlation coefficient (r values) between the three dependent variables (bank erosion) and the hydrometeorological parameters for the most dynamic reaches (R1 and R4). *p-value* : (0.0001; 0.001; 0.01; 0.05) = (**;***;**,*)**

Characteristic	Independent variable	Bank erosion variable		
		E _{max} n = 43	E _{TB} n = 13	E _{BB} n = 39
Hydrological parameters	Q _{max}	0.32*	0.48	0.22
	Q _{vol}	/	0.38	/
	Q _{moy_fl}	0.58****	0.77***	0.42**
	No _{fl}	-0.22	-0.09	/
	% _{fl}	0.09	0.29	-0.05
	D _{fl}	/	0.16	/
Meteorological parameters	R _{sum}	/	0.13	0.04
	R _{max}	/	-0.09	/
	R _{moy}	0.13	0.34	0.04
	R _{int}	0.2	0.11	/

The analysis of erosion processes reach by reach also showed the same trends: for example for R1, $Q_{\text{moy_fl}}$ was the only significant variable with an r value of 0.72 with E_{max} ($n = 23$) and 0.57 with E_{BB} ($n = 21$). It should, however, be noted that some good correlations appear at R4 between E_{max} and all hydrological parameters (Q_{max} : $r = 0.62$, $p\text{-value} = 0.0002$; Q_{vol} : $r = 0.7$, $p\text{-value} < 0.0001$; $Q_{\text{moy_fl}}$: $r = 0.64$, $p\text{-value} = 0.0002$; and D_{fl} : $r = 0.67$, $p\text{-value} < 0.0001$); with a maximum of $r = 0.82$ ($p\text{-value} < 0.0001$) observed for $Q_{\text{moy_fl}}$ at the top of the bank.

Finally, simple regression analysis was used considering all reaches combined (R1 to R6) and the two most dynamic reaches (R1 and R4) (Figure 7.46). Even if the coefficients of determination (R^2) are low, some of them show relatively good relationships between the two identified variables. It is once again $Q_{\text{moy_fl}}$ that best explains the bank erosion and it is at the top of the bank that the model best fits the data ($R^2 = 0.6$ for all the reaches, as well as R1 and R4).

All these statistical analyses converge and indicate that for all reaches only two correlated independent variables clearly play a key role in bank erosion: mean discharge of floods ($Q_{\text{moy_fl}}$) and peak discharges (Q_{max}). Meteorological variables seem very poorly correlated to bank retreat. Some of the other hydrological parameters are more or less correlated to erosion, but if considered alone, the role they play is weak. The statistical analysis finally shows that these correlations exist for the top and bottom of the bank but are clearly stronger when considering the upper part of the bank.

Furthermore, the correlation (Pearson) with the morphological parameters (SCI and bank vegetation cover) and the bank erosion were made considering the amount of the bank retreat (TB + MB and BB) and the same SCI and bank vegetation cover for the 15 months of survey. It then appeared that the SCI and the bank erosion were poorly correlated ($r^2 = 0.21$, 0.03 and 0.12), when the bank vegetation cover was better correlated to erosion bank on TB and MB ($r^2 = 0.46$ and 0.47, respectively). The BB was less concerned by vegetation cover and more intensively scoured by fluvial erosion. Thus, the *silt and clay index* (i.e. the ratio between the volume of particles smaller than 74 μm and the amount of the bank sample, Schumm, 1977) which determined the cohesiveness of the bank and the potential vulnerability to the freeze-thaw processes (Couper, 2003; Grab, 2004; Wallemacq et al., 2011), is included between 34% and 89% (Table 2). The high level of the SCI and the vegetation cover can explain the low vulnerability to the subaerial processes of the Merantaise banks.

All this suggests that if, predictably, peak discharge is key, the duration of high flow is at least as important. In other words, this indicates that bank retreat on the Merantaise does not usually work in sudden pulses but rather as a semi-continuous process during high flow.

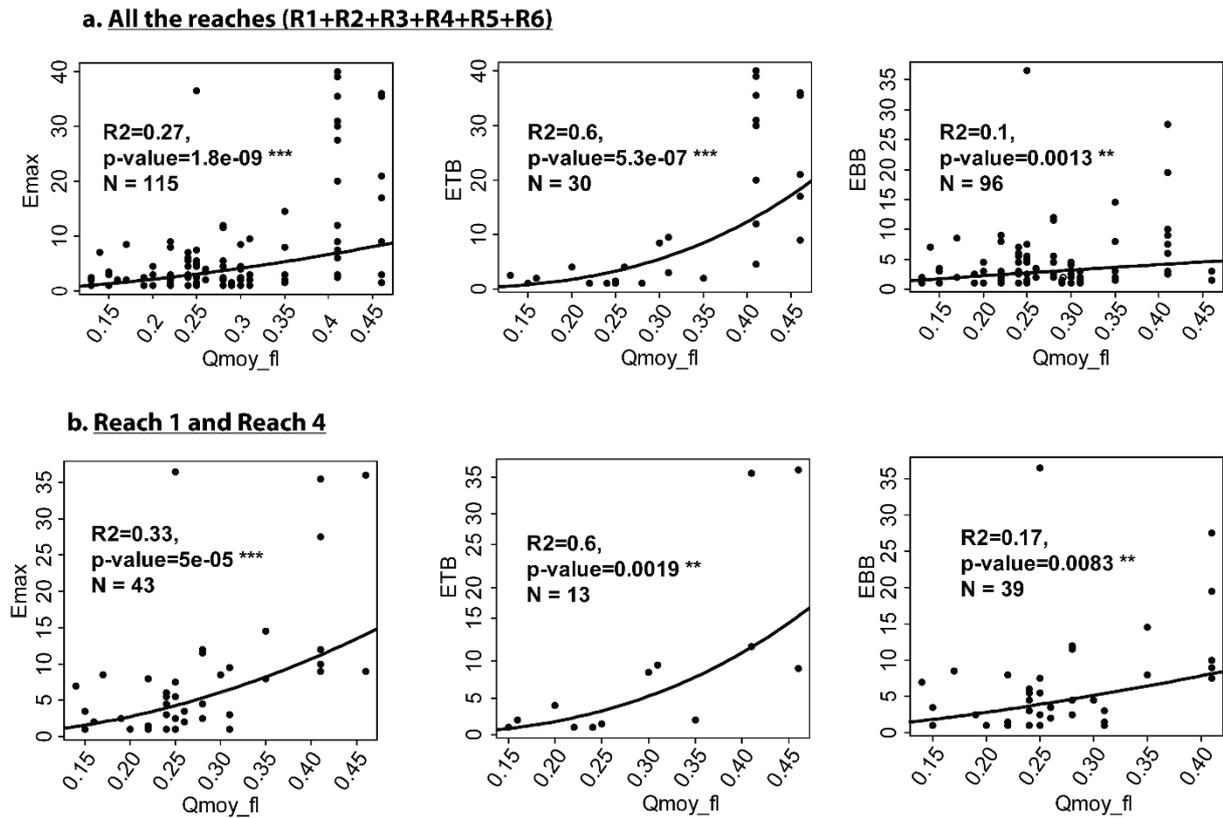


Figure 7.46 : Relationship between the different erosion bank variables and the most significant independent variable, Q_{moy_fl} .

4.3. Differential erosion in bank removal assessed with SfM Photogrammetry

SfM Photogrammetry allows a finer description of bank retreat and was thus used at reach 4 in order to better understand the processes involved in the morphological dynamic of the bank (Figure 7.47). The evolution of this reach has been divided into 9 periods that correspond to the dates between SfM surveys. Figure 7.47.A presents the evolution of the bank for each of the nine periods and Figure 7.47.B shows the cross-sectional evolution in the central location of the bank (rectangle on Figure 7.47.A.), where the dynamic was maximal.

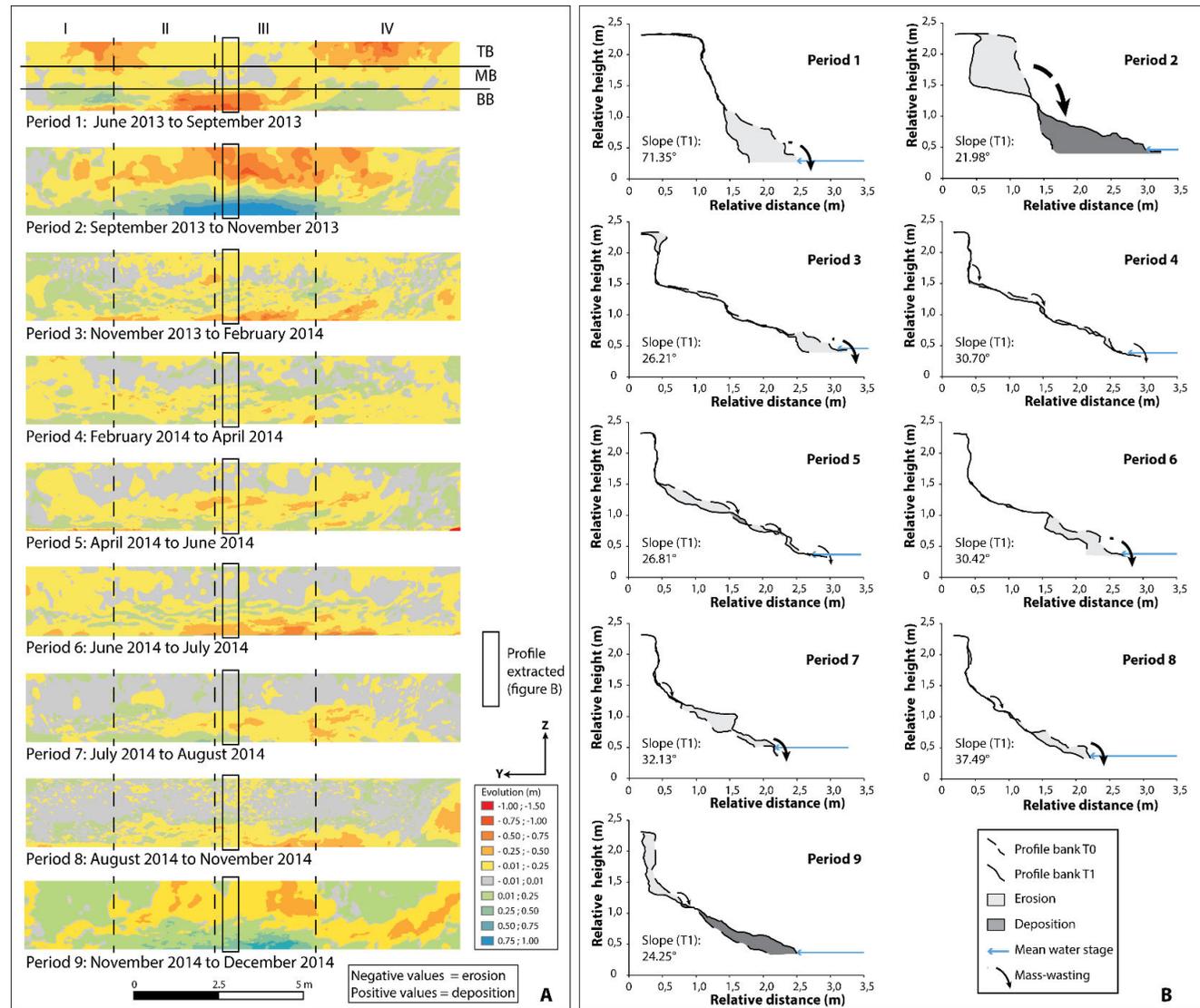


Figure 7.47 : Evolution (m) of the eroded bank in R4 over 9 periods, with regard to the hydrological conditions. Data are from Structure-from-Motion treatment. A: Erosion and deposition for each period. Four zones (I, II, III, IV) were defined vertically and three layers (T=top, M=middle, and B=bottom) horizontally. B: Profiles of the middle part of the eroded bank.

The largest peak flow recorded during this study occurred during the first period, on the 19th of June 2013, with a discharge of 2.84m³/s (Figure 7.44). It generated severe erosion on BB in zones II and III (~150cm of bank retreat) and on TB in zones I and IV. 20 to 50 cm of collapsed sediment from the top of the bank was deposited at the bottom of the bank in zones I and IV. The bank material eroded in BB was evacuated by the flow mostly during the peak flow.

The greatest episode of bank erosion occurred during the second period, that may be related to the second highest flood event (2.08 m³/s) that occurred on the 9th and 10th of November 2013. Erosion occurred mainly in zones II and III with 35 to 80 cm of sediment eroded from the middle and the top of the bank. The failed bank materials were deposited at the bank-toe forming a berm wider than 140 cm. Figure 10 provides complementary observations based on the erosion pins survey. One may see that BB actually experienced a continuous retreat throughout period 2, increasing the height and slope of the bank. Just before the flood event on the 9-10th of November, the bank had a sub-vertical face allowing undercutting that played the role of triggering cantilever bank failure. The collapsed bank material was mostly deposited on BB and, to a lesser extent, on MB.

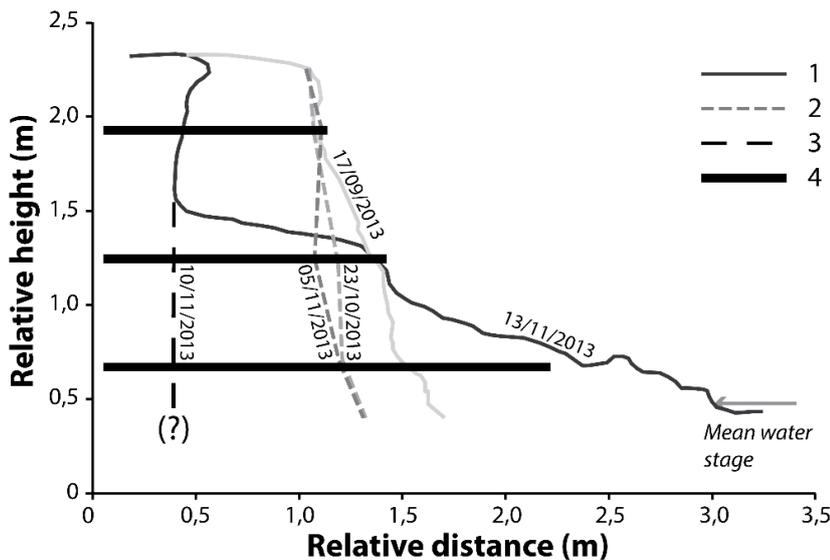


Figure 7.48 : Evolution of the bank from September 17, 2013, to November 13, 2013 (period 2), Zone III. 1.: data from SfM; 2.: data from erosion pins; 3.: hypothetical bank retreat during the peak discharge (2.08 m³/s); 4.: Position of the erosion pins (implemented metal rods).

As observed by Nasermoaddeli and Pasche (2008), the berm formed by riverbank failure in section II and III then constituted a defence for the upper layers (MB and TB) by decreasing the bank slope and stabilizing the bank. During period 3, erosion was therefore very limited. Despite several significant peak flows (0.98 m³/s and 1.43 m³/s) only the bottom layer (BB), in zones III and IV, was slightly eroded. The flows slowly undercut the unconsolidated material collapsed during period 2. On average over period 3, the bank-toe retreated by 10 to 25 cm (with a maximum of 50 cm).

During the following periods (4 and 5) the hydrograph shows very weak water level rises. Only slight bank face changes occurred. Then, the bank-toe and the entire surface of the bank were eroded. The hydrograph (Figure 7.44) suggests that fluvial processes played a minor role during this period, and that aerial processes (rain, frost, etc.) are more likely to have been responsible for those slight morphological adjustments. The most significant changes appeared on the middle layer (MB). This corresponds to mass failures such as slides and slumps of the material towards the bottom layer. It mainly occurred in zones II, III and IV with 20 to 35 cm of material sliding to the bottom layer and a maximum of 50 cm on section IV.

Period 6 and period 7 are marked by a return of high flows ($0.90\text{m}^3/\text{s}$, $1.55\text{ m}^3/\text{s}$, $2.08\text{m}^3/\text{s}$) and a significant retreat of the bottom of the bank especially in the downstream part of the reach (zones III and IV). A cumulative erosion of more than 150 cm was recorded, most of which concerned MB and BB. The top of the bank essentially remained stable from February 2014 (period 3).

This evolution continued until November 2014 (period 8). An erosion retreat of 40 to 50 cm was calculated in zones IIIB and IVB, leaving a cutting zone at the bottom of the bank. For the first time since the summer of 2013, significant erosion also occurred on the most downstream part of the reach (zone IV). Despite the lack of significant peak flow ($<0.5\text{m}^3/\text{s}$) but due to the erosion of the berm protecting the bank immediately upstream (zones II and III), this section was more exposed to fluvial erosion. Moreover the bank here was steeper and thus more sensitive to erosion. An average 30 cm retreat was measured.

The last period (9), from November to December 2014, corresponds to a new cycle of mobilisation of the bank material, as observed in November 2013 (period 2) but with lower intensity. The top and middle layers were eroded, especially on zones II and III and on the downstream section of zone IV. On one hand a maximum of 45 cm was eroded, for an average retreat of 30 cm. On the other hand a maximum accumulation of 75 cm occurred for an average deposition of 50 cm. In zone IV, the deposits at the bottom layer were quickly evacuated, as they faced the direction of flow.

Finally, one may say that bank erosion on reach 4 may be described as a cycle mainly correlated to the hydrograph (Figure 7.49). At first, the base of the bank is destabilized by high flows generating the removal of a large amount of material from the bottom and middle part of the bank. The top of the bank is then exposed and weakened and may drop off or slump. The failed material deposits at the bank-toe and forms a berm of unconsolidated sediment that prevents any bank retreat. It is then progressively evacuated by moderate water rises. Concomitantly, bank adjustments occur at the top and middle part of the bank, mostly due to subaerial processes. Once the berm has been evacuated and the bank has recovered a subvertical posture, exposing its entire height to high flow, the cycle restarts and the bank retreats once again.

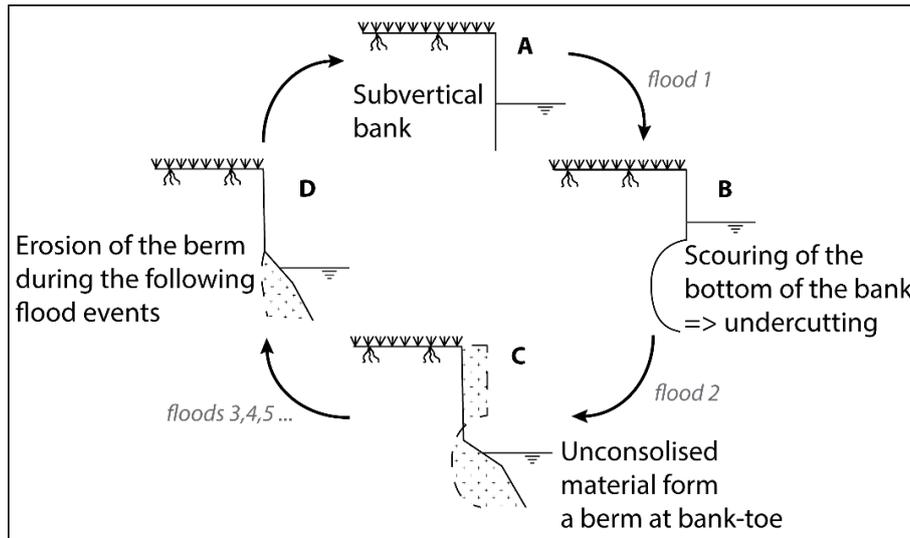


Figure 7.49: Theoretical schema of the cycle of erosion evolution (after Nasermoaddeli and Pasche, 2008, modified).

4.4. Comparison between Erosion pins and SfM Photogrammetry

One aim of this paper is to propose a review of the discrepancy in resolution of the two methods used. If the pins allow several reaches to be easily studied due to the simplicity of implementation and surveying, SfM photogrammetry allows a finer analysis and reduces the amount of bias. Even if the erosion pins are a proven means of bank retreat measurement, their use is limited when eroded volumes or sediment budget have to be calculated. The number of pins and their positioning have been discussed in the literature (Lawler, 1993; Couper et al., 2002; Laubel et al., 2003), but recommendations rely on an empirical approach and no papers have yet proposed any quantification of the accuracy of the technique.

First, Figure 7.50 shows that the density of pins we chose to install gave a relatively good appreciation of the effective volume of eroded sediment but only when the bank retreat was low (i.e. for period 4: $\Delta=0.16 \text{ m}^3$ and period 5: $\Delta=0.12 \text{ m}^3$). When morphological activity was high (i.e. during period 1 and 2), the number of pins and their location were much less efficient in correctly quantifying the volume of eroded bank. Pins underestimated the eroded volume by up to twice the actual eroded volume: for period 1, the erosion pins, for instance, provided an estimation of 1.04 m^3 of bank erosion, while SfM estimated 2.38 m^3 of eroded material. As a reminder, the reach 4 measured 25.5 m in length (Table 2).

Secondly, Figure 7.50 shows that on reach 4, a rather good estimation of the eroded volume may be reached with about thirty pins placed 1.5 m apart horizontally and 0.8 m apart vertically. This result is valid for the nine periods studied and is thus independent of the magnitude of erosion activity. Moreover, it appears that the symmetrical implantation scheme is more efficient than the random one. The minimum distance of 1.5 m between the rods symmetrically inserted allowed a perfect correlation

between the volume of bank retreat estimated by SfM and that estimated by a simulated erosion pin grid. Meanwhile, for the same minimum distance of 1.5 m between the rods with a random grid, there is a ratio of 1.4.

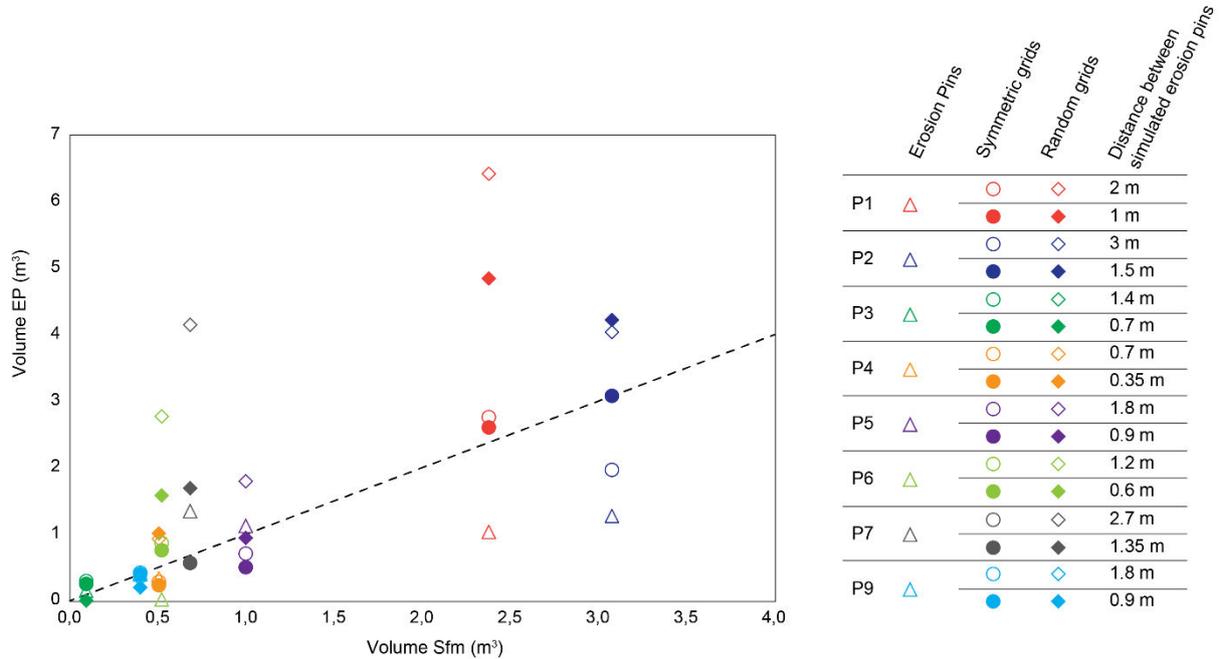


Figure 7.50: Relationship between the eroded volume (positive values) of the SfM Photogrammetry and the erosion pins, in a common window and for each period. The simulations with P8 were too poor to be taken account.

5. Discussion

5.1. The accuracy of erosion pins

The results of these simple tests of comparison between the two methods of erosion assessment implemented on reach 4 clearly show that if erosion pins provide accurate results on bank retreat, the pins have to be considered with caution with regard to the quantification of the eroded surface or volume. Some complementary tests made on different types of river banks with different erosion patterns is still needed to increase the precision of our results. But it may already be stated that, in these small energy streams, if pins provide a rather good erosion rate at the exact location of the pins, extrapolations between them are hazardous. Our results suggest moreover that the implementation of the pins following a symmetric grid is the most efficient and that the multiplication of the erosion pins does not seem to improve the representativeness of the network. This goes against what may be seen in most of the studies using erosion pins. Up to now, existing literature was indeed unable to show an ideal model of number and distribution of erosion pins for all river systems (Lawler, 1993; Couper et al., 2002). In most studies, a large number of pins and a mean distance between pins below 1 m horizontally and below 30 cm vertically have been favoured (Table 7). On a rather dynamic bank such as Reach 4 of the Merantaise

River, reducing the space below 1.5 m horizontally (with a fixed spacing of 0.8 m vertically) did not improve the quality of the data if a symmetrical implementation of the pins is chosen. However, one of the advantages of the erosion pins survey over the SfM Photogrammetry is that this method may be used under water level.

²This comparison between the results from a spatially almost-continuous technique (SfM) and a discrete one (pins), applied on a same study site emphasises the great variability of erosion that occurs within a bank reach of a few meters long where bank erosion is limited. Figure 7.47 shows moreover that this variability is lateral but also, and perhaps above all, vertical. Similarly to what had been seen in numerous previous studies, the bottom (BB), middle (MB) and top (TB) of the bank appear to evolve at different time scales because of the different erosion processes involved (Hooke, 1979; Couper and Maddock, 2001; Nasermoaddeli and Pasche, 2008; Henshaw et al., 2012). While subaerial and subsurface processes are commonly considered as ‘preparatory’ processes which weaken the surface of the bank, fluvial erosion and mass failure are two processes linked through the concept of basal endpoint control described by Carson and Kirkby (1972) and later by Thorne (1978, 1982) (Couper et Maddock, 2001; Wood et al., 2001). This concept of ‘basal endpoint control’ highlights the complexity and the interconnection of the bank retreat and the explanatory processes. Indeed, as reported by Thorne and Osman (1988), “continued retreat through mass failure requires basal clean out of slumped debris. As this depends entirely on fluvial entrainment, rates of retreat by mass failure are fluvially controlled, even though the mass stability of the bank is not directly related to flow forces”. This was the same pattern of erosion occurring on a low energy streams, such as the Merantaise, where the erosion and transport capacity are very limited.

Indeed, because of the relative small size of the catchment and the recent incision of the bed following from urbanization, the bankfull level is never reached and water level at high flow never exceeds one third of the bank height. The collapsed material is consequently never fully submerged and floods are usually not energetic enough to fully generate erosion (i.e. scour and transport). Shear stress has proven to be high enough to scour the bank; but this was often too low to evacuate all of the eroded material as it was produced. Several high flow events were therefore necessary to clear the bank toe. This is the main reason why the correlations between bank retreat and fluvial descriptors are not as good as expected (correlation coefficient ranging between 0.4 and 0.8). Though they highlight the dominance of the fluvial erosion variables, especially through mean flood discharge ($Q_{\text{moy-fl}}$) and peak discharge (Q_{max}), these correlations are weaker than those presented in the literature (Hooke, 1979; Julian and Torres, 2006; Henshaw et al., 2012). Henshaw et al. (2012) have for instance shown that fluvial erosion accounts for bank erosion at 89 % of erosion pin locations in several British upland catchments. It is worth repeating that the subaerial processes may not be considered in this study as weakening the correlation to fluvial factors as it has been shown in numerous studies on small headwater catchments (Lawler, 1986, 1993; Stott, 1997; Prosser et al., 2000; Couper and Maddock, 2001; Wallemacq et al., 2011; Hamel et al., 2013). On the Merantaise, as also shown by Henshaw et al. (2012), precipitation and

frost do not significantly influence bank retreat (Table 6.A and B). This is probably because most of the study reaches are located in a forested area that intercepts a significant part of the rainfall and clearly because no significant conditions of frost were recorded during the study.

Julian and Torres (2006) studied an urban stream (Sand River) which, like the Merantaise, was incising. They demonstrated for their part that hydraulic erosion was mainly dictated by the peak flow intensities. Our results are slightly divergent as we show that peak flow alone may not fully explain bank erosion. In our case, it is the mean flood discharge that is best correlated to bank retreat. This suggests that the intensity of the flood (water level and flow velocity) is key but also that the duration of the event is important. Though peak flows, generated by summer storms, can be highly morphogenous (i.e. the June 2013 storm event was responsible for a loss of 4.06 m³ of bank material at R4), it is rather the addition of medium events that will allow bank scour or evacuation of collapsed materials. These different findings between our two studies may be explained by the cohesiveness of the bank that is largely acknowledged among the key factors controlling bank erosion (Hooke, 1980; Baker, 1988; Lawler et al., 1997, 1999; Huang and Nanson, 1998; Couper, 2003; Laubel et al., 2003; Viel, 2012). From a literature review, Julien and Torres (2006) proposed a conceptual model for erosion rates of cohesive riverbanks, based on the bank composition (i.e. silt-clay contents, *SCI*). According to their model, the magnitude, the variability and the maximum of the hydraulic peaks best predict erosion of banks with *SCI* content inferior to 20-40 %. For more cohesive banks (*SCI* >40 %) the best predictor is the duration of high flows. The banks of all Merantaise River reaches may be considered as rather moderately to highly cohesive (*SCI* ranging between 34 % and 89 %) (Table 2 and Figure 12) and, in accordance with what their model predicted, it is indeed a combination of peak flow and duration of high flow (in our case mean discharge during floods) that best explain bank erosion. In their case, *SCI* of the Sand River is much lower (2.8 to 12.4 %) and bank erosion is thus best explained by peak intensities.

They justify their model, however, by the fact that below 20 % of *SCI*, only hydrological scouring may be considered as responsible for bank erosion; above 40% aerial processes would be dominant; and between 20 to 40 %, it would be a combination of both factors. This is contrary to what we observe on the Merantaise River where aerial processes seem not playing a key role on bank retreat. Solely hydraulic erosion is involved despite the cohesiveness of the banks. Indeed, we have clearly shown that the river has enough energy to scour the bank but not to transport the collapsed sediment (that usually stays compact even after their collapse).

Figure 7.51 shows moreover that silt-clay contents are not correlated to the spatial variability of bank erosion and clearly do not explain the discrepancy between reaches despite the fact that they experienced the same hydrological variations. Contrary to expectations, the highest erosion rates do not necessarily match the sites with the lowest silt concentration (and vice versa). Likewise, the average

energy recorded at each study reach does not explain the differences. Indeed, Table 2 shows that in this case, reaches with the highest stream power are not those that saw the highest bank erosions rates.

In such an environment such as the Merantaise River where excess stream power or shear stress is so low, it is rather the site-specific characteristics that will allow the occurrence of bank retreat. In a similar way to the study by Laubel et al. (2003) on 15 Danish first and second order streams, the bank erosion rate is indeed directly related to the bank angle. In other words, bank retreat is at its maximum where a bend or a local obstacle (embankment, vegetation, large particle, etc.) reflects the river flow towards the bank. One may indeed notice that R2, R3, R5 and R6 are quite straight (bank angle close to 0 %) and have very limited bank erosion, while R1 and R4 have a bank angle rating between 30 and 35 % (Figure 7.40 and Figure 7.47) and consequently experience very active bank retreat. This is particularly clear on R4 where an old ruined embankment and a tree located on the right bank directly upstream of the vertical profile P1 direct the flow towards the left bank, generating bank erosion.

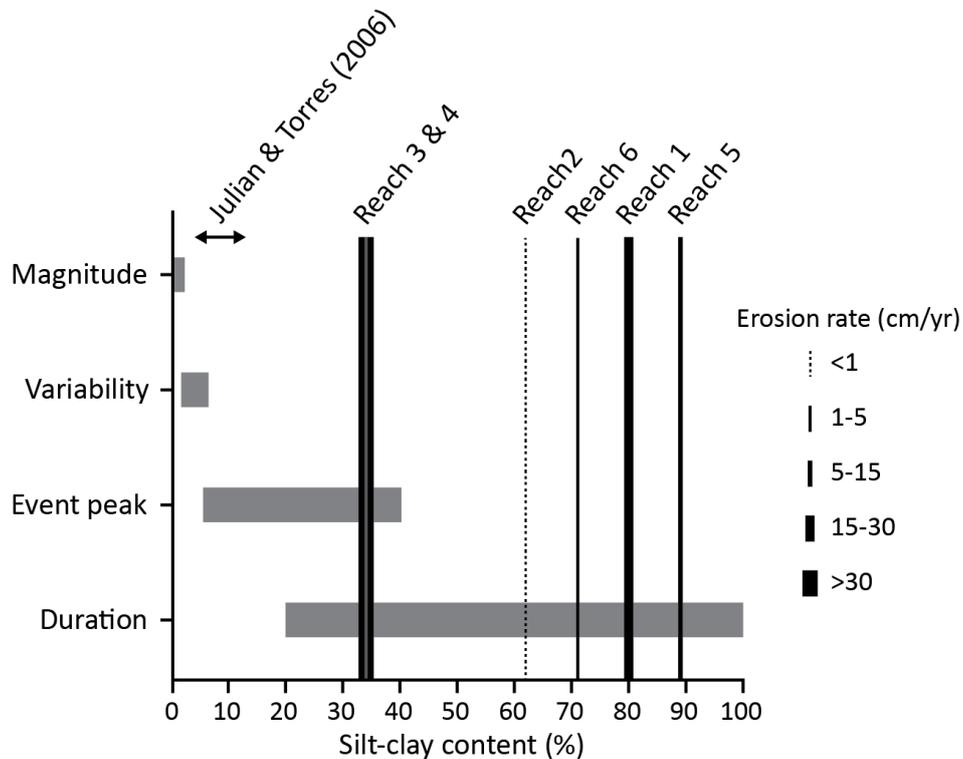


Figure 7.51 : Julian and Torres (2006)'s conceptual model of best predictors for erosion rates of cohesive riverbanks (modified) and erosion rates of the six reaches studied on the Merantaise River.

1 **Table 7 : Comparison of the erosion pins equipment between different studies in small catchments.**

Study	Location	Nb of pins (horizontal pins / vertical pins)	Mean distance between pins (m) (horizontal pin spacing / vertical pin spacing)	Nb of profiles	Nb of reaches
Hooke, 1979	7 streams , Devon, England	342	0.4 and 0.8 m / 0.3 m	–	16
Lawler, 1986	The Ilston basin, Wales	230 (4 to 8 pins per profile)	1 m / –	–	–
Lawler et al., 1999	The Swale-Ouse system, northern UK	421; 27-65 per site (varying depending of the bank)	0.8 to 40 m / 0.3 to 10 m	–	10
Stott, 1997	Monachyle Glen and Kirkton Glens, Scotland	304 for the Monachyle River; 126 for the Kirkton River (varying depending on the height of the bank)	0.5 m / 0.1 m	62 for the Monachyle River; 29 for the Kirkton River (?)	62 for the Monachyle River; 29 for the Kirkton River
Couper and Maddock, 2001	The River Arrow, Warwickshire, UK	284	1 m / 0.3 m	–	4 (350 m: 13 to 54 m each))
Couper et al., 2002	Nant Tanllwyth, Afon Trannon and	Nant Tanllwyth: 137 Afon Trannon: 60	Nant Tanllwyth: 0.1m/0.25m Afon Trannon: 1 m/0.1 m	–	Nant Tanllwyth: 16 Afon Trannon: 1
Laubel et al., 2003	15 lowland streams in Denmark	1500 (3/varying depending on the height of the bank)	0.5 m / 0.25 m	99 (91 considered for statistical analyses)	33 stream reaches 75-m long
Wallemacq et al., 2011	The Chavanne River, Belgium	48 (3 to 6 per profile)	0.1 to 0.2 m	11	11
Henshaw et al., 2012	The Pontbren experimental catchment, England	110 (3 to 9 pins by row)	0.15 m (in vertical rows)	24	24
This study	The Merantaise River, France	63	3 m / 1 m	21	6

2

5.2. The long term river width evolution

As already mentioned in the introductory section, 20th century sporadic cross profiles collected in local administration archives indicate that consecutively to the urbanization of the catchment, the bed of the Merantaise River experienced a widening of roughly 200 %. Since the 1980's the mean width of the bed increased from 2 m up to 4 m, corresponding to a bank erosion rate of 5 to 6 cm/yr. The six reaches studied in this paper have been chosen because they are considered as representative of the entire course of the river. They show an average erosion rate of 14.8 cm/yr - that is twice the erosion rate recorded over the last 35 years. Our results show that bank erosion is locally very heterogeneous and ranges from less than 1 cm/yr to almost 40 cm/yr. Yet the recent widening occurred over the entire course of the Merantaise River. This indicates that if the erosion rate is variable from one location to another depending of the site-specific characteristics, the erosion rate also changes over time. Indeed, local lateral evolutions of the bed induce progressive modifications of flow directions that eventually displace the location of high erosion rates. In this way, lateral evolution may propagate to the entire bed. This is what we observe on Reach 4 where the downstream part of the reach was relatively preserved from erosion at the beginning of the study, and the most dynamic during the final periods (Figure 9).

6. Conclusion

As suggested by the vegetation cover of the Merantaise studied reaches, a gradient of bank retreat has been observed. The two sites almost bare of vegetation experience an erosion rate of several tens of centimetres/year, while the two sites covered by more than 40 % of vegetation were very stable. This illustrates the very heterogeneous pattern of bank erosion observed on the Merantaise. Our results indicate that bank retreat may occur in lowland, low energy streams but that erosion results from complex processes operating on various spatial and temporal scales.

Bank erosion rates and processes recorded in the Merantaise catchment during this investigation were comparable with those observed and measured in similar catchments and confirmed the major role played by the mean discharge of flood events (Hooke, 1979; Lawler, 1986; Lawler et al., 1999; Stott, 1997; Couper and Maddock, 2001; Couper et al., 2002; Laubel et al., 2003; Wallemacq et al., 2011; Henshaw et al., 2012; Dépret et al., 2015; Corbonnois et al., 2016). However, contrary to what other studies have shown, the low energy of the Merantaise River induces a relatively bad correlation with peak flow intensity. We showed that the river has enough energy to scour the bank but not to transport the collapsed sediment. It takes therefore a certain amount of time (several flood events) to clear the bank toe, allowing a new phase of erosion to occur.

Furthermore, the high local variability of the bank erosion of the Merantaise River is linked more to the properties of the small low energy/slope rivers than to the composition of the bank. The very

local context of the reaches, such as the streamflow direction, the embankment, the vegetation cover or the lateral input play a major role in bank erosion.

7. Acknowledgements

This research was supported by the Doctoral School of Geography of Paris. The authors would like to thank the *Parc Naturel Régional de la Haute Vallée de Chevreuse* for their help on the field and IRSTEA for making a water pressure sensor available during the survey. We also like to thank Natasha Shields for assistance in translating. The authors are particularly grateful to Dimitri Lague for his help in setting up the M3C2 plugin. Finally, the authors would like to express their gratitude to the two anonymous reviewers for their constructive comments and suggestions.

8. References

- Alho, P., Kukko, A., Hyypä, H., Kaartinen, H., Hyypä, J., Jaakkola, A., 2009. Application of boat-based laser scanning for river survey. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 1831-1838. <https://doi.org/10.1002/esp.1879>
- Ashbridge, D., 1995. Processes of river bank erosion and their contribution to the suspended sediment load of the River Culm, Devon. In Foster, I., Gurnell, A., Webb, B. (eds) *Sediment and Water Quality in River Catchments*, Wiley: Chichester, 229–245
- Assani, A.A., Petit, F., 2004. Impact of hydroelectric power releases on the morphology and sedimentology of the bed of the Warche River (Belgium). *Earth Surface Processes and Landforms* 29, 133-143. <https://doi.org/10.1002/esp.1004>
- Baker, VR., 1988. Flood erosion. In Baker VR., Kochel RC., Patton PC. (Eds.). *Flood geomorphology*. Wiley Interscience, New York, 81-95.
- Barker, R., Dixon, L., Hooke, J., 1997. Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion. *Earth Surface Processes and Landforms* 22, 1217-1227. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199724\)22:13<1217::AID-ESP819>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199724)22:13<1217::AID-ESP819>3.0.CO;2-U)
- Bird, S., Hogan, D., Schwab, J., 2010. Photogrammetric monitoring of small streams under a riparian forest canopy. *Earth Surf. Process. Landforms* 35, 952-970. <https://doi.org/10.1002/esp.2001>
- Brasington, J., 2010. From grain to flooplain: hyperscale models of braided rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 48 (4), 52-53.
- Braud, I., Breil, P., Thollet, F., Lagouy, M., Branger, F., Jacqueminet, C., Kermadi, S., Michel, K., 2013. Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France. *J. Hydrol.* 485, 5-23. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.049>
- Bravard, J.-P., Petit, F., 2000. *Les cours d'eau, dynamique du système fluvial*, Armand Colin, Collection U, Paris, 222 pp. ISBN: 2-200-25177-7.
- Carbonneau, P., Lane, S., Bergeron, N., 2003. Cost-effective non-metric close-range digital photogrammetry and its application to a study of coarse gravel river beds. *International Journal of*

- Remote Sensing, 24, 2837-2854. <https://doi.org/10.1080/01431160110108364>
- Carson, MA., Kirkby, MJ., 1972. Hillslope Form and Processes. Cambridge University Press, New York, viii, 476 pp.
- Cavalli, M., Tarolli, P., 2011. Application of LIDAR technology for rivers analysis. Italian Journal of Engineering Geology and Environment. Special Issue 1. 33-44. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2011-01.S-03>
- Chin, A., 2006. Urban transformation of river landscapes in a global context. *Geomorphology* 79, 460-487. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.033>
- Corbonnois, J., Bonnefond, M., Chardon, V., Rodrigues, S., Jugé, P., Cali, J., Verdun, J., Simonetto, E., Tchekpo, W., Labergerie, E., Fauchaux, G., 2016. Détermination des conditions de la dynamique fluviale d'une rivière aménagée de basse énergie, à partir de secteurs du Loir (Bassin de la Loire aval). *Géomorphologie, Relief, Processus, Environnement*. 22, 345-361. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11559>
- Couper, P., 2003. Effects of silt-clay content on the susceptibility of river banks to subaerial erosion. *Geomorphology* 56, 95-108. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00048-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00048-5)
- Couper, P., Maddock, I., 2001. Subaerial river bank erosion processes and their interaction with other bank erosion mechanisms on the River Arrow, Warwickshire, UK. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 631-646. <https://doi.org/10.1002/esp.212>
- Couper, P., Stott, T., Maddock, I., 2002. Insights into river bank erosion processes derived from analysis of negative erosion-pin recordings: observations from three recent UK studies. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 59-79. <https://doi.org/10.1002/esp.285>
- Dapporto, S., Rinaldi, M., Casagli, N., Vannocci, P., 2003. Mechanisms of riverbank failure along the Arno River, central Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 28, 1303-1323. <https://doi.org/10.1002/esp.550>
- Darby, S.E., Rinaldi, M., Dapporto, S., 2007. Coupled simulations of fluvial erosion and mass wasting for cohesive river banks. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 112, F03022. <https://doi.org/10.1029/2006JF000722>
- Dépret, T., Gautier, E., Hooke, J., Grancher, D., Vermoux, C., Brunstein, D., 2015. Hydrological controls on the morphogenesis of low-energy meanders (Cher River, France). *Journal of Hydrology* 531, 877-891. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.035>
- Dietrich, J., 2016. Riverscape mapping with helicopter-based Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology* 252, 144-157. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.008>
- Dietrich, J., 2014. Application of Structure-from-Motion photogrammetry to fluvial geomorphology. PhD Thesis.
- Fonstad, M., Dietrich, J., Courville, B., Jensen, J., Carbonneau, P., 2013. Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.3366>

- Förstner, W., 1986. A feature based correspondence algorithm for image matching. *Arch. Photogramm. Remote Sens.*
- Fox, G. a., Felice, R.G., 2014. Bank undercutting and tension failure by groundwater seepage: predicting failure mechanisms. *Earth Surface Processes and Landforms* 39, 758-765. <https://doi.org/10.1002/esp.3481>
- Fox, G.A., Wilson, G. V., Simon, A., Langendoen, E.J., Akay, O., Fuchs, J.W., 2007. Measuring streambank erosion due to ground water seepage: correlation to bank pore water pressure, precipitation and stream stage. *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 1558-1573. <https://doi.org/10.1002/esp.1490>
- Grosprêtre, L., 2011. Etude et gestion des impacts hydrogéomorphologiques de la périurbanisation. L'exemple du bassin de l'Yzeron dans l'Ouest lyonnais. Université Lumière Lyon2.
- Hamel, V.B., Buffin-Bélanger, T., Héту, B., 2013. Contribution à l'étude de l'érosion des berges : analyse à haute résolution spatio-temporelle des mouvements subaériens sur une berge de la rivière Ouelle, Québec, Canada. *Géomorphologie Relief Processus Environnement*. 19 (2), 119-132. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10176>
- Harris, C., Stephens, M., 1988. A Combined Corner and Edge Detector. *Proceedings Alvey Vis. Conf.* 1988 147-151. <https://doi.org/10.5244/C.2.23>
- Henshaw, A.J., Thorne, C.R., Clifford, N.J., 2012. Identifying causes and controls of river bank erosion in a British upland catchment. *Catena* 100, 107-119. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.07.015>
- Heritage, G., Hetherington, D., 2007. Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 66-74. <https://doi.org/10.1002/esp.1375>
- Hooke, J.M., 1979. An analysis of the processes of river bank erosion. *J. Hydrol.* 42, 39-62. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(79\)90005-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(79)90005-2)
- Javernick, L., Brasington, J., Caruso, B., 2014. Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology* 213, 166-182. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.006>
- Julian, J.P., Torres, R., 2006. Hydraulic erosion of cohesive riverbanks. *Geomorphology* 76, 193-206. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.11.003>
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J., 2013. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 82, 10-26. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>
- Laubel, A., Kronvang, B., Hald, A.B., Jensen, C., 2003. Hydromorphological and biological factors influencing sediment and phosphorus loss via bank erosion in small lowland rural streams in Denmark. *Hydrological Processes* 17, 3443-3463. <https://doi.org/10.1002/hyp.1302>
- Lawler, D.M., 1993. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: A review. *Earth Surface Processes and Landforms* 18, 777-821. <https://doi.org/10.1002/esp.3290180905>

- Lawler, D.M., 1992. Design and installation of a novel automatic erosion monitoring system. *Earth Surface Processes and Landforms* 17, 455-463. <https://doi.org/10.1002/esp.3290170505>
- Lawler, D.M., 1986. River Bank Erosion and the Influence of Frost: A Statistical Examination. *Trans. Inst. Br. Geogr.* 11, 227. <https://doi.org/10.2307/622008>
- Lawler, D.M., Couperthwaite, J.S., Bull, L.J., Harris, N.M., 1997. Bank erosion events and processes in the Upper Severn basin. *Hydroly and Earth System Sciences* 1, 523-534. <https://doi.org/10.5194/hess-1-523-1997>
- Lawler, D.M., Grove, J.R., Couperthwaite, J.S., Leeks, G.J.L., 1999. Downstream change in river bank erosion rates in the Swale-Ouse system, northern England. *Hydrological Processes* 13, 977-992. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199905\)13:7<977::AID-HYP785>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199905)13:7<977::AID-HYP785>3.0.CO;2-5)
- Lespez, L., Viel, V., Rollet, A.-J., Delahaye, D., 2015. The anthropogenic nature of present-day low energy rivers in western France and implications for current restoration projects. *Geomorphology* 251, 64-76. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.015>
- Lowe, D.G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int. J. Comput. Vis.* 60, 91-110. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- Lowe, D.G., 1999. Object recognition from local scale-invariant features. *Proc. Seventh IEEE Int. Conf. Comput. Vis.* 2. <https://doi.org/10.1109/ICCV.1999.790410>
- Luppi, L., Rinaldi, M., Teruggi, L.B., Darby, S.E., Nardi, L., 2009. Monitoring and numerical modelling of riverbank erosion processes: a case study along the Cecina River (central Italy). *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 530-546. <https://doi.org/10.1002/esp.1754>
- Marteau, B., Vericat, D., Gibbins, C., Batalla, R.J., Green, D.R., 2017. Application of Structure-from-Motion photogrammetry to river restoration. *Earth Surface Processes and Landforms* 42, 503-515. <https://doi.org/10.1002/esp.4086>
- Masoodi, A., Noorzad, A., Majdzadeh Tabatabai, M.R., Samadi, A., 2018. Application of short-range photogrammetry for monitoring seepage erosion of riverbank by laboratory experiments. *Journal of Hydrology* 558, 380-391. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.051>
- Micheletti, N., Chandler, J., Lane, S., 2015. Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. *Earth Surface Processes and Landforms* 40, 473-486. <https://doi.org/10.1002/esp.3648>
- Nasermoaddeli, M.H., Pasche, E., 2008. Application of terrestrial 3D laser scanner in quantification of the riverbank erosion and deposition. *River Flow* 2008 2407-2416.
- Navratil, O., Breil, P., Schmitt, L., Grosprêtre, L., Albert, M.B., 2013. Hydrogeomorphic adjustments of stream channels disturbed by urban runoff (Yzeron River basin, France). *Journal of Hydrology* 485, 24-36. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.036>
- Navratil, O., Evrard, O., Esteves, M., Legout, C., Ayrault, S., Némery, J., Mate-Marin, A., Ahmadi, M., Lefèvre, I., Poirel, A., Bonté, P., 2012. Temporal variability of suspended sediment sources in an alpine catchment combining river/rainfall monitoring and sediment fingerprinting. *Earth Surface*

- Processes and Landforms 37, 828-846. <https://doi.org/10.1002/esp.3201>
- Notebaert, B., Verstraeten, G., Govers, G., Poesen, J., 2009. Qualitative and quantitative applications of LiDAR imagery in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 217-231. <https://doi.org/10.1002/esp.1705>
- Pi, Cuaz, M., Javelle, E., Mandier, P., 1997. Bank erosion management based on geomorphological, ecological and economic criteria on the Galaure River, France. *Regul. Rivers-Research Manag.* 13, 433-448. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199709/10\)13:5%3C433::AID-RRR467%3E3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199709/10)13:5%3C433::AID-RRR467%3E3.0.CO;2-L)
- Picco, L., Mao, L., Cavalli, M., Buzzi, E., Rainato, R., Lenzi, M. a., 2013. Evaluating short-term morphological changes in a gravel-bed braided river using terrestrial laser scanner. *Geomorphology* 201, 323-334. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.07.007>
- Prosdocimi, M., Calligaro, S., Sofia, G., Dalla Fontana, G., Tarolli, P., 2015a. Bank erosion in agricultural drainage networks: new challenges from Structure-from-Motion photogrammetry for post-event analysis. *Earth Surface Processes and Landforms* 39, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/esp.3767>
- Prosdocimi, M., Calligaro, S., Sofia, G., Dalla Fontana, G., Tarolli, P., 2015b. Bank erosion in agricultural drainage networks: new challenges from structure-from-motion photogrammetry for post-event analysis. *Earth Surface Processes and Landforms* 40, 1891-1906. <https://doi.org/10.1002/esp.3767>
- Prosser, I.P., Hughes, A.O., Rutherford, I.D., 2000. Bank erosion of an incised upland channel by subaerial processes: Tasmania, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 1085-1101. [https://doi.org/10.1002/1096-9837\(200009\)25:10<1085::AID-ESP118>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200009)25:10<1085::AID-ESP118>3.0.CO;2-K)
- Rinaldi, M., 2003. Recent channel adjustments in alluvial rivers of Tuscany, Central Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 28, 587-608. <https://doi.org/10.1002/esp.464>
- Rumsby, B.T., Brasington, J., Langham, J. a., McLelland, S.J., Middleton, R., Rollinson, G., 2008. Monitoring and modelling particle and reach-scale morphological change in gravel-bed rivers: Applications and challenges. *Geomorphology* 93, 40-54. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.017>
- Samadi, A., Amiri-Tokaldany, E., Davoudi, M.H., Darby, S.E., 2013. Experimental and numerical investigation of the stability of overhanging riverbanks. *Geomorphology* 184, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.03.033>
- Stott, T., 1997. A comparison of stream bank erosion processes on forested and moorland streams in the Balquhiddy Catchments, central Scotland. *Earth Surface Processes and Landforms* 22, 383-399. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199704\)22:4<383::AID-ESP695>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199704)22:4<383::AID-ESP695>3.0.CO;2-4)
- Surian, N., 1999. Channel changes due to river regulation: The case of the Piave River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 24, 1135-1151. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199911\)24:12<1135::AID-ESP40>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199911)24:12<1135::AID-ESP40>3.0.CO;2-F)

- Tarolli, P., 2014. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. *Geomorphology* 216, 295-312. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.03.008>
- Wallemacq, V., Petit, F., Van Campenhout, J., Houbrechts, G., 2011. Impact de la glace de ségrégation sur l'érosion des berges d'un ruisseau ardennais (la Chavanne, Belgique). *Géomorphologie Reli. Process. Environ.* 17, 65-82. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.9226>
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M., 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Wheaton, J.M., Brasington, J., Darby, S.E., Sear, D.A., 2009. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surf. Process. Landforms* 35, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/esp.1886>
- Wood, A.L., Simon, A., Downs, P.W., Thorne, C.R., 2001. Bank-toe processes in incised channels: the role of apparent cohesion in the entrainment of failed bank materials. *Hydrol. Process.* 15, 39-61. <https://doi.org/10.1002/hyp.151>
- Wolman, M.G., 1959. Factors influencing erosion of a cohesive river bank. *American Journal of Science*, 257, 204–216. DOI: 10.2475/ajs.257.3.204
- Wynn, T.M., Henderson, M.B., Vaughan, D.H., 2008. Changes in streambank erodibility and critical shear stress due to subaerial processes along a headwater stream, southwestern Virginia, USA. *Geomorphology*, 97, 260–273. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.08.010

**Chapitre 8. LES FACTEURS DE CONTRÔLE RESPONSABLES DES
AJUSTEMENTS MORPHOLOGIQUES ACTUELS**

A. : Les différents éléments de contrôle de l'hydrologie dans le bassin versant	p. 329
B. : Un régime hydrologique influencé par l'urbanisation	p.357

Introduction

Après avoir dressé le portrait de l'état morphologique actuel de la Mérentaise, il s'agit désormais de déterminer les facteurs de contrôle responsables des ajustements physiques du chenal. Comme nous avons pu le constater, les conditions morpho-sédimentaires identifiées sur le terrain (incisions et élargissements du lit mineur) témoignent d'une mise en place récente. Ces évolutions semblent s'être produites durant les trois ou quatre dernières décennies (années 80) et coïncident avec le développement urbain massif dans le bassin versant, notamment celui de la ville de Saint-Quentin-en-Yvelines.

Nous avons montré que le chenal actuel n'est que partiellement hérité des aménagements hydrauliques anciens (moulins) qui ont façonné les paysages du fond de vallée durant « l'âge d'or » des activités de meunerie (phase 1). Leur abandon durant la phase de « désaménagement » de la rivière (phase 2) les a progressivement déconnectés du linéaire que l'on connaît aujourd'hui. Aujourd'hui, seuls 50 % du linéaire correspond encore au chenal actif durant la première phase d'aménagement.

Les rivières ajustent leur cours en réponse aux modifications des variables de contrôles. Celles qui jouent un rôle majeur sont les variables de contrôle primaires, à savoir les flux hydriques (Q_i) et sédimentaires (Q_s). Mais ces facteurs externes sont également complétés par des variables de contrôle considérées comme secondaires (Malavoi et Bravard, 2010) : la forme et la pente de la vallée, les caractéristiques granulométriques du lit et des berges, la nature et la densité de la végétation riveraine. On peut ajouter à cette liste les différentes interventions anthropiques qui constituent un forçage du milieu : seuils en rivière, protections de berges, rejets urbains et agricoles, éventuels remblais ou curage/extraction dans le lit, ... Ces variables de contrôle secondaires correspondent bien souvent à des facteurs locaux. Or ceux-ci participent pleinement du fonctionnement hydrosédimentaire des rivières, en particulier celles de gabarit modeste, de faible énergie et situées en tête de bassin (Meyer et Wallace, 2001; Melun, 2012; Jugie et al., 2018).

Dans le cas de la Mérentaise, nous n'avons pas identifié de véritables changements structurels dans l'apport sédimentaire, depuis les années 1970-80. Cette variable de contrôle ne semble pas expliquer les évolutions morphologiques récentes de la rivière. En revanche, du fait du nouveau caractère périurbain du bassin versant, il est fort probable que les modifications des conditions d'écoulements hydrologiques semble le candidat évident pour expliquer cette incision et cet élargissement notable du lit.

A. Les différents éléments de contrôle de l'hydrologie dans le bassin versant

Il est désormais acquis que l'urbanisation des bassins versants est une cause majeure de perturbation du fonctionnement hydrosédimentaire et écologique des systèmes fluviaux (Gregory et al., 1992; Chin, 2006; Navratil et al., 2013). Pour rappel, les effets hydrologiques de l'urbanisation correspondent essentiellement, pour une pluie donnée, à une augmentation des volumes ruisselés, à l'accélération des écoulements et à une modification de la distribution temporelle des débits. La superficie du bassin versant détermine l'intensité et la vitesse des ajustements sous l'effet de l'urbanisation. Plus le bassin est de petite taille, plus la réactivité aux apports hydrologiques est importante, et donc plus les ajustements morphologiques du cours d'eau sont rapides (Park, 1977 ; Bledsoe et al., 2001; Chin, 2006). La part de surface urbanisée du bassin joue de manière variable selon le taux d'imperméabilisation du bassin versant. Cependant, un seuil de 10% de surfaces urbanisées à partir duquel les effets de l'urbanisation sont inévitables est généralement considéré (Boothet Jackson, 1997 ; Bledsoe et al., 2001). Les contextes périurbains sont un peu plus complexes puisque il s'agit d'espaces à la fois urbains et ruraux (souvent agricoles). Les perturbations alors sont partiellement indirectes.

Il s'agit donc ici de proposer une synthèse des différentes sources de perturbations associées à l'urbanisation du bassin versant de la Mérintaise.

1. L'urbanisation du bassin versant de la Mérintaise

Le bassin versant de la Mérintaise peut être qualifié de périurbain car l'urbanisation y est essentiellement implantés dans les marges de la vallée, sur les plateaux et les hauts de versants, à l'exception de Châteaufort et de Gif-sur-Yvette. Cependant, le taux d'urbanisation⁵⁵ représente tout de même 23%, soit près d'un quart du territoire. Il correspond non seulement aux espaces constituant la ville à proprement parlé, mais aussi à tout le réseau de routes. De la même manière, l'urbanisation d'un bassin se caractérise par son réseau de drainage artificiel (fossés et réseaux d'assainissement) qui conditionne aussi fortement la réponse hydrologique du bassin versant (Leopold, 1968 ; Sauer et al., 1983 ; Harned, 1988 ; Chocat, 1997 ; Schick et al., 1999 ; Grosprêtre, 2011). C'est ce dernier qui constitue le lien direct entre la ville et le cours d'eau en évacuant les eaux pluviales concentrées dans le réseau par une série de rejets urbains (buses, déversoirs d'orages) (Grosprêtre, 2011).

⁵⁵ Le taux d'urbanisation et le taux d'imperméabilisation des sols sont souvent distingués car le premier ne prend pas en compte les espaces végétalisés au sein des villes (jardin, espaces verts, ...). Nous n'avons pas fait cette distinction dans cette étude pour des raisons techniques. Nous préférons donc utiliser le terme de taux d'urbanisation et avons conscience qu'il surestime la part réellement d'imperméabilisation des sols.

1.1. Les modalités générales de l'urbanisation du bassin de la Mérantaise

La Mérantaise est un exemple typique d'hydrosystème de marges urbaines. Cependant le développement de l'urbanisation dans le bassin versant y est quelque peu particulier. En effet, comme nous l'avons déjà expliqué dans la présentation générale du site d'étude (Chapitre 2), la Mérantaise se trouve sur le territoire de la Ville-Nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines. S'il ne s'agit pas ici de redonner à nouveau l'histoire et les enjeux de la Ville-Nouvelle, nous retracerons succinctement et caractériserons les grandes phases de mise en place l'urbanisation du bassin de la Mérantaise.

Ainsi, l'urbanisation de notre site d'étude a connu un développement particulièrement massif et rapide. Alors que le territoire était resté presque exclusivement rural et agricole jusque dans les années 1970, la sortie de terre de la Ville-Nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines dès les années 1980 a conduit multiplier par ≈ 6 le taux de surfaces urbanisées entre la fin de la Seconde guerre mondiale et aujourd'hui (Tableau 8.1).

Époque	Taux d'urbanisation
1820	2%
1947	4%
2015	23%

Tableau 8.1 : Évolution du taux d'urbanisation dans le bassin de la Mérantaise

Ce développement urbain est essentiellement localisé dans les marges du bassin versant, sur les plateaux et les hauts de versants, à l'image de la Zone d'Activités de Trappes en tête de bassin de la Mérantaise, ou du Cressely (commune de Magny-les-Hameaux). Seules les portions de la rivière comprises dans les communes de Châteaufort et de Gif-sur-Yvette se trouvent en contexte pleinement urbain (Figure 8.1).

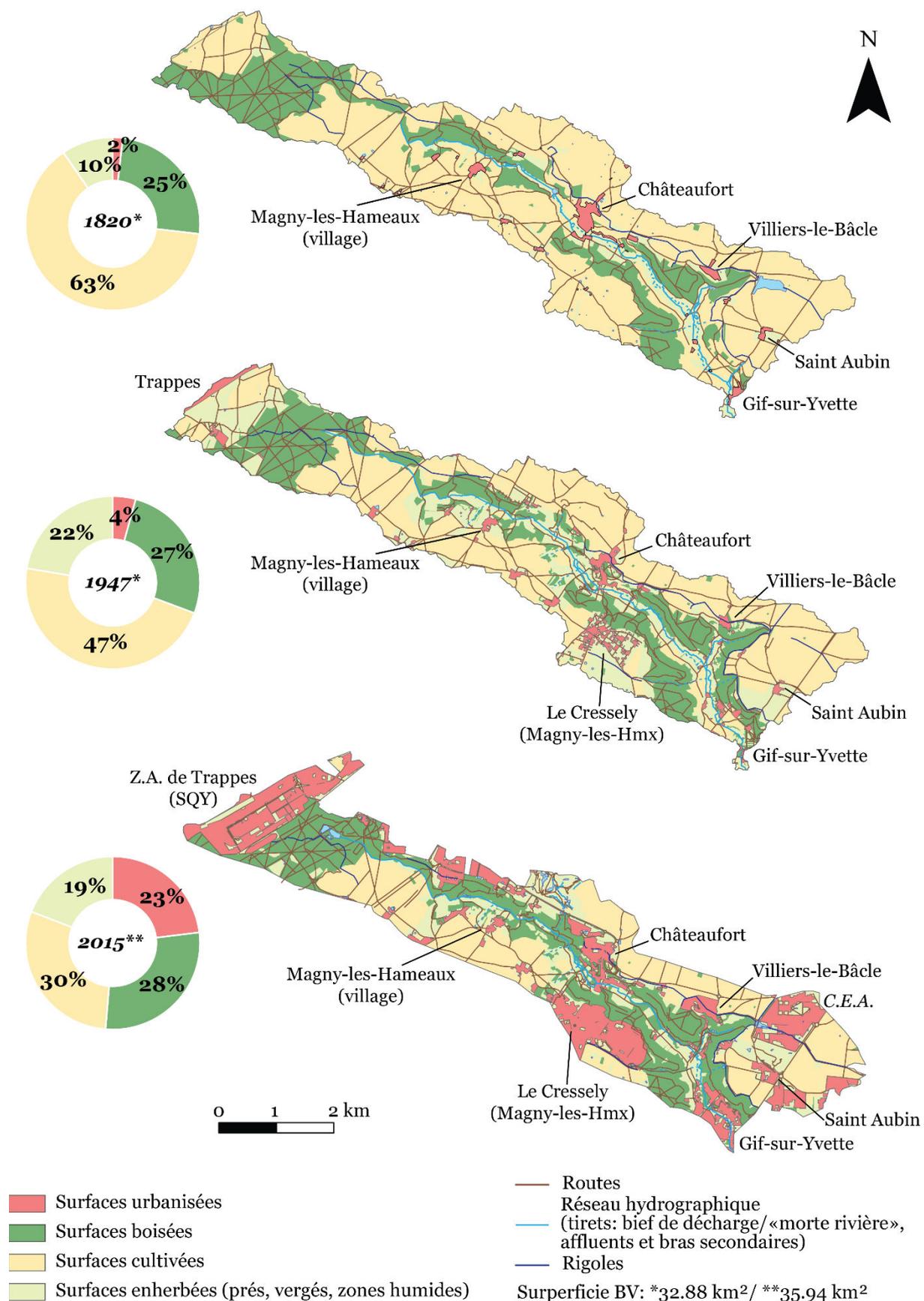


Figure 8.1 : Distribution spatiale des surfaces urbanisées dans le bassin de la Mérintaise

1.2. Les réseaux de drainage artificiels

Les surfaces imperméables nouvellement créées sont équipées d'un réseau de drainage artificiel (**Figure 8.2**). Celui-ci désigne généralement tout le linéaire qui concentre et évacue les eaux pluviales précipitées sur les surfaces imperméables d'un bassin versant, à savoir les routes, les fossés et le réseau d'assainissement d'eau pluviale. Dans le cas de la Mérintaise, il faut également ajouter le système hydraulique des rigoles du château de Versailles⁵⁶, qui bien que partiellement à l'abandon depuis l'après-guerre, interceptent une partie des écoulements hydrologiques du bassin versant. Les rigoles constituent d'une certaine manière les premiers réseaux de drainage artificiels du bassin de la Mérintaise (SYB, 2013).

L'extension du réseau routier depuis 40 ans est notable dans le bassin de la Mérintaise (**Figure 8.1** et **Figure 8.2**). Les routes constituaient un linéaire d'environ 157 km à la fin des années 1940. Elles représentent désormais près de 270 km de linéaire, qui se concentrent en partie dans les villes mais qui traversent également les territoires ruraux et agricoles (Vanneste, 2017). Le réseau routier s'est largement développé de manière concomitante aux espaces urbains (SIAHVY, 2010). Le linéaire de routes a non seulement augmenté, mais certains tronçons qui demeuraient en terre battue ont été bétonnés et les routes principales ont été bien souvent agrandies. Parallèlement au réseau routier s'ajoutent les ≈ 20 km de fossés. Une partie a été creusée le long des routes, l'autre partie draine essentiellement les surfaces agricoles des versants (**Figure 8.3**).

⁵⁶ Les rigoles du château de Versailles ont fait l'objet d'un développement dans la chapitre 2 consacré aux aménagements hydrauliques anciens.

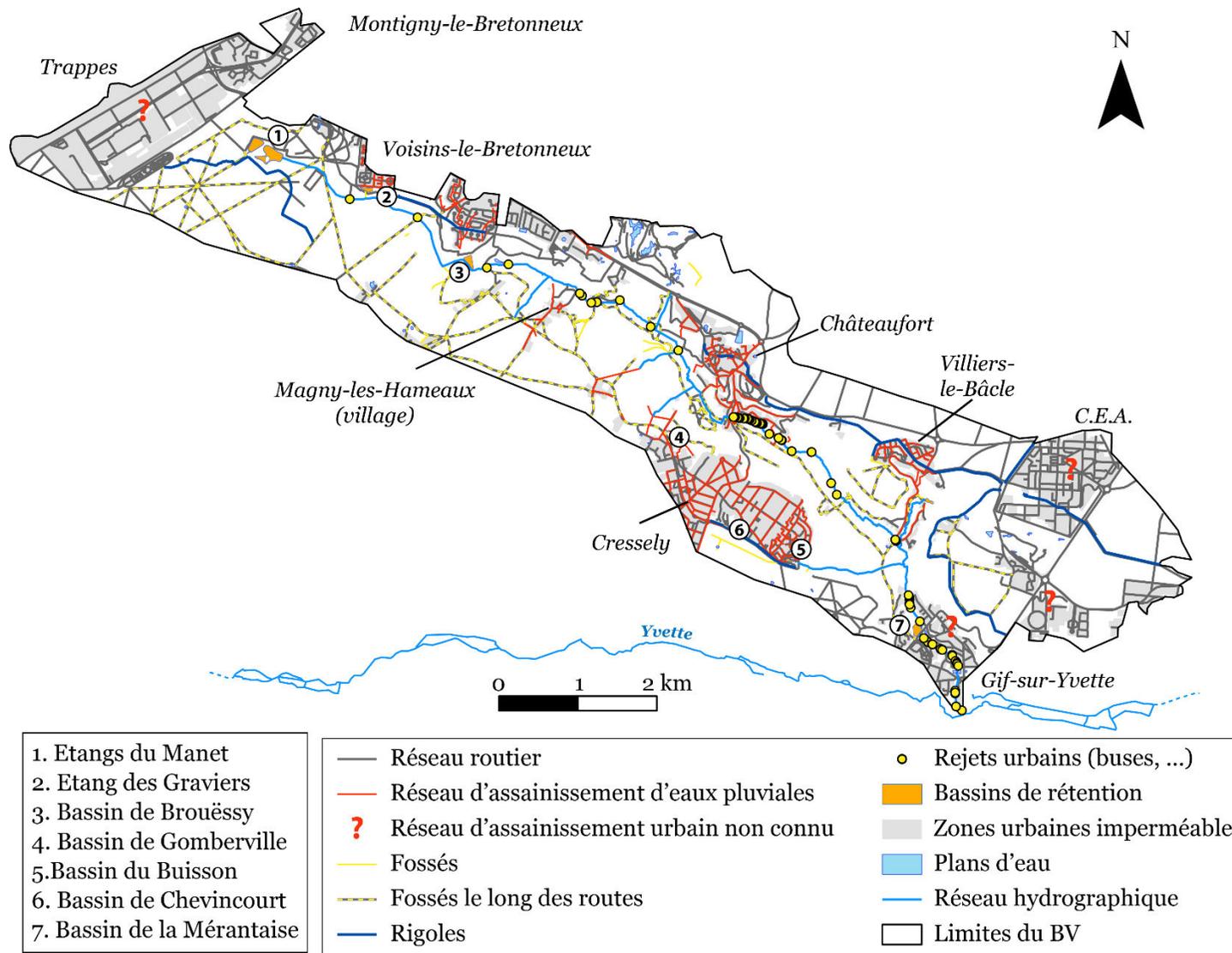


Figure 8.2 : carte du réseau de drainage artificiel (routes, fossés, réseau d'assainissement) et des rejets urbains. Le réseau d'assainissement n'est pas complet, une partie des fossés n'est pas représenté car ils suivent essentiellement le réseau routier.



Figure 8.3 : Exemple de fossés permettant le drainage des terres agricoles du bassin versant de la Mérantaise (a.). Les eaux ruisselées rejoignent ensuite le réseau d’assainissement des eaux pluviales pour déversement (b.). Les surfaces agricoles sont aussi bien contributrices d’apports liquides que solide par l’érosion des sols à nu (a., c. et d.) (Crédits photos : D. Fekih)

Le réseau de drainage artificiel ainsi défini et localisé évacue les eaux de pluies ruisselées des surfaces imperméables en grande partie directement dans la rivière au niveau de rejets urbains (**Figure 8.2** et **Figure 8.3**). Ces rejets urbains constituent l’ensemble des exutoires du réseau de drainage artificiel et prennent le plus souvent la forme de buses implantées dans les berges (**Figure 8.4**). Dans le cas de la vallée de l’Yvette amont dont fait partie le bassin de la Mérantaise, Lefebvre (2015) montre qu’à l’exception des plus grosses communes qui sont raccordés à un réseau d’assainissement collectif connecté à des stations d’épuration ou des bassins d’orage, la grande majorité des zones urbaines du bassin sont des petits bourgs dont les réseaux d’eaux usées sont non collectifs. Ces petites communes rejettent leurs eaux pluviales directement dans la rivière. Dans le bassin de la Mérantaise, seule la communauté d’agglomération de Saint-Quentin-en-Yvelines ne rejette pas directement ces eaux de pluies dans la Mérantaise. Les eaux pluviales transitent tout d’abord dans les bassins d’orage des étangs du Manet Il n’est également pas rare de voir des tuyaux qui drainent les lotissements riverains. Ce raccordement est à la limite du sauvage et est difficile à contrôler. Leur participation aux apports hydrologiques dans la Mérantaise semble assez faible mais il est effectif en temps de pluie.



Figure 8.4: Exemple de rejets urbains (buses) dans la Mérintaise, au niveau du parc du CNRS à Gif-sur-Yvette. (Crédits photo : D. Fekih, 2015 et M. Jugie, 2013)

1.2. Les bassins de rétention

Enfin, les eaux de pluies précipitées dans la vallée de la Mérintaise sont également gérées par l'intermédiaire de bassins de rétention (**Figure 8.2**). Ils ont été conçus pour retenir et infiltrer les eaux récupérées et pour limiter les risques d'inondation en diminuant les débits de pointes associés aux fortes crues. Ces ouvrages ont une influence majeure car ils contrôlent une partie non négligeable des apports hydriques (Sauer et al., 1983), mais sont également parfois considérés comme responsables de la dégradation morphologique des cours d'eau (Booth, 1991, 2000).

Le bassin versant de la Mérintaise est équipé de 7 bassins de rétention (également appelés bassins d'orage) et géré par la CASQY, la Communauté d'Agglomération de Saint-Quentin-en-Yvelines (**Tableau 8.2** et **Figure 8.5**) :

- les étangs du Manet (2 bassins),
- le bassin des Gravieres,
- le bassin de Brouëssy,
- le bassin de Gomberville,
- le bassin de Chevincourt
- et celui du Buisson.

Leurs caractéristiques principales sont présentées dans le **Tableau 8.2**. Initialement, quatre d'entre eux (les Manets, Les Gravières, Chevincourt et le Buisson) ont été conçus pour être en eau toute l'année, et deux pour être à sec en dehors des épisodes pluvieux (Brouëssy et Gomberville) (Figure 8.5). Aujourd'hui, tous les bassins sont en eau de manière permanente, faute d'entretien. Si la date de mise en service des bassins est majoritairement inconnue, les bassins pour lesquels cette information est disponible ont été construits entre le début des années 1980 et les années 1990. Il est très probable que tous soient contemporains ou tout juste postérieurs de la sortie de terre de Saint-Quentin-en-Yvelines et du reste du développement urbain du bassin versant de la Mérentaise.

Bassin	Commune	Dates de mise en service	Surface du bassin (ha)	Débit rejet max	Capacité théorique des bassins (volume normal/volume max)
Les Manets	SQY	1978-1982	Manet 1 : 2.55 Manet 2 : 5	270 L/s	Manet 1 : 21 000 m ³ / 51 000 m ³ Manet 2 : 50 000 m ³ /210 000 m ³
Les Gravières	SQY (VBx)	Non connue	0.33	?	Non connu/non connu
Brouëssy	Magny-les-Hameaux	Non connue	0.50	?	0 m ³ (à sec)/non connu
Gomberville	Gomberville (Magny-les-Hameaux)	1991	0.36	25 L/s	0 m ³ (à sec)/12 500 m ³
Chevincourt	Magny-les-Hameaux	Non connue	0.10	? (surverse dans un fossé vers le bassin du Buisson)	1 000 m ³ /1 500 m ³
Le Buisson	Le Cressely (Magny-les-Hameaux)	Non connue	0.34	?	7 500 m ³ /27 700 m ³

Tableau 8.2 : Caractéristiques principales des bassins d'orage du bassin versant de la Mérentaise (sources : CASQY)

Enfin, il existe un dernier bassin d'orage situé dans la partie aval de la vallée, en amont de Gif-sur-Yvette (**Figure 8.6**). Géré par le syndicat de bassin de l'Yvette, le SIAHVY, le bassin de la Mérentaise a été créé en 1954, puis recalibré en 1974, pour assurer la protection des habitants de Gif-sur-Yvette et de leurs biens face au risque d'inondation. Alors que dans les années 1930, le site était une prairie humide destinée aux fourrages et au milieu de laquelle s'écoulait la rivière, le cours d'eau naturel a été remblayé pour y implanter le bassin de rétention de la Mérentaise. Seul le bief perché du moulin de Chamort a été maintenu jusqu'aux récents travaux de restauration et reconfiguration du bassin (2014-2015). Bien qu'il ait une capacité de rétention de 98 100 m³ (augmenté de 9% lors des travaux de modernisation de 2015) (SIAHVY), le bassin de la Mérentaise sera peu considéré dans notre analyse

puisqu'il se situe très à l'aval de la vallée. Il faut enfin mentionner le bassin du Canal de Villiers-le Bâcle qui se trouve à la source captée de l'unique véritable affluent de la Mérantaise. C'est un bassin d'orage qui contrôle les écoulements urbains de la commune de Villiers-le-Bâcle. Nous n'avons malheureusement que peu d'éléments sur ce bassin.

La capacité théorique de tous les bassins de rétention est estimée à 220 000 m³, ce qui correspond à 30h de stockage pour un débit de 2 m³/s, soit la crue morphogène atteinte ou dépassée 1% du temps durant nos trois ans de suivi de l'hydrologie.

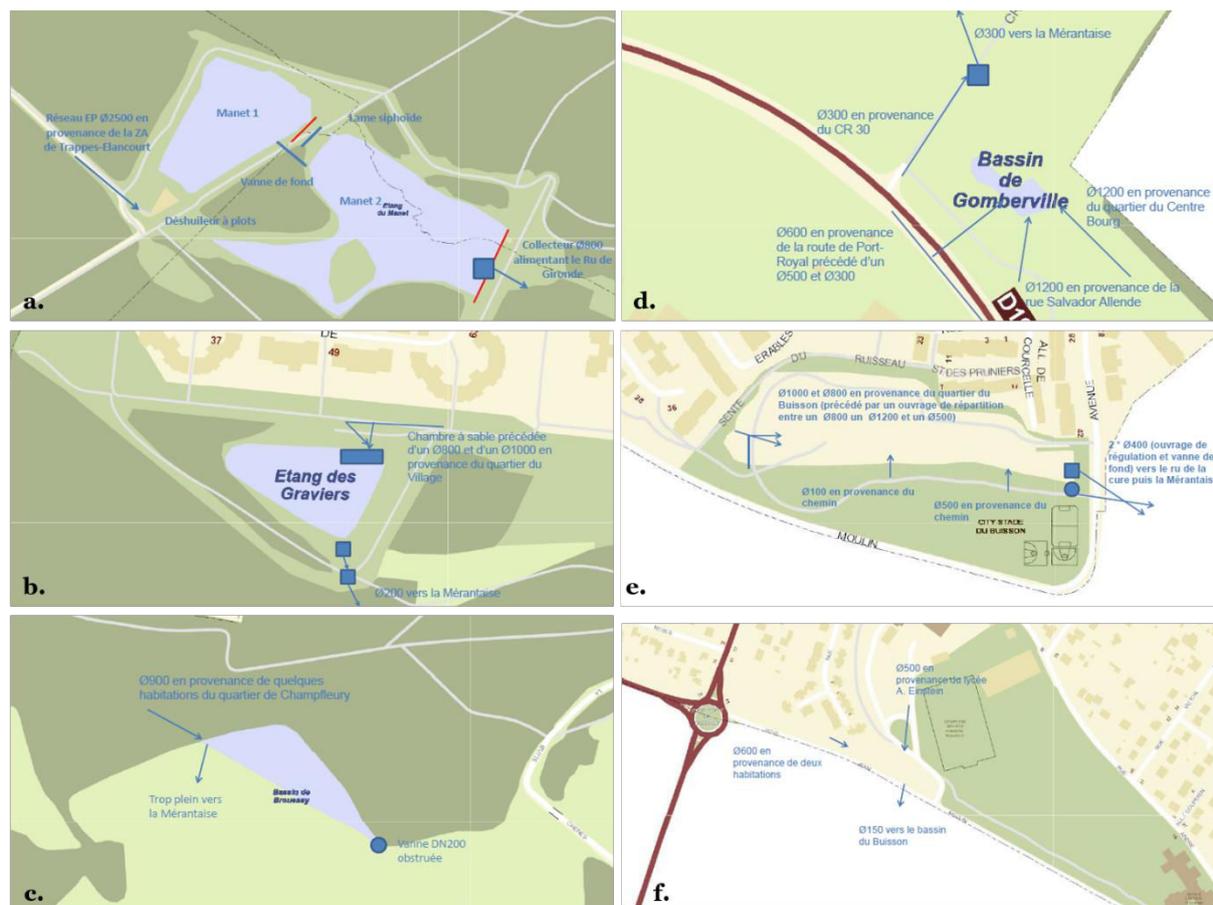


Figure 8.5 : Cartographie des 7 bassins de rétention de la vallée de la Mérantaise géré par la CASQY. Leur localisation est précisée sur la figure 8.2. a. Étangs du Manet (sources de la Mérantaise) ; b. étang des Graviers ; c. étangs de Brouëssy ; d. bassin de Gomberville ; e. bassin du Buisson ; f. Chevincourt (sources : CASQY).



Figure 8.6 : Configuration actuelle de la retenue du bassin de la Mérantaise à Gif. Aménagement d'une zone humide et d'un chenal « restauré » (crédits : D. Fekih, 2016)

2. Les ravines, preuves du ruissellement important dans le bassin versant

Plusieurs ravines ont été identifiées dans le bassin de la Mérantaise, incisant localement les versants et le fond de vallée. Celles-ci sont récentes et témoignent de l'influence de l'urbanisation sur le fonctionnement hydrosédimentaire des rivières (Grosprêtre, 2011). En effet, l'intensification du ruissellement causé par la concentration des écoulements dans les réseaux de drainages artificiels a entraîné la formation de ravines (Wasson et al., 1998). En Russie, dans les fonds de vallée des affluents de la rivière Siem, Bondarev et Gregory (2002) ont par exemple démontré que l'urbanisation avait considérablement augmenté l'intensité d'érosion des ravines. Celles-ci se sont retrouvées connectées au réseau hydrographique et ont délivrés d'importants volumes de sédiments dans le cours d'eau principal. Cette tendance a également été observée dans le contexte de la vallée de la Mérantaise.

Dans le cas de notre zone d'étude, sept secteurs présentant des ravines imposantes ont ainsi été relevés sur le terrain (**Figure 8.7** et **Tableau 8.3**). Ils correspondent pour une grande majorité (exception faite des secteurs 5 et 6) à une incision dans les dépôts superficiels des versants par concentration des ruissellements sur les plateaux agricoles ou les zones urbanisées. Les ravines sont pour la plupart à sec en temps normal et sont réactivées à l'occasion de fortes pluies (**Figure 8.8**). La ravine 4 est très souvent en eau car elle évacue les eaux des terrains du Golf de Guyancourt vers la Mérantaise. Mais les écoulements restent tout de même modestes car maîtrisés par les gestionnaires du Golf. Les ravines 1 et 2 drainent les eaux des surfaces agricoles et du réseau routier présents sur le plateau autour de Magny-les-Hameaux. Le secteur 3 correspond à de multiples ravines qui incisent les versants au niveau de Magny-les-Hameaux. Les ravines 5 et 6 correspondent aux anciens canaux de décharge du moulin des

Vassaux. Elles présentent aujourd'hui des traces d'incision qui laissent penser à un surcreusement postérieur à la fin de l'activité du chenal perché, et donc une réactivation récente de ces canaux devenus des ravines d'érosion. Enfin, la ravine 7 est notamment alimentée par une fuite de la rigole de Saint-Aubin qui réceptionne les eaux des surfaces agricoles du plateau de Saclay et de la commune de Saint-Aubin.

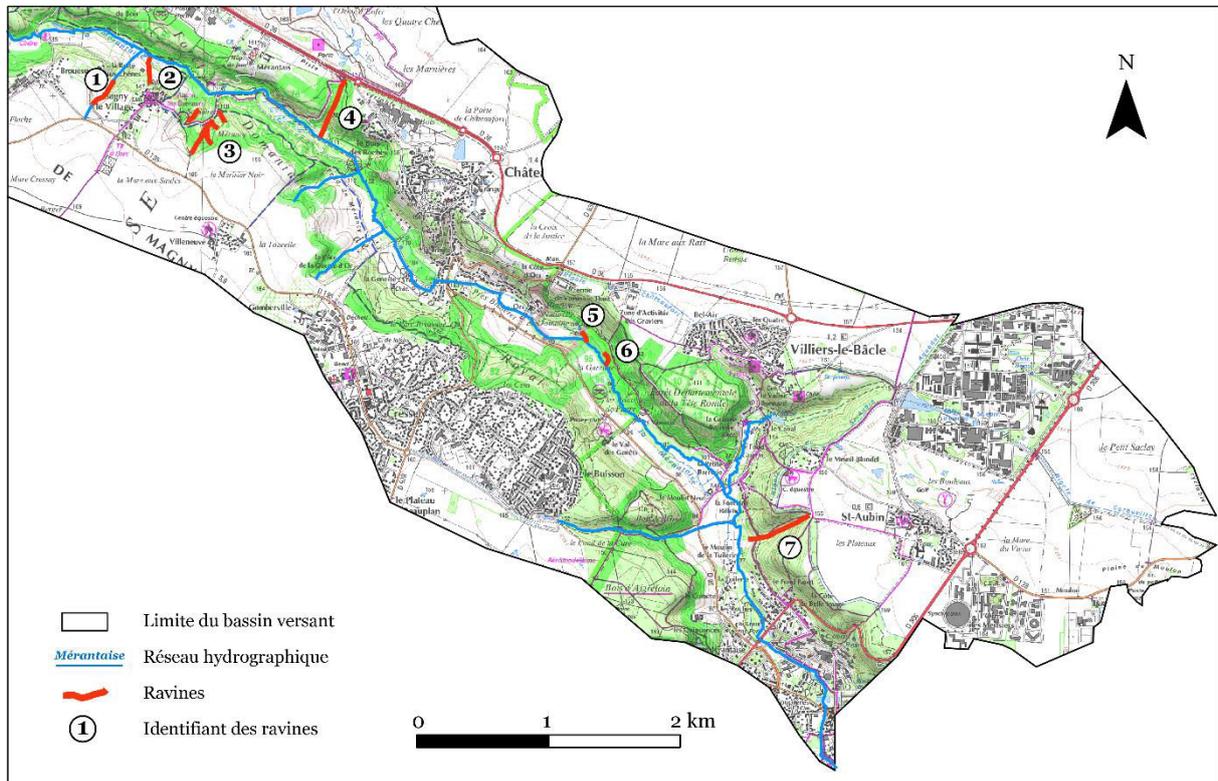


Figure 8.7 : Localisation des sept principales ravines du bassin versant de la Mérantaise



Figure 8.8 : Exemple de rigoles à sec (a.) et en eau (b.) sur les versants de la Mérantaise (Magny-les-Hameaux) (Crédits photos : D. Fekih, 2015).

Ces ravines présentent des profondeurs parfois importantes (**Tableau 8.3** et **Figure 8.9**). Elles ont été mesurées sur le terrain à l'aide d'une tige graduée tous les 10 cm. La profondeur moyenne correspond à la moyenne des profondeurs relevées au niveau de 5 transects répartis le long de toute la ravine, quand cela était possible, ou tout du moins sur un maximum de linéaire accessible. Comme le montre le tableau suivant (**Tableau 8.3**), 4 ravines (ou secteurs de ravine) sur 7 possèdent des profondeurs maximales importantes, supérieures ou égales à 1.70 m. La ravine n°2, la plus marquée de toutes, est caractérisée par un tronçon particulièrement incisé de près de 2.80 m de profondeur (**Figure 8.9. a. et b.**). Cependant, cette incision spectaculaire est principalement due à la géologie très érodable du versant. Essentiellement sableux et limoneux, l'eau a facilement creusé dans le substrat et fragilisé les structures anthropiques mises en place pour gérer le ruissellement, laissant aujourd'hui un trou béant de près de 4 m de large dans le versant, sur environ 6 m de long. La ravine se restreint ensuite mais reste très incisée.

Ravines	Longueur (m)	Profondeur moyenne (m)	Profondeurs max. (m)
1	≈ 350	0.80	1.45
2	≈ 225	1.90	2.80
3	≈ 550 (cumulé)	1.20	1.70
4	≈ 490	1.30	1.85
5	≈ 100	0.80	1.00
6	≈ 130	0.90	1.20
7	≈ 500	1.20	1.70

Tableau 8.3 : Caractéristiques morphologiques des 6 ravines du bassin de la Mérantaise.



Figure 8.9: Ravines d'érosion dans le bassin de la Mérantaise. a. et b. : ravine n°2 ; c. ravine n°1 ; d. et e. ravine n°7 ; f. : ravine n°4.

Par ailleurs, le long de ces ravines se trouvent des ouvrages, bien souvent des buses (busage court) ou des ponts, qui acheminent et concentrent les écoulements ruisselant des versants et des plateaux. Ces ouvrages portent tous des marques d'érosion et d'affouillement, plus ou moins importantes. Cette déstabilisation des infrastructures d'écoulement peut-être telle que certains ouvrages se retrouvent déconnectés des écoulements par le creusement de la ravine. C'est le cas à l'aval de la ravine n°4 où la buse ouverte censée acheminer les eaux de versant est désormais surélevée d'environ 50 cm au-dessus de la ravine (**Figure 8.10**).



Figure 8.10 : Buse déconnectée des écoulements à cause de l'érosion de la ravine en amont.

Enfin, outre les apports liquides, les ravines fournissent également la rivière en particules solides. Aucune mesure, ni suivi particulier, de cette charge solide n'ont été effectués durant cette étude, mais les nombreuses observations de terrain ont, pour autant, permis d'identifier un apport significatif de particules fines (sables, limons et argiles) provenant de l'érosion des sols agricoles des plateaux cultivés. Ce transfert d'éléments fins est à l'origine d'un ensablement des ravines souvent observé après d'importants épisodes pluvieux (Figure 8.11). Ce constat est plus spécifiquement été observé au niveau des ravines de Magny-les-Hameaux (n°2 et 3), ainsi qu'au niveau de la ravine alimenté par les fuites de la rigole de Saint-Aubin (n°7).

Il ne s'agit pas, dans ce paragraphe, de développer plus en détail les aspects relatifs aux apports liquides et solides du bassin versant et de la connectivité du bassin. Ils seront approfondis plus tard, lors de l'identification des facteurs de contrôle responsables du fonctionnement hydromorphologique actuel de la Mérintaise.



Figure 8.11: Exemple de ruissellement de sédiments fins (apports solides) dans les ravines n°3, issus de l'érosion des sols agricoles sur le plateau (a.).

3. La connectivité du bassin versant

Par ailleurs, nous avons cherché à connaître la connectivité du bassin versant de la Mérintaise afin de mieux connaître les dynamiques de ruissellement de ce contexte périurbain. L'analyse de la connectivité hydrologique permet de décrire les transferts de flux liquides ou solides des versants au cours d'eau en fonction des structures spatiales (occupation du sol et aménagements) contrôlant les écoulements à la surface ou en subsurface des versants (Creed et Band, 1998 ; Western et al, 2001 ; Hooke, 2003 ; Stieglitz et al., 2003; Lane et al., 2004 ; Croke et al., 2005 ; Brierley et al., 2006 ; Ocampo et al, 2006 ; Bracken et Croke, 2007 ; Tetzlaff, 2007 ; Viel, 2012). Cet aspect a été traité par deux étudiants de master de l'Université de Paris 7, D. Fekih (2016) et A. Vanneste (2017). Ce sont ainsi en grande partie leurs travaux qui sont retranscrits ici sous forme de synthèse.

3.1. Approche méthodologique

L'analyse de la connectivité hydrologique du bassin versant de la Mérintaise été envisagée à la fois en termes de dynamiques spatiales et d'évolutions temporelles. Il s'agissait notamment d'envisager une éventuelle réponse du bassin aux mutations paysagères que la vallée a connu dans les dernières décennies, à savoir l'urbanisation et le recul des surfaces agricoles.

L'étude de la connectivité de ruissellement de la vallée de la Mérintaise s'est déroulée en trois étapes successives et repose à la fois sur un diagnostic précis de terrain et de la modélisation de type SMA⁵⁷. Dans un premier temps, l'état de connexion des surfaces ruisselantes des versants a été déterminé *in situ* et par l'analyse d'un modèle numérique de terrain (topographie ; résolution 25 m, IGN), de photographies aériennes et cartes topographiques par relevé systématique : (i) du mode d'occupation du sol, (ii) des structures et surfaces facilitants les écoulements (surfaces urbanisées, réseau de drainage artificiel et routes), (iii) et de celles les contraignant (haies, talus, végétation, ...). Parallèlement, l'inventaire de toutes les arrivées d'eau dans la rivière (rejets) a été effectué afin d'identifier les entrées contrôlées des apports hydrologiques. Une fois intégrées dans une base de données géoreférencée, ces informations ont permis de dresser la cartographie et la typologie des connexions hydrologiques dans le bassin versant en fonction de l'occupation des sols, de la topographie et de l'organisation de la structure paysagère. La typologie des connexions hydrologiques des différentes parcelles du bassin est celle utilisée par V. Viel dans sa thèse en 2012 et illustré par le schéma suivant (**Figure 8.12**). Elle distingue :

⁵⁷ SMA : Système Multi Agent

- Les connexions dites « directes » (A.) : ces connexions hydrologiques les plus simples déterminent les espaces où la dynamique des écoulements de surface n'est pas modifiée par les différents réseaux anthropiques (parcelles connexes à un cours d'eau drainé).
- Les connexions dites « indirectes » (B.) : elles regroupent les surfaces sur lesquelles la dynamique des écoulements est modifiée par la structure paysagère. Ce sont souvent des parcelles éloignées du cours d'eau et connectée artificiellement par différents types de réseaux. Ont été distinguées les surfaces indirectement connectées par un bassin et celles connectées par un linéaire.
- Les surfaces «non connectées » (C.).

Étant donné l'objectif d'analyse diachronique de la connectivité hydrologique du bassin versant de la Mérantaise, ce travail de digitalisation et de relevé a été réalisé à deux dates différentes : 2015 par l'état actuel et 1947-1949 pour l'état passé. Le choix de cette période antérieure a été dicté, d'une part, par la disponibilité de la donnée cartographique et topographique⁵⁸, et d'autre part par la volonté de comparer la connectivité du bassin avant et après le développement urbain dans le bassin versant.

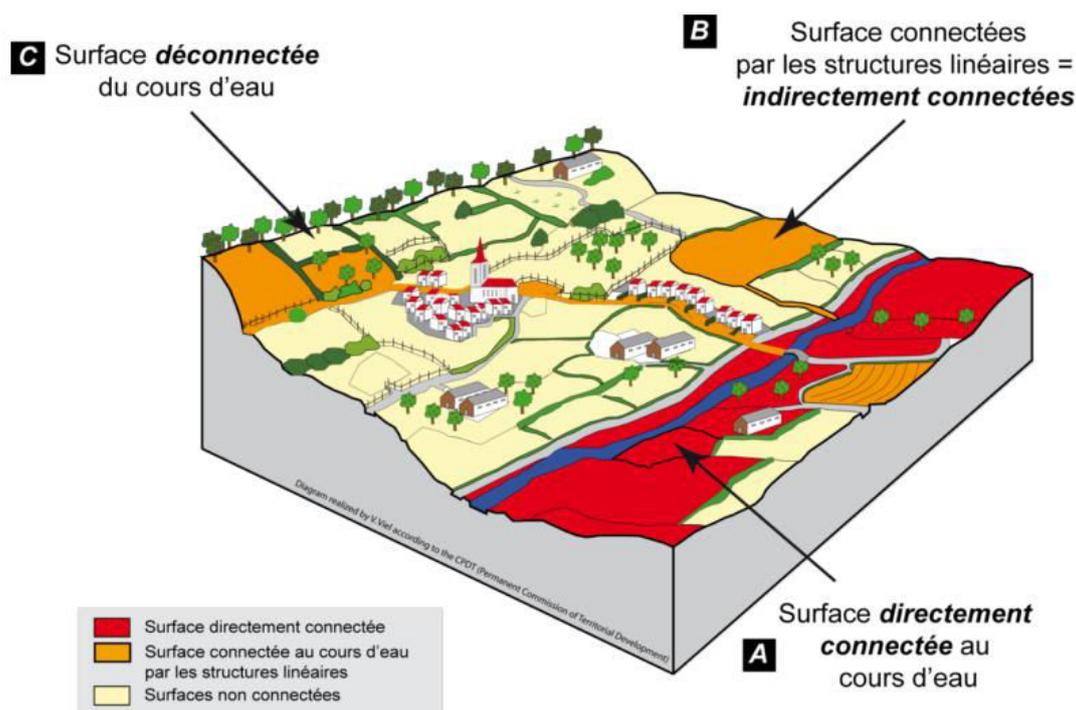


Figure 8.12 : Typologie des connexions hydrologiques dans un bassin versant (Viel, 2012 ; d'après Conférence Permanente du Développement Territorial, Pays de Herve, modifié)

⁵⁸ Des orthophotoplans de notre zone d'étude étaient disponibles et ont été fournis par l'IGN pour les années 1947 (Essonne) et 1949 (Yvelines)

Dans un second temps, le recours à un système multi-agent (SMA), nommé LASCAR (pour *Landscape StruCture And Runoff*) a permis de simuler le cheminement des écoulements de surface au sein du bassin versant (Vanneste, 2017) aux deux périodes considérées.

Le SMA LASCAR, développé par R. Reulier dans le cadre de sa thèse de doctorat (2015), est un modèle capable de reproduire les dynamiques spatiales des processus d'écoulement de surfaces à travers les différentes échelles de l'hydrosystème. Nous renvoyons le lecteur aux travaux d'A. Vanneste (2017) et R. Reulier (2015) pour connaître le fonctionnement détaillé du modèle. Nous ne présenterons ici que les résultats obtenus pour le bassin de la Mérintaise (Fekih, 2016 ; Vanneste, 2017).

3.2. Résultats de la connectivité du bassin de la Mérintaise

Les résultats obtenus de cette analyse ont permis de déterminer dans un premier temps la connectivité du bassin versant en 2015, puis de simuler la connectivité passée, avant urbanisation (1947-1949) grâce au SMA LASCAR. La connectivité a été observée pour les surfaces cultivées et pour les surfaces imperméables (urbain, réseau de drainage artificiel et réseau routier), partant du principe que les surfaces boisées et enherbées n'étaient pas des surfaces productrices de ruissellement.

3.2.1. Connectivité hydrologique en 2015⁵⁹

Ainsi, en 2015, les **surfaces cultivées (Figure 8.14)** représentent 30% de la superficie totale du bassin versant. Il s'agit du principal poste de mode d'occupation du sol. La typologie des connexions des terres cultivées du bassin fait apparaître que 45% d'entre elles ne sont pas connectées à la rivière, contre 55% connecté d'une manière ou d'une autre au réseau hydrographique (**Figure 8.13**). La forte part des surfaces agricoles indirectement connectées (49%) s'explique certainement par le fait que la plupart des parcelles sont raccordées au réseau de drainage artificiel, que ce soit les fossés, les rigoles ou les drains agricoles (Fekih, 2016). La faible part des surfaces directement connectée (6%) s'explique *a priori* par la présence importante de surfaces filtrantes le long du cours d'eau (prairies et bois). La localisation des surfaces déconnectées de la Mérintaise sur les versants nord laisse supposer au rôle d'interception des rigoles du plateau de Saclay (**Figure 8.14**). Pour rappel, les surfaces de cultures se concentrent sur les plateaux et les fonds de vallée sont essentiellement occupés par des prairies et des bois. Cette organisation des paysages de la vallée explique en partie que la connexion des surfaces cultivées soit limitée.

⁵⁹ Les résultats et conclusion présentés ici à propos de la connectivité actuelle (2015) du territoire de la Mérintaise sont issus du travail de recherche (M1) de D. Fekih.

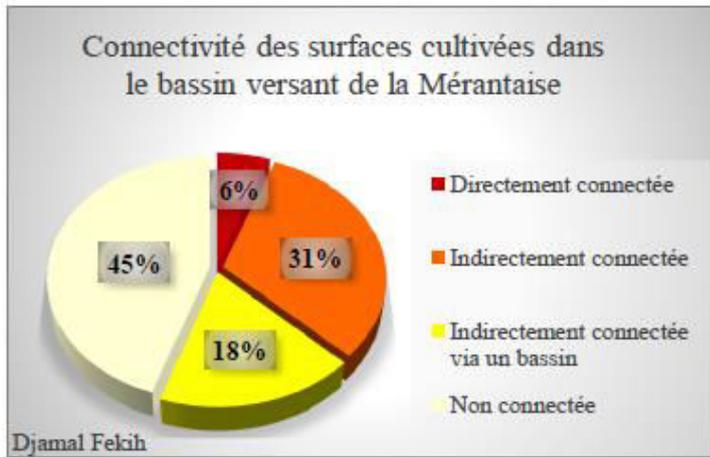


Figure 8.13 : Distribution statistique de la connectivité agricole du bassin versant de la Mérantaise (Fekih, 2016)

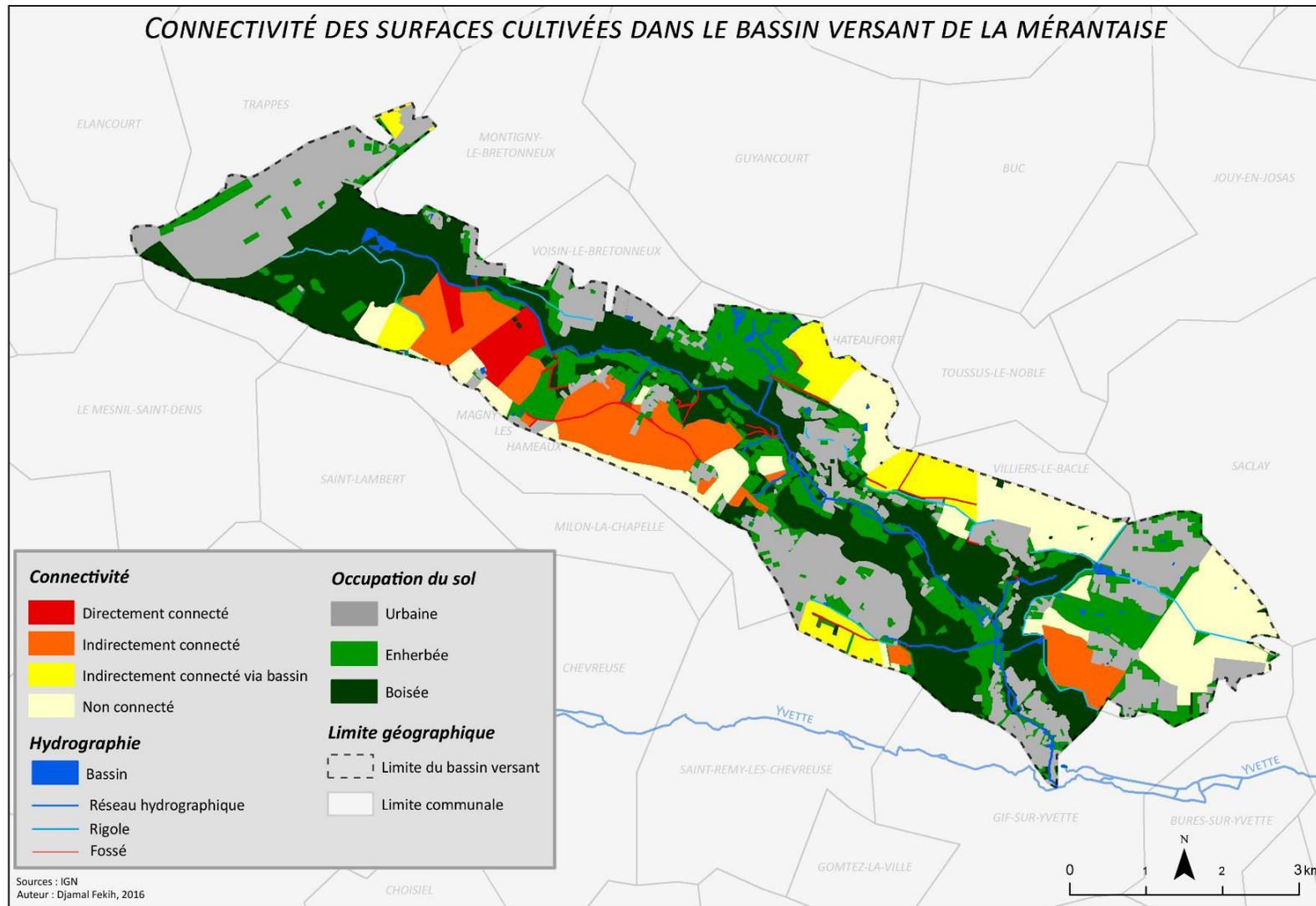


Figure 8.14 : Carte de connectivité hydrologique des surfaces agricoles du bassin de la Mérantaise (Fekih, 2016)

Les **surfaces imperméables (Figure 8.16)** concernent, quant à elles, 23 à 24 % de la superficie du bassin versant. De la même manière que les surfaces agricoles, une part non négligeable des territoires urbanisés (21%) est déconnectée du cours de la Mérantaise (**Figure 8.15**), possiblement sous l'effet des rigoles du plateau de Saclay qui interceptent une partie des eaux précipité dans le bassin versant. La grande majorité des eaux issues des surfaces imperméables sont indirectement connectées à la rivière et sont d'abord captées par les bassins de rétention présentés *supra* (cf. 1.3.). Enfin, 21 % des eaux de ruissellement urbains sont directement évacuées dans la Mérantaise par le réseau d'assainissement (non collectif) des communes. Cela représente tout de même plus d'1/5^e du territoire.



Figure 8.15 : Pourcentage de la connectivité agricole du bassin versant de la Mérantaise (Fekih, 2016).

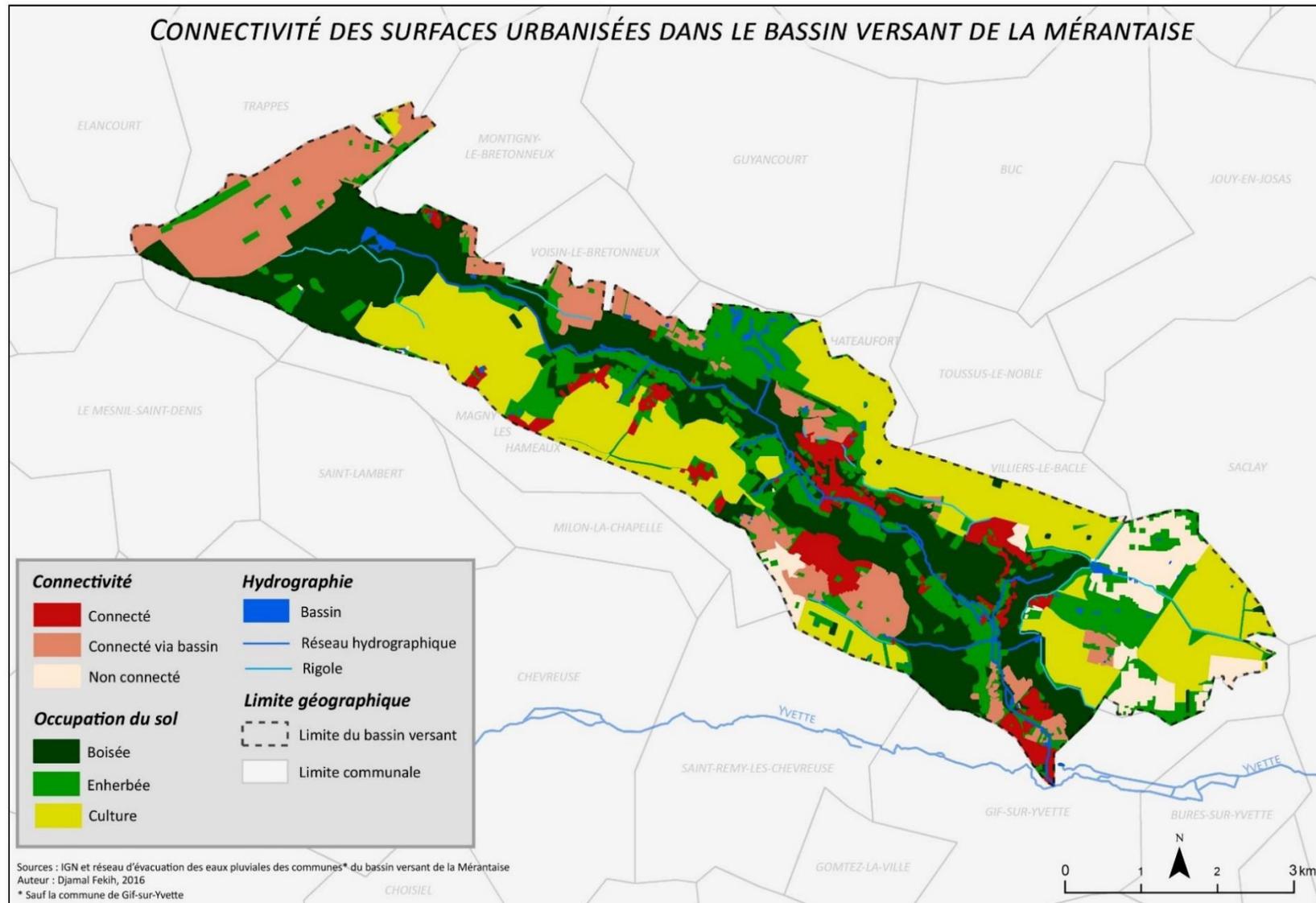


Figure 8.16 : Carte de connectivité hydrologique des surfaces imperméables du bassin de la Mérantaise (Fekih, 2016)

Enfin, l'analyse de la connectivité totale de toutes les surfaces productrices de ruissellement (cultures et urbaines confondues = 53% du territoire, **Figure 8.18**) fait apparaître que 34 % d'entre elles sont déconnectées de la Mérantaise pour 66% des surfaces contributrices des apports liquides à la rivière (**Figure 8.17**). Parmi ces 66%, la majorité (36%) est indirectement connectée par les bassins de rétention. Ces 36% de surfaces contributrices via les bassins, associées au 27% indirectement connectées via le réseau de drainage (routes, fossés, réseau d'assainissement), montrent l'importance de l'interférence anthropique dans les apports hydrologiques au cours d'eau.

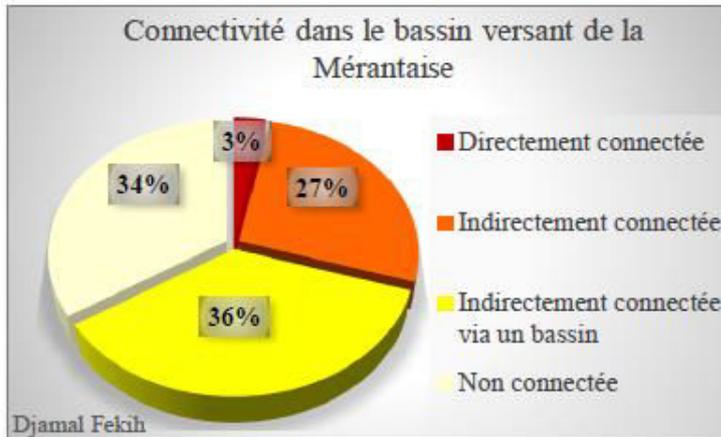


Figure 8.17 : Distribution de la connectivité des surfaces productrices de ruissellement dans le bassin versant de la Mérantaise (Fekih, 2016)

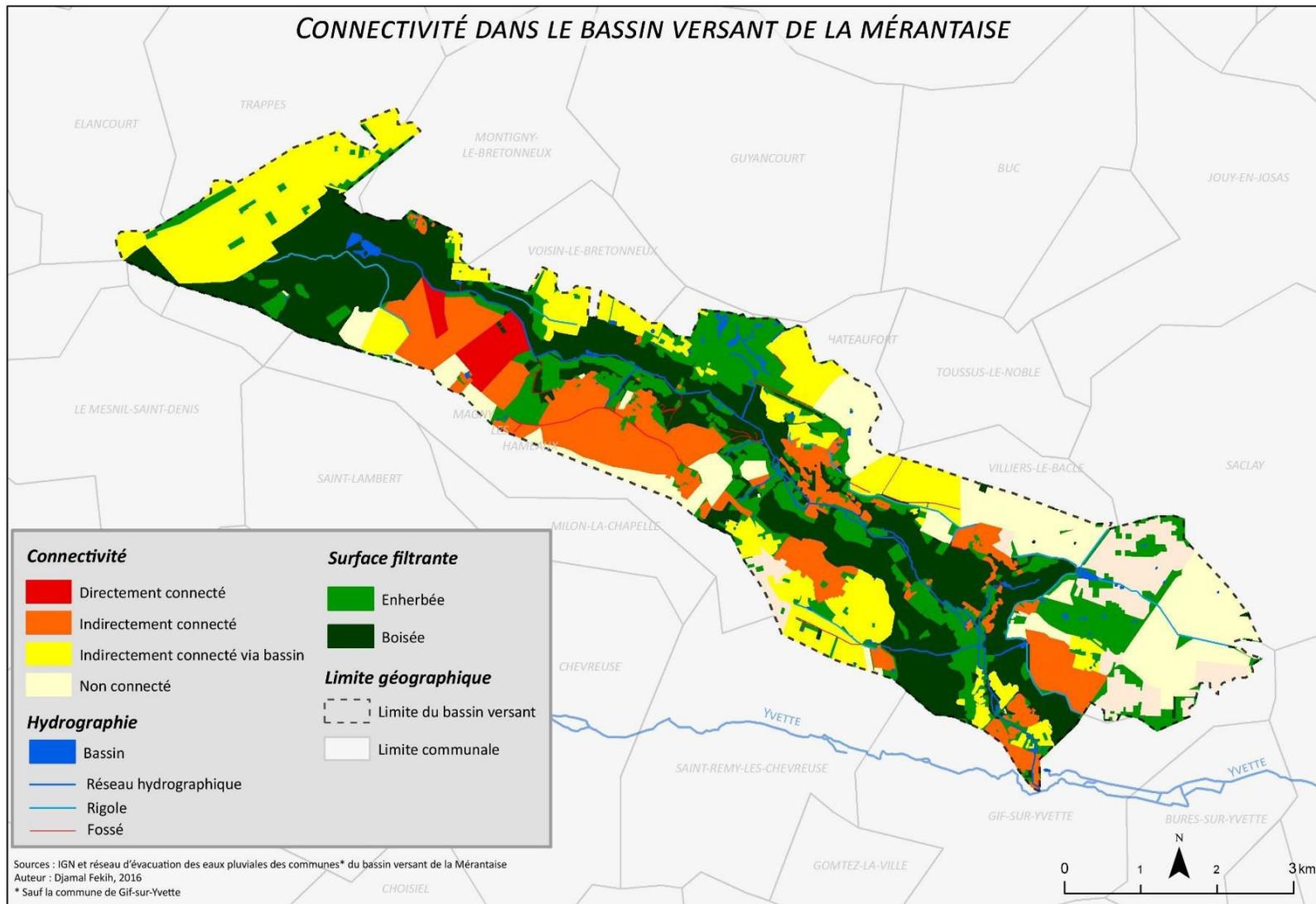


Figure 8.18 : Carte de connectivité de toutes les surfaces contributrices de ruissellements (agricoles ou urbains) (Fekih, 2016)

3.2.2. Reconstitution de la connectivité ante-urbanisation du bassin versant (1947-1949) grâce à la simulation SMA LSACAR

L'évolution du mode d'occupation du sol entre l'après-guerre et aujourd'hui a déjà été abordée plusieurs fois. Il ne s'agit donc pas ici de revenir sur les mutations observées dans bassin versant de la Mérintaise, à savoir l'augmentation des surfaces imperméables (zones urbaines et routes) avec le développement massif et rapide de l'urbanisation, l'augmentation relative des surfaces boisées et enfin le recul des terres rurales et agricoles. Nous proposons donc de concentrer notre propos sur les simulations de connectivité du bassin versant grâce au SMA LASCAR.

Le Système Multi Agent LASCAR (Landscape StruCTure And Runoff) développé par R. Reulier (2015) a comme objectif de reproduire les dynamiques spatiales des processus de surface aux différentes échelles de l'hydrosystème modélisé et en fonction des structures paysagères qui contrôlent les dynamiques de transfert hydrosédimentaire (haies, routes, surfaces enherbées, cultures, bâti, ...). Les données d'entrée du modèle sont donc la topographie, le réseau hydrographique et l'occupation du sol composé des différentes entités du paysage (les surfaces (cultivées, urbaines, enherbées, ...), les linéaires (réseau routier, fossés, haies, ...) et les entités ponctuelles (rejets des eaux pluviales, ...). Chaque élément, fixe (entités paysagères) ou en mouvement (ruissellement des eaux de pluies), est modélisés et mis en relation. Les agents gouttes (correspondant à un volume d'eau précipité sur une surface donnée) sont alors mis en mouvement, guidés (par le réseau de drainage artificiel, notamment) ou contraints (haies) selon la topographie (**Figure 8.19**).

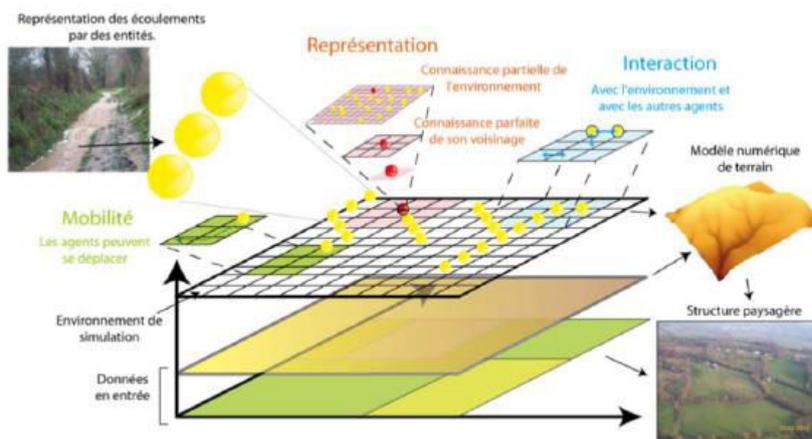


Figure 8.19 : Schéma conceptuel de l'approche des dynamiques spatiales des écoulements à partir d'un système multi-agent (Reulier, 2015)

Précisons que pour des raisons méthodologiques relatives au fonctionnement du modèle, le bassin versant considéré par A. Vanneste et R. Reulier pour la digitalisation du mode d'occupation du sol de la période 1947-1949 est celui de 2015. Il ne correspond donc pas réellement au bassin versant actif jusque à l'époque avant le développement de l'urbanisation. En effet, comme nous l'avons déjà

expliqué, les limites du bassin versant actuel ne respectent plus la réalité topographique du territoire car les réseaux d'eaux pluviales des villes, en particulier Saint-Quentin-en-Yvelines, sont gérés artificiellement sans toujours tenir compte du relief du bassin versant.

La digitalisation de l'occupation des sols en 1947-1949 a permis de localiser et quantifier la part de surfaces ruisselantes (cette fois-ci tous les types de surfaces sont considérés). La connectivité maximale du bassin versant est de 34% (12 km²) et concerne essentiellement les zones agricoles des plateaux et des versants (**Figure 8.21**). Les résultats de la simulation de la connectivité hydrologique du bassin de la Mérintaise en 1947-1949 montrent que les surfaces directement connectées au réseau hydrographique ne représentent que 2.5% du bassin versant. La grande majorité de celles-ci se trouvent assez logiquement en fond de vallée, au plus près de la rivière : les quelques terres cultivées sont les plus ruisselantes d'entre elles (68%), suivie des surfaces boisées (12.49%) et enherbées (14.48%) (**Figure 8.20** et **Figure 8.21**). Les surfaces urbaines sont encore peu nombreuses à l'époque et essentiellement situées sur les plateaux et en haut de versant. De ce fait, elles ne contribuent directement à la rivière qu'à hauteur de 0.10% du bassin versant (soit 4.13% du total des surfaces directement connectées à la Mérintaise).

Les surfaces indirectement connectées à la rivière sont majoritaires puisqu'elles représentent 31% du bassin versant (**Figure 8.21**). Encore une fois, les surfaces cultivées constituent l'essentiel de ce type d'apport (92% des surfaces indirectement connectées ; **Figure 8.20**). L'hypothèse la plus probable est que cette eau ruisselée issues des surfaces agricoles soit dans un premier temps interceptée par le réseau de drainage artificiel (réseau de drainage agricole), avant d'être restituée à la rivière par ce dernier au niveau de rejets concentrant les flux. De la même manière, mais dans une proportion beaucoup plus modeste (4.81% du total des surfaces indirectement connectées), les zones urbaines sont le deuxième contributeur d'eau indirectement ruisselée dans le réseau hydrographique (**Figure 8.20**). Les surfaces enherbées et boisées représentent à elles seules moins de 2% des surfaces indirectement connectées. Ce ratio est assez logique et témoignent d'une absence de drainage artificiel pour ce type de surfaces.

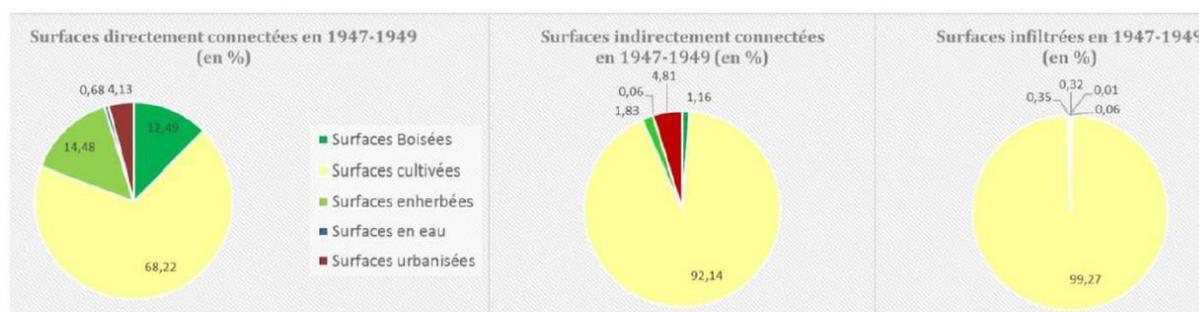


Figure 8.20 : Répartition de la connectivité hydrologique du bassin versant de la Mérintaise en 1947-1949 (A. Vanneste, 2017)

La simulation LASCAR modélise également les surfaces infiltrées. Celles-ci concernent 10% du bassin versant. Si les résultats statistiques montrent une écrasante part des surfaces agricoles, l'observation en détail de la distribution spatiale permet de préciser que ces surfaces sont généralement suivies en aval par des surfaces enherbées infiltrantes, ce qui peut avoir influencé les résultats de la simulation.

Enfin, le reste des surfaces du bassin versant (56.5%) est modélisé comme déconnecté du réseau hydrographique. Il s'agit essentiellement de surfaces enherbées et boisées localisées en tête de bassin et dans le fond de vallée. Elles ont une capacité d'interception et de ré-infiltration des eaux précipitées qui expliquent cette déconnection.

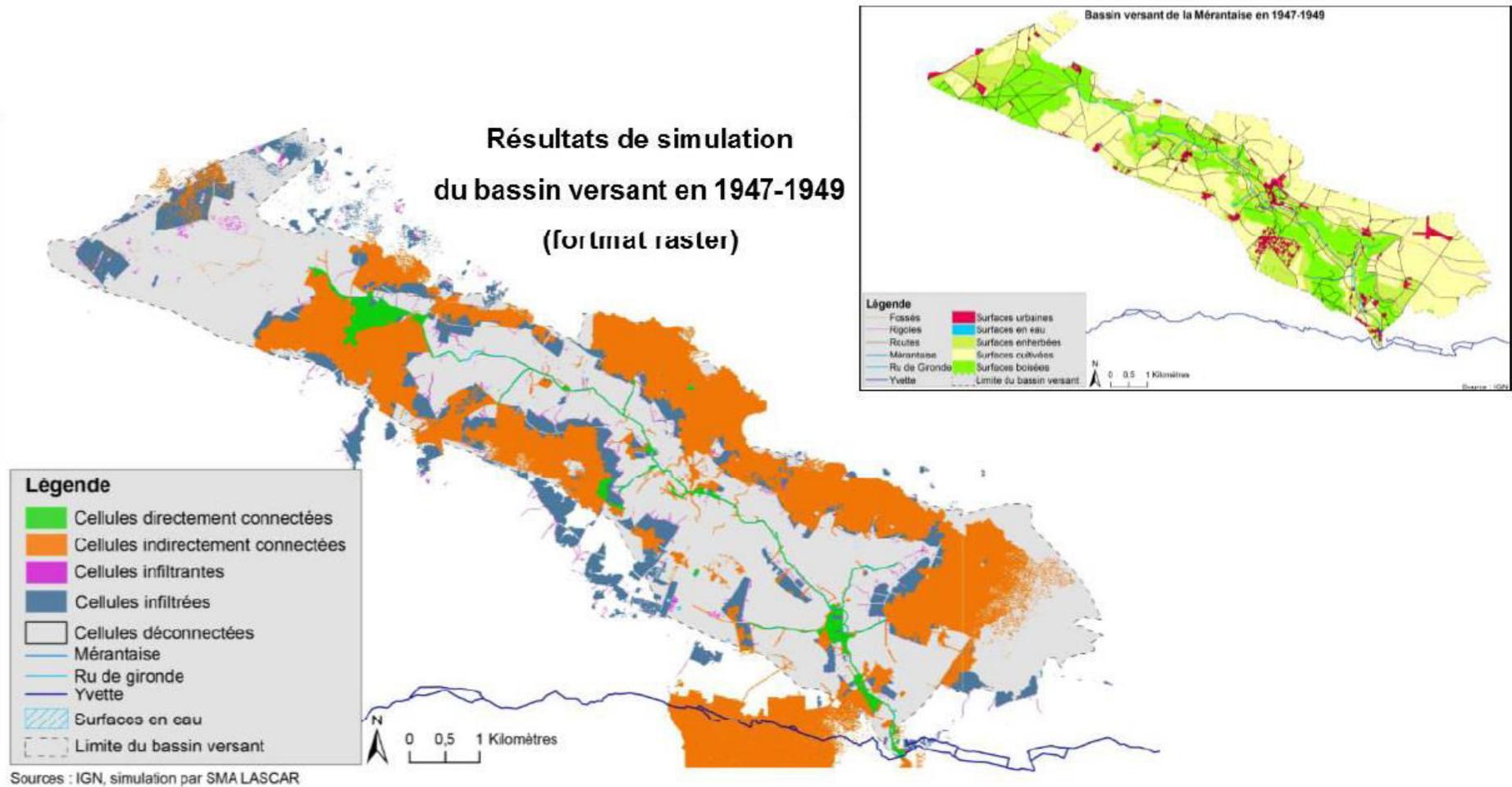


Figure 8.21 : Connectivité hydrologique des surfaces ruisselantes simulée pour la période 1947-1949, avant l’urbanisation du bassin (A. Vanneste, 2017)

3.2.3. Synthèse de l'évolution diachronique de la connectivité hydrologique du bassin versant de la Mérintaise

Bien que le travail distinction des types de surfaces connectées ou non au réseau hydrographique, effectué en 2016 par D. Fekih, et la simulation, réalisée par A. Vanneste en 2017, ne reposent pas totalement sur les mêmes traitements et analyses, il est possible d'en tirer plusieurs éléments de conclusion :

- La part des surfaces indirectement connectées à la rivière est importante aux deux périodes, mais l'augmentation des surfaces imperméables (urbanisation et réseaux routiers) les rend prépondérantes pour l'époque actuelle, indéniablement sous l'influence de l'urbanisation.
- Spatialement, la logique de distribution des surfaces connectées ou non au cours d'eau est restée relativement la même. Seule la tête de bassin, marquée par un fort développement des surfaces imperméables.
- Le réseau de drainage artificiel (routes, fossés et réseau d'assainissement) s'est intensifié sous l'effet l'attraction de la zone d'étude et de l'urbanisation. Les principales conséquences sont une augmentation de structures linéaires sur le territoire et une connectivité plus importante de surfaces. Les linéaires en fond de vallée rendent la dynamique du ruissellement plus complexe (Vanneste, 2017).
- Parallèlement, les points d'entrée du réseau dans la rivière sont plus nombreux. Ils se localisent principalement dans les secteurs médians et aval du bassin versant (Vanneste, 2017), entre Châteaufort et Gif-sur-Yvette, où les surfaces urbaines se sont multipliées et rejettent directement leurs eaux pluviales dans la rivière (réseau d'assainissement non collectif), où les surfaces boisées sont moins importantes et donc moins infiltrantes qu'en amont, et où les eaux précipitées et ruisselées sont plus génératrice de risque inondation.

Les perspectives concernant cette analyse de la connectivité hydrologique du bassin versant de la Mérintaise restent encore de pouvoir quantifier les flux hydriques écoulés dans le bassin et de pouvoir déterminer de manière chiffrée le rôle de l'urbanisation sur les apports hydrologiques à la rivière.

B. La signature de l'urbanisation dans le régime hydrologique de la Mérintaise

Constat a été fait que Notre hypothèse la modification des conditions d'écoulement dans le bassin versant expliquait pleinement les ajustements morphologiques actuels de la Mérintaise (une incision et un élargissement rapide et récent du chenal). Ces changements dans les apports hydrologiques à la rivière sont donc dus aux évolutions récentes du mode d'occupation des sols et en particulier le développement de l'urbanisation dans le bassin. En effet, on a précédemment observé une concordance temporelle entre les dynamiques fluviales récentes et le caractère périurbain hérité des années 1980 (sortie de terre de SQY et étalement urbain de Châteaufort, Gif-sur-Yvette ou Villiers-le-Bâcle). Cette partie est donc l'occasion de caractériser la réponse hydrologique de la Mérintaise face aux changements récents des modes d'occupation du sol. Nous proposons ici la mise en évidence de quelques marqueurs de la signature hydrologique de l'urbanisation sur les flux liquides.

Pour ce faire, nous avons cherché à identifier une éventuelle tendance évolutive de l'hydrologie portant la signature du développement urbain dans le bassin versant. Ce dernier ayant débuté au début des années 1980 dans le cas de la Mérintaise, il s'agit donc de regarder sur le « temps long » (40 ou 50 ans) l'évolution des chroniques de débits de la rivière. Malheureusement, cette donnée n'est pas disponible pour notre site d'étude puisqu'il n'a été équipé de stations hydrométriques qu'à partir de 2010 (au Bois des Roches) et 2012 (à Ors). Nous avons donc choisi de baser notre analyse sur les chroniques de crues de la station hydrométrique disponible la plus proche, à savoir celle de Villebon-sur-Yvette. Cette station de mesure, dont les données sont accessibles par la Banque Hydro (<http://hydro.eaufrance.fr/>), couvre une longue période de suivi de 51 ans, entre 1968 et 2018. Cependant, nous avons travaillé avec les débits instantanés au pas de temps horaire qui eux ne sont disponibles qu'entre 1983 et 2018.

1. Les effets de l'urbanisation sur l'hydrologie : éléments de tendance sur le long terme

1.1. Contexte de développement urbain à Villebon-sur-Yvette

La sonde hydrométrique de Villebon-sur-Yvette est l'unique station de mesure sur l'Yvette. Elle est située dans un environnement essentiellement urbain, à environ 7.5 km en aval de la confluence de l'Yvette avec la Mérintaise. Elle draine un bassin versant de 224 km² dans lequel est compris le bassin de la Mérintaise. Celui-ci compte pour 16% du territoire considéré. Le contexte géographique qui caractérise les abords et l'amont de la station de Villebon-sur-Yvette est un peu différent de celui de la vallée de la Mérintaise. En effet, à l'inverse de notre site d'étude, la vallée de l'Yvette est aujourd'hui très urbanisée dans sa partie aval (où est située la sonde de Villebon-sur-Yvette) et est restée relativement

rurale à l'amont. Cependant, si la proportion de surfaces urbaines et de population n'est pas la même entre les deux bassins versants, la mise en place de l'occupation du sol actuelle suit les mêmes évolutions générales et ne connaît qu'un très léger décalage temporelle en faveur du bassin de l'Yvette à Villebon. En effet, à l'image de l'ensemble de la vallée de Chevreuse, la commune a connu un premier essor durant l'entre-deux guerres mais c'est surtout à partir des années 1960 et 1970 qu'elle voit sa population et la construction de lotissement augmenter considérablement (**Figure 8.22** et **Figure 8.23**). La commune des Ullis, située au sud de Villebon et d'Orsay, a par exemple été imaginée et créée dans les années 1970 sur des terrains pratiquement vierges de construction. Le territoire drainé jusqu'à la station hydrométrique de Villebon-sur-Yvette est donc aménagé un peu plus tôt et de manière beaucoup plus significative que le bassin versant de la Mérantaise. Par ailleurs, le développement urbain dans le bassin de l'Yvette à Villebon a été plus progressif que celui du bassin versant de la Mérantaise. Le réseau d'assainissement est géré en collectif et les eaux sont évacuées vers une station d'épuration. Pour autant, il permet tout de même une comparaison entre les deux bassins versants en termes d'évolution de l'hydrologie sous l'influence de l'urbanisation.

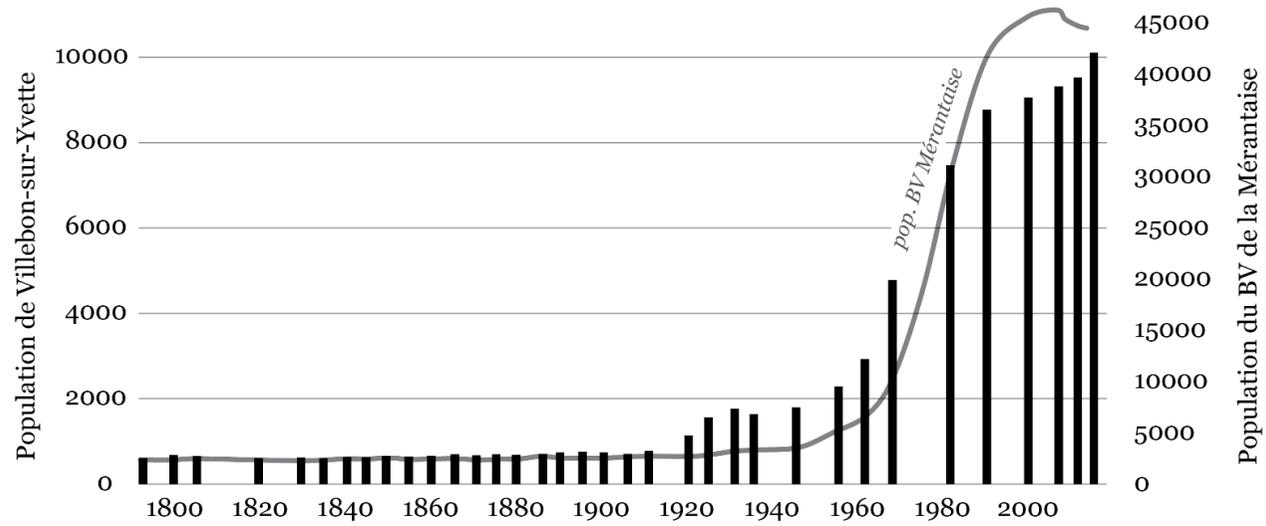


Figure 8.22 : Évolution de la population de Villebon-sur-Yvette (recensement de 1793 à 2015 ; base Casini de l'EHESS et INSEE)

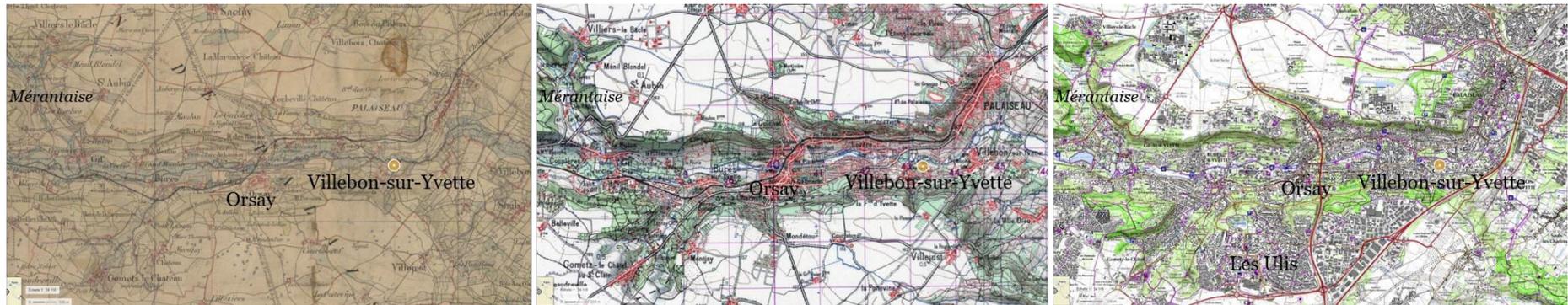


Figure 8.23 : Évolution urbaine de la vallée de l'Yvette au niveau de Villebon-sur-Yvette (sources : Géoportail)

1.2. Analyse de l'hydrogramme de la station hydrométrique Villebon-sur-Yvette

1.2.1. Caractéristiques principales du régime hydrologique

Les principaux débits caractéristiques de la station de Villebon-sur-Yvette sont présentés dans le tableau suivant (**Tableau 8.4**). Le module interannuel de l'Yvette, qui correspond à la moyenne pondérée des 12 écoulements mensuels sur l'ensemble de la période considérée, est de $1.31 \text{ m}^3/\text{s}$. Le régime hydrologique de la rivière suit des variations saisonnières assez classiques en contexte climatique océanique dégradé, avec un étiage atteint en septembre ($0.853 \text{ m}^3/\text{s}$) et les plus hautes eaux enregistrées en hiver, au mois de février ($2 \text{ m}^3/\text{s}$) (**Figure 8.24** et **Tableau 8.4**).

Station Villebon-sur-Yvette (H4243010)	
Nombre d'années de suivi (période)	51 ans (1968-2018)
Superficie BV (km ²)	224
Module interannuel (sur 51 ans) (m ³ /s)	1.31 [1.22-1.40]*
Q mensuel max (m ³ /s)	2.000
Q mensuel min (m ³ /s)	0.853

Tableau 8.4 : Quelques débits caractéristiques de la station de Villebon-sur-Yvette (Banque hydro). * les valeurs entre crochets désignent les bornes de l'intervalle de confiance (95%)

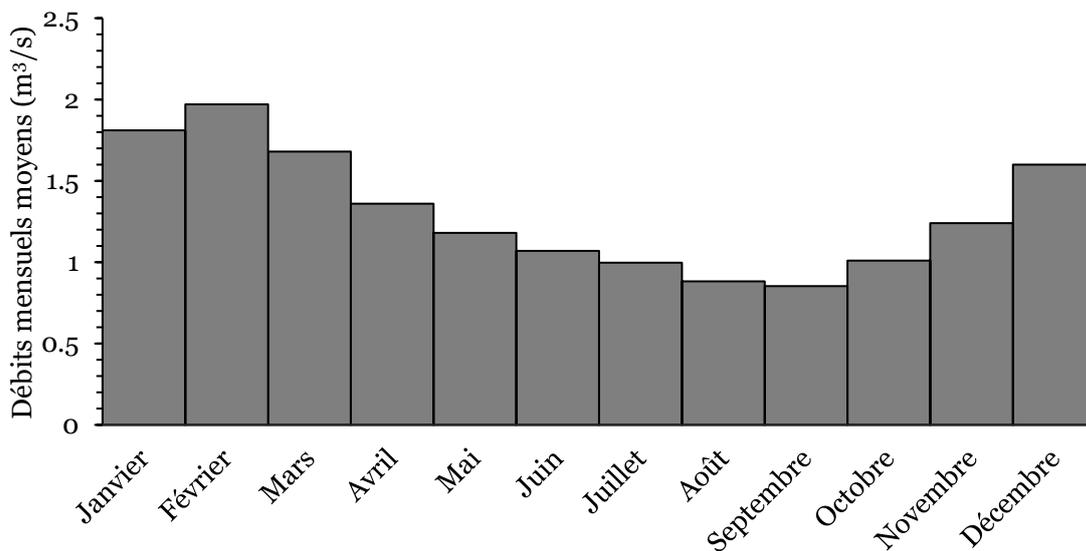


Figure 8.24 : Écoulements mensuels moyens pour la période 1968-2018. Données calculées sur 51 ans (Banque Hydro, station H4243010)

1.2.2. Tendance générale du régime hydrologique

La tendance générale du régime hydrologique de l'Yvette à Villebon a été observée sur la période 1983-2016 (32 ans) pour laquelle les débits instantanés sont disponibles. Les données de toutes les années ne sont pas toujours complètes, en particulier pour les années les plus anciennes, entre 1984 et 1997. Il peut parfois manquer 4 à 5 mois de données. Il existe, par ailleurs, des hiatus dus à des données visiblement défectueuses. Le traitement de la chronique de débits a été fait à deux échelles. Nous avons, d'une part, regardé les évolutions générales du régime hydrologique de l'Yvette pour toutes les valeurs de débits (des débits d'étiage aux débits de crues). Nous avons, d'autre part, isoler les pics des hautes eaux qui ne sont atteintes que 5% du temps sur la courbe des débits classés. Le choix de ce seuil a été déterminé afin de considérer un maximum de débits de crues significatifs, à partir de 3.45 m³/s. Seules les crues de plus de 2 h ont été prises en compte (363 crues recensées entre 1983 et 2016). Il manque une mise en regard de l'hydrologie avec la pluviométrie mais encore une fois il s'agit ici de pistes de réflexion.

L'hydrogramme présenté ci-dessous (**Figure 8.25**) ne montre pas, au premier abord, de tendance particulière dans l'évolution du régime hydrologique. Cependant, une observation plus attentive permet d'identifier plusieurs éléments caractéristiques de l'influence de l'urbanisation sur le régime hydrologique, ainsi que des ruptures dans les chroniques de débits.

Tout d'abord, l'intensité des débits de crues semblent plus importantes à la fin qu'au début de notre chronique. Une rupture paraît se dessiner à partir du milieu des années 1990. Alors que jusque-là les pics de crues atteignaient au maximum 12.5 m³/s, les débits enregistrés après 1995 témoignent d'une intensité plus grande, souvent supérieure à 15 m³/s et dépassant les 25 m³/s durant la crue de juin 2016. Par ailleurs, l'hydrogramme témoigne également d'une densification des pics de crues (Gregory, 1976) durant la deuxième partie de notre chronique (**Figure 8.25** et **Tableau 8.5**). On remarque une très légère tendance à la hausse du nombre de pics de crues durant la phase post-urbanisation, par rapport à la période « pré »-urbanisation. L'isolement des pics des crues atteintes ou dépassées seulement 5 % du temps confirme cette observation (**Figure 8.26**).

Deuxièmement, le niveau de base des débits diminue légèrement et les étiages sont plus prononcés au cours du temps, à l'image de ce qui a pu être observé dans la littérature (Rose and Peters, 2001, Chin, 2006). Si l'on compare les débits de base de nous deux périodes identifiées précédemment, il est en moyenne de 1.28 m³/s pour la première période (septembre 1983-août 1994) et de 1.05 m³/s pour la seconde période (septembre 1994-août 2016) (**Figure 8.25** et **Tableau 8.5**).

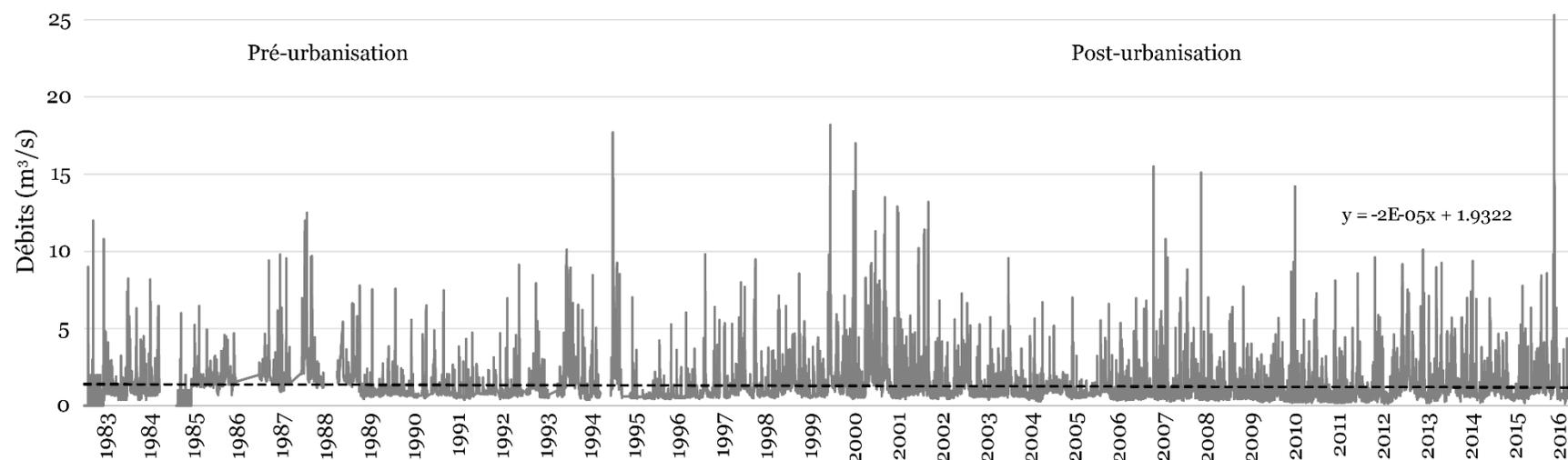


Figure 8.25 : Hydrogramme de la station de Villebon-sur-Yvette (débits instantanés) (Banque Hydro, station H4243010)

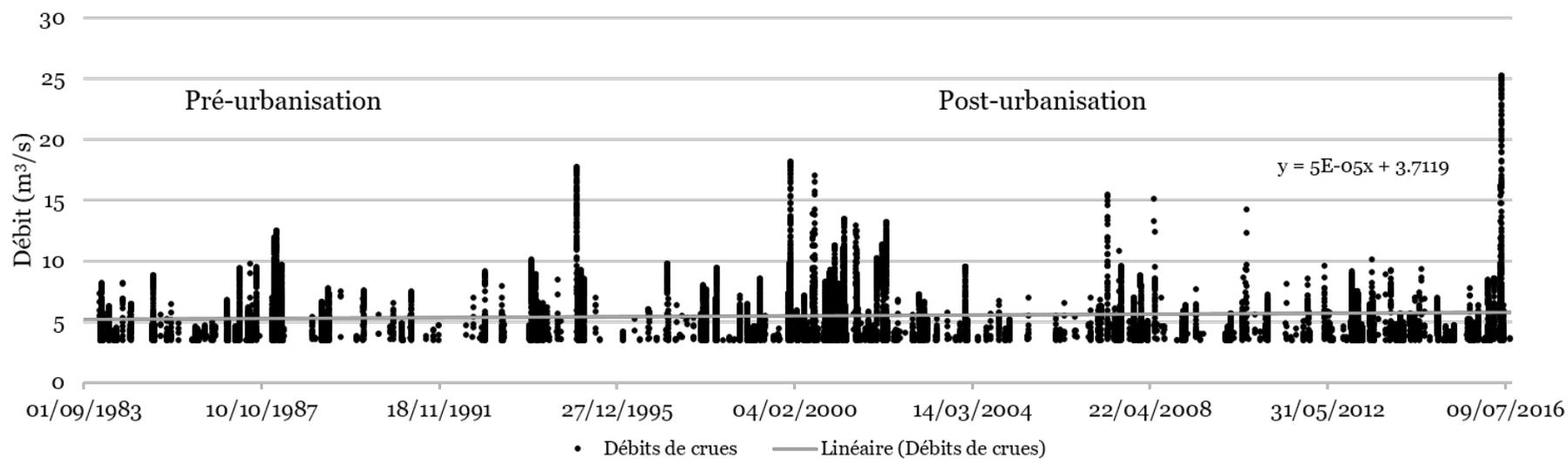


Figure 8.26 : Intensité et distribution des crues atteintes que 5% du temps entre 1983 et 2016 (débits instantanés) (Banque hydro, station H4243010)

Enfin, la littérature établie que l'urbanisation est responsable d'une diminution de la durée de crues (Konrad et al., 2005 ; Chin, 2006; Chin et al., 2013). Elles sont plus intenses et plus concentrées. Aussi, malgré une forte variabilité des valeurs de durée des crues (2h à 612h), le graphique suivant (**Figure 8.27**) montre une tendance à la diminution de la durée des crues durant la seconde partie de notre chronique de crues par rapport à la première période. La durée moyenne des crues pour la période 1983-1994 (11 ans) est de 41h pour 104 crues recensées. La durée moyenne des crues est de 34h pour la période 1995-2016 (21 ans) pour un total de 259 crues, soit 7 h en moyenne de moins pour plus du double de nombre de crues.

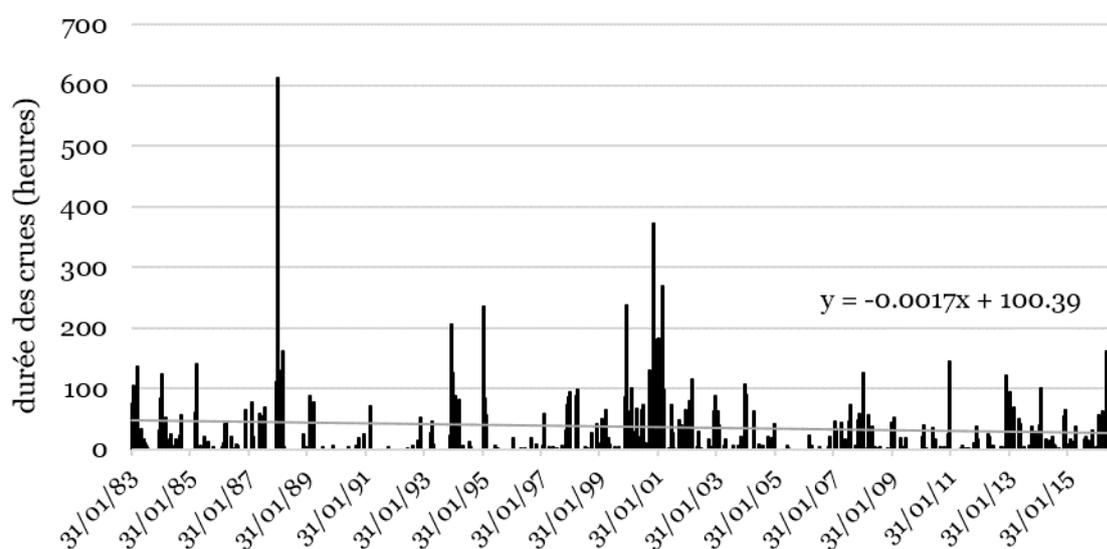


Figure 8.27 : Durée des crues de l'Yvette entre 1983 et 2016.

	Période 1 Sept. 1983 - août 1994	Période 2 Sept. 1994 – août 2016
Débit de base (m³/s)	1.28	1.05
Max des pics de crues (m³/s)	12.5 (12/02/1988)	25.3 (01/06/2016)
Nombre moyen de crues (>3.45 m³/s)/an	8.09 (soit 89 sur 12 ans)	12.45 (soit 274 sur 22 ans)
Durée moyenne des crues	41 h pour 104 crues	34 h pour 259 crues

Tableau 8.5 : Synthèse des paramètres hydrologiques témoignant de l'impact de l'urbanisation sur le régime hydrologique de l'Yvette.

Ainsi, il semble bien y avoir un lien entre l'étalement urbain de la vallée de l'Yvette à Villebon-sur-Yvette et la réponse hydrologique du bassin versant. En effet, un changement du régime hydrologique semble s'opérer juste après les années 1980, période de développement massif des

surfaces urbanisées (**Figure 8.22** et **Figure 8.24**). Le décalage chronologique entre les deux variables (écoulement et urbanisation) est cohérent avec ce qui est décrit dans la littérature pour les contextes urbains et périurbains, à savoir la dizaine d'années qui séparent le début d'une imperméabilisation des sols sur plus de 10% du bassin versant et la présence effective de nouvelles conditions hydrologiques contrôlées par l'urbanisation et susceptibles d'influencer les ajustements hydromorphologiques des rivières impactées (Hammer, 1972 ; Booth et Jackson, 1997 ; Bledsoe et al, 2001 ; Schueler, 1995 d'après Doll et al., 2002 ; Chin, 2006). Cette évolution apparaît également cohérente avec

2. Le fonctionnement hydrologique de la Mérantaise : influence des apports urbains

Après avoir identifié une influence de l'urbanisation à l'échelle de plusieurs décennies sur l'Yvette, nous proposons maintenant de caractériser succinctement le fonctionnement hydrologique de la Mérantaise. Notre analyse se base sur une chronique de débits couvrant 3 années hydrologiques de 2012 à 2015. La rivière n'est équipée en matériel de suivi hydrologique que depuis février 2012, à l'occasion d'un suivi des populations de truites *fario* par l'IRSTEA (étude pré-projet de restauration écologique) et de ce travail de caractérisation de l'hydromorphologie du cours d'eau. Une sonde de hauteur d'eau (mini Diver DI501 par Schlumberger) a été installée aux Prés Bicheret, en amont d'Ors (Châteaufort). Situé à mi-parcours de la rivière, à environ 7 km de la source, elle draine un bassin versant d'environ 21 km². Le débit été estimé à partir de jaugeages réalisés à différents niveaux d'eau (cf. Chapitre 2 et 3 pour plus de détails concernant la sonde hydrométrique). Les plus hautes eaux enregistrées atteignent 104.6 cm au droit de la sonde de mesure aux Prés Bicheret. Nous avons pu effectuer plusieurs jaugeages pour établir la courbe de tarage, pour des hauteurs d'eau allant de 17 à 60 cm de haut. Si cet intervalle de valeurs est assez bien renseigné (environ un débit jaugé tous les 10 cm), les débits obtenus pour les hauteurs d'eau supérieures à 60 cm sont estimés et potentiellement surestimés.

2.1. Comportement hydrologique et débits caractéristiques

La chronique des débits de la Mérantaise, entre septembre 2012 et août 2015, est présentée par l'hydrogramme suivant (**Figure 8.28**). Les débits ont été mis en regard avec les données de précipitations (mm) mesurées à la station météorologique de Toussus-le-Noble. Une partie de l'analyse du fonctionnement hydrologique de notre site d'étude a déjà été réalisé à l'occasion de notre article sur l'érosion des berges (Chapitre 7, B.3.2.). Nous renvoyons donc le lecteur aux résultats obtenus concernant le rôle de l'hydrologie sur les ajustements latéraux en cours de la rivière. Nous caractériserons ici le comportement hydrologique de la Mérantaise à l'aide de quelques débits caractéristiques (**Tableau 8.6** et **Tableau 8.7**). Puis, nous nous intéresserons plus particulièrement à la réactivité du bassin versant aux volumes d'eau précipité (relation pluie-débit).

Durant ces 3 ans de suivi, la crue la plus importante a atteint 3.141 m³/s et ne s'est produite qu'une seule fois, en décembre 2012. Le débit minimum enregistré a été de 0.017 m³/s en septembre 2014. Le module est en moyenne de 0.112 m³/s sur les trois ans, mais le débit moyen en hivers est légèrement plus important que le débit moyen d'été. Il est respectivement de 0.128 m³/s en hiver pour 0.091 m³/s en été. Le débit de base journalier a été identifié autour de 0.04-0.05 m³/s. Par ailleurs, la chronique des débits montre l'occurrence de pics de crues toute l'année, aussi bien en hiver qu'en été. Les crues d'orages estivaux ont d'ailleurs été parmi les plus importantes enregistrées durant les 3 années de suivi (1.504 m³/s ; 1.559 m³/s ; 2.102 m³/s ; 2.814 m³/s).

Nous nous sommes également intéressés aux débits instantanés classés qui permettent de déterminer l'occurrence de certains débits seuils préalablement définis. La valeur donnée pour chacun de ces débits retenus correspond à la moyenne des débits de l'occurrence (**Tableau 8.7**). Les extrêmes (maximum et minimum) ont été précisés et illustrent la forte variabilité des classes de débits, en particulier des plus forts. En effet, la rivière est caractérisée par de faibles débits et des intensités de crues proportionnellement très importantes. C'est un fonctionnement assez symptomatique de ce type de cours d'eau périurbains de faible énergie (Chin, 2006; Chin et al., 2013).

Débits caractéristiques (2012-2015)		
Max. (m³/s)	3.141 (20/12/2012)	
Min. (m³/s)	0.017 (20/09/2014)	
Moyen (m³/s)	0.112	
Médian (m³/s)	0.069	
Module (m³/s)	Été (mai-septembre)	0.091
	Hiver (octobre-avril)	0.128

Tableau 8.6 : Quelques débits caractéristiques de la Mérintaise sur 3 années hydrologiques (2012-2015)

Fréquence des débits classés (occurrence)	Valeurs des débits (m ³ /s)	Nombre d'occurrence sur la période (3 ans)	Durée moyenne d'un évènement
0.99 (débits atteints ou dépassés 1% du temps/3ans)	1.218 [0.752-3.121]	15	0.11 jours/an ou 2.67 h/an
0.95 (débits atteints ou dépassés 5% du temps /3 ans) <i>Q morphogène</i>	0.385 [0.359-0.408]	98	0.19 jours/an ou 4.47 h/an

Tableau 8.7: Débits journaliers classées, Q 0.99 atteints 1% du temps ; Q 0.95, atteints 5% du temps.

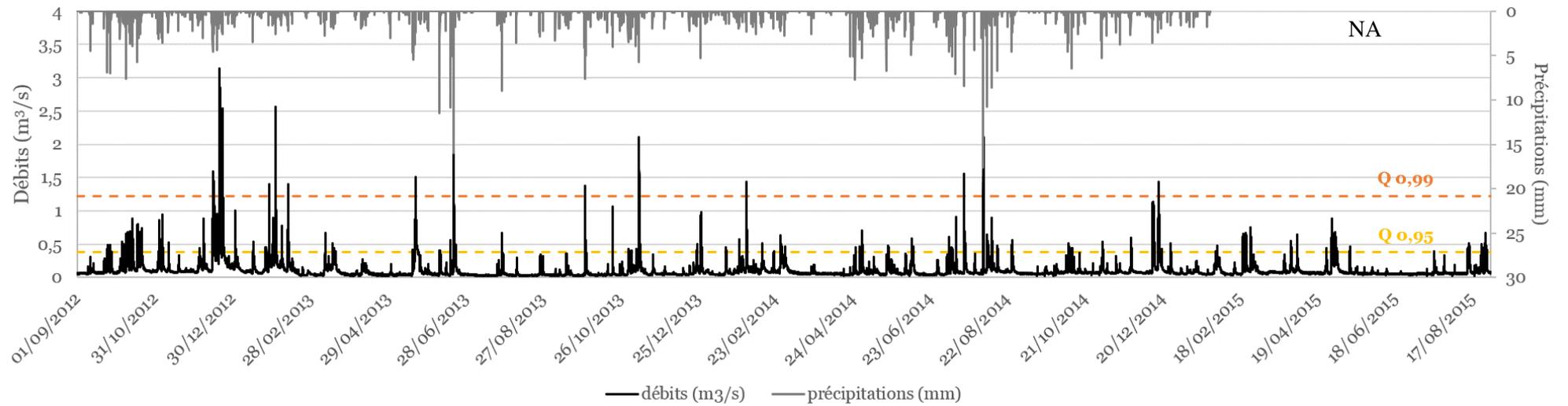


Figure 8.28 : Débits de la Mérantaise (m^3/s) et précipitations (mm). $Q\ 0,99$ = débit journalier atteint 1% du temps sur la période (3 ans) ; $Q\ 0,95$ = débit journalier atteint 5% du temps sur la période (3 ans).

Le débit à pleins bords est un débit caractéristique très souvent considéré dans la littérature lors de l'analyse du régime hydrologique des rivières (Bravard et Petit, 2000) car il constitue un débit-seuil significatif des dynamiques et des ajustements hydrosédimentaires, tant d'un point de vue géomorphologique (Leopold et al., 1964 ; Petit, 1984 ; Navratil, 2005) qu'hydrologique (Bultot et Dupriez, 1976). Cependant, ce débit à pleins bords ne nous a pas paru pertinent à prendre en compte pour notre étude car il n'est pratiquement jamais atteint du fait de la géométrie disproportionnée du chenal comparativement à la capacité hydrologique de la Mérintaise et aux caractères morphogènes de débits moins importants (Jugie et al., 2018). Nous avons plutôt cherché à identifier les débits les plus forts survenus pendant la période de suivi (Q 0.99) ainsi que les débits considérés comme morphogènes *a priori* (Q 0.95) (**Tableau 8.7**). Ce sont ces débits qui sont responsables des ajustements morphologiques et de la dynamique fluviale des cours d'eau.

Les débits les plus forts pris en compte sont ceux atteints ou dépassés 1% du temps durant les 3 années de suivi. Ils correspondent à la fréquence 0.99 des débits journaliers classés. Le débit moyen estimé pour cette classe de débits est de 1.218 m³/s, avec une forte variabilité des valeurs (de 0.752 m³/s et 3.121 m³/s). Ce débit-seuil a été atteint et/ou dépassé 15⁶⁰ fois durant les trois ans de suivi. De la même manière, les débits considérés comme morphogènes *a priori*, sont ceux atteints ou dépassés 5 % du temps. Ils ont été estimés à en moyenne 0.385 m³/s et ont été comptabilisés 98 fois entre 2012 et 2015.

2.2. Réactivité du bassin versant

Enfin, nous nous sommes intéressés à la réactivité du bassin versant de la Mérintaise face aux épisodes pluviométriques. Il est désormais admis que les petits bassins versants compris dans un contexte urbain et périurbain sont sujets à un temps de réponse relativement court entre un événement pluvieux et la montée/descente des eaux dans le chenal (Navratil et al., 2013; Miller et al., 2014; Lefebvre, 2015; Miller et Hess, 2017). Notre approche méthodologique a consisté à identifier :

- La **durée de l'épisode pluvieux (h) et de la crue associée** ;
- le **temps écoulé entre l'évènement pluvieux et la crue survenue en réponse (h)**. Trois temporalités ont été retenues : le début, le pic et la fin de la pluie/ de la crue ;

Les caractéristiques principales des conditions hydro-climatiques de notre zone d'étude ont déjà été présentées dans le Chapitre 2. Nous ne rendons compte ici que de la somme des précipitations pour les

⁶⁰ L'occurrence des pics de crues a été déterminée en comptabilisant les pics indépendants séparés d'au moins 48h.

années 2012 à 2015, ainsi que les extrêmes mensuelles (**Tableau 8.8**). Les données de pluies sont celles enregistrées à la station météorologique de Toussus-le-Noble à 1 km au nord de notre bassin versant.

	2012	2013	2014	2015	Normales (1981-2010)
Total (mm)	710	631.9	691	507.5	694.2
Max. (mm)	112.3 (octobre)	95.5 (novembre)	107 (août)	82.5 (septembre)	68.8 (octobre)
Min. (mm)	6.4 (août)	27.9 (juillet)	8.2 (septembre)	8.4 (juin)	50 (février)

Tableau 8.8 : Caractéristiques des précipitations annuelles de 2012 à 2015 à la station météorologique de Toussus-le-Noble. Rappel des normales sur 30 ans (1981-2010) à la station de Trappes (sources : Météo France).

L'analyse de la réponse de la rivière aux précipitations est illustrée par 3 « zooms chronologiques » permettant d'appréhender le cas d'une crue d'hiver (**Figure 8.29**), d'une crue d'orage estival (**Figure 8.30**) et d'une crue sous l'influence des bassins de rétention ou des éventuels apports hydrologiques par les rejets urbains (réseau d'eaux pluviales) (**Figure 8.31**). Les épisodes retenus ont été choisis pour leur représentativité, en termes de débits et de dynamiques hydrologiques.

	Illustration	Type d'épisode	Période de l'évènement (pluie + crue)	Q ^{moy} (m ³ /s)	Précipitations en cumulé (mm)
Crue 1	Figure 8.29	Crue hivernale	12/12/2014-15/12/2014	0.557	29.9
Crue 2	Figure 8.30	Crue estivale (2 épisodes successifs)	03/08/2014-04/08/2014	0.374	20.4
Crue 3	Figure 8.31	Crue estivale sous influence des bassins de rétention et/ou l'apport des rejets urbains directs	27/07/2013-28/07/2013	0.248	15.3

Tableau 8.9 : Caractéristiques des 3 crues considérées pour illustrer la réactivité du bassin versant.

Comme l'illustre chacun de ces cas, le régime hydrologique de la Mérantaise témoigne d'une très forte réactivité du bassin versant aux précipitations, que ce soit en termes d'intensité des événements ou de réponse hydrologique. En hiver (**Figure 8.29**), les pluies et les crues sont généralement plus longues qu'en été (**Figure 8.30**). L'épisode pluvieux dure ici 34h pour une crue de 67h40. Le débit maximum est atteint en 21h30. Il est de 1.142 m³/s, ce qui est assez fort et déjà supérieur au débit morphogène (en moyenne 0.385 m³/s). Les pluies représentent une hauteur d'eaux précipitées de 29.9 mm. Concernant le temps de réponse du bassin lors de cette crue hivernale (12/12/2014 au 15/12/2014), il s'écoule 9h entre le (premier) pic des précipitations (12/12/2014 à 19h00) et le (premier) pic de la crue (13/12/2014 à 03h55) (*Lag time*, Carter, 1961 ; Leopold, 1968, 1991 ; Seaburn, 1969 ; Brater and

Sangal, 1969 ; Gregory, 1974, 1976 ; Neller, 1988 ; Hardison et al.,2009). Les pluies ont déjà cessées depuis 33h45 lorsque la crue est pratiquement redescendue à son niveau de base. La montée des eaux est rapide (6h45), tandis que la décrue est plus lente et progressive (46h15). Les eaux redescendent dès l'arrêt des pluies.

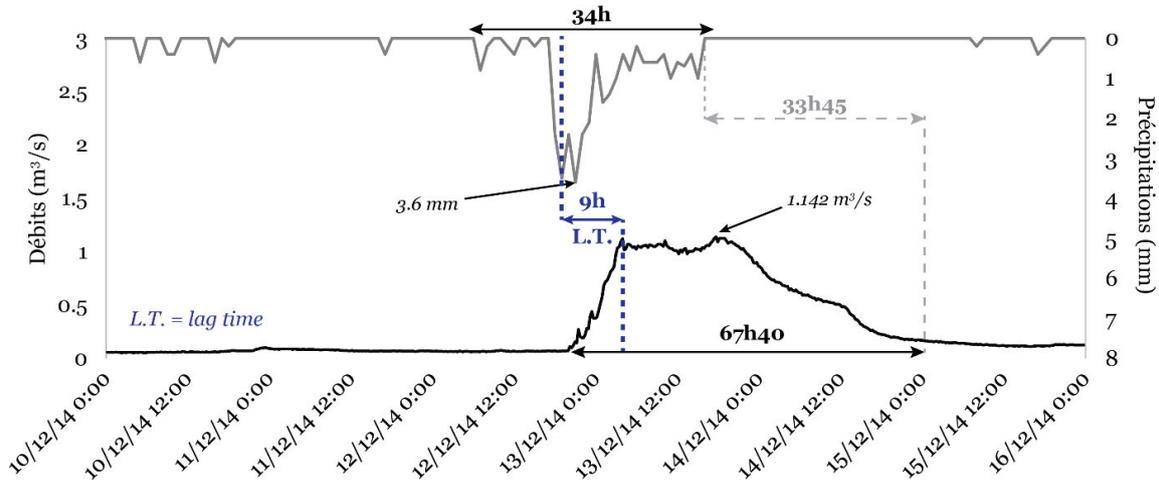


Figure 8.29 : Réactivité du bassin versant – crue n°1 – crue hivernale (12/12/2014-15/12/2014).

La réponse hydrologique du bassin versant en été s'avère plus rapide qu'en hiver (Figure 8.30). En effet, le temps de réactivité de la rivière, entre le maximum des pluies et le pic de la crue (*lag time*), est en moyenne de 2h, à chacun des évènements identifiés. Les eaux montent en une demi-heure pour le premier évènement ($Q_{max}=0.261 \text{ m}^3/\text{s}$, pour un débit de base de $0.065 \text{ m}^3/\text{s}$) et 1h15 pour la seconde crue, plus conséquente. A l'occasion de cette crue provoquée par un orage estival violent (20.4 mm d'eau précipitée en moins de 3h), un débit de $2.102 \text{ m}^3/\text{s}$ est atteint, soit un débit de faible fréquence (atteint et/ou dépassé moins d'1% du temps sur la période de suivi) et de très forte intensité. La décrue est également très rapide puisqu'il faut à peine 1h45, lors du premier évènement, et 6h pour le second, pour que les débits retrouvent leur niveau de base.

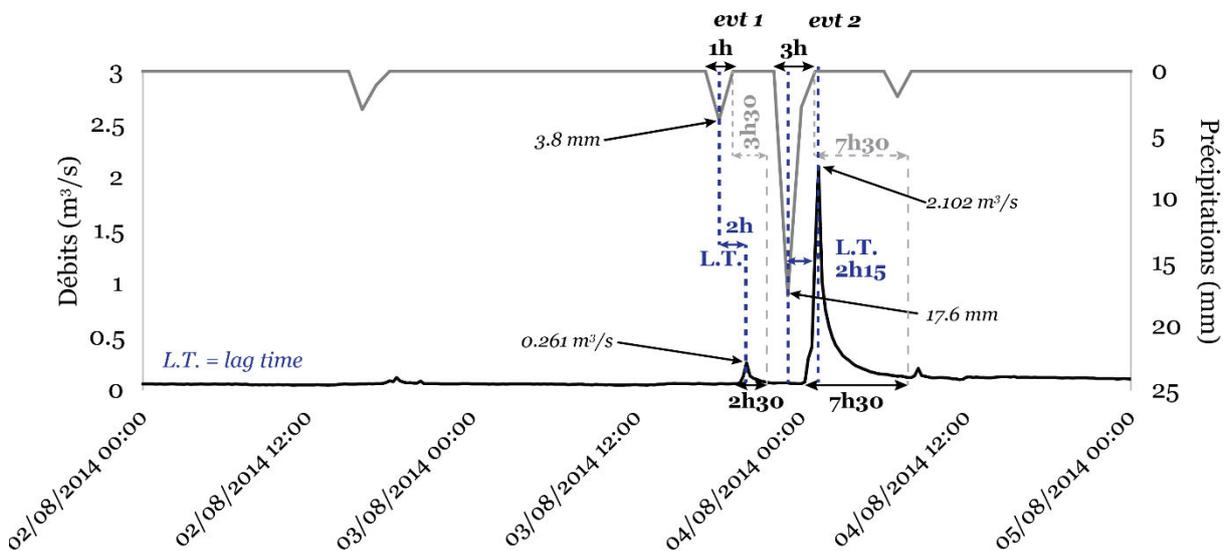


Figure 8.30 : Réactivité du bassin versant – crue n°2 – crues estivales (03/08/2014-03/08/2014 ; 04/08/2014-04/08/2014).

Enfin, nous proposons d'illustrer, par le cas suivant, l'exemple d'une crue pour laquelle il est possible d'observer l'influence des bassins de rétention et/ou d'apports hydrologiques par les rejets urbains directs, en l'occurrence celui du réseau d'assainissement des eaux pluviales de Châteaufort et du réseau routier des versants (**Figure 8.31**). En effet, nous avons vu précédemment qu'une grande part des eaux ruisselées contributrices des apports hydrologiques de la Mérantaise sont interceptées par les bassins de rétention. Nous ne sommes pas en mesure de déterminer la raison de ce lâcher d'eau en période estival, si ce n'est pour assurer un niveau d'étiage. Quoiqu'il en soit, cette situation a été observée pour différentes crues et présente donc un schéma récurrent dans le bassin de la Mérantaise. Lors de cet évènement, 15.3 mm de pluie sont tombés durant 4 heures le 27/07/2013. Le maximum des hauteurs d'eaux précipitées est de 9 mm. La rivière a très vite réagit puisqu'on note une montée des eaux 1h45 après le début des précipitations. Le débit maximum ($0.675 \text{ m}^3/\text{s}$) est atteint moins de 30 minutes plus tard. La décrue s'amorce très vite également et atteint un premier seuil de $0.137 \text{ m}^3/\text{s}$ au bout de 3h45. Cependant, un nouvel épisode de crue est observé (en bleu sur la **Figure 8.31**) sans nouvel épisode de pluie. Plus modeste du point de vue de l'intensité, cette crue atteint $0.376 \text{ m}^3/\text{s}$, soit pratiquement le seuil du débit morphogène déterminé précédemment (débit atteint ou dépassé seulement 5% du temps durant notre suivi). En revanche, la crue est beaucoup plus longue (31h), ce qui laisse penser que cet épisode est le fait d'un lâcher d'eau des bassins de rétention des étangs du Manet.

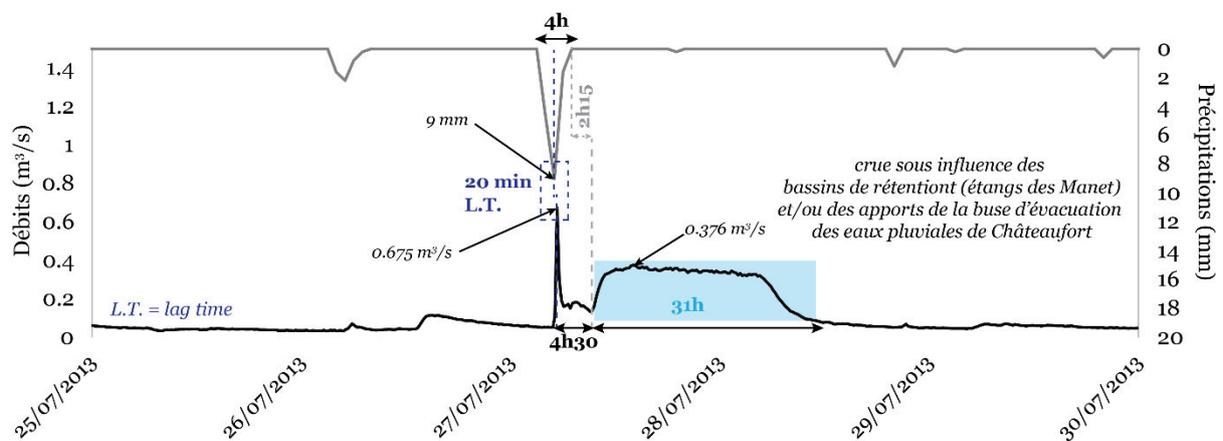


Figure 8.31 : Réactivité du bassin versant – crue n°3 – effet des bassins de rétention et des rejets d’eaux pluviales (27/07/2013-28/07/2013).

Ces trois exemples de crues témoignent donc de la forte réactivité du bassin versant de la Mérantaise qui s'explique à la fois par sa petite taille et par le rôle des réseaux de drainage artificiel. Cette réactivité s'illustre par l'intensité des crues proportionnellement au débit de base de la rivière. On observe un rapport d'au moins 1 à 40 entre le niveau d'eau moyen et les plus hautes eaux. Ce paramètre n'est cependant pas systématique (Lefebvre, 2015). Par ailleurs, la réactivité de la Mérantaise se définit également par le temps de réponse très court entre l'occurrence des épisodes pluvieux et la montée des eaux dans le chenal.

Ce constat va dans le sens des observations faites par K. Lefebvre dans sa thèse (2015). Travaillant à l'échelle du bassin versant de l'Yvette amont (Yvette et affluents dont la Mérintaise), elle constate également la forte réactivité des bassins et sous-bassins de l'Yvette aux épisodes pluvieux, ainsi que les temps de réponse généralement très courts des cours d'eau (< 6h).

Conclusion du chapitre

Ainsi, ce chapitre a permis de définir les principaux facteurs de contrôle responsables de la dynamique fluviale et des ajustements morphologiques actuels de notre site d'étude, à savoir les apports hydrologiques sous influence directe et indirecte de l'urbanisation grandissante dans le bassin versant. Plusieurs pistes de réflexion ont montré le rôle certain des surfaces imperméabilisées et des réseaux de drainage artificiel sur le ruissellement urbain et les modifications des conditions d'écoulement de la Mérintaise qui ont conduit à une incision et un élargissement significatifs du lit de la rivière.

Nos résultats s'avèrent assez cohérents avec la littérature s'intéressant aux modifications hydromorphologiques et les impacts environnementaux liés à l'urbanisation. Chin (2006)⁶¹ propose une synthèse bibliographique de référence sur le sujet à partir d'une centaine de cas d'étude à travers le monde couvrant plus de 50 ans d'investigation. Son article, *Urban transformation of river landscapes in a global context*, fait le point sur les conséquences du développement en court et à venir de l'urbanisation sur la trajectoire hydrosédimentaire des hydrosystèmes mondiaux, tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif. Elle aborde notamment l'impact de l'imperméabilisation des sols et du ruissellement urbain sur les réponses hydrologiques et morphologiques des cours d'eau étudiés qui nous intéresse ici. Aussi rappelle-t-elle que le développement de l'urbanisation est à l'origine de crues plus fortes, plus fréquentes, plus courtes et que le temps de réponse aux épisodes pluvieux est raccourci. Ses propos sont illustrés par plusieurs exemples précis situés aux États-Unis et en Angleterre (Tableau 8.10). Toutes les études citées par Chin (2006) témoignent de débits de pointes deux à quatre fois plus importants et d'une diminution d'un 1/5^{ème}, jusque à la moitié, du délai des réponses de crues aux apports hydrologiques dans le bassin versant. Dans le bassin versant de Rosebarn près d'Exter, Gregory (1976) a observé des volumes d'eau écoulés (ruissellement) 2 à 4 fois plus nombreux en contexte urbain, entraînant une augmentation significative de la fréquence des crues. Il comptabilisait 171 crues par an en 1969 pour 423 trois ans plus tard, en 1972. Rose et Peters (2001) ont, quant à eux, constaté que les événements hydrologiques survenus dans les cours d'eau urbains et périurbains d'Atlanta (Géorgie, États-Unis) étaient plus rapides et plus courts en contexte urbain (1 à 2 jours de moins de crue). De la même manière, le débit de base diminuait systématiquement de 35-40% et les étiages de 25-35% dans

⁶¹ L'article de Chin et al., 2013 reprend, complète et réactualise en partie cette étude.

les bassins versants urbains. Enfin, Konrad et al. (2005) ont démontré une plus faible variabilité interannuelle des débits. Les saisons hydrologiques sont moins respectées du fait du contrôle des écoulements par des systèmes de rétention et d'évacuation des eaux pluviales ruisselées. Dans la lignée de ces travaux, les études réalisées sur le bassin versant périurbain de l'Yzeron, en région lyonnaise, ont mis en évidence l'influence hydrologique des surfaces imperméabilisées et en particulier des rejets urbains des réseaux de drainage artificiels (Schmitt et al., 2007, 2011; Grosprêtre et Schmitt, 2008; Grosprêtre, 2011; Navratil et al., 2013). Ce contexte urbain et périurbain français présente également des caractéristiques propres à ces milieux, déjà énumérées : l'augmentation des débits de pointes et de la fréquence de dépassement des débits critiques de mise en mouvement de la charge solide, donc une augmentation du nombre annuel de crues morphogènes, une diminution du temps d'exposition du lit à des écoulements lents permettant le réarrangement des particules et l'adaptation des espaces aquatiques, ou encore un fonctionnement complexe du régime hydrologique du fait de l'artificialisation du ruissellement urbain et agricole dans le bassin (réseau de drainage artificiel : routes, fossés, réseaux d'assainissement) (Grosprêtre, 2011).

Il est cependant difficile de comparer ces résultats quantifiés aux nôtres car nous n'avons pas le même recul temporel permettant d'identifier le comportement des écoulements hydrologiques avant et après le développement de l'urbanisation dans le bassin versant. Les éléments présentés dans ce chapitre sont plutôt des pistes de réflexion donnant des ordres de grandeur de l'impact de l'urbanisation sur les modifications hydromorphologiques du bassin de la Mérantaise. Ils ouvrent des perspectives qu'il serait bien de développer plus tard, au-delà de ce travail de thèse. Il serait notamment intéressant d'essayer d'appliquer des modèles pour évaluer plus précisément la relation pluie-débit, mieux identifier le rôle de nombreux paramètres qui n'ont pas été abordés ici, ou du moins succinctement (le coefficient de ruissellement, l'évapotranspiration, l'infiltration des sols, les relations nappes-rivière, ...) (Andréassian et al., 2003; Lefebvre, 2015; Ebrahimian et al., 2016; Niemi et al., 2017). Une meilleure connaissance de l'évolution temporelle des conditions d'écoulements hydrologiques de surfaces et souterrains dans le bassin versant suite à l'urbanisation du territoire permettrait d'appréhender autrement la trajectoire hydrosédimentaire de la Mérantaise. D'autre part, la comparaison n'est pas toujours aisée car les petits cours d'eau périurbains de faible énergie sont encore trop peu représentés dans la littérature scientifique. Les études sont essentiellement concentrées sur les rivières urbaines et bien souvent avec des gabarits plus importants. Les cours d'eau de tête de bassin, pourtant de plus en plus concernés par le phénomène d'urbanisation, restent à mieux connaître.

Partie 3. État des lieux et compréhension des ajustements hydromorphologiques récents de la Méridionale

Location	Peak discharge	Lag time	Floods (frequency)	Seasonality/individual storm effects	Total runoff/water yield	Reference
Washington D.C.	+2–6× (80%)	–	+ mean annual floods 1.8×			Carter, 1961
Long Island, New York Santa Clara County, California	+123% direct runoff			+5% baseflow	+1.18× 1945; +1.70× 1958	Sawyer, 1963 Harris and Rantz, 1964
Sacramento, California				Summer baseflow 0.7×; January 4.1×	+2.29×	James, 1965
Jackson, Mississippi Pennsylvania	+4.5× mean annual flood +2–3× mean annual Q est. (50% paved)	–				Wilson, 1967 Leopold, 1968
Long Island, New York Detroit, Michigan NE Exeter, Devon	+; at least 250% > than forested +3–4× +2x	– flood peak widths –1/5 –1/2		+1.5× winter, 2.8× summer; small storms affected more	+ direct runoff 27% +%runoff>0.92	Seaburn, 1969 Brater and Sangal, 1969 Gregory, 1974
Harlow, Essex NE Exeter, Devon	+220% max monthly flood	–1/2	+3× summer floods +(171/yr 1969 to 423/yr 1972)			Hollis, 1974 Gregory, 1976
Harlow, Essex				+low flow, +summer flows	+water yield	Hollis, 1977
NE Exeter, Devon	+2–4×				+2–4× storm runoff volume	Walling, 1979
Atlanta, Georgia	+			+total in wet yr; –total and low flows in dry yr		Ferguson and Suckling, 1990
San Francisco Bay area	+2×	–				Leopold, 1991

Tableau 8.10 : Exemples de changements hydrologiques causés par l'urbanisation aux États-Unis et au Royaume-Uni (Chin, 2006)

Chapitre 9. QUEL(S) PROJET(S) DE RESTAURATION ÉCOLOGIQUE
POUR LES PETITS COURS D'EAU PÉRIURBAINS ?
ÉLÉMENTS DE DISCUSSION

A. : Des rivières de faible énergie mais pour autant dynamiques	p.377
B. : La restauration écologique, nouveau paradigme de la trajectoire des rivières	p.386
C. : Des projets durables de restauration écologique pour les petites rivières périurbaines ?	p.394

Introduction

Notre recherche doctorale s'articule autour de deux problématiques initiales. Il s'agissait, dans un premier temps, d'identifier et de caractériser la trajectoire historique et hydrosédimentaire actuelle d'une petite rivière périurbaine de faible énergie. En l'occurrence, la Mérantaise, un cours d'eau francilien situé au sud-ouest de l'agglomération parisienne, à la périphérie de la Ville-Nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines et de Gif-sur-Yvette. D'autre part, comme un grand nombre de cours d'eau, notre zone d'étude fait l'objet de projets de restauration de la continuité écologique pour répondre aux exigences institutionnelles et environnementales de la DCE. Or, ce concept voit, depuis quelques années, ces objectifs et ces méthodes de mise en œuvre discutés, critiqués et repensés, notamment par la communauté scientifique (par exemple: Downs et Gregory, 2004; Wohl et Merritts, 2007; Morandi et Piégay, 2011; Wohl et al., 2015; Lespez et Germaine, 2016; Barraud et Germaine, 2017;).

Ainsi, ce dernier chapitre sera, tout d'abord, l'occasion de revenir sur la capacité dynamique de la Mérantaise, qualifiée de cours d'eau de faible énergie (**A.**). Nous discuterons notamment du fait que, malgré cette appellation, les ajustements morphologiques identifiés sont le résultat d'une succession spatio-temporelle de changements survenus à l'échelle du chenal et du bassin versant ; à savoir la mise en place d'ouvrages hydrauliques (moulins, seuils, en dérivation) et de modifications des pratiques dans le bassin versant (urbanisation des plateaux, des versants et de l'exutoire). Nous terminerons donc ce premier point de discussion par une synthèse sur **l'héritage des aménagements hydrauliques anciens et de l'urbanisation sur les dynamiques qui caractérisent aujourd'hui la trajectoire de la Mérantaise.**

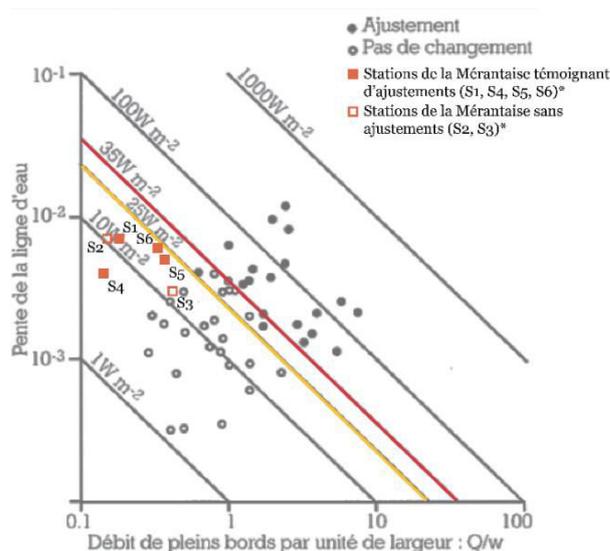
Dans un second temps (**B. et C.**), ce dernier chapitre sera l'occasion de participer à la réflexion sur les enjeux et les objectifs de la restauration écologique. Il s'agira tout d'abord de remettre en perspective ce nouveau paradigme par rapport au concept de trajectoire : **Dans quelle mesure les opérations de restauration écologique ne constituent-elles pas une nouvelle étape d'aménagement du cours d'eau, une nouvelle phase dans la construction de la trajectoire de la rivière ?** Ensuite, nous nous interrogerons sur le caractère écologiquement pertinent et hydromorphologiquement durable des projets de restauration. Nous nous poserons en particulier la question suivante, comme un aboutissement de notre raisonnement à propos de ces objets d'études : **Quel(s) projet(s) de restauration écologique pour les petites rivières périurbaines ?** En effet, ces dernières se trouvent dans des contextes particuliers soumis à des dynamiques paysagères et fonctionnelles complexes – parfois contradictoires –, caractéristiques des espaces de transitions, entre ville et campagne, mal définis et difficiles à appréhender (Germaine et al., 2017). Les objectifs et les enjeux des opérations de restauration écologique des cours d'eau périurbains témoignent de cette complexité.

A. Des rivières de faible énergie mais pour autant dynamiques

1. La Mérintaise, une rivière de « faible énergie » dynamique

Avant de s'interroger plus spécifiquement sur les questions de restauration écologique, nous souhaitons commencer notre discussion à propos de l'un des problèmes récurrents de la perception des petites rivières de faible énergie, à savoir la capacité dynamique de ces cours d'eau. En effet, la dénomination même de « rivières de faible énergie » les enferme, d'une certaine façon, dans la catégorie des cours d'eau peu dynamiques et donc quasi immobiles d'un point de vue morpho-sédimentaire. Celle des cours d'eau que les scientifiques anglo-saxon appellent parfois « boring rivers » (Rollet et Lespez, 2013)

La littérature scientifique considère, depuis les travaux pionniers de Brookes (1987, 1988) repris par Wasson et al. (1998), que la capacité d'ajustements d'un cours d'eau est en grande partie fonction de sa puissance spécifique (ω). Celle-ci dépend du débit à plein bord (m^3/s), de la pente du lit (m/m) et de la largeur du lit à plein bord (m) et détermine, au-delà de la capacité de transport de la charge solide (Rubey, 1933 ; Knapp, 1938 ; Bagnold, 1960, 1966, 1977), la morphologie des lits fluviaux par érosion (Viel, 2012; Bizzi et Lerner, 2015). Brookes (1987, 1988), puis Wasson et al. (1998), ont défini des seuils de puissance spécifique conditionnant la capacité des rivières à réajuster leur lit et leurs berges en suivant le principe d'équilibre dynamique des hydrosystèmes (BIOTEC et Malavoi, 2007). Ils considèrent ainsi un seuil théorique de $35 W/m^2$, en-dessous duquel la puissance naturelle de la rivière ne lui permet pas, *a priori*, de se réajuster morphologiquement (**Figure 9.1**). Un seuil mineur à $25 W/m^2$ est également identifié. Ces valeurs-seuil peuvent toutefois être nuancées en fonction de la nature plus ou moins cohésive des berges (Malavoi, 2010).



* Les valeurs de la Mérintaise n'ont pas été déterminées à partir du débit de pleins bords mais à partir du débit de crue atteint 1% du temps durant notre période de suivi (0.385 m³/s, à S4, au plus proche de la station hydrométrique d'Ors) et de la largeur du lit correspondante.

Figure 9.1: Seuils théoriques de puissance spécifique et mise en perspective de valeurs calculées pour la Mérintaise (d'après Brookes, 1988 ; in Wasson et al., 1998, modifié). Les carrés pleins représentent les stations de la Mérintaise pour lesquelles des ajustements morphologiques ont été observés (carré plein), ou non (carré vide).

Dans le cas de notre site d'étude, les valeurs de puissances spécifiques, estimées à partir du débit de crue atteint ou dépassé 1% du temps (soit 0.385 W/m² en moyenne) et les largeurs correspondantes, restent assez faibles puisqu'elles sont comprises entre 6 et 20 W/m² (**Figure 9.2**). Ce sont donc des valeurs bien en deçà du seuil théorique d'ajustement de 35W/m² identifié dans la littérature. Pourtant, notre analyse des conditions morphologiques et des dynamiques fluviales de la Mérantaise a montré la présence effective d'ajustements morphologiques récents. En seulement une trentaine d'années (1980's-2015), le lit de la rivière s'est considérablement enfoncé et élargie sur une partie du linéaire. Pour rappel, une incision moyenne de 40 à 50 cm – pouvant aller jusqu'à un mètre d'incision – a été relevée dans la partie médiane du cours d'eau. De la même manière, le suivi de l'érosion des berges au niveau de 6 tronçons a permis d'identifier un recul moyen de 14.8 cm/an entre 2013 et 2015 (Jugie et al., 2018). La **Figure 9.1** présentent les six stations de la Mérantaise pour lesquelles une valeur de puissance spécifique a été calculée (carrés) et mise en perspective par rapport au modèle théorique des seuils d'ajustements de Brookes (1988, in Wasson et al., 1998). Ces six stations sont les mêmes que celles du suivi de l'érosion des berges. Les stations S1, S4, S5 et S6 témoignent d'ajustements morphologiques alors même que les puissances spécifiques qui y sont estimées sont inférieures à 20 W/m². Comme nous l'avions exposé dans le chapitre 7, les modifications du lit et des berges les plus importantes ont été observées à l'amont et dans la partie médiane de la Mérantaise (soit au niveau de S1, S4 et S5 / R1, R4 et R5 dans l'article, Jugie et al., 2018). Or, ces stations présentent des puissances spécifiques estimées assez faibles (S1 : 10 W/m² ; S4 : 6 W/m² ; S5 : 18 W/m²). Elles s'expliquent par des sections où le lit de la rivière est très large (entre 5 et 8.5 m), du fait justement de l'activité morphogène du chenal. Cela montre bien que ce critère théoriquement déterminant de la capacité de réajustement des cours d'eau n'est en réalité pas systématique et que la mobilité du lit d'une rivière de faible énergie peut être effective et s'expliquer par d'autres paramètres. Des cours d'eau de faible énergie (\leq à 15 ou 20 W/m²) peuvent en effet être caractérisés par d'importants processus d'érosion de berges lorsque celles-ci sont peu cohésives (sables, graviers...) ou qu'ils bénéficient d'un apport suffisant en alluvions grossières depuis l'amont. Ou bien, les processus érosifs peuvent être fortement réduits sur des cours pourtant puissants ($>$ 40 W/m²) si leurs berges s'avèrent cohésives (limons, argiles) ou que les apports issus de l'amont sont réduits et composés de particules fines, ce qui est notamment le cas sur les cours d'eau portant de nombreux ouvrages en travers (Melun, 2012).

De plus, l'atteinte du débit à pleins bords est souvent considérée comme un élément déterminant la capacité d'une rivière à éroder son lit et ses berges. Il est notamment utilisé pour le calcul des puissances spécifiques (Brookes, 1987, 1988). Or, du fait de l'incision de la Mérantaise, ces débits n'ont jamais été atteints durant nos 4 années de suivi alors même que le cours d'eau a connu des processus érosifs importants qui ont conduit à des ajustements morphologiques. Pour cette étude, comme pour tous les cas des cours d'eau fortement incisés, le recours à ce débit caractéristique n'a donc pas de sens. Les débits morphogènes, c'est-à-dire responsables d'ajustements morphologiques (mobilité des formes, érosion des berges et du fond du lit), se produisent bien avant le débit à pleins bords soit atteint. Du fait

de l'incision, la récurrence du débit à pleins bords peut être beaucoup plus faible alors que la récurrence des crues morphogènes reste sensiblement la même (autour de la crue annuelle). Les ajustements morphologiques auraient même tendance à se produire plus fréquemment puisque la capacité du chenal s'agrandit et que la rivière déborde moins souvent. Ceci n'est qu'en partie vrai puisque, on l'a vu, les hauteurs d'eau, et donc les capacités érosives, baissent significativement lorsque la rivière s'élargit fortement.

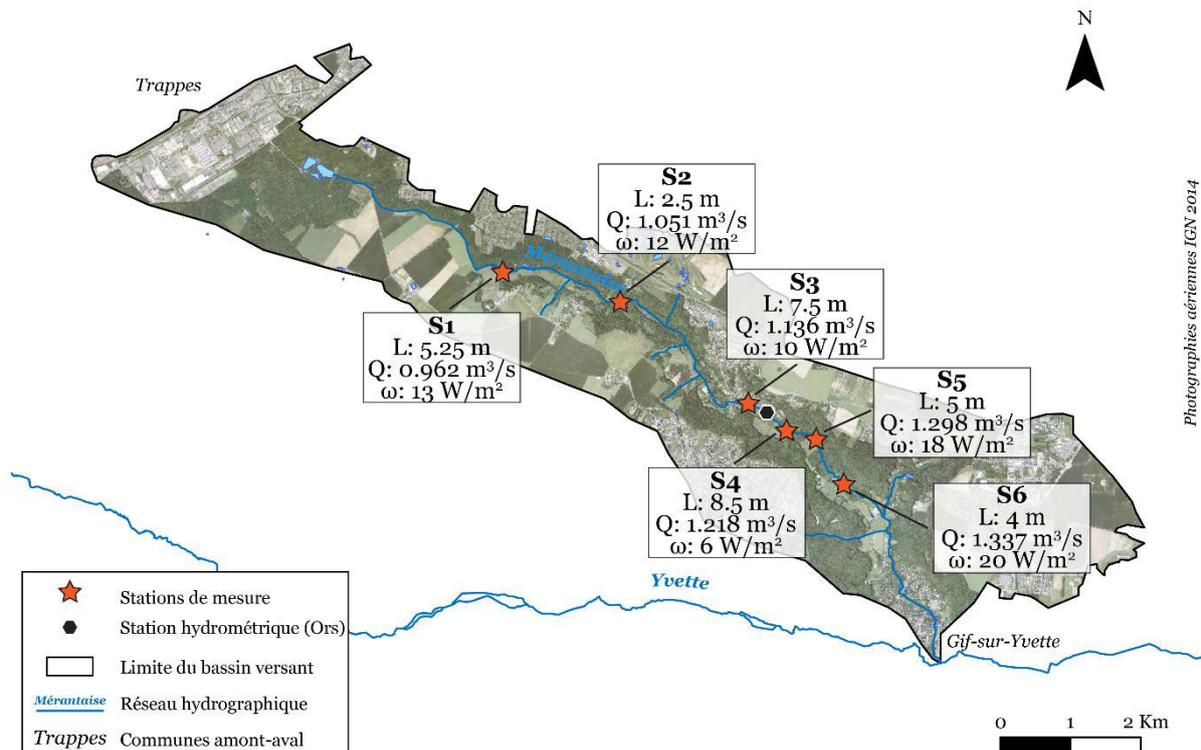


Figure 9.2 : Estimation des puissances spécifiques en 6 points de mesures sur le bassin versant de la Mérantaise (W/m²).

2. Des ajustements morphologiques discontinus et hétérogènes

Le deuxième aspect remarquable concernant les ajustements morphologiques de la Mérantaise réside dans le constat que ceux-ci s'avèrent discontinus et hétérogènes. Nous avons en effet montré que l'incision est variable tout au long du linéaire. Elle peut être très importante par endroit (par exemple dans la partie médiane et aval du linéaire) mais quasi nulle ailleurs (par exemple, en amont de Magny-les-Hameaux). De la même façon, notre étude de l'érosion des berges a montré un élargissement du lit important dans les secteurs déjà fortement incisés et des berges qui ne s'érodent pas dans d'autres sections du chenal (Jugie et al., 2018). Dans les chapitres précédents détaillant les ajustements et les facteurs de contrôle (Chapitre 7 et 8), nous avons notamment conclu au rôle très important des facteurs locaux : rejets urbains, protections de berges, rupture de pente, composition des berges, orientation du courant, ... Ce ne sont ainsi pas tant les conditions hydrologiques, généralement désignées (débits à

pleins bords et puissance spécifique), que les conditions locales (facteurs locaux, débits morphogènes, ...) qui expliquent les capacités d'ajustement de la Mérantaise. À l'échelle du linéaire, les conditions hydrologiques sont relativement homogènes.

Cette variabilité des dynamiques d'ajustements morphologiques n'est pas une spécificité de la Mérantaise. Elle a également été observée dans d'autres contextes de petits cours d'eau périurbains ou urbains de faible énergie historiquement anthropisés, comme sur le Morbras, en région parisienne. De façon très comparable à ce qui vient d'être décrit, cet affluent de la Marne présente également une incision et un élargissement systématique mais spatialement hétérogène en fonction de l'hydrologie et des facteurs locaux (Ali, 2017 ; de Milleville, 2017). Dans sa thèse, L. Grosprêtre (2011) a montré l'influence majeure des drains artificiels et des rejets urbains sur les modifications du fonctionnement hydrologique du bassin de l'Yzeron et les ajustements morphologiques locaux de la rivière. Il a constaté, d'une part, que les incisions sont à la fois plus fréquentes et plus importantes lorsque les surfaces imperméables et le nombre de rejets augmentent. D'autre part, ses résultats montrent que, quelle que soit leur nature, ces drains artificiels (réseaux d'assainissement, routes, pistes) modifient fortement la vitesse de propagation et la nature des écoulements (écoulements surfaciques ou souterrains). Il en déduit donc qu'ils sont vraisemblablement à l'origine de la plupart des incisions locales observées sur le bassin versant de l'Yzeron.

Outre la capacité d'ajustement de la Mérantaise qui, nous venons de le voir, est loin d'être négligeable, il apparaît que la rivière suit le schéma bien décrit pour les rivières et bassin historiquement aménagés : chenalisation, réseau de drainage artificiel et rejets urbains, ... (Simon et Rinaldi, 2006; Grosprêtre, 2011; Schmitt et al., 2016). En 1986, Simon et Hupp (1986, in Simon et Rinaldi, 2006) proposaient un modèle conceptuel d'évolution d'un tronçon de cours ayant subi des travaux de chenalisation. Les auteurs distinguent six étapes d'évolution du chenal en travers et en long suite à l'aménagement du cours d'eau, dont notamment une incision du cours d'eau (étape III et IV), suivie dans un second temps d'un élargissement du chenal actif (étape IV et V). Ce modèle se base sur des observations faites dans le contexte des rivières nord-américaines de gabarits semble-t-il plus importants que celui de notre site d'étude. Il convient toutefois parfaitement pour illustrer la trajectoire hydromorphologique de la Mérantaise (**Figure 9.3.a**). Nous avons, cependant, choisi d'ajouter une dimension en plan au modèle pour tenir compte de la variabilité longitudinale et sectorielle des petites rivières périurbaines qui n'a que peu été décrite dans la littérature (**Figure 9.3.b**).

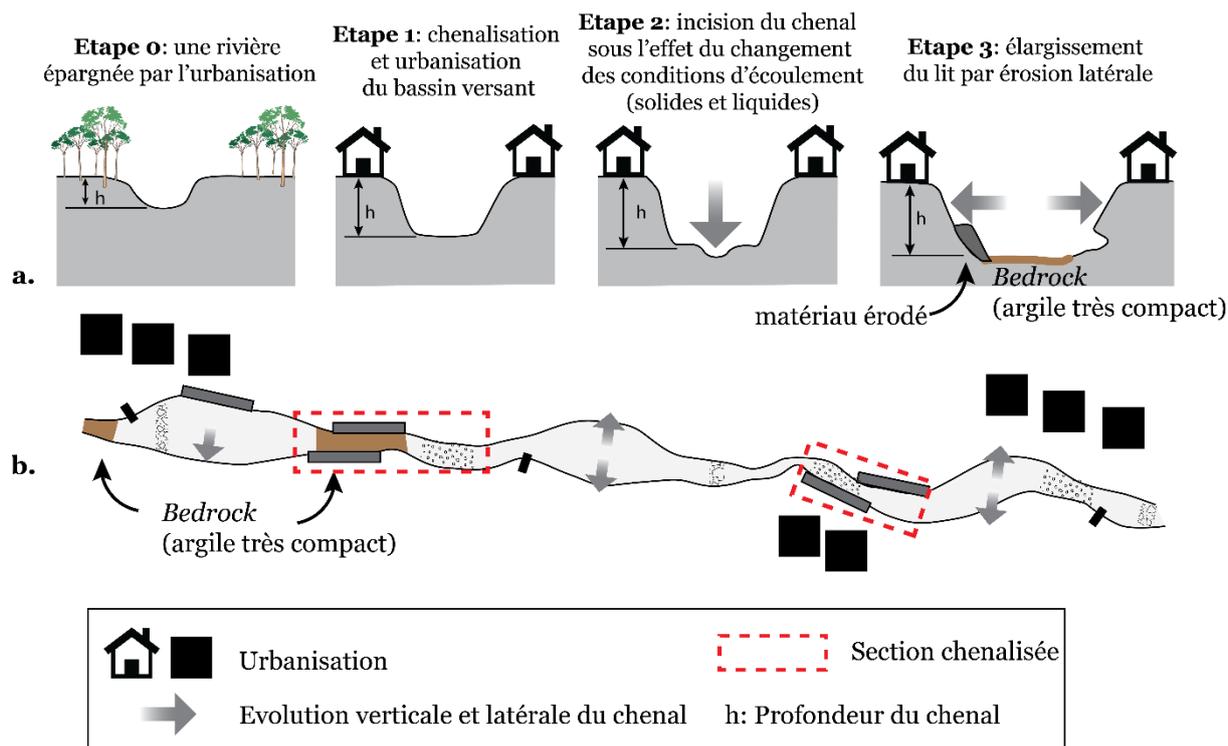


Figure 9.3 : Rappel du modèle conceptuel d'évolution d'un cours d'eau historiquement chenalisé proposé par Simon et Hupp en 1986 (a.) et réadapté pour illustrer la variabilité spatiale des ajustements des petites rivières périurbaines de faible énergie (b.) (d'après Simon et Hupp, 1986 ; in Simon et Rinaldi, 2006).

Pour conclure sur le caractère dynamique des petites rivières, malgré une apparente faible énergie, il nous apparaît nécessaire de distinguer plusieurs types de rivières de faible énergie en fonction de leurs capacités d'ajustements. Dans le contexte francilien, il semble, en effet, que les « grands » cours d'eau (Marne, Orge, Oise, Yerres, Yvette, l'Essonne, à l'exception de la Seine)⁶², situés dans des fonds de vallée bien dessinés, peuvent être considérés comme des cours d'eau de faible énergie peu dynamiques ($<35 \text{ W/m}^2$). L'Yerres, par exemple, a des puissances spécifiques comprises entre 6 W/m^2 (à l'aval) et 24 W/m^2 (à l'amont) et les ajustements verticaux sont quasi nuls (Michler, 2017 et communication personnelle). Cela s'explique plus probablement par le caractère très contraint de ces grands cours d'eau (artificialisation ancienne du lit et des berges pour des besoins hydrauliques et de navigation). A l'inverse, les petits cours d'eau franciliens ($<200 \text{ km}^2$ de BV, en contexte périurbains) semblent, pour la plupart, témoigner de dynamiques morphologiques effectives, en particulier une incision récente et un élargissement encore actif du chenal (Ali, 2017; Jugie et al., 2018; de Milleville, 2017, 2018). Le fonctionnement hydrosédimentaire et la trajectoire d'une partie de ces petites rivières

⁶² Nous distinguons ici les grands cours d'eau des petites rivières à l'échelle du bassin versant de la Seine, c'est-à-dire les cours d'eau dont le chenal n'est pas prospectable à pied. Cette appellation est donc à relativiser par rapport à ce qui est communément établi dans la littérature.

(péri)urbaines commencent à être bien connu grâce à de récents travaux universitaires ou de diagnostics avant travaux de restauration écologique de plus en plus nombreux (Barbecot, 2006 ; Jugie, 2012 ; Jugie et al., 2018 ; Lefebvre, 2015 ; Ali, 2017 ; Fekih, 2016 ; Vanneste, 2017 ; de Milleville, 2017, 2018 ; Guoin, en cours). Nous pouvons notamment citer les cours d'eau suivants pour lesquels une dynamique comparable à celle décrite sur la Mérantaise a été observée : le Morbras, la Beuvronne, la Biberonne et le Rhodon. Sur le Morbras, Ali (2017) a par exemple estimé, grâce à une étude diachronique sur 53 ans (1964-2017) au droit de 5 tronçons, une incision comprise entre 20 cm et 1.70 m et une érosion latérale active comprise entre 0 cm et 2 m. Encore une fois, ces ajustements récents sont également hétérogènes et discontinus tout au long du linéaire.

Cette capacité dynamique des petits cours d'eau franciliens s'explique certainement par leur positionnement géographique et la nature du substrat géologique de leur bassin versant. Nombreux sont ceux qui font la jonction entre les plateaux et les fonds de vallée encaissés qui caractérisent le paysage du bassin parisien. Ce sont des cours d'eau de tête de bassin dont les bassins versants sont compris entre une dizaine et une centaine de km² et qui rejoignent des cours d'eau plus importants, topographiquement plus bas d'une centaine de mètres de dénivelé. Les pentes du lit de ces rivières sont donc assez fortes comparativement aux hydrosystèmes plus grands et peu dynamiques dans lesquelles elles finissent leur course car elles doivent rattraper l'écart de pente entre le plateau et le fond de vallée. Par exemple, l'Yerres possède une pente moyenne de 0.01% (Michler, 2017) lorsque la Mérantaise a une pente générale de 0.7%. Cette position en rebord de plateau est caractéristique de notre zone d'étude et ne se retrouve pas dans d'autres contextes tels que la partie de la Normandie située sur les marges du bassin parisien. Les cours d'eau y sont définis par des pentes peu marquées, des régimes hydrologiques modérés par les conditions climatiques et hydrogéologiques régionales et des bancs peu mobiles constitués de graviers et de sables (Viel, 2012; Lespez et al., 2015, 2017). En revanche, certains petits cours d'eau normands qualifiés d'« ordinaires » et situés au cœur du Massif armoricain présentent des pentes plus fortes qui entraînent des énergies suffisamment conséquentes pour assurer un ajustement morphologique des lits (Lespez et al., 2017). Dans la continuité de ce raisonnement, le substrat géologique des bassins versants modifie la proportion de l'alimentation par les niveaux aquifères des formations sédimentaires (Lespez et al., 2017). Dans le bassin sédimentaire parisien, les marnes et des sables de Fontainebleau jouent alors un rôle important dans ces apports latéraux. Enfin, les petits cours d'eau de faible énergie franciliens sont, par ailleurs, compris dans des bassins versants très réactifs dont le régime hydrologique est directement contrôlé par les conditions d'imperméabilisation des sols (urbanisation) dans le bassin versant. Des conditions hydromorphologiques et des évolutions de trajectoires assez similaires ont également été relevées sur l'Yzeron (Grosprêtre, 2011; Navratil et al., 2013; Schmitt et al., 2016). Ce cours d'eau périurbain de l'agglomération lyonnaise, compris dans un bassin versant de 147 km² et fait l'objet de nombreux travaux et programmes de recherche notamment grâce au dispositif de l'OTHU (Observatoire de Terrain d'Hydrologie Urbaine). Le réseau hydrographique de l'Yzeron s'écoule dans des vallées plus ou moins encaissées dans le plateau lyonnais.

L'un des principaux affluents étudiés par les équipes de recherches, la Chaudanne, possède une pente moyenne assez forte de 5%. Les chercheurs ont notamment établi une augmentation sensible de la réactivité du bassin versant depuis les années 1970, période de développement urbain massif de Lyon et ses environs. Les zones urbaines ont connu une forte progression, de 11 à 55 % entre le début du XX^{ème} siècle et les années 2000, à laquelle s'ajoute l'intensification du réseau des « Rejets Urbains de Temps de Pluies (RUTP) ». Dans le sous-bassin de la Chaudanne, la contribution des RUTP aux crues de la rivière pour des périodes de retour allant de 0.2 an à 3 ans a été estimée a en moyenne 50%. De manière générale, l'influence de l'imperméabilisation des surfaces urbaines concerne tous les compartiments de l'Yzeron et est responsable d'une incision importante (1 à 2 m, jusqu'à 4 m) et un élargissement des chenaux par érosion des berges en contexte périurbain (Grosprêtre, 2011; Navratil et al., 2013; Schmitt et al., 2016).

De la même manière, le régime hydrologique, et donc la capacité d'ajustement de ces cours d'eau, sont conditionnés par le contexte urbain et périurbain qui les environne. La vallée de la Mérintaise conserve en partie son caractère rural mais relie deux espaces urbains importants que sont la Ville-Nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines, en amont, sur le plateau de Trappes et Gif-sur-Yvette, en aval, dans la vallée de l'Yvette.

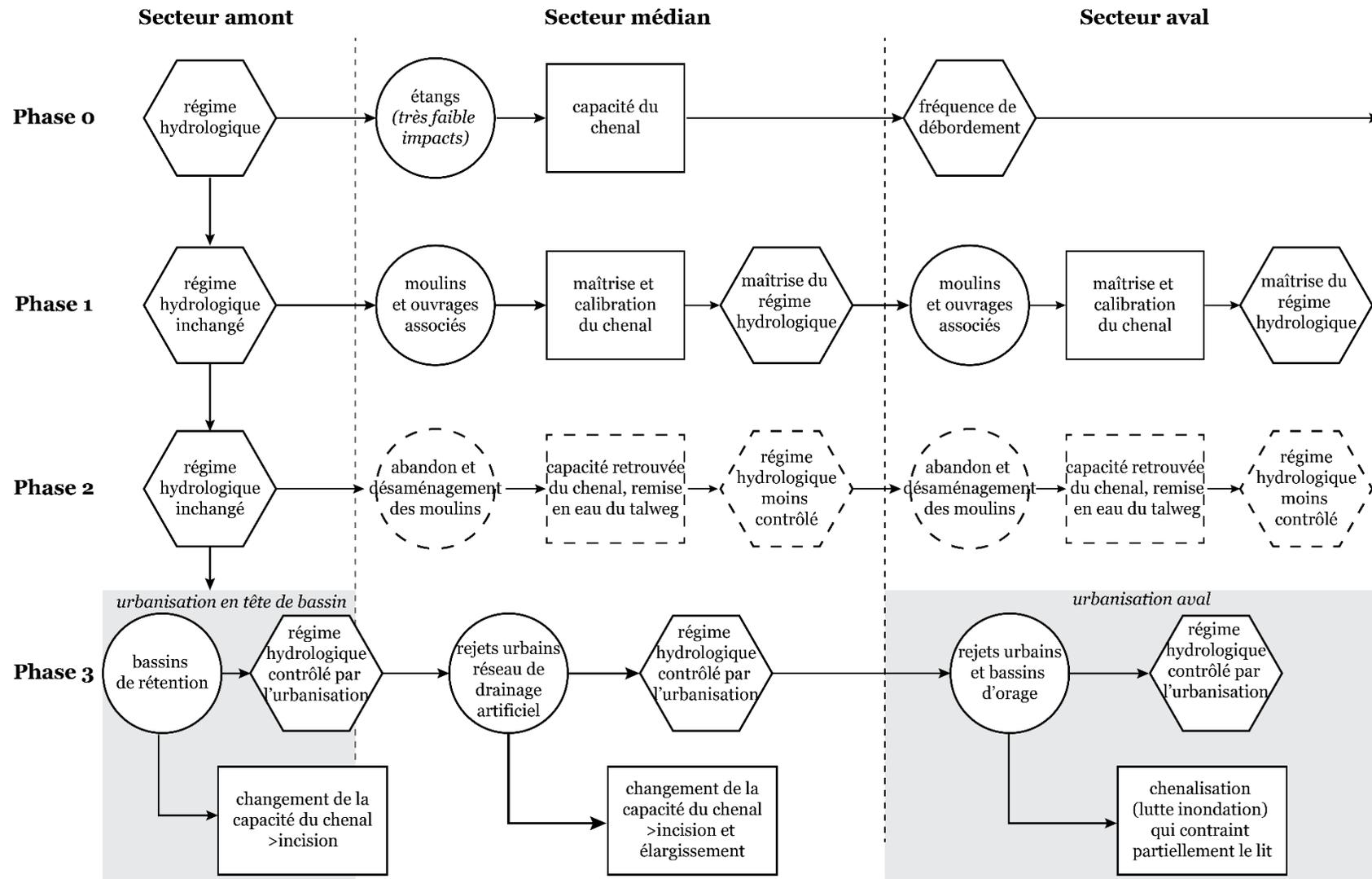
Ainsi, il faut distinguer plusieurs catégories de rivières de faible énergie, car faible énergie ne signifie pas systématiquement absence de dynamiques morphologiques. Il existe bien une différence entre les cours d'eau de plaine très peu dynamiques, pour lesquels quasi aucune modification morphologique significative n'est observée – comme c'est le cas des « boring rivers » et des rivières « ordinaires » rurales de Normandie (Barraud et Germaine, 2017; Lespez, 2012) – et les cours d'eau tels que les petites rivières franciliennes périurbaines dont les processus morphogènes peuvent se produire de manière hétérogène mais suffisantes sur plusieurs décennies pour modifier l'aspect et le fonctionnement hydromorphologiques du chenal.

3. Dynamique fluviale et ajustements morphologiques hérités de la succession d'aménagements hydrauliques dans le fond de vallée et de changements de pratiques à l'échelle du bassin versant

Les dynamiques fluviales et les ajustements morphologiques observés actuellement sont l'héritage direct de la succession de plusieurs générations d'aménagements hydrauliques anciens (moulins, réseau des étangs et rigoles du Château de Versailles) et de l'urbanisation récente du bassin versant. Ces derniers ont contrôlé et contrôlent aujourd'hui encore le régime hydrologique et les capacités d'ajustement de la rivière. Notre propos est ainsi illustré par la figure suivante (**Figure 9.4**). Ce diagramme s'inspire du schéma conceptuel établi par Chin et al. (2013) et qui représente six scénarii d'évolution spatiale en fonction des effets de l'urbanisation sur les variables de contrôle (apports liquides

et solides). Nous avons réadapté le schéma pour l'appliquer à l'exemple de l'évolution des dynamiques fluviales et des ajustements de la Mérantaise face, d'une part, aux aménagements hydrauliques anciens (moulins et autres ouvrages) (Phase 1 et 2) et, d'autre part, à l'urbanisation du bassin lors de son développement massif sur les plateaux et les versants, depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle (Phase 3) (**Figure 9.4**).

Après une époque révolue durant laquelle la rivière était encore très peu investie par les sociétés riveraines (Phase 0), les aménagements hydrauliques implantés dès le Moyen-Âge ont commencé à impacter le régime hydrologique et les capacités du chenal par des interventions directes sur le chenal (Phase 1). Cependant, le maintien d'un régime hydrologique peu influencé, à l'exception d'un contrôle mineur des débits pour les activités hydrauliques, ont limité des ajustements morphologiques très importants. Le chenal était certes dérivé, perché sur les versants et en partie recalibré artificiellement, l'entretien du lit de la rivière assure un fonctionnement hydrodynamique raisonnablement influencé par l'Homme. L'abandon d'une partie des ouvrages hydrauliques et la remise en eau du talweg durant la phase 2 a redonné un semblant de fonctionnement libéré à la rivière. En revanche, le développement massif et rapide de l'urbanisation en tête de bassin et en secteur aval a durablement modifié le régime hydrologique et les capacités d'ajustements morphologiques en conséquence (Phase 3).



1
2
3

Figure 9.4 : Évolutions spatiales (horizontale) et temporelles (verticale) des capacités morphologiques (rectangles) et hydrologiques (hexagones) du chenal sous le double effet des activités anthropiques (ronds) : les aménagements hydrauliques et l'urbanisation. (d'après Chin et al. 2013)

B. La restauration écologique, nouveau paradigme de la trajectoire des rivières

La restauration écologique constitue aujourd'hui l'un des piliers fondateurs de la gestion et de la préservation des milieux aquatiques (cours d'eau de surface, masses d'eau souterraines, plans d'eau et zones humides). Elle illustre notamment l'émergence d'une nouvelle vision de la rivière depuis la fin du XX^{ème} siècle. En effet, après avoir assumé des fonctions essentiellement économiques, les ressources en eau sont désormais perçues comme un bien à sauvegarder, à préserver, face à l'érosion de la biodiversité par des siècles de surexploitation alimentaires, hydriques et énergétiques (Perrow et al., 2008 ; Lespez et Germaine, 2016). Plus spécifiquement, les rivières urbaines et périurbaines sont passées du statut de réceptacles des rejets urbains à celui de milieux vivants, de patrimoine naturel à intégrer à la ville et sa périphérie (Germaine et Barraud, 2013 ; de Coninck et al., 2015; Lestel et Carré, 2017).

Concrètement, la restauration écologique renvoie à plusieurs types d'actions aux objectifs, aux implications et de nature différents (Morandi et Piégay, 2011). On distingue trois groupes d'actions : écologiques, hydrauliques et piscicoles. Les opérations de restauration hydrauliques sont généralement les moins lourdes et consistent essentiellement en travaux de gestions et d'entretien du chenal et des berges. Les opérations d'ordre écologiques sont, quant à elles, beaucoup plus ambitieuses car elles conduisent à reconfigurer le chenal et la plaine alluviale dans le but de libérer les dynamiques fluviales jusque-là contrainte par l'aménagement de la rivière (Lespez et Germaine, 2016). Parmi cette catégorie, les travaux de rétablissement de la continuité piscicole et sédimentaire par la suppression partielle ou totale des ouvrages en travers (seuils en rivière ou barrages) représentent la majorité des actions menées et un levier emblématique des politiques environnementales. Elle focalise donc une grande partie des questionnements scientifiques et de notre propre réflexion.

Comme toutes les rivières présentant des marques de dégradation et ayant subi un aménagement systématique de leur cours (travaux de chenalisation et implantation d'ouvrages en travers), la Mérantaise fait l'objet de projets de restauration de sa qualité écologique. Ces derniers seront détaillés plus loin, lors de notre discussion plus spécifique sur les enjeux et les objectifs de la restauration écologique des petites rivières périurbaines (C.). Il s'agit ici, dans un premier temps, de participer à la réflexion générale sur le concept même de restauration écologique des milieux aquatiques, et en particulier sur les enjeux et les objectifs du rétablissement de la continuité écologique (effacement partiel ou total des ouvrages en travers).

Cette notion revêt un aspect très institutionnel du fait de son appropriation par les politiques publiques sur l'environnement. Et ce, à travers les différents textes législatifs et réglementaires sur la gestion des milieux aquatiques : en France, la Loi sur l'eau de 1992, la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) de 2000, la LEMA de 2006, le Grenelle de l'environnement en 2009 ... (Morandi, 2014).

Concept des politiques nationales, concept des acteurs de la gestion de l'eau, la « restauration écologique des cours d'eau » est également le terrain de réflexion de la sphère scientifique. D'abord appropriée et questionnée par les sciences de la nature, notamment l'écologie (Barnaud, 1995 ; Palmer et Bernhardt, 2006), l'ingénierie (Degoutte, 2012), l'ingénierie écologique (Adam et al., 2008 ; Rey et al., 2009 ; ASTEE, 2013) et la géomorphologie fluviale (Malavoi et Bravard, 2010), le concept a ensuite été mobilisé par les sciences humaines et sociales (Gobster, 2000) qui y voit l'occasion d'interroger les relations Homme-Nature (Morandi, 2014). Les chercheurs en sciences humaines et sociales questionnent les enjeux de concertation des acteurs autour des projet, de la perception et de la représentation des milieux aquatiques à restaurer, des conflits d'acteurs, des services écosystémiques rendu par les milieux aquatiques ... (Tunstall et al., 2000 ; Junker et al., 2007 ; Barraud et al., 2009 ; Buijs, 2009 ; Cottet, 2010 ; Flaminio, 2012 ; Flaminio et al., 2015; Lespez et Germaine, 2016; Lespez et al., 2016; Barraud et Germaine, 2017). Ainsi, la restauration écologique est désormais fortement interdisciplinaire et protéiforme, à la fois dans sa conception intellectuelle (appropriation par toutes les sciences) et dans sa pratique (par les gestionnaires et les scientifiques). Cependant, si ces deux grandes disciplines, sciences de la nature et sciences humaines et sociales, ont considérablement amélioré les connaissances sur la restauration de la continuité écologique chacune dans leur domaine, les problèmes écologiques et socio-économiques restent encore majoritairement analysés séparément. Les apports communs des deux grands domaines de recherche semble pourtant essentiels à coupler (Dufour et al., 2017).

1. La remise en cause du retour à un état de référence *ante-aménagements*

La restauration hydromorphologique et écologique se base sur un objectif fixé par la DCE de « retour au bon état écologique des cours d'eau ». Celui-ci est initialement guidé par la volonté écocentrique et statique de retrouver un état d'origine des systèmes fluviaux, avant leur exploitation systématique par les sociétés riveraines (Bradshaw, 1996). La restauration écologique était alors pensée comme un reconquête d'un « *paradis perdu* », d'un état naturel libéré de l'emprise humaine (Dufour et Piégay, 2009; Flaminio et al., 2015). Dans cette perspective, les projets de rétablissement de la continuité piscicole et hydrosédimentaire, à savoir l'effacement d'ouvrages hydrauliques transversaux est l'une des actions les plus emblématiques de cette politique de restauration des milieux aquatiques (Morandi et Piégay, 2011; Lespez et Germaine, 2016). En effet, la suppression physique de ces aménagements anciens symbolise de manière concrète cette volonté d'effacer toutes traces d'implication humaine et de rendre ses droits à la Nature.

Cependant, cette approche est désormais largement rediscutée par la communauté scientifique depuis la fin des années 2000. L'article de Dufour et Piégay, *From the myth of a lost paradise to targeted river restoration : forget natural references and focus on human benefits*, publié en 2009, fait d'ailleurs référence sur la question. Il s'inscrit dans la lignée d'autres auteurs tel que Walter et Merritts (2008) ou

Wohl et Merritts (2007) qui interrogeaient le sens du terme « rivière naturelle » et de l'état de référence à considérer. Tous ses auteurs s'accordent notamment sur le fait qu'il est totalement illusoire et peu productif de rechercher à reconstituer une rivière « naturelle ». Les termes même de « renaturation », « d'écoulement naturel » ou de « dénaturation », de même que le « *rêve de rivières naturelles* » (Montgomery, 2008) doivent être abandonnés car il n'y plus de systèmes fluviaux naturels dans le « Vieux Monde » (Europe de l'Ouest) depuis au moins trois millénaires (Lespez, 2013 ; Brown et al., 2018). La problématique est la même aux États-Unis ou sur le continent Australien, bien que la chronologie connaissent un décalage puisque les hydrosystèmes ont perdu leur caractère naturel depuis près de trois siècles maintenant (Fryirs et Brierley, 2001; Walter et Merritts, 2008). Il faut désormais accepter l'irréversibilité du temps. En 1964, D. Lowenthal allait même plus loin en considérant l'Homme comme faisant partie intégrante de la Nature. Un peu comme Rousseau qui désignait l'Homme comme un « *animal social* », Lowenthal propose une vision de l'Homme et de ses actions comme participant de l'écosystème. On peut alors reprendre le concept de « géosystème ». Développée par l'École de Géographie russe et introduite en France par Bertrand, dans les années 70, cette forme d'analyse spatiale s'inspire des écosystèmes « naturels » mais rend compte de la place et du rôle de l'Homme⁶³. Elle désigne un système spatialisé dynamique formé d'un ensemble d'éléments naturels et anthropiques, interconnectés et en interrelations constantes. La perception de ce qui est naturel et de ce qui ne l'est pas change alors de paradigme. Cette approche entre, quelque part, en contradiction avec celle d'Anthropocène (propulsé par le Prix Nobel de chimie Paul Crutzen en 1995) et qui considère que l'Humanité est entrée dans une nouvelle ère, débutée lorsque les activités anthropiques ont laissé une empreinte pérenne sur l'ensemble du globe, soit dès le XVII^{ème} siècle avec l'ère industrielle. Il ne s'agit pas dans notre propos de minimiser l'impact des activités humaines sur les milieux aquatiques mais plutôt de le considérer comme un élément constitutif de l'Histoire des systèmes fluviaux par des usages et des pratiques multiples.

Enfin, notons que le principe de restauration écologique n'est pas récent et poursuit un mouvement historique (Barraud, 2004, 2007, 2011, 2017; Barraud et Germaine, 2017; Lespez et Germaine, 2016). D'une part, l'impact des seuils sur la circulation des poissons « migrateurs » est identifié depuis longtemps, comme en témoignent les nombreux dispositifs implantés un peu partout dans le monde pour atténuer l'impact écologique des seuils et barrages (branchages, rampe et passe à poissons, ...) (Wildam, 2013; Barraud, 2011, 2017a, 2017b). Le « management écologique » (de Coninck et al., 2015) est une conception ancienne puisque les premières passes à poissons mises en place en Europe datent du début du XX^{ème} siècle. Ainsi, dans les années 1830, le propriétaire écossais d'une distillerie à Deanston, sur la Theith River, un certain M. Smith, avait équipé son usine d'une passe à poissons (Barraud, 2007, 2011, 2017). Ce dispositif est également repéré en Irlande, en 1852, à Ballisodare, County Sligo. En France, le barrage du Bazacle, sur la Garonne (à Toulouse) est pourvu d'une passe à

⁶³ <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/geosysteme> (consulté en ligne le 07/07/2018)

poissons dès 1840 et la loi du 31 mai 1865 introduit la possibilité d'aménager des échelles à poissons sur les barrages des usines hydrauliques à la suite d'une enquête instruite par les conservateurs des Eaux et Forêts (Cazeils, 2003; Barraud, 2011). De la même manière, nous avons montré que lors de la phase d'abandon des activités hydrauliques de la Mérintaise, les biefs perchés étaient progressivement délaissés et la « morte rivière » remise en eau. Il s'agissait là d'instructions clairement énoncées par le service de Police de l'Eau lors des demandes de désaffectation des moulins, comme à Ors ou aux Vassaux (cf. Chapitre 5). Le fait même que les ouvrages hydrauliques aient été abandonnés et déconnectés du réseau hydrographique actif dès le début du XX^{ème} siècle montre que ce sont des préoccupations anciennes (Lespez et Germaine, 2016).

2. La trajectoire des cours d'eau, un élément essentiel pour les projets de restauration

Dans cette perspective, la restauration écologique a, en effet, fait émerger, ou tout du moins redynamiser, le concept de **trajectoire**, essentiel dans l'étude et la compréhension des milieux aquatiques. Il est notamment hérité du glissement de conception de la restauration écologique comme un retour à un état antérieur figé, basé sur la vision d'un cours d'eau encore vierge de toute intervention humaine (« *pristine conditions* ») vers un état de référence évolutif, considérant le caractère dynamique des corridors fluviaux (facteurs de contrôle et réponses hydromorphologiques) (Dufour et Piégay, 2009). La rivière est continuellement soumise à des processus dynamiques et fluctuants, que ce soit en conditions naturelles ou anthropisées. Elle est le résultat d'une combinaison complexe d'usages et de pratiques tant à l'échelle du lit que du bassin versant (Lespez, 2013 ; Lespez et al., 2016). Ce constat implique donc que les systèmes fluviaux évoluent suivant une trajectoire donnée (Hughes et al., 2005; Brierley and Fryirs, 2005). Par ailleurs, chaque trajectoire de rivière est unique et dépendante d'un contexte hydro-climatique, géologique, anthropique et social propre au cours d'eau et également évolutif. Les conditions locales jouent donc un rôle important dans la définition hydromorphologique et écologique des rivières (Dufour et Piégay, 2009).

Aussi, partant de ce principe, la plupart des chercheurs s'accordent désormais sur la nécessité de considérer la trajectoire historique et actuelle des rivières lors des projets de restauration pour identifier l'influence à la fois des conditions naturelles et des interventions humaines (Antrop, 2005; Brierley and Fryirs, 2005 ; Wohl et al., 2005; Lespez et al., 2006 ; Hoyle et al., 2008 ; Dufour et al., 2017). La compréhension des processus et des formes qui ont façonnés les rivières et les vallées au cours du temps sont essentiels pour identifier de manière efficiente les évolutions à venir de la rivière après des opérations de restauration (Wohl et al., 2015; Lespez et Germaine, 2016; Dufour et al., 2017). Paradoxalement, certains auteurs relèvent que, dans les faits, l'intégration de la trajectoire des cours d'eau à restaurer dans les diagnostics et les expertises avant travaux est loin d'être systématique (Lespez et al., 2005, 2013, 2015, 2016, 2017 ; Lespez et Germaine, 2016 ; Sneddon et al., 2017). Cela est notamment dû à la difficulté de reconstitution de ces trajectoires qui nécessite des techniques de mesures

et d'interprétations complexes. Plusieurs années de travail sont généralement nécessaires pour venir à bout des connaissances sur le temps long, le temps historique et le fonctionnement hydrosédimentaire actuel d'une rivière. Elle implique également des compétences pluridisciplinaires (histoire, archéologie, géographique, hydromorphologie, écologie, chimie de l'eau, biologie, ...) qu'une seule et même personne ne peut pas maîtriser. Il faut donc bien souvent plusieurs scientifiques spécialistes de ces différents domaines de recherche. Enfin, les hydrosystèmes sont constitués de multiples unités fonctionnelles dans lesquels les formes, les flux hydrosédimentaires et les processus dynamiques interagissent de façon complexe entre eux (Amoros et Petts, 1993). Ainsi, la reconstitution de la trajectoire des rivières ne peut ignorer les différentes échelles en jeux (chenal et bassin versant), ce qui complique encore un peu plus l'exercice. Cette contradiction et cette difficulté de mise en œuvre explique le décalage entre la sphère des scientifiques et des gestionnaires. Ces derniers se retrouvent facilement démunis face à ce travail dantesque de reconstruction de la trajectoire passée et présente de la rivière à restaurer.

3. La « restauration écologique », une nouvelle étape de construction de la trajectoire de la rivière

Ainsi, dans le prolongement de cette réflexion, la place concrète de la restauration écologique dans l'histoire des cours d'eau aménagés pose question. La restauration mène-t-elle à la création de « nouvelles rivières » (Lespez et Germaine, 2016) ? Ou bien, ces projets de réhabilitation ne participent-ils pas, finalement, de la trajectoire de la rivière comme une nouvelle étape d'aménagement ? C'est dans cette perspective que nous souhaitons participer à la discussion sur les enjeux et les objectifs des projets de restauration écologique des milieux aquatiques.

Les opérations de restauration écologique, et en particulier celles du rétablissement de la continuité piscicole et sédimentaire, consistent en des travaux de reconfigurations physiques et concrètes du chenal et de la plaine alluviale (quand cela est possible). Elles impliquent donc, dans un premier temps, la destruction des éléments considérés comme des obstacles à l'écoulement ou des contraintes au « bon état écologique » : suppression partielle ou totale des ouvrages en travers et latéraux. Puis dans un deuxième temps, il s'agit de « reconstituer », de « recomposer » des formes et des motifs paysagers attribués aux rivières considérées, par la société, comme en bon état écologique (reméandrage, espace de liberté retrouvé, ...). Ces modèles de référence sont généralement établis à partir de considération sur l'état d'altération ou de non altération des rivières par rapport à des conditions *a priori* « naturelles » (Gob et al., 2014). En ce sens, ces opérations peuvent être considérées comme une nouvelle « campagne » de travaux qui redessinent, une nouvelle fois, la configuration physique de la rivière « restaurée ». De la même façon que les travaux de chenalisation (dérivation du lit sur les versants,

reprofilage, ...) entrepris lors du développement massif des activités hydrauliques ont profondément modifié l'aspect des fonds de vallée, cette nouvelle génération d'interventions sur les cours d'eau se concrétise par des travaux de creusement, de terrassement et autres. La rivière est refaçonnée de manière artificielle – bien que l'on cherche à rétablir un aspect naturel. Les objectifs fonctionnels ne sont évidemment pas les mêmes mais les modes d'intervention le sont. Les engins de chantiers ont remplacé les pelles, les pioches et les bras des ouvriers du XVIII^{ème} siècle. Les travaux de modification du linéaire s'inscrivent dans la continuité et, qui plus est, dans le même espace physique. **Les opérations de reconfiguration du chenal constituent une nouvelle étape d'équipement du cours d'eau, la quatrième phase d'aménagement de la trajectoire historique et fonctionnelle de la rivière** (dans le cas de la Mérintaise) (Figure 9.5).

À ce titre, le terme de rivière « désaménagée », parfois rencontré dans la littérature, peut paraître contradictoire étant donné la nature des opérations et si, comme nous le considérons, ces travaux de reconfiguration du chenal participent en réalité d'une nouvelle phase d'aménagement de la rivière. Lespez et Germaine interrogent d'ailleurs cette appellation dès le titre de leur article paru en 2016, « *la rivière désaménagée ? Les paysages fluviaux et l'effacement des seuils et des barrages en Europe de l'Ouest et en Amérique du Nord-Est* ». L'un des points de discussion de ces auteurs est la création de « nouvelles rivières » rurales et urbaines. Ils considèrent ainsi que les projets de restauration écologique sont à l'origine de « nouvelles rivières » à la fois dans le sens de changements physiques et paysagers du milieu, mais aussi en termes d'acceptation sociale et conceptuelle des modèles de rivières restaurées. Encore une fois, il s'agit bien d'un nouveau projet d'aménagement de la rivière plus que celui d'un « désaménagement » au sens strict. La rivière « restaurée » n'est pas nécessairement plus naturelle que la rivière rectifiée et faiblement sinueuse.

Concernant la perspective paysagère de ces opérations de restauration, Lespez et Germaine note qu'il est alors possible d'identifier un certain nombre de motifs paysagers qui caractérisent la rivière « restaurée » (reméandrage, berges reprofilées, ..), tout comme les seuils, les barrages, les vannes, les abreuvoirs et les moulins marquaient la rivière « domestiquée et sacrifiée » (Frioux, 2010). Cette approche paysagère est une autre manière de voir ces opérations de restauration comme une inscription concrète dans la trajectoire des systèmes fluviaux. Elle témoigne de la diffusion d'un modèle paysager spécifique.

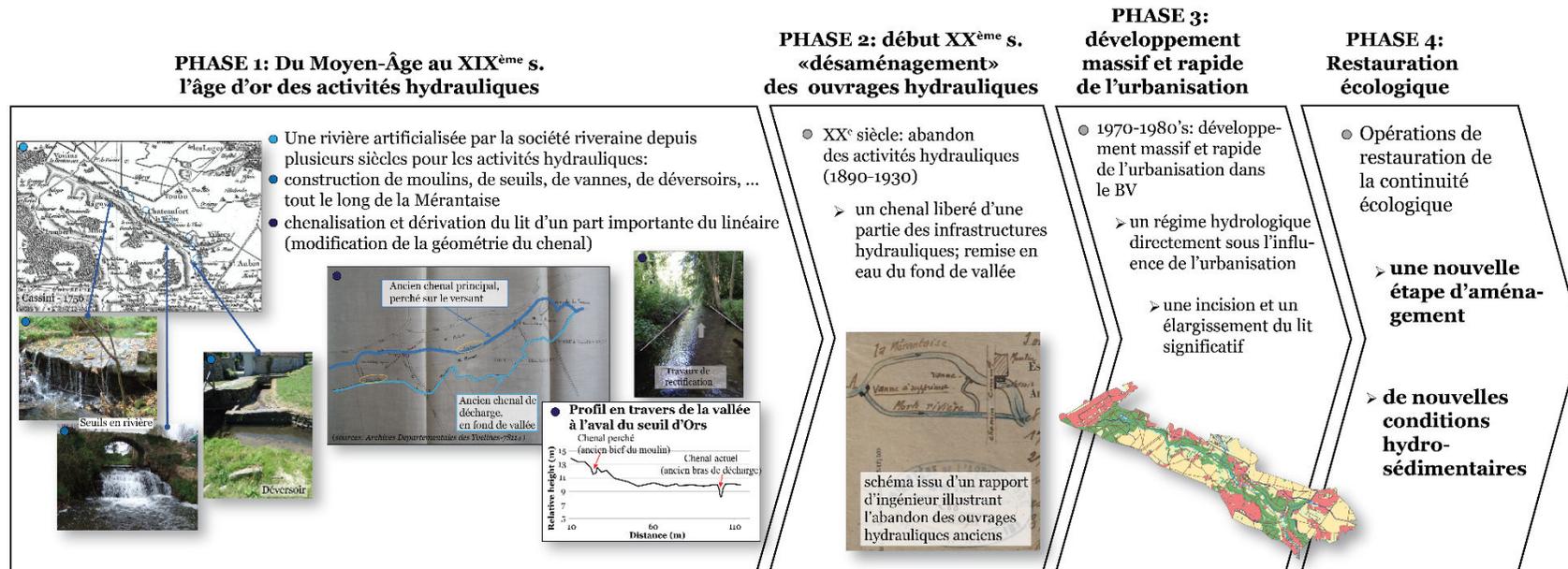


Figure 9.5 : Trajectoire de la Mérintaise, de la mise en place des aménagements hydrauliques anciens (XVII^{ème} siècle) aux projets de restauration (2015).

Par ailleurs, on observe, depuis quelques années, un nombre grandissant d'études qui considère le concept de « trajectoire » comme une construction sociale, culturelle et politique car les opérations de restauration sont soumises à une pluralité d'enjeux, d'acteurs et de conflits (par exemple, Flaminio, 2012; Carré et Haghe, 2013; de Coninck et al., 2015; Flaminio et al., 2015; Barraud et Germaine, 2017). De ce fait, des projets de restauration écologique mis en œuvre dans des contextes géographiques et institutionnels proches peuvent être différents et témoigner d'ambitions différentes pour les milieux aquatiques. En Europe, le choix des modalités de mise en œuvre de la DCE est laissé à la charge de chaque État membre (Gob et al., 2014). Dans la synthèse récente de Lespez et Germaine (2016) sur la question des rivières « désaménagées », la comparaison du contexte français et anglais illustre bien ce constat. En France, la suppression des obstacles à l'écoulement domine largement les autres types d'actions de restauration (Adam et al., 2007; Germaine et Barraud, 2013b, 2013a, Lespez et al., 2015, 2017). Dans le département du Calvados, par exemple, 46 démantèlements d'ouvrages ont été recensés sur les 50 opérations des restaurations financées de 2012 à 2015 (Lespez et Germaine, 2016). Au Royaume-Unis, les objectifs de restauration sont les mêmes mais les projets mis en œuvre privilégient les opérations de reconfiguration du chenal d'écoulement (remise en talwegs, reméandrage et amélioration de la diversité des formes et des faciès d'écoulement). Ainsi, d'après le recensement de 2016 de la base de données du RRC (Restoration River Center, équivalent de l'Agence de l'Eau en Angleterre), seuls 114 opérations de démantèlement d'ouvrages ont été menés sur les 1479 projets de restauration. Cela ne représente que 8% des opérations effectuées. Par ailleurs, il semble que le modèle écologique mis en œuvre dans une région ou un pays donnée dépend pour beaucoup du contexte économique et environnemental local.

C. Des projets durables de restauration écologique pour les petites rivières périurbaines ?

Cette dernière étape de la discussion est l'occasion de se concentrer sur les projets de restauration écologique des petites rivières périurbaines, eux-mêmes. En effet, si le caractère nécessaire de la restauration et de la préservation des milieux aquatiques est difficilement contestable – sauf pour des questions de patrimonialisation des rivières et des ouvrages hydrauliques (Germaine et Barraud, 2013b), la nature concrète des actions menées peut en revanche poser question selon le contexte. Dans un environnement urbain, la question de la restauration écologique est particulièrement délicate et requiert une réflexion intégrée, tant en termes d'acteurs, d'objectifs ou d'échelles d'intervention (Cairns, 1995). Ce paragraphe aura donc comme double objectifs (i) d'**interroger le caractère durable des projets de restauration dans le contexte des petites rivières (péri)urbaines** et (ii) de **proposer quelques pistes d'actions à mener pour s'assurer du caractère efficient de ces projets de restauration**.

L'objectif principal des opérations de restauration de la continuité écologique est d'atténuer les perturbations anthropiques sur les milieux aquatiques ; ce qui en fait une action positive et nécessaire *a priori* (Gregory et al., 2002 ; Hart et al., 2002 ; Rollet et al., 2013). Cependant, toute intervention humaine sur la nature, ou tout du moins sur un élément voué à retrouver un caractère naturel, soulève nécessairement la question des gains et des pertes que cette intervention peut générer. Le rapport coûts/bénéfices, qu'il concerne un aspect économique, environnemental ou sociétal, implique généralement de s'assurer que les risques pour la société et les milieux sont négligeables. Dans notre cas, ce sont les gains écologiques des projets de restauration en contexte (péri)urbain qui nous intéressent. Autrement dit, nous questionnons la trajectoire potentielle de restauration (Doyle et al., 2005 ; Brierley et Fryirs, 2005 ; Kondolf et al., 2008 ; Arnaud, 2012) de la vallée de la Mérintaise.

1. Une priorité donnée aux enjeux de lutte contre le risque inondation en contexte urbain

Tout d'abord, quoi qu'on en dise, les enjeux de la restauration écologique des cours d'eau en contexte urbain et périurbain restent prioritairement conditionnés par le risque d'inondation des zones urbanisées. Autant les projets de restauration des rivières rurales sont guidés par des enjeux piscicoles et la diversité des habitats au sein du chenal et de ses marges, autant les projets de restauration des rivières (péri)urbaines sont conduits par des problématiques liées aux menaces de l'eau sur les populations riveraines (Lespez et Germaine, 2016). Outre-Atlantique, la Darby Creek, cours d'eau périurbain de la périphérie de Philadelphie a été l'objet d'un projet de restauration de la continuité écologique durant lequel 3 seuils en rivière, compris entre 1 et 3 m de haut, ont été effacés et une partie

du linéaire reconfiguré (sinuosité recréée, pente réduite, berges reprofilées). Néanmoins, l'objectif premier de ces opérations était de diminuer le risque inondation, notamment au niveau du seuil de Borough Dam (Lespez et Germaine, 2016). En France, l'Yzeron, cours d'eau de la région lyonnais en situation périurbaine, est également un autre exemple de la considération du risque inondation (Flaminio et al., 2015). Bien que les altérations hydromorphologiques touchent autant les espaces ruraux que les espaces urbains, ce sont ces derniers qui ont fait l'objet d'ambitieux projets de restauration. Aussi la Mérantaise ne fait-elle pas exception.

1.1. Les opérations de restauration écologique sur la Mérantaise

En 2015, de nouveaux aménagements de la Mérantaise ont été inaugurés en public dans la commune de Gif-sur-Yvette par le SIAHVY, maître d'ouvrage des opérations. Ces travaux de restauration écologique ont été menés entre 2013 et 2015, au niveau de trois secteurs, un secteur amont, un secteur médian et un secteur aval (**Figure 9.6**). Ils ont concerné la reprise de 1500 m de cours d'eau de l'aval de la Mérantaise, juste avant sa confluence avec l'Yvette.

Plusieurs types d'opérations ont été effectués : (i) des suppressions totales ou partielles d'obstacles en travers, (ii) un reméandrage du chenal, (iii) des dérivations de plans d'eau et (iv) la remise du cours d'eau dans son talweg d'origine. Il s'agit donc d'aménagements qui reconfigurent physiquement et profondément le chenal.

Concernant les objectifs de ces opérations, l'intitulé de la note de synthèse⁶⁴, estampillée « Agence Française pour la Biodiversité », et l'énumération de ces objectifs illustrent la priorité affichée à la lutte contre le risque inondation sur les enjeux écologiques. En effet, cette fiche est intitulé : « *Programme de réduction des risques inondations et restauration de la continuité écologique de la Mérantaise à Gif-sur-Yvette* ». De la même manière, les objectifs sont présentés dans l'ordre suivant :

- « *Limiter et prévenir le risque inondation* »
- *Protéger et restaurer les milieux aquatiques*
- *Préserver les usages existants en rive*
- *Mise en valeur des abords de la rivière du point de vue paysager et patrimonial* »

À chaque fois, les enjeux relatifs à la lutte contre le risque d'inondation sont placés en premier, devant les objectifs d'amélioration de l'état écologique de la Mérantaise. D'autre part, il est également précisé que les opportunités d'intervention ont été guidées par la succession d'importants épisodes d'inondation dans la commune de Gif-sur-Yvette (1995, 1999, 2001 et 2007). Ce sont prioritairement ces événements qui ont justifié ces travaux. L'argument écologique est présenté comme une raison en plus, « *afin que*

⁶⁴ Document consultable en ligne à l'adresse suivante : http://www.onema.fr/sites/default/files/pdf/cnrr17_REXmerantaise.pdf (consulté le 10/10/2018)

le projet soit en accord avec la législation » qui impose de restaurer la continuité écologique des milieux aquatiques. Ainsi, l'essentiel des travaux a concerné le recalibrage du bassin d'orage à l'amont de Gif-sur-Yvette, le Bassin de la Mérantaise, dans le secteur amont. Il s'agissait notamment d'augmenter sa capacité de stockage de 8 100m³, soit 9% de sa capacité initiale (90 000 m³). Le maître d'ouvrage (SIAHVY) se félicite d'ailleurs de l'efficacité des aménagements constatée durant la crue de juin 2016.

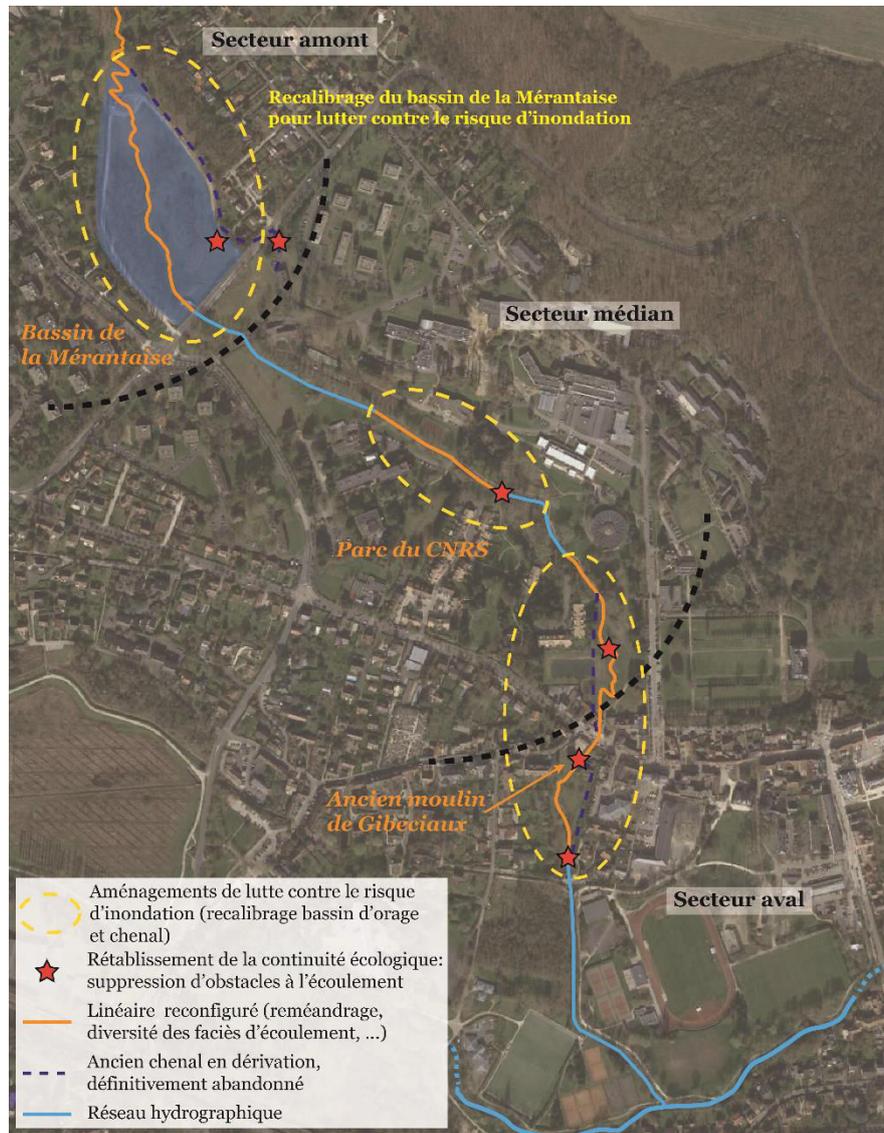


Figure 9.6 : Localisation et nature des opérations de restauration effectuées à Gif-sur-Yvette, entre 2013 et 2015 (sources : SIAVHY et AFB)

Une attention particulière a tout de même été portée aux aspects écologiques : un nouveau lit à méandre a été recréé en fond de talweg (à partir d'une reconstitution historique), un lit mineur légèrement resserré pour favoriser un travail morphologique de la rivière, 6 ouvrages hydrauliques ont fait l'objet d'une suppression (vannes, seuils et déversoirs pour partie à l'abandon), soit 9 m de dénivelé retrouvé.

Un autre projet de restauration est en cours mais les travaux n'ont pas débuté. Il s'agit de l'effacement *a priori* partiel d'un ouvrage en travers totalement infranchissable (1.70 m), désigné par les gestionnaires sous le nom de « seuil d'Ors », situé au niveau de l'ancien moulin d'Ors à Châteaufort. Le maître d'ouvrage est, cette fois, le PNR HVC et le site se situe dans un contexte immédiat plus rural, bien qu'à l'aval direct de la commune de Châteaufort.

2. Des projets de restauration écologiquement pertinents et hydromorphologiquement durables ?

Ainsi, les projets de restauration effectués sur le cours de la Mérintaise illustrent l'exemple d'opérations menées en contexte urbain. Cependant, ils posent la question du caractère durable de ces opérations d'un point de vue hydromorphologique et pertinent d'un point de vue écologique. En effet, quels peuvent être les réels gains écologiques lorsque, d'une part, la priorité des opérations est donnée à la lutte contre les inondations, et d'autre part, que les travaux de rétablissement de la continuité écologique ne considèrent pas l'ensemble des causes des altérations physiques de la rivière ?

2.1. Des opérations de reconquête qui répondent d'abord à des préoccupations économiques et sociales

Comme le rappelle Flaminio et al. (2015), les enjeux de restauration écologique et le nouvel engouement pour les rivières urbaines et périurbaines sont source de débats au sein de la sphère scientifique. Alors que certains auteurs relèvent l'émergence des préoccupations écologiques dans les sphères publiques et politiques, d'autres travaux dénoncent une intégration des enjeux environnementaux avant tout liée à des facteurs économiques ou encore à la prise de conscience d'un risque d'inondation longtemps oublié. Pour S. Bonin (2007), les projets de réhabilitation créeraient un paysage esthétique qui remplit des fonctions économiques mais qui n'intègre peu, voire pas, d'enjeux écologiques. D'autre part, les contraintes à la réalisation de ces projets de restauration sont plus importantes en ville qu'à la campagne car la pression foncière y est souvent plus forte (ex. disponibilité des terrains et acquisition foncière coûteuse) et les conflits plus nombreux du fait de la diversité et la multiplicité des acteurs (acceptabilité des projets). Dans le cas de la Mérintaise, les opérations réalisées à Gif-sur-Yvette se situent en domaine 100% privé et ont nécessité de longues discussions avec les propriétaires riverains. Plus en amont, à Ors, le choix du secteur à restaurer a été en partie décidé pour des raisons pratiques de propriété des lieux. En effet, il s'agit d'un tronçon possédé par le maître d'ouvrage, le PNR HVC et la commune de Châteaufort. Aussi, s'ils ne sont pas négligés, les intérêts écologiques viennent tout de même dans un second temps et sont directement soumis au contexte social et territorial.

2.2. Une prise en compte variable des conditions hydrosédimentaires spécifiques à chaque site

Alors que la priorité des enjeux de restauration est portée sur les aspects socio-économiques, les conditions physiques d'accueil des espèces piscicoles, et en particulier les caractéristiques hydrosédimentaires, ne sont pas toujours respectées. Elles sont parfois reconstituées par réinjection de recharge sédimentaire, sans pour autant respecter la réalité du fonctionnement hydrosédimentaire du site restauré (Arnaud, 2012). Ce manque de considération des conditions hydrosédimentaires réelles des cours d'eau restaurés s'explique en partie par le fait que les opérations de restauration se basent sur des modèles esthétiques préétablis de rivières considérées comme « naturelles ». Lespez et Germaine (2016) relèvent à ce propos qu'une large part de l'évaluation de la réussite des projets de restauration des rivières urbaines et périurbaines repose sur un aspect esthétique et paysager. Avec l'émergence des thématiques du « *Riverscape* » ou du « *River design* » (Prominski et al., 2012), la diffusion de modèles esthétiques archétypaux tend à standardiser les projets de restauration sans respecter la spécificité hydrosédimentaire de chaque rivière et de chaque site (Kondolf et al., 2006). On observe, en effet, une surreprésentation des rivières à méandre qui résulte notamment d'une réaction à la rectification des cours d'eau ou de la représentation « naïves » et bucoliques des cours d'eau comme sinueux s'écoulant dans des prairies permanentes longés par une ripisylve diversifiée, plus ou moins continue (Lespez et Germaine, 2016). C'est notamment le cas des petites rivières de faible énergie de l'ouest français ou de la région parisienne qui ont subi une dérivation et une rectification quasi-systématique de leur cours lors de la mise en place des aménagements hydrauliques anciens. Encore une fois, cette réalité nous fait nous interroger sur les véritables objectifs des projets de restauration et leur caractère durable d'un point de vue écologique et géomorphologique. L'écologie ne semble alors qu'un prétexte pour satisfaire des attentes sociales d'une autre nature ou se basant sur une connaissance, une vision, erronée du bon fonctionnement écologique. D'ailleurs, Kondolf (2006) critique tout autant la dimension esthétique et archétypale des formes restituées lors des opérations de restauration écologique que la dynamique proposée. Or, nous avons déjà montré que chaque site est spécifique et que le fonctionnement des rivières urbaines et périurbaines étaient désormais profondément influencés par l'urbanisation à l'échelle du bassin versant. Il ne semble donc pas raisonnable de considérer un modèle esthétique, et encore moins fonctionnel, applicable par essence aux contextes ruraux, dont le régime hydrologique est peu influencé par l'urbanisation, pour restaurer les espaces (péri)urbains.

Par ailleurs, il existe une sorte de paradoxe dans les projets de restauration des cours d'eau urbains et périurbains concernant le fonctionnement hydrologique. Les cours d'eau réaménagés sont, en effet, conditionnés pour recevoir des crues exceptionnelles (crue centennale en général), mais les projets de restauration ne prennent pas en considération le fonctionnement si particulier du régime hydrologique sous influence urbaine. Pour reprendre le cas de la Mérantaise, le chenal a été recalibré pour accueillir

une crue exceptionnelle suivant une géométrie plus ou moins arbitraire (un chenal de crue de 10 m de large dans lequel est emboîté un chenal actif de 2.50 m), des bancs de charges grossières et des épis ont été réinjectés dans le lit mineur et quelques enrochements ont été installés au niveau des berges. Si ces aménagements reprennent les motifs du modèle de la rivière à méandre largement répandu et que les gestionnaires assurent qu'ils se maintiennent jusque-là malgré des épisodes hydrologiques puissants (crue de 2016), nous sommes en droit de se demander si ces aménagements seront véritablement durables et s'ils ont un sens d'un point de vue du fonctionnement écologique. Les conditions hydrologiques contrôlées à l'échelle du bassin versant n'ont pas été changées. Si la morphologie du chenal a retrouvé un aspect qui peut paraître « naturel », ce n'est pas le cas du régime hydrologique, ni des fonctionnements hydrosédimentaires, toujours sous l'influence de l'urbanisation à l'amont et à l'aval. Dans une perspective plus lointaine, on pourrait également ajouter les conséquences du changement climatique qui devrait augmenter l'intensité et la fréquence des événements météorologiques violents et donc augmenter le ruissellement urbain (Islam et al., 2011; Sarukkalgige, 2013; Jato-Espino, 2016).

De la même manière, des secteurs plus en amont de la Mérantaise mériteraient d'être restaurés. Cependant, ils présentent pour certains un affleurement du *bedrock*, une argile très compacte et très difficilement érodable, sur laquelle la charge sédimentaire ne peut plus se fixer. L'essentiel des sédiments plus grossiers transportables pour la rivière a désormais disparu, très probablement sous l'effet du régime hydrologique urbain. Les habitats pour les biocénoses aquatiques ont donc été réduits. Or, réintroduire une charge solide trop fine risque d'aboutir à son évacuation rapide par les débits morphogènes de la rivière. À l'inverse, la réinjection d'une charge grossière surcalibrée empêchera la mobilité de la charge de fond et risquera d'entraîner la fermeture progressive du substrat. D'autres exemples montrent la dichotomie entre la réalité du fonctionnement hydrosédimentaire des rivières et les travaux de restauration menés. Sur l'Yerres, par exemple, de gros blocs ont été injectés dans le lit de la rivière, or ils ne correspondent absolument pas à la charge sédimentaire présente et transportée par la rivière. À peine correspondent-ils à des blocs qui pourraient être hérités de périodes plus anciennes lorsque la rivière était plus dynamique (Michler, 2017 : communication personnelle).

2.3. Une emprise spatiale restreinte des opérations de restauration et des échelles d'intervention mal adaptées

Ces aspects, évoqués précédemment, soulèvent un autre problème qui est celui de l'emprise spatiale restreinte des opérations de restaurations et des échelles d'intervention mal adaptées. En effet, les opérations de restauration concernent concrètement des tronçons spatialement limités à la zone directement sous l'influence de l'ouvrage à supprimer (dans le cas du rétablissement de la continuité

écologique). En contexte urbain, ce constat est d'autant plus vrai qu'au-delà de la dimension longitudinale restreinte des travaux de restauration, il est bien souvent difficile de redonner sa mobilité latérale au cours d'eau. Comme on l'a vu précédemment, les petits cours d'eau (péri)urbains sont essentiellement des propriétés privées du fait de leur statut de rivières « non-domaniales ». Aussi, est-il compliqué de faire accepter aux propriétaires riverains, responsables de la gestion de la rivière, que la restitution d'un « espace de liberté » de la rivière est préférable d'un point de vue hydrosédimentaire et biologique. Dans la quasi-totalité des projets étudiés par Lespez et Germaine pour leur article *La rivière désaménagée ? Les paysages fluviaux et l'effacement des seuils et des barrages en Europe de l'Ouest et en Amérique du Nord-Est* (2016), les travaux de reconfiguration du chenal s'accompagnent d'une fixation des berges essentiellement par enrochement.

Cette considération spatialement restreinte des secteurs restaurés omet, d'une certaine manière, le fonctionnement complexe et emboîté des différents compartiments et variables qui constituent l'hydrosystème. Il est en effet largement acquis que les systèmes fluviaux doivent être appréhendés à l'échelle du bassin versant et non pas à l'unique échelle du site. Cela est d'autant plus nécessaire pour les variables de contrôle tels que le régime hydrologique et les apports sédimentaires. En France, le passage d'une gestion sectorielle à une gestion intégrée de l'eau conduite à l'échelle des bassins versants est acté depuis la Loi sur l'eau de 1992 avec la mise en place des Schémas directeurs d'Aménagement et de Gestion des eaux (SDAGE) et des Schémas d'Aménagement et de Gestion des eaux (SAGE) (Lespez et al., 2016) Cette loi marque ainsi un élargissement des échelles spatiales de référence (du corridor fluvial au bassin versant). Or, l'exemple de la Mérintaise montre bien que, dans une certaine mesure, les conditions hydrologiques et sédimentaires de la rivière à l'échelle du bassin versant ne sont que partiellement prises en considération dans la réalisation concrète des projets de restauration. Certes les nouveaux aménagements ont été pensés pour accueillir une crue centennale, mais on est en droit de se demander de quelle manière les conséquences d'un régime hydrologique directement impacté par les ruissellements urbains, à savoir des crues plus intenses et fréquentes, des étiages potentiellement plus marqués et une réactivité très forte de la rivière, ont réellement été intégrés dans le processus de projet écologique durable de la Mérintaise.

2.4. Des projets systématiquement nécessaires et efficaces ?

De la même manière, certains auteurs ont montré que le manque de conception intégrée des projets de restauration écologique peut parfois aboutir à des effets négatifs sur les milieux aquatiques, en particulier les annexes hydrauliques situées dans la plaine alluviale. Ainsi, Dufour et al. (2017) rapportent le cas des projets de restauration de la continuité écologique sur la Vire et sur l'Orne (Normandie) où la suppression de seuils a causé des changements dans la connectivité hydrologique de la plaine alluviale avec les cours d'eau. Une diminution de la croissance des arbres (analyses par

dendrochronologie) a été observée en réponse à la baisse de l'humidité des sols par l'abaissement de la nappe phréatique. Les ouvrages en travers, notamment les barrages, sont en effet responsables d'une surélévation et du maintien de la nappe à des niveaux hauts. Dans ce projet de restauration, les espèces arborées de la plaine d'inondation ont été « sacrifiées » pour rétablir la continuité écologique. De la même manière, nous avons déjà présenté *supra* l'exemple américain des projets de démantèlement du Birch Run Dam, du Siebert Dam et du Big Brown Dam, en Pennsylvanie, rapporté par Lespez et Germaine (2016). Les sites restaurés après la suppression des ouvrages ont été en partie stabilisés avec la fixation des berges par enrochement ou travaux de génie écologique, au détriment d'une liberté retrouvée de la rivière. Ce critère de liberté de mobilité de la rivière est pourtant une solution durable d'un point de vue hydrosédimentaire et biologique.

Dans le cas de la Mérintaise, le projet non réalisé de la suppression du seuil d'Ors nécessite également une réflexion intégrée sur le fonctionnement hydrosédimentaire du secteur (au moins) et les conséquences de l'effacement du seuil sur les différentes composantes de la rivière. En effet, le cours d'eau est actuellement soumis à une incision et une érosion des berges, or le seuil maintient, d'une part, la ligne d'eau, mais surtout, la pente du lit. Il évite ainsi une érosion régressive qui déstabiliserait les ouvrages en amont (pont et route d'Ors) par une réactivation des processus d'érosion du chenal.

Ainsi, les objectifs de la restauration écologiques peuvent parfois être problématiques vis-à-vis de certains compartiments des hydrosystèmes. Ils posent les questions suivantes : sur quels processus ou espèces choisit-on de concentrer les efforts ? Quels usages doit-on valoriser, ou au contraire minimiser ? Quels processus dynamiques sont privilégiés, et au détriment de quels autres ? (Dufour et Piégay, 2009 ; Dufour et al., 2017).

2.5. Un manque de retour d'expérience et une trajectoire restaurée difficile à anticiper

Enfin, la plupart des études relatives à la restauration écologique pointent le manque de retour d'expérience des opérations de réaménagement permettant de s'assurer de leur caractère bénéfique (Morandi et Piégay, 2011; Morandi, 2014; Lespez et Germaine, 2016; Dufour et al., 2017; Brown et al., 2018). Les acteurs de la restauration des milieux aquatiques relèvent également ce problème.

Ce manque de connaissances scientifiques est notamment dû à la rareté des évaluations concertées et sur le long terme. Les effets sociaux et économiques bénéficient de suivis très limités, voire inexistantes (Narcy, 2013 ; Flaminio et al., 2015) , alors que l'évaluation écologique est, elle, en cours de structuration (Morandi et Piégay, 2011) et que la validité scientifique des intérêts procurés par les effacements de seuils est débattue (Germaine et Barraud, 2013b ; Barraud et Germaine, 2017; Dufour et al., 2017).

Ainsi, la durabilité des projets de restauration de la Mérantaise et l'avenir de sa « trajectoire de restauration », méritent d'être questionnés. Cette dernière, correspondant à l'état de la rivière après restauration, est difficile à appréhender *a priori*. La **Figure 9.7** reconstitue l'évolution de la « trajectoire de dégradation » de la Mérantaise sous l'effet des interventions humaines (Figure 9.7A., B., C.) et de la « trajectoire supposée de restauration », à partir de 2015. Les trajectoires des différents paramètres ayant pu influencer le fonctionnement hydromorphologique de la rivière (**Figure 9.7, A., B., C., E., F.**) ont été mis en regard avec la qualité hydromorphologique globale (**Figure 9.7, G.**) Les opérations de restauration étant très récentes, le retour d'expérience sur les impacts positifs, ou non, reste limité. Pour le moment, il est prévu un suivi de la qualité hydromorphologique (à l'aide du protocole CARHYCE) et biologique (piscicole et macro-invertébrés) retrouvée pour une période de 2 à 3 ans après restauration. Or, l'équilibre dynamique d'un cours d'eau n'est rarement retrouvé avant 10 ans de réajustements. Par ailleurs, nous émettons l'hypothèse que les effets bénéfiques des opérations de restauration sur la qualité hydromorphologique globale de la rivière seront peut-être de courte durée si les conditions d'écoulement aujourd'hui directement sous influence de l'urbanisation ne sont pas suffisamment prise en considération, voire restaurées elles-aussi (ce point sera développé par la suite). En effet, les travaux ont certes permis au chenal de retrouver un aspect morphologique proche de l'état de référence d'une rivière non influencée par les interventions anthropiques (état de référence type CARHYCE). Cependant, l'absence de modification du régime hydrologique risque d'aboutir plus probablement à une nouvelle diminution de la qualité hydromorphologique globale de la Mérantaise : une nouvelle phase d'incision et d'élargissement du lit (**Figure 9.7, E., F., G.**).

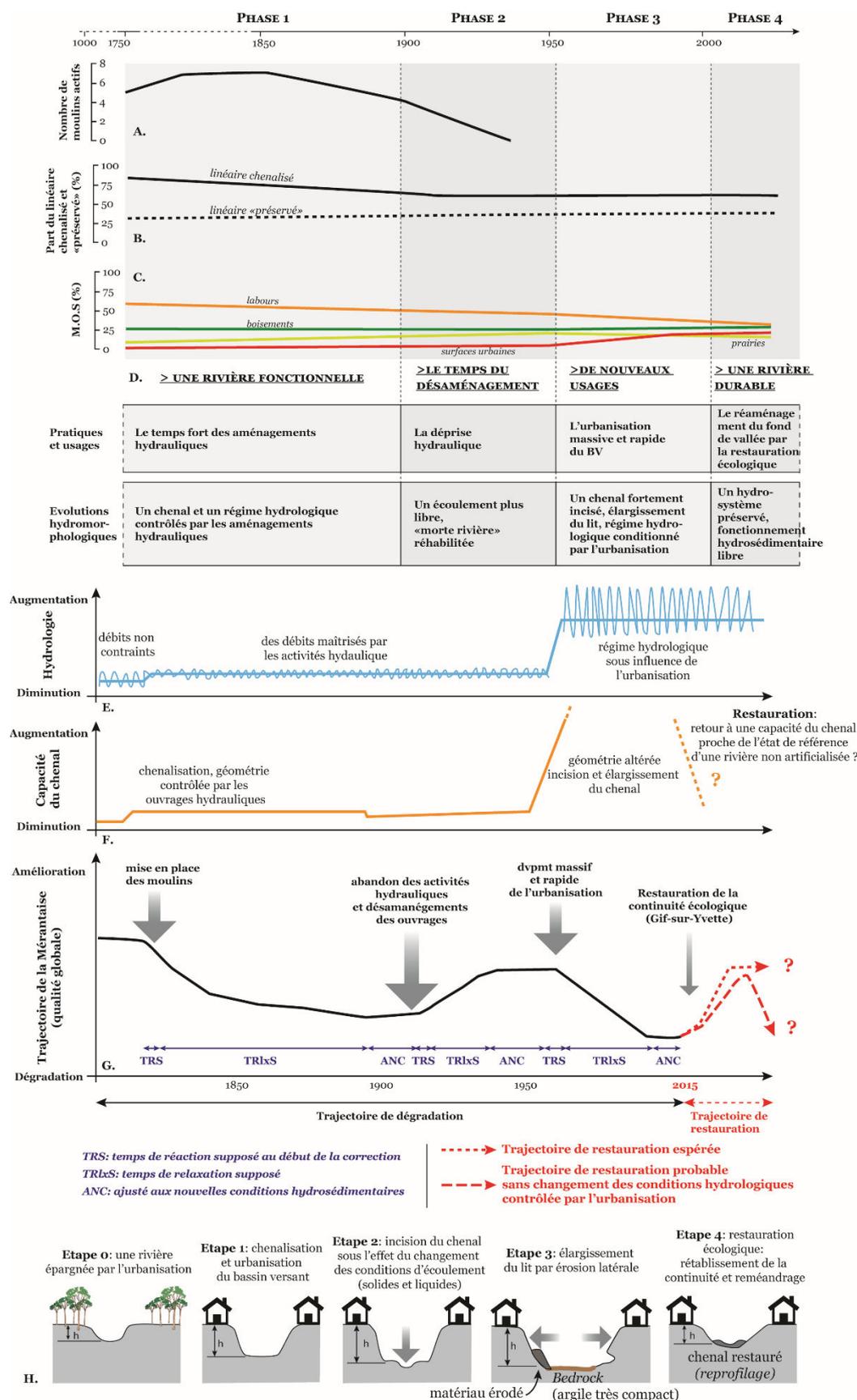


Figure 9.7 : Reconstitution schématique des trajectoires de dégradation et de restauration du compartiment hydromorphologique de la Mérentaise (modifié et réinterprété d'après Astrade et al., 2011 pour A., B., C. et D. ; modifié et réinterprété d'après Dufour et Piégay, 2009 pour E.). Trajectoire de la Mérentaise au regard de l'aménagement historique du chenal (A. et B.) et du bassin versant de la Mérentaise (C.)

3. Quelques pistes de réflexion pour mieux prendre en compte les conditions d'écoulement à l'échelle du bassin versant

Nous évoquons dans le paragraphe précédent la mise en péril de la durabilité des projets de restaurations des petites rivières urbaines et périurbaines par une intégration incomplète des écoulements urbains à l'échelle du bassin versant. Bien qu'il soit acquis que la compréhension du fonctionnement hydrosédimentaire des systèmes fluviaux nécessite une approche à l'échelle du bassin versant et malgré une gestion en théorie intégrée des dynamiques hydrauliques longitudinales et transversales de la rivière, l'essentiel des opérations de restauration restent spatialement pensées et réalisées à l'échelle du site en fond de vallée (Magilligan et al., 2016). Or, dans le cas de la Mérantaise, l'étude de la connectivité du bassin versant a montré que le régime hydrologique est aujourd'hui grandement contrôlé par les ruissellements urbains (et agricoles) issus des surfaces imperméabilisées et du réseau de drainage artificiel. Il devrait donc mieux être pris en considération dans les projets de restauration écologique.

Quelques pistes de réflexion ont déjà été soumises précédemment, en particulier concernant les charges sédimentaires réinjectées dans le lit des tronçons restaurés. Nous proposons ici de compléter cette liste à propos des ruissellements urbains. Les marges de manœuvre pour restaurer des conditions hydromorphologiques et écologiques durables sont assez limitées en contexte urbain et périurbain car les facteurs responsables des altérations sont bien souvent liés à des bénéfices pour la population riveraine difficile à remettre en cause : lutte contre les inondations, protection du bâti et des infrastructures routières, ... (Pelte, 2007). Pourtant, la meilleure prise en compte des conséquences de l'urbanisation sur le fonctionnement hydrosédimentaire des petites rivières est un enjeu majeur, aussi bien du point de vue de la préservation de l'environnement que du bon fonctionnement du milieu urbain (Carré et Deutsch, 2015).

Ainsi, les budgets des travaux de restauration écologique sont quasi systématiquement alloués à la reconfiguration physique du chenal en fond de vallée, en tout cas pour les opérations de rétablissement de la continuité piscicole et sédimentaire. Or peut-être faudrait-il également réserver une partie du financement à des actions menées pour la gestion des eaux urbaines au niveau des surfaces contributrices : par des opérations significatives de végétalisation de ces surfaces ruisselantes, par exemple. Pourquoi ne pas financer la mise en place de toits végétalisés qui intercepteraient les eaux précipitées et limiteraient les écoulements trop importants vers la rivière ? Si ce type d'actions n'est pas encore envisagé dans le cas de notre site d'étude, des solutions similaires sont mises en place et testées dans d'autres contextes. Van de Voorde et al. (2009) rapportent, par exemple, la promotion de la collecte et du recyclage des eaux pluviales en ville, notamment par l'interception et le stockage des eaux de pluie sur les toits des bâtiments. Les auteurs rappellent qu'en France, cette pratique fait l'objet d'un crédit d'impôts pour les particuliers depuis 2006 et l'usage de ces eaux à l'intérieur des bâtiments, une fois filtrées, est autorisé depuis 2008. Cet exemple fait, d'ailleurs, écho à l'actualité puisque le ministre de

la Transition écologique et solidaire a annoncé, lors de la présentation de son « Plan Biodiversité », le 4 juillet 2018, la fin de l'artificialisation des sols sans contrepartie des territoires français⁶⁵. Pour chaque hectare artificialisé, imperméabilisé, un hectare doit être « rendu à la nature » (reboisement, création d'espaces ruraux et préservés, ...). Il est ainsi évident qu'une gestion plus intégrée des bassins versants lors avec la gestion hydrosédimentaire des rivières s'impose. Or, comme nous l'avons montré, cela est encore loin d'être effectif.

Cependant, cette réflexion sur les enjeux urbanistiques de la gestion des eaux pluviales urbaines soulèvent plusieurs limites. D'une part, un certain décalage d'appréciation des enjeux en cause apparaît entre les acteurs de la gestion des eaux et les populations urbaines du fait du cumul des enjeux et des acteurs et du rapport de ces populations à la nature. Ils concernent en effet une population plus nombreuse, plus diversifiée dans ses attentes, plus difficile à satisfaire que celle des riverains ruraux (Lespez et Germaine, 2016). L'appréciation du paysage par les populations urbaines et de ce qui peut être considéré comme « naturel », en termes de représentation et de dynamiques est souvent faussé par une perception biaisée de la nature (Barro et Bright, 1998 ; Nassauer et al., 2001 ; Flaminio et al., 2015). Le rapport à la rivière de ces populations urbaines reste encore ambigu et limité. À cela s'ajoute le « syndrome » des rivières urbaines toutes affectées par le même « mal » dont les trois symptômes sont : une hydrologie complexifiée (notamment par les réseaux de collecteurs des eaux usées ou pluviales), une géomorphologie simplifiée (diminution de l'apport sédimentaire, disparition de bras secondaires, diminution de la sinuosité) et une fonctionnalité écologique réduite (Walsh et al., 2005 ; Bernhardt et Palmer, 2007 ; Flaminio et al., 2015). Pourtant, les études récentes, d'une portée plus sociologique sur la question, laissent espérer un fort potentiel de reconnexion et de réappropriation de la rivière urbaine/périurbaine par les habitants des villes et des marges urbaines à l'occasion des projets de restauration écologique (Flaminio et al., 2015 ; Lespez, et al., 2018). À ce propos, l'exemple des actions de concertation menées sur le Morbras par une équipe composée à la fois de gestionnaires et de chercheurs (groupe de travail Petites rivières urbaines de l'association ARCEAU Île-de-France), illustre bien ce potentiel. Le groupe de travail a ainsi animé des ateliers de réflexion avec des usagers du Morbras, une rivière de la région parisienne. L'objectif était d'aboutir à une déconstruction du concept de restauration écologique, mais aussi des diagnostics de la rivière afin de favoriser son intégration dans le territoire dans l'optique d'opérations de restauration⁶⁶.

⁶⁵ <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/nicolas-hulot-presente-plan-biodiversite-loccasion-du-premier-comite-interministeriel-biodiversite> et https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/2018.07.04_PlanBiodiversite.pdf (consultés en ligne le 05/07/2018).

⁶⁶ http://www.eptb-loire.fr/wp-content/uploads/2017/05/4_19_mai_am/19%20mai%20après%20midi/4_RonanQuillien.pdf (consulté le 28/06/2018)

Les études disponibles sur le sujet sont essentiellement orientées vers les problématiques de pollution chimique engendrées par le ruissellement urbain. Il existe peu de travaux sur les enjeux liés à l'hydromorphologie et à la biologie des rivières altérées (Lehoucq et al., 2013). Pour reprendre l'exemple de l'article de Van de Voorde et al. (2009), celui-ci observe que cette promotion de la collecte et de l'utilisation des eaux pluviales ne s'accompagne pas, jusqu'à présent, d'une réflexion suffisante sur l'adéquation entre la qualité des eaux de pluies issues des toitures et les usages envisagés, ni sur les procédures d'entretien à la fois de la surface de collecte et de la cuve qu'il convient de mettre en place. Les produits d'épandage utilisés pour le nettoyage et l'entretien des toitures pourraient notamment constituer une source importante de polluants organiques dans les eaux collectées. Par ailleurs, les auteurs remarquent qu'il reste encore un travail de sensibilisation à faire auprès des particuliers. Ces derniers n'ont pas nécessairement les bonnes pratiques pour préserver la qualité des eaux ruisselées par manque de connaissance. Quatre pratiques en contradiction avec les ambitions écologique de la collecte et de l'utilisation des eaux pluviales ont été identifiées par les chercheurs : le décrassage grossier, le traitement anti-mousses, l'imperméabilisation et la peinture. Or, pour ces quatre pratiques, des produits spécifiques existent, qui incluent pour la plupart une action biocide, donc polluante pour la ressource en eau et la biocénose (en bout de chaîne).

En contexte rural, les enjeux du ruissellement des eaux précipitées sont également présents. Cependant, la gestion de ces eaux ruisselées, toutes aussi polluées que les eaux d'origine urbaines, est déjà mieux prise en compte. Plusieurs exemples d'actions mises en place à l'occasion de projets de restauration écologique témoignent d'une meilleure intégration de ces problèmes à l'échelle du bassin versant (Bouni et al., 2012, rapport ONEMA). En effet, en Normandie, plusieurs organismes de gestionnaires et d'aménageurs des milieux aquatiques (CATER, syndicats de bassins, ...) travaillent en étroite collaboration avec les agriculteurs des bassins versants pour faire changer les pratiques agricoles. Des programmes de replantation de haies ou de surfaces enherbées pour intercepter et infiltrer les écoulements sont développés notamment par la CATER Normandie (<http://www.cater-normandie.fr/dossiers-thematiques/ruissellement-et-erosion.html>). Dans le même ordre d'action de gestion, le Syndicat Mixte du Bassin de la Sélune s'est doté d'un technicien de rivière « bocage-érosion » chargé d'accompagner les projets de replantation de haies (<http://bassin-selune.fr/qui-sommes-nous/equipe>).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette thèse avait deux objectifs principaux. L'un était de pallier le manque de connaissances sur les conditions d'ajustements hydromorphologiques des petites rivières périurbaines de faible énergie, à travers la reconstitution de la trajectoire historique et fonctionnelle d'un petit bassin versant francilien de marges urbaines. L'autre enjeu majeur de ce travail doctoral était d'interroger la place des opérations de la restauration écologique, préconisée depuis les années 2000 par la Directive Cadre européenne sur l'Eau, par rapport à la trajectoire conditionnant le fonctionnement hydrosédimentaire passé et actuel des cours d'eau (de faible énergie et périurbains, dans notre cas). Il s'agissait notamment de questionner le caractère écologiquement pertinent et hydromorphologiquement durable des projets de restauration des petits cours d'eau périurbains au regard des objectifs que vise le principe de la restauration écologique des milieux aquatiques.

Plusieurs objectifs plus spécifiques découlaient de ces interrogations et hypothèses de départ. Aussi, les petites rivières de faible énergie sont souvent désignées sous le terme de « *boring rivers* » par la littérature anglo-saxonne, sous-entendant la quasi-absence de dynamiques morphologiques et fluviales de ces cours d'eau. Or, ce travail de thèse était l'occasion d'évaluer la capacité d'ajustement de la Mérentaise (faisant *a priori* partie de cette catégorie de rivières), et de nuancer le terme de « faible énergie ». Par ailleurs, notre terrain d'étude ayant été historiquement équipé en ouvrages hydrauliques et étant, aujourd'hui, situé en contexte périurbain, il s'agissait d'analyser l'impact de ces différents modes d'occupation du sol et pratiques de la vallée sur les conditions hydromorphologiques de la rivière.

Le bassin versant de la Mérentaise offre, dans ces perspectives, un bon exemple de petit hydrosystème périurbain fortement soumis à plusieurs générations de pressions anthropiques, de différentes natures et intensités, tant à l'échelle du chenal qu'à celui du bassin versant. Par ailleurs, située au cœur de l'Île-de-France (Yvelines, Essonne), l'étude de la Mérentaise a permis d'apporter des éléments de compréhension sur les évolutions historiques et fonctionnelles qui ont marqué les petits cours d'eau du contexte des franciliens, peu étudiés jusque-là. On observe, en effet, un récent intérêt scientifique pour ces objets d'étude et ce contexte géographique, grâce à l'émergence de plus en plus prégnante des enjeux de restauration écologique des petites rivières urbaines et péri-urbaines (cf. par exemple, les travaux du PIREN Seine). Nos travaux sur la Mérentaise s'inscrivent dans cette dynamique scientifique en plein essor. Ils sont d'ailleurs précurseurs, d'une certaine manière, pour ce qui est de la problématique de reconstitution de la trajectoire historique et fonctionnelle des petites rivières franciliennes car il n'existe pas, à notre connaissance, d'études similaires sur ces enjeux et ce contexte géographique. Quelques travaux universitaires, réalisés ou en cours, se sont emparés récemment de ces questions et du cadre géographique des petites rivières périurbaines d'Île-de-France, mais il reste encore beaucoup à faire d'un point de vue scientifique.

Notre travail de recherche était organisé en trois temps, consacrés, d'une part, (i) à la reconstitution de la trajectoire historique et fonctionnelle de la Mérintaise, d'autre part, (ii) à l'établissement d'un état des lieux des conditions hydromorphologiques actuelles de la rivière, pour, enfin, (iii) être en mesure de questionner les enjeux et objectifs des opérations de restauration écologique dans la construction de la trajectoire de la rivière. La démarche générale de la thèse s'inscrivait dans une approche multiscalaire et interdisciplinaire, croisant données et méthodes historiques et hydromorphologiques.

■ Une rivière historiquement aménagée et dynamique

À ce titre, nos résultats ont permis d'identifier et distinguer 3 grandes phases historiques d'aménagements caractérisant la trajectoire de la vallée Mérintaise. Celles-ci sont rapportées et détaillées dans la partie 2. La première phase, courant du XVIII^{ème} à la fin du XIX^{ème} siècle, couvre une vaste période pluriséculaire, témoignant d'une forte emprise anthropique sur le corridor fluvial de la rivière étudiée. En effet, cette phase est considérée comme celle de « l'âge d'or » des activités hydrauliques (meunerie dans le cas de la Mérintaise) et se distingue par le développement et le maintien de nombreux ouvrages nécessaires à ces activités au sein même du chenal : moulins, seuils en rivière, vannes, lavoirs, ...et travaux de chenalisation importants (dérivation systématique des usines hydrauliques en position perchée sur les versants et rectification du tracé). Alors que les petites rivières de gabarit modeste ont été les premiers systèmes fluviaux à être aménagés par les sociétés, elles ont connu un abandon précoce de leur cours et de leurs aménagements hydrauliques faute d'avoir su se moderniser à la suite des avancées industrielles et techniques du XIX^{ème} siècle (Rivals, 2000; Barraud, 2007). Le chenal de la Mérintaise connaît alors une nouvelle phase essentiellement caractérisée par un « désaménagement » des ouvrages hydrauliques présents sur son cours : les moulins ayant perdu leur intérêt économique, les usines et les biefs perchés sont progressivement abandonnés au profit du talweg qui retrouve un écoulement pérenne après plusieurs siècles de dérivation des débits. Le fond de vallée est « remis en eau » et le chenal retrouve un tracé moins contraint durant la première moitié du XX^{ème} siècle. Cependant, cette réalité est de courte durée puisque les années 1980 marquent une nouvelle ère dans les pratiques et les usages de la rivière et de son bassin versant. La région parisienne est, en effet, le théâtre d'un bouleversement sociétal important, comme le reste de la France, avec l'exode rural débuté dans les années 1950 et le développement massif de l'urbanisation de son territoire pour faire face à la venue des populations rurales vers les villes. La troisième phase constitutive de la trajectoire de la Mérintaise se caractérise donc par une multiplication, sur près d'un quart de son territoire, des surfaces urbaines. Celles-ci s'accompagnent d'une intensification des réseaux routiers, mais surtout des réseaux de drainages artificiels dont l'exutoire est la rivière. Si le chenal à retrouver une partie de son cours en fond de vallée, de nouvelles contraintes, cette fois-ci directes (rejets urbains et protections de berge pour

lutter contre l'érosion des rives et le risque d'inondation) et indirectes (ruissellements urbains), viennent perturber l'équilibre hydrodynamique de la rivière.

Ces aspects ont été abordés dans la troisième, et dernière, partie de ce travail doctoral. Il s'agissait, en effet, de caractériser le fonctionnement hydrosédimentaire actuel de la Mérantaise et d'identifier les différents facteurs responsables de l'état morphologique, aujourd'hui, partiellement altéré du chenal. Nos observations ont permis d'établir deux constats : (1) la rivière présente des traces significatives d'incision et d'érosion latérale. Cependant, ces ajustements morphologiques s'avèrent spatialement variables et discontinus. Tout le linéaire n'est pas concerné par la même intensité et fréquence de dynamiques fluviales. Constat a été fait que les secteurs les plus impactés étaient généralement ceux directement ou indirectement soumis aux perturbations hydrologiques engendrées par l'imperméabilisation des sols (surfaces urbaines) ou l'implantation de drains artificiels. À cela s'ajoute d'autres facteurs locaux comme la composition des berges et du fond du lit, l'orientation du courant, ou encore la présence de structures anthropiques ou naturelles dans le chenal (lit et berge) pouvant contraindre les écoulements. En revanche, nous avons pu observer que si les seuils en rivière étaient considérés comme des obstacles à la libre circulation des espèces aquatiques et des sédiments, ils n'avaient en réalité qu'un impact limité sur le transfert de la charge sédimentaire mobilisée dans le lit de la Mérantaise. En effet, la capacité de transport de la charge grossière est très faible, voire nulle. Ce ne sont donc pas les seuils qui empêchent leur libre circulation. Seule la fraction la plus fine de la charge sédimentaire (sables, limons, argiles) est mobilisée par les courants. Or, ils ne sont pas, non plus, bloqués par les seuils artificiels du fait de leur mode de transport en suspension, et circulent librement au-delà des obstacles supposés. Au contraire ces ouvrages hydrauliques hérités maintiennent aujourd'hui le fond du lit de la rivière et limite les risques d'érosion régressive accélérés par un déséquilibre entre les apports en débits liquides et solides ($Q_l > Q_s$) et le régime hydrologique directement influencé par l'urbanisation. Enfin, nos résultats ont montré que les ajustements morphologiques constatés et mesurés aujourd'hui dans le chenal de la Mérantaise avaient été mis en place récemment (< 40 ans) et coïncident chronologiquement avec les modifications des écoulements hydrologiques engendrées par le développement massif et rapide de l'urbanisation dans le bassin versant depuis les années 1980. La comparaison entre un état passé, antérieur au début de l'urbanisation et l'état actuel de la géométrie du chenal a été possible grâce au recours à une documentation historique variée et notamment la consultation de cartes anciennes (XVII^{ème}-XX^{ème} siècle), le croisement de profils topographiques de ces différentes périodes (1980, 2010 et 2015) ou encore d'archives textuelles témoignant d'une géométrie plus modeste du chenal. En atteste la description du lit de la Mérantaise faite par G. Gaudin, dans son mémoire de thèse publié en 1963, qui la présente comme un petit ruisseau dont la largeur moyenne est comprise entre 1.20 m et 1.50 m (sauf en amont de Châteaufort où elle « varie d'environ un mètre ») et le chenal à l'amont « se réduit à une mince rigole qui se saute d'un pas ». Une géométrie qui diffère bien des conditions morphologiques actuelles (2.50m à 8 m de large, et des hauteurs de berge souvent ≥ 1.50 m.

Tous ces éléments constatés à propos du fonctionnement historique et hydrosédimentaire de la Mérentaise, de la chronologie des aménagements hydrauliques et des réponses du chenal sont cohérents avec ce qui a pu être observé dans la littérature scientifique pour des contextes plus ou moins similaires. L'impact de l'urbanisation sur les ajustements morphologiques et les conditions hydrosédimentaires des rivières est déjà bien renseigné (Gregory et al., 1992; Chin, 2006; Gurnell et al., 2007; Chin et al., 2013; Navratil et al., 2013; Chin et al., 2016). La trajectoire historique de l'aménagement hydraulique de la vallée entre en résonance avec ce qui a pu être décrit pour le contexte normand et plus généralement Ouest-français (Lespez et al., 2006, 2017; Cador et Lespez, 2012; Barraud et al., 2013; Germaine et Barraud, 2013; Beauchamp et al., 2017a, 2017b), ou encore bourguignon (Jacob-Rousseau et al., 2016). De la même manière, le caractère périurbain du bassin versant de la Mérentaise et les conséquences de l'urbanisation sur la morphologie de la rivière entrent en écho avec les constats établis dans le bassin de l'Yzeron, cours d'eau périurbain de la région lyonnaise (Grosprêtre, 2011; Navratil et al., 2013; Flaminio et al., 2015; Schmitt et al., 2016).

▪ **De nouvelles connaissances sur les petits hydrosystèmes périurbains franciliens et discussion autour du concept de la restauration écologique**

Cette thèse a donc permis d'améliorer les connaissances encore trop lacunaires sur les petits cours d'eau périurbains historiquement aménagés, et notamment ceux du contexte francilien. Ces derniers sont aujourd'hui soumis aux enjeux forts et parfois contradictoires du développement de l'urbanisation, d'une part, et de la préservation nécessaire des milieux aquatiques, d'autre part.

Par ailleurs, cette étude était l'occasion de participer à la réflexion sur les enjeux et les objectifs de la restauration écologique pour les petites rivières (péri)urbaines. Nous avons notamment questionné le caractère écologiquement pertinent et hydromorphologiquement pérenne des opérations de restauration. Le principal problème soulevé était celui d'une intégration insuffisante des évolutions et des conditions hydrologiques contrôlées par les nouvelles pratiques à l'échelle du bassin versant (urbanisation) dans les projets de restauration. Les opérations de restauration consistent en une reconfiguration physique uniquement à l'échelle du chenal mais ne prennent pas suffisamment en compte les enjeux de gestion à l'échelle du bassin versant (meilleure gestion des surfaces imperméables et du ruissellement urbain).

De la même manière, nous avons interrogé la façon dont les travaux de restauration s'inscrivent dans la trajectoire des rivières. Nous avons donc émis l'hypothèse que plus qu'un retour à un état préservé antérieur aux grandes modifications de l'hydrosystème par l'Homme, la restauration de la continuité écologique est à considérer comme **une nouvelle étape de l'aménagement des rivières**

répondant à des enjeux politiques et environnementaux actuels et dont les objectifs pourront évoluer par la suite avec les besoins et usages de l'eau par les sociétés. Dans le cas de la Mérantaise et de nombreux cours d'eau, cette nouvelle étape peut être identifiée à la phase 4 de la trajectoire historique et fonctionnelle de la rivière, après celle de « l'âge d'or » des activités hydrauliques (Phase 1), de l'abandon des ouvrages hydrauliques et d'une certaine liberté retrouvée de la rivière (Phase 2), et enfin, celle des modifications des usages et des pratiques à l'échelle du bassin versant, notamment du développement de l'urbanisation comme nouveau facteur de contrôle des dynamiques fluviales des rivières (Phase 3). Cette réflexion s'inscrit dans la continuité de celle de T. Dutoit qui définit la restauration écologique comme « [une action qui consiste] à *piloter un écosystème dégradé selon une des trajectoires dites de référence par rapport à des objectifs choisis en amont du projet dans des contextes scientifiques et socio-économiques du moment* » (Dutoit, 2014 ; Lespez et Germaine, 2016). Précédemment, Trimble (2009) constatait à propos de la Coon Creek (Wisconsin, USA) que les différentes opérations conduites depuis quatre décennies sur son terrain d'étude n'étaient pas seulement un exemple de désaménagement de la rivière mais aussi un « nouveau projet de rivière aménagée pour d'autres raisons ». Ses travaux sont également à l'origine de la réflexion de L. Lespez et M.A. Germaine valorisée dans leur article *La rivière desaménagée ?*⁶⁷ (2016) sur ce sujet. Les auteurs ont notamment conclu que les opérations de restauration écologique correspondaient en à nouveau projet d'aménagement des rivières et que les cours d'eau « restaurés » n'étaient pas nécessairement plus « naturels » que les rivières historiquement rectifiées.

▪ Perspectives

Cette étude s'est essentiellement concentrée sur la reconstitution des périodes historiques récentes, du XVII^{ème} siècle au XX^{ème} siècle. S'il s'agit d'époques particulièrement significatives quant aux évolutions des pratiques et des usages à l'échelle du chenal et du bassin versant de la Mérantaise, elles ne permettent pas d'expliquer pleinement les héritages anciens et géomorphologiques constitutif de la trajectoire historique et fonctionnelle de la rivière. Il serait intéressant de pouvoir élargir le cadre temporel de ces connaissances aux périodes antérieures grâce à des études géoarchéologiques et une reconstitution des paléo-environnements. Une meilleure compréhension des évolutions de la vallée de la Mérantaise sur le temps long (Holocène) compléterait donc notre travail doctoral, à l'image de ce qui peut être fait dans d'autres contextes, souvent sur des hydrosystèmes plus conséquents : en Normandie (Lespez et al., 2005b.; Germain-Vallée et Lespez, 2011; Lespez, 2012; Lespez et al., 2015; Beauchamp et al., 2017b), dans le bassin de la Loire (par exemple, Gautier et al., 2007, pour le Moyen-Âge peu renseigné sur la Mérantaise), celui de la Garonne (Lescure, 2015), ou celui du Rhône (Salvador

⁶⁷ Le titre complet de l'article est *La rivière desaménagée ? Les paysages fluviaux et l'effacement des seuils et des barrages en Europe de l'Ouest et en Amérique du Nord.*

et Berger, 2014). Ces lacunes devraient, cependant, être partiellement comblées car une thèse, intitulée « *Trajectoire fonctionnelle (hydrogéomorphologie, biologie) des petites rivières périurbaines d'Île-de-France : l'exemple de la Biberonne, de la Mérantaise et du Morbras* »⁶⁸ est prévue sur le sujet et doit débiter à la rentrée 2018.

Par ailleurs, le fonctionnement hydrologique du bassin de la Mérantaise n'a pu être étudié de manière approfondie. Il mériterait d'être développé par une analyse plus poussée et notamment un travail de modélisation des conditions hydrologiques avant et après le développement de l'urbanisation. Celle-ci étant finalement récente dans le bassin versant de la Mérantaise (1980), il doit être possible de se baser sur des chroniques de débits et de pluies suffisamment fiables pour agréments un des nombreux modèles de relation pluies-débits existants (Andréassian et al., 2003; Niemi et al., 2017; Salavati et al., 2015).

Enfin, cette étude illustre le cas précis d'un petit cours d'eau francilien, la Mérantaise, mais elle est transposable et adaptable (par ces méthodes et ces résultats) à d'autres contextes, en particulier les rivières périurbaines du bassin parisien.

⁶⁸ Thèse effectuée par L. de Milleville, sous la direction de L. Lespez, co-dirigée par F. Gob et E. Talès (IRSTEA), à l'Université de Paris Est Créteil (UPEC) et au Laboratoire de Géographie Physique (LGP) UMR CNRS 8591.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

Adam, Ph., Malavoi, J.R., Debiais, N. 2007. Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau. Agence de l'Eau Seine-Normandie. DEMAA - Service eaux de surface. Manuel : 61 p.; fiches techniques : 100 p.

Adam P., Debiais N., Gerber F. & Lachat B. 2008. Le génie végétal : un manuel technique au service de l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, La documentation Française, 290 p.

Alho P, Kukko A, Hyypä H, Kaartinen H, Hyypä J, Jaakkola A. 2009. Application of boat-based laser scanning for river survey. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 1831-1838. DOI: 10.1002/esp.1879

Ali, L. 2016. Étude de la dynamique hydromorphologique du Morbras et de sa plaine alluviale. Mémoire de Master 1. Université Paris Est Créteil.

Ali L. 2017. Étude de la dynamique hydromorphologique du Morbras. Mémoire de Master 2, Paris XII UPEC, 154 pp.

Ambers R.K.R. 2007. Effects of a Small, Century-old Dam on a Second-order Stream in

the Virginia Piedmont. *Southeastern Geographer*, 47 (2), 181-201

Amoros, C., Roux, A.L., Reygrobellet, J.L., Bravard, J.P., Pautou, G. 1987. A method for applied ecological studies of fluvial hydrosystems. *Regulated Rivers: Research and Management* 1, 17- 36.

Amoros, C., Bravard, J.P., Reygrobellet, J.L., Pautou, G., Roux, A.L. 1988. Les concepts d'hydrosystème et de secteur fonctionnel dans l'analyse des systèmes fluviaux à l'échelle des écosystèmes. *Bulletin d'écologie* 19, 531-546.

Amoros C., Petts G.E. 1993. Bases conceptuelles. In : Amoros C. et Petts G.E. (Eds.), *Hydrosystèmes fluviaux*, Paris, Masson, coll. *Ecologie* 24, 3-17.

Andersson E., Nilsson N. C., Johansson M.E. 2000. Effects of river fragmentation on plant dispersal and riparian flora. *Regulated Rivers: Research and Management* 16, 83–89.

Andréassian V, Parent E, Michel C. 2003. A distribution-free test to detect gradual changes in watershed behavior. *Water Resources Research* 39 (9), 1252. DOI: 10.1029/2003WR002081

Antrop M. 2005. Why landscapes of the past are important for the future. *Landscape and Urban*

Planning 70, 21-34. DOI:
10.1016/j.landurbplan.2003.10.002

Armengaud J., Balland P., Badré M. 2003. Le curage d'entretien des cours d'eau « vieux fonds, vieux bords ». Rapport de l'inspection générale de l'environnement. Ministère de l'écologie et du développement durable

Arnal G. et Kovacs J.-C. (non publié). Détermination du degré de rareté régionale des espèces végétales, Conservatoire Botanique National du Bassin Parisien.

Arnaud F. 2012. Approches géomorphologiques historique et expérimentale pour la restauration de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial aménagé : le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne), Université Lumière Lyon 2

Arnold C., Boison P., Patton P. 1982. Sawmill Brook: an example of rapid geomorphic change related to urbanization. *Journal of Geology* 90, 155-166.

Ascher F. 1995. Meapolis ou l'avenir des villes, O. Jacob, Paris, 346 pp.

Ashraf M., Kahlowan M.A., Ashfaq A. 2007. Impact of small dams on agriculture and groundwater development: A case study from Pakistan. *Agricultural Water Management* 92, 90-9

Assani AA, Petit F. 2004. Impact of hydroelectric power releases on the morphology and sedimentology of the bed of the Warche River (Belgium). *Earth Surface Processes and Landforms* 29, 133-143. DOI: 10.1002/esp.1004

Assani A.A., Buffin-Belanger T., Roy. A.G. 2005. Analyse d'impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada). *Revue des Sciences de l'Eau* 18, 103-127

ASTEE, 2013. Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques. Pourquoi ? Comment ? Décembre 2013, 357 p.

Astrade L, Jacob-Rousseau N, Bravard J-P, Allignol F, Simac L. 2011. Detailed chronology of mid-altitude fluvial system response to changing climate and societies at the end of the Little Ice Age (Southwestern Alps and Cévennes, France). *Geomorphology* 133, 100-116. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.06.028

Azelos L. 2005. Bilan écologique de la réserve naturelle régionale du domaine d'Ors, Ed. MNHN.

B

Bagnold, R.A. 1960. Sediment discharge and stream power. a preliminary announcement. U.S. Geological Survey, Circular 421.

- Bagnold R.A. 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. U.S. Geological Survey, 422, 137p.
- Bagnold R.A. 1977. Bed load transport by natural rivers. *Water Resource Research* 13, 303-312
- Balland P. 2004. Impacts des barrages sur les milieux physiques et biologiques. *Ingénieries*, Supplément au n° 38, 23-32
- Baumgartner L. J. 2007. Diet and feeding habits of predatory fishes upstream and downstream of a low-level weir. *Journal of Fish Biology* 70, 879-894
- Barker R, Dixon L, Hooke J. 1997. Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion. *Earth Surface Processes and Landforms* 22, 1217-1227. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199724)22:13<1217::AID-ESP819>3.0.CO;2-U
- Barnaud G. 1995. A l'interface de la pratique et de la théorie : l'écologie de la restauration, *Natures Sciences Sociétés*, Vol. HS 3, 29-35.
- Barraud R. 2004. Les rivières à biefs étagés : des paysages contre nature ? *Cahiers Nantais* 61 : 31-43.
- Barraud R. 2007. Vers un « tiers-paysage »? *Géographie paysagère des fonds de vallées sud-armoricaines*. Héritage, évolution, adaptation, Université de Nantes; Institut de Géographie et d'Aménagement Régional (IGARUN), 410 pp.
- Barraud R. 2009. La mise en œuvre de la gestion physique des cours d'eau. Le cas des seuils. Retour d'expérience. Bassins de la Sèvre nantaise et du Thouet, 86 pp.
- Barraud R. 2011. Rivières du futur, "*wild rivers*"? *Vertigo*, HS 10. DOI: 10.4000/vertigo.11411
- Barraud R. 2017. Removing mill weirs in France: The structure and dynamics of an environmental controversy. *Water Alternatives* 10 : 796-818.
- Barraud R. 2017. Démanteler les seuils de moulins à eau en France: géohistoire d'une controverse environnementale. *Colloque LIFE Continuité écologique 2017*, communication orale
- Barraud R, Germaine M-A. 2017. Démanteler les barrages pour restaurer les cours d'eau: Controverses et représentations . *Update Sci. Quae* (éd). Versailles
- Barraud R, Lespez L, Germaine M-A, Cador J-M. 2013. Moulins à eau et ouvrages hydrauliques , outils de reconstitution et d'interprétation des trajectoires paysagères des fonds de vallées. In *Au fil de l'eau. Ressources, risques et gestion du Néolithique à nos jours* , Ballut C et Fournier P (éd). 71-88.

- Barro, S. C., & Bright, A. D. 1998. Public Views on Ecological Restoration A Snapshot from the Chicago Area. *Ecological Restoration*, 16 (1), 59-65.
- Batalla R.J., Gomez C.M., Kondolf G.M. 2004. Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *Journal of Hydrology* 290, 117-136
- Beauchamp A, Lespez L, Delahaye D. 2017a. Impacts des aménagements hydrauliques sur les systèmes fluviaux bas-normands depuis 2000 ans, premiers résultats d'une approche géomorphologique et géoarchéologique dans la moyenne vallée de la Seulles. *Quaternaire* : 253-258. DOI: 10.4000/quaternaire.8153
- Beauchamp A, Lespez L, Rollet A-J, Germain-Vallée C, Delahaye D. 2017b. Les transformations anthropiques d'un cours d'eau de faible énergie et leurs conséquences, approche géomorphologique et géoarchéologique dans la moyenne vallée de la Seulles, Normandie. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 23 : 121-138. DOI: 10.4000/geomorphologie.11702
- Beechie T.J., Sear D.A., Olden J.D., Pess G.R., Buffington J.M., Moir H., Roni P., Pollock M.M. 2010. Process-based principles for restoring river ecosystems. *BioScience* 60 (3): 209-222
- Benda L., Hassan M.-A., Church M. et May C.-L. 2005. Geomorphology of steep-land headwaters : the transition from hillslopes to channels, *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 41 (4), 835-851.
- Benoit P. 1998. Au four et au moulin : innovation et conjoncture. 293-301 pp.
- Benoit P, Berthier K, Franche-comté ET, Benoit P. 1998. L'innovation dans l'exploitation de l'énergie hydraulique d'après le cas des monastères cisterciens de Bourgogne, Champagne et Franche-Comté. 58-66 pp.
- Bernhardt, E. S., & Palmer, M. A. 2007. Restoring Streams in an Urbanizing World. *Freshwater Biology* 52 (4), 738-751.
- Billen G., Thieu V., Garnier J., Silvestre M. 2009. Modelling the N cascade in regional watersheds: The case study of the Seine, Somme and Scheldt rivers. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 133, 234-246
- Billi P., Paris E. 1992. Bed sediment characterization in river engineering problems. *Proceedings of the Symposium "Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basin"*, 24-29 August 1992, Oslo, Norway, IAHS Publications 210, 11-20
- BIOTEC, Malavoi J.R.. 2007 : Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau. Publications de l'Agence de l'Eau Seine Normandie
- Bird S, Hogan D, Schwab J. 2010. Photogrammetric monitoring of small streams

under a riparian forest canopy. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 952-970. DOI: 10.1002/esp.2001

Bizzi S., Lerner D.N. 2015. The use of stream power as an indicator of channel sensitivity to erosion and deposition processes. *River Res. Appl.* 31, 16-27.

Bledsoe B.P., Watson C.C. 2001. Effects of urbanization on channel instability. *Journal of the American Water Resources Association* 37 (2), 255-270.

Bondarev V., Gregory K. 2002. Urbanization and stream channels. *Geography Review* 15 (5), 10-13

Bonin, S. 2007. Fleuves en ville : enjeux écologiques et projets urbains. *Strates. Matériaux pour la recherche en sciences sociales* 13, 11 p.

Booth D.B. 1991. Urbanization and the natural drainage system: impacts, solutions and prognoses. *The Northwest Environmental Journal* 7 (1), 93-118.

Booth D.B. 2000. Forest cover, impervious surface area, and the mitigation of urbanization impacts in King County. Washington. Prepared for the King County Water and Land Resources Division, 18 p. (<http://water.washington.edu/Research/Reports/forest.pdf>)

Booth DB, Jackson CR. 1997. Urbanization of aquatic systems: degradation thresholds, stormwater detection, and the limits of mitigation. *Journal of the American Water Resources Association* 33 : 1077-1090. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1997.tb04126.x

Bouleau G. 2017. La catégorisation politique des eaux sous l'angle de la political ecology : le patrimoine piscicole et la pollution en France. *Espace géographique* 46 : 214. DOI: 10.3917/eg.463.0214

Bouloud A., Foutlane A., Bouchich L. 2001. Eutrophisation des retenues de barrage et production d'eau potable. *Revue H.T.E* 119, 21-24.

Bouni C., Chevillotte G., Dufour A., Narcy J.B (ASCa). 2012. Etude comparative des projets de restauration des cours d'eau. Analyse transversale des études de cas européennes et françaises. *Rapport ONEAM*, 77 pp.

Bouraoui M. 2000. L'agriculture, nouvel instrument de la construction urbaine ? Étude de deux modèles agri-urbains d'aménagement du territoire : le plateau de Saclay, à Paris, et la plaine de Sijoumi, à Tunis, Thèse de Doctorat, ENGREF-ENSPV, 439 pp.

BrackenL-J., Croke J. 2007. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff- dominated geomorphic systems. *Hydrological processes* 21, 1749-1763.

- Bradshaw A. D. 1996. Underlying principles of restoration, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 53, No. Suppl. 1, 3-9.
- Branch, N.P., Batchelor, C.R., Cameron, N.G., Coope, R., Densem, R., Gale, R., Green, C.P., Williams, A.N. 2012. *Holocene Environmental Changes at Hornchurch Marshes*, London, UK: implications for our understanding of the history of *Taxus* (L.) woodland in the Lower Thames Valley. *The Holocene* 22, 1143–1158.
- Brandt S.A. 2000a. Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena* 40, 375-401.
- Brandt S.A. 2000b. Prediction of downstream geomorphological changes after dam construction: a stream power approach. *Water Resource Development* 16, 343-367.
- BRAATNE
- Brater, E.F., Sangal, S. 1969. Effects of urbanization on peak flows. In: Moore, W.L., Morgan, C.W. (Eds.), *Effects of Watershed Changes on Stream Flow*. Water Resources Symposium 2. University of Texas, Austin, 201–213
- Braud I, Breil P, Thollet F, Lagouy M, Branger F, Jacqueminet C, Kermadi S, Michel K. 2013. Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France. *Journal of Hydrology* 485, 5-23. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.04.049
- Bravard J.P., Magny M. (dir.). 2002. *Les fleuves ont une histoire. Paléoenvironnement des rivières et des lacs français depuis 15000 ans*, Errance, Paris, 312 p.
- Bravard J.P., Petit F. 2000. *Les cours d'eau, dynamique du système fluvial*, Armand Colin, Collection U, Paris, 222 p.
- Breil P., Chocat B. 2007. Comment mesurer l'évolution des risques d'inondation et comment identifier leurs causes? Colloque Les petites rivières périurbaines: connaissance des risques, évaluation de la qualité, aide à la décision, OTHU, janvier 2007
- Breil P., Radojevic B., Chocat B. 2010. Urban development and extreme flow regime changes. Proceedings of the 6th world FRIEND conference, 25-29 October 2010, Fez, Morocco, IAHS Publications 340, 314-319.
- Brierley GJ, Fryirs KA. 2005. *Geomorphology and River Management: Application of the River Styles Framework*. Blackwell Publishing: Malden, MA, USA, 398
- Brierley G., Fryirs K., Jain V. 2006. Landscape connectivity: the geographic basis of geomorphic applications. *Area* 38 (2), 165-174.
- Brookes A. 1985. River channelization: traditional engineering methods, physical consequences and alternative practices. *Progress in Physical Geography* 9 (1), 44-73.

Brookes A. 1987. River channel adjustments downstream from channelization works in England and Wales. *Earth Surface Processes Landforms* 12, 337-351.

Brookes A. 1988. *Channelized rivers: perspectives for environmental management*. John Wiley & Sons, Chichester, 326 p.

Brookes A., Gregory K.J. 1983. An assessment of river channelization in England and Wales. *The Science of the Total Environment* 27, 97-111.

Brown, A.G. 1997. Biogeomorphology and diversity in multiple-channel systems. *Glob. Ecol. Biogeogr. Lett.* 6, 179–185

Brown, A.G., Toms, P., Carey, C. et Rhodes, E. 2013. Geomorphology of the Anthropocene: Time-transgressive discontinuities of human-induced alluviation. *Anthropocene* 1, 3-13

Brown AG, Lespez L, Sear DA, Macaire J-J, Houben P, Klimek K, Brazier RE, Van Oost K, Pears B. 2018. Natural vs anthropogenic streams in Europe: History, ecology and implications for restoration, river-rewilding and riverine ecosystem services. *Earth-Science Reviews* 180, 185-205. DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.02.001

Brunsdon D, Thornes JB. 1979. Landscape Sensitivity and Change. *Transactions of the Institute of British Geographers* 4 : 463. DOI: 10.2307/622210

Buijs A. 2009. Public support for river restoration. A mixed-method study into local residents' support for and framing of river management and ecological restoration in the Dutch floodplains, *Journal of Environmental Management* 90 (8), 2680-2689.

Bultot F, Dupriez GL. 1976. Conceptual hydrological model for an average-sized catchment area, I. Concepts and relationships. *Journal of Hydrology* 29, 251-272. DOI: 10.1016/0022-1694(76)90040-8

Bunte K., Ergenzinger P. 1989. New tracer techniques for particles in gravel bed rivers. *Bulletin de la Société Géographique de Liège* 25, 85-90

Burges S.J., Wigmosta M.S., Meena J.M. 1998. Hydrological effects of land-use change in a zero- order catchment. *Journal of Hydrologic Engineering*, 3 (2), 86-97.

Burnouf J. 2009. Vulnérabilité des sociétés médiévales aux aléas météorologiques et climatiques, Actes de la table ronde de Lattes, 11 mai 2007, *Archéologie du Midi Médiéval*

C

Cador J-M, Lespez L. 2012. Les cours d'eau bas-normands aujourd'hui : Entre hydrosystèmes et systèmes hydrauliques. In Lespez L. *Paysages et gestion de l'eau: sept millénaires d'histoire des vallées en Normandie*, 235-272

- Cairns J. 1991. The status of the theoretical and applied science of restoration ecology, *The Environmental Professional*, Vol. 11, 152-159.
- Cairns J. 1995. Ecosocietal Restoration Reestablishing Humanity's Relationship with Natural Systems. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* 37 (5), 4-33
- Campana N.A., Tucci C.E.M. 2001. Predicting floods from urban development scenarios: case study of the Diluvio basin, Porto Alegre, Brazil. *Urban Water* 3, 113-124.
- Capanni R. 2011. Etude et gestion intégrée des transferts sédimentaires dans le système Gapeau/rade de Hyères, Thèse de Doctorat, Université de Provence Aix – Marseille, 319p
- Carbonneau P, Lane S, Bergeron N. 2003. Cost-effective non-metric close-range digital photogrammetry and its application to a study of coarse gravel river beds. *International Journal of Remote Sensing* 24, 2837-2854. DOI: 10.1080/01431160110108364
- Carcaud, N. 2004. D'espace et de temps : un itinéraire de recherche et d'enseignement sur les anthroposystèmes fluviaux. Mémoire d'HDR, Université d'Angers, 2 vol., 219 & 216 p
- Carré et al. 2011 (Dir). Les petites rivières urbaines d'Île-de-France. Découvrir leur fonctionnement pour comprendre les enjeux autour de leur gestion et de la reconquête de la qualité de l'eau. *PIREN Seine*. Vol. 11. 86 pp.
- Carré C, Haghe J-P. 2013. Spatialization of political action applied to waterways management an overview of Parisian urban small rivers. *Environnement Urbain* 7 : c1. DOI: 10.7202/1027731ar
- Carré C., Deutsch J.C. 2015. L'eau dans la ville. Une amir qui nous fait la guerre. Éditions de l'Aube
- Carter, R.W. 1961. Magnitude and frequency of floods in suburban areas. *USGS Professional Paper* 424-B, B9-B11.
- Castanet C. 2008. La Loire en val d'Orléans: les 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, 545 pp.
- Cavalli M, Tarolli P. 2011. Application of LIDAR technology for rivers analysis. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment* : 33-44. DOI: 10.4408/IJEGE.2011-01.S-03
- Cazeils N. 2003. Autrefois la pêche en eau douce. Insolite, histoires, traditions et savoir-faire, Rennes, éditions Ouest-France, Mémoires, 127 p.
- Charpy R. 1941. Note statistique sur la production des eaux douces françaises. *Bulletin Français de Pisciculture*, 38-44. DOI: 10.1051/kmae:1941004

- Cherruault J., Dussurget F., Prévieu M., Salin P. 2015. Evolution du profil en long de la "Mérantaise" depuis le XIXème siècle. Projet pré-professionnel. Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes (CNAM), 91 pp.
- Chevreuil M., Blanchard M., Dargnat C., Gasperi J., Gourlay C., Lorgeoux C., Moilleron R., Moreau-Guignon E., Oollivon D., Teil M.-J., Mouchel J.-M. 2009. La micropollution organique dans le Bassin de la Seine. Fascicule Piren-Seine, 66 p
- Chin A. 2006. Urban transformation of river landscapes in a global context. *Geomorphology* 79 : 460-487. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.06.033
- Chin A., Gregory K.J. 2001. Urbanization and adjustments of ephemeral stream channels. *Annals of American Geographers*, 91 (4), 595-608
- Chin A., Gregory K.J. 2005. Managing urban river channel adjustments. *Geomorphology*, 69, 28- 45
- Chin, A., O'Dowd, A.P., Gregory, K.J. 2013. Urbanization and river channels. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Wohl, E. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, CA, *Fluvial Geomorphology* 9, 809-827
- Chin A, An L, Florsheim JL, Laurencio LR, Marston RA, Solverson AP, Simon GL, Stinson E, Wohl E. 2016. Investigating feedbacks in human–landscape systems: Lessons following a wildfire in Colorado, USA. *Geomorphology* 252 : 40-50. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.07.030
- Chocat B. 1997. Le rôle possible de l'urbanisation dans l'aggravation du risque d'inondation : l'exemple de l'Yzeron (Lyon). *Revue de Géographie de Lyon* 72 (4), 273-280.
- Chorley R.J. 1962. *Geomorphology and general systems theory*. USGS professional paper, 500B, 10 p.
- Coleman D., MacRae C., Stein E.D. 2005. Effect of increases in peakflows and imperviousness on morphology of southern California streams. Southern California Coastal Water Research Project, Technical Report 450, 70 p.
- de Coninck A, Deroubaix J-F, Carré C, Becu N, Haghe J-P, Hubert G. 2015. Confronter et recomposer les représentations pour concilier des politiques environnementales antagonistes. L'implication de la communauté scientifique dans la mise en débat de la continuité écologique sur Grand Morin. *Environnement, politiques publiques et pratiques locales* : 95-120.
- Corbin A. (Ed). 1995. *L'avènement des loisirs, 1850-1960*. Paris, Aubier, 475 pp.
- Corbonnois J., Bonnefond M., Chardon V., Rodrigues S., Jugé P., Cali J., Verdun J., Simonetto E., Tchekpo W., Labergerie E., Faucheux G. 2016. Détermination des

conditions de la dynamique fluviale d'une rivière aménagée de basse énergie, à partir de secteurs du Loir (Bassin de la Loire aval). *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 22, 345-361. DOI: 10.4000/geomorphologie.11559

Costanza R., D'Arge R., De Groot R.S., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., Van den Belt M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260

Cottet M. 2010. La perception des bras morts fluviaux. Le paysage, un médiateur pour l'action dans le cadre de l'ingénierie de la restauration. Approche conceptuelle et méthodologique appliquée aux cas de l'Ain et du Rhône. Thèse de Doctorat, Université Lyon 3, 358 p.

Couper P. 2003. Effects of silt-clay content on the susceptibility of river banks to subaerial erosion. *Geomorphology* 56, 95-108. DOI: 10.1016/S0169-555X(03)00048-

Couper P, Maddock I. 2001. Subaerial river bank erosion processes and their interaction with other bank erosion mechanisms on the River Arrow, Warwickshire, UK. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 631-646. DOI: 10.1002/esp.212

Couper P, Stott T, Maddock I. 2002. Insights into river bank erosion processes derived from analysis of negative erosion-pin recordings: observations from three recent UK studies.

Earth Surface Processes and Landforms 27, 59-79. DOI: 10.1002/esp.285

Coynel A., Schafer J., Hurtrez J., Etcheber H. 2003. Réseau d'observation des transferts sédimentaires dans le Sud- Ouest de la France : comportement des petits fleuves montagnards des Pyrénées Atlantiques. Proceedings of the international conference on gully erosion in mountain areas, Processes, Measurement, Modelling and Regionalization, Dignes-les-Bains, France, 44-49

Creed I.F., Band L.E. 1998. Exploring functional similarity in the export of nitrate-N from forested catchments: a mechanistic modelling approach. *Water Resource Science*, 34 (11), 3079-3093

Croke J., Mockler S., Fogarty P., Takken I. 2005. Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity. *Geomorphology*, 68, 257-268.

Croze O., Larinier M. 2007. Mitigation de l'impact des seuils et barrages sur la circulation des poissons migrateurs en rivière : solutions techniques et limites. In : Colloque Grands aménagements maritimes et fluviaux. Techniques nouvelles de conception et insertion environnementale. Paris : SHF - AIPCN - CETMEF, 155-159

Csiki S., Rhoads B.L. 2010. Hydraulic and geomorphological effects of run-of-river dams. *Progress in Physical Geography* 34 (6), 755-780

D

- Dapporto S, Rinaldi M, Casagli N, Vannocci P. 2003. Mechanisms of riverbank failure along the Arno River, central Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 28, 1303-1323. DOI: 10.1002/esp.550
- Darby SE, Rinaldi M, Dapporto S. 2007. Coupled simulations of fluvial erosion and mass wasting for cohesive river banks. *Journal of Geophysical Research* 112, F03022. DOI: 10.1029/2006JF000722
- Degoutte G. 2006. Diagnostic, aménagement et gestion des rivières – Hydraulique et morphologie fluviale appliquée, Editions Tec & Doc, Lavoisier, 393 pp.
- Degoutte G. 2012. Diagnostic, aménagement et gestion des rivières. Hydraulique et morphologie fluviales appliquées. 2ème édition, Lavoisier, Editions Tec & Doc, Paris, 542 p.
- Dépret T. 2014. Fonctionnement morphodynamique actuel et historique des méandres du Cher, Thèse de Doctorat, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, 514 pp.
- Dépret T, Gautier E, Hooke J, Grancher D, Virmoux C, Brunstein D. 2015. Hydrological controls on the morphogenesis of low-energy meanders (Cher River, France). *Journal of Hydrology* 531, 877-891. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.10.035
- Desbordes M. 1989. Principales causes d'aggravation des dommages dus aux inondations par ruissellement superficiel en milieu urbanisé. *Bulletin Hydrologie Urbaine-SHF* 4, 2-10
- Descroix L. 1994. L'érosion actuelle dans la partie occidentale des Alpes du Sud. Thèse de Doctorat, Université de Lyon II, 337p
- Dietrich J. 2014. Application of Structure-from-Motion photogrammetry to fluvial geomorphology. Thèse de Doctorat, Department of Geography, University of Oregon, 124 pp.
- Dietrich J. 2016. Riverscape mapping with helicopter-based Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology* 252, 144-157. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.05.008
- Doll B.A., Wise-Frederick D.E., Buckner C.M., Wilkerson S.D., Harman W.A., Smith R.E., Spooner J. 2002. Hydraulic geometry relationships for urban streams throughout the piedmont of North Carolina. *Journal of the American Water Resources Association* 38 (3), 641-651.
- Douglas I. 1985. Urban sedimentology. *Progress in Physical Geography* 9, 255-280.
- Downs, P.W. et Gregory, K.J. 2004. River channel management, Towards Sustainable Catchment Hydrosystems, London : Arnold.

Doyle M.W., Stanley E.H., Orr C.H., Selle A.R., Sethi S.A., Harbor J.M. 2005. Streamresponse to small dam removal: lessons from Heartland. *Geomorphology* 71, 227-244

Dransart S. 2013. Inventaire des moulins à eau. Moulin d'Orce, Méranaise, Châteaufort. PNR HVC. 22 pp.

Duarte C.M., Conley D.J., Carstensen J., Sanchez-Camacho M. 2008. Return to Neverland: shifting baselines affect eutrophication restoration targets. *Estuaries and Coasts* 32: 29- 36. doi: 10.1007/s12237-008-9111-2.

Dubois-Taine G., Chalas Y. (dir). 1997. La ville émergente, La Tour d'Aigues, Editions de l'Aube, 286 pp.

Dufour S, Piégay H. 2009. From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: Forget natural references and focus on human benefits. *River Research and Applications* 25, 568-581. DOI: 10.1002/rra.1239

Dufour S., Rollet A.J., Oswald J., Arnaud de Sartre X. 2010. Ecosystem services, an opportunity to improve restoration practices in river corridors ? 11 p

Dufour S, Rollet AJ, Chapuis M, Provansal M, Capanni R. 2017. On the political roles of freshwater science in studying dam and weir removal policies: A critical physical geography approach. *Water Alternatives* 10, 853-869.

Dunham J.B., Cade B.S., Terrell J.W. 2002 : Influences of spatial and temporal variation on fish-habitat relationships defined by regression quantiles. *Transactions of the American Fisheries Society* 131, 86-98

Dunne T., Leopold L.B. 1978. *Water in environmental planning*. Ed. Freeman and Co., San Francisco, 818 p.

Dutoit, T. 2014. Restauration écologique : quelles recherches mener pour agir non seulement pour, mais aussi par le vivant ? In Rey F, Gosselin F et Doré A. (Ed.), *Ingénierie écologique. Action par et/ou pour le vivant ?* Paris, Quae, 83-98

Dynesius M., Nilsson C. 1994. Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern third of the world. *Science* 266 (5186), 753-762

E

Eleb-Harlé N, Barles S. 2005. Hydrologie et paysages urbains en villes nouvelles. Morphologie et logiques de conception. Le Val Maubuée, secteur II de Marne-la-Vallée et le centre ville de Saint-Quentin-en-Yvelines. 1970-1990.

Elliott, R. 1982. Faking Nature. *Inquiry*, 25, 81-93

Erskine W.D., Keene A., Busch R., Cheetham M., Chalmers A. 2011. Influence of riparian vegetation on channel widening and subsequent

contraction on a sand-bed stream since European settlement: Widden Brook, Australia. *Geomorphology* 148, 102-114.

Esteves J.G., Ludwig W. 2003. Transfert de matière en suspension et de carbone particulaire dans le bassin versant de la Têt, Sud de la France. In Servat E., Najem W., Leduc C., Shakeel A. (Eds.), *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions (Proceedings of an International Symposium held at Montpellier, April 2003)*. IAHS Publ., 278 IAHS, Wallingford, United Kingdom, 442-447

F

Faulkner, D.J. 1998. Spatially variable historical alluviation and channel incision in west central Wisconsin. *Annals of the Association of American Geographers* 88, 666–685.

Fekih D. 2016. Les Dynamiques de ruissellement en milieu périurbain: le cas du bassin versant de la Mérantaise. Mémoire de Master 1, Université Paris Diderot, 93 pp.

Flaminio S. 2012. De l'Yzeron perdu à l'Yzeron retrouvé. Du côté des riverains inondés. Perceptions et représentations de l'Yzeron et de sa restauration à Oullins et à Sainte-Foy-lès-Lyon. Mémoire de Master 2, ENS de Lyon, 197 p.

Flaminio S, Cottet M, Le Lay Y-F. 2015. A la recherche de l'Yzeron perdu : quelle place pour le paysage dans la restauration des rivières

urbaines? *Norois* 4, 65-79. DOI: 10.4000/norois.5793

Fonstad M, Dietrich J, Courville B, Jensen J, Carbonneau P. 2013. Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms* 38 : 421-430. DOI: 10.1002/esp.3366

Förstner W. 1986. A feature based correspondence algorithm for image matching. *Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 26 : 150-166.

Frémont A. 1997. "La terre", in *Les lieux de mémoire, Tome III (Dir. Nora P.)* Quarto Gallimard

Freytet P, Baltzer F, Dewolf Y, Freytet A, Koeniguer J-C, Plaziat J-C, Plet A, Rumelhart M. 1995. Découverte de mollusques d'eau douce stampiens (Oligocène) et de traces de racines silicifiées au sommet des Grès de Fontainebleau près de Magny-les-Hameaux (Yvelines); implications paléocéologiques et conséquences sur l'âge de la grésification. *Géologie de la France* 4, 27-36.

Fryirs K, Brierley G. 2001. Variability in sediment delivery and storage along river courses in Bega catchment, NSW, Australia: implications for geomorphic river recovery. *Geomorphology* 38 : 237-265. DOI: 10.1016/S0169-555X(00)00093-3

G

- Gaeuman DA, Schmidt JC, Wilcock PR. 2003. Evaluation of in-channel gravel storage with morphology-based gravel budgets developed from planimetric data. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 108, n/a-n/a. DOI: 10.1029/2002JF000002
- Gautier E., Burnouf J., Carcaud N., Chambaud F., Garcin M. 2007. Les interrelations entre les sociétés et le fleuve Loire depuis le Moyen Âge. In Trémolières M., Schnitzler A. (ed.), *Protéger, restaurer et gérer les zones alluviales, pourquoi et comment ?*, Tec & Doc, Paris, 83-97.
- Gaudin G. 1963. La vallée de la Mérintaise: Etude géomorphologique. *Mémoire de DES*. 72 pp.
- Germain-Vallée C. et Lespez L. 2011. L'apport des recherches géomorphologiques et micromorphologiques récentes à l'archéologie des paysages de la Plaine de Caen (Calvados, Basse-Normandie). *Norois* 220, Poitiers, Universités de l'Ouest, 2012, 141-176.
- Germaine M. 2009. De la caractérisation à la gestion des paysages ordinaires des vallées dans le Nord-Ouest de la France. Représentations, enjeux d'environnement et politiques publiques en Basse-Normandie, Thèse de Doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, 645 pp.
- Germaine M-A, Barraud R. 2013a. Les rivières de l'ouest de la France sont-elles seulement des infrastructures naturelles? Les modèles de gestion à l'épreuve de la directive-cadre sur l'eau. *Natures Sciences Sociétés* 21 : 373-384. DOI: 10.1051/nss/2014003
- Germaine M-A, Barraud R. 2013b. Restauration écologique et processus de patrimonialisation des rivières dans l'Ouest de la France. *VertigO* 16, 1-16. DOI: 10.4000/vertigo.13583
- Germaine MA, Temple-Boyer É, Milian J, Fourault-Cauet V, Raymond R. 2017. La diversité des paysages des franges périurbaines: proposition d'indicateurs pour caractériser les espaces entre ville et campagne-deux cas de terrains franciliens. *Espace Géographique* 46, 19-40. DOI: 10.3917/eg.461.0019
- Gob F., Belliard J., Albert M.-B., Navratil O., Sauquet E., Catalogne C. 2010. Quantifying the physical alterations of river reaches using a regional river morphology reference model. A step towards river restoration. *River Flow 2010*, 8-10 septembre 2010, Braunschweig, Allemagne, 7 p
- Gob F, Bilodeau C, Thommeret N, Belliard J, Albert M, Tamisier V, Baudoin J, Kreutzenberger K. 2014. Un outil de caractérisation hydromorphologique des cours d'eau pour l'application de la DCE en France (CARHYCE). *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 20, 57-72. DOI: 10.4000/geomorphologie.10497
- Gob F., Thommeret N., Bilodeau C., Tamisier V., Duval E., Legentil C., Grancher D.,

- Raufaste S., Baudoin J-M. et Kreutzenberger K., Interface d'exploitation des données Carhyce [en ligne], Laboratoire de Géographie Physique – AFB, <http://lgp.cnrs.fr/carhyce>
- Gobster P. H. 2000. Introduction - Restoring nature: human actions, interactions, and reactions, in Gobster P. H. & Hull R. B., Restoring nature. Perspectives from the social sciences and humanities, Island Press, Washington D.C., 1-19
- Gordon E., Meetenmeyer R.K. 2006. Effects of dam operation and land use on stream channel morphology and riparian vegetation. *Geomorphology* 82, 412-4
- Graf W.L. 1977. Network characteristics in suburbanizing streams. *Water Resources Research*, 13, 459-463
- Grams P.E., Schmidt J.C. 2002. Streamflow regulation and multi-level flood plain formation: channel narrowing on the aggrading Green River in the eastern Uinta Mountains, Colorado and Utah. *Geomorphology* 44, 337-360
- Gregory, K.J. 1974. Streamflow and building activity. In: Gregory, K. J., Walling, D.E. (Eds.), *Fluvial Processes in Instrumented Watersheds*. Inst. Br. Geog. Spec. Publ. 6, 123–139
- Gregory, K.J. 1976. Drainage basin adjustments and man. *Geographica Polonica* 34, 155–173
- Gregory KJ. 2006. The human role in changing river channels. *Geomorphology* 79 : 172-191. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.06.018
- Gregory KJ, Davis RJ, Downs PW. 1992. Identification of river channel change to due to urbanization. *Applied Geography* 12, 299-318. DOI: 10.1016/0143-6228(92)90011-B
- Gregory, S.; Li, H. and Li, J. 2002. The conceptual basis for ecological responses to dam removal. *BioScience* 52(8), 713.
- Grier M. 2003. Impact environnemental des seuils en rivières – Etude bibliographique. Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental. 103 pp
- Grosprêtre L. 2011. Étude et gestion des impacts hydrogéomorphologiques de la périurbanisation. L'exemple du bassin de l'Yzeron dans l'Ouest lyonnais. Thèse de doctorat. Université Lumière Lyon2, 301 pp.
- Grosprêtre L., Schmitt L. 2010. Etude hydrogéomorphologique de l'Yzeron et définition d'indicateurs de suivi – Partie 1 : Diagnostic hydrogéomorphologique des affluents et sous-affluents de l'Yzeron et des branches principales du réseau hydrographique et mesures de réhabilitation. CNRS/UMR 5600. Réalisé pour le compte du Grand Lyon et du SAGYRC, 107 p.
- Guibert R., Maitre F. 1998. Le Domaine d'Ors, Université Paris XI – Centre d'Orsay

Guillaume A. 1983. Les temps de l'eau. La cité, l'eau et les techniques. Nord de la France. Fin IIIe - début XIXe siècle, Seyssel, Champ Vallon, 263 p

Gurnell A, Lee M, Souch C. 2007. Urban Rivers: Hydrology, Geomorphology, Ecology and Opportunities for Change. *Geography Compass* 1, 1118-1137. DOI: 10.1111/j.1749-8198.2007.00058.x

H

Hack J.T. 1960. Interpretation of erosion topography in humid temperate regions? *American Journal of Sciences* 258A, 80-97

Hadley R.F., Emmett W.W. 1998. Channel changes downstream from a dam. *Journal of the American Water Resources Association* 34, 629–637

Hamel VB, Buffin-Bélanger T, Héту B. 2013. Contribution à l'étude de l'érosion des berges : analyse à haute résolution spatio-temporelle des mouvements subaériens sur une berge de la rivière Ouelle, Québec, Canada. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 2013, 119-132. DOI: 10.4000/geomorphologie.10176

Hammer T.R. 1972. Stream channel enlargement due to urbanization. *Water Resources Research* 8 (6), 1530-1540.

Hardison, E.C., O'Driscoll, M.A., DeLoatch, J.P., Howard, R.J., Brinson, M.M. 2009. Urban land use, channel incision, and water table decline along coastal plain streams, North Carolina. *Journal of the American Water Resources Association* 45(4), 1032–1046

Harned D.A. 1988. Effects of highway runoff on streamflow and water quality in the Sevenmile Creek basin, a rural area in the piedmont province of North Carolina, July 1981 to July 1982. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2329, 33 p.

Harris C, Stephens M. 1988. A Combined Corner and Edge Detector. *Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988* : 147-151. DOI: 10.5244/C.2.23

Hart, D.D., Johnson, T.E., Bushaw-Newton, K.L., Horwitz, R.J., Bednarek, A.T., Charles, D.F., Kreeger, D.A., Velinsky, D.J. 2002. Dam removal: Challenges and opportunities for ecological research and river restoration. *BiorScience* 52(8), 669.

Harwood, K., Brown, A.G. 1993. Changing in-channel and overbank flood velocity distributions and the morphology of forested multiple channel (anastomosing) systems. *Earth Surface Processes and Landforms* 18, 741–748.

Hauer C, Unfer G, Tritthart M, Habersack H. 2011. Effects of stream channel morphology , transport processes and effective discharge on salmonid. 685, 672-685. DOI: 10.1002/esp.2087

Henshaw AJ, Thorne CR, Clifford NJ. 2012. Identifying causes and controls of river bank erosion in a British upland catchment. *Catena* 100, 107-119. DOI: 10.1016/j.catena.2012.07.015

Heritage G, Hetherington D. 2007. Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 66-74. DOI: 10.1002/esp.1375

Hirsch, R.M. 1977. The interaction of channel size and flood discharges for basins undergoing urbanization. *Effects of Urbanization and Industrialization on the Hydrological Regime and on Water Quality* (Proceedings of a symposium held at Amsterdam, October 1977). IAHS Publication 123, Surrey, UK, 83–92

Hoffman T., Thorndycraft V.R., Brown A.G., Coulthard T.J., Damnati B., Kale V.S., Middelkoop H., Notebaert B., Walling D.E. 2010. Human impact on fluvial regimes and sediment flux during the Holocene: Review and future research agenda. *Global and Planetary Change* 72, 87-98.

Hollis G.E., Lockett J.K. 1976. The response of natural river channels to urbanization: two case studies from southeast England. *Journal of Hydrology* 30 (4), 351-363.

Hooke JM. 1979. An analysis of the processes of river bank erosion. *Journal of Hydrology* 42 : 39-62. DOI: 10.1016/0022-1694(79)90005-2

Hooke J. 2003. Coarse sediment connectivity in river channel systems: a conceptual framework and methodology. *Geomorphology*, 56, 79-94.

Houben P., Wunderlich J., Schrott L. 2009. Climate and longterm human impact on sediment fluxes in watershed systems. *Geomorphology* 108, 1-7.

Hoyle J, Brooks AP, Brierley GJ, Fryirs KA, Lander J. 2008. Variability in the nature and timing of channel response to typical human disturbance along the Upper Hunter River, New South Wales, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms* 33, 868–889.

Hughes FMR, Colston A, Mountford JO. 2005. Restoring Riparian ecosystems: the challenge of accommodating variability and designing restoration trajectories. *Ecology and Society* 10(1): p. 12 (available from. www.ecologyandsociety.org 1 September 2008).

I

Islam S, Bari M, Anwar F. 2011. Assessment of hydrologic impact of climate change on Ord River catchment of Western Australia for water resources planning: A multi-model ensemble approach. In *Proceedings of the 19th International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM 2011)*, Chan F, Marinova D, et Anderssen RS (éd). The Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc.: Perth, Australia; 3587-3593.

J

- Jacob-Rousseau N. 2009. Levades et chaussées dans des lits torrentiels : un impact à retardement. *Mémoire d'Ardèche et Temps Présent* 104, 73-8.
- Jacob-Rousseau N, Météry F, Tscheiller C, Navratil O. 2016. La petite hydraulique agricole et industrielle, de l'histoire économique à l'évaluation quantitative des pressions sur les écoulements, XIXe-début XXe siècle. Bassins de l'Arroux, de la Grosne et de la Petite Grosne (Bourgogne, France). *BSGLg* 67, 143-160
- Jansson R., Nilsson C., Dynesius M., Andersson E. 2000. Effects of river regulation on river-margin vegetation: A comparison of eight boreal rivers. *Ecological Applications* 10, 203-24.
- Jansson R., Zinko U., Merritt D.M. 2005. Hydrochory increases riparian plant species richness: a comparison between a free-flowing and a regulated river. *Journal of Ecology* 93, 1094–1103.
- Jato-Espino D. 2016. Hydrological modelling of urban catchments under Climate Change for the design of a spatial decision support system to mitigate flooding using pervious pavements meeting the principles of sustainability, Université de Cantabria, Espagne
- Javernick L, Brasington J, Caruso B. 2014. Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology* 213 : 166-182. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.01.006
- Johnson P.A., Fecko J. 2008. Regional channel geometry equations: a statistical comparison for physiographic provinces in the eastern US. *River Research and Applications* 24, 823-834.
- Joly, D, T Brossard, H Cardot, J Cavailhès, M Hilal et P Wavresky. 2010. «Types of climates on continental France, a spatial construction». *Cybergeo European Journal of Geography*, vol. 501. <http://www.cybergeo.revues.org/index23155.html>
- Jugie, M. 2012. Caractérisation hydromorphologique de la Mérantaise (Vallée de Chevreuse – Yvelines). Un projet de restauration de la continuité écologique et sédimentaire de la rivière. Mémoire de Master 2. Université Paris 1 Sorbone-Panthéon, 96 pp.
- Jugie M, Gob F, Virmoux C, Brunstein D, Tamisier V, Le Coeur C, Grancher D. 2018. Characterizing and quantifying the discontinuous bank erosion of a small low energy river using Structure-from-Motion Photogrammetry and erosion pins. *Journal of Hydrology* 563, 418-434. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.06.019
- Julian JP, Torres R. 2006. Hydraulic erosion of cohesive riverbanks. *Geomorphology* 76, 193-206. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.11.003

Junker B., Buchecker M. et Mueller-Boeker U. 2007. Objectives of public participation: which actors should be involved in the decision making for river restorations? *Water Resources Research* 43 (10), 1-11

Juracek K.E. 1999. Geomorphic Effects of Overflow Dams on the Lower Neosho River, Kansas. USGS Water- Resources Investigations Report 99-4147, 6 p.

K

Kauffman G.J., Brant T. 2000. The role of impervious cover as a watershed-based zoning tool to protect water quality in the Christina River basin of Delaware, Pennsylvania and Maryland. Watershed Management Conference, 21-24 June 2000, Colorado State University Fort Collins, Colorado.

Knapp R.T. 1938. Energy-balance in stream-flows carrying suspended load. *American Society of Mechanical Engineers*, 501-505.

Knighton A.D. 1984. *Fluvial forms and processes*. Arnold, London, 218 p.

Kondolf G.M. 1997. Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channel. *Environmental Management*, 21, 533-551

Kondolf, G. M. 2006. River restoration and meanders. *Ecology and Society* 11(2), 42. <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss2/art42/>

Kondolf G.M., Smeltzer M.W., Railsback S.F. 2001. Design and performance of a channel reconstruction project in a coastal California gravel-bed stream. *Environmental Management* 28: 761-776

Kondolf G.M., Angermeier P.L., Cummins K., Dunne T., Healey M., Kimmerer W., Moyle B., Murphy D., Patten D., Railsback S., Reed D.J., Spies R., Twiss R. 2008. Projecting cumulative benefits of multiple river restoration projects: an example from the Sacramento-San Joaquin river system in California. *Environmental Management* 42 (6), 933-945

Konrad C.P., Booth D.B., Burges S.J. 2005. Effects of urban development in the Puget Lowland, Washington, on interannual streamflow patterns: consequences for channel form and streambed disturbance. *Water Resources Research* 41 (7), W07009.1-W07009.15.

L

Lague D, Brodu N, Leroux J. 2013. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82 : 10-26. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009

Lane S.N., Brookes C.J., Kirby M.J., Holden J. 2004. A network-index-based version of TOPMODEL for use with high-resolution digital topographic data. *Hydrological Processes* 18, 191-201.

- Laubel A, Kronvang B, Hald AB, Jensen C. 2003. Hydromorphological and biological factors influencing sediment and phosphorus loss via bank erosion in small lowland rural streams in Denmark. *Hydrological Processes* 17 : 3443-3463. DOI: 10.1002/hyp.1302
- Lawler DM. 1986. River Bank Erosion and the Influence of Frost: A Statistical Examination. *Transactions of the Institute of British Geographers* 11 : 227. DOI: 10.2307/622008
- Lawler DM. 1992. Design and installation of a novel automatic erosion monitoring system. *Earth Surface Processes and Landforms* 17 : 455-463. DOI: 10.1002/esp.3290170505
- Lawler DM. 1993. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: A review. *Earth Surface Processes and Landforms* 18 : 777-821. DOI: 10.1002/esp.3290180905
- Lawler DM, Couperthwaite JS, Bull LJ, Harris NM. 1997. Bank erosion events and processes in the Upper Severn basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 1 : 523-534. DOI: 10.5194/hess-1-523-1997
- Lawler DM, Grove JR, Couperthwaite JS, Leeks GJL. 1999. Downstream change in river bank erosion rates in the Swale-Ouse system, northern England. *Hydrological Processes* 13 : 977-992. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(199905)13:7<977::AID-HYP785>3.0.CO;2-5
- Le Bihan M. 2009. L'enterrement des cours d'eau en tête de bassin en Moselle (57). Mémoire de Master 2. Université de Metz, 118 pp.
- Le Calvez C. 2017. Les usagers confrontés à la restauration de la continuité écologique des cours d'eaus de petits cours d'eau de l'ouest de la France : approche en région Bretagne, Thèse de Doctorat, Université Rennes 2, 433 pp.
- Le Cœur C., Gautier E. 2005. Les enjeux des friches hydrauliques : entretien, ré-affectation, dés- aménagements. Présentation d'un programme de recherche, Serna, V. et Gallicé, A. (dir.), *La Rivière aménagée : entre héritages et modernité*, *Aestuaria* 7, 495-508
- Lefebvre, K. 2015. Diagnostic et quantification des flux nappe-rivière: modélisation hydrodynamique et géochimique du bassin versant de l'Yvette amont (France). Thèse de Doctorat. Université Paris-Saclay, 315 pp.
- Le Floc'h, É., Aronson, J. 1995. Écologie de la restauration : définition de quelques concepts de base, *Natures Sciences Sociétés*, hors-série «Recréer la nature », 29-35.
- Leopold, L.B. 1968. Hydrology for urban land planning — a guidebook on the hydrologic effects of urban land use. USGS Circular 554
- Leopold, L.B. 1973. River channel change with time: an example. *Geological Society of America Bulletin* 84 (6), 1845–1860.

- Leopold, L.B. 1991. Lag times for small drainage basins. *Catena* 18, 157–171
- Leopold L. B., Maddock T. J. 1953. Hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. U.S. Geological Survey Professional Paper 252, 55 p.
- Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P. 1964. *Fluvial Processes in Geomorphology*. W.H. Freeman and Co., San Francisco, 522 p.
- Leopold L.B., Bull W.B. 1979. Base level, aggradation, and grade. *Proceedings of the American Philosophical Society* 123 (3), 168-202.
- Lero Poff N. Hart D.D. 2002. How Dams Vary and Why It Matters for the Emerging Science of Dam Removal. *BioScience* 52 (8), 659-668.
- Lescure S. 2015. *La Garonne maritime à l'Holocène: dynamique, environnements et occupation humaine*, Paris 1 Panthéon Sorbonne, Thèse de Doctorat, 266 pp.
- Lescure S., Arnaud-Fassetta G., Cordier S. 2011. Sur quelques modifications hydromorphologiques dans le Val de Seine (Bassin parisien, France) depuis 1830 : quelle part accorder aux facteurs hydrologiques et anthropiques ? *Echogéo*, 18, 15 p.
- Lespez L. (éd.). 2012. *Paysages et gestion de l'eau. Sept millénaires d'histoire de vallées et de plaines littorales en Basse-Normandie*. Caen, Bibliothèque du pôle rural n° 3, Presses Universitaires de Caen – MRSN, 336 p.
- Lespez, L., 2013. Les dynamiques environnementales des petits cours d'eau bas-normands depuis le Néolithique: Quelles leçons pour aujourd'hui dans le cadre de la DCE? Communication orale. SAGE VIRE
- Lespez L, Garnier E, Cador J-M, Rocard D. 2005a. Les aménagements hydrauliques et la dynamique des paysages des petits cours d'eau depuis le XVIII e siècle dans le nord-ouest de la France, l'exemple du bassin versant de la Seulles (Calvados). *Aestuaria* 7, 89-109.
- Lespez L., Clet-Pellerin M., Limondin-Lozouet N., Pastre, J.-F. et Fontugne M. 2005b - Discontinuités longitudinales des dynamiques sédimentaires holocènes dans les petites vallées de l'Ouest du Bassin Parisien, l'exemple de la Mue (Basse Normandie). *Quaternaire* 16 (4), 273-298. doi:10.4000/quaternaire.482
- Lespez L, Cador J-M, Germaine M-A. 2006. Gestion de l'eau et trajectoires des paysages des petites vallées, exemples normands. *Interactions Nature-Société, analyses et modèles* : 1-6.
- Lespez L, Viel V, Rollet A-J, Delahaye D. 2015. The anthropogenic nature of present-day low energy rivers in western France and implications for current restoration projects. *Geomorphology* 251, 64-76. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.05.015

- Lespez L, Germaine M-A, Barraud R. 2016. L'évaluation par les services écosystémiques des rivières ordinaires est-elle durable ? *VertigO*, Hors-série 25, 22 pp. DOI: 10.4000/vertigo.17443
- Lespez L, Germaine M-A. 2016. La rivière désaménagée ? Les paysages fluviaux et l'effacement des seuils et des barrages de l'Europe de l'ouest et de l'Amérique du Nord-Est. *BCGLg* 67, 223-254.
- Lespez L, Beauchamp A, Germaine M-A, Barraud R. 2017. De l'aménagement au désaménagement: les temps de l'environnement des systèmes fluviaux ordinaires de l'ouest de la France. In *Démanteler les barrages pour restaurer les cours d'eau. Controverses et représentations*, Barraud R et Germaine M-A (éd). *QUAE: Versailles*; 27-42.
- Lespez, L., Germaine, M.-A., Temple-Boyer, E. 2018, Small rivers restoration and inhabitants in Paris urban area, Annual Meeting of the AAG, Nouvelle-Orléans, 10-14 avril
- Lestel L., Carré C. (Eds). 2017. *Les rivières urbaines et leur pollution*. Versailles, Quæ
- Ligonnière, R. 1991. Autour des sources de l'Yvette, Société des Amis de Gif et d'Alentour.
- Limburg K.E., Schmidt R.E. 1990. Patterns of fish spawning in Hudson River tributaries: response to an urban gradient ? *Ecology* 71 (4), 1238-1245.
- Lowe DG. 1999. Object recognition from local scale-invariant features. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision* 2 DOI: 10.1109/ICCV.1999.790410
- Lowe DG. 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60 : 91-110. DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94
- Lowenthal D. 1964. Is wilderness "paradise enow"? *Images of nature in America*. *Columbia University Forum* 7, 34-40.
- Luppi L, Rinaldi M, Teruggi LB, Darby SE, Nardi L. 2009. Monitoring and numerical modelling of riverbank erosion processes: a case study along the Cecina River (central Italy). *Earth Surface Processes and Landforms* 34 : 530-546. DOI: 10.1002/esp.1754

M

Magilligan F.J., Nislow K.H. 2005. Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology* 71, 61- 78

Magilligan FJ, Graber BE, Nislow KH, Chipman JW, Sneddon CS, Fox CA. 2016. River restoration by dam removal: Enhancing connectivity at watershed scales. *Elementa: Science of the Anthropocene* 4 : 000108. DOI: 10.12952/journal.elementa.000108

Malavoi J.-R. 2003. *Stratégie d'intervention de l'Agence de l'Eau sur les seuils en rivières*.

- Agence de l'Eau Loire – Bretagne / AREA Eau – Environnement, 134p.
- Malavoi J.-R. 2005. Dynamique du transport solide et propositions de gestion. Syndicat Intercommunal d'Aménagement de Bassin Versant de l'Albarine, 65 p.
- Malavoi, J.R. 2010. Atténuer l'impact des ouvrages transversaux sur les cours d'eau {I}. Principes de restauration globale. Techniques Sciences et méthodes 10, 23-36.
- Malavoi J. R., Bravard J. P. 2010. Eléments d'hydromorphologie fluviale. ONEMA, 228 p.
- Malavoi J.R., Souchon Y., 2010. Eléments pour une harmonisation des concepts et des méthodes de suivi scientifique minimal. Volets hydromorphologie-hydroécologie. Pôle Hydroécologie des cours d'eau Onema-Cemagref Lyon MAEP-LHQ, 82 p.
- Mari A. 1998. Proposition de plan de gestion 1999-2003, PNR de la haute vallée de Chevreuse.
- Marteau B, Vericat D, Gibbins C, Batalla RJ, Green DR. 2016. Application of Structure-from-Motion photogrammetry to river restoration. *Earth Surface Processes and Landforms* 42 : 503-515. DOI: 10.1002/esp.4086
- Martin-Dhermont. 2001. Bilan du suivi de la végétation : saison 2001
- Meehan W.R., Swanson F.J., Sedell J.R. 1977. Influences of riparian vegetation on aquatic ecosystems with particular reference to salmonid fishes and their food supply. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RM 43, 137-145
- Mégnyen C. (dir.). 1980. Synthèse géologique du bassin de Paris. Volume II (Atlas). Mémoire BRGM n°102, 124 pp.
- Melun G. 2012. Évaluation des impacts hydromorphologiques du rétablissement de la continuité hydrosédimentaire et écologique sur l'Yerres aval, Thèse de Doctorat, Université Paris 7 Diderot, 335 pp.
- Melun G., Passy P. 2007. Cartographie hydrogéomorphologique du Bas-Rhône entre Pont-Saint-Esprit et Beaucaire (France) : apport et valorisation par le SIG. Mémoire de master I. 124p
- Mendras H. 1967. La fin des paysans, innovations et changement dans l'agriculture française. *Revue française de Sociologie*, Paris SEDEIS, Thèse de Doctorat, 364 pp.
- Messerli B., Grosjean M., Hofer T., Nunez L., Pfister C. 2000. From nature-dominated to human-dominated environmental changes. *Quaternary Science Reviews* 19, 459-479.
- Meybeck M., De Marsily G., Fustec E. (Eds). 1998. La Seine en son bassin. Fonctionnement

- écologique d'un système fluvial anthropisé. Elsevier, 752
- Meybeck M., Laroche L., Dürr H.H., Syvitski J.P.M. 2003. Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers. *Global and Planetary Change*, 39, 65-93
- Meyer J, Wallace J. 2001. Lost linkages and lotic ecology : rediscovering small streams. In Press M, Huntly N, et Levin S (éd). 295-317.
- Micheletti N, Chandler J, Lane S. 2015. Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. *Earth Surface Processes and Landforms* 40 : 473-486. DOI: 10.1002/esp.3648
- Michler L. 2017. Morphological evolution and sediment dynamics in a low-energy river in a contexte of dam removal. The Yerres river in the Seine catchment (France). 9th International Conference on Geomorphology, Novembre 2017, New Dehli (Inde)
- Miller JD, Hess T. 2017. Urbanisation impacts on storm runoff along a rural-urban gradient. *Journal of Hydrology* 552 : 474-489. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.06.025
- Miller JD, Kim H, Kjeldsen TR, Packman J, Grebby S, Dearden R. 2014. Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. *Journal of Hydrology* 515 : 59-70. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.011
- de Milleville L. 2017. Relation entre altération hydrogéomorphologique et qualité biologique de cours d'eau en Île-de-France. La Biberonne, la Mérantaise et la Morbras. Mémoire de Master 1, Paris XII UPEC et Paris 1 Panthéon Sorbonne, 136 pp.
- de Milleville L. 2018. Vers la construction d'une trajectoire hydrosédimentaire et biologique de trois petites rivières périurbaines d'Île-de-France (Biberonne, Mérantaise, Morbras). Mémoire de Master 2, Paris XII UPEC et Paris 1 Panthéon Sorbonne
- Miltner R.J., White D., Yoder C. 2004. The biotic integrity of streams in urban and suburbanizing landscapes. *Landscape and Urban Planning* 69, 87-100
- Montgomery, D.R., 2008. Dreams of natural streams, *Science* 319, 291-292.
- Morandi B. 2014. La restauration des cours d'eau en France et à l'étranger : de la définition du concept à l'évaluation de l'action. *Eléments de recherche applicables, Geography*. Ecole normale supérieure de lyon - ENS LYON, Thèse de Doctorat, 429 pp.
- Morandi B, Piégay H. 2011. Les restaurations de rivières sur Internet : premier bilan. *Natures Sciences Sociétés* 19, 224-235. DOI: 10.1051/nss/2011145
- Morisawa M., Laflure E. 1979. Hydraulic geometry, stream equilibrium and urbanization. In: *Adjustments of the fluvial system : a*

proceedings volume of the Tenth Annual Geomorphology Symposia Series, Binghamton, New York, 333-349.

Morse C.C. 2001. The response of first and second order streams to urban land-use in Maine, USA. Master of Science Thesis, University of Maine, 98 p

N

Narcy J. B. 2013. Regards des sciences sociales sur la mise en oeuvre des politiques de l'eau, ONEMA, Collection Comprendre Pour Agir, 156 p.

Nasermoaddeli MH, Pasche E. 2008. Application of terrestrial 3D laser scanner in quantification of the riverbank erosion and deposition. *River Flow* 2008, 2407-2416.

Nassauer, J. I., Kosek, S. E., & Corry, R. E. 2001. Meeting Public Expectations with Ecological Innovation in Riparian Landscapes. *JAWRA: Journal of the American Water Resources Association* 37 (6), 1439-1443.

Navratil O., Albert M.B., Herouin E. 2005. Influence de l'urbanisation sur la morphologie des cours d'eau de l'Yzeron à travers l'analyse du débit à pleins bords et de leur géométrie hydraulique. Rapport de synthèse pour le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, 28 p.

Navratil O., Evrard O., Esteves M., Legout C., Ayrault S., Némery J., Mate-Marín A., Ahmadi

M., Lefèvre I., Poirel A., Bonté P. 2012. Temporal variability of suspended sediment sources in an alpine catchment combining river/rainfall monitoring and sediment fingerprinting. *Earth Surface Processes and Landforms* 37 : 828-846. DOI: 10.1002/esp.3201

Navratil O, Breil P, Schmitt L, Grosprêtre L, Albert MB. 2013. Hydrogeomorphic adjustments of stream channels disturbed by urban runoff (Yzeron River basin, France). *Journal of Hydrology* 485, 24-36. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.01.036

Neller, R.J. 1988. A comparison of channel erosion in small urban and rural catchments, Armidale, New South Wales. *Earth Surface Processes and Landforms* 13, 1-7

Nelson E.J., Booth D.B. 2002. Sediment sources in an urbanizing, mixed land-use watershed. *Journal of Hydrology* 264, 51-68.

Niemi TJ, Warsta L, Taka M, Hickman B, Pulkkinen S, Krebs G, Moisseev DN, Koivusalo H, Kokkonen T. 2017. Applicability of open rainfall data to event-scale urban rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology* 547, 143-155. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.01.056

Nilsson C. 1976. The influence of man's activities in rivers on sediment transport. *Nordic Hydrology* 7, 145- 160

Notebaert B, Verstraeten G, Govers G, Poesen J. 2009. Qualitative and quantitative

applications of LiDAR imagery in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms* 34 : 217-231. DOI: 10.1002/esp.1705

Notebaert, B. et Verstraeten, G. 2010. Sensitivity of West and Central European river systems to environmental changes during the Holocene: A review. *Earth-Science Reviews* 103(3), 163-182

O

Ocampo C.J., Sivapalan M., Oldham C. 2006. Hydrological connectivity of upland-riparian zones in agricultural catchments: implications for runoff and nitrate transport. *Journal of Hydrology* 331 (3-4), 643-658

Ormerod S. J. 2004. A Golden Age of River Restoration Science? *Aquatic conservation : marine and freshwater ecosystems* 14, 543-550

Ourso R.T., Frenzel S.A. 2003. Identification of linear and threshold responses in stream along a gradient of urbanization in Anchorage, Alaska. *Hydrobiologia* 501, 117-131

P

Palmer M.A. 2009. Reforming watershed restoration: science in need of application and applications in need of science. *Estuaries and Coasts* 32: 1-17

Palmer M. A. & Bernhardt E. S. 2006. *Hydroecology and river restoration: ripe for*

research and synthesis, *Water Resources Research* 42 (3), 1-4.

Park, C.C. 1977. Man-induced changes in stream channel capacity. In: Gregory, K.J. (Ed.), *River Channel Changes*. Wiley, Chichester, UK, 121–144

Pasternack GB, Bounrisavong MK, Parikh KK. 2008. Backwater control on riffle – pool hydraulics, fish habitat quality, and sediment transport regime in gravel-bed rivers. 357, 125-139. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.05.014

Peiry J.L. 2003. Expertise géomorphologique dans le cadre du renouvellement de la concession du barrage de Kembs. Rapport d'expertise de l'Université Blaise Pascal, GEOLAB UMR 6042 CNRS & UBP « Géodynamique des milieux naturels et anthropisés », Clermont- Ferrand, 6 pp.

Pelte T. 2007. Pour la mise en œuvre de la DCE : quels enjeux et difficultés de l'évaluation de la qualité des petits rivières de type « Yzeron » ? colloque

Perrow, M. R., Skeate, E. R., Leeming, D., England, J. & Tomlinson, M. L. 2008. Uncertainty surrounding the ecological targets and response of river and stream restoration. *River Restoration: Managing the uncertainty in Restoring Physical Habitat*. Wiley, 139-166.

Petit F. 1984. Les processus contrôlant l'évolution du tracé d'une rivière ardennaise.

Zeitschrift für Geomorphologie. Suppl. Bd 48, 95-109

Petit F., Hallot E., Houbrechts G., Mols J. 2005. Evaluation des puissances spécifiques de rivières de moyenne et de haute Belgique. Bulletin de la Société Géographique de Liège 46, 37-50.

Petts G.E. 1980. Long-term consequences of upstream impoundment. Environmental Conservation 7, 325- 332

Petts G.E., Gurnell A.M. 2005. Dams and geomorphology: research progress and future directions. Geomorphology 71, 27-47

Pi, Cuaz M, Javelle E, Mandier P. 1997. Bank erosion management based on geomorphological, ecological and economic criteria on the Galaure River, France. Regulated Rivers-Research & Management 13 : 433-448. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1646(199709/10)13:5%3C433::AID-RRR467%3E3.0.CO;2-L

Picco L, Mao L, Cavalli M, Buzzi E, Rainato R, Lenzi M a. 2013. Evaluating short-term morphological changes in a gravel-bed braided river using terrestrial laser scanner. Geomorphology 201 : 323-334. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.07.007

Pichot D. 2002 Le moulin et l'encellulement dans l'ouest français (XIe – XIIIe siècle), in Mousnier M (dir.), Moulins et meuniers dans les campagnes européennes (IXè – XVIIIè s.),

actes des XXIè journées internationales d'histoire de l'Abbaye de Flaran, 3-5/09/1999, Toulouse, PUM, p. 111-129

Piégay H., Darby S.A., Mosselmann E., Surian N. 2005. The erodible corridor concept: applicability and limitations for river management. River Research and Applications 21, 773-789.

Pizzuto J.E., Hession W.C., McBride M. 2000. Comparing gravel-bed rivers in paired urban and rural catchments of southeastern Pennsylvania. Geology 28 (1), 79-82

Phillips J.D., Slaterry M.C., Musselman Z.A. 2005. Channel adjustments of the the lower Trinity River, Texas, downstream of Livingston dam. Earth Surface Processes and Landforms 30, 1419-1439

Pollard A.I., Reed T. 2004. Benthic invertebrate assemblage change following dam removal in a Wisconsin stream. Hydrobiologia 513, 51-58.

Pont P., Simonet J.P., Walteer A. 2002. Medium-term changes in suspended sediment delivery to the ocean: consequences of catchment heterogeneity and river management (Rhône River, France). Estuarine, Coastal and Shelf Science 54, 1-18.

Poulot M. 2008. Les territoires périurbains: "fin de partie" pour la géographie rurale ou nouvelles perspectives? Géocarrefour 83 (4) [en ligne]

- Principe R.E. 2010. Ecological effects of small dams on benthic macroinvertebrate communities of mountain streams (Cordoba, Argentina). *International Journal of Limnology* 46, 77-91.
- Prominski, M., Stokman, A., Zeller, S., Stimberg, D. & Voermanek, H. 2012. *River. Space. Design. Planning strategies, methods and projects for urban rivers*, Birkhauser Verlag AG
- Prosdocimi M, Calligaro S, Sofia G, Dalla Fontana G, Tarolli P. 2015a. Bank erosion in agricultural drainage networks: new challenges from structure-from-motion photogrammetry for post-event analysis. *Earth Surface Processes and Landforms* 40, 1891-1906. DOI: 10.1002/esp.3767
- Prosdocimi M, Calligaro S, Sofia G, Dalla Fontana G, Tarolli P. 2015b. Bank erosion in agricultural drainage networks: new challenges from Structure-from-Motion photogrammetry for post-event analysis. *Earth Surface Processes and Landforms* 40, 1891-1906. DOI: 10.1002/esp.3767
- Prosser IP, Hughes AO, Rutherford ID. 2000. Bank erosion of an incised upland channel by subaerial processes: Tasmania, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 1085-1101. DOI: 10.1002/1096-9837(200009)25:10<1085::AID-ESP118>3.0.CO;2-K
- Radojevic B. 2002. Méthode d'évaluation de l'influence urbaine sur le régime des crues d'un bassin versant de 150 km². Thèse de doctorat en Génie Civil, INSA de Lyon, 239 p.
- Reulier R. 2015. Structure paysagère et dynamique spatiales des transferts hydro-sédimentaires. Approche par simulation multi-agents, Thèse de doctorat, Université de Caen Normandie, p350.
- Rey F., Mathys N., Dutoit T., Buisson E. 2009. *Ecologie de la restauration et ingénierie écologique. Enjeux, convergences, applications. Avant-propos. Ingénieries - EAT, No. Spécial*, 3-5.
- Rinaldi M. 2003. Recent channel adjustments in alluvial rivers of Tuscany, Central Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 28 : 587-608. DOI: 10.1002/esp.464
- Rivals C, 2000, *Le Moulin et le meunier. Mille ans de meunerie en France et en Europe*, Portet-sur-Garonne, Empreintes Editions, 2 tomes, 239 et 233 pp.
- Robaglia R. 2009. Étude méthodologique pour une nouvelle approche des dynamiques évolutives de l'hydraulique dans la Haute Vallée de l'Yvette. Mémoire de M2 en Histoire des Techniques, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne. sous la direction de Garçon A.-F., 135 pp.

R

- Rollet A. 2007. Étude 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, Lyon III Jean Moulin, Thèse de Doctorat, 305 pp.
- Rollet A.J., Lespez, L. 2013. La restauration physique des cours d'eau Bas Normands? Eléments de connaissance, implications opérationnelles et perspectives scientifiques ... Atelier IRD2 "Restauration de cours d'eau, Octobre 2013
- Rollet AJ, Piégay H, Dufour S, Bornette G, Persat H. 2013. Assessment of consequences of sediment deficit on a gravel river bed downstream of dams in restoration perspectives: application of a multicriteria, hierarchical and spatially explicit diagnosis. *River Research and Applications* 30, 939-953. DOI: 10.1002/rra.2689
- Rood S.B., Heinze-Milne S. 1989. Abrupt downstream forest decline following river damming in southern Alberta. *Canadian Journal of Botany* 67, 1744-1749
- Rose, S., Peters, N.E. 2001. Effects of urbanization on streamflow in the Atlanta area (Georgia, USA): a comparative hydrological approach. *Hydrological Processes* 15, 1441-1457.
- Roux, A.L. 1982. Cartographie polythématique appliquée à la gestion écologique des eaux. CNRS, Lyon 1-113.
- Roux-Michollet D., Clémens A., Montuelle B. et Marmonier P. 2013. Prospective sur les actions de recherche sur la restauration et la remédiation écologique des milieux aquatiques - Document de synthèse à destination de l'ONEMA - Journées d'étude les 11 et 12 mars 2013, Juin 2013, CNRS, INEE, Zones Ateliers, 56 p.
- Rubey W.W. 1933. Equilibrium-conditions in debris-laden streams. *American Geophysical Union Transaction*. 14th Ann. Meeting, 497-505.
- Rumsby BT, Brasington J, Langham J, McLelland SJ, Middleton R, Rollinson G. 2008. Monitoring and modelling particle and reach-scale morphological change in gravel-bed rivers: Applications and challenges. *Geomorphology* 93 : 40-54. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.12.017

S

Salavati B, Oudin L, Furusho C, Ribstein P. 2015. Évaluation de l'impact de l'urbanisation sur la réponse hydrologique de 172 bassins versants américains. *La Houille Blanche* 3, 51-57. DOI: 10.1051/lhb/20150033

Salvador P.-G., Berger J.F. 2014. The evolution of the Rhone River in the Basses Terres basin during the Holocene (Alpine foothills, France). *Geomorphology* 204, 71-84

Sarr D.A. 2002. Riparian livestock enclosure research in the western United States: a critique

and some recommendations. *Environmental Management* 30 (4): 516-526.

Sarukkalgil PR. 2013. Impacts of climate and land surface changes on urban catchment hydrology. 425-429

Sauer V.B., Thomas W.O.Jr., Stricker V.A., Wilson K.V. 1983. Flood characteristics of urban watersheds in the United States. USGS Water Supply Paper, 2207, 63 pp.

Scäfer J., Blanc G., Lapaquellerie Y., Maillet N., Maneux E., Etcheber H. 2002. Ten years observation of the Gironde tributary fluvial system: fluxes of suspended matter, particulate organic carbon and cadmium. *Marine Chemistry* 79, 229-242

Schick A.P., Grodek T., Wolman M.G. 1999. Hydrological processes and geomorphic constraints on urbanization of alluvial fan slopes. *Geomorphology* 31, 325-335.

Schmitt L., Maire G., Nobilis P., Humbert J. 2007. Quantitative morphodynamic typology of rivers: A methodological study based on the French Upper Rhine basin. 1726-1746

Schmitt L., Lafont M., Trémolières M., Jezequel C., Vivier A., Breil P., Namour P., Valin K., Valette L. 2011. Using hydro-geomorphological typologies in functional ecology: Preliminary results in contrasted hydrosystems. *Physics and Chemistry of the Earth* 36, 539-548. DOI: 10.1016/j.pce.2009.11.011

Schmitt L., Grosprêtre L., Breil P., Namour P., Lafont M., Delile H., Eschbach D., Jacob-Rousseau N., Cournoyer B. 2016. L'hydromorphologie, une dimension-clé pour l'étude interdisciplinaire des petits hydrosystèmes périurbains (bassin de l'Yzeron, France). *BCGLg* 67, 161-179

Sear D.A. 1995. Morphological and sedimentological changes in a gravel-bed river following 12 years of flow regulation for hydropower. *Regulated rivers research and Management* 10, 247-264.

Shreve R.W. 1969. Stream lengths and basin areas in topologically random channel networks, *Journal of Geology* 77, 397-414.

Schumm S.A. 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey, *Bulletin of the Geological Society of America* 67, 597-646.

Schumm S. A. 1977. *The fluvial system*. John Wiley & Sons, New York, 338 pp.

Seaburn, C.E. 1969. Effects of urban development on direct runoff to East Meadow Brook, Nassau County, Long Island, New York. USGS Professional Paper 627-B, B1-B14.

Serna V et Gallicé A (coord.). 2005. *La rivière aménagée : entre héritages et modernité*. Formes, techniques et mise en œuvre, *Aestuarium*, n°7, 508 p.

- SIAHVY. 2010. Etude du bassin versant de la Méritantaise. Rapport Phase 1 à 4.
- Simon A. 2008. The controversy in approaches to river restoration in the United States: process vs. form. In: Gumiero B., Rinaldi M., Fokkens B. [eds], 4th ECRR International Conference on River Restoration, June 16-21, 2008, Venice, Italy, 391-400.
- Simon, A., Hupp, C.R. 1986. Channel evolution in modified Tennessee channels. Proceedings, Fourth Federal Interagency Sedimentation Conference, Las Vegas, March 24–27, 1986, vol. 2, 71-82.
- Simon A, Rinaldi M. 2006. Disturbance, stream incision, and channel evolution: The roles of excess transport capacity and boundary materials in controlling channel response. *Geomorphology* 79, 361-383. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.06.037
- Sneddon CS, Barraud R, Germaine M-A. 2017. Dam removals and river restoration in international perspective. *Water Alternatives* 10, 648-654.
- Souchon Y., Nicolas V. 2011. Barrages et Seuils : principaux impacts environnementaux. ONEMA – CEMAGREF. 28 pp.
- Skalak K., Pizzuto J., Hart D.D. 2009. Influence of Small Dams on Downstream Channel Characteristics in Pennsylvania and Maryland: Implications for the Long-Term Geomorphic Effects of Dam Removal. *Journal of the American Water Resources Association* 45 (1), 97-109.
- Staneley E.H., Doyle M.W. 2002. A geomorphic perspective on nutrient retention following dam removal, *BioScience* 52, 693-701
- Stephan E. 2007. Le Domaine d’Ors à Châteaufort. *Bulletin de la société historique et archéologique de Rambouillet et de l’Yvelines, SHARY*, 104, 17-31
- Stewardson M., Rutherford I. 2008. Conceptual and mathematical modelling in river restoration: do we have unreasonable confidence? In: Darby S. & Sear D. [eds], *River Restoration: Managing the Uncertainty in Restoring Physical Habitat*, John Wiley & Sons, Chichester, 61-78
- Stieglitz M. Shaman J., Mc Namara J., Engel V., Shanley J., Kling G.W. 2003. An approach to understanding hydrologic connectivity on the hillslope and the implications for nutrient transport. *Global Biogeochemical Cycles* 17 (4), 1105-1120.
- Stott T. 1997. A comparison of stream bank erosion processes on forested and moorland streams in the Balquhiddar Catchments, central Scotland. *Earth Surface Processes and Landforms* 22 : 383-399. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199704)22:4<383::AID-ESP695>3.0.CO;2-4

Stomberg J.C., Tiller R., Richter B.D. 1996. Effects of groundwater decline on riparian vegetation of semiarid regions: the San Pedro River, Arizona, USA. *Ecological Applications*, 6, 113–131

Surian N. 1999. Channel changes due to river regulation: The case of the Piave River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 24, 1135-1151. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199911)24:12<1135::AID-ESP40>3.0.CO;2-F

T

Tamisier V., Gob F., Bilodeau C., Thommeret N. 2017. Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau français (Carhyce). Valorisation des données Carhyce pour la construction d'un outil d'aide à la gestion des cours d'eau. Rapport scientifique CNRS (LGP-LADYSS)/Université de Paris Panthéon-Sorbonne/ESGT/AFB, 140 pp.

Taoufik M., Dafir J.E. 2002. Comportement du phosphore dans le sédiment des barrages de la partie aval du bassin versant d'Oum Rabiaa (Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau* 15 (1), 235-249

Tarolli P. 2014. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. *Geomorphology* 216, 295-312. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.03.008

Tetzlaff D. 2007. Connectivity between landscapes and riverscapes – a unifying theme in integrating hydrology and ecology in catchment science? *Hydrological Processes* 21(10), 1385-1389

Thiry M. 2012. Les Sables de Fontainebleau à Darvault: les sables blancs, la disposition et l'altération des grès, le calcaire. Guide pour une excursion géologique, n°E121114 MTHI. 12 pp.

Thorne C.R. 1997. Channel Types and Morphological Classification. In Thorne C.R., Hey R.D., Newson M.D. (Eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley & Sons, Chichester, 175-222

Trimble, S. W. 2009. Fluvial processes, morphology and sediment budgets in the Coon Creek Basin, WI, USA, 1975-1993. *Geomorphology* 108(1), 8-23

Trimble S.W., et Cooke R.U. 1991. Historical sources for geomorphological research in US, *Professional Geographer*, 43, 212-228.

Tulipe O. 1934. L'habitat rural en Seine-et-Oise. Essai de géographie du peuplement, Paris, 82 pp.

Tunstall S. M., Penning-Rowsell E. C., Tapsell S. M. & Eden S. E. 2000. River restoration: Public attitudes and expectations, *Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management* 14 (5), 363-370.

V

Valentin L. 2011. Histoire et écologie dans les Parcs Naturels Régionaux: l'exemple de la réserve du Domaine d'Ors. Mémoire de Master, ENSV, Paris 1, 117 pp.

Valette P, Carozza J-M. 2010. Mise en œuvre d'une démarche géohistorique pour la connaissance de l'évolution des paysages fluviaux : l'exemple de la moyenne vallée de la Garonne. *Géocarrefour* 85 : 17-27. DOI: 10.4000/geocarrefour.7679

Vanneste A. 2017. Analyse de l'évolution des dynamiques du ruissellement en milieu périurbain: la cas de la Mérantaise en Île-de-France. Mémoire de Master 1, Université Paris Diderot, 117 pp.

Van de Voorde A., Tchang-Minh A., de Gouvello B., Carré C., Chebbo G., Gromaire M.C. 2009. Stockage/utilisation des eaux de pluie: Quelle(s) incidence(s) des pratiques d'entretien des toitures sur la qualité et le potentiel d'usage des eaux de ruissellement ? *Cahiers de l'ASEES* 14 (1), 45-53, DOI <https://doi.org/10.1051/asees/2009007>

Véron J. 2007. La moitié de la population vit en ville. Bulletin mensuel d'information de l'Institut National d'études Démographiques (INED), *Population et Sociétés* 435, 4 p.

Viel V. 2012. Analyse spatiale et temporelle des transferts sédimentaires dans les hydrosystèmes normands, Thèse de Doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, 367 pp.

Vigier L. et Caudron A. 2008. Bibliographie annotée : évaluation de l'efficacité des travaux de restauration des habitats physiques des cours d'eau, *FDP74*, 138-137

Volcot J. 2001. La métamorphose du bas-Rhône. Mémoire de DEA. 190 pp.

W

Wallemacq V, Petit F, Van Campenhout J, Houbrechts G. 2011. Impact de la glace de ségrégation sur l'érosion des berges d'un ruisseau ardennais (la Chavanne, Belgique). *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 17 : 65-82. DOI: 10.4000/geomorphologie.9226

Walsh, C. J., Roy, A. H., Feminella, J. W., Cottingham, P. D., Groffman, P. M., & Morgan, R. P. 2005. The Urban Stream Syndrome: Current Knowledge and the Search for a Cure. *Journal of the North American Benthological Society* 24 (3), 706-723.

Walter RC, Merritts DJ. 2008. Natural Streams and the Legacy of Water-Powered Mills. *Science* 319, 299-304. DOI: 10.1126/science.1151716

Walters D.M., Leigh D.S., Bearden A.B. 2003. Urbanization, sedimentation, and the homogenization of fish assemblages in the Etowah River Basin, USA. *Hydrobiologia* 494, 5-10.

- Ward J.V., Tockner K., Uehlinger U., Malard F. 2001. Understanding natural patterns and processes in river corridors as the basis for effective river restoration. *Regulated Rivers: Research and Management*, 17, 311-323
- Wasson J.G., Malavoi J.R., Maridet L., Souchon Y., Paulin L. 1998 : "Impacts écologiques de la chenalisation des rivières". Cemagref eds. Coll. Études : « Gestion des milieux aquatiques », n°14
- Western R. 2001. Toward capturing hydrologically significant connectivity in spatial patterns. *Water Resource Research* 37 (1), 83-97.
- Westoby MJ, Brasington J, Glasser NF, Hambrey MJ, Reynolds JM. 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179 : 300-314. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021
- Wheaton JM, Brasington J, Darby SE, Sear DA. 2009. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms* 35 : n/a-n/a. DOI: 10.1002/esp.1886
- Whitlow J.R., Gregory K.J. 1989. Changes in urban stream channels in Zimbabwe. *Regulated Rivers: Research and Management* 4, 27-42.
- Wildam, L. 2013. Dam removal: A history of decision points. *Reviews in Engineering Geology* 21, 1-10
- Williams G.P., Wolman M.G. 1984. Downstream effects of dams on alluvial rivers. USGS circ., 781, 48 pp.
- Wittfogel K.A. 1956. The hydraulic civilizations. In: Thomas W.L. [eds], *Man's Role in Changing the Face of the Earth*, University of Chicago press, 152-164.
- Wohl E, Angermeier PL, Bledsoe B, Kondolf GM, MacDonnell L, Merritt DM, Palmer MA, Poff NL, Tarboton D. 2005. River restoration. *Water Resources Research* 41, 1-12. DOI: 10.1029/2005WR003985
- Wohl E, Merritts DJ. 2007. What Is a Natural River? *Geography Compass* 1, 871-900. DOI: doi:10.1111/j.1749-8198.2007.00049.x
- Wohl E, Lane S, Wilcox A. 2015. The Science and Practice of River Restoration. *Water Resources Research* 51, 5974-5997. DOI: 10.1002/2014WR016874. Received
- Wolman M.G. 1954. A method of sampling coarse river bed material. *Transactions of the American Geophysical Union*, 35 (6), 951-956
- Wolman M.G. 1967. Two problems involving river channels and their background observations. *Northwest. Univ. Stud. Geogr.* 14, 67-107
- Wong T.S.W., Li Y. 1998. Assessment of changes in overland time of concentration for two opposing urbanization sequences. *Hydrological Sciences Journal* 43 (1), 115-130.

Wood AL, Simon A, Downs PW, Thorne CR. 2001. Bank-toe processes in incised channels: the role of apparent cohesion in the entrainment of failed bank materials. *Hydrological Processes* 15, 39-61. DOI: 10.1002/hyp.151

Woolsey S., Weber C., Gonser T., Hoehn E., Hostmann M., Junker B., Roulier C., Schweizer S., Tiegs S., Tockner K., Peter. A. 2005. Guide du suivi des projets de revitalisation fluviale. Publication du projet Rhône-Thur. Eawag, WSL, LCH-EPFL, VAW-ETHZ, 113 pp.

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Diagramme conceptuel des questionnements scientifiques relatifs à l'impact de l'anthropisation des cours d'eau et de leur niveau de connaissance et d'intérêt par la communauté scientifique (d'après Gregory, 2006, développé de Gregory, 1987).	36
Figure 1.2 : Schéma théorique des types d'implantation des moulins à eau (droite) et détails de l'aménagement d'un moulin en dérivation (gauche) (d'après Barraud, 2007, modifié)	43
Figure 1.3 : Exemple d'ouvrages en travers : a. seuil ; b. vanne mobile ; c. déversoir	45
Figure 1.4 : Évolution de la population mondiale entre 1950 et 2050 (projeté). a. part de l'évolution de la population urbaine par rapport à la population mondiale totale ; b. répartition de cette même évolution (population urbaine) sur les grands continents du monde en 1950, 2009 et 2050 (projeté). (d'après Chin et al., 2013) ; Sources : donnée de population issues de l'United Nations Population Division, 2010. Projection de la population urbaine mondiale: révision en 2009 du recensement de la population, United Nations, New York. Disponible en ligne : http:// esa.un.org/unpd/wup/	49
Figure 1.5 : Représentation imbriquée des concepts de système fluvial (a.) et d'hydrosystème (b.) (Melun, 2012 ; d'après Amoros et Petts, 1993, modifié)	51
Figure 1.6 : a. Balance de Lane reprise par Borland (1960) ; b. Illustration du déséquilibre de la balance de Lane sous l'effet de l'anthropisation des cours d'eau (aménagements hydrauliques) (d'après Bledsoe, 2010 ; modifié).	52
Figure 1.7 : Schéma d'ajustement du chenal à l'aval d'un ouvrage transversal en réponse aux modifications des débits liquides (Q_l) et solides (Q_s) (Arnaud, 2012 ; d'après Petts et Gurnell, 2005 ; basé sur Schumm, 1969)	55
Figure 1.8 : Évolution des niveaux piézométriques sous l'influence d'un seuil en rivière (Melun, 2012, d'après Degoutte, 2006 ; modifiée)	56
Figure 1.9 : Schéma conceptuel des temps des réponses aux perturbations (durables ou ponctuelles) (Melun, 2012 ; d'après Brundsen et Thornes, 1979 ; Knighton, 1984)	59
Figure 1.10 : illustration de l'impact de l'urbanisation sur les dynamiques de crues (Fédération canadienne des municipalités et Conseil national de recherche Canada, 2003)	60
Figure 1.11 : Illustration évocatrice de l'effet de l'urbanisation sur le régime hydrologique (source inconnue, internet)	61
Figure 1.12 : Modèle d'évolution temporelle de la production sédimentaire d'un bassin versant et de la réponse morphologique en fonction de l'occupation du sol (Wolman, 1967 ; modifié d'après Downs et Gregory, 2004)	63
Figure 1.13 : Diagramme représentant six modèles conceptuels de l'impact spatial de l'hydrologie urbaine sur les chenaux des systèmes fluviaux. La zone grisée représente la partie du bassin concernée par l'urbanisation (d'après Chin et al., 2013 ; reproduit de Chin et Gregory, 2009).	67

Figure 1.14 : Modèle conceptuel de la trajectoire temporelle proposé par Dufour et Piégay (2009)....	73
Figure 1.15 : cadre conceptuel pour la définition des objectifs durables de restauration (d'après Dufour et Piégay, 2009 ; Dufour et al., 2010 ; traduit et mis en forme par Arnaud, 2012)	74
Figure 1.16 : Champs de contraintes de la durabilité (d'après Woosley et al., 2005 ; retranscrit et traduit par Arnaud, 2012)	75
Figure 1.17 : Cadre conceptuel des trajectoires temporelles de restauration des compartiments physique et biologiques à la suite de l'effacement d'un ouvrage en travers (Doyle et al., 2005)	76
Figure 2.1 : Carte de localisation (a.) de la Mérantaise et du relief de son bassin versant (b.).	78
Figure 2.2 : Cadre géologique du Bassin parisien. Carte et coupe géologique. (d'après Mégnien, 1980 ; AGBP, 2014 ; modifiées)	81
Figure 2.3: Géologie de la Mérantaise : (a.) carte géologique proposée à partir de la carte géologique au 1/50 000° du BRGM ; (b.) deux coupes géologiques de la vallée de la Mérantaise (d'après le SIAHVY, modifié) ; (c.) logs détaillant l'organisation en sous-sol de la géologie du bassin versant.	83
Figure 2.4 : Pentas et largeurs du lit selon les secteurs de la vallée (a.). Illustration de la dissymétrie des versants (b.).	84
Figure 2.5 : Les trois unités morphométriques et paysagères composant la vallée de la Mérantaise (a.) et la pente générale de la rivière (b.).	86
Figure 2.6: Caractéristiques granulométriques de la Mérantaise. Les valeurs ont été par détermination granulométrique sur radier (surface), suivant la méthode de prélèvement de Wolman (1954).....	87
Figure 2.7 : Exemple de substrat et de charge sédimentaire rencontrés dans le chenal de la Mérantaise. a. blocs, sur substratum argileux compact ; b. et c. blocs constitués artificiellement en seuil, issus d'un muret effondré (c.) ; d. argile très compact à l'affleurement ; e. charge solide composant l'essentiel des radiers du chenal, charge immobile ; f. ensablement à l'aval de la Mérantaise. (Crédits photo : M. Jugie)	88
Figure 2.8 : Normales annuelles des précipitations et températures sur la période 1981-2010 (source : Station météorologique de Trappes, Météo France).....	90
Figure 2.9 : Comparaison des valeurs de précipitation entre les normales des 30 dernières années (1981-2010) et des années de suivi durant la thèse.....	91
Figure 2.10 : Débits mensuels de l'Yvette à la station à Villebon-sur-Yvette (1968-2017) et ceux estimés de la Mérantaise pour la même période (sources : Banque Hydro. Station H4243010)	92
Figure 2.11 : Cartographie des plus hautes eaux connues suite à une série d'inondations dans la vallée de l'Yvette et de la Mérantaise (sources : DRIEE, 2011 ; <i>Étude hydrologique et hydraulique du bassin de la Mérantaise</i> , 2010).....	93
Figure 2.12 : Section de la Mérantaise alimentée ou non par la nappe des Sables de Fontainebleau (données d'après Lefebvre, 2015 ; modifié).....	95

Figure 2.13 : Carte piézométrique de l'aquifère Oligocène contenue dans les Sables de Fontainebleau et écoulements régionaux présumés, modifiée à partir de celle de Rampon, 1965 (Corcho Alvarado et al., 2007, modifié). En encadré, le secteur de la Mérantaise pour lequel on observe l'absence d'écoulement vers la rivière de la nappe des Sables de Fontainebleau.....	95
Figure 2.14 : Évolutions de la population des communes du bassin versant de la Mérantaise entre 1841 et 2013. (Sources : données <i>ante</i> -1968 : LdH/EHESS/Cassini, monographies communales ADY ; données <i>post</i> -1968 : INSEE, 2017). (*Populations calculées au <i>pro rata</i> de la superficie des communes comprises dans le bassin versant).....	96
Figure 2.15 : Illustration par une comparaison diachronique de cartes anciennes du développement massif et rapide de l'urbanisation en tête de bassin de la Mérantaise. Construction effective de la Ville-Nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines à partir des années 1980. (Sources : IGN).....	99
Figure 2.16 : Mode d'occupation du sol actuel dans le bassin versant de la Mérantaise. État en 2014 (source : photographies aériennes IGN 2014. Digitalisation D. Fekih, 2015, modifiée)	99
Figure 2.17 : Highlands broutant dans les Près Bicheret.....	101
Figure 2.18 : Contexte écologique (cadre institutionnel) du bassin versant de la Mérantaise.	101
Figure 3.1 : Localisation des secteurs prospectés et non prospectés.	105
Figure 3.2 : Démarche méthodologique générale de la thèse.....	106
Figure 3.3 : Plan d'intendance de la commune de Magny-les-Hameaux (78) (C2/47 ; Archives en ligne des Archives Départementales des Yvelines).....	111
Figure 3.4 : Exemple de représentation du tracé de la Mérantaise sur le secteur du Moulin Neuf. a. Extrait de la carte d'État-Major de 1820 : le tracé du lit mineur est assez large (IGN). b. Extrait de la carte topographique au 1/25 000 ^e (IGN) : le tracé est simplifié à un train aux dimensions uniques.	113
Figure 3.5 : Exemples d'erreur de cartographie sur les cartes IGN récentes. Le trait bleu met en évidence le tracé effectif de la Mérantaise selon les époques (XIX ^{ème} et XX ^{ème} siècle) ; le trait rouge correspond au linéaire cartographié alors que l'eau ne coule plus dans les fossés. a. Moulin d'Ors (Châteaufort) ; b. Moulin Neuf (Villiers-le-Bâcle).....	114
Figure 3.6 : Extrait de l'Atlas des routes de France dits Atlas de Trudaine, représentant une partie de notre secteur d'étude. Le relief de la vallée de la Mérantaise est cartographié (cercle noir en pointillé) mais le réseau hydrographique a été ignoré. Généralité de Paris, Vol. VI – Versailles II, 1745-1780, au 1/8584 ^e . Cote : CP/F/14/8448 (notice ZZ000254). Consultation en ligne de la version numérisée (http://www.culture.gouv.fr/Wave/image/archim/trudaine/frdafanchat_8448p033r01-p.jpg , 14/03/2016)	115
Figure 3.7 : Extrait de la Carte des environs de Paris, levée et gravée par l'Abbé Delagrive (1740). Feuille V, Sud-Ouest. (Sources : IGN).....	116
Figure 3.8 : Extraits de la carte trouvée dans le fond O ¹ 1740 ² (AN)	116

Figure 3.9 : Procédure de réglementation des usines hydrauliques d'après la circulaire "Magne" (1851) (d'après Barraud, 2007).....	121
Figure 3.10 : Localisation des données historiques locales disponibles et consultées renseignant sur les aménagements de la Mérantaise et de son bassin versant. Ne sont localisés sur la carte que les plans locaux. Les cartes générales et les photographies aériennes recouvrant toute la zone d'étude. Les numéros correspondent aux aménagements cités dans les archives administratives des Ponts et Chaussées 1. Moulin de la Geneste ; 2. Moulin d'Ors ; 3. Domaine d'Ors ; 4. Moulin des Vassaux ; 5. Moulin Neuf ; 6. Moulin Aubert/de la Tuilerie ; 7. Moulin de Chamort ; 8. Moulin de Gibeciaux. La frise permet de resituer la chronologie et la nature des documents disponibles.....	125
Figure 3.11 : Exemples de traces d'érosion de berge active (a., b.) ou potentielle (c., d.) ; ainsi que d'affouillement de berge (e.) ou d'ouvrages latéraux (f., g., h.). (Crédits photo : M. Jugie)	128
Figure 3.12 : Exemples de protections de berges anthropiques (a. blocs, b., muret et bois, c., gabions, d. tôle) et « naturelles » (e., racines, f. végétation dense). (Crédits photo : M. Jugie)	130
Figure 3.13 : Exemples d'affluents (a. fossé ; b. ruissellement de sources des versants ; c. ravines) et de buses et drains artificiels (d. et f. exutoires du réseau de drainage des eaux pluviales urbaines ; e. tuyaux de jardin ; g. buse obstruée). (Crédits photo : M. Jugie)	132
Figure 3.14 : Exemples d'obstacles à l'écoulement. a. chute du moulin d'Ors à Châteaufort ; b. système de vannage dans le parc du CNRS de Gif-sur-Yvette ; c. petit seuil anthropique constitué de blocs de pierres ; d. Section du collecteur d'eaux usées de la vallée de la Mérantaise traversant la rivière. (Crédits photo : M. Jugie)	133
Figure 3.15 : localisation de la sonde hydrométrique implantée à Ors et les stations météorologiques de Trappes et Toussus-le-Nôble.....	136
Figure 3.16 : Sondes Mini-Diver et Baro utilisées pour l'enregistrement des données de hauteur d'eau (a.) et illustration du dispositif (b.).....	137
Figure 3.17 : Trois exemples de sites de suivi de la mobilisation de la charge de fond de la Mérantaise (a. Site 1 ; b. Site 2 ; c. site 6). Réinjection et calage des particules après avoir été peintes.....	138
Figure 3.18 : Suivi de la mobilisation de la charge de fond sur un des sites équipés. a. au moment de la réinjection ; b. à l'occasion du relevé de la mobilisation des traceurs.	139
Figure 4.1 : Localisation des huit moulins de la Mérantaise	148
Figure 4.2: Moulin de Mérancis, cartographié sur les minutes de la carte d'État-Major (1819-1821 ; Feuille 10 bis).....	148
Figure 4.3 : Plan de situation du moulin et de l'étang de Mérancis en 1787, d'après le plan d'intendance de Magny-les-Hameaux (C247 ADY) (d'après Stephan, 1989, modifié). 1 : La Mérantaise ; 2. Chaussée de l'étang, dernier élément hérité encore perceptible dans le paysage aujourd'hui ; 3. Moulin et dépendances ; 4. Canal d'alimentation de la roue ; 5. Chemin actuel ; 6. Limites du finage entre Magny-les-Hameaux et Châteaufort.	149

- Figure 4.4 : Plan de situation du moulin et domaine de la Geneste (d'après la carte d'État-Major, 1819).
1. Bief perché ; 2. Canal d'amenée ; 3. Moulin (bâtiment des machines) ; 4. « Morte rivière », talweg ;
5. Canal de fuite ; 6. Bras de décharge alimentant la « morte rivière » 151
- Figure 4.5 : Plan de situation du moulin et du domaine d'Ors (d'après la carte d'État-Major, 1819) 1.
Moulin ; 2. Bief d'amenée du moulin, perché sur le versant ; 3. Bras de décharge, « Morte rivière » ; 4.
Canal de décharge ; 5. Vannes de décharge ; 6. Seuil d'Ors ; 7. Prairie humide ; 8. Château (et jardins
en grisé) ; 9. Pièce d'eau ; 10. Voûte (la « morte rivière » a été enterrée). 152
- Figure 4.6 : Cartographie d'un plan d'eau en amont du moulin d'Ors. a. extrait du Plan de Seigneurie de
Chevreuse, 1702 (ADY – D1470), sur lequel un étang et une digue sont clairement identifiés ; b. extrait
de la *Carte des environs de Paris* de l'abbé Delagrive (IGN, version colorisée, 1750) 153
- Figure 4.7: Le seuil d'Ors dans son état actuel. Vue depuis l'aval. 154
- Figure 4.8 : Plan de situation du moulin des Vassaux (d'après la carte d'État-Major, 1819). 1. Bâtiment
du moulin ; 2. Bras d'amenée, bief perché sur le versant ; 3. Bras de décharge, « morte rivière » ; 4.
Canal de décharge ; 5. Vannes de décharges ; 6. Déversoir. 155
- Figure 4.9 : Le moulin des Vassaux désormais abandonné (clichés de 2014). a. vue du moulin depuis
l'ancien bief perché ; b. vue de l'ancienne salle des machines ; c. extrait d'un plan local illustrant le
fonctionnement du complexe du moulin des Vassaux au XIX^{ème} siècle (sources : ADY 7S 115). .. 156
- Figure 4.10 : Plan de situation du moulin Neuf. 1. Moulin ; 2. Retenue du moulin ; 3. Canal d'amenée,
bief perché sur le versant ; 4. Bras de décharge ; 5. Canal de décharge ; 6. Canal de fuite ; 7 déversoir ;
8. Vannes de décharge ; 9. Affluent, en rive gauche, venant de Villiers-le-Bâcle. 157
- Figure 4.11: Vue sur le moulin Neuf et le fond de vallée de la Mérantaise, à la fin du XIX^{ème} siècle.
Carte postale (ADE 2Fi 038) 157
- Figure 4.12: Plan de situation du moulin Aubert, devenu moulin de la Tuilerie. 1. : Retenue du moulin
et canal d'amené (bief perché) ; 3. : Bras de décharge (talweg, « morte rivière ») ; 4. : canal de fuite ;
5. : canal de fuite souterrain ; 6 : dépendances du moulin ; 7. : limites de propriété longé par un canal de
décharge. 158
- Figure 4.13 : Plan de situation du moulin de Chamort. 1. : Moulin et dépendances ; 2. : Retenue amont ;
3 canal d'amenée (bief perché) ; 4. : canal de décharge vers le fond de vallée ; 5. : Bras de décharge
(talweg, « morte rivière ») ; 6. : Canal de fuite. 159
- Figure 4.14 : Cartes postales représentant le moulin de Chamort à la fin du XIX^{ème}-début XX^{ème} siècle
(?) (Source : www.delcampe.net) 160
- Figure 4.15 : Le moulin de Gibeciaux au début du XX^{ème} siècle. (source : www.delcampe.net et ADE –
2Fi 081) 161
- Figure 4.16 : Plan de situation du moulin de Gibeciaux. 1. : Moulin et dépendances ; 2. Retenue à
l'amont du déversoir ; 3. : Canal d'amenée d'eau (bief perché) ; 4. Canal de fuite ; 5. : Jardins de la
propriété. 161

- Figure 4.17 : Illustration d'une roue à augets dont tous les moulins de la Mérentaise sont équipés. a. Extrait de la coupe du bief à Ors, établie en 1849 par un ingénieur des Ponts et Chaussées (ADY – 7S 112-115 ; modifié) ; b. État actuel de la roue du moulin d'Ors, désormais élément « décoratif » du moulin d'Ors réhabilité (05/11/2013)..... 163
- Figure 4.18 : Répartition des moulins et état du chenal durant la phase 1 (XVIIe-XIXe s.) (a.). b. Ratio entre la part chenalisé et « préservée » du lit de la Mérentaise ; c. Chronologie de l'activité des moulins. 166
- Figure 4.19 : Localisation et hauteurs des chutes des lavoirs de la Mérentaise. 1. Lavoir de Magny-les-Hameaux ; 2. Lavoir de Châteaufort ; 3. Lavoir de Gibeciaux (crédits photo : M. Jugie ; sources lavoirs de Gibeciaux : ADE 2Fi)..... 170
- Figure 4.20: Croquis pour le projet de construction d'un pont sur le "chemin de grande communication N°6" (actuel D 938). La géométrie du lit de la Mérentaise est représentée à l'aide d'un trait marron. (Sources : ADY 7S 113)..... 171
- Figure 4.21 : Exemple de ponts et passerelles présents tout le long de la Mérentaise. a. pont de la D938 à Châteaufort ; b. ruines des « Ponts de Pierre », en amont des Vassaux ; c. pont de la route d'Ors ; d. pont au fond de Mérencis ; e. vieux pont à l'aval du moulin Neuf ; f. passerelle vestige du domaine d'Ors (XIX^{ème}-XX^{ème}). (Crédits photos : M. Jugie)..... 172
- Figure 4.22 : Exemple de bief perché sur les versants, ici à Ors..... 174
- Figure 4.23 : Extrait d'un plan local illustrant le tracé de la Mérentaise dans le secteur du moulin des Vassaux. Distinction entre le bief perché appelé « *Mérentaise* » et le bras de décharge « *Morte rivière* » (sources : ADY 7S 115). 175
- Figure 4.24 : Extrait de la carte d'État-Major (feuille 10 bis) illustrant le chenal rectifié et dérivé dans le secteur amont de la Mérentaise. Encart : photographie actuelle annotée du déversoir cité..... 176
- Figure 4.25 : Exemples de sections chenalisées du lit de la Mérentaise encore visibles aujourd'hui. 177
- Figure 4.26 : Extrait du profil en long du chenal de la Mérentaise en amont du moulin d'Ors, levé par un ingénieur des Ponts et Chaussées en 1849. (Sources : ADY 7S 115) 179
- Figure 4.27 : Exemple de représentation de murets de protection de berge (construits ou à construire) le long de la Mérentaise (encadré). Extrait d'un plan simplifié local, cartographiant les abords du lavoir de Châteaufort, à l'occasion d'un projet de construction d'un muret en rive gauche sur le canal de fuite du moulin de la Geneste, situé juste à l'amont. (ADY, 7S 113) 181
- Figure 4.28 : Extrait d'un plan local représentant la section sous voûte de la « morte rivière », entre le moulin d'Ors et celui des Vassaux, réalisé en 1855 (ADY, 7S 113) 181
- Figure 4.29 : Les différents travaux de chenalisation de la Mérentaise durant la Phase 1. * le moulin de Mérencis n'est plus actif dès le début du XIX^{ème} siècle. 185
- Figure 4.30 : Plan d'Intendance de la paroisse de Gif-sur-Yvette, 1786 (ADE, C2/4), illustrant localement l'usage agricole du bassin de la Mérentaise. Les surfaces en jaune correspondent aux espaces

de culture, les surfaces en vert clair aux prairies, en vert foncé aux espaces boisés et les constructions (urbanisation) sont représentées en rouge.	188
Figure 4.31 : Plan général des étangs et rigoles de Versailles (1812), (sources : Service archéologique départementale des Yvelines).....	192
Figure 4.32 : Réseau des rigoles et étangs inférieurs du plateau de Saclay (sources : SIAHVY).....	193
Figure 4.33 : Mode d’occupation du sol durant la phase 1 (XVII ^{ème} -XIX ^{ème} siècle). MOS Reconstitué à partir de la Carte d’État-Major de 1819-1820 et complété à partir des données historiques textuelles.	196
Figure 5.1 : Évolutions de l’usage des moulins de la Mérantaise reconstituée à partir des enquêtes statistiques de 1869, 1885 et 1926-1930 (Sources : ADY 7S 15, 7S 16). a. cartographie des évolutions d’usages des moulins ; b. frise chronologique de l’activité des moulins (rappel).	205
Figure 5.2 : Extrait du rapport des Ponts et Chaussées à l’occasion de la demande de désaffectation du moulin d’Ors par son propriétaire de l’époque, M. Bertrand (fils), en 1921. (Sources : ADY – 7S 114).	207
Figure 5.3 : État de la chenalisation du linéaire de la Mérantaise durant la Phase 2, correspondant essentiellement à un abandon et un désaménagement du lit de la rivière.	209
Figure 5.4 : Répartition du mode d’occupation du sol durant la deuxième phase (1880-1950). (d’après les photographies aériennes de l’IGN, campagnes de 1947-1949).	211
Figure 5.5: Le haras du moulin Neuf au début du XX ^{ème} siècle. Chevaux et vaches y partages les pâturages de la prairie humide en fond de vallée. (Sources : ADE, 2Fi 192)	212
Figure 5.6 : Vue des paysages du bassin versant de la Mérantaise en 1913 (sources : ADY, 3Fi 52 9)	214
Figure 6.1: Évolution de la population de la France métropolitaine entre 1801 et 2002 (d’après Dumont, 2002 ; sources INSEE)	218
Figure 6.2 : Illustration par une comparaison diachronique de cartes anciennes du développement massif et rapide de l’urbanisation en tête de bassin de la Mérantaise. Construction de la Ville-Nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines à partir des années 1980.	219
Figure 6.3 : Les étangs du Manet (étang aval). Prise de vue depuis la digue (crédit photo : Jugie, 2012)	220
Figure 6.4 : Répartition du mode d’occupation du sol durant la troisième phase (1950-2015). (D’après les photographies aériennes de l’IGN, campagne de 2014)	222
Figure 6.5 : La répartition des eaux pluviales en tête de bassin de la Mérantaise (Ru de la Gironde). Extrait du Plan hydrologique de la CASQY, en charge des eaux pluviales de Saint-Quentin-en-Yvelines (CASQY, 2012, modifié)	223

Figure 6.6: Comparaison des limites et du territoire des bassins versants topographie (avant 1980) et artificiel (actuel).	224
Figure 6.7: État de la chenalisation du linéaire de la Mérantaise durant la Phase 3. Seuls 2 moulins sur les 7 sont encore connectés à la rivière.	225
Figure 6.8 : Exemples de friches hydrauliques sur la Mérantaise. a. moulin des Vassaux abandonné ; on y aperçoit l'ancienne salle des machines et un ancien bief perché. b. ancienne vanne levée en amont du moulin de la Tuilerie (Aubert). c. ancienne roue du moulin d'Ors. d. ancien bief comblé entre le moulin d'Ors et le moulin des Vassaux, laissant une trace presque imperceptible de sa présence. (Crédit photo : M. Jugie, 2013-2014)	227
Figure 6.9 : Vues de la rigole de Châteaufort (Crédit photo : M. Jugie, 2013).	228
Figure Synthèse.0.1 : Synthèse des évolutions comparées du chenal et du bassin versant de la Mérantaise à travers les trois grandes phases d'aménagements de la vallée	230
Figure 7.1: Localisation des profils en travers où les hauteurs de berge ont été mesurées.	239
Figure 7.2: Exemples de hauteurs de berges importantes sur le cours de la Mérantaise (Crédits photo : M. Jugie).....	240
Figure 7.3: Exemple du surplomb du collecteur d'eau usées de la vallée de la Mérantaise (canalisation 2).	241
Figure 7.4: Marques d'affouillement des piles du seuil d'Ors	242
Figure 7.5: Buse implantée transversalement au lit de la Mérantaise (amont), portant des marques d'affouillement et d'incision.	242
Figure 7.6 : Exemples d'ouvrages latéraux présentant des marques d'incision du lit de la rivière.....	243
Figure 7.7 : Unique mobilisation de la charge grossière peinte observée au site 4. (a) à la réinjection des éléments peints ; (b.) suivi.....	244
Figure 7.8 : Localisation et caractéristiques principales des sites de suivis de la mobilisation de la charge de fond.....	244
Figure 7.9 : Localisation des traces d'érosion latérale des berges de la Mérantaise.	245
Figure 7.10 : typologie de l'érosion des berges.....	246
Figure 7.11: Localisation des marques d'érosion considérée comme active.....	246
Figure 7.12 : Localisation des marques d'érosion potentielle (ou passée).	247
Figure 7.13 : Localisation des marques d'affouillement des ouvrages latéraux.....	248
Figure 7.14 : Exemples d'ouvrages latéraux porteurs de marques d'incision. a. culées de ponts ; b. muret ; c. buses.....	248

Figure 7.15: Localisation des stations hydromorphologiques présentes le long de la Mérantaise.	250
Figure 7.16: Illustration de l'indicateur morphologique global (IMG) disponible sur la base de données CarHyCE. L'intervalle [0 ;1] comprend 68% des valeurs des résidus des stations de référence ; l'intervalle [0 ;2] 95% et l'intervalle [0 ;3], 99%. (Gob et al., 2014).....	252
Figure 7.17: localisation des stations de référence et de la Mérantaise dans l'HER type 1, « Tables calcaires ».....	255
Figure 7.18 : Détails des HER type 2, au sein de l'HER 9, type 1.....	255
Figure 7.19: Indicateurs morphologiques globaux des 5 stations hydromorphologiques de la Mérantaise.	260
Figure 7.20: Écarts des stations hydromorphologiques de la Mérantaise au modèle de référence.	262
Figure 7.21 : Localisation des profils en travers utilisés pour déterminer les largeurs et les profondeurs spécifiques de la Mérantaise.....	264
Figure 7.22 : Distribution des largeurs en 9 classes (effectifs et pourcentages).....	265
Figure 7.23 : Distribution des profondeurs en 7 classes (effectifs et pourcentages)	265
Figure 7.24 : Distribution spatiale des largeurs (a.) et des profondeurs (b.) le long du linéaire de la Mérantaise	266
Figure 7.25: Distribution spatiale des largeurs (a.) et des profondeurs (b.) de la Mérantaise pondérée par la taille du bassin versant.....	267
Figure 7.26 : Écarts au modèle des largeurs à plein bord (a.), des profondeurs à plein bord (b.) de la Mérantaise.	269
Figure 7.27 : Localisation du tronçon d'étude pour la comparaison du chenal entre 1980 et 2015 (linéaire couvert par le plan des années 80 + levés topographiques de 2015). Localisation des secteurs détaillés pour la quantification de l'incision du lit de la Mérantaise.	271
Figure 7.28 : Répartition des points existants et interpolés suivant l'axe du chenal (extrait) (Cherruault et al, 2015, ESGT).....	272
Figure 7.29 : Différences d'altitudes entre les profils de « 1980 » et 2015 au zoom 1. * Malgré l'existence du seuil dans les années 1980, il n'a pas été reporté dans la topographie du chenal des années 1980 et n'a pas pu être matérialisé dans ce schéma. Il faut donc être prudent avec les résultats obtenus au droit du seuil.	274
Figure 7.30 : Différences d'altitudes entre les profils de « 1980 » et 2015 au zoom 2 et profil en travers actuel (tabulation n°20 ; ESGT) illustrant l'incision du lit.....	274
Figure 7.31 : Différences d'altitudes entre les profils de « 1980 » et 2015 au zoom 3	275
Figure 7.32: Différences d'altitudes entre les profils de « 1980 » et 2015 au zoom 4.	275

Figure 7.33 : Différences d'altitudes entre les profils de « 1980 » et 2015 au zoom 5.	276
Figure 7.34 : Localisation des profils en travers utilisés pour comparés la géométrie du chenal entre les années 1980 et 2010/2015. Plan 1 à 3 (fonde carte : plan SIAHVY).....	278
Figure 7.35 : Localisation des profils en travers utilisés pour comparés la géométrie du chenal entre les années 1980 et 2010/2015. Plan 4 à 6 (fonde carte : plan SIAHVY).....	279
Figure 7.36 : Comparaison de la géométrie du chenal entre 1849 (ADY, 7S 115) et 2015.	282
Figure 7.37 : Exemples d'ouvrages latéraux récents présentant des marques d'affouillement prononcées. a. buses de rejets urbains ; b. et c. culées de ponts ; d. muret de protection.....	284
Figure 7.38 : Exemples d'affleurement d'une argile très compact (<i>bedrock</i>) qui contraint désormais fortement l'incision du lit.	285
Figure 7.39 : Location of Merantaise catchment and bank erosion measurement reaches.	289
Figure 7.40 : Description of the characteristics and local context of the six studied reaches.	291
Figure 7.41: Structure-from-Motion Photogrammetry methodology used at Reach 4. A: diagram of the Structure-from-Motion photogrammetry survey; B: example of different angle shoots for photogrammetry survey, reconstruction of the Point Cloud by VisualSfM; C: example of comparison point cloud between two periods by CloudCompare, M3C2 plugin (Lague et al., 2013).....	297
Figure 7.42 : Comparison of erosion values between erosion pins and SfM survey.....	298
Figure 7.43 : Schematic illustration of the workflow for the construction of the point clouds needed for the comparison of the two methods.....	299
Figure 7.44 : Rainfall, temperature (air) and discharge over the study period. The dotted lines represent the erosion pin readings. The grey-white bands represent the 9 periods of the SfM Photogrammetry survey (P1 to P9).	300
Figure 7.45 : Schema of the spatial variation in morphological activity rates (MAR) detected by erosion pins in the Merantaise River. The MAR data was calculated considering exclusively the effective bank retreat (cumulative retreat) detected by erosion pins after 16 month of survey (at December 2014). 304	
Figure 7.46 : Relationship between the different erosion bank variables and the most significant independent variable, Q_{moy_fl}	309
Figure 7.47 : Evolution (m) of the eroded bank in R4 over 9 periods, with regard to the hydrological conditions. Data are from Structure-from-Motion treatment. A: Erosion and deposition for each period. Four zones (I, II, III, IV) were defined vertically and three layers (T=top, M=middle, and B=bottom) horizontally. B: Profiles of the middle part of the eroded bank.	310
Figure 7.48 : Evolution of the bank from September 17, 2013, to November 13, 2013 (period 2), Zone III. 1.: data from SfM; 2.: data from erosion pins; 3.: hypothetical bank retreat during the peak discharge (2.08 m ³ /s); 4.: Position of the erosion pins (implemented metal rods).	311

Figure 7.49: Theoretical schema of the cycle of erosion evolution (after Nasermoaddeli and Pasche, 2008, modified).	313
Figure 7.50: Relationship between the eroded volume (positive values) of the SfM Photogrammetry and the erosion pins, in a common window and for each period. The simulations with P8 were too poor to be taken account.	314
Figure 7.51 : Julian and Torres (2006)'s conceptual model of best predictors for erosion rates of cohesive riverbanks (modified) and erosion rates of the six reaches studied on the Merantaise River.	317
Figure 8.1 : Distribution spatiale des surfaces urbanisées dans le bassin de la Méranlaise	331
Figure 8.2 : carte du réseau de drainage artificiel (routes, fossés, réseau d'assainissement) et des rejets urbains. Le réseau d'assainissement n'est pas complet, une partie des fossés n'est pas représenté car ils suivent essentiellement le réseau routier.	333
Figure 8.3 : Exemple de fossés permettant le drainage des terres agricoles du bassin versant de la Méranlaise (a.). Les eaux ruisselées rejoignent ensuite le réseau d'assainissement des eaux pluviales pour déversement (b.). Les surfaces agricoles sont aussi bien contributrices d'apports liquides que solide par l'érosion des sols à nu (a., c. et d.) (Crédits photos : D. Fekih)	334
Figure 8.4: Exemple de rejets urbains (buses) dans la Méranlaise, au niveau du parc du CNRS à Gif-sur-Yvette. (Crédits photo : D. Fekih, 2015 et M. Jugie, 2013)	335
Figure 8.5 : Cartographie des 7 bassins de rétention de la vallée de la Méranlaise géré par la CASQY. Leur localisation est précisée sur la figure 8.2. a. Étangs du Manet (sources de la Méranlaise) ; b. étang des Gravier ; c. étangs de Brouëssy ; d. bassin de Gomberville ; e. bassin du Buisson ; d. Chevincourt (sources : CASQY).....	337
Figure 8.6 : Configuration actuelle de la retenue du bassin de la Méranlaise à Gif. Aménagement d'une zone humide et d'un chenal « restauré » (crédits : D. Fekih, 2016).....	338
Figure 8.7 : Localisation des sept principales ravines du bassin versant de la Méranlaise	339
Figure 8.8 : Exemple de rigoles à sec (a.) et en eau (b.) sur les versants de la Méranlaise (Magny-les-Hameaux) (Crédits photos : D. Fekih, 2015).	340
Figure 8.9: Ravines d'érosion dans le bassin de la Méranlaise. a. et b. : ravine n°2 ; c. ravine n°1 ; d. et e. ravine n°7 ; f. : ravine n°4.	341
Figure 8.10 : Buse déconnectée des écoulements à cause de l'érosion de la ravine en amont.....	342
Figure 8.11: Exemple de ruissellement de sédiments fins (apports solides) dans les ravines n°3, issus de l'érosion des sols agricoles sur le plateau (a.).	342
Figure 8.12 : Typologie des connexions hydrologiques dans un bassin versant (Viel, 2012 ; d'après Conférence Permanente du Développement Territorial, Pays de Herve, modifié)	344
Figure 8.13 : Distribution statistique de la connectivité agricole du bassin versant de la Méranlaise (Fekih, 2016)	346

Figure 8.14 : Carte de connectivité hydrologique des surfaces agricoles du bassin de la Mérantaise (Fekih, 2016)	347
Figure 8.15 : Pourcentage de la connectivité agricole du bassin versant de la Mérantaise (Fekih, 2016).	348
Figure 8.16 : Carte de connectivité hydrologique des surfaces imperméables du bassin de la Mérantaise (Fekih, 2016)	349
Figure 8.17 : Distribution de la connectivité des surfaces productrices de ruissellement dans le bassin versant de la Mérantaise (Fekih, 2016)	350
Figure 8.18 : Carte de connectivité de toutes les surfaces contributrices de ruissellements (agricoles ou urbains) (Fekih, 2016)	351
Figure 8.19 : Schéma conceptuel de l’approche des dynamiques spatiales des écoulements à partir d’un système multi-agent (Reulier, 2015)	352
Figure 8.20 : Répartition de la connectivité hydrologique du bassin versant de la Mérantaise en 1947-1949 (A. Vanneste, 2017).....	353
Figure 8.21 : Connectivité hydrologique des surfaces ruisselantes simulée pour la période 1947-1949, avant l’urbanisation du bassin (A. Vanneste, 2017	355
Figure 8.22 : Évolution de la population de Villebon-sur-Yvette (recensement de 1793 à 2015 ; base Casini de l’EHESS et INSEE).....	359
Figure 8.23 : Évolution urbaine de la vallée de l’Yvette au niveau de Villebon-sur-Yvette (sources : Géoportail)	359
Figure 8.24 : Écoulements mensuels moyens pour la période 1968-2018. Données calculées sur 51 ans (Banque Hydro, station H4243010)	360
Figure 8.25 : Hydrogramme de la station de Villebon-sur-Yvette (débits instantanés) (Banque Hydro, station H4243010).....	362
Figure 8.26 : Intensité et distribution des crues atteintes que 5% du temps entre 1983 et 2016 (débits instantanés) (Banque hydro, station H4243010)	362
Figure 8.27 : Durée des crues de l’Yvette entre 1983 et 2016.	363
Figure 8.28 : Débits de la Mérantaise (m ³ /s) et précipitations (mm). Q 0.99 = débit journalier atteint 1% du temps sur la période (3 ans) ; Q 0.95 = débit journalier atteint 5% du temps sur la période (3 ans).	366
Figure 8.29 : Réactivité du bassin versant – crue n°1 – crue hivernale (12/12/2014-15/12/2014).	369
Figure 8.30 : Réactivité du bassin versant – crue n°2 – crues estivales (03/08/2014-03/08/2014 ; 04/08/2014-04/08/2014).....	369

Figure 8.31 : Réactivité du bassin versant – crue n°3 – effet des bassins de rétention et des rejets d’eaux pluviales (27/07/2013-28/07/2013).	370
Figure 9.1: Seuils théoriques de puissance spécifique et mise en perspective des valeurs calculées pour la Mérantaise (d’après Brookes, 1988 ; in Wasson et al., 1998, modifié). Les carrés représentent les stations de la Mérantaise pour lesquelles des ajustements morphologiques ont été observés (carré plein), ou non (carré vide).	377
Figure 9.2 : Estimation des puissances spécifiques en 6 points de mesures sur le bassin versant de la Mérantaise (W/m^2).	379
Figure 9.3 : Rappel du modèle conceptuel d’évolution d’un cours d’eau historiquement chenalisé proposé par Simon et Hupp en 1986 (a.) et réadapté pour illustrer la variabilité spatiale des ajustements des petites rivières périurbaines de faible énergie (b.) (d’après Simon et Hupp, 1986 ; in Simon et Rinaldi, 2006).	381
Figure 9.4 : Évolutions spatiales (horizontale) et temporelles (verticale) des capacités morphologiques (rectangles) et hydrologiques (hexagones) du chenal sous le double effet des activités anthropiques (ronds) : les aménagements hydrauliques et l’urbanisation. (d’après Chin et al. 2013).	385
Figure 9.5 : Trajectoire de la Mérantaise, de la mise en place des aménagements hydrauliques anciens (XVII ^{ème} siècle) aux projets de restauration (2015).	392
Figure 9.6 : Localisation et nature des opérations de restauration effectuées à Gif-sur-Yvette, entre 2013 et 2015 (sources : SIAVHY et AFB).	396
Figure 9.7 : Reconstitution schématique des trajectoires de dégradation et de restauration du compartiment hydromorphologique de la Mérantaise (modifié et réinterprété d’après Astrade et al., 2011 pour A., B., C. et D. ; modifié et réinterprété d’après Dufour et Piégay, 2009 pour E.). Trajectoire de la Mérantaise au regard de l’aménagement historique du chenal (A. et B.) et du bassin versant de la Mérantaise (C.).	403

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Quelques définitions trouvées dans la littérature pour désigner les seuils en rivière (Melun, 2012).....	44
Tableau 1.2 : Établissement de seuils de sensibilité à l'impact de l'urbanisation sur la morphologie et la biologie des cours d'eau (Grosprêtre, 2011).	58
Tableau 1.3 : Rapport entre le ruissellement avant urbanisation et après urbanisation pour une pluie donnée dans la ville de Hempstead, Long Island, Etats-Unis (Grosprêtre, 2011 ; d'après Seaburn, 1969 d'après Knighton, 1984). L'occupation du sol pré-urbanisé n'est pas connue.	61
Tableau 1.4 : Taux d'agrandissement (E_r) de la section pleins bords en fonction de l'occupation des sols (Grosprêtre, 2012 d'après Hammer, 1972).....	65
Tableau 1.5 : L'évolution progressive de la définition de restauration/réhabilitation depuis l'émergence du concept dans la littérature scientifique (d'après Dufour et Piégay, 2009 et les références citées) ...	72
Tableau 2.1 : Évolutions démographiques comparatives du bassin de la Mérintaise, des Yvelines, de l'Essonne, de la Ville-Nouvelle de St-Quentin-en-Yvelines et de la France (métropolitaine), entre 1968 et 2013 (sources : INSEE, 2017)	97
Tableau 2.2 : Répartition en chiffre du mode d'occupation du sol du bassin versant de la Mérintaise, d'après la digitalisation des photographies aériennes IGN 2014.	100
Tableau 3.1 : Liste des cartes anciennes utilisées pour l'étude rétrospective. Les lignes grisées correspondent aux cartes géoréférencées à partir de la carte IGN Scan 25 (2008).	110
Tableau 3.2 : Listes des plans principaux locaux institutionnels consultés : plans d'intendance et cadastre napoléoniens.....	112
Tableau 3.3 : Tableau récapitulatif des erreurs RMSE inhérentes au calage des cartes et plans locaux anciens géoréférencés.....	117
Tableau 3.4 : Listes des photographies aériennes utilisées, présentées par mission (source : IGN). La campagne de 1949, grisée, a été géoréférencées par l'IGN et intégrée aux SIG.....	118
Tableau 3.5 : Critères de « franchissabilité » d'un seuil retenu, selon la hauteur de l'ouvrage en travers	133

Tableau 3.6 : Tableau de synthèse récapitulant les différents paramètres relevés lors de l'état des lieux du fonctionnement hydromorphologique de la Mérantaise.....	135
Tableau 4.1 : Retranscription des caractéristiques des usines hydrauliques présentes sur le cours de la Mérantaise recensées dans « l'enquête statistique des irrigations et des usines sur les cours d'eau non navigables ni flottables » publiée en 1885 (ADY – 7S 16 ; modifié). * fonction du moulin d'Ors à la fin du XIX ^{ème} siècle. Initialement il s'agissait également d'un moulin à blé ; ** le moulin Aubert est appelé moulin de la Tuilerie au XX ^{ème} siècle ; *** nom modifié pour harmonisation. Moulin désigné sous le nom de « Jubéciaux » dans la source primaire.	164
Tableau 4.2 : Reconstitution des débits disponibles et utilisés pour le fonctionnement des moulins, à partir des données de « l'enquête statistique des irrigations et des usines sur les cours d'eau non navigables ni flottables » publiée en 1885 (ADY – 7S 16).....	165
Tableau 4.3 : Inventaire estimé des ouvrages hydrauliques des moulins de la Mérantaise.....	168
Tableau 4.4 : Inventaire des seuils et vannes des trois lavoirs de la Mérantaise.	169
Tableau 4.5 : Retranscription des largeurs moyennes de la Mérantaise dans les communes soumises à l'enquête de 1838 sur les « Rivières et cours d'eau non navigables » (ADY, 7S 15). Dans le fond d'archives consulté, l'enquête est disponible pour ces trois seules communes.....	179
Tableau 4.6 : Répartition entre la part du lit actif chenalisé et celle « préservée ». * Ces pourcentages sont calculés en considérant l'ensemble des ≈ 17 km de linéaire actif, dérivations secondaires compris.	186
Tableau 4.7: Description des rigoles du réseau des étangs inférieurs compris dans le bassin de la Mérantaise, d'après la Carte topographique du domaine des Eaux de Versailles divisé en quatre arrondissements, levés en 1819 et 1920 et complétée en 1914 (sources : ADY 2Q 146). Les pentes ont été déterminées par le SIAVHY (2010) * rigoles partiellement comprises dans le bassin versant. ** le total de linéaire de rigole compris dans le bassin de la Mérantaise est d'environ 20.5 km, soit 32 km ²	194
Tableau 7.1 : Hauteurs d'eau relevées au droit de 16 transects entre Châteaufort et les Vassaux, à l'aide d'un télémètre laser (Jugie, 2012). Les transects sont présentés d'amont (1) en aval (16). Les berges supérieures à 1.50 m sont en gras.....	239
Tableau 7.2: Inventaire de l'incision amont et aval au droit des sections du collecteur d'eau usées de la vallée de la Mérantaise traversant le chenal (Cherruault et al, 2015 ; ESGT).....	241

Tableau 7.3 : Liste et description 34 stations hydromorphologiques de référence du modèle CarHyCE. BV : surface du bassin versant (km ²), L _{pb} : largeur moyenne à plein bord (m), P _{pb} : profondeur maximale à plein bord (m) ; L/P : rapport largeur/profondeur à plein bord ; S _{m_{pb}} : surface mouillée à plein bord (m ²) ; S _{pb} : pente de la ligne d'eau à plein bord.....	254
Tableau 7.4 : Caractéristiques des cinq stations hydromorphologiques implantées le long de la Mérentaise. PK : distance à la source (km) ; BV : surface du bassin versant en km ² L _{pb} : largeur moyenne à plein bord (m), P _{pb} : profondeur maximale à plein bord (m) ; L/P : rapport largeur/profondeur à plein bord ; S _{m_{pb}} : surface mouillée à plein bord (m ²) ; S _{pb} : pente de la ligne d'eau à plein bord. La station en grisé correspond à un état après opération de restauration des conditions écologiques.....	258
Tableau 7.5 : Illustration des écarts entre les deux profils en long avec l'exemple de la longueur totale respective des profils de « 1980 » et 2015.	273
Tableau 7.6: Moyennes des incisions entre Châteaufort et le moulin Neuf (d'après les données de Cherruault et al, 2015, ESGT).....	277
Tableau 7.7 : Évolutions des largeurs et des profondeurs à pleins bords du chenal de la Mérentaise entre les années 80 et 2010, au droit de 31 transects. *valeurs potentiellement surestimées en raisons d'un problème de relevé initial des géomètres de l'époque ou d'une erreur de mesure de notre part ; ** les évolutions négatives ont été conservées, partant du principe qu'elles pouvaient témoigner d'un exhaussement du lit.	280
Tableau 7.8 : Retranscription de la quantification de l'incision et élargissement du lit du Morbras entre 1964 et 2017 (Ali, 2017 ; modifié).....	283
Tableau 8.1 : Évolution du taux d'urbanisation dans le bassin de la Mérentaise.....	330
Tableau 8.2 : Caractéristiques principales des bassins d'orage du bassin versant de la Mérentaise (sources : CASQY).....	336
Tableau 8.3 : Caractéristiques morphologiques des 6 ravines du bassin de la Mérentaise.	340
Tableau 8.4 : Quelques débits caractéristiques de la station de Villebon-sur-Yvette (Banque hydro). * les valeurs entre crochets désignent les bornes de l'intervalle de confiance (95%).....	360
Tableau 8.5 : Synthèse des paramètres hydrologiques témoignant de l'impact de l'urbanisation sur le régime hydrologique de l'Yvette.	363
Tableau 8.6 : Quelques débits caractéristiques de la Mérentaise sur 3 années hydrologiques (2012-2015).....	365

Tableau 8.7: Débits journaliers classés, Q 0.99 atteints 1% du temps ; Q 0.95, atteints 5% du temps.
..... 365

Tableau 8.8 : Caractéristiques des précipitations annuelles de 2012 à 2015 à la station météorologique de Toussus-le-Noble. Rappel des normales sur 30 ans (1981-2010) à la station de Trappes (sources : Météo France). 368

Tableau 8.9 : Caractéristiques des 3 crues considérées pour illustrer la réactivité du bassin versant. 368

Tableau 8.10 : Exemples de changements hydrologiques causés par l'urbanisation aux États-Unis et au Royaume-Uni (Chin, 2006)..... 373