

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)

Fanny Arnaud

▶ **To cite this version:**

Fanny Arnaud. 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). Géographie. Université Lumière Lyon 2, 2012. Français. NNT : . tel-00833042

HAL Id: tel-00833042

https://theses.hal.science/tel-00833042

Submitted on 11 Jun 2013

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution| 4.0 International License

Université de Lyon

Ecole Doctorale « Sciences Sociales »

Laboratoire Environnement, Ville, Société

(CNRS UMR 5600 EVS)

THESE

présentée par

Fanny Arnaud

en vue de l'obtention du

DOCTORAT de l'Université Lumière Lyon 2

Discipline : Géographie, Aménagement et Urbanisme

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)

---

soutenue publiquement le 10 décembre 2012 devant le jury composé de :

Denis Aelbrecht	Docteur, EDF-CIH	Examinateur
Gilles Arnaud-Fassetta	Professeur, Université Paris-Diderot	Rapporteur
Hervé Piégay	Directeur de Recherches CNRS, ENS de Lyon	Directeur
Anne-Julia Rollet	Maître de conférences, Université de Caen	Encadrante
André Roy	Professeur, University of Waterloo, Canada	Rapporteur
Laurent Schmitt	Professeur, Université de Strasbourg	Encadrant

Université de Lyon

Ecole Doctorale « Sciences Sociales »

Laboratoire Environnement, Ville, Société

(CNRS UMR 5600 EVS)

THESE

présentée par

Fanny Arnaud

en vue de l'obtention du

DOCTORAT de l'Université Lumière Lyon 2

Discipline : Géographie, Aménagement et Urbanisme

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)

soutenue publiquement le 10 décembre 2012 devant le jury composé de :

Denis Aelbrecht	Docteur, EDF-CIH	Examinateur
Gilles Arnaud-Fassetta	Professeur, Université Paris-Diderot	Rapporteur
Hervé Piégay	Directeur de Recherches CNRS, ENS de Lyon	Directeur
Anne-Julia Rollet	Maître de conférences, Université de Caen	Encadrante
André Roy	Professeur, University of Waterloo, Canada	Rapporteur
Laurent Schmitt	Professeur, Université de Strasbourg	Encadrant

Remerciements

Si le rendu d'un manuscrit de thèse signifie l'achèvement d'une phase de rédaction plutôt solitaire, au terme de ces trois années et demi (allez… moins de quatre !) de recherche passées entre Lyon et le Rhin, je retiendrai surtout un travail d'équipe au quotidien, et de beaux moments partagés. Qu'il me soit permis ici de saluer l'ensemble des personnes ayant contribué à la réalisation de ce travail, par leur soutien scientifique, technique ou tout simplement amical.

Je tiens tout d'abord à remercier mes trois encadrants de thèse, **Hervé Piégay**, **Laurent Schmitt** et **Anne-Julia Rollet**. Je remercie en particulier Hervé, pour son positivisme indéfectible qui m'a tirée vers le haut tout au long de ces années ; Laurent, pour son implication sur le volet historique, ses précieux éclairages sur le fonctionnement de l'hydrosystème rhénan et son enthousiasme scientifique ; Anne-Julia, pour son appui sur les analyses de données *in situ*, et ses conseils aussi bien à distance que chez elle à Caen (je la remercie aussi pour son confortable lit d'ami !). Je vous suis extrêmement reconnaissante de m'avoir offert un apprentissage de l'activité de recherche dans un environnement scientifique et opérationnel si enrichissant.

Je remercie **Gilles Arnaud-Fassetta**, **André Roy** et **Denis Aelbrecht** d'avoir accepté de participer à mon jury de thèse, en particulier mes deux rapporteurs pour le temps consacré à évaluer ce manuscrit.

Je remercie les partenaires du projet INTERREG « Redynamisation du Vieux Rhin » pour les échanges de données, les traductions franco-allemandes, les coups de main sur le terrain, et pour toutes les discussions et réunions qui auront fait murir mon travail. Merci en particulier à **Christiane Alonso** et **Christian Blum** (Région Alsace) ; **Regina Ostermann**, **Ottmar Huppmann** et **Ulrike Pfarr** (Regierungs Präsidium Freiburg) ; **Dominique Burlet** et **Pierre-Lou Tisserand** (DREAL Alsace) ; **Kai Kempmann** et **Gerard Ströhlein** (WSA) ; **Andreas Dittrich** et **Klaus Koll** (LWI) ; **Michelle Trémolières**, **Isabelle Combroux** et **Elodie Piquette** (Université de Strasbourg) ; **Philippe Kniebiely** et **Léa Merckling** (Petite Camargue Alsacienne) ; **Luc Dietrich** (Conservatoire des Sites Alsaciens) ; **Alain Garnier** (EDF) ; **André Paquier**, **Jérôme le Coz**, **Benoit Camenen** et **Claire Béraud** (IRSTEA Lyon) ; **Kamal El Kadi** et **Andres Die Moran** (LNHE).

Je salue les collègues du Centre d'Ingénierie Hydraulique d'EDF qui ont œuvré au sein du projet « Erosion maitrisée », en particulier **Denis Aelbrecht**, **Agnès Barillier**, **Anne Clutier** et **Kevin Pinte**. Les réunions de projet régulières et les rapports d'étape m'ont grandement aidé à structurer mon travail dans les premiers temps de ma thèse. Plus largement, la qualité des échanges, tant sur les plans humains que professionnels, et le climat de confiance qui s'est instauré au cours de ces années, ont sans aucun doute permis de créer des conditions très bénéfiques à l'avancée du projet.

Je remercie les organismes gestionnaires d'Alsace et du Baden-Württemberg pour m'avoir autorisée à accéder à leurs archives, afin de reconstituer la chronologie des travaux d'aménagement du Rhin. Mes profonds remerciements sont adressés à **Erni Dillmann**, ingénieur retraité du Service de la Navigation de Strasbourg, pour m'avoir accueillie à son domicile si

chaleureusement et avoir extrait de sa cave quelques trésors concernant les plans de la correction du 19ème siècle.

Une partie de cette thèse a pu bénéficier de la contribution de plusieurs contractuels et étudiants : merci à **Dorothée Hoenen** pour son aide au traitement SIG des cartes et des photographies aériennes ; **Christiane Alonso** pour le géoréférencement des vols aériens de la recharge expérimentale. J'ai également eu plaisir à travailler avec **Karen Johnstone** et **Véronique Ferrier** dans le cadre de leur Master.

Si la thèse est souvent décrite comme un exercice solitaire, je mesure ma chance d'avoir pu échanger quotidiennement avec **David Béal**, administrateur scientifique et appui technique en imagerie, terrain et traitements statistiques dans le projet INTERREG. Merci, Michka, pour tes codes MATLAB qui m'ont facilité le traitement de pas mal de profils en travers, et pour tes nombreux talents déployés *in situ*, parmi lesquels : une aptitude remarquable à se sortir de situations désespérées (du chenal du Rhin à la neige croûtée d'Orelle) ; un recordman de la granulométrie en solitaire ; un MacGyver de la bathymétrie (il manquerait pas un câble ?!)… le tout agrémenté d'un soutien moral infaillible ainsi que d'un humour, mi-fin mi-graveleux, qui ont soufflé un vent de légèreté tout au long de ma thèse. La Moufette te remercie pour tout ça.

J'adresse également mes chaleureux remerciements aux collègues et étudiants qui ont accepté de donner de leur temps et de leur personne lors des campagnes de terrain, par toutes les météo et parfois jusqu'à des heures tardives. Puissent ces valeureux collaborateurs retrouver leur contribution ci-dessous !

Date	Objet de la mission	Participants
2-5 mars 2009	Validation état 0 éco-géomorphologique	F. Arnaud, D. Béal, L. Schmitt, K. Pinte, P.A. Delorme
24 août-3 septembre 2009	Etat 0 site INTERREG/EDF Patron granulométrique du lit mineur	F. Arnaud, D. Béal, A.J. Rollet, V. Chaouch, M. Arnaud, J. Saulas, J.P. Roche, P.A. Delorme
29 mars-2 avril 2010	Etat 0 site INTERREG/EDF	F. Arnaud, D. Béal, K. Michel, C. Billard
29-30 juillet 2010	Collecte des galets à équiper	F. Arnaud, D. Béal
20-24 septembre 2010	Etat 0 site INTERREG/EDF	F. Arnaud, D. Béal, K. Michel, K. Dzubakova, D. Hoenen
16-18 novembre 2010	Etat 0bis site INTERREG	F. Arnaud, D. Béal, B. Morandi, V. Wawrzyniak
2-6 mai 2011	Etat 1 site INTERREG Patron granulométrique des marges	F. Arnaud, D. Béal, A.J. Rollet, K. Michel, R. Ostermann, T. Raso, G. Fantino, V. Ferrier, C. Alonso, C. Béraud, C. Blum
3-7 juillet 2011	Volumétrie des bancs Patron granulométrique des marges	D. Béal, V. Ferrier, T. Raso, C. Dodane
24-28 octobre 2011	Etat 1 site INTERREG	F. Arnaud, D. Béal, K. Michel, P. Kniebiely, C. Blum

Le travail de terrain a été rendu possible grâce au prêt d'équipements par différents laboratoires : merci à **Vincent Gaertner** et **Norbert Landon** pour la mise à disposition du matériel de la plateforme OMEAA ; **Samuel Meulé** (CEREGE) pour la formation à la mesure bathymétrique par écho-sondeur ; **Guillaume Dramais** (IRSTEA Lyon) pour la formation écho-sondeur et le prêt du matériel ; **Fréderic Liébault** (IRSTEA Grenoble) pour le prêt de l'antenne de détection des PIT tags ; **Rodolphe Montagnon** (Paracom) pour le suivi aérien de la recharge expérimentale.

L'Université Lyon 2 et le personnel de l'UMR 5600 m'ont offert un environnement de travail matériel et humain des plus favorables durant ces années. Je remercie ainsi **Paul Arnould**, **Hervé Piégay** et **Jean-Yves Toussaint** pour m'avoir accueilli au sein de leur UMR ; **Marie-Christine Michel**, **Vanessa Michel, Sandy Artero** et **Patrick Gilbert** pour leur encadrement administratif. Dans le couloir ISIG de l'ENS de Lyon, je remercie **Marie-Laure Trémélo** et **Hervé Parmentier** pour leur appui en techniques SIG et DGPS ; **Lise Vaudor** pour ses lumières sous R, et sa capacité à vulgariser les plus obscures formulations statistiques ; **Kristell Michel** pour son dynamisme au laboratoire comme à l'extérieur, mais toute en tempérance quand il s'agissait de freiner mes ardeurs sur le terrain… Je salue **Marylise Cottet**, dont la joie de vivre a habité mon bureau durant une bonne partie de la thèse, et **Guillaume Fantino**, pour les pauses cinématographiques à la GoPro et les dépannages SIG. Mes pensées vont également vers les « jeunes » du laboratoire, encore tout frais et plein d'espoir sur la finition d'une thèse en trois ans (!) : **Jérémie Riquier**, **Elsa Parrot** (merci pour les coups de main de dernière minute, je vous rendrai la pareille !), **Mélanie Bertrand** (merci pour ces évasions en danse et en musique, toujours salvatrices), **Bertrand Morandi** (tu feras donc partie de la prochaine sortie ?!), **Véronique Bennachio**, **Emeline Comby**, **Stéphanie de Carrara**. Je pense aussi aux doctorants « matures » ou tout récents docteurs : **Barbara Belletti**, **Elise Wiederkehr** (nous y serons arrivées en même temps !), **Vincent Wawrzyniak** (battues à plate couture…), **Loïc Grosprêtre** (merci pour les conseils administratifs de fin de thèse), **Adrien Alber** (à quand des retrouvailles en montagne ?!), **Catherine Lavaigne**. Je salue enfin les « anciens » : **Jérôme Lejot**, **Clément Dodane** (animateurs de soirée devant l'éternel…), **Magalie Rival**, **Nicolas Talaska**, **Yves le Lay, Janique Valy, Christopher Gomez**…

J'ai également une pensée pour mes collègues thésards hors des murs du laboratoire, avec lesquels j'ai eu plaisir à échanger sur nos sujets respectifs : merci à **Claire Béraud** (IRSTEA Lyon) et **Andres Die Moran** (LNHE), les deux autres doctorants du projet « Rhin », pour les échanges de données dans la dernière ligne droite de nos rédactions. Je salue **Julien Bergé** (IRSTEA Lyon), roi des poissons du Rhône ; merci pour ton soutien durant la fin de thèse. J'ai également une pensée pour **Margot Chapuis** (CEREGE), experte de la Durance ; merci pour toutes nos discussions scientifico-philosophiques sur un coin de comptoir, pour tes nombreux encouragements, et bonne continuation outre-Atlantique !

Pour finir, mes proches ont vécu la thèse avec moi et en connaissent maintenant un peu sur la géomorphologie du Rhin… Je tiens donc à remercier mes proches dans le Royans ainsi que mes parents, mes frères et ma sœur, pour leur compréhension, leur patience et leur réconfort moral voire culinaire (la purée de courge maternelle ayant démontré ses vertus sur la productivité de fin de thèse). Je salue également mes amis lyonnais, pour leur présence au quotidien, et bien sûr ma famille ENGEESienne dispersée en France et ailleurs, pour tous les bons moments partagés à l'extérieur : Laure et sa famille, Yohann, Caro, Boris & Dorine (merci pour les dépannages à distance !), Meu et ses parents, Caro & Elo, Fred & Sylvie, Greg & Fanny, Simon, Mathieu, Yacine, Thierry, Clém & Boris, Aude & Margot, Jean & Pernelle, Sophie & Buzuk, Rocco & Charlotte. J'ai enfin une pensée particulière pour mes deux collocatrices lyonnaises improvisées, Dorothée et Julie, qui auront éprouvé à plusieurs reprises les lattes de mon canapé jusqu'à mon paillasson, et qui en cela auront certainement contribué à l'équilibre d'une partie de cette thèse !

Table des matières

Remerciements 5
Table des matières 9

Préambule

A/ Contexte de recherche 17

B/ Organisation générale de la thèse 19

Chapitre 1

Contexte scientifique et objet d'étude 21

A/ Cadre thématique 23

1. L'anthropisation des cours d'eau : pressions et impacts environnementaux 23
1.1. Les pressions anthropiques en général 23
1.2. Les travaux en rivière 24
1.2.1. La chenalisation 24
1.2.2. Les épis 24
1.2.3. Les barrages 25
1.3. Les impacts morphologiques de ces travaux 27
1.3.1. Bases théoriques du fonctionnement des cours d'eau 27
Définitions 27
Principes de fonctionnement du système fluvial 27
1.3.2. Les impacts de la chenalisation 29
1.3.3. Les impacts des épis 30
1.3.4. Les impacts des barrages 31
Impacts des barrages sur les variables de contrôle 31
Impacts des barrages sur les variables morphologiques 33
1.3.5. Echelles spatio-temporelles d'ajustement et effets cumulatifs 34
1.4. Les impacts écologiques et socio-économiques de ces travaux 36
1.4.1. Liens entre hydro-morphologie et écologie des cours d'eau 36
1.4.2. Impacts écologiques et socio-économiques 36

2. La restauration des cours d'eau 39
2.1. Définitions 39
2.1.1. Le retour à un état non perturbé 39
2.1.2. Des références statiques … 40
2.1.3. … à la formulation d'objectifs de restauration réalistes 40
2.2. Des exemples d'opérations de restauration 42
2.3. Le challenge des modèles prédictifs de réponse aux actions 44
2.4. La gestion adaptative et la place de l'expérimentation en restauration 45
2.5. Apprécier la durabilité des actions 47

B/ Problématique de recherche 49

1. L'intérêt de la géomorphologie historique : fonder le diagnostic sur la trajectoire temporelle d'évolution 49
2. L'intérêt de la géomorphologie expérimentale : tester les actions et proposer des indicateurs 50

C/ Cadre géographique 52

1. Généralités sur le système fluvial rhénan 52
2. Physiographie du Rhin supérieur 54
   2.1. Héritages géologiques et géomorphologiques 54
   2.2. Structuration longitudinale de la plaine alluviale du Rhin supérieur 55
   2.3. Régime hydrologique du Rhin supérieur 56
3. Contexte historique de l'aménagement du Vieux Rhin 58
   3.1. Le Rhin « sauvage » (début du 19ème siècle) 58
   3.2. La correction (1842-1876) 59
   3.3. La régularisation (1931-1950) 61
      3.3.1. « Rhin libre ou canal ? » 61
      3.3.2. Principes de la régularisation 63
      3.3.3. Essais de fixation du lit 64
   3.4. Le barrage de Kembs et le Grand Canal d'Alsace (1929-1959) 66
      3.4.1. Principes de la canalisation 66
      3.4.2. Impacts du barrage de Kembs sur les débits liquides 68
      3.4.3. Impacts du barrage de Kembs sur les débits solides 69
         Dynamique sédimentaire en amont du barrage 69
         Gestion des sédiments au barrage 70
         Conclusion sur les impacts du barrage sur les débits solides 70
4. Contexte opérationnel de la restauration du Vieux Rhin 71
   4.1. De l'aménagement du Rhin supérieur à sa restauration écologique 71
   4.2. Un engagement collectif pour la restauration du Vieux Rhin 72
   4.3. Les projets EDF et INTERREG 74

Chapitre 2

Géomorphologie historique - Etude de l'évolution morphologique du Vieux Rhin depuis le 19ème siècle 77

A/ Introduction 79

1. Les enjeux et les questionnements de l'analyse rétrospective 79
2. La démarche générale 79
   2.1. Les échelles d'étude 79
   2.2. Le cadre d'analyse et les sources d'information 80
3. L'analyse quantitative des données 80
   3.1. Les méthodes d'analyse spatiale 80
   3.2. Les méthodes d'analyse statistique 82
4. Organisation du chapitre 83

B/ Analyse de l'évolution verticale du lit du Rhin (1880-2011) 86

1. Matériel et méthodes 86

1.1. Recensement des données verticales 86
1.1.1. Profils en long et en travers (1880-2009) 86
1.1.2. Sondages d'épaisseurs de sédiments fins sur les marges (2011) 88
1.2. Méthodes d'analyse des données 89
1.2.1. Analyse semi-quantitative de l'évolution de la section en travers (1884-2009) 89
1.2.2. Analyse quantitative de l'évolution du profil en long (1880-2009) 90
1.2.3. Analyse quantitative des volumes érodés et déposés dans la bande active et sur les marges du Vieux Rhin contemporain (1950-2011) 90
Eléments bibliographiques sur l'évolution verticale du Vieux Rhin contemporain 90
Méthode d'analyse des profils en travers (1950-2009) 91
Méthode d'analyse des sondages d'épaisseurs de sédiments fins (2011) 93
2. Résultats 93
2.1. L'évolution générale de la morphologie en travers du lit du Rhin (1884-2009) 93
2.1.1. La diversité morphologique en travers du lit corrigé 93
2.1.2. La simplification du lit régularisé 94
2.2. L'évolution de la variabilité du talweg et le patron d'incision du lit (1880-2009) 96
2.2.1. Le lissage du profil en long du talweg 96
2.2.2. L'ampleur de l'incision du lit corrigé 98
2.3. La dynamique sédimentaire de la bande active et des marges végétalisées du Vieux Rhin contemporain (1950-2011) 100
2.3.1. Evolution diachronique de la bande active et des marges végétalisées 100
L'incision de la bande active 100
L'exhaussement des marges végétalisées 101
2.3.2. Patrons longitudinaux d'évolution de la bande active et des marges végétalisées 104
La bande active 104
Les marges végétalisées 105

C/ Analyse de l'évolution planimétrique du Rhin (1828-2008) 107

1. Matériel et méthodes 107
1.1. Recensement des données planimétriques 107
1.1.1. Cartes du 19ème - début 20ème siècle 107
1.1.2. Plans de la régularisation (1946-1968) 108
1.1.3. Photographies aériennes (1956-2008) 108
1.2. Intégration des données sous SIG et étude cartographique 109
1.2.1. Géoréférencement des données 109
1.2.2. Travail cartographique 111
Cartographie de la mobilité du Rhin sauvage (1828-1838) 111
Cartographie des unités physionomiques de la plaine rhénane (1828-1925) 112
Cartographie des ouvrages de la régularisation (1946-1968) 114
Cartographie des unités physionomiques du Vieux Rhin (1956-2008) 114
1.2.3. Estimation des erreurs 115
Evaluation des erreurs associées au traitement SIG des données 115
Evaluation des erreurs associées aux différences de débit 116
2. Résultats 116
2.1. La mobilité du lit du Rhin sauvage (1828-1838) 116
2.2. L'évolution planimétrique de la plaine rhénane (1828-1925) 117
2.2.1. Evolution générale des unités physionomiques de la plaine rhénane 117
2.2.2. Evolution des types de chenaux 119
2.3. L'évolution planimétrique du Vieux Rhin (1956-2008) 124

2.3.1. Préambule : l'impact des épis sur la morphologie en plan 124
Eléments bibliographiques sur les impacts morphologiques des épis 124
Analyse statistique 125
2.3.2. Evolution diachronique générale des principales unités physionomiques 128
2.3.3. Evolution de la bande active 130
Analyse diachronique 130
Analyse spatiale 131
2.3.4. Evolution des bancs 134
Approche générale 134
Evolution des bancs sur trois secteurs 137

D/ Caractérisation granulométrique du lit du Vieux Rhin 141

1. Eléments bibliographiques 141
1.1. L'affinement granulométrique longitudinal 141
1.2. La stratification verticale : armure et pavage 143
2. Caractérisation du patron longitudinal d'affinement du Vieux Rhin 145
2.1. Matériel et méthodes 145
2.1.1. Choix des sites échantillonnés 145
2.1.2. Choix de la méthode d'échantillonnage 146
2.2. Résultats 148
2.2.1. Modèle d'affinement longitudinal observé 148
2.2.2. Recherche des facteurs de contrôle de l'affinement 149
3. Caractérisation du degré de pavage du lit 150
3.1. Matériel et méthodes 150
3.1.1. Choix des sites échantillonnés 150
3.1.2. Choix de la méthode d'échantillonnage 150
3.1.3. Description de l'échantillonnage volumétrique 150
3.2. Résultats 151

E/ Analyse du fonctionnement sédimentaire récent du Vieux Rhin (1990-2010) 154

1. Matériel et méthodes 154
1.1. Justification de la démarche retenue 154
1.2. Quantification des entrées sédimentaires 155
1.2.1. Apports sédimentaires issus de l'amont et des affluents 155
1.2.2. Apports sédimentaires issus des érosions latérales 156
1.2.3. Apports sédimentaires issus de l'incision du lit 156
1.3. Quantification du stockage sédimentaire 157
1.3.1. Stockage sédimentaire dans le lit mineur 157
1.3.2. Stockage sédimentaire sur les marges 157
2. Résultats 158

F/ Synthèse et discussion générale 160

1. La trajectoire temporelle d'évolution du Vieux Rhin depuis le 19ème siècle 160
1.1. L'évolution morphologique de l'hydrosystème fluvial entre 1828 et 1925 160
1.1.1. Une incision dans le lit corrigé qui contrôle l'assèchement de l'hydrosystème 160
1.1.2. Un prolongement d'une trajectoire temporelle naturelle ? 162
1.2. L'évolution morphologique du Vieux Rhin entre 1930 et 2011 163
1.2.1. L'héritage de la correction et de la régularisation 163

1.2.2. Les logiques spatio-temporelles et les liens de causalité entre les processus 164
1.3. Le bilan des changements morphologiques depuis le 19ème siècle 166
1.4. La caractérisation de la trajectoire temporelle d'évolution du Vieux Rhin 168
2. Les implications pour la restauration du Vieux Rhin 169

Chapitre 3

Géomorphologie expérimentale - Suivi géomorphologique de l'expérience de recharge sédimentaire du Vieux Rhin 173

A/ Eléments bibliographiques sur les recharges sédimentaires et leurs suivis scientifiques 175

1. Des exemples d'opérations de recharge sédimentaire 175
2. Le suivi scientifique des recharges sédimentaires 178
2.1. Définition des structures de suivi 178
2.2. Exemples de suivis géomorphologiques de recharges sédimentaires 180

B/ L'expérience de recharge sédimentaire du Vieux Rhin 182

1. Les enjeux et les questionnements de la recharge expérimentale 182
2. La mise en œuvre de la recharge expérimentale 183
3. La mise en œuvre du suivi géomorphologique 186
3.1. La structure thématique du suivi et les objectifs 186
3.2. Les structures temporelle et spatiale du suivi 188
3.3. Les méthodes de suivi mises en œuvre 189
3.3.1. Suivi par imagerie aérienne 189
3.3.2. Suivi par mesures topographiques et bathymétriques 190
Acquisition des données 190
Traitement des données et précision des levés 191
3.3.3. Suivi par traçage sédimentaire 192
Eléments bibliographiques sur le traçage de particules 192
Principes méthodologiques des transpondeurs passifs (PIT tags) 193
Utilisation des transpondeurs passifs pour le suivi de la recharge expérimentale 195
3.3.4. Suivi granulométrique 199
Eléments bibliographiques sur les structures spatiales d'échantillonnage granulométrique 199
Développement d'une méthode pour le suivi granulométrique de la recharge 202

C/ Résultats du suivi géomorphologique de la recharge expérimentale 205

1. Analyse de l'influence de la recharge sur la géométrie du lit 205
1.1. Résultats de l'imagerie 205
1.2. Résultats des mesures topographiques et bathymétriques 206
2. Analyse du transport des particules introduites 211
2.1. Taux de détection des traceurs 211
2.2. Distances et trajectoires de déplacement des traceurs 213
2.3. Distances de déplacement et taille des particules 214
2.4. Logiques spatiales de déplacement des traceurs 215
2.4.1. Influence de la position latérale initiale sur le déplacement 216
2.4.2. Influence de la position longitudinale initiale sur le déplacement 216
3. Analyse de l'influence de la recharge sur la taille du substrat 217

3.1. Caractérisation du sédiment injecté 218
3.2. Evaluation des variations granulométriques avant-après recharge 218
3.3. Comparaison des deux méthodes d'échantillonnage granulométrique 219

D/ Synthèse et discussion sur le suivi géomorphologique de la recharge expérimentale ... 222

1. Les apports scientifiques et méthodologiques du suivi 222
1.1 L'intérêt de l'imagerie aérienne et des mesures *in situ* 222
1.1.1. Les apports du suivi de la géométrie du lit et du transport solide 222
1.1.2. Les apports du suivi du substrat 224
1.2. L'intérêt de la modélisation hydraulique 225
2. Les apports opérationnels du suivi 226

E/ Vers l'élaboration d'indicateurs pour l'évaluation de la restauration du Vieux Rhin ... 230

1. Eléments bibliographiques sur les indicateurs d'évaluation 230
1.1. Définitions 230
1.2. Catégories d'indicateurs d'évaluation utilisés en restauration 231
1.3. Modes d'utilisation d'indicateurs dans un projet de restauration 232
2. Proposition d'indicateurs d'évaluation pour la restauration du Vieux Rhin 234
2.1. Rappel des objectifs de la restauration du Vieux Rhin 234
2.2. Proposition d'indicateurs physiques d'évaluation de la restauration 236

Conclusion générale

A/ La trajectoire temporelle d'évolution d'un tronçon fluvial anthropisé et les implications pour la gestion 241

B/ Le retour d'expérience apporté par le suivi géomorphologique de la recharge sédimentaire 243

C/ Les perspectives 245

Bibliographie 249
Liste des figures 268
Liste des tableaux 275
Résumé 278
Résumé 280

Préambule

A/ Contexte de recherche

Ce travail a été réalisé au sein de l'UMR 5600 EVS du CNRS. L'intérêt d'une thèse de géomorphologie appliquée à la restauration d'un tronçon fluvial aménagé - le Vieux Rhin en aval du barrage de Kembs – a vu le jour dans le contexte de deux projets démarrés en 2009 : le projet INTERREG « Redynamisation du Vieux Rhin » (Piégay *et al.*, 2009, 2010), lancé par la Région Alsace et réunissant une vingtaine d'équipes de recherche et de gestionnaires français et allemands, sous la coordination scientifique de l'UMR 5600 ; le projet « Erosion maitrisée » (Piégay *et al.*, 2010 ; Clutier *et al.*, 2012), lancé par EDF dans le cadre du renouvellement de concession de l'aménagement hydro-électrique de Kembs et faisant l'objet d'une convention avec l'UMR 5600. Ces programmes, complémentaires, évaluent les possibilités de restaurer le transport solide et la dynamique latérale, afin d'améliorer les fonctionnalités morphologiques et écologiques favorables à la biodiversité dans le Vieux Rhin.

Pour répondre à une problématique de restauration des processus sédimentaires d'un tronçon fluvial dégradé par des interventions humaines, nous avons choisi, dans ce travail de thèse, d'explorer deux composantes de la géomorphologie fluviale : l'approche historique et l'approche expérimentale.

D'une part, la **géomorphologie historique** est la composante fondamentale de la discipline, qui interprète les formes et les processus actuels à la lumière des héritages du passé (Bravard, 1998). Une démarche rétrospective est souvent essentielle pour comprendre le fonctionnement des systèmes fluviaux et optimiser leur gestion actuelle et future : elle permet d'identifier les effets morphologiques et écologiques des activités humaines, de documenter les patrons naturels d'évolution, de déterminer la sensibilité aux grandes crues (Gurnell *et al.*, 2003). Les changements sont mis en évidence à une échelle pluri-décennale à pluri-centennale en couplant diverses sources d'information : principalement des photographies aériennes (Gilvear *et al.*, 1997 ; Surian, 1999 ; Winterbottom et Gilvear, 2000), des cartes anciennes (Peiry, 1987 ; Bravard et Bethemont, 1989 ; Gurnell *et al.*, 1994 ; Hohensinner *et al.*, 2004), des levés topographiques (Arnaud-Fassetta, 2003 ; Landon, 1999), ou encore des données sédimentologiques (Miramont *et al.*, 1998 ; Arnaud-Fassetta *et al.*, 2003 ; Rollet, 2007) voire dendrochronologiques (Dufour, 2005).

La géomorphologie historique s'intéresse aux interactions entre les différents compartiments de l'hydrosystème, et recherche les facteurs de contrôle à des niveaux scalaires emboités. La prise en compte de la double sphère temporelle et spatiale est souvent présentée comme une spécificité de la géomorphologie fluviale, qui la distingue traditionnellement de l'autre discipline traitant des cours d'eau, l'ingénierie hydraulique (Bravard, 1998).

D'autre part, la **géomorphologie expérimentale** est une composante plutôt nouvelle et « appliquée » de la discipline, qui est apparue avec la restauration des cours d'eau. Une approche expérimentale se révèle en effet primordiale dans les projets engagés récemment sur les grands fleuves (ex. : Colorado : Schmidt, 2012 ; Danube : Jungwirth, 2012 ; Rhône : Cotillon et Piégay,

2012 ; Rhin : Schmitt, *et al.*, 2012), où sont recherchées conjointement l'amélioration de la qualité écologique du milieu, la préservation de la sécurité des biens et des personnes et la pérennité des usages actuels. Dans ce contexte multi-enjeux, une notion clé émerge, celle de **risques** potentiels liés à la manipulation du compartiment physique (érosions latérales non contrôlées, modification des conditions d'écoulement et aggravation des inondations…), en d'autres termes les **gains et pertes** pouvant résulter de la restauration (Gaeuman, 2012). Ces aspects justifient de procéder à des expérimentations grandeur nature afin d'évaluer la pertinence des actions et adapter les restaurations futures (Habersack *et al.*, 2008). L'utilisation de modèles numériques et/ou physiques est également de plus en plus préconisée afin d'éclairer les décideurs quant au choix des scénarios de restauration.

La géomorphologie expérimentale revient à transposer *in situ* une démarche ordinairement cantonnée à la modélisation du transport solide en laboratoire (Meyer-Peter et Müller, 1948 ; Einstein, 1950 ; Rickenmann, 1991, cités par Recking *et al.*, 2012). Le **suivi scientifique** de l'expérience implique la collecte de données sur le terrain, qui constitue une véritable tradition en géomorphologie (Wohl, 2012). Ces données sont utiles pour améliorer la capacité prédictive des modèles, leur calibration ne reposant ainsi plus uniquement sur des essais en canal artificiel, mais sur des observations en conditions naturelles (Rollet, 2007). En retour, les travaux de modélisation permettent d'accéder à des données quantifiées sur la configuration des écoulements en crue, ce patron hydraulique étant difficilement mesurable sur le terrain, mais primordial pour étudier le transport solide (Chapuis, 2012). Finalement, l'approche expérimentale développée dans le domaine de la restauration des cours d'eau croise les outils des géomorphologues et des hydrauliciens, ce qui tend à atténuer la frontière qui a pu exister entre les disciplines et à favoriser de plus en plus de travaux en partenariat.

Les deux approches géomorphologiques explorées dans cette thèse visent **un objectif à la fois scientifique et opérationnel**. Sur le plan scientifique, notre travail propose de progresser dans la compréhension de la trajectoire temporelle d'ajustement d'un tronçon fluvial aménagé, en recherchant les réponses morphologiques aux pressions anthropiques et en précisant leurs dimensions spatiales et temporelles. En outre, l'opération de recharge sédimentaire que nous avons suivie est une expérience scientifique en soi, qui permet d'enrichir les connaissances actuelles sur les processus de transport solide. Sur le plan opérationnel, le dialogue avec les gestionnaires autour des résultats du suivi est fondamental pour évaluer l'efficacité de l'opération et aider à élaborer des scénarios de restauration à plus large échelle. Les pratiques futures bénéficieront également de la mise en perspective apportée par la reconstitution de la trajectoire temporelle d'évolution du tronçon fluvial.

B/ Organisation générale de la thèse

Ce manuscrit est organisé en trois chapitres, hormis ce préambule et la conclusion générale (fig. 1.1).

Le premier chapitre présente le **cadre thématique et géographique** du travail de recherche. Il comprend :

1. un état de la question concernant les impacts des activités humaines sur la morphologie et l'écologie des cours d'eau, ainsi que les perspectives de gestion offertes par la restauration ;
2. une formulation, à partir de cette synthèse, de la problématique de recherche ;
3. une présentation du tronçon fluvial étudié, le Rhin entre Kembs et Breisach, notamment le contexte historique de son aménagement et le contexte opérationnel de sa restauration.

Le second chapitre aborde l'**évolution morphologique du Vieux Rhin depuis le 19ème siècle**. La trajectoire temporelle d'ajustement est analysée, pour aider notamment à déterminer la sensibilité et la réactivité du tronçon aux futures actions de restauration.

Le troisième chapitre porte sur le **suivi géomorphologique d'une expérience d'introduction artificielle de charge grossière dans le Vieux Rhin**. Les risques et les bénéfices environnementaux sont analysés, et des indicateurs de suivi sont proposés pour évaluer les effets de futures opérations.

La conclusion générale synthétise finalement les éléments de connaissance apportés par les approches historique et expérimentale, afin de formuler des **propositions de restauration** sur le long terme et appliquée plus largement sur le tronçon.

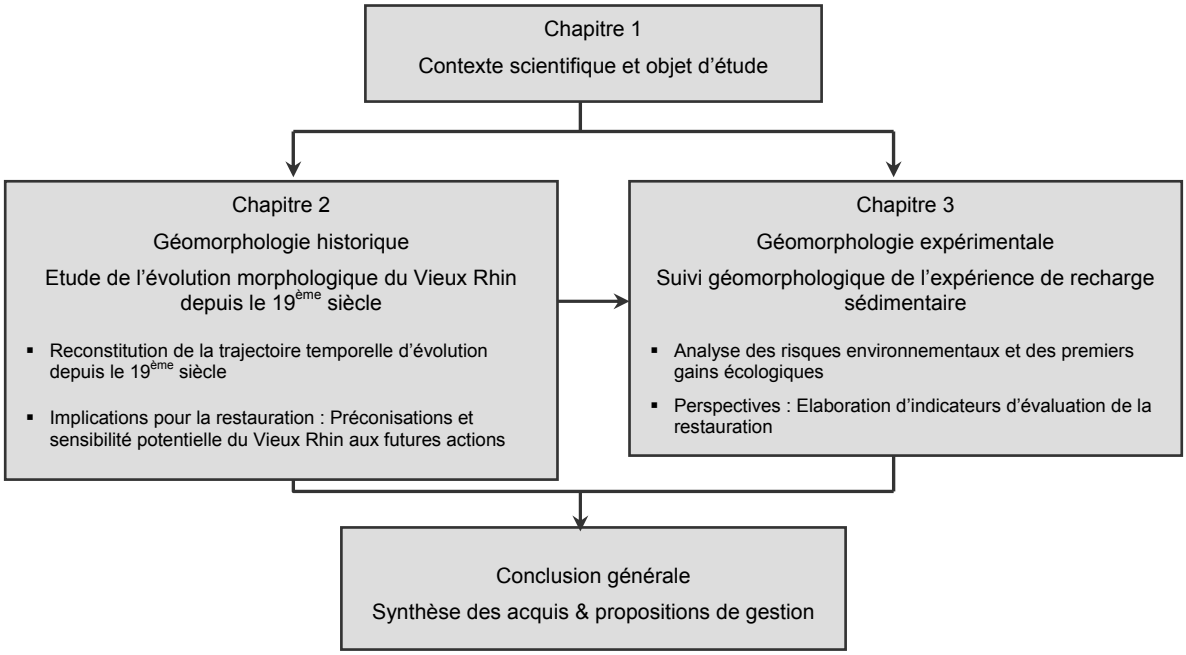


Figure 1.1 : Organisation générale du manuscrit

Chapitre 1

Contexte scientifique et objet d'étude

Nous définissons dans ce chapitre les cadres thématiques et géographiques dans lesquels s'inscrit ce travail de thèse. Les pressions anthropiques exercées sur les hydrosystèmes fluviaux ainsi que leurs impacts environnementaux sont d'abord présentés. Puis, les nouveaux modes de gestion permettant d'améliorer l'état morphologique et écologique des cours d'eau sont abordés. Nous mobilisons deux approches géomorphologiques - historique et expérimentale - pour répondre à une problématique de restauration écologique d'un tronçon fluvial fortement anthropisé. Nous appuyons notre recherche sur le cas du Vieux Rhin, un tronçon de 50 km localisé entre Kembs et Breisach (France, Allemagne) et perturbé par des activités humaines depuis près de deux siècles.

A/ Cadre thématique

1. L'anthropisation des cours d'eau : pressions et impacts environnementaux

1.1. Les pressions anthropiques en général

L'Homme implanté près des cours d'eau en exploite les nombreuses ressources (eau, nourriture, graviers, potentiel hydro-électrique, voie navigable, aspects récréatifs…) tout en se protégeant des risques inhérents à ces environnements fluviaux (inondations, érosions latérales, pollutions, maladies…) (Downs et Gregory, 2004). L'intensité et la nature des pressions exercées sur les cours d'eau ont considérablement évolué à travers l'histoire, depuis les *« sociétés hydrauliques »* du Proche-Orient et de la Chine en activité il y a près de 5 000 ans (Wittfogel, 1956, cité par Downs et Gregory, 2004 ; Gregory, 2006).

Les **pressions indirectes** portent sur l'occupation des sols et sur la structure du réseau de drainage du bassin versant. Ces paramètres déterminent les flux liquides et solides qui parviennent jusqu'au cours d'eau et façonnent la dynamique fluviale (Grosprêtre, 2011). L'urbanisation est ainsi devenue l'une des principales sources de perturbation anthropique des systèmes fluviaux depuis les années 1950 (Chin, 2006). Les **pressions directes** affectent le lit mineur et les berges. Il en existe trois types (Wasson *et al.*, 1998) :

- *l'entretien* : élimination de la végétation, nettoyage du bois mort… ;
- *les terrassements :* extractions, curage, recalibrage, rectification, reprofilage ;
- *les ouvrages* : barrages, seuils, épis, endiguements, protections de berges.

Les cours d'eau ont le plus souvent été aménagés en combinant plusieurs de ces techniques. La chenalisation regroupe par exemple une variété d'opérations : curage, recalibrage, rectification, reprofilage, endiguements, protections de berges, entretien (Brookes, 1988). Ces interventions composites ont couramment été entreprises dans les projets d'aménagement à buts multiples qui ont vu le jour durant la première moitié du 20ème siècle dans certains grands bassins fluviaux mondiaux, par exemple sur la Tennessee River (Etats-Unis) et la Yellow River (Chine) pour la protection contre les inondations, la navigation et la production hydro-électrique (Downs et Gregory, 2004).

Le **Rhin supérieur**, objet de la présente thèse, a été aménagé dès le 19ème siècle, comme la plupart des grands axes fluviaux européens (Danube, Rhône…). Il a subi des phases successives de chenalisation, de construction d'épis et de barrages. Nous présentons plus en détail ces trois types de travaux.

1.2. Les travaux en rivière

1.2.1. La chenalisation

La chenalisation concerne tous les aménagements qui modifient le tracé en plan, la section en travers ou la pente, et qui visent ou aboutissent directement ou indirectement à une **accélération des écoulements** (Wasson *et al.*, 1998). Cette intervention a été utilisée dans le passé principalement pour augmenter la débitance et protéger les terrains riverains contre les inondations. Elle a également souvent été entreprise pour améliorer la navigabilité, fixer les berges ou assécher les terrains pour l'agriculture, l'industrie et le développement urbain (Brookes, 1988).

Les digues sont l'élément structurant de la plupart des travaux de chenalisation. Ouvrages longitudinaux s'opposant au passage de l'eau, leur première construction remonte à 4 000 ans, quand un ancien bras du Nil a été aménagé en canal afin d'irriguer des cultures (Bethemont, 2000). Les grands travaux de chenalisation des plaines alluviales européennes ont eu lieu essentiellement au 19ème siècle. La plupart des rivières alpines et périalpines adoptait alors un style en tresses, résultant à la fois de la détérioration climatique du Petit Age Glaciaire (1550-1850) et de la forte pression agro-pastorale exercée sur les bassins montagnards, ces facteurs ayant augmenté les débits liquides et accru la charge sédimentaire fournie par les processus de versants (Bravard et Peiry, 1993). Les travaux ont consisté à concentrer les eaux du lit majeur, parfois large de plusieurs kilomètres, en un chenal unique entre des digues de hautes et de basses eaux distantes de quelques centaines de mètres. Le Danube (Hohensinner *et al.*, 2004), le Rhône (Poinsard et Salvador, 1993) et ses affluents, Drôme, Durance, Isère, Arve (Bravard et Peiry, 1993), ont ainsi été chenalisés, au même titre que le **Rhin supérieur** (Humbert et Descombes, 1985).

1.2.2. Les épis

Les épis sont des ouvrages transversaux, ancrés dans la berge et barrant une partie du lit mineur. Leur fonction est de **modifier les conditions d'écoulement** (Degoutte, 2006). Sur l'Elbe (Allemagne) et la Waal (delta du Rhin), les premiers épis ont été construits aux 15ème et 16ème siècles pour favoriser la sédimentation dans des secteurs où les écoulements divergeaient, et ainsi gagner des terres agricoles (Weitbrecht, 2004 ; Middelkoop, 1997). Les épis peuvent également servir à protéger une berge de l'érosion (Degoutte, 2006).

Sur les grands axes fluviaux européens, ces ouvrages ont principalement été employés pour **améliorer la navigabilité**. Par exemple, le profil en long du Rhône a été régularisé en adoptant un système de digues et de tenons (épis reliant les digues à la berge), puis en construisant les « casiers Girardon », combinant digues, tenons, épis noyés, plongeants et seuils de fond (épis noyés prolongés jusqu'à la berge opposée) (Poinsard et Salvador, 1993). La méthode intégrait les lois empiriques établies par Fargue sur la Garonne (Jamme, 1969). Ces techniques ont ensuite servi de modèle pour l'aménagement de la Loire (Olivier, 2004) et du **Rhin supérieur** au début du 20ème siècle (Humbert et Descombes, 1985).

Les épis sont des ouvrages au fonctionnement et à la conception complexes. Plusieurs types de structures existent, et leur classification peut reposer sur différents critères (Jamme, 1969 ; Przedwojski *et al.*, 1995, cités par Yossef, 2005) :

- *la technique et les matériaux de construction :* les épis sont fabriqués en enrochements, graviers, sable, gabions ou bois. Leur hauteur (épis noyés ou émergés dans des conditions normales) et leur structure (épis pleins ou perméables) diffèrent selon l'effet recherché sur l'écoulement et selon le mode de transport des sédiments ;
- *la forme en plan et l'inclinaison :* les épis peuvent être droits, en crosse, en « T », et construits perpendiculairement ou inclinés par rapport à la berge. Ceux pointant vers l'aval tendent à attirer les écoulements vers eux, et ceux pointant vers l'amont dévient le courant vers le chenal ;
- *la longueur et l'espacement* : ces deux critères dépendent de la largeur du lit, de la position de l'épi et de la contraction du chenal souhaitée. Ils définissent le ratio d'aspect (longueur de l'épi / espacement entre deux épis), paramètre important qui détermine le patron hydrodynamique entre et à proximité des ouvrages (Weitbrecht, 2004).

1.2.3. Les barrages

Ouvrages transversaux barrant totalement le lit mineur, les premiers barrages ont été implantés en Egypte il y a 5 000 ans (Bethemont, 2000). Leur construction s'est peu à peu répandue dans toutes les régions du monde et s'est multipliée au siècle dernier, en particulier depuis les années 1950 : alors que le nombre de grands barrages[1] était estimé à 427 en 1900, il était de 5 268 en 1950, et il dépassait 45 000 en 1998, les ouvrages étant répartis dans 140 pays (Brandt, 2000 ; WCD, 2000). La France se classe au dixième rang mondial (569 grands barrages) et est le second constructeur européen après l'Espagne (WCD, 2000).

Les barrages sont généralement construits pour assurer une ou plusieurs fonctions, qu'il s'agisse de l'irrigation des terres agricoles, l'alimentation en eau potable, la régulation des débits, la production hydro-électrique, la dérivation des eaux dans un canal ou vers un autre bassin versant, la régulation du tirant d'eau pour la navigation, le contrôle des flux de sédiments ou encore la création d'un plan d'eau pour les loisirs (Brandt, 2000 ; *www.barrages-cfbr.eu*).

Pour la production hydro-électrique, (cas de l'aménagement de Kembs sur le Rhin), les barrages sont communément classés selon la hauteur de la chute H et la position sur le linéaire hydrographique, avec présence ou non d'un réservoir. Nous pouvons ainsi distinguer trois catégories (Bethemont, 2000 ; Viollet, 2010) :

- *les barrages de haute chute ($H > 200$ m)* sont implantés en tête de bassin. Une conduite forcée prélève l'eau dans un lac ou depuis un captage en altitude, et l'achemine jusqu'à l'usine

[1] Un grand barrage est un ouvrage mesurant plus de 15 m de haut, ou mesurant entre 5 et 15 m et retenant plus de 3 millions de m^3 d'eau (WCD, 2000).

située en fond de vallée. Les aménagements de la Grande Dixence (Suisse) et des chutes Churchill (Canada) sont des exemples de haute chute ;

- *les barrages de moyenne chute (40 m < H < 200 m)* sont le plus souvent construits sur le cours moyen des rivières. Un ouvrage barre le lit et crée un réservoir en son amont. Les barrages Hoover sur le Colorado (Etats-Unis), Itaïpu sur le Parana (Paraguay) et Trois-Gorges sur le Yangtze (Chine) sont des ouvrages de moyenne chute ;

- *les barrages de basse chute (H < 40 m)* sont implantés sur le cours inférieur des rivières et des grands fleuves navigables. Les contextes topographiques (larges plaines et faibles dénivelées) et humains (fortes densités de population) ne permettent généralement pas de construire un grand réservoir. Cette configuration **« au fil de l'eau »**, sans possibilité de stockage, entraine une dépendance marquée vis-à-vis des variations de débit. De fait, ces ouvrages sont le plus souvent des **barrages mobiles**, constitués de vannes qui font transiter les crues et permettent de maintenir un tirant d'eau constant pour la navigation et la production hydro-électrique (*www.barrages-cfbr.eu*). L'aménagement **en dérivation** permet de pallier à l'absence de réservoir (Tricart et Bravard, 1991 ; Bethemont, 2000) : le barrage relève le tirant d'eau en amont, et alimente un canal d'amenée sur lequel sont implantées l'usine et les écluses. Le débit turbiné est ensuite restitué au cours d'eau par un canal de fuite. Des ensembles en dérivation ont été mis en place sur le Rhône du lac Léman à la mer (Tricart et Bravard, 1991), sur la Durance en aval du lac de Serre-Ponçon (Warner, 2000) et sur le **Rhin supérieur** entre Kembs et Strasbourg (Humbert et Descombes, 1985). Le **Vieux Rhin**, objet de cette thèse, constitue un tronçon court-circuité de 50 km de long (fig. 1.2).

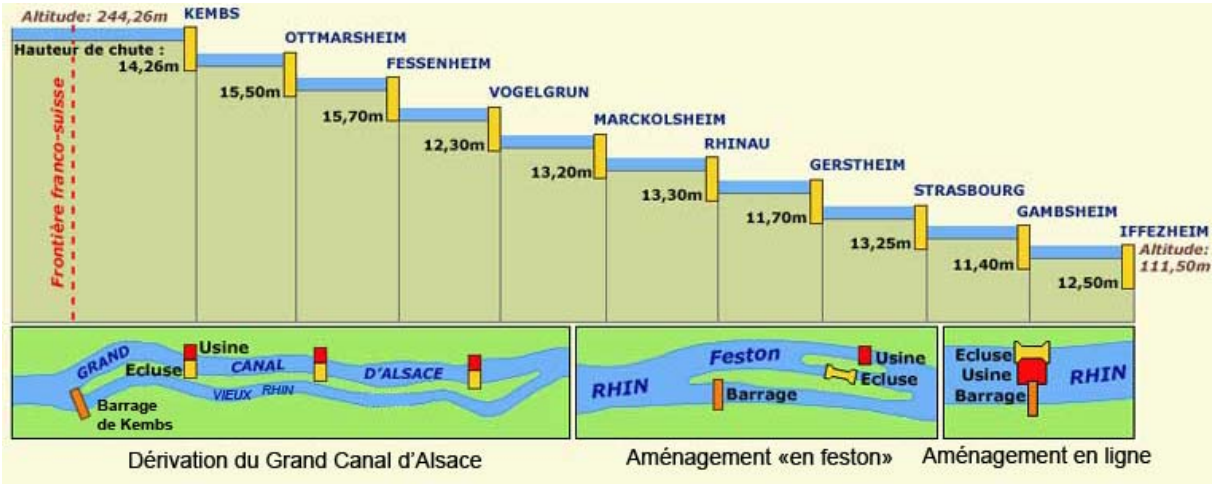


Figure 1.2 : Aménagement hydro-électrique du Rhin supérieur entre Kembs et Iffezheim : huit usines sont implantées en dérivation et deux usines sont implantées en ligne (d'après *www.encyclopedie.bseditions.fr*)

1.3. Les impacts morphologiques de ces travaux

1.3.1. Bases théoriques du fonctionnement des cours d'eau

Définitions

En géomorphologie fluviale et en écologie, le cours d'eau est le plus souvent appréhendé en s'appuyant sur deux concepts complémentaires (fig. 1.3) :

1. **le système fluvial** (Schumm, 1977), qui décrit les transferts longitudinaux d'eau et de sédiments dans le bassin versant. Il est divisé en trois zones, au sein desquelles coexistent les processus d'érosion, de transport et de dépôt : la *zone de production*, où en termes de bilan l'érosion l'emporte sur le dépôt, la *zone de transfert*, où les deux processus s'équilibrent, et la *zone de stockage*, où le dépôt l'emporte sur l'érosion (Church, 2002) ;
2. **l'hydrosystème fluvial** (Roux, 1982 ; Amoros et Petts, 1993), sous-ensemble du système fluvial, qui appréhende les échanges et les interactions dans quatre dimensions : *longitudinale* (de l'amont vers l'aval), *latérale* (entre le lit mineur et la plaine alluviale), *verticale* (entre le chenal et la nappe d'accompagnement) et *temporelle*. Les diverses **connectivités écologiques** (Amoros et Roux, 1988, cités par Muhar et Jungwirth, 1998) qui régissent un hydrosystème fluvial impliquent des flux d'eau, de sédiments, d'énergie, de substances nutritives, de détritus ainsi que le transit passif ou actif d'organismes vivants. Ces flux sont bidirectionnels et peuvent être étudiés à des niveaux scalaires emboîtés.

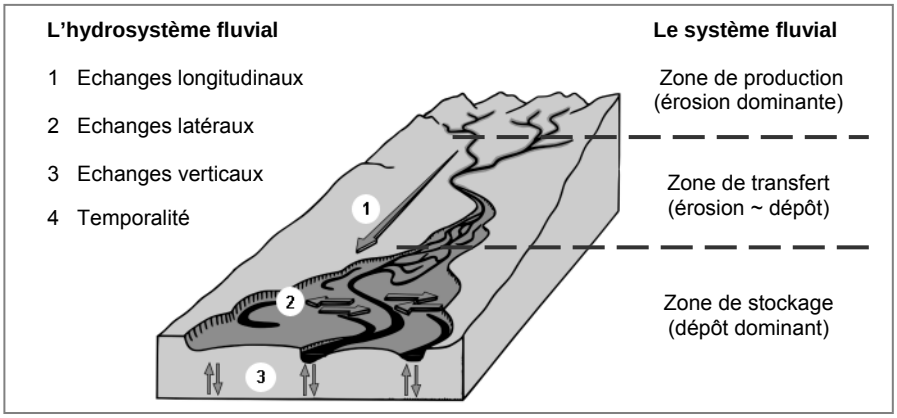


Figure 1.3 : Emboîtement schématisé de l'hydrosystème fluvial dans le système fluvial (d'après Amoros et Petts, 1993 ; Rollet, 2007 ; Morandi et Piégay, 2012)

Principes de fonctionnement du système fluvial

La dynamique du système fluvial est le résultat d'une combinaison de variables hiérarchisées agissant dans un jeu complexe de « processus-réponses » (Schumm, 1977) : les caractéristiques morphologiques (largeur, pente, sinuosité…) sont placées sous le contrôle des débits liquides et solides transitant dans le système, eux-mêmes dépendant de variables dominantes que sont le relief, la géologie, le climat et l'occupation du sol au sein du bassin versant (fig. 1.4).

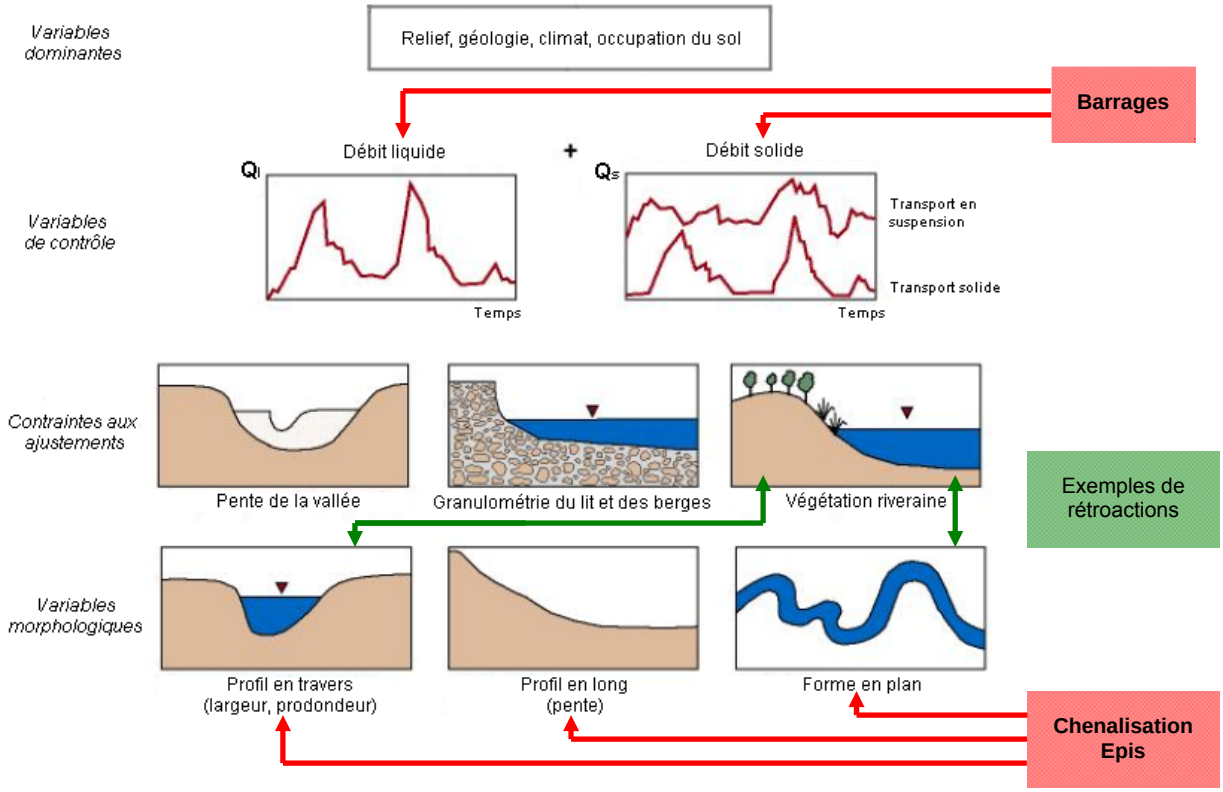


Figure 1.4 : Exemples d'interactions entre les variables hiérarchisées du système fluvial et les actions anthropiques (modifié d'après Thorne, 1997 et Bledsoe, 2010)

D'autres facteurs interviennent, tels que la pente de la vallée, la granulométrie du fond et des berges et la végétation riveraine. Certains auteurs (Petts, 1979 ; Thorne, 1997) ont décrit ces facteurs comme des « contraintes aux ajustements », car ils ont la capacité de limiter ou de favoriser les ajustements morphologiques induits par la modification des variables de contrôle. Par exemple, la végétation qui s'implante sur les berges participe à limiter la mobilité latérale et à réduire la largeur du lit mineur (Thorne, 1997). D'autres auteurs (Liébault et Piégay, 2002 ; Dufour, 2005) ont étudié les effets rétroactifs sur les contraintes aux ajustements : sur des cours d'eau des Alpes du Sud, il a été observé que l'enfoncement du lit peut entrainer le « perchement » des bancs latéraux, étant alors moins fréquemment inondés et donc plus facilement colonisables par la végétation pionnière. Celle-ci agit à son tour sur la morphologie en rétractant la bande active, ce qui peut avoir pour effet d'aggraver l'incision en cours.

En somme, le système fluvial se présente comme un **ensemble complexe d'interactions et de rétroactions** entre les variables le composant (fig. 1.4, flèches vertes), dans une logique d'**équilibre dynamique**, état moyen autour duquel les variables oscillent (Schumm, 1977 ; Knighton, 1984).

L'équilibre du système fluvial est classiquement formulé par la **balance de Lane** (1955) : elle relie la fourniture sédimentaire (débit solide Q_s, granulométrie D) à la puissance fluviale (débit liquide Q_l, pente I) capable de l'évacuer (fig. 1.5, a). Dans un tronçon en équilibre, les sédiments pénétrant dans le système sont transportés vers l'aval sans phénomène significatif de **dépôt**

(*aggradation*) ou d'**érosion** (*degradation*). En revanche, une perturbation de l'une ou plusieurs des variables est susceptible d'affecter cet équilibre durablement, et de façon parfois irréversible (Simon et Darby, 1999).

Compte-tenu de son influence croissante au cours de l'histoire, l'Homme est à intégrer dans le schéma de fonctionnement du système fluvial (fig. 1.4, flèches rouges et fig. 1.5, b). Les variables affectées diffèrent selon les aménagements : les barrages exercent un effet sur les débits liquides et solides, tandis que la chenalisation et l'implantation d'épis impactent directement les variables morphologiques.

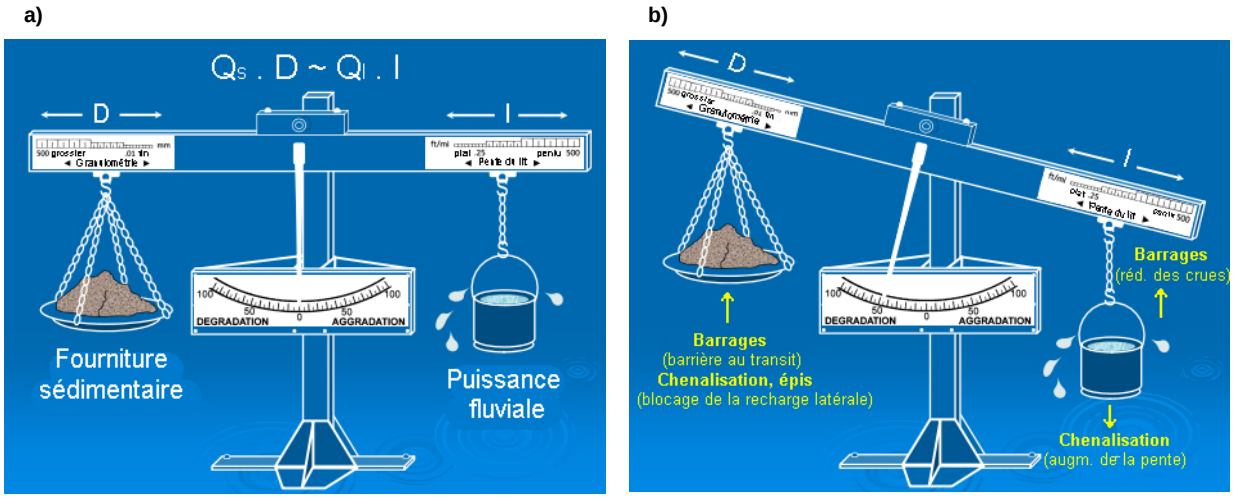


Figure 1.5 : a) Balance de Lane illustrée par Borland (1960). b) Déséquilibre de la balance avec l'anthropisation des cours d'eau (modifié d'après Bledsoe, 2010)

Nous présentons ci-après les impacts morphologiques spécifiques aux trois types de travaux en rivière.

1.3.2. Les impacts de la chenalisation

La rectification, souvent rencontrée dans les travaux de chenalisation, a pour effet direct de diminuer la longueur développée du cours d'eau : sur le cours inférieur du Mississippi (Etats-Unis), 16 coupures de méandres ont raccourci le fleuve de 243 km dans les années 1920-1940 (Smith et Winkley, 1996) ; sur le cours moyen du Yangtze, 3 rectifications ont supprimé 78 km dans les années 1970 (Li *et al.*, 2007). En conséquence, la pente augmente, ce qui accroit les forces tractrices et la puissance fluviale, et fait pencher la balance vers une **incision**.

Contrairement aux érosions du fond du lit (*scour)*, qui sont limitées spatialement et temporellement, l'incision désigne un enfoncement généralisé, pouvant durer plusieurs décennies et étant susceptible d'affecter toute une partie du réseau hydrographique (Galay, 1983 ; Simon et Darby, 1999). Sur le Mississippi, Hudson *et al.* (2008) ont mesuré sur deux tronçons chenalisés de 100 km chacun et sur une période de 14 ans, une incision moyenne de 3,5 m et 6 m, et supérieure à 10 m localement. En complément, la purge du chenal est souvent accentuée par

l'artificialisation des berges, qui supprime les possibilités de recharge par érosion latérale (Peiry, 2003).

Le basculement du profil en long consécutif à une rectification s'étend classiquement au-delà du tronçon aménagé : l'incision progresse vers l'amont par **érosion régressive**, et les matériaux prélevés sont déposés en aval (Brookes, 1988). Robbins et Simon (1983) (cités par Simon et Rinaldi, 2006) ont mis en évidence ce patron sur une rivière du Tennessee (fig. 1.6) : un recalibrage et une rectification ont été opérés en 1967, entre la confluence et une station de jaugeage implantée en amont. L'érosion a progressé jusqu'à une deuxième station en 1970, et a atteint une troisième station, à 21 km en amont du site aménagé, au milieu des années 1970. Le chenal incisé au droit de la première station s'est peu à peu exhaussé, avec l'arrivée des sédiments érodés depuis l'amont.

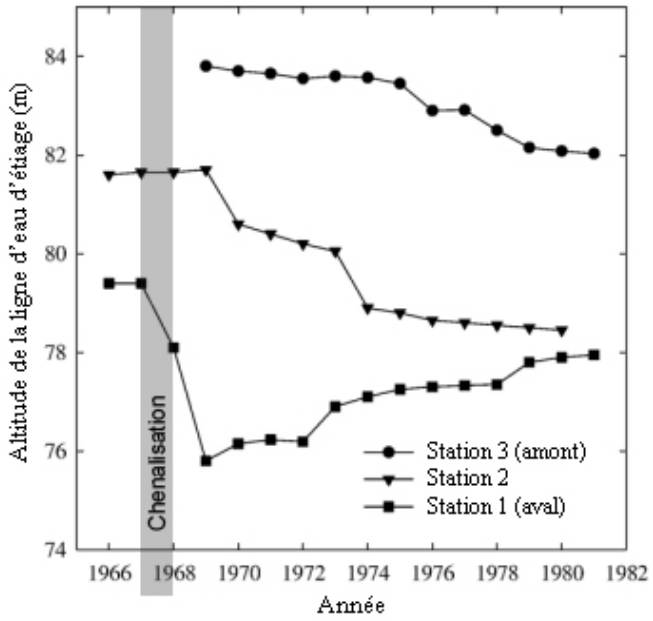


Figure 1.6 : Evolution de la ligne d'eau d'étiage sur la South Fork Forked Deer River : la chenalisation a été réalisée entre la confluence et la station 1 en 1967-68. La station 3 se trouve à 21 km en amont de la station 1 (Robbins et Simon, 1983, d'après Simon et Rinaldi, 2006)

1.3.3. Les impacts des épis

Les épis ont pour effet de modifier la magnitude et la direction des écoulements entre et à proximité des ouvrages, ce qui induit une géométrie spécifique de ces tronçons aménagés (Weitbrecht, 2004) : l'écoulement ralentit entre les épis, ce qui favorise le développement de **plages de dépôt entre les ouvrages**, tandis que la contraction du chenal accroit les forces tractrices et provoque une **incision du lit**. Sur la Waal, Ten Brinke *et al.* (2001, 2004) ont montré que ces deux processus sont liés, les matériaux déposés sur les marges provenant en partie de l'incision du fond.

Le ralentissement des écoulements tend à privilégier le **dépôt des fractions les plus fines** entre les épis, les fractions grossières restant en transit dans le chenal, en accord avec les travaux de

Hjulström (1935) décrivant les phases de transport, d'érosion et de sédimentation en fonction de la taille des particules et de la vitesse du courant. En effet, le lit de la Waal est composé de sables grossiers (D_{50} entre 0,5 et 4 mm), tandis que les champs d'épis sont constitués de sables plus fins (D_{50} entre 0,35 et 0,4 mm) (Ten Brinke *et al.*, 2004). Schwartz et Kozerski (2003) ont également identifié deux cortèges granulométriques entre les épis de l'Elbe : des sables fins et grossiers dans les secteurs où la vitesse moyenne est supérieure à 10 cm/s, et des boues dans les autres secteurs. La majeure partie de la bibliographie sur les épis concerne les lits sableux, cependant nous supposons que ce phénomène de dépôt sélectif puisse s'appliquer aux lits graveleux tels que le Vieux Rhin.

Enfin, Yossef et De Vriend (2010) ont modélisé en canal le comportement morphologique d'une section à épis. Les auteurs ont estimé que l'évolution sur le long terme serait un **comblement total des champs d'épis**. Les facteurs susceptibles d'inverser cette tendance seraient le rayon de courbure et les effets de rétroaction entre processus morpho- et hydrodynamiques. La colonisation végétale constitue par ailleurs un mécanisme pouvant accélérer le processus de comblement. Dans les sections court-circuitées du Rhône, la végétalisation des « casiers Girardon » émergés a en effet conduit à une accrétion de ces secteurs, par piégeage des sédiments fins (Raccasi, 2008).

1.3.4. Les impacts des barrages

Les effets morphologiques des barrages ont fait l'objet de plusieurs synthèses scientifiques au cours de ces 30 dernières années (Petts, 1979 ; Williams et Wolman, 1984 ; Kondolf, 1997 ; Brandt, 2000 ; Grant *et al.*, 2003 ; Petts et Gurnell, 2005 ; Graf, 2006 ; Rollet, 2007 ; Schmidt et Wilcock, 2008 ; Souchon et Nicolas, 2011 ; Grant, 2012). Ces effets sont nombreux et plus complexes que ceux induits par la chenalisation et les épis, car les barrages modifient à la fois les débits liquides et solides, et les changements qu'ils imposent sont susceptibles d'affecter plus ou moins profondément les variables morphologiques.

Impacts des barrages sur les variables de contrôle

Les impacts sur les débits liquides varient selon le type de barrage. La modification la plus courante concerne **la fréquence, l'amplitude et la durée des débits extrêmes,** minimum et maximum : les pics de crue sont souvent diminués, alors que les débits d'étiage peuvent être augmentés (Magalligan et Nislow, 2005 ; Brandt, 2000). C'est le cas de la majorité des barrages-réservoirs. Les ouvrages en dérivation produisent généralement l'effet inverse sur les débits minimum : l'essentiel des débits est acheminé vers l'usine hydro-électrique, et un **débit réservé** est maintenu en aval du barrage, hors périodes de crue où le débit dépassant le débit d'équipement de l'usine est alors déversé dans le tronçon court-circuité. En France, la loi « pêche » de 1984 a fixé le débit réservé *« garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces »* (art. L 432-5 du Code de l'environnement) au 10ème du module pour les nouveaux ouvrages et au 40ème du module pour les ouvrages existants (Alava, 2009). Le plus souvent, ces valeurs sont très inférieures au module naturel, voire au débit d'étiage (fig. 1.7).

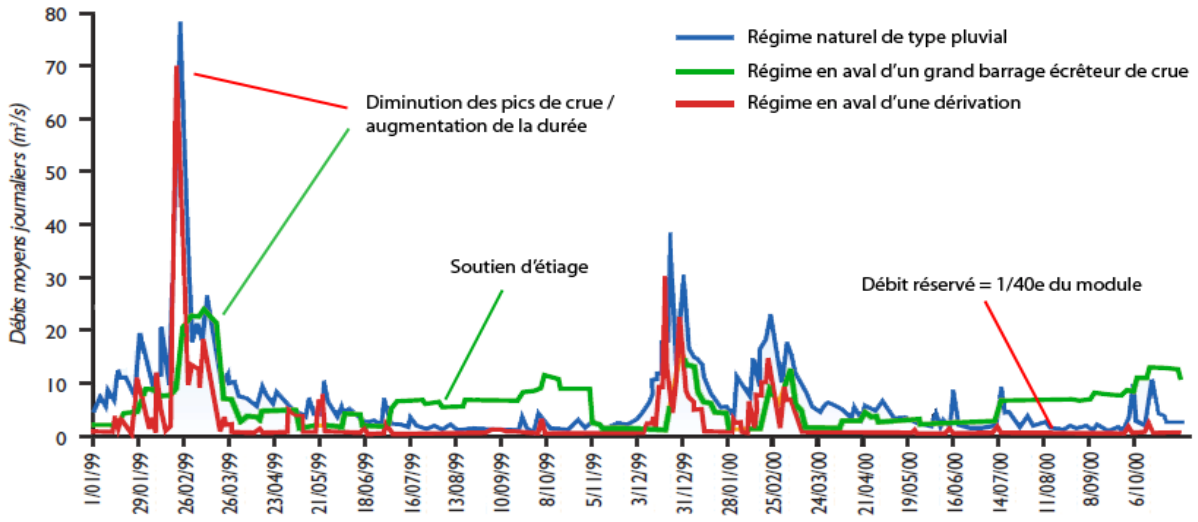


Figure 1.7 : Comparaison des caractéristiques de trois régimes hydrologiques théoriques : régime naturel de type pluvial, régime artificiel en aval d'un grand barrage écrêteur de crue, régime de débit réservé en aval d'une dérivation de centrale hydro-électrique (d'après Baran et Leroyer-Gravet, 2007)

Les impacts des barrages sur les débits solides sont également variables, selon si l'ouvrage est équipé de vannes permettant le transit. Le mode de gestion de la retenue entre aussi en jeu (réintroduction des matériaux de dragage en aval du barrage…). Mais, quand bien même les sédiments ne s'accumulent pas en amont, leur transport vers l'aval est conditionné par la puissance fluviale, qui se trouve également altérée. Schmidt et Wilcock (2008) ont exploité une base de données regroupant 61 tronçons aménagés de l'Ouest américain, soit plus de 4 000 km de cours d'eau. En utilisant la balance de Lane (1955) et les relations d'Einstein-Brown et de Chézy, les auteurs démontrent que :

$$I^* = \frac{(Q_s^*)^{0.5}(D^*)^{0.75}}{Q_l^*}$$

avec : $I^* = \frac{I_{post}}{I_{pré}}$ $Q_s^* = \frac{Q_{s\,post}}{Q_{s\,pré}}$ $Q_l^* = \frac{Q_{l\,post}}{Q_{l\,pré}}$ $D^* = \frac{D_{post}}{D_{pré}}$

I : pente du lit
Q_s : débit solide
Q_l : débit liquide (période de retour = 2 ans)
D : diamètre moyen des sédiments du fond
pré : condition d'avant barrage
post : condition d'après barrage

I^* exprime la **balance sédimentaire**, soit le potentiel de dépôt ou d'érosion en réponse à la modification des variables de contrôle. Trois cas de figure sont rencontrés :

- $I^* > 1$: cela signifie qu'une augmentation de la pente est nécessaire pour transporter la fourniture sédimentaire post-barrage, compte-tenu de la modification des débits de crue. Il y a trop de sédiments à transporter, une condition post-barrage d'**excès sédimentaire** est donc prévisible ;
- $I^* < 1$: une condition post-barrage de **déficit sédimentaire** est prévisible ;
- $I^* = 1$: le tronçon est en **équilibre dynamique** entre le dépôt et l'érosion.

Les auteurs constatent une large gamme de valeurs prises par *I** (entre 0,08 et 1,64), expliquée par les nombreuses combinaisons d'ajustements possibles (fig. 1.8). Environ **67 % des tronçons sont en déficit sédimentaire**, et seulement 4 % sont en excès. Les 29 % restants sont en équilibre, ou indéterminés par manque de données.

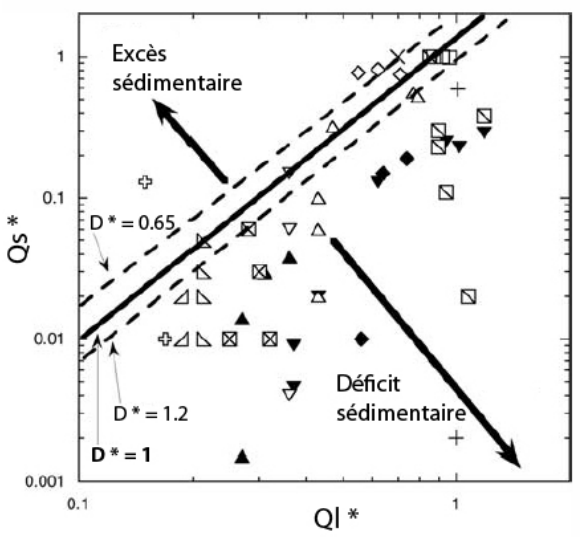
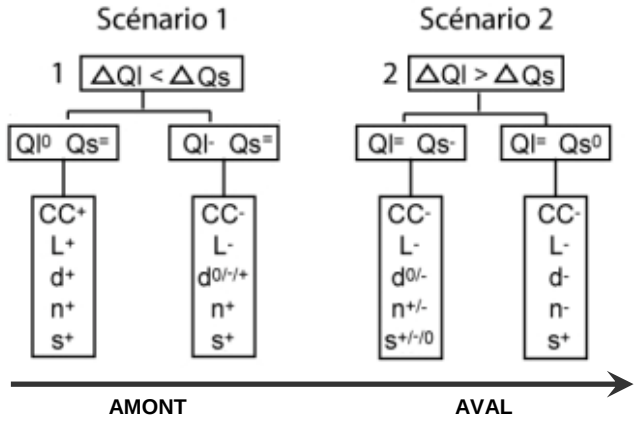


Figure 1.8 : Diagramme de modification des débits liquides (Q_l*) et solides (Q_s*) étant à l'origine d'un déficit ou d'un excès sédimentaire en aval de barrages. Les diagonales représentent l'équilibre dynamique (*I = *1*) pour *D** = 0.65, 1 et 1.2. Chaque point représente un tronçon de rivière, et chaque figuré renvoie à une rivière différente dans la base de données (d'après Schmidt et Wilcock, 2008)**

Impacts des barrages sur les variables morphologiques

Schumm (1969) a proposé quatre scénarios d'évolution découlant des combinaisons possibles de modification des variables de contrôle (fig. 1.9) (Petts et Gurnell, 2005).

Kondolf (1997) illustre les effets morphologiques des barrages avec le concept de ***hungry water*** : « l'eau affamée » relâchée par l'ouvrage se réalimente avec les sédiments du fond, ce qui provoque une **incision** et une **augmentation de la granulométrie du fond** (*bed coarsening*), par érosion sélective (scénario 1, fig. 1.9). Ce phénomène est toutefois limité, dans le cas où le barrage n'accentue pas le déficit sédimentaire et/ou si le laminage des crues est très significatif et réduit la puissance fluviale (scénario 2, fig. 1.9). Dans ce cas, la diminution de l'amplitude et de la durée des inondations favorise la **colonisation végétale** des milieux annexes au chenal et notamment des bancs, moins fréquemment immergés, ce qui provoque une **rétraction de la bande active** et un exhaussement des marges végétalisées (Martin et Johnson, 1987 ; Marston *et al.*, 1995 ; Johnson, 1997 ; Friedman *et al.*, 1998 ; Surian, 1999 ; Liébault et Piégay, 2002 ; Petts et Gurnell, 2005 ; Cadol *et al.*, 2010). Sur la Piave (Italie), Surian (1999) a montré que la bande active actuelle présente une largeur moyenne équivalente à 35 % de sa valeur du début du 20ème siècle, avant la construction des barrages.



avec :

CC : capacité du chenal
L : largeur
d : profondeur
n : rugosité (granulométrie du fond)
s : pente

Figure 1.9 : Scénarios d'évolution d'un tronçon fluvial en aval d'un barrage, en réponse aux modifications relatives des débits liquides (Q_l) et solides (Q_s). L'importance des modifications décroit de l'amont vers l'aval (d'après Petts et Gurnell, 2005 basé sur Schumm, 1969)

Le patron longitudinal de rétraction est contrôlé par le facteur principal de perturbation : une prépondérance du **facteur hydrologique** se manifestera le plus souvent par une **végétalisation synchrone** sur l'ensemble du tronçon affecté, tandis qu'un **facteur sédimentaire** dominant se traduira par une **progression amont-aval** de l'impact, la végétation s'implantant préférentiellement sur les bancs latéraux « perchés » par la progression vers l'aval du front d'incision résultant du déficit sédimentaire (Liébault et Piégay, 2002 ; Dufour, 2005). Dans tous les cas, l'intensité des ajustements tend à diminuer avec la distance au barrage (fig. 1.9), car les effets sur les variables de contrôle sont atténués, et la présence d'affluents en aval modifie les conditions de crue et de fourniture sédimentaire (Schmidt et Wilcock, 2008).

1.3.5. Echelles spatio-temporelles d'ajustement et effets cumulatifs

Wasson *et al.* (1998) évoquent l'image du chêne et du roseau pour illustrer les deux réponses possibles d'un tronçon fluvial à une perturbation :

- soit le tronçon est **résilient**, c'est-à-dire que tel un élastique, il est facilement modifié mais est capable de s'auto-restaurer par des mécanismes de rétroaction ;
- soit le tronçon est **résistant**, c'est-à-dire qu'il est peu modifié jusqu'à un certain niveau de perturbation (*effet de seuil*), au-delà duquel les transformations peuvent être importantes.

L'atteinte d'un seuil, ainsi que la relation « force-résistance » qui existe entre l'intensité de la perturbation et les caractéristiques du tronçon (géologie, régime hydrologique, granulométrie du fond, cohésion des berges, type de végétation…) constituent les fondements du concept de **sensibilité au changement** (Graf, 1979 ; Schumm, 1991 ; Downs et Gregory, 1993).

Les échelles d'ajustement diffèrent alors selon la sensibilité du système au changement, la nature et l'intensité de la perturbation, et le temps nécessaire à la propagation de ce changement, si le tronçon enregistrant une modification des variables de contrôle est différent du tronçon affecté

par les ajustements (Church, 1995). Les changements peuvent s'exprimer à court terme, lors d'un épisode de crue, ou à moyen et long termes (plusieurs années voire dizaines, centaines d'années) plus à l'aval (Knighton, 1984 ; Amoros et Petts, 1993).

La réponse générale d'un cours d'eau à une perturbation est classiquement décomposée en un **temps de réaction** et un **temps de relaxation** (Graf, 1977) : le système évolue rapidement les premières années, puis il progresse de manière asymptotique jusqu'à l'atteinte du nouvel équilibre. La plupart des incisions et rétractions observées sur des tronçons fluviaux aménagés évolue selon ce modèle non linéaire (fig. 1.10) (Williams et Wolman, 1984 ; Surian et Rinaldi, 2003). Dans le cas de l'incision, le ralentissement, voire l'arrêt du processus, est contrôlé par un ou plusieurs facteurs : l'affleurement du substratum rocheux non mobilisable, la formation d'une couche de pavage, l'occurrence de nouvelles entrées sédimentaires par les versants ou par les affluents, la diminution de la capacité de transport, la colonisation végétale (Williams et Wolman, 1984).

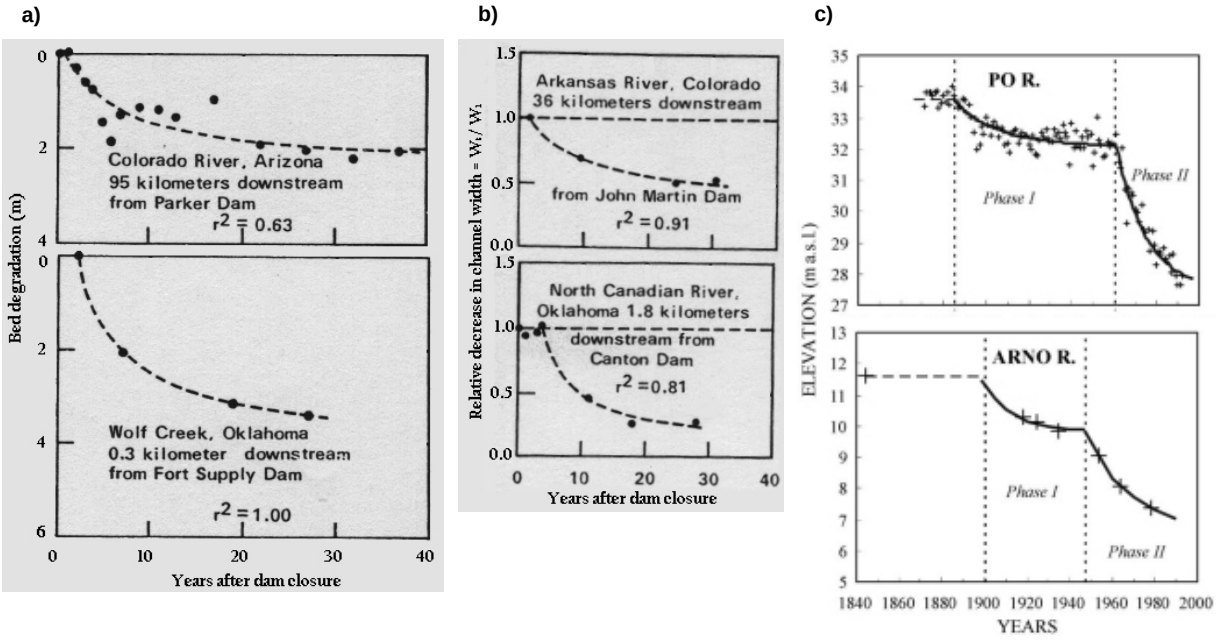


Figure 1.10 : Modèles d'ajustement de tronçons fluviaux aménagés : a) Fonction hyperbolique d'incision en aval de barrages. b) Fonction hyperbolique de rétraction en aval de barrages (Williams et Wolman, 1984). c) Fonction exponentielle d'incision après des changements d'occupation des sols (phase 1) et des barrages et extractions (phase 2) (Surian et Rinaldi, 2003)

Les exemples du Po et de l'Arno (Italie) (Surian et Rinaldi, 2003, fig. 1.10, c) illustrent les **effets cumulatifs** d'aménagements réalisés de façon concomitante ou successive. Dans ce contexte, le concept de **trajectoire temporelle d'ajustement** permet de mieux appréhender la réponse complexe d'un tronçon fluvial aménagé, au cours de laquelle les cycles, les tendances sur le long terme et les fluctuations sur le court terme se superposent (Brierley et Fryirs, 2005 ; Dufour, 2005 ; Hughes *et al.*, 2005 ; Brierley *et al.*, 2008 ; Dufour et Piégay, 2009).

Ces perturbations morphologiques pèsent sur le fonctionnement écologique des cours d'eau et ont également des répercussions économiques.

1.4. Les impacts écologiques et socio-économiques de ces travaux

1.4.1. Liens entre hydro-morphologie et écologie des cours d'eau

En 1980, Vannote *et al.* (cités par Dufour, 2005) proposaient le concept de **continuum fluvial** *(river continuum concept)* afin de décrire la structuration des communautés biologiques et du fonctionnement trophique selon le gradient amont-aval des conditions physiques. Les auteurs mettaient ainsi en évidence une modification longitudinale de la composition des populations de poissons et de macro-invertébrés.

Aujourd'hui, **il est très largement admis le rôle majeur des processus hydro-morphologiques sur le fonctionnement écologique des cours d'eau** : la dynamique fluviale façonne les habitats aquatiques et terrestres, et ceux-ci déterminent en grande partie l'abondance, la distribution et la composition des communautés faunistiques et floristiques (fig. 1.11) (Stillwater Sciences, 2002, 2005, 2006 ; Bunte, 2004). Dans ce système hiérarchisé qu'est le cours d'eau, une modification naturelle ou anthropique de l'une ou l'autre des variables d'ajustement ou de contrôle conduit irrémédiablement à une modification du compartiment biologique.

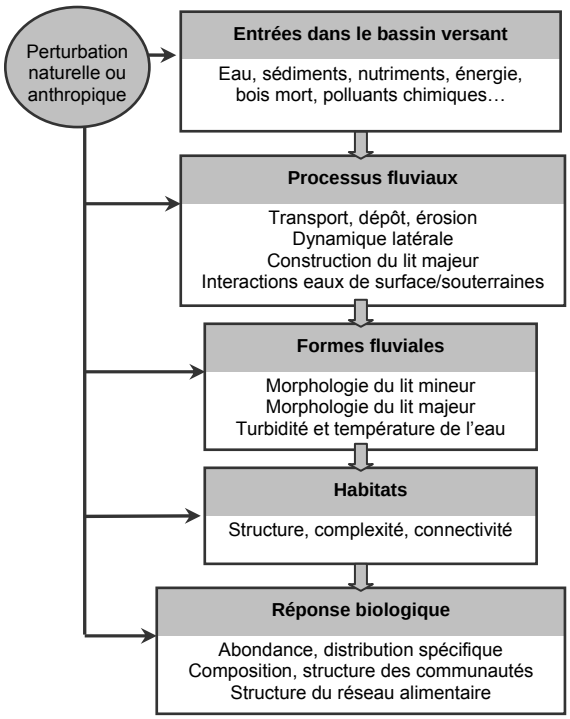


Figure 1.11 : Modèle conceptuel des liens entre les compartiments physiques et biologiques dans les systèmes alluviaux (d'après Stillwater Sciences, 2005)

1.4.2. Impacts écologiques et socio-économiques

L'incision d'un tronçon fluvial aménagé peut avoir de très nombreux effets sur les biocénoses aquatiques et terrestres ainsi que sur les activités socio-économiques liées au cours d'eau (tableau 1.1) (Bravard *et al.*, 1999).

Impacts de l'incision sur la géométrie, la capacité de transport, la fourniture sédimentaire et les infrastructures	Impacts écologiques et socio-économiques
Abaissement du niveau d'eau	* Baisse du toit de la nappe et diminution des réserves d'eau souterraine * Modification de l'alimentation en eau et de la composition de la végétation riveraine * Assèchement des zones aquatiques périfluviales * Modifications physico-chimiques et altération de la qualité des eaux * Assèchement et perte des habitats hyporhériques en berge
Affouillement des ouvrages en lit mineur (seuils, piles de pont, pipelines, protections de berges)	* Destruction ou réparations coûteuses
Affouillement et érosion des berges et des versants riverains	* Elargissement et instabilité du chenal * Perte de terrains agricoles et d'infrastructures riveraines * Glissements de terrain
Rétraction de la bande active, diminution du rapport largeur/profondeur	* Réduction des surfaces d'habitats aquatiques, altération des habitats riverains * Réduction de la surface du lit participant à la recharge souterraine * Concentration de l'écoulement et augmentation des forces tractrices susceptibles d'aggraver l'incision
Simplification du chenal et abandon des chenaux multiples	* Homogénéisation des habitats aquatiques * Appauvrissement des communautés piscicoles * Réduction des habitats riverains
Disparition des bancs de graviers	* Disparition d'habitats * Réduction de la biodiversité
Pavage du fond	* Disparition des graviers pour la reproduction des poissons
Exhumation de barres rocheuses	* Disparition des graviers pour la reproduction des poissons * Disparition des habitats hyporhéiques * Obstacles à la migration piscicole
Réduction des débordements	* Changements dans la mosaïque végétale
Augmentation des apports solides en aval	* Exhaussement des tronçons en aval

Tableau 1.1 : Impacts écologiques et socio-économiques liés à l'incision d'un tronçon fluvial aménagé (d'après Bravard *et al.*, 1999)

Dans le lit mineur, l'incision peut mettre en péril la stabilité des berges et des ouvrages de génie civil (seuils, piles de ponts…) (Bravard, 1994 ; Kondolf, 1997). De plus, la simplification des formes fluviales et la modification des vitesses et des profondeurs conduisent souvent à une homogénéisation des faciès d'écoulement et des substrats, ce qui entraine une forte simplification des habitats pour les invertébrés et les poissons (Wasson *et al.*, 1998). Les situations d'incision sont également susceptibles d'aboutir à la formation d'un pavage, constitué de particules trop grossières pour pouvoir être mobilisées par les poissons au moment du frai (Kondolf, 1997). Dans de nombreuses rivières californiennes, la reproduction des salmonidés est ainsi menacée par la raréfaction des graviers compris entre 15 et 50 mm d'axe *b* (Kondolf et Wolman, 1993).

Dans le lit majeur, l'incision induite par les aménagements, ou les aménagements eux-mêmes (endiguements, protections de berges, barrages…), affectent la **connectivité écologique** dans ses trois dimensions : **longitudinale** (déconnexion des bras secondaires par l'amont ou l'aval), **latérale** (déconnexion totale des bras, diminution de la fréquence des débordements…) et

verticale (abaissement du toit de la nappe…). Ces déconnexions se traduisent par un assèchement des habitats et par un appauvrissement généralisé des biocénoses (Adam *et al.*, 2006) (fig. 1.12). Par exemple, la végétation des tronçons chenalisés évolue typiquement vers une réduction de la diversité spécifique et une homogénéisation de la structure des communautés (Bombino *et al.*, 2007 ; Dufour *et al.*, 2007).

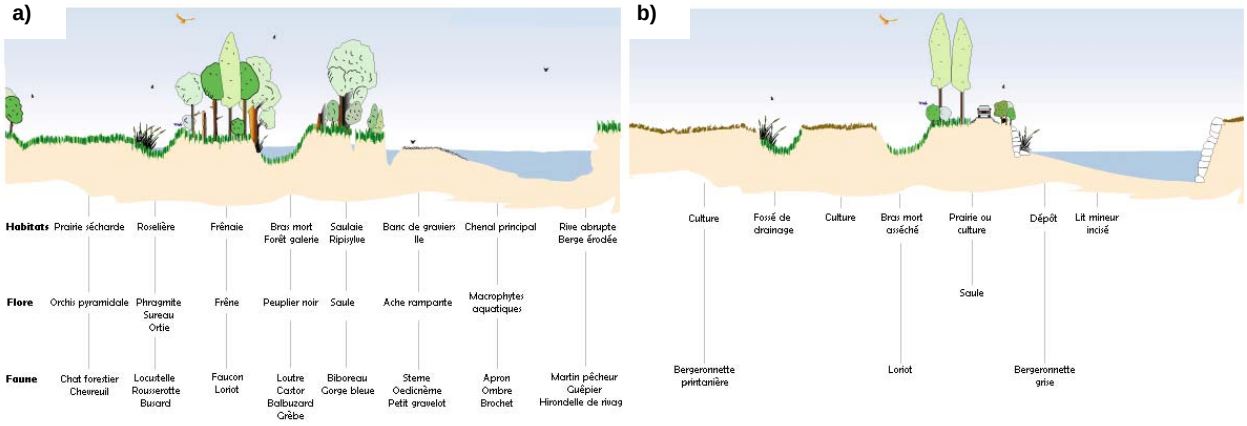


Figure 1.12 : Illustration des impacts de l'incision ou de la chenalisation sur les habitats et biocénoses liés au cours d'eau : situation avant (a) et après (b) aménagement (d'après une réalisation de L. Terraz, DREAL Franche-Comté, 2003 ; Adam *et al.*, 2006)

Outre les effets de l'incision, les incidences écologiques et économiques des travaux en rivière sont variées. Elles concernent par exemple les modifications thermiques de l'eau dans la retenue des barrages ou en aval de dérivations (Olden et Naiman, 2010), l'aggravation des crues en aval de tronçons chenalisés (Wasson *et al.*, 1998)… Jamme (1969) cite le cas de la Tisza, un affluent du Danube dont la longueur du tracé a été réduite de moitié par des coupures de méandres au 19ème siècle, ce qui a eu pour effet d'amplifier la crue de 1879 et de détruire à 95 % la ville de Szeged située en aval.

Il ne faut cependant pas oublier que certains aménagements peuvent assurer des bénéfices écologiques. Les champs d'épis immergés peuvent par exemple servir de nurseries et d'abris pour la faune piscicole, et d'aires d'incubation pour les algues planctoniques (Reynolds *et al.*, 1991, cités par Sukhodolov *et al.*, 2002). Dans certains cas, les épis sont implantés spécialement pour restaurer une diversité de fond à un lit trop uniforme (Thompson, 2002 ; Degoutte, 2006 ; Adam *et al.*, 2007) ; encore faut-il que soient analysés les risques d'érosion de berges, d'incision localisée ou de sur-élévation de la ligne d'eau en crue pouvant résulter de ces ouvrages (Adam *et al.*, 2007).

Enfin, si les publications d'écologie ou de géomorphologie mettent largement en lumière les perturbations anthropiques des systèmes fluviaux, il faut rappeler que les aménagements entrepris dans un souci de gestion intégrée et de développement territorial et durable existent ! La construction du barrage hydro-électrique de Nam Theun 2 (Laos) en est un exemple récent (EDF, 2009 ; Salignat, 2012). Différentes actions sociales et environnementales ont accompagné le projet : reconstruction de 15 villages localisés dans la zone d'inondation, alimentation en eau

potable de 80 villages impactés en aval, proposition de techniques agricoles alternatives, protection de la faune sauvage, financement d'une réserve naturelle de 4 000 km²…

En France, le durcissement de la mise en concurrence des concessions hydro-électriques oblige depuis 2004 toutes les entreprises à présenter à l'Etat des offres conciliant efficacité énergétique et mesures compensatoires, pour une meilleure préservation des écosystèmes impactés et un respect des autres usages liés à l'eau (Leteurtrois *et al.*, 2006 ; EDF, 2012). Cet exemple de modification du cadre législatif s'inscrit dans le contexte d'une prise de conscience environnementale qui a débuté dans nos sociétés occidentales il y a déjà 50 ans (*environmental awareness*, Carson, 1962, cité par Downs et Gregory, 2004). Dans ce contexte, la restauration écologique ouvre la voie à un nouveau rapport entre l'Homme et le cours d'eau, et offre un champ d'actions et de recherches scientifiques particulièrement vaste.

2. La restauration des cours d'eau

2.1. Définitions

2.1.1. Le retour à un état non perturbé

La restauration couvre de nombreux modes d'action, qui visent tous à améliorer la qualité écologique d'un milieu naturel dégradé par des interventions humaines. Cairns (1991) évoque ***« un retour complet, structurel et fonctionnel, à un état non perturbé »***. Muhar *et al.* (1995) relatent *« l'ensemble des mesures qui modifient les altérations induites par l'Homme, de telle sorte que le fonctionnement écologique du nouvel état se rapproche d'une rivière naturelle »*. Le concept allemand de *leitbild* évoque une « situation idéale », soit le potentiel naturel d'un cours d'eau en l'absence de pressions économiques et politiques (Kern, 1992 ; Jungwirth *et al.*, 2002). Le concept de *naturalité*, employé initialement dans la gestion des forêts et des espaces naturels protégés (Peterken, 1996 ; Schnitzler-Lenoble, 2002) et récemment transposé aux hydrosystèmes fluviaux (Trémolières *et al.*, 2002 ; Wohl et Merritts, 2007), suggère également le retour à un état non anthropisé. En Europe, la Directive Cadre sur l'Eau exige d'atteindre le *« bon état écologique »* des masses d'eau d'ici 2015. Cet état est défini par rapport à des conditions biologiques, hydromorphologiques et physico-chimiques de référence, représentant *« pas ou très peu d'altérations anthropogéniques »* (annexe V). De ce point de vue, la DCE constitue l'une des plus ambitieuses actions collectives de promotion de la naturalité menée à ce jour (Newson et Large, 2006, cités par Dufour et Piégay, 2009).

Il est possible de positionner la restauration des cours d'eau sur un gradient opposant l'état naturel ou semi-naturel à l'état dégradé (Boon *et al.*, 1992) (fig. 1.13). La restauration intervient quand les actions de préservation, puis de limitation et d'atténuation des effets négatifs des activités humaines, ne sont pas suffisantes pour maintenir la qualité écologique du tronçon.

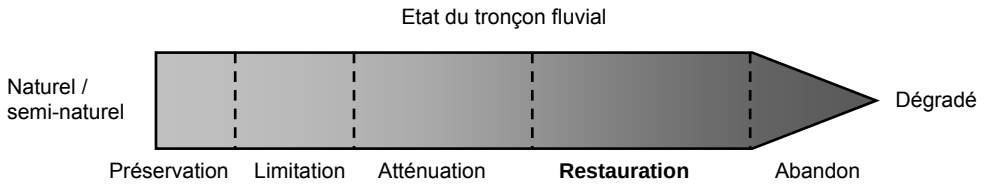


Figure 1.13 : Options de gestion selon l'état de dégradation d'un tronçon fluvial (d'après Boon *et al.*, 1992)

2.1.2. Des références statiques …

Les premières restaurations, entreprises en Europe et aux Etats-Unis au cours des années 1980-1990, étaient principalement basées sur des références historiques statiques. De fait, elles se limitaient le plus souvent à **une simple « réparation » des formes fluviales altérées** (Dufour et Piégay, 2009). Dans certains cas, ces actions se sont soldées par un échec (Kondolf *et al.*, 2001). Depuis, une meilleure compréhension du fonctionnement des hydrosystèmes nous permet de mieux diagnostiquer les causes des altérations, c'est-à-dire les perturbations des variables de contrôle du système fluvial, et ainsi 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). Aussi, selon Wohl *et al.* (2005), la restauration *« participe à la réparation de l'intégrité écologique, en rétablissant les processus hydrologiques, géomorphologiques et écologiques ».*

2.1.3. … à la formulation d'objectifs de restauration réalistes

Depuis les années 2000, le concept de **services écosystémiques** (Costanza *et al.*, 1997 ; MEA, 2005 ; Dufour *et al.*, 2010) est en passe de modifier les pratiques. En effet, pendant longtemps, la valeur des écosystèmes était seulement basée sur les biens qu'ils étaient en mesure de produire pour les populations humaines (eau, nourriture, graviers…). Or, les services et bénéfices dérivés directement ou indirectement des écosystèmes sont de plus en plus reconnus ; ils incluent le traitement des déchets, la séquestration du carbone, la régulation des eaux et du climat, les ressources génétiques, le bien-être (loisirs, développement personnel...) (Costanza *et al.*, 1997 ; Roni et Beechie, 2012). Cette prise de conscience de l'importance des écosystèmes pour l'existence humaine en général conduit à un intérêt croissant pour la restauration des milieux naturels (Roni et Beechie, 2012). La définition du WWF/IUCN (2000) résume bien ce nouvel état d'esprit, selon lequel la restauration est *« un processus qui vise à rétablir l'intégrité écologique tout en améliorant le bien-être de l'homme ».* A ce propos, Bazin et Barnaud (2002) ont identifié trois objectifs majeurs motivant un projet de restauration :

- *le retour à un bon niveau de biodiversité*, représenté par la qualité écologique du milieu ;
- *le rétablissement de la fonctionnalité des écosystèmes*, afin qu'ils remplissent à nouveau des fonctions écologiques et des services à l'échelle d'un territoire ;
- *la préoccupation d'une certaine efficacité économique*, les mesures devant répondre à des critères de faisabilité et de reproductibilité à plus grande échelle.

Les nouveaux concepts dressent le cadre actuel et futur de la restauration : avec le concept de *trajectoire temporelle,* **la réversibilité des ajustements est remise en cause**. Il devient alors préférable de penser l'évolution du site restauré comme un prolongement de sa trajectoire passée, plutôt que de viser un retour, idéalisé, vers une référence historique statique (fig. 1.14) (Dufour et Piégay, 2009). Par ailleurs, la restauration ne peut pas se limiter à une simple « renaturation », dans la mesure où elle doit répondre aux *besoins de la société*. Les enjeux résideraient donc désormais dans 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) (fig. 1.15).

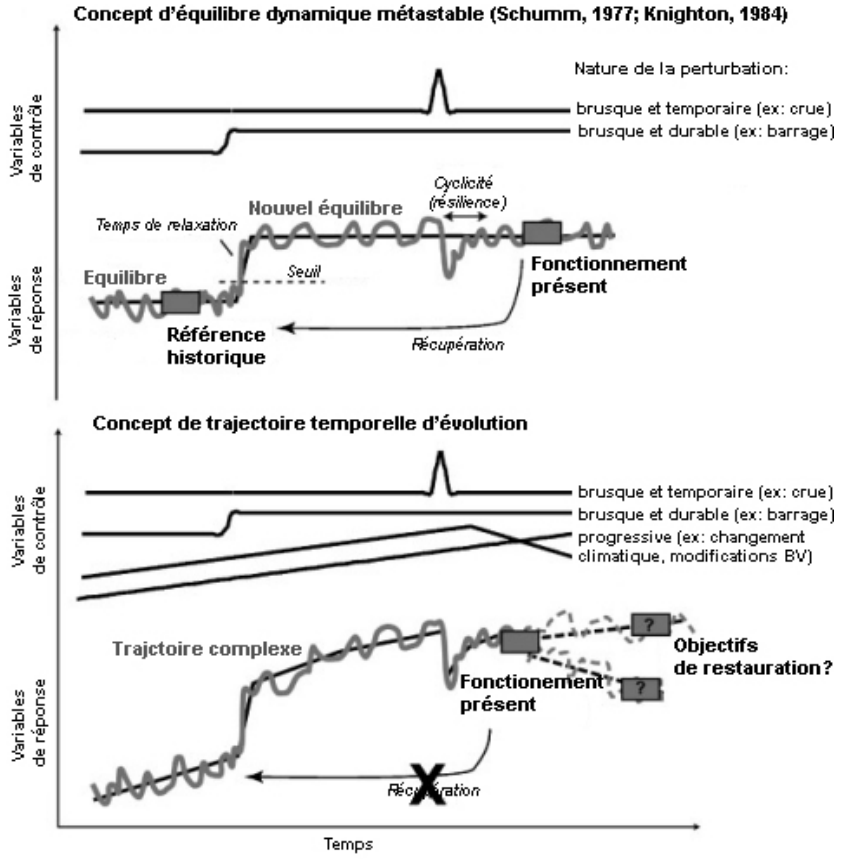


Figure 1.14 : Remise en cause de la réversibilité des processus avec le concept de trajectoire temporelle d'évolution (d'après Dufour et Piégay, 2009)

La plupart des programmes de restauration entrepris récemment consiste ainsi en des approches multifonctionnelles, combinant « renaturation » et satisfaction de besoins sociétaux, dans une perspective de développement durable et à large échelle (Habersack et Piégay, 2008). Par exemple, le projet d'aménagement intégré du Danube entre Vienne et Bratislava, lancé en 2002, vise simultanément à maintenir un tirant d'eau constant pour la navigation, stopper l'incision et améliorer l'état écologique du chenal et de ses marges (Reckendorfer *et al.*, 2005 ; Jungwirth, 2008). Plusieurs actions sont mises en œuvre dans ce cadre.

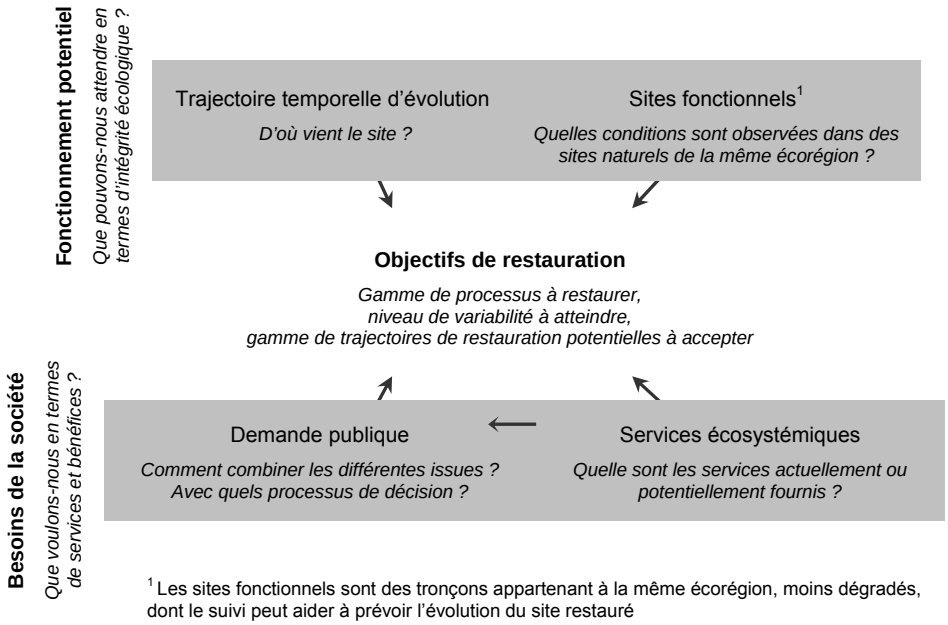


Figure 1.15 : Cadre conceptuel pour la définition d'objectifs de restauration (d'après Dufour et Piégay, 2009 ; Dufour *et al.*, 2010)

2.2. Des exemples d'opérations de restauration

La restauration physique des cours d'eau peut porter sur les **flux, liquides ou solides**, ou sur la **structure du lit** (Habersack et Piégay, 2008). L'intervention peut être menée **passivement** ou **activement**, selon qu'elle sollicite ou non la dynamique naturelle de la rivière une fois que les causes des perturbations ont été prises en compte (Kondolf, 2011). Par exemple, plus le cours d'eau sera puissant, avec des berges facilement érodables et des apports solides importants, plus la réactivation de sa dynamique latérale sera aisée (par simple suppression des enrochements), peu coûteuse et avec des effets rapides (Malavoi et Adam, 2007). A l'inverse, des interventions plus lourdes, coûteuses et aux résultats moins spectaculaires seront à envisager sur les cours d'eau peu puissants, peu dynamiques et à faibles apports grossiers (Malavoi et Adam, 2007). Une vue d'ensemble des principales options de restauration selon la nature des altérations hydro-morphologiques est donnée dans le tableau 1.2.

La loi sur l'eau et les milieux aquatiques de 2006 a modifié la loi « pêche » de 1984, en imposant l'**augmentation des débits réservés** en aval des barrages français d'ici 2014 : auparavant égal au 40ème du module pour les ouvrages existants, le débit minimal sera porté au 10ème du module si celui-ci est inférieur à 80 m^3/s, et au 20ème du module sinon (Alava, 2009). Cette nouvelle loi introduit également la notion de *« régime réservé »*, qui suggère la possibilité de fixer des débits différents selon la période de l'année, et ainsi **rétablir en partie une variabilité et une continuité hydrologiques**. Le relèvement des débits réservés a été entrepris dans les sections court-circuitées du Rhône à partir des années 1990, dans le cadre d'un programme de restauration hydraulique et écologique visant à retrouver un fleuve *« vif et courant »* (Bravard, 2006). Les autres actions de ce programme sont la restauration de la continuité biologique et la **reconnexion des annexes fluviales** asséchées (Olivier *et al.*, 2011).

Altérations hydro-morphologiques		Modification des débits liquides	Perturbation du transit sédimentaire	Blocage de la mobilité latérale	Homogénéisation des faciès	Appauvrissement du substrat	Déconnexion des milieux annexes	Baisse du toit de la nappe
Action sur…	Causes	Barrages	Barrages	Chenalisation, épis	Effets de l'incision[1]	Effets de l'incision	Effets de l'incision	Effets de l'incision
	Options de restauration							
… les flux liquides	Augmentation des débits réservés	X						X
… les flux liquides	Restauration de la continuité hydrologique	X						X
… les flux liquides et la structure du lit	Reconnexion des annexes fluviales						X	X
… les flux solides	Restauration de la continuité sédimentaire		X		X	X	X	X
… les flux solides	Introduction de charge grossière		X		X	X	X	X
… les flux solides et la structure du lit	Elargissement du lit mineur		X	X	X	X	X	X
… la structure du lit	Diversification du fond				X	X		X

[1] L'incision est le plus souvent provoquée par les barrages, la chenalisation, les épis ou les extractions en lit mineur

Tableau 1.2 : Principales options de restauration physique des cours d'eau selon la nature des altérations hydro-morphologiques (modifié d'après Habersack et Piégay, 2008)

D'autres mesures sont focalisées sur les débits solides : le Rhône fait actuellement l'objet d'un schéma directeur visant à étudier les potentialités d'un **élargissement du lit mineur**, ce qui permettrait d'améliorer les capacités d'écoulement en crue, de réactiver la dynamique latérale et d'augmenter les flux sédimentaires jusqu'à la mer (Gaydou *et al.*, 2009 ; Moiroud et Bravard, 2012). Des actions similaires sont en cours sur le Danube, où il est prévu d'intervenir sur 40 % du linéaire entre Vienne et Bratislava, en retirant les enrochements et en remodelant les épis pour permettre au fleuve de refaçonner ses berges (Reckendorfer *et al.*, 2005 ; Kloesch *et al.*, 2011). Ce type d'intervention est souvent rencontré sur les cours d'eau périalpins, des exemples connus étant l'Isar (Allemagne) (Belau, 2002), la Drau (Autriche) (Habersack et Piégay, 2008) et la Thur (Suisse) (Woolsey *et al.*, 2005).

Une autre opération intéressant les flux solides est l'**introduction artificielle de charge grossière**. Elle est entreprise sur des tronçons en fort déficit sédimentaire, à la suite de l'interruption du transit par des barrages ou d'extractions sévères de granulats. C'est le cas des rivières de la

Central Valley en Californie (Kondolf *et al.*, 2005), du Rhin en aval du barrage d'Iffezheim (Kuhl, 1992), du Danube en aval de Vienne (Jungwirth, 2008), de la basse vallée de l'Ain (Rollet *et al.*, accepté), de l'Aar (Suisse) (Schälchli *et al.*, 2010) ou encore de la Mur (Autriche) (Kloesch *et al.*, 2008).

2.3. Le challenge des modèles prédictifs de réponse aux actions

Malavoi et Souchon (2010) constatent que si les trajectoires temporelles d'ajustement des tronçons fluviaux dégradés sont plutôt bien connues et documentées, en revanche les trajectoires de restauration restent difficiles à prédire. Evaluer le **potentiel de récupération** (*recovery potential*, Brierley et Fryirs, 2005), c'est-à-dire la capacité du site restauré à améliorer ses processus morphologiques au cours des prochaines décennies, est une tâche complexe, qui implique de considérer une multitude de facteurs naturels et anthropiques : trajectoire temporelle d'évolution (fonction de la sensibilité au changement), hydro-morphologie locale (occurrence des crues, contraintes aux ajustements…), forçages à large échelle (autres pressions anthropiques, changement climatique…) (Brierley et Fryirs, 2005 ; Doyle *et al.*, 2005).

Une approche simple serait d'utiliser notre connaissance des changements passés pour anticiper les évolutions futures. Cependant, beaucoup d'études soulignent le fait que **les trajectoires de restauration sont rarement symétriques aux trajectoires de dégradation** (Kondolf *et al.*, 2006 ; Duarte *et al.*, 2008 ; Palmer, 2009). Cette asymétrie serait inhérente aux variabilités naturelles et anthropiques précédemment évoquées.

Kondolf *et al.* (2008) ont imaginé le cas d'un barrage empêchant la remontée de salmonidés jusqu'à leurs habitats de frai. A la suppression de l'ouvrage, la première réponse potentielle serait une recolonisation rapide : la dégradation est *réversible* et la réponse est *symétrique* (fig. 1.16, a).

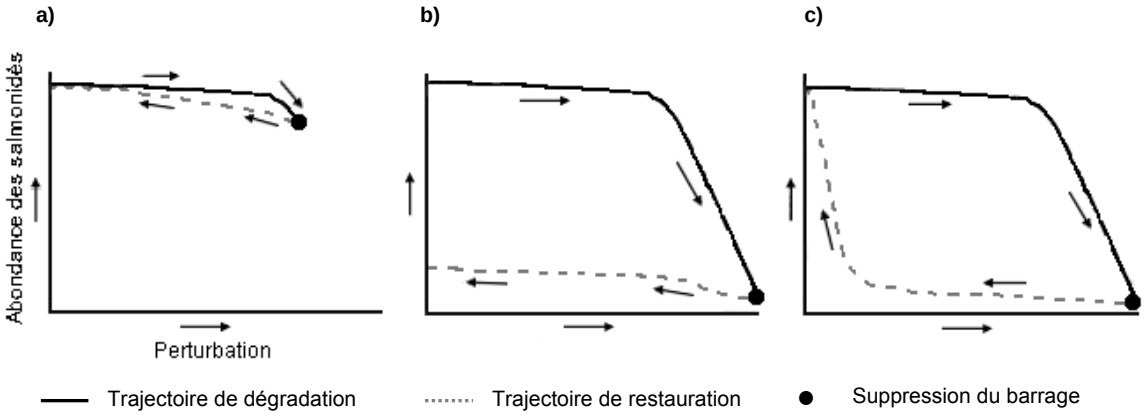


Figure 1.16 : Trajectoires temporelles de dégradation et de restauration proposées par Sarr (2002) et transposées par Kondolf *et al.* (2008) pour modéliser la réponse piscicole d'une suppression de barrage : a) dégradation réversible et restauration symétrique. b) dégradation irréversible. c) dégradation réversible et restauration asymétrique

Il est aussi probable que le tronçon ait subi trop de dégradations et qu'une simple reconnexion longitudinale soit insuffisante pour restaurer les habitats : la dégradation est *irréversible* et la réponse est *asymétrique (*fig. 1.16, b). Enfin, il est possible que d'autres pressions anthropiques aient réduit l'abondance spécifique et entravé le repeuplement au cours des premières années. L'élimination de ces pressions ainsi que les premières reproductions finiraient par rétablir le niveau d'abondance : la dégradation est *réversible* et la réponse est *asymétrique* (fig. 1.16, c).

A côté de ces cas simples, les trajectoires de restauration se révèlent souvent complexes et extrêmement diverses, tant pour le compartiment physique que biologique. Le rétablissement partiel ou total des fonctionnalités, ainsi que les temps de réponse, sont multiples (fig. 1.17) (Doyle *et al.*, 2005).

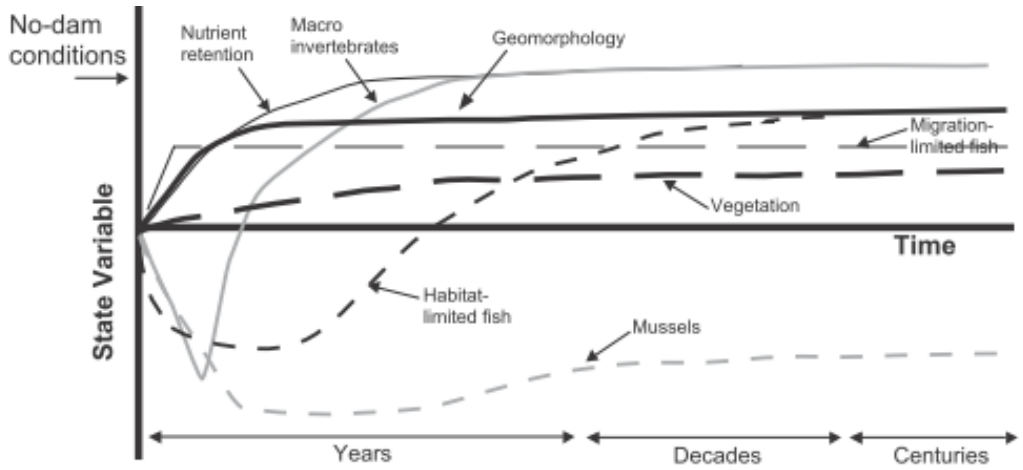


Figure 1.17 : Cadre conceptuel des trajectoires temporelles de restauration des compartiments physiques et biologiques à la suite de la suppression d'un barrage (Doyle *et al.*, 2005)

Face à cette complexité, les outils de modélisation actuels se trouvent limités pour prédire les réponses aux actions (Piégay *et al.*, 2005 ; Perrow *et al.*, 2008 ; Stewardson et Rutherfurd, 2008). L'**expérimentation** sur des sites pilotes, accompagnée d'un **suivi scientifique**, s'avère ainsi fondamentale pour améliorer les modèles, évaluer la pertinence de l'action et engager si nécessaire des mesures correctives, **selon une logique adaptative et dans une perspective durable**.

2.4. La gestion adaptative et la place de l'expérimentation en restauration

La gestion adaptative est née dans la sphère environnementale, au Canada et aux Etats-Unis, il y a plus de 20 ans (Holling, 1978 ; Walters, 1986 ; Halbert et Lee, 1991 ; Hilborn, 1992). Elle se définit comme **un processus systématique d'amélioration continue des pratiques**, grâce aux leçons tirées des pratiques antérieures. Il s'agit d'un **« apprentissage par l'action »** (*learning by doing*), c'est-à-dire une « expérience » dans le but de réduire les incertitudes entourant un projet complexe (MEA, 2005). La structure du projet est évolutive, les informations scientifiques collectées à chaque étape étant utilisées pour réviser et améliorer l'étape suivante (fig. 1.18).

Ce mode de gestion se révèle particulièrement adapté à la restauration de cours d'eau, dans la mesure où c'est **une discipline récente qui revêt encore souvent un caractère novateur**, ce qui justifie pleinement de procéder par itérations successives entre tests grandeur nature et modèles prédictifs. Aux Etats-Unis, une démarche adaptative est engagée sur le Colorado en aval du barrage Glen Canyon depuis 1996. Les effets de crues expérimentales sont évalués par le Centre de Recherche et de Suivi du Grand Canyon, dans le but de déterminer les modes de gestion optimaux pour restaurer les bancs de sable et les habitats en aval du barrage (Schmidt, 2012). Le Danube est également géré selon un mode adaptatif (Jungwirth, 2008) : des expériences sont conduites sur des modèles numériques et physiques (Hengl *et al.*, 2009 ; Huber *et al.*, 2011 ; Tritthart *et al.*, 2011) et sur un site pilote de 3 km de long (Schabuss *et al.*, 2008 ; Kloesch *et al.*, 2011), afin d'évaluer la faisabilité d'actions qui devraient concerner à terme 50 km. Un suivi scientifique d'accompagnement est programmé jusqu'en 2020 (Schabuss *et al.*, 2008).

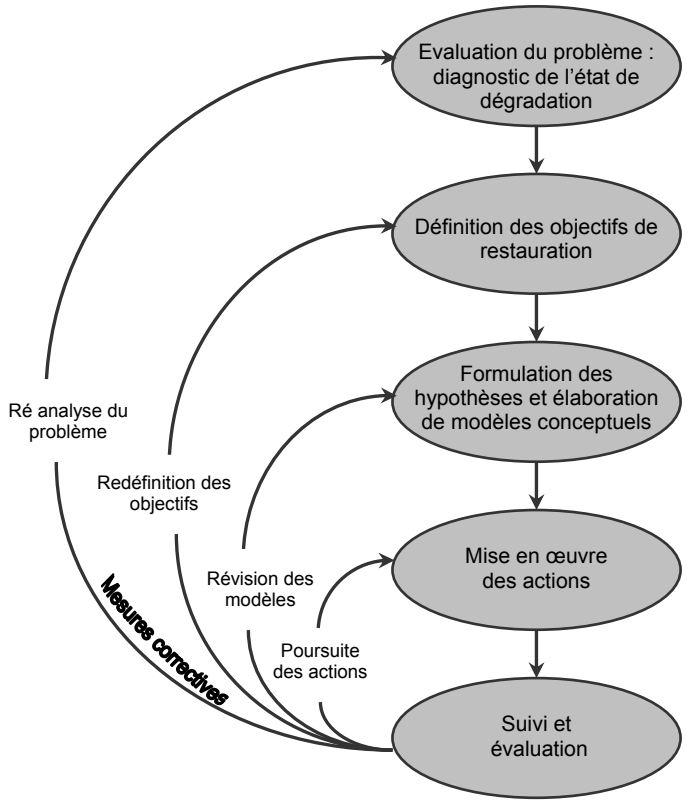


Figure 1.18 : Principe de la gestion adaptative appliquée à la restauration des cours d'eau (modifié d'après Stillwater Sciences, 2005)

Le **suivi** est à la base de la démarche adaptative (fig. 1.18). Il repose sur des **observations permettant de détecter les changements de paramètres physiques, chimiques ou biologiques** survenus après l'intervention (Roni, 2005). La caractérisation quantitative, semi-quantitative ou qualitative des changements se fait au moyen d'**indicateurs biotiques ou abiotiques**, qui rendent compte de l'évolution temporelle du site restauré par rapport à une référence (Morandi, 2010). Ces indicateurs, ainsi que les protocoles de mesure, sont à sélectionner dès l'avant-projet, en même temps que la formulation des objectifs, puisque le suivi doit **aider à déterminer dans quelle mesure les objectifs fixés ont été atteints** (Woolsey *et al.*, 2005).

Le suivi permet d'identifier les objectifs encore à atteindre, et d'engager si nécessaire des mesures complémentaires d'amélioration, selon une logique adaptative (Woolsey *et al.*, 2005). Par exemple, un suivi scientifique est en cours depuis 2002 en accompagnement du programme de restauration du Rhône. Les chercheurs ont tout d'abord mis au point les méthodes de mesure, et ont proposé des indicateurs d'évaluation des compartiments physiques (sédimentation des lônes, granulométrie…) et biologiques (poissons, macro-invertébrés…). Les données ainsi produites permettront d'établir des modèles prédictifs qui seront utilisés pour définir les futures stratégies de restauration et alléger les suivis d'accompagnement par la suite (Olivier et Lamouroux, 2009).

2.5. Apprécier la durabilité des actions

Un postulat fréquemment énoncé est que toute opération visant à atténuer des perturbations anthropiques - de fait, toute restauration - constitue une action positive et donc nécessaire (Rollet *et al.*, accepté). Pourtant, à partir du moment où l'Homme décide d'intervenir sur la nature, il est légitime de s'interroger sur **les gains et les pertes** que cette intervention peut générer. Par exemple, le relèvement du débit réservé est favorable aux écosystèmes aquatiques en général ; mais ce gain se traduit corrélativement par une perte des bancs exondés colonisés par les invertébrés terrestres (ECOTEC, 2006). Au-delà des pertes écologiques, il est important de s'assurer que les **risques pour la société** sont négligeables par rapport aux bénéfices à attendre. Sur ce point, la question des inondations est souvent intégrée à la réflexion. Sur l'Enz (Allemagne), des essais sur modèle physique ont permis de définir un scénario optimal d'élargissement et de revégétalisation des berges, permettant d'améliorer la qualité écologique et de rétablir les fonctions récréatives, tout en maintenant la capacité du tronçon à évacuer les crues (Bölscher *et al.*, 2005 ; Meixner *et al.*, 2006).

Ces exemples interrogent à nouveau sur les objectifs de restauration : sur quels processus ou espèces choisit-on de concentrer les efforts ? Quels usages doit-on valoriser, ou au contraire minimiser ?… (Dufour et Piégay, 2009). La restauration relève ainsi de la mise en balance d'une foule de contraintes, environnementales, sociétales et économiques. La **durabilité** se situe à l'interface de ces trois dimensions (fig. 1.19) (Woolsey *et al.*, 2005).

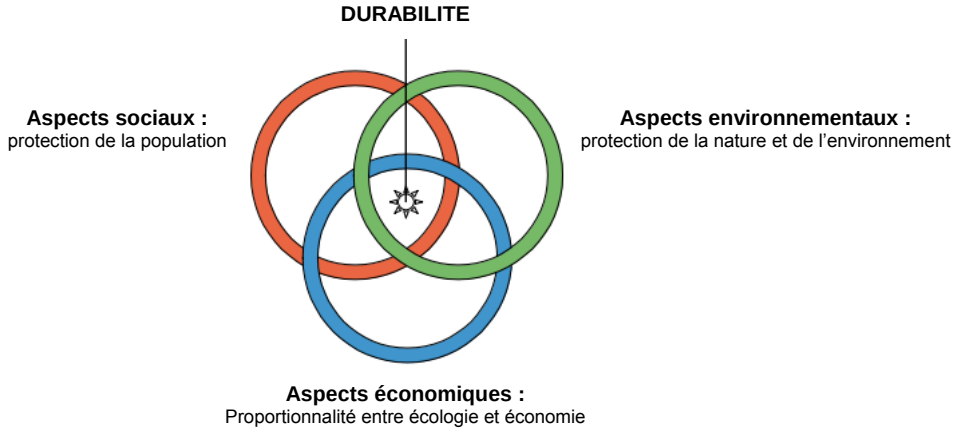


Figure 1.19 : Champ des contraintes de la durabilité (d'après Woolsey *et al.*, 2005)

Outre ces champs thématiques, le caractère durable des actions repose sur **une formulation des questions à l'échelle de tronçons plus longs, et sur des périodes de temps plus longues**. Le succès d'une restauration est souvent difficile à évaluer sur la base d'un suivi de quelques années (Hughes *et al.*, 2005). Les trajectoires temporelles de dégradation couvrent dans la plupart des cas plusieurs décennies, il est donc compréhensible que la restauration de tronçons fluviaux très modifiés nécessite des efforts sur le long terme (Kondolf *et al.*, 2008). De plus, la dimension multi-scalaire des processus et des composantes de l'hydrosystème impose de concevoir la restauration en prenant en compte tous les niveaux hiérarchiques, de l'habitat au bassin versant (Gregory, 2008). L'intégration d'échelles spatiales et temporelles emboîtées concourt ainsi à la **formulation de scénarios d'évolution**, dans une stratégie de gestion durable des hydrosystèmes.

B/ Problématique de recherche

Cette thèse de géomorphologie s'inscrit dans une démarche de restauration écologique d'un tronçon fluvial dégradé par des activités humaines. L'utilisation croisée de méthodes empruntées à la géomorphologie historique et à la géomorphologie expérimentale se révèle particulièrement adaptée pour répondre à cette problématique générale.

1. L'intérêt de la géomorphologie historique : fonder le diagnostic sur la trajectoire temporelle d'évolution

Le gestionnaire de cours d'eau qui constate sur le terrain un chenal incisé ou des peuplements végétaux riverains très simplifiés, aura certes identifié des altérations, mais ce diagnostic de l'état actuel ne lui sera pas suffisant pour planifier des actions réparatoires et garantir leur efficacité sur le long terme. Rechercher les **causes** de ces altérations apparait primordial pour définir des stratégies de restauration durables et à différentes échelles spatiales.

La géomorphologie historique permet de comprendre comment les changements se sont manifestés, à quelles vitesses le système a réagi à la suite de modifications des variables de contrôle. L'approche consiste à fonder le diagnostic non pas sur une référence statique avant perturbation, mais sur la **trajectoire temporelle d'ajustement**, en tenant compte des changements, réversibles ou irréversibles, et des besoins sociétaux actuels (Dufour et Piégay, 2009). De plus, la connaissance des ajustements passés permet d'**établir des objectifs de restauration réalistes**, compte-tenu de la sensibilité du système aux changements (Kondolf et Larson, 1995). L'approche historique permet également d'identifier les **processus** effectivement dégradés, et de **sélectionner les actions réparatoires les plus appropriées** (Mika *et al.*, 2010). Enfin, la détermination des trajectoires de dégradation peut aider, dans une certaine mesure, à prévoir les trajectoires de restauration. Il est évident qu'il n'existe pas de symétrie entre le temps d'ajustement aux pressions anciennes et le temps d'ajustement aux futures interventions (Kondolf *et al.*, 2006). Cependant, l'hypothèse est qu'une analyse espace-temps fine peut aider à identifier des indicateurs pour appréhender la réactivité du système, et en **déduire des évolutions potentielles** (Kondolf et Larson, 1995).

De nombreux travaux ont développé une approche géomorphologique rétrospective dans une optique de restauration écologique, par exemple sur l'Ain (Rollet, 2007), l'Isère (Girel *et al.*, 2003), le Rhône (Collilieux *et al.*, 2008), le Danube (Hohenshinner *et al.*, 2005), le Rhin aux Pays-Bas (Schoor *et al.*, 1999), ou encore en Espagne (Ollero, 2010), en Italie (Large et Petts, 1996), aux Etat-Unis (Kondolf et Larson, 1995) et en Australie (Brooks et Brierley, 2004 ; Mika *et al.*, 2010).

Le **Vieux Rhin**, tronçon de 50 km situé à la frontière franco-allemande, représente un terrain d'étude original pour développer une telle approche. Le tronçon a subi de multiples pressions

anthropiques qui se sont succédées dans le temps depuis le 19ème siècle : **correction** de son lit en tresses en un chenal unique pour la protection contre les inondations (milieu du 19ème siècle), **régularisation** au moyen d'épis pour améliorer la navigabilité de la voie d'eau (années 1930), et finalement construction du **barrage de Kembs** et du **Grand Canal d'Alsace** pour la navigation et la production hydroélectrique (1932-1959). Si les principaux impacts environnementaux de ces travaux ont déjà fait l'objet de descriptions générales (Carbiener, 1974 ; Humbert et Descombes, 1985 ; Maire, 1997), en revanche aucune analyse espace-temps fine n'avait été entreprise. De plus, dans le cadre des projets EDF « Erosion maîtrisée » et INTERREG « Redynamisation du Vieux Rhin », la compréhension du fonctionnement morphologique du tronçon fluvial s'est avérée fondamentale pour appréhender la sensibilité du Vieux Rhin aux changements et replacer les évolutions futures dans un contexte pluri-décennal. L'objectif de l'approche historique explorée dans cette thèse est donc double :

1. **reconstituer la trajectoire temporelle d'évolution du Rhin depuis le 19ème siècle** ;
2. **alimenter la réflexion sur les stratégies de restauration et aider à évaluer la sensibilité potentielle de l'hydrosystème aux futures actions**.

2. L'intérêt de la géomorphologie expérimentale : tester les actions et proposer des indicateurs

Si la modélisation peut constituer une aide à la compréhension de certains phénomènes, la diversité des processus fluviaux observés sur le terrain continue à limiter la précision et la capacité de prédiction des outils (Piégay *et al.*, 2005 ; Perrow *et al.*, 2008 ; Stewardson et Rutherfurd, 2008). Certains processus physiques restent en effet difficiles à modéliser, parmi eux les échanges latéraux entre le lit mineur et le lit majeur et les ajustements géomorphologiques associés. Par ailleurs, les formules de transport solide utilisées dans les modèles ont été établies essentiellement en canal artificiel, et pour des conditions hydrauliques, géométriques et sédimentaires bien définies. Appliquées à des cas réels, les taux d'erreur peuvent dépasser 400 % (Cardoso et Neves, 1994 ; Molinas et Wu, 2001, cités par EDF R&D, 2009).

Dans le contexte de la restauration, la nécessité de procéder à des **expérimentations** grandeur nature apparait clairement. Cela permet d'écarter les risques liés à la manipulation du compartiment physique, et d'évaluer les bénéfices environnementaux à attendre. Les données *in situ* collectées au cours du **suivi géomorphologique** permettent en outre d'améliorer la performance des modèles hydrauliques, dont la calibration ne repose ainsi plus uniquement sur des essais en canal (Rollet, 2007).

Le suivi de l'expérience est fondamental sur le plan opérationnel, pour contrôler l'efficacité de l'action et engager si nécessaire des mesures correctives, selon une **logique adaptative** (Woolsey *et al.*, 2005). Cependant, concernant la restauration des cours d'eau en général, les synthèses récentes en France (Adam *et al.*, 2006 ; Malavoi et Souchon, 2010), en Suisse (Woolsey *et al.*, 2007) et aux Etats-Unis (Bash et Ryan, 2002 ; Palmer *et al.*, 2005 ; Kondolf *et al.*, 2007 ; Roni et Beechie, 2012), constatent que les suivis sont encore trop rares, faute de temps, de moyens

financiers et humains, et d'une formulation claire des objectifs en début de projet. Il en résulte un manque de recul conséquent sur la pertinence des actions réalisées. A l'échelle européenne, si la DCE ne prévoit pas que soit évalué un « état géomorphologique » des cours d'eau à l'image de l'état chimique et biologique, il existe cependant un véritable enjeu pour définir des indicateurs de suivi géomorphologique utilisables dans les futurs plans de gestion. Le choix des indicateurs pose les questions de stratégie d'échantillonnage, de reproductibilité, de coût…

La seconde partie de ce travail de thèse porte donc sur le **suivi géomorphologique d'une expérience d'introduction artificielle de charge grossière dans le Vieux Rhin**. Action phare du projet INTERREG, ce test a été engagé dans le but de déterminer la sensibilité du tronçon fluvial à ce type d'opération, afin d'évaluer la faisabilité d'entreprendre une restauration à plus large échelle et sur une temporalité plus longue. Le retour d'expérience doit également permettre de caler les modèles hydrauliques et d'aider, grâce aux résultats de ces derniers, à définir des scénarios d'évolution sur le long terme. La réflexion aborde à la fois l'évaluation des risques environnementaux et les bénéfices écologiques. L'objectif de la géomorphologie expérimentale développée dans cette thèse est donc triple :

1. **mener une analyse de risques**, en termes de stabilité du pavage, de protection des ouvrages existants et de sécurité des personnes ;
2. **estimer les premiers gains écologiques** ;
3. **tester des indicateurs** d'évaluation des effets morphologiques et écologiques d'une restauration engagée sur le long terme et à plus large échelle.

C/ Cadre géographique

1. Généralités sur le système fluvial rhénan

Avec une superficie de bassin versant de 185 000 km² et une longueur de 1320 km, le Rhin est le troisième fleuve d'Europe après la Volga et le Danube. Il est l'unique fleuve d'Europe occidentale à relier les Alpes à la mer du Nord. Son module à l'embouchure est de 2 200 m^3/s. Le bassin rhénan s'étend en tout ou partie sur dix pays. Il est communément divisé en cinq tronçons morphologiquement et hydrographiquement contrastés : le Rhin alpin, le Haut-Rhin, le Rhin supérieur, le Rhin moyen et le Rhin inférieur (fig. 1.20) (CHR, 1977 ; Humbert et Descombes, 1985 ; Uehlinger *et al.*, 2009).

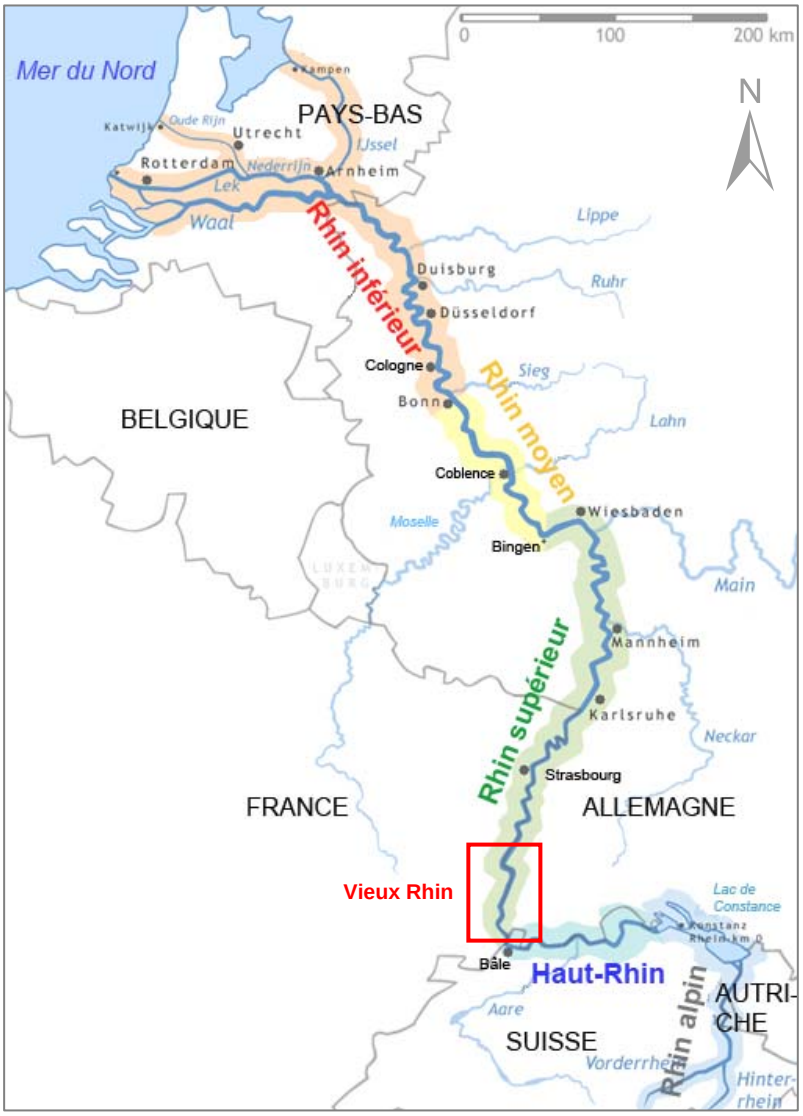


Figure 1.20 : Sectorisation longitudinale du système fluvial rhénan et localisation du tronçon d'étude

Le Rhin alpin, jusqu'au lac de Constance : le fleuve nait en Suisse de la réunion de deux branches, le Rhin antérieur (*Vorderrhein*), qui prend sa source dans le massif du Saint Gothard, à 2 344 m d'altitude, et le Rhin postérieur (*Hinterrhein*), qui nait dans le massif de l'Adula, à 2 216 m. Les deux torrents confluent à Reichenau, à 582 m. Pendant 170 km, la pente décroit de 1-3 m/km à 0,6 m/km, jusqu'au lac de Constance[2]. Ce large lac naturel, d'une superficie de 542 km² et d'une longueur de 76 km, pondère le régime hydrologique et réduit la fourniture sédimentaire en aval : plus de 3 millions de m^3 de sédiments transportés depuis l'amont y sont déposés chaque année, dont 40 000 m^3 d'éléments grossiers (Mikos, 1994).

Le Haut-Rhin, entre le lac de Constance et Bâle : sur ce tronçon, le fleuve est confiné entre les massifs de la Forêt Noire et du Jura, et il constitue la frontière entre la Suisse et l'Allemagne. Il franchit des calcaires du Jurassique au niveau des chutes de Schaffhouse. Ses principaux affluents sont la Thur et l'Aar. Ce dernier est plus important que le Rhin en termes de débit et de superficie de bassin versant. Le fleuve s'écoule avec une pente de 0,8-1,3 %. Après 140 km de lit régulier et encaissé, il parvient à Bâle dans la vaste plaine du fossé rhénan.

Le Rhin supérieur, entre Bâle et Bingen : le fossé d'effondrement rhénan s'étend sur 35 km de large et 310 km de long en aval de Bâle. Il est bordé par les massifs de la Forêt Noire et de l'Odenwald à l'Est, et par les Vosges et le Palatinat à l'Ouest. Le Rhin constitue la frontière entre la France et l'Allemagne sur environ 180 km. Sa pente est de 0,1 % dans le secteur du Vieux Rhin. Le fleuve reçoit peu d'affluents hormis l'Ill. Puis, le Neckar conflue à Mannheim et le Main à Mayence. Entre Mayence à Bingen, la pente est descendue à 0,025 %.

Le Rhin moyen, entre Bingen et Cologne : après la confluence avec la Nahe, le fleuve franchit le Massif Schisteux Rhénan sur 110 km, jusqu'à Bonn. Sa pente augmente à 0,04 %. Le fleuve reçoit successivement les eaux de la Lahn et de la Moselle. Entre Bonn et Cologne, il prend à nouveau l'aspect d'un cours d'eau de plaine avec de larges méandres.

Le Rhin inférieur, jusqu'à la mer : le fleuve reçoit les eaux de la Ruhr, de l'Emscher et de la Lippe. Sa pente diminue de 0,023 % à 0,008 %. Peu après son entrée dans les Pays-Bas, le lit se divise en trois branches principales, l'Ijssel, la Lek et la Waal. Le delta est formé par la confluence du Rhin et de la Meuse.

Le Vieux Rhin, tronçon d'étude de la présente thèse, est situé dans la moitié méridionale du Rhin supérieur, entre les villes de Kembs et de Breisach (fig. 1.20).

[2] Le kilométrage officiel du Rhin débute au pont de Constance (PK 0).

2. Physiographie du Rhin supérieur

2.1. Héritages géologiques et géomorphologiques

La formation du fossé rhénan (*Upper Rhine Graben*) a débuté à l'Eocène moyen (-49 à -37 millions d'années). En Alsace, l'effondrement total varie entre 2 000 et 4 000 m (Vogt, 1984, cité par Schmitt, 2010). C'est seulement depuis le début du Pléistocène (-2,6 millions d'années) que le Rhin s'écoule en direction de la mer du Nord *via* le fossé d'effondrement. Auparavant, la branche alpine s'est écoulée successivement vers le Danube et vers le Rhône (Preusser, 2008, cité par Schmitt, 2010).

La glaciation würmienne (-70 000 à -10 000 ans) survenue à la fin du Pléistocène a participé à constituer un important cône de déjection au débouché de la vallée du Haut-Rhin, lorsque le glacier alpin s'étendait jusqu'aux environs de Bâle. Le manteau d'alluvions fluvio-glaciaires (galets, graviers, sables, limons…) déposées en aval atteint par endroits une épaisseur de 250 m. Il renferme la plus importante réserve d'eau souterraine d'Europe occidentale (Simler *et al.*, 1979, cités par Schmitt, 2010).

Au cours de l'Holocène (derniers 10 000 ans), le profil en long du Rhin s'est ajusté en réponse à la modification de plusieurs facteurs de contrôle du système fluvial (Schmitt, 2010) :

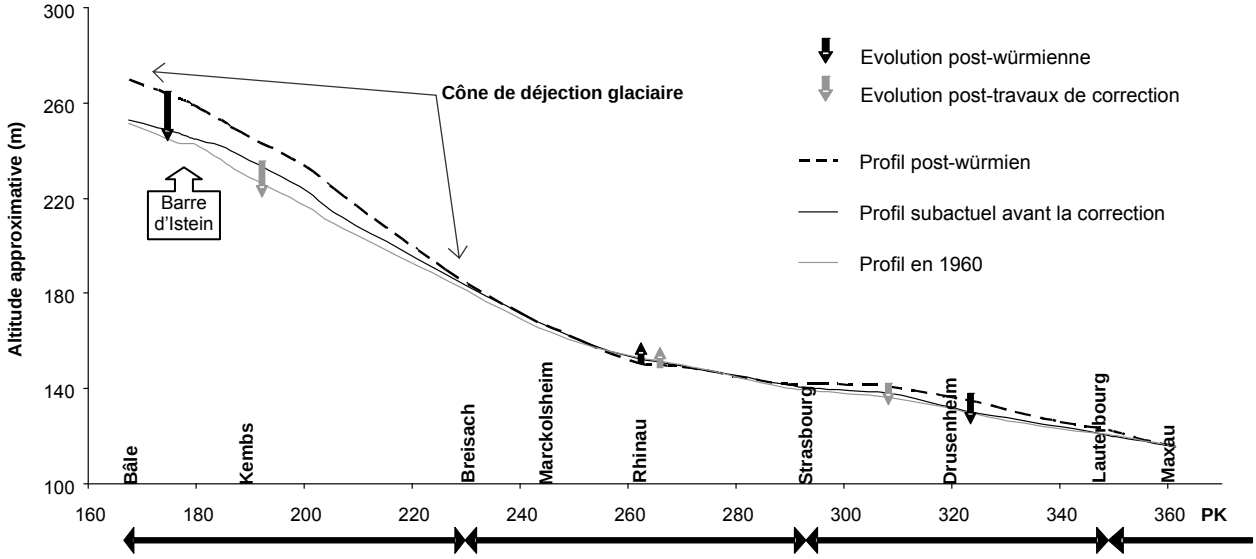
- une diminution globale des débits liquides et solides avec le réchauffement climatique (Hirth, 1971) ;
- un piégeage des alluvions dans les lacs suisses formés par le retrait des glaciers alpins, ce qui a fortement réduit la fourniture sédimentaire et a pondéré le régime hydrologique (Walser, 1959 ; Hirth, 1971) ;
- des mouvements tectoniques positifs au sud de Mulhouse (Nivière *et al.*, 2006) et négatifs à hauteur de Marckolsheim, voire jusqu'au nord de Strasbourg (Jung et Schlumberger, 1936 ; Vogt, 1980).

En conséquence, le lit du Rhin a connu les évolutions suivantes (Schmitt, 2010) :

- **secteur Bâle - Breisach : incision pouvant atteindre 25 m** ;
- secteur Breisach - Strasbourg : quasi-stabilité du profil en long, voire exhaussement à hauteur de Rhinau, lié à la subsidence et au dépôt des alluvions déstockées en amont ;
- secteur Strasbourg - Maxau : incision essentiellement d'origine tectonique, de 10 à 20 m.

2.2. Structuration longitudinale de la plaine alluviale du Rhin supérieur

Carbiener (1969, 1970,1983) s'est basé sur l'évolution post-würmienne du profil en long, sur la morphologie du fond de vallée et sur le tracé du fleuve en 1828 pour sectoriser le Rhin supérieur en quatre zones homogènes (fig. 1.21). La **zone des tresses** s'étend entre Bâle et Breisach (soit le futur Vieux Rhin). D'autres types de chenaux étaient également présents dans ce secteur, en proportion réduite par rapport aux tresses. Il s'agit des *Giessen*, *Brunnenwasser*, *Altwasser* et *Muhlbach*, termes communément employés dans la littérature locale pour décrire les anciens bras du Rhin, et dont le fonctionnement hydro-morphologique s'apparente à des **anastomoses** (Carbiener, 1983 ; Carbiener et Dillmann, 1992 ; Schmitt, 1995).



	Zone des tresses	Zone des tresses et anastomoses	Zone des anastomoses et méandres naissants	Zone des méandres
Largeur hydrosystème	2,9 km	5,9 km	4,9 km	5,5 km
Pente talweg	0,93 ‰	0,66 ‰	0,46 ‰	0,31 ‰
Puissance spécifique	45 $W.m^{-2}$	33 $W.m^{-2}$	26 $W.m^{-2}$	22 $W.m^{-2}$
Nbre. moyen tresses[1]	7,1	7,4	5,6	4,0
Nbre. moyen anastomoses[1]	2,6	4,6	2,8	4,5
Sinuosité talweg	1,11	1,22	1,33	1,45

[1] Nombre moyen de chenaux par profil en travers d'après la carte de 1828

Figure 1.21 : Gradient longitudinal du Rhin supérieur entre Bâle et Maxau et caractérisation synthétique des secteurs du Rhin sauvage (1828) (d'après Carbiener, 1970 ; Carbiener et Dillmann, 1992 ; Schmitt, 2010)

Kleinas (2003), Schmitt *et al.* (2007) et Schmitt (2010) ont cherché à affiner la sectorisation de Carbiener. A partir du tracé du fleuve en 1828, les auteurs ont retenu 27 variables relatives à la morphologie générale (sinuosité du talweg, largeur de l'hydrosystème), aux bancs, aux îles (nombre, distance au talweg, longueur moyenne…) et aux types de chenaux (distance au talweg, nombre). Les variables ont été mesurées sur 34 tronçons de 5 km de long entre Bâle et

Lauterbourg. Une analyse en composantes principales et une classification ascendante hiérarchique ont permis d'identifier plusieurs tronçons homogènes dominés par les tresses, les anastomoses et les méandres. Six variables de contrôle susceptibles d'expliquer l'évolution longitudinale ont été testées. Les analyses de régression ont montré que **la pente et l'évolution verticale holocène** sont les variables les plus discriminantes (fig. 1.22) (Schmitt, 2010).

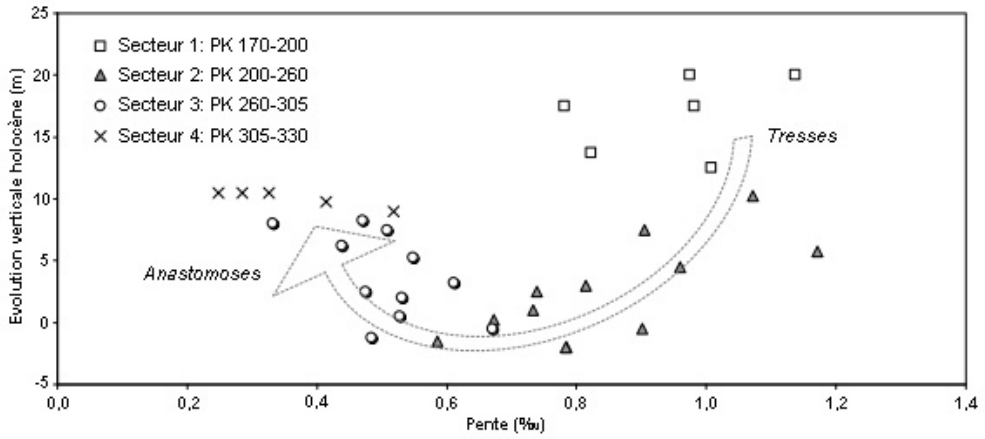


Figure 1.22 : Evolution des secteurs du Rhin supérieur en fonction de la pente et de l'évolution verticale holocène (modifié d'après Schmitt, 2010)

2.3. Régime hydrologique du Rhin supérieur

La mesure des débits du Rhin à Bâle a débuté en janvier 1808 (CECR, 1978). Dans un premier temps, le niveau du plan d'eau n'était relevé qu'une fois par jour, à 12 h. On passa plus tard, notamment pour les niveaux élevés, à trois observations par jour, complétées occasionnellement par des indications sur l'heure de formation et la hauteur des pointes de crue. Depuis janvier 1869, le niveau est relevé en continu par un limnigraphe (CECR, 1978). Pour les besoins de l'étude, les débits maximaux, minimaux et moyens mensuels avant 1869 ont été tirés de Ghezzi (1926), et les débits maximaux et moyens journaliers après 1869 ont été acquis auprès de l'Office Fédéral de l'Environnement suisse (OFEV).

Le bassin versant suisse a connu d'importants travaux hydrauliques au 19ème siècle. La pièce maîtresse de la « **première correction des eaux du Jura** » (1868 -1890) fut la dérivation de l'Aar dans le lac de Bienne, afin d'assécher les terrains riverains et retarder la pointe de crue à la confluence avec l'Emme (Chavaz et Gygax, 1964). Ces interventions ont eu pour effet de modifier profondément le régime des crues du Rhin à Bâle, si bien que l'hydrologie contemporaine est communément analysée à partir de 1891 (figures 1.23, 1.24 et tableau 1.3) (CECR, 1978).

Le régime hydrologique du Rhin en aval de Bâle est largement conditionné par le bassin alpin. Il est de type **nivo-glaciaire**, les deux mois de plus hautes eaux étant juin et juillet (CHR, 1977) (fig. 1.23).

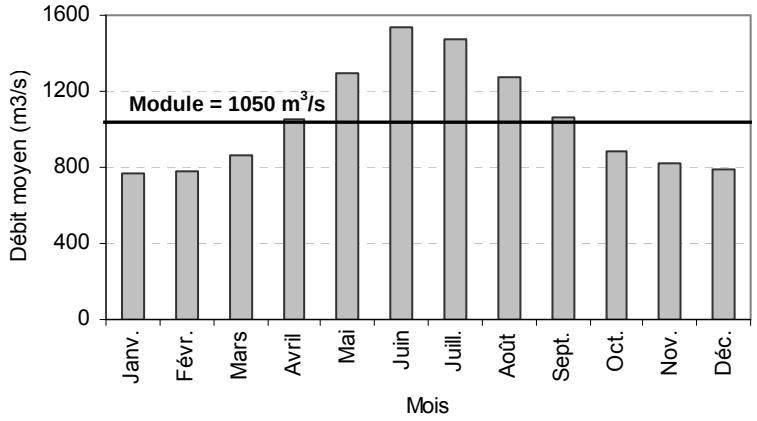


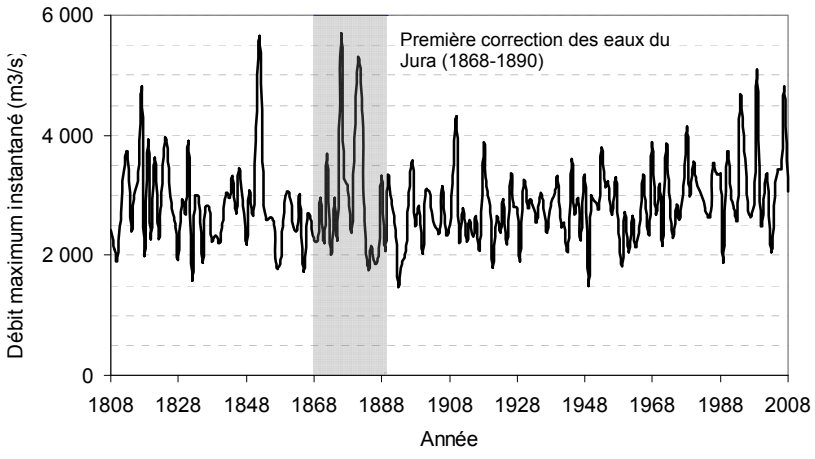
Figure 1.23 : Débits moyens mensuels interannuels et module du Rhin à Bâle sur la période 1891-2008

Sur la période 1891-2008, le Rhin à Bâle présente un **module de 1050 m³/s** et un étiage interannuel (moyenne des *QMNA*) de 450 m³/s. La crue centennale est estimée à 4650 m³/s et la crue biennale à 2800 m³/s (tableau 1.3). **Trois crues centennales ont été enregistrées au cours de ces 20 dernières années**, en mai 1994, mai 1999 et août 2007. Il s'agit des évènements les plus importants depuis 1891, et des 7ème, 4ème et 5ème plus importants depuis 1808 (fig. 1.24).

Période de retour	Q_2	Q_5	Q_{10}	Q_{30}	Q_{50}	Q_{100}	Q_{300}
Débit (m³/s)	2800	3350	3700	4200	4400	4650	5100

Tableau 1.3 : Débits instantanés du Rhin à Bâle sur la période 1891-2008 (ajustement de Pearson III, OFEV)

a)



b)

Rang	Année	Jour	Mois	Q max instant. (m³/s)
1	1876	13	06	5700
2	1852	18	09	5642
3	1881	03	09	5280
4	1999	12	05	5090
5	2007	09	08	4810
6	1817	06	07	4790
7	1994	09	05	4640
8	1882	28	12	4615
9	1910	16	06	4300
10	1978	08	08	4150
11	1824	26	08	3960
12	1819	21	12	3925
13	1851	02	08	3903
14	1831	05	09	3891
15	1999	22	02	3890
16	1968	22	09	3890
17	1995	01	06	3860
18	1918	24	12	3857
19	1972	23	11	3850
20	1953	27	06	3800

Figure 1.24 : a) Crues du Rhin à Bâle entre 1808 et 2008 (débits maximum annuels instantanés). b) 20 plus grandes crues enregistrées à Bâle depuis 1808 (débits maximum mensuels instantanés) ; les lignes grisées concernent la période avant 1890

3. Contexte historique de l'aménagement du Vieux Rhin

Le Rhin entre Kembs et Breisach a subi d'importants travaux hydrauliques entre le milieu du 19ème siècle et le milieu du 20ème siècle, pour satisfaire essentiellement à des besoins de protection contre les inondations, d'amélioration de la navigabilité et d'exploitation du potentiel énergétique du fleuve. La chronologie et les modalités de réalisation des trois phases d'aménagement (correction, régularisation, canalisation) sont explicitées dans les paragraphes suivants en s'appuyant sur diverses sources bibliographiques (rapports d'ingénieurs, monographies, articles scientifiques, mémoires…) collectées auprès des archives et des services de gestion des eaux d'Alsace et du Baden-Württemberg.

3.1. Le Rhin « sauvage » (début du 19ème siècle)

Jusqu'en 1840, le Rhin entre Bâle et Lauterbourg était un fleuve encore à l'état sauvage, composé de chenaux multiples, de bancs graveleux, d'îles végétalisées et de hauts-fonds gênant la navigation, sur une largeur pouvant dépasser 3 km (fig. 1.25) (Marchal et Delmas, 1959 ; Maire, 1997). L'intensité de la dynamique fluviale a entrainé la disparition de plusieurs villages riverains depuis le Moyen Age (Werner, 1928 ; Schmitt *et al.*, in prep.). Les bras morts laissés par la décrue étaient propices à l'insalubrité ; le paludisme régnait à l'état endémique à cette époque (Tricart et Bravard, 1991). L'instabilité du fleuve posait également des problèmes de délimitation de la frontière entre l'Alsace et le Grand Duché de Bade (Kintz, 2001), et de fixation des limites de parcelles entre propriétaires (Kaufmann, 1954).

Jusqu'au début du 19ème siècle, les populations riveraines ont cherché à se protéger des débordements par des aménagements locaux : construction de levées en terre, seuils artificiels sur les affluents, tentatives de pose d'épis en lit mineur… (Migneret, 1862). Mais ces interventions restaient fragmentées et ne permettaient pas d'éradiquer durablement les inondations (Werner, 1928 ; Decoville-Faller, 1961 ; Schmitt *et al.*, in prep.).

En 1789, le général français d'Arçon présente le premier projet global de correction du cours du Rhin. Il consiste à fixer un tracé naturel (d'Arçon, 1789, cité par Humbert et Descombes, 1985) : *« (…) flatter les penchants du fleuve ; ne jamais heurter les directions qu'il affecte ; profiter de tous les creusages déjà opérés par le grand courant, et dans les parties à redresser, solliciter le courant lui-même à creuser le nouveau lit auquel on se propose de l'assujettir ; aboutir aux points nécessaires par des arrondissements moelleux, extrêmement doux ; enfin, aider toujours la nature et ne contraindre l'inconstance du fleuve qu'en l'invitant à suivre des routes plus faciles ».* Cette citation est importante car elle n'est pas sans rappeler les principes de la régularisation, qui sera entreprise un siècle plus tard.



Figure 1.25 : Le Rhin en tresses et anastomoses vers 1830 : vue vers l'amont depuis le rocher d'Istein (peinture de P. Birmann, 1758-1844)

En 1812, le colonel badois Tulla propose de fixer un tracé peu sinueux, dans le but de provoquer une incision et ainsi réduire les débordements (Tulla, 1825) : *« Il est évident qu'un terrain riverain est d'autant plus exposé aux inondations que le niveau du sol est plus bas, par rapport à celui des plus grandes ou des moyennes eaux du fleuve. La mesure la plus efficace pour éloigner tous les maux qui résultent d'un niveau trop bas du sol, (…) c'est de* ***faire baisser le niveau des fleuves et des rivières****, qui, pendant leur hauteur moyenne, attaquent les rives, et qui, pendant les grandes eaux, deviennent dangereuses par les inondations. (…) La seule opération par laquelle on puisse s'opposer aux ravages des fleuves et en faire baisser le niveau, (…) consiste : à donner aux fleuves la direction la plus droite possible, à couper ou barrer les bras secondaires, (…) en un mot, à* ***rectifier les fleuves****. »*

Les guerres de la Révolution contraignirent la France à abandonner le projet du général d'Arçon. C'est le projet de Tulla qui est finalement approuvé par la Convention du 5 avril 1840 entre la France et le Grand Duché de Bade. Les travaux sont réalisés entre Bâle et Strasbourg de 1842 à 1876.

3.2. La correction (1842-1876)

La correction a consisté à fixer le lit du fleuve **entre deux digues de basses eaux distantes de 200 à 250 m**, selon un tracé régulier formé de lignes droites et d'arcs de cercles d'un rayon minimum d'environ 1 000 m (fig. 1.26) (Migneret, 1862). Ce lit était dimensionné pour un débit d'environ **2 000 m^3/s** (Bensing, 1966). Les digues ont été construites en sections de 600 à 900 m de long séparées par des intervalles de 50 à 60 m, ce qui ménageait une issue aux crues jusqu'aux digues de hautes eaux implantées environ 1 km en retrait (Tricart et Bravard, 1991 ; Lévy, 1982).

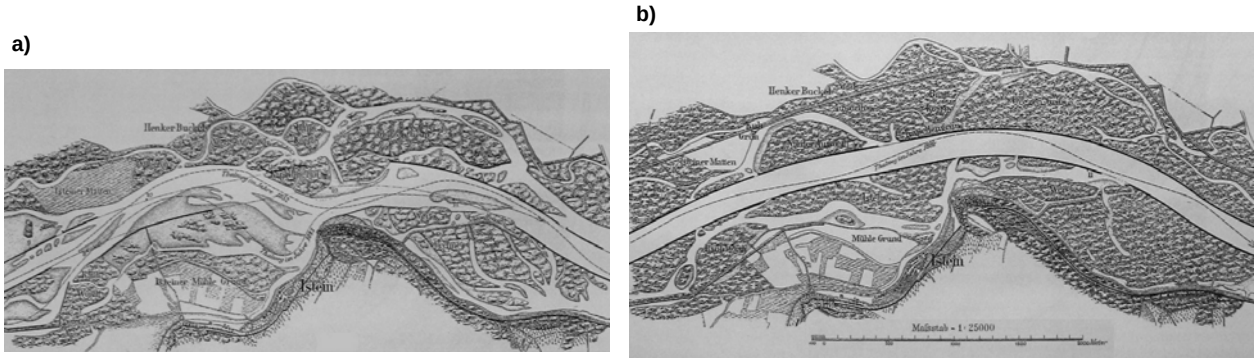


Figure 1.26 : Evolution du tracé en plan du Rhin au niveau d'Istein entre 1843 (a) et 1884 (b) (d'après Honsell, 1885)

Les ouvrages ont été construits en fascines remplies de pierres, recouvertes par des enrochements. L'arrière des digues était consolidé par de la terre et des graviers (Migneret, 1862 ; Honsell, 1885 ; Lévy, 1982). Le mode de construction a évolué au cours des travaux, les digues de basses eaux ayant dû être renforcées après les grandes crues de 1851 et 1852 (cf. fig. 1.24, b) (fig. 1.27, a) (Johnstone, 2010). L'essentiel de l'aménagement était achevé en 1876, néanmoins les grandes crues de 1876, 1881 et 1882 nécessitèrent de nouvelles consolidations (fig. 1.27, b) (Gallusser et Schenker, 1992).

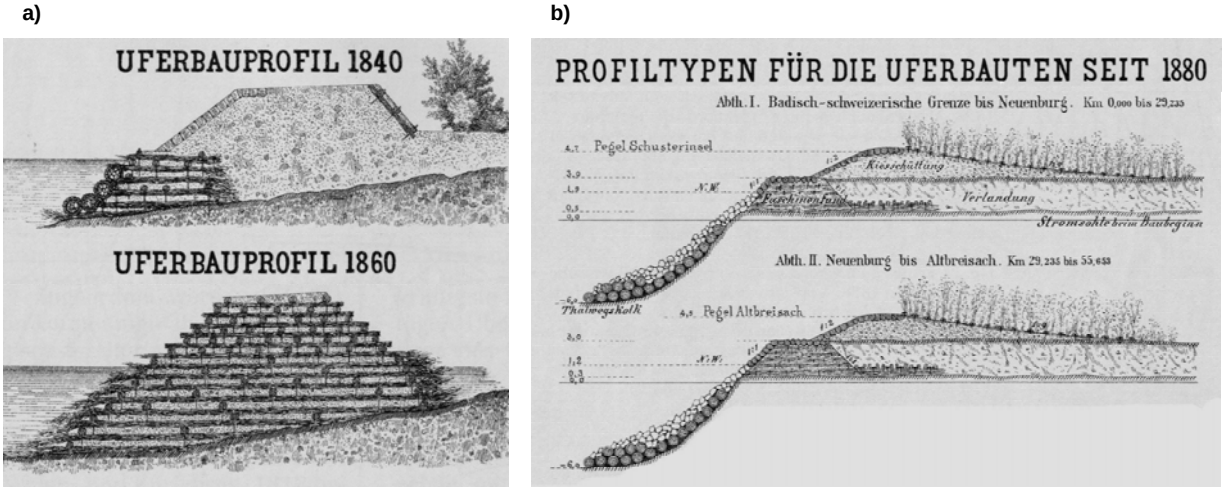


Figure 1.27 : Exemples de digues de correction construites en 1840, 1860 (a) et après 1880 (b) (d'après Honsell, 1885)

Au terme de la correction, le Rhin fut raccourci de 32 km entre Bâle et Lauterbourg, soit 14 % de son cours. L'aménagement provoqua l'incision prévue par Tulla, mais celle-ci dépassa largement les attentes initiales : suite à un enfoncement de 4 m dans la partie amont, en 1928 l'**affleurement rocheux d'Istein** constitue un seuil infranchissable par les bateaux 332 jours par an (fig. 1.28 et 1.29) (Humbert et Descombes, 1985). Plus à l'aval, l'augmentation des vitesses d'écoulement et le déplacement aléatoire des bancs compliquaient la navigation (Descombes, 1981). En 1909, C. Grad décrit la mobilité des formes dans le lit corrigé : *« Pendant que le bateau file de toute la rapidité du courant, j'entends autour de moi (…) quelque chose comme le bruit de la grêle contre les vitres. (…) Ce*

bruit, me dit un des ingénieurs, vient du mouvement des cailloux, qui déplace au fond de l'eau les bancs de gravier ».



Figure 1.28 : Vue de la barre d'Istein depuis l'aval (cliché F. Arnaud, 2009)

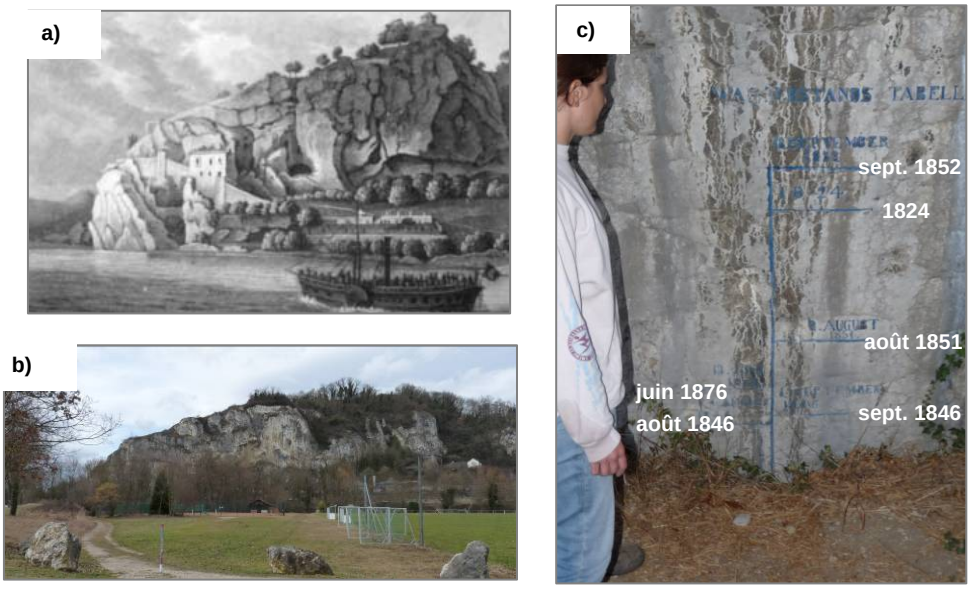


Figure 1.29 : Effets de la correction au niveau du rocher d'Istein : a) Rocher d'Istein au début du 19ème siècle (peinture présentée sur le panneau d'information du rocher d'Istein, date inconnue). b) Rocher d'Istein en 2010. c) Echelle des hautes eaux : la crue de septembre 1852 (5642 m^3/s) a atteint 1,36 m au-dessus du sol. A la fin de la correction, le lit s'est incisé et la plus grande crue jamais enregistrée, en juin 1876 (5700 m^3/s), est 89 cm plus bas que celle de 1852 (clichés F. Arnaud, 2010)

3.3. La régularisation (1931-1950)

3.3.1. « Rhin libre ou canal ? »

Au début du 20ème siècle, deux thèses s'affrontent pour rétablir la navigation jusqu'à Bâle : construire un canal latéral, ou aménager le Rhin lui-même (Antoine, 1922 ; Libault, 1924). La figure 1.30 présente une série de cartes postales éditées au début des années 1920 par les

défenseurs du projet du canal latéral ; celui-ci est comparé à la régularisation, qui conserve le Rhin *« libre et sauvage »*.

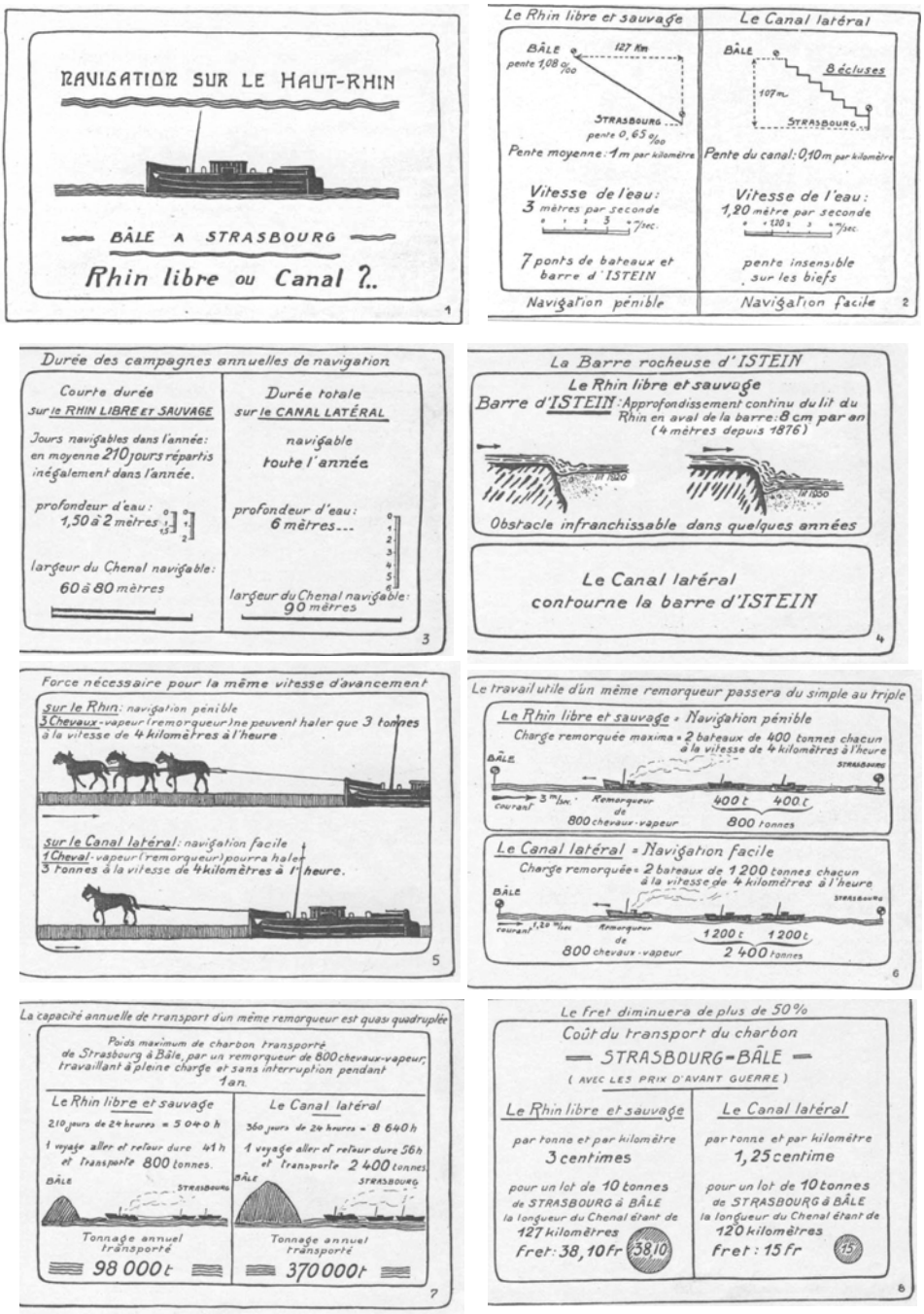


Figure 1.30 : Cartes postales éditées par les défenseurs du projet du canal latéral (années 1920, fourni par E. Dillmann)

Poitrat (1950) exposera *a posteriori* les avantages et inconvénients de ces deux aménagements qui furent finalement entrepris en même temps : *« (…) si la France n'avait pas construit Kembs en 1928, la Suisse aurait été obligée d'en entreprendre la construction à ses frais vers 1934 car le Rhin aurait pratiquement cessé à cette date d'être navigable à la barre d'Istein » ; « Le moment semble maintenant proche où les travaux de canalisation et de régularisation pourront être harmonieusement poursuivis dans une complète unité de vue des trois puissances intéressées »*.

La canalisation et la régularisation ont été approuvées en 1925 par la Commission Centrale pour la Navigation du Rhin (protocole CCNR 1925-I-20). Les deux projets n'étaient pas rivaux : la régularisation visait une amélioration rapide de la navigabilité, tandis que le canal latéral allait prendre 30 ans pour être réalisé, également pour la production hydro-électrique (Poitrat, 1950).

3.3.2. Principes de la régularisation

La régularisation a été entreprise selon les plans de l'ingénieur badois Honsell, inspiré des travaux de Girardon sur le Rhône (Humbert et Descombes, 1985) et de Fargue sur la Garonne (Lévy, 1982). Les épis ont été construits en aval de Strasbourg entre 1907 et 1924, puis entre Strasbourg et Istein à partir de 1931. Sur ce secteur, les travaux ont été financés à 60 % par la Suisse et à 40 % par l'Allemagne, le WSD de Freiburg dirigeant les opérations avec l'appui technique de la France (Marchal et Delmas, 1959). L'ensemble des travaux est consigné dans le rapport d'un ingénieur du WSD (Schneider, 1966).

L'objectif était de créer un chenal d'étiage (540 m^3/s à Bâle) de **75 m de large, 2 m de profondeur et navigable au moins 318 jours par an** (Dpt. Féd. Int., 1929). Il s'agissait également de freiner l'incision du lit, en créant un tracé sinusoïdal censé ralentir le processus. Des épis ont été implantés environ tous les 100 m, chaque « champ d'épi » de 1 à 1,5 km de longueur alternant de manière régulière entre les deux rives (fig. 1.31) (Dpt. Féd. Int., 1929 ; Schneider, 1966).

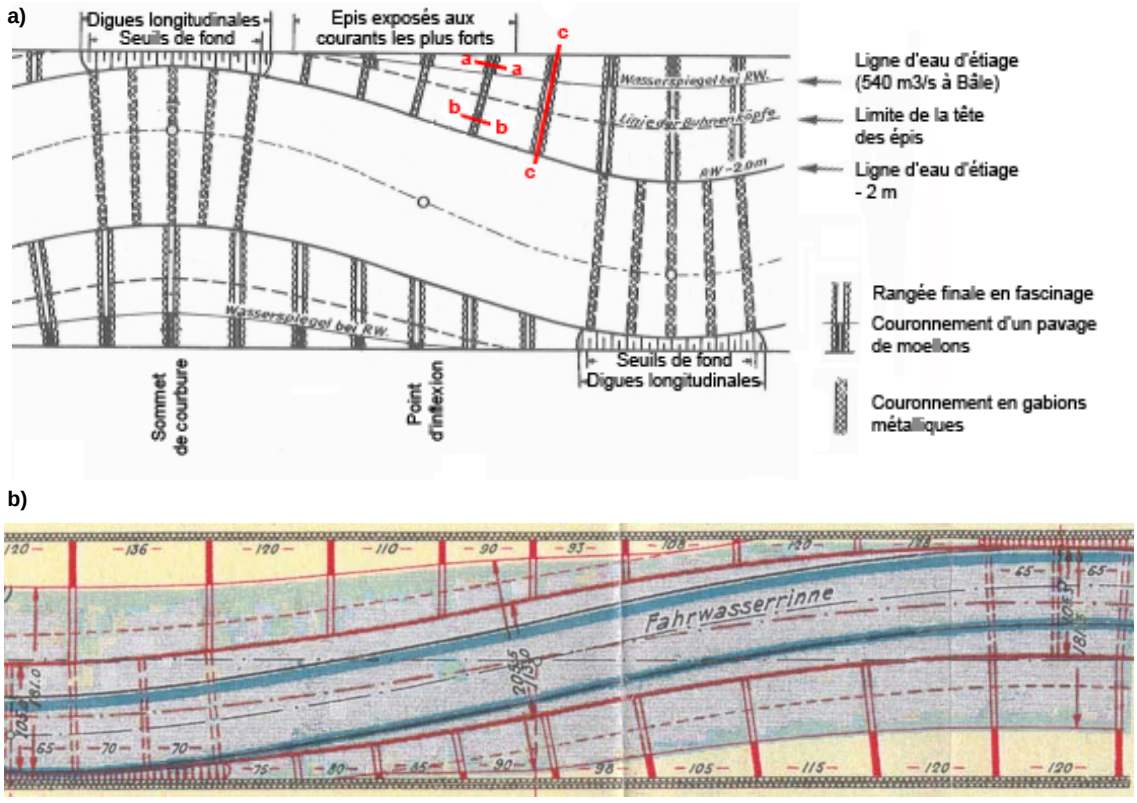


Figure 1.31 : Plans schématiques de disposition des ouvrages de la régularisation : a) Informations sur les matériaux de construction. Les profils a-a, b-b et c-c sont montrés dans la fig. 1.32, a (d'après Schneider, 1966). b) Informations sur les distances entre les ouvrages et sur la largeur du chenal navigable (en mètres) (d'après Dpt. Féd. Int., 1929)

Les épis ont été construits en immergeant une rangée de gabions en fascinage ou en grillage de 8 à 10 m de longueur, remplis de moellons et placés dans le sens du courant. Lorsque les graviers transportés et déposés atteignaient la hauteur de la rangée, une seconde était placée, et l'opération renouvelée jusqu'à la hauteur souhaitée. L'épi était ensuite couronné d'un pavage de moellons ou de gabions métalliques (fig. 1.31 et 1.32) (Poitrat, 1952 ; Lévy, 1982).

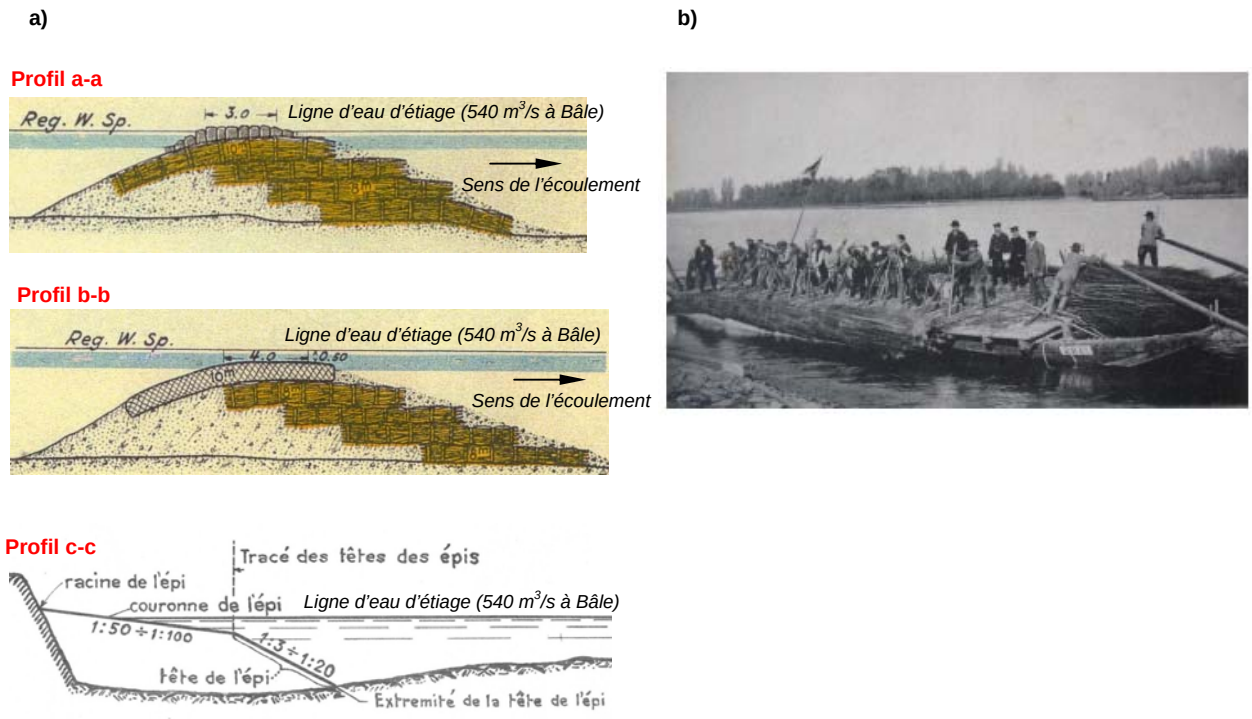


Figure 1.32 : a) Profils schématiques des épis (d'après Dpt. Féd. Int., 1929 ; Commission des travaux, 1953). b) Installation des gabions en fascinage (environ 1935, carte postale fournie par E. Dillmann)

Ce mode de construction, par étapes successives, explique que les dates de chantier soient données en termes de *« premiers travaux »* et de *« travaux supplémentaires »*. Les premiers travaux ont été réalisés entre 1931 et 1935. En 1939, les épis étaient construits à 85 % (Schneider, 1966).

La régularisation améliora très rapidement le trafic fluvial jusqu'à Bâle, dès 4 ou 5 ans après le démarrage des travaux (Marchal et Delmas, 1959). Cependant, le problème principal restait l'incision, qui mettait notamment en péril les épis. Des essais sur modèle réduit réalisés par le Laboratoire d'Hydraulique de Karlsruhe en 1937 (cités par Marchal et Delmas, 1959) ont comparé les volumes érodés sur une période de 30 ans dans le secteur de Breisach, avec et sans épis. L'étude a montré que les épis ralentissaient l'incision au cours de la première décennie, puis le phénomène s'inversait, et pendant la troisième décennie le volume érodé était plus grand qu'en l'absence d'épis. Plusieurs travaux ont tenté de fixer le fond du lit.

3.3.3. Essais de fixation du lit

Les épis exposés aux courants les plus forts, et donc à l'incision la plus importante, étaient ceux situés en sortie de courbe (cf. fig. 1.31, a). Il était donc prévu de construire des **groupes de 5**

seuils de fond au sommet des courbures, raccordés aux berges par des « digues longitudinales », et raccordés aux épis en face de manière à former un ouvrage continu en travers du lit (fig. 1.31) (Marchal et Delmas, 1959). Ce système devait assurer la fixation complète du profil en travers, et l'arrêt de l'incision. Cependant, des essais menés par le Laboratoire d'Hydraulique de Karlsruhe entre 1937 et 1942 ont conduit à renoncer à ce dispositif, présentant les inconvénients d'accélérer l'écoulement au droit des groupes, et de former des mouilles profondes en aval, ce qui était incompatible avec la navigation (Marchal et Delmas, 1959 ; Schneider, 1966 ; Jamme, 1969). Seules quelques amorces de seuils de fond furent construites (Marchal et Delmas, 1959).

L'Ecole Polytechnique de Zurich procéda à une autre étude sur la mise en œuvre d'un revêtement continu de gros matériaux, censé former un **pavage artificiel** pour stopper l'incision (Schneider, 1966 ; Jamme, 1969). Un test grandeur nature fut réalisé en 1949, sur une section de 1 150 m en aval du canal de fuite de Kembs. Le revêtement était constitué de blocs entre 15 et 38 cm de diamètre (fig. 1.33).

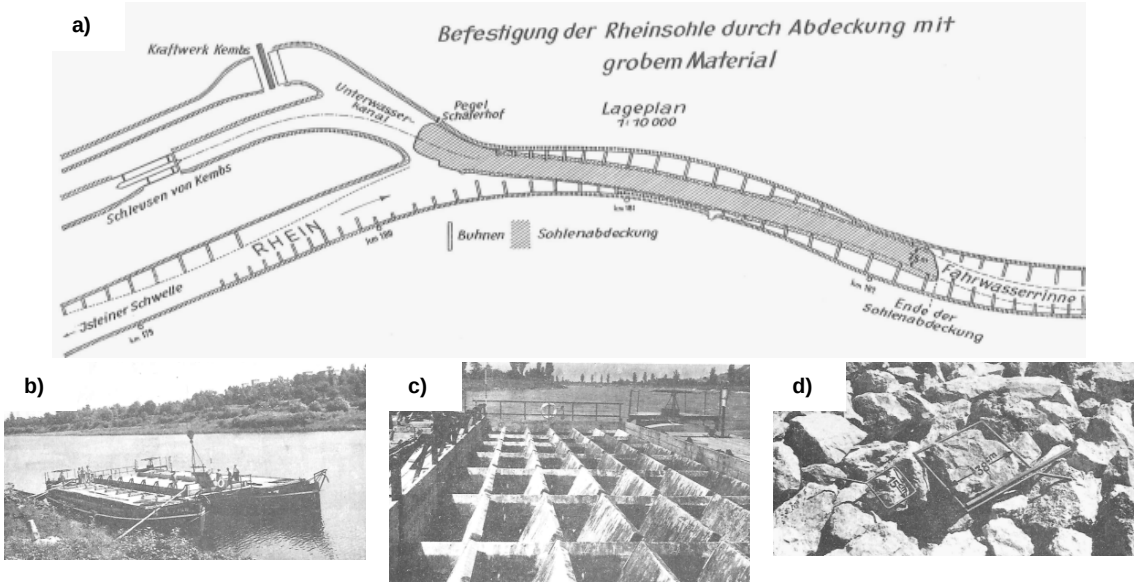


Figure 1.33 : Expérimentation portant sur la mise en place d'un pavage artificiel en aval du canal de fuite de Kembs en 1949 : a) Plan schématique de localisation. b) et c) Vues des barges de déversement des matériaux. d) Vue des matériaux entre 15 et 38 cm de diamètre (Schneider, 1966)

Mais, compte-tenu de résultats décevants (destruction du pavage par les hélices des remorqueurs, affouillements dangereux pour la navigation), du coût extrêmement élevé de l'opération si elle avait dû être entreprise sur tous les secteurs en incision (dépassant très largement le coût des épis seuls), et enfin de la substitution progressive du Grand Canal d'Alsace au Rhin régularisé, ces essais furent abandonnés (Poitrat, 1950 ; Marchal et Delmas, 1959 ; Schneider, 1966). Cependant, il est à noter le caractère particulièrement innovant de ces recherches, tandis que des expérimentations similaires sont entreprises actuellement sur les secteurs incisés du Danube (Jungwirth, 2008).

L'incision progressant, et l'entretien des épis ayant été interrompu pendant la Seconde Guerre Mondiale, un quart des moellons utilisés entre Istein et Strasbourg a disparu à cette époque (Poitrat, 1950 ; Kaufmann, 1954). L'entretien des ouvrages fut définitivement arrêté avec la mise en eau des biefs du Grand Canal d'Alsace.

3.4. Le barrage de Kembs et le Grand Canal d'Alsace (1929-1959)

R. Koechlin, fondateur de la Société des Forces Motrices du Haut-Rhin, propose en 1902 un projet de canal latéral qui contournerait la barre d'Istein, soit le futur bief de Kembs (Libault, 1924). Le traité de Versailles de 1919 confère à la France *« le droit exclusif à l'énergie produite par l'aménagement du fleuve »* (art. 358). La construction du Grand Canal d'Alsace est finalement approuvée en 1925.

3.4.1. Principes de la canalisation

Le barrage et le bief de Kembs ont été construits entre 1928 et 1932. Le barrage de dérivation est un ouvrage de basse chute, composé de cinq passes de 30 m de large fermées par des vannes de 12 m de haut. Il relève le niveau amont du fleuve d'environ 11 m, et le remous s'étend jusqu'à Bâle, 4 km en amont. En 1946, EDF a pris en charge les aménagements et a construit les biefs successifs d'Ottmarsheim, Fessenheim et Vogelgrün en 1952, 1956 et 1959 (fig. 1.34 et 1.35) (Lefoulon, 1959). Aujourd'hui, la chaîne hydro-électrique du Grand Canal d'Alsace produit près de 4 milliards de kWh par an, soit plus de 20 % des besoins en électricité de l'Alsace (EDF, 2007).

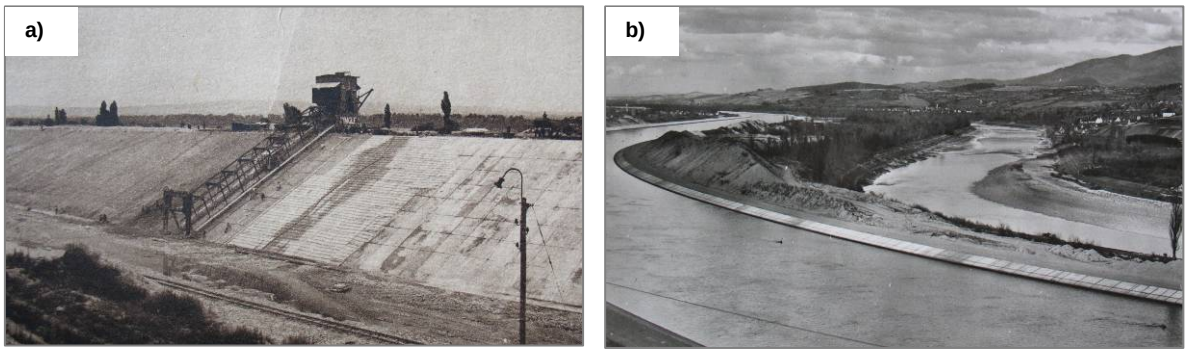


Figure 1.34 : a) Chantier de Kembs : machine à bétonner les talus (1930). b) Chantier d'Ottmarsheim : vue sur le Grand Canal d'Alsace et le Vieux Rhin (environ 1950) (cartes postales fournies par E. Dillmann)

Le Grand Canal d'Alsace a une largeur de 150 m au plan d'eau, 80 m au fond et une profondeur moyenne de 12 m. Il prend naissance 500 m en amont du barrage de Kembs. A l'amont de chaque aménagement, il se divise en un canal de force motrice (usine) et un canal de navigation (écluses) (EDF, 1982). A la mise en service de chaque bief, l'ancien canal de fuite reliant le chantier au Rhin corrigé a été partiellement comblé, ce qui explique que le Vieux Rhin actuel soit plus large au niveau des trois « bouchons » de Kembs, Ottmarsheim et Fessenheim.

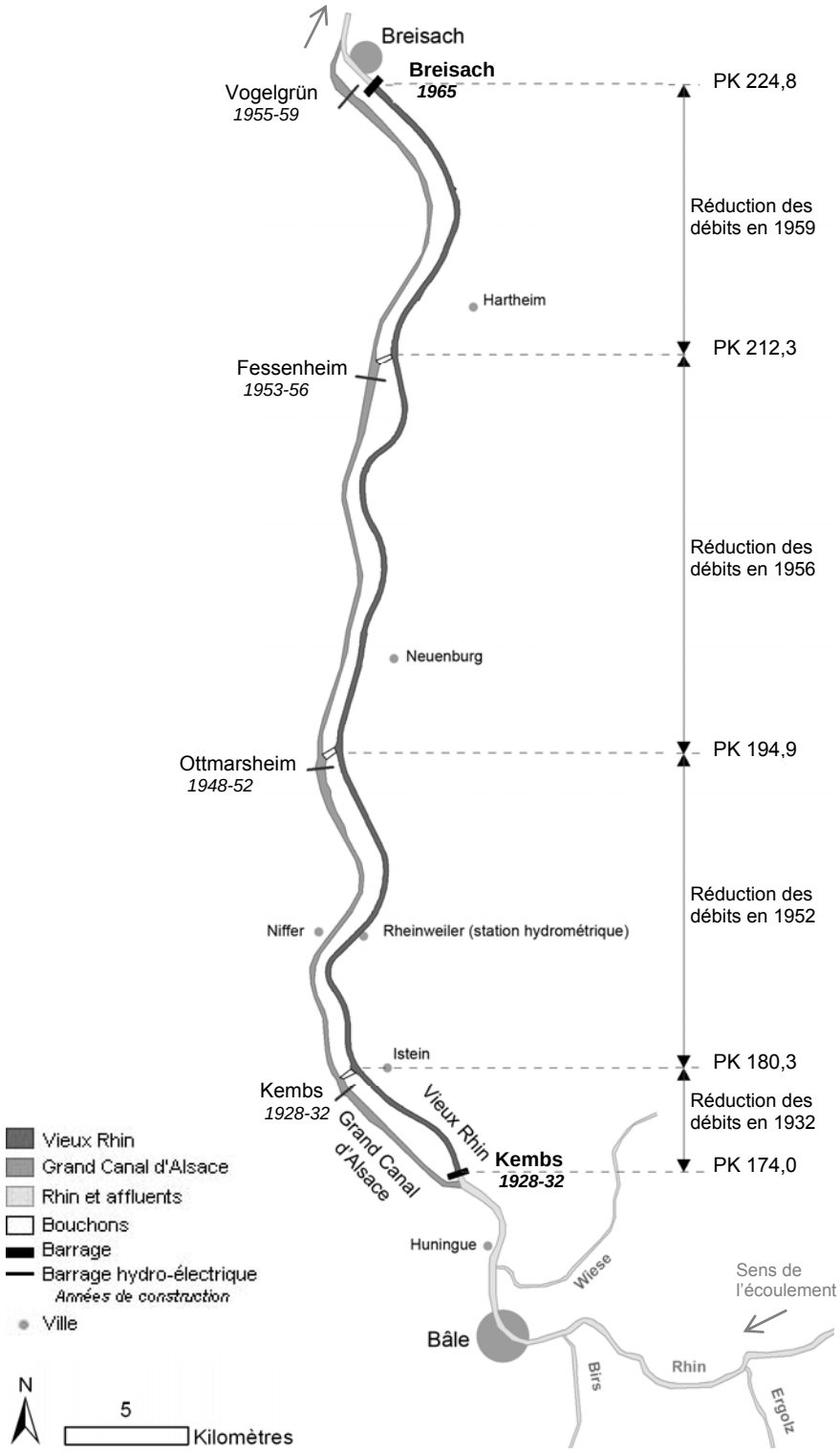


Figure 1.35 : Plan de situation du Vieux Rhin et du Grand Canal d'Alsace. Les années de construction des biefs successifs du Grand Canal d'Alsace et de réduction des débits dans les tronçons du Vieux Rhin correspondants sont indiquées

La construction du barrage de Kembs a eu pour effet d'imposer de nouveaux débits liquides et solides pour le Vieux Rhin en aval. Les modifications de ces variables sont étudiées dans le paragraphe suivant.

3.4.2. Impacts du barrage de Kembs sur les débits liquides

La Wiese est l'unique affluent du Rhin entre Bâle et le barrage de Kembs. Ses crues représentent seulement 1,7 % des crues du Rhin à Bâle (Belleville, 2009). En considérant ces apports comme négligeables, le débit parvenant au barrage peut donc être assimilé à la **différence entre le débit du Rhin à Bâle et le débit entonné dans le Grand Canal d'Alsace**. Celui-ci correspond au débit d'équipement de l'usine de Kembs : de 850 m^3/s en 1932, il a été relevé par paliers pour répondre à l'augmentation du trafic fluvial et des besoins en hydro-électricité. Depuis 1983, le débit turbiné est de **1400 m^3/s** (fig. 1.36) (EDF, 1982 ; ECOTEC, 2006).

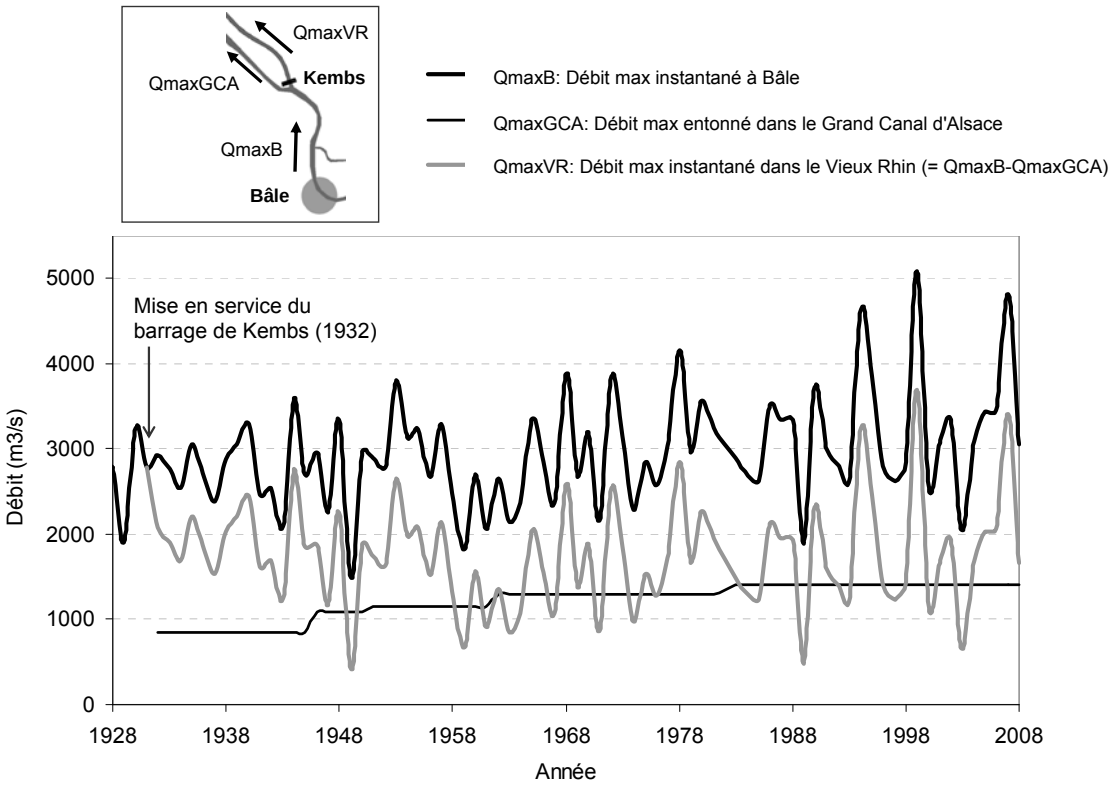


Figure 1.36 : Débits maximum annuels instantanés à Bâle et dans le Vieux Rhin entre 1928 et 2008. Le débit maximal entonné dans le Grand Canal d'Alsace a été augmenté par paliers, de 850 m^3/s à 1400 m^3/s

Le barrage de Kembs est considéré en *fonctionnement normal* tant que le débit à Bâle est inférieur à 2800 m^3/s. Le niveau de la retenue est maintenu constant. Deux cas de figure existent (ECOTEC, 2006) :

- *le débit est inférieur à 1430 m^3/s* (ou 1420 m^3/s de décembre à février) : **dans le Vieux Rhin transite un débit réservé de 30 m^3/s** (ou 20 m^3/s). Le débit entonné dans le Grand Canal d'Alsace est égal au débit du Rhin à Bâle moins ce débit réservé ;
- *le débit est compris entre 1430 m^3/s et 2800 m^3/s :* 1400 m^3/s sont entonnés dans le Grand Canal d'Alsace et **la différence est restituée au Vieux Rhin par l'ouverture des vannes**.

Au-delà de 2800 m^3/s, l'aménagement est en *fonctionnement occasionnel* : le débit entonné dans le Grand Canal d'Alsace reste de 1400 m^3/s, et les débits supplémentaires sont restitués au Vieux Rhin par les vannes du barrage, ce qui entraîne l'abaissement progressif du niveau de la retenue. La navigation devient interdite (ECOTEC, 2006).

En cas de crues exceptionnelles, des mesures consistent à intervenir directement sur le Grand Canal d'Alsace, en transférant du débit progressivement vers le Vieux Rhin, de manière à réactiver d'anciennes zones d'inondation au niveau de l'île du Rhin pour ralentir les écoulements en aval. Ces **« manœuvres exceptionnelles des usines hydro-électriques du Rhin »** représenteraient un volume de rétention d'environ 15 millions de m^3 entre Kembs et Breisach (ECOTEC, 2006). Ces manœuvres concernent les débits supérieurs à 3500 m^3/s à Bâle et dépendent des conditions hydrologiques en aval (station de Maxau). A ce jour, aucune manœuvre exceptionnelle n'a dû être déclenchée sur le Rhin à la hauteur de la zone d'étude.

Le débit réservé transitant dans le Vieux Rhin représente **1/40ème du module du Rhin à Bâle**. Le débit de 1420-1430 m^3/s a été dépassé en moyenne 69 jours par an entre 1932 et 2008. Le Vieux Rhin est donc en débit réservé **296 jours par an**, soit 81 % du temps.

Le débit-seuil de mise en mouvement a été estimé à **550 et 1000 m^3/s en amont et en aval du PK 198**, respectivement (EDF R&D, 2009). Cela correspond à un débit à Bâle de 1950 et 2400 m^3/s. Ces débits ont été dépassés en moyenne 15 et 3 jours par an entre 1932 et 2008. En l'absence de barrage, les débits de 550 et 1000 m^3/s à Bâle seraient dépassés en moyenne 328 et 175 jours par an. **Le barrage de Kembs a donc réduit la fréquence de dépassement des débits-seuils d'un facteur 22 et 58**.

3.4.3. Impacts du barrage de Kembs sur les débits solides

Etudier l'impact sur les débits solides nécessite d'évaluer si le barrage de Kembs permet le transit des sédiments. En complément, une estimation des entrées sédimentaires à l'amont s'avère utile.

Dynamique sédimentaire en amont du barrage

Avant la construction de Kembs, le transport solide était déjà fortement altéré par la succession de 11 aménagements hydro-électriques construits à partir de 1898 entre le lac de Constance et Bâle, ainsi que par l'artificialisation des berges du fleuve et de ses affluents (Kolly, 1959 ; Peiry, 2003). Ces altérations anthropiques se superposent à un contexte sédimentaire naturel peu dynamique, avec le piégeage d'une partie des sédiments d'origine alpine par les nombreux lacs suisses (Walser, 1959 ; Bensing, 1966).

Entre la dernière usine (Birsfelden, PK 163) et le barrage de Kembs (PK 174), les deux principaux affluents susceptibles de fournir des sédiments au fleuve sont successivement la Birse et la Wiese. EDF CIH (2005) a procédé à l'analyse de relevés bathymétriques réalisés en 1990 et 2002 entre la confluence de la Birse et Kembs. L'étude a révélé les volumes suivants :

- Entre la confluence de la Birse et Bâle : 20 000 m^3 déposés, 280 000 m^3 érodés ;
- Sur 2,5 km en aval de Bâle : 90 000 m^3 érodés ;
- Sur les derniers 1,3 km en amont de Kembs : 70 000 m^3 déposés.

Il semblerait donc que 280 000 m^3 de sédiments aient transité par le barrage entre 1990 et 2002. Toutefois, il s'agit d'une estimation haute, étant donné que ces sédiments ont également pu être évacués vers le Grand Canal d'Alsace.

Gestion des sédiments au barrage

Le barrage de Kembs permet le transit sédimentaire exclusivement en crue, quand les vannes sont ouvertes. Sinon, les sédiments s'accumulent dans la retenue. Des carottages effectués en 2003 ont montré qu'il s'agit essentiellement de limons et d'argiles à l'amont immédiat du barrage, et de sables et de graviers en amont de la dérivation (ECOTEC, 2006).

Environ 35 000 m^3 de sédiments ont été dragués en amont du barrage entre 1991 et 2003, par pompage puis dilution dans le Grand Canal d'Alsace. Ce volume est en nette diminution par rapport aux décennies précédentes (240 000 m^3 entre 1965 et 1990), en raison d'une évolution dans les principes de gestion des retenues. Depuis 1994, à Kembs comme au niveau des autres barrages rhénans, il est en effet jugé préférable de curer moins souvent et moins profondément, ce qui favorise l'évacuation vers l'aval des sédiments superficiels (ECOTEC, 2006). Cette érosion ne survient que pour des débits dépassant 3500 m^3/s, grâce à l'application de règles spécifiques d'exploitation en crue (ECOTEC, 2006). Entre 1990 et 2002, le Rhin a connu six crues supérieures à ce débit. Par ailleurs, nous savons que la crue de 2007 aurait érodé 50 000 m^3 (A. Clutier, EDF, communication personnelle). Ce volume serait cohérent avec les 280 000 m^3 potentiellement transportés entre 1990 et 2002 (EDF-CIH, 2005), qui auraient été évacués suite aux six autres crues.

Conclusion sur les impacts du barrage sur les débits solides

Trois éléments sont à retenir :

- Le barrage de Kembs interrompt le transit sédimentaire pour des débits inférieurs à 3500 m^3/s (environ Q_{10}) ;
- 330 000 m^3 de matériaux auraient été évacués vers le Vieux Rhin depuis 1990 ;
- en supposant que l'essentiel de la charge de fond soit stoppé par la chaîne hydro-électrique en amont, les sédiments évacués à Kembs seraient principalement des **sédiments fins**.

4. Contexte opérationnel de la restauration du Vieux Rhin

4.1. De l'aménagement du Rhin supérieur à sa restauration écologique

Les premières études sur les impacts environnementaux des travaux hydrauliques, ainsi que sur la richesse écologique du Rhin supérieur, datent des années 1970 (Carbiener, 1969, 1970, 1974 ; Schäfer, 1973). Ces études ont contribué à faire émerger les réflexions sur la **restauration écologique**, en parallèle de la **question des inondations**. En effet, si les deux principaux objectifs de l'aménagement du Rhin - navigabilité de la voie d'eau et production énergétique - étaient atteints dans les années 1980, en revanche les crues s'étaient aggravées en aval (Maire, 1997). Ce phénomène est principalement lié à l'accélération des écoulements dans le fleuve canalisé, et à la réduction drastique des surfaces inondables : en 1977, au terme de l'aménagement du Rhin supérieur (date de construction du dernier barrage d'Iffezheim), ces surfaces sont réduites à 140 km², sur environ 1000 km² au début du 19ème siècle (Dister, 1992 ; Gallusser et Schenker, 1992).

La **convention franco-allemande du 6 décembre 1982** marque un engagement pour rétablir une partie des capacités de rétention des crues de la plaine rhénane. Le polder d'Erstein, au sud de Strasbourg, en est une concrétisation. Opérationnel depuis 2003, il présente la double fonction d'écrêtement des crues et de restauration du fonctionnement écologique de l'hydrosystème (Schmitt *et al.*, 2009). En Allemagne, le **Programme Intégré pour le Rhin** (*Integriertes Rheinprogram : IRP*), lancé en 1996, concilie également la protection contre les crues et la réhabilitation des milieux alluviaux (Ministerium für Umwelt und Verkehr, 1997). Une des mesures de ce programme est de décaisser la rive droite du Vieux Rhin sur 43 km de long et sur une largeur moyenne de 100 m, afin de créer une capacité de stockage d'environ 25 millions de m^3 (Schmitt *et al.*, 2009). Ces travaux ont débuté en 2009 et sont planifiés sur 15 ans. Environ 28 millions de m^3 de graviers seront excavés.

Outre les inondations, un autre problème majeur a longtemps été la **pollution des eaux** : au début des années 1980, le bassin rhénan compte 40 millions d'habitants, et la majeure partie des eaux usées est déversée directement dans le fleuve, en l'absence de système d'assainissement. Les engrais, saumures et matières industrielles s'ajoutent aux rejets, et confèrent au Rhin la réputation d'**égout de l'Europe**, alors même que 20 millions de personnes tirent leur eau potable du fleuve (De Gravelaine, 1979 ; Poindron, 1984). En 1986, l'incendie de l'entreprise bâloise Sandoz provoque le déversement de 20 tonnes de pesticides, ce qui crée une hécatombe parmi la faune aquatique jusqu'à Coblence, et l'interruption des captages d'eau potable jusqu'aux Pays-Bas (CIPR, 2003a).

Ce véritable traumatisme va accélérer la concrétisation de mesures de protection et de sauvegarde du fleuve : dès 1987, la Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR) lance le Programme d'Action Rhin. Ses objectifs sont la réintroduction des espèces disparues dont le Saumon atlantique, la réhabilitation de la qualité de l'eau et la réduction des polluants dans les sédiments (CIPR, 2003a). Le nouveau plan « Rhin 2020, Programme pour le développement

durable du Rhin » vise la prévention des inondations, la protection des eaux souterraines et la **restauration des écosystèmes**. Les enjeux sont de rétablir le réseau de biotopes caractéristiques du milieu rhénan, ainsi que la continuité écologique du fleuve et de ses affluents du lac de Constance à la mer du Nord (CIPR, 2001).

Ces formulations concordent avec les objectifs de la DCE. Une des *« questions importantes »* énoncée dans l'état des lieux de 2004 est en effet de *« retrouver les équilibres écologiques, en restaurant et en préservant les écosystèmes rhénans »* (DCE, 2005). Les nouveaux SDAGE Rhin et Meuse visent ainsi l'atteinte du bon potentiel écologique et du bon état chimique du fleuve, en tant que *« masse d'eau fortement modifiée »*, d'ici 2027.

Enfin, le Rhin supérieur fait partie du réseau Natura 2000, et depuis 2008 il est inscrit sur la liste Ramsar des zones humides d'importance internationale. Désigner un fleuve transfrontalier sur un tronçon aussi long (170 km) et aussi anthropisé est une première, ce qui devrait amener les acteurs du Rhin à intensifier encore davantage leurs efforts de restauration dans les années à venir (Schmitt, 2010).

4.2. Un engagement collectif pour la restauration du Vieux Rhin

La qualité du milieu physique du Vieux Rhin en fait « ***le tronçon le plus remarquable du Rhin supérieur*** » (CIPR, 2003b). En effet, ce secteur a conservé une certaine diversité en matière d'habitats aquatiques et riverains, grâce à un tracé relativement sinueux montrant une variété d'écoulements, de profondeurs et de largeurs. De plus, le tronçon présente ***« le meilleur potentiel de frayères pour le Saumon atlantique du Rhin supérieur »*** (ECOTEC, 2006). Le Vieux Rhin se révèle donc être biologiquement intéressant, ce qui justifie sa protection.

Les jalons d'une restauration ont été posés lors de la conférence « Une chance pour le Rhin supérieur », tenue à Colmar en 2002 et réunissant des institutions et des organisations de protection de la nature suisses, allemandes et françaises. La conférence a souligné l'importance du Vieux Rhin pour la mise en réseau des biotopes, notamment pour la remontée du Saumon jusqu'à Bâle ; à la condition, évidemment, que des passes à poissons soient installées sur tous les barrages pour permettre la continuité biologique jusqu'au Vieux Rhin (pour l'instant, seuls Iffezheim et Gambsheim, les deux derniers barrages de la chaîne hydro-électrique du Rhin supérieur, sont équipés depuis 2000 et 2006).

A l'heure actuelle, les surfaces fonctionnelles pour les communautés de poissons sont limitées dans le Vieux Rhin, en raison du pavage et du colmatage du lit (Roche, 1991 ; Wetzlar, 2002). Deux points fondamentaux, à l'origine des principaux dysfonctionnements écologiques, ont été identifiés (Peiry, 2003) :

1. **le faible transport solide**, qui fige les formes fluviales et affecte le dynamisme des écosystèmes aquatiques et terrestres (groupements forestiers statiques appartenant aux

stades âgés des successions végétales alluviales, fond du lit très grossier défavorable à la faune piscicole) ;

2. **la faible largeur du corridor fluvial**, qui altère les groupements végétaux riverains du fait des contraintes hydrauliques importantes qu'elle induit en période de déversement (arbres tous inclinés vers l'aval, groupements de bois tendre dégradés par les crues).

Face à ces constats, les Organisations Non Gouvernementales réunies à la conférence de Colmar ont proposé leur vision de la restauration du Vieux Rhin, consistant à concilier la protection contre les crues, la mise en réseau des biotopes et la création d'un nouvel espace de vie pour les populations des territoires riverains (fig. 1.37).

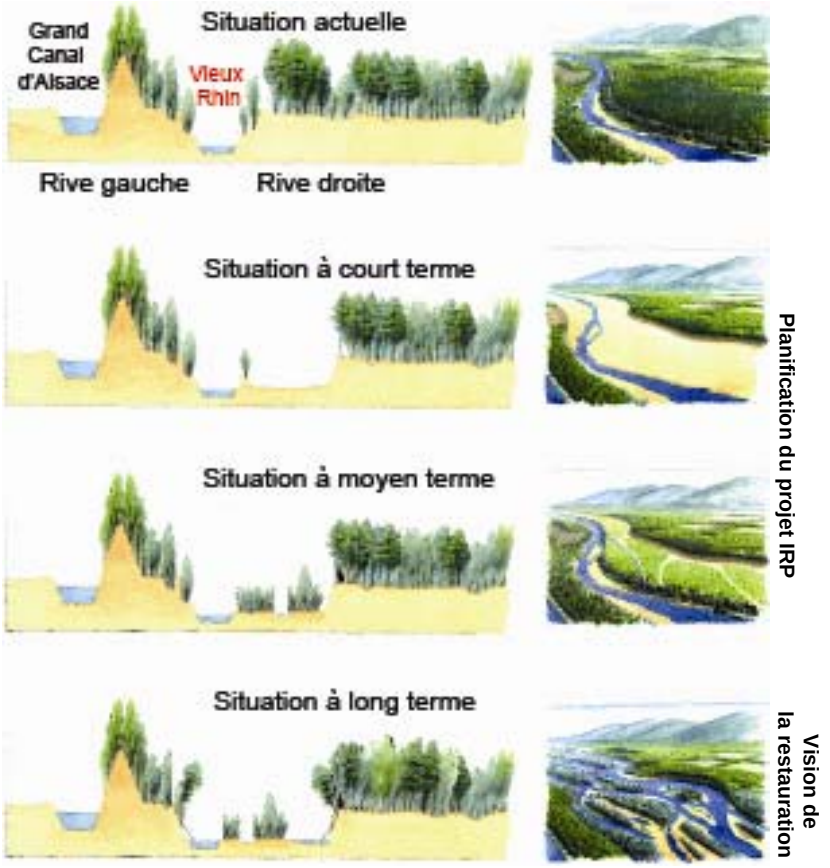


Figure 1.37 : Vision des Organisations Non Gouvernementales pour la restauration du Vieux Rhin (d'après Buisson, 2003)

C'est dans ce contexte émergent de restauration qu'ont été lancés récemment les projets EDF et INTERREG. Ils constituent le cadre opérationnel de la présente thèse.

4.3. Les projets EDF et INTERREG

Les concessions française et suisse attribuées à EDF sur la chute de l'aménagement hydro-électrique de Kembs sont arrivées à échéance le 31 décembre 2007. Dans le cadre du renouvellement de concession, EDF s'est engagé à mettre en place une série de mesures compensatoires visant à **restaurer la dynamique alluviale et augmenter la biodiversité dans le Vieux Rhin** (Peiry, 2003 ; ECOTEC, 2004, 2006). Parmi ces mesures, le relèvement du débit réservé, de 20-30 m^3/s à 50-150 m^3/s, est entré en vigueur le 1er janvier 2011.

Une autre mesure concerne l'**érosion maîtrisée des berges de la rive gauche**. Par « érosion » », on entend la possibilité d'amorcer, *via* une action mécanique de fragilisation des berges, un processus érosif qui serait ensuite entretenu par les crues. Par « maîtrisée », on conçoit une intervention spatialement limitée, garantissant la sûreté des ouvrages annexes (Grand Canal d'Alsace…). EDF a identifié 13 km de berges pouvant être érodés, sur un total de 50 km. La restauration des apports sédimentaires latéraux viendrait compléter le relèvement du débit réservé, pour une amélioration sensible des habitats aquatiques (Piégay *et al.*, 2009, 2010 ; Clutier *et al.*, 2012).

Le projet INTERREG IV « Redynamisation du Vieux Rhin », lancé en 2009 par la région Alsace, ouvre plus largement la réflexion sur les scénarios de restauration, l'érosion maitrisée étant une option parmi d'autres. L'objectif est de **définir un plan de restauration des fonctionnalités hydro-morphologiques et écologiques sur l'ensemble du Vieux Rhin et sur le long terme**. Les recherches sont focalisées sur la **redynamisation du transport solide**, dans le but de (i) multiplier les faciès morphologiques, (ii) rétablir si possible une zone alluviale composée de chenaux multiples, (iii) favoriser le développement d'habitats aquatiques et riverains pionniers présentant une grande valeur patrimoniale (Piégay *et al.*, 2010).

Le projet INTERREG réunit des équipes de recherche, des associations de protection de la nature et des décideurs français et allemands. 19 partenaires travaillent en concertation, sous la coordination scientifique de l'UMR 5600 du CNRS (fig. 1.38).

La restauration d'un certain transport solide est envisagée selon deux sources sédimentaires : une **introduction artificielle**, et une **recharge naturelle ou assistée par érosion latérale**. La question est ainsi de pouvoir comprendre quelles sont les meilleures modalités de recharge, comment le sédiment sera ensuite transféré vers l'aval et quels seront les habitats probables et les réponses écologiques associés (Piégay *et al.*, 2010).

Au-delà des gains écologiques, la manipulation du compartiment physique est susceptible de générer des risques, liés à la protection des ouvrages, à la satisfaction des usages actuels (navigation notamment) et à la sécurité des personnes (compatibilité des actions avec le projet IRP de rétention des crues). De fait, la réflexion engagée aborde à la fois l'**évaluation des risques environnementaux et des bénéfices écologiques** (fig. 1.39).



Figure 1.38 : Acteurs et champs thématiques inclus dans le projet INTERREG. Les champs grisés ont été traités dans la thèse (d'après Piégay *et al.*, 2009)

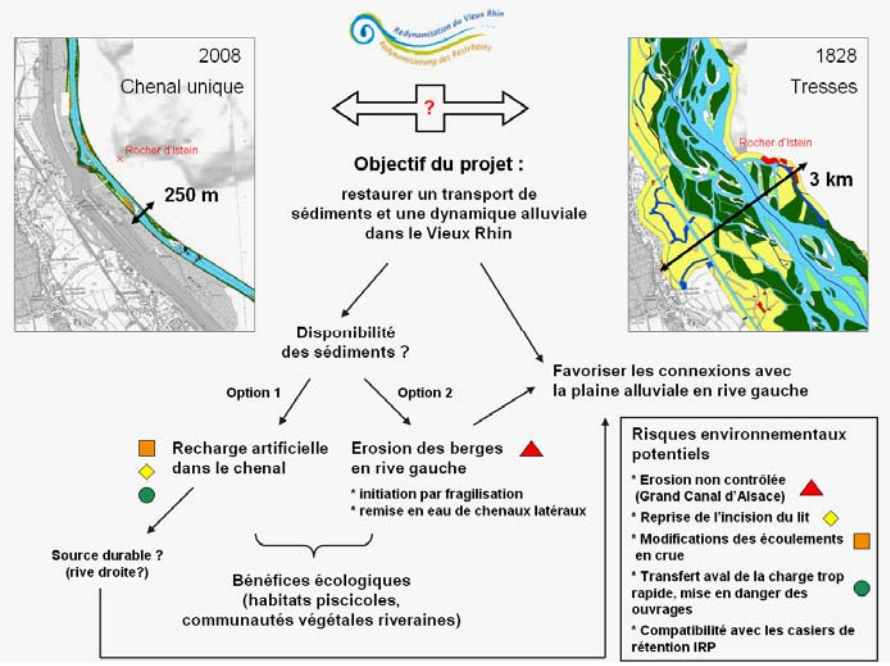


Figure 1.39 : Principe de la restauration du Vieux Rhin envisagée dans le projet INTERREG (d'après Piégay *et al.*, 2010)

Compte-tenu des risques potentiels et du caractère innovant des approches, les projets EDF et INTERREG reposent sur un **dispositif d'expérimentation et de simulation important, selon une logique adaptative**. Plusieurs sites pilotes ont été définis. Deux aborderont les modes d'initiation des processus érosifs, à partir de 2013 (projet EDF). Ils ont été précédés de simulations physiques réalisées par le LNHE (Die Moran, 2012). L'autre site pilote (projet INTERREG), dont **le suivi géomorphologique fait l'objet du chapitre 3 de la présente thèse,** a été mis en place en 2010. Il aborde la question du transfert de la charge *via* une **introduction artificielle de charge grossière**. L'évolution du dépôt sous l'action des crues doit permettre de fournir des éléments de base à la définition des scénarios. L'expérience est accompagnée de simulations numériques et physiques réalisées par l'IRSTEA (Béraud, 2012) et le LWI (Koll *et al.*, 2010).

Ces dispositifs expérimentaux sont complétés par plusieurs études : une **analyse historique**, **qui fait l'objet du chapitre 2 de la présente thèse,** deux **suivis écologiques** (EDF, Université de Strasbourg, Conservatoire des Sites Alsaciens, Petite Camargue Alsacienne) et une **étude sociologique** (Université de Strasbourg) (fig. 1.38).

L'ensemble des actions engagées dans les projets EDF et INTERREG permettra de proposer des scénarios d'évolution du Vieux Rhin pour les 20 prochaines années, dans le but de restaurer le transport solide et d'améliorer les fonctionnalités écologiques tout en préservant la sécurité des biens et des personnes et en garantissant la pérennité des usages actuels de l'un des plus grands fleuves européens.

Chapitre 2

Géomorphologie historique - Etude de l'évolution morphologique du Vieux Rhin depuis le 19ème siècle

Restaurer la dynamique morphologique d'un tronçon fluvial dégradé nécessite d'identifier les causes de ces altérations, et de mettre en évidence les patrons de changement. Ce chapitre vise ainsi à caractériser la trajectoire temporelle d'évolution du Rhin entre Kembs et Breisach, depuis le fleuve « sauvage » de 1828 jusqu'au Vieux Rhin actuel. Les réponses morphologiques aux aménagements sont appréhendées en analysant les changements verticaux et planimétriques survenus depuis deux siècles, en étudiant la structure granulométrique du lit, et en quantifiant le fonctionnement sédimentaire récent (vingt dernières années) du tronçon fluvial. Au terme de cette analyse, les liens de causalité entre les ajustements sont recherchés, et la trajectoire temporelle d'évolution est reconstituée. Ces résultats permettent d'alimenter la réflexion sur les stratégies les plus pertinentes à suivre afin de restaurer le Vieux Rhin sur le long terme, ainsi que sur la sensibilité potentielle du tronçon fluvial aux futures opérations.

A/ Introduction

1. Les enjeux et les questionnements de l'analyse rétrospective

Une démarche rétrospective présente plusieurs intérêts, scientifiques et opérationnels, pour la restauration du Vieux Rhin. Tout d'abord, la **connaissance de la morphologie du fleuve au 19ème siècle**, avant les travaux de correction ainsi que les ajustements en réponse à cet aménagement, est utile en termes de communication sur l'état historique (« ce qu'on a perdu avec les aménagements ») et de valorisation des futures actions de restauration (« ce qu'on peut espérer retrouver dans le Vieux Rhin restauré »). Il est évident que les emprises spatiales ont changé avec l'occupation des sols, du Rhin en tresses large de 3 km au début du 19ème siècle au Vieux Rhin endigué de 250 m, et que certains de ces changements sont irréversibles. Cependant, nous considérons qu'il est important de bien comprendre les impacts des travaux sur les différents compartiments de l'hydrosystème, et d'appréhender la diversité des milieux aquatiques du fleuve naturel, diversité qui pourra être recouverte partiellement, en tout cas fonctionnellement, avec la restauration. En particulier, le Rhin sauvage présentait plusieurs types de chenaux : Certains types ont-ils été plus résistants à la correction que d'autres ? Quels types ont évolué vers d'autres types ? Quelles sont les vitesses de changement ?

Les travaux ultérieurs, régularisation, barrage de Kembs et Grand Canal d'Alsace, ont porté sur le lit corrigé et ont créé la configuration que nous connaissons aujourd'hui. Dans cet espace, la **connaissance des ajustements morphologiques depuis la fin du 19ème siècle** s'avère primordiale pour replacer les prochaines évolutions du fleuve dans un contexte pluri-décennal, et aider ainsi à guider les futurs choix de restauration. L'hypothèse est qu'un pavage lié à l'incision s'est mis en place précocement, et a figé les formes fluviales (Dittrich *et al.*, 2005, 2010). Nous chercherons à valider cette hypothèse en tentant de répondre aux questions suivantes : le Vieux Rhin actuel suit-il une trajectoire ancienne héritée du 19ème siècle, ou est-il ajusté aux nouveaux débits liquides et solides imposés par le barrage de Kembs depuis 50 ans ? Peut-on mettre en évidence une dynamique sédimentaire récente ? Qu'en déduire sur les stratégies de restauration à adopter, ainsi que sur la réactivité du tronçon fluvial aux futures actions ?

2. La démarche générale

2.1. Les échelles d'étude

Une **approche diachronique** a été privilégiée dans ce chapitre, de manière à analyser l'évolution morphologique du Rhin à la suite des différents travaux d'aménagement intervenus depuis deux siècles, et en tenant compte des héritages géomorphologiques plus anciens. Notre travail est également basé sur l'observation et la quantification des processus morphologiques à **différents niveaux scalaires du système fluvial**. La démarche a été menée :

- **à l'échelle du Rhin entre Kembs et Breisach (50 km)**, dans le but d'appréhender les tendances générales d'évolution ;
- **à l'échelle de tronçons fluviaux (de 100 m à quelques km)**, afin d'étudier finement la manifestation des processus, d'extraire les logiques spatiales et de mettre en évidence les liens de causalité.

2.2. Le cadre d'analyse et les sources d'information

Pour répondre aux questions posées, notre travail a bénéficié des apports de quelques études antérieures, centrées essentiellement sur la compréhension des processus hydrodynamiques et sur les effets des crues récentes sur le chenal du Vieux Rhin, dans le cadre d'études préliminaires au programme IRP (Hartmann *et al.*, 1998 ; Dittrich *et al.*, 2000, 2005, 2010). L'analyse rétrospective que nous restituons dans ce chapitre représente **la première étude quantifiée sur le fonctionnement géomorphologique ancien et contemporain du Vieux Rhin, dans une perspective de restauration écologique**. Une base de données hydro-morphologique a été constituée dans ce cadre. Les sources d'information exploitées sont de deux types :

- **des documents d'archives,** acquis auprès de l'IGN, d'EDF, des bibliothèques et des services de gestion des eaux d'Alsace et du Baden-Württemberg (collectés en partie dans le cadre du Master 1 de K. Johnstone, 2010). Il s'agit surtout de cartes représentant le tracé du Rhin au 19ème et au début du 20ème siècle, de plans d'avancement des travaux d'aménagement, de photographies aériennes depuis les années 1950 et de relevés topographiques ;
- **des mesures *in situ*** effectuées pendant la thèse : elles concernent principalement les épaisseurs de sédiments fins déposés sur les marges (collectées dans le cadre du Master 2 de V. Ferrier, 2011) et la granulométrie des bancs.

3. L'analyse quantitative des données

3.1. Les méthodes d'analyse spatiale

L'ensemble des données collectées a été intégré dans un **Système d'Information Géographique** (logiciel ArcGis). Nous avons travaillé à un pas d'espace de 500 m et de 100 m pour l'étude des cartes et des photographies aériennes, respectivement. L'extraction des métriques à ces échelles a été effectuée par désagrégation spatiale, au moyen de segments élémentaires (Alber et Piégay, 2011) (fig. 2.1 et 2.2). Les structures spatiales d'évolution ont ensuite été analysées par agrégation et identification de tronçons fluviaux homogènes (Alber et Piégay, 2011) (fig. 2.1). Des agrégations spatiales ont également été appliquées sur les données topographiques collectées dans cette étude, levées à un pas de 200 m. Les échantillonnages granulométriques des bancs ont également été spatialisés.

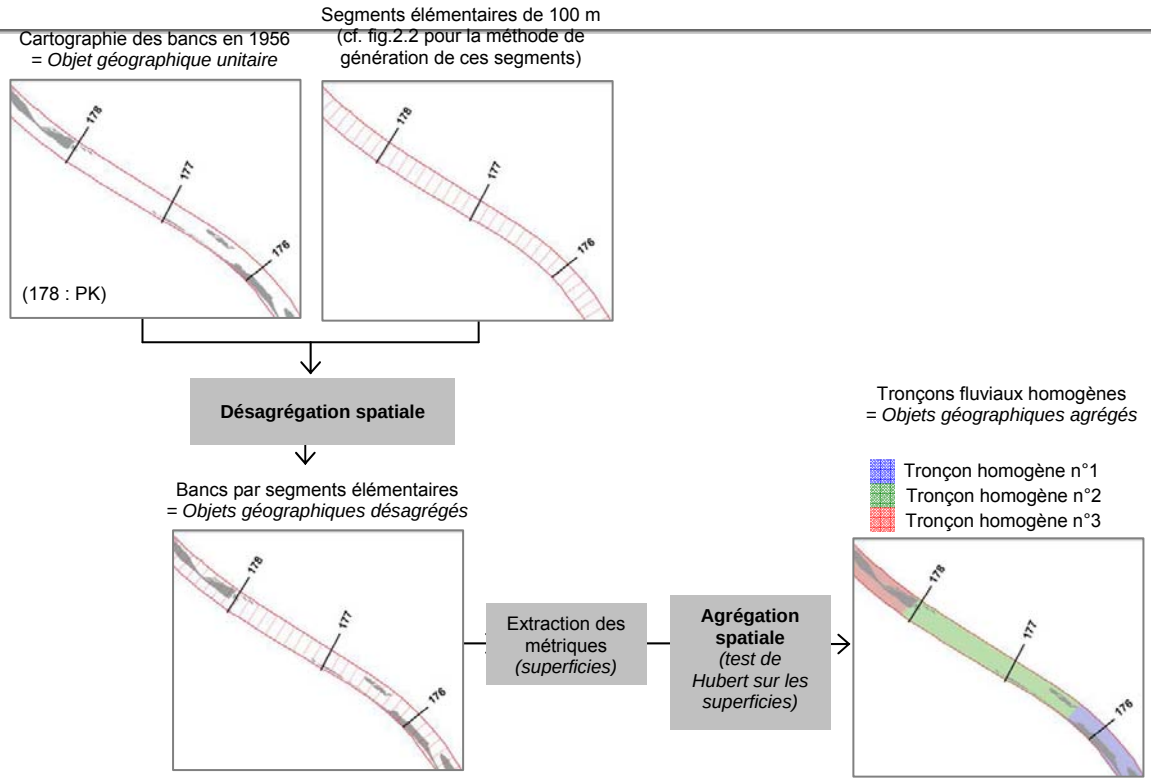


Figure 2.1 : Description des méthodes de désagrégation et d'agrégation spatiale pour l'identification de tronçons fluviaux homogènes selon la procédure d'Alber et Piégay (2011). Exemple des superficies de bancs en 1956 extraites à un pas de 100 m. Illustration entre les PK 175 et 179

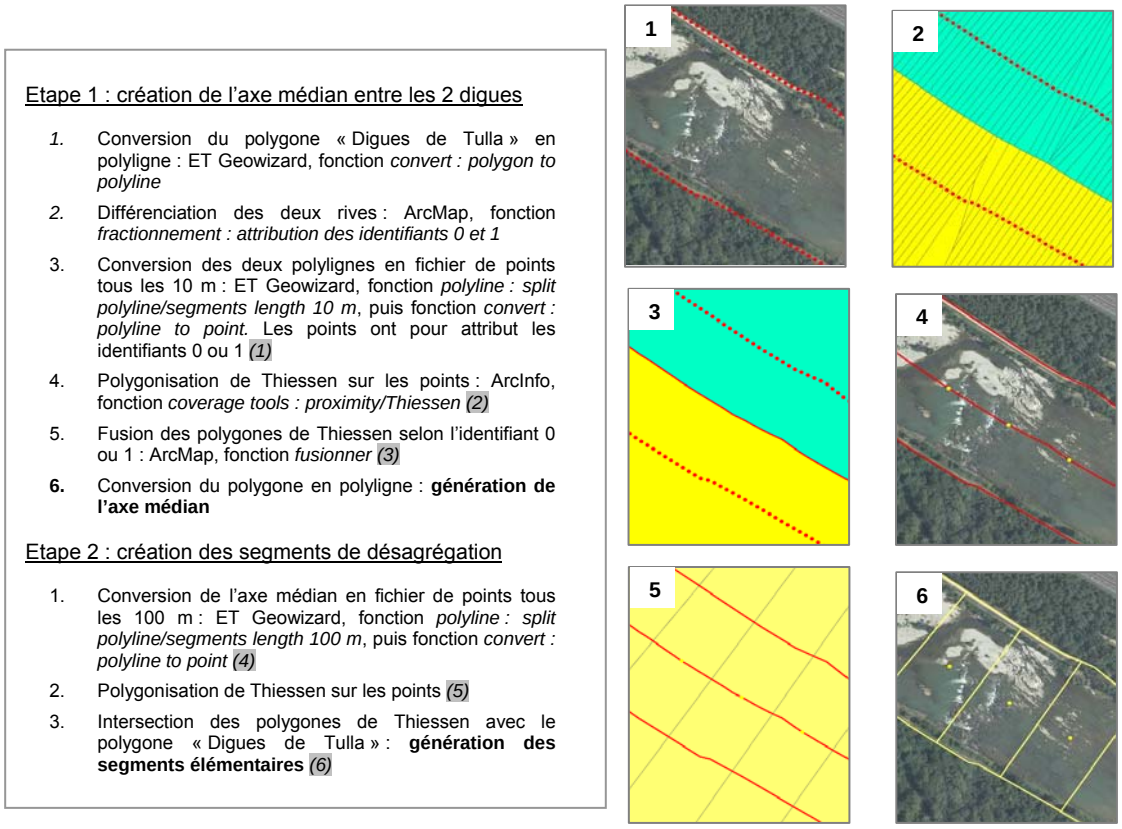


Figure 2.2 : Description de la méthode de génération des segments élémentaires selon la procédure d'Alber et Piégay (2011). Exemple de la segmentation de l'espace intra-digues à un pas de 100 m. Illustration sur l'ortho-photographie d'août 2008 au droit de la barre d'Istein

3.2. Les méthodes d'analyse statistique

Les données vectorisées (ex. : superficies de bande active, zones de dépôt et d'érosion…) ont fait l'objet de différents traitements en utilisant les fonctions de calcul d'ArcGis et les logiciels Excel, StatView et R. Plusieurs méthodes statistiques ont été employées :

Pour représenter la distribution statistique des variables, nous avons utilisé des **graphiques en boîte** (*box plot*), indiquant les valeurs minimale, maximale, moyenne, médiane ainsi que les 10ème, 25ème, 75ème et 90ème centiles (fig. 2.3).

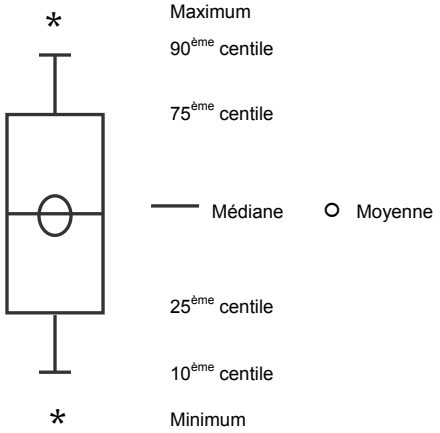


Figure 2.3 : Principe du graphique en boîte (*boxplot*)

Pour tester la significativité des différences entre deux groupes de données appariés, nous avons utilisé le **test non paramétrique de Wilcoxon**. Celui-ci est basé sur la somme des rangs des individus X_i dans la réunion des deux groupes X et Y à comparer. L'hypothèse nulle H_0 est que les groupes présentent la même distribution ; l'hypothèse est rejetée pour un niveau de probabilité p conventionnellement inférieur à 0,05. Par exemple, dans le cas de l'analyse de l'évolution planimétrique de la bande active entre 1956 et 2008 (cf. C/2.3.3), les années (soit les groupes de largeurs de bande active mesurées par segments élémentaires de 100 m) ont été comparées deux à deux. Un niveau de probabilité p très inférieur à 0,05 indique une différence significative entre deux années, ce qui permet d'extraire des périodes homogènes en termes d'évolution.

Pour détecter des ruptures dans l'évolution amont-aval d'une variable, nous avons utilisé le **test de stationnarité d'Hubert *et al.* (1989)** (cf. fig. 2.1 et 2.4). Celui-ci est basé sur la comparaison de la moyenne du segment élémentaire i avec la moyenne des segments voisins. L'hypothèse nulle H_0 est l'absence de rupture dans la série X_i ; cette hypothèse est rejetée pour un niveau de probabilité inférieur à 0,05. Un seuil a été appliqué afin d'extraire des tronçons fluviaux homogènes supérieurs à 1,5 km de long.

Pour représenter le patron longitudinal d'une variable et son évolution temporelle, nous avons eu recours à des **graphiques cumulés**. La comparaison des pentes des courbes cumulées permet de visualiser aisément la distribution spatiale des processus, et la comparaison diachronique permet

de mettre en évidence l'éventuelle propagation des changements vers l'aval. Par exemple, dans le cas de l'analyse de l'évolution des vitesses d'érosion et de dépôt dans la bande active entre 1950 et 2009 (cf. B/2.3.2), une pente négative correspond à un tronçon fluvial homogène en incision au cours de la période ; une pente positive à un tronçon en dépôt ; une pente nulle à un tronçon en équilibre (fig. 2.4). Sur tous les graphiques représentant l'évolution longitudinale de variables, les repères naturels et anthropiques jalonnant le linéaire, tels que la barre d'Istein, les rampes miliaires et les ponts construits dans les années 1960-1970, ont été renseignés en abscisse, afin de faciliter la lecture.

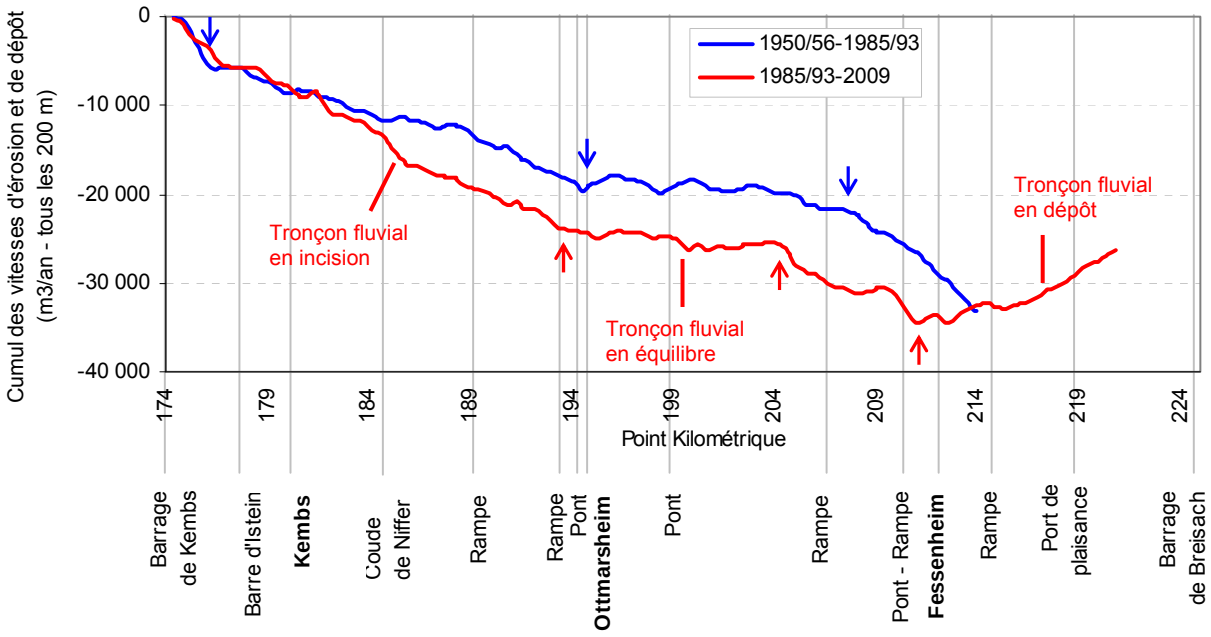


Figure 2.4 : Principe du graphique cumulé. Les flèches indiquent les ruptures détectées avec le test de Hubert. Les lieux indiqués en gras sur l'axe des abscisses correspondent aux trois « bouchons » de Kembs, Ottmarsheim et Fessenheim

Enfin, pour mesurer l'intensité d'une relation entre deux variables, nous avons utilisé des **modèles de régression simples, linéaires et non linéaires**. La qualité de l'ajustement est renseignée par le coefficient de détermination r^2.

4. Organisation du chapitre

La base de données exploitée dans ce chapitre est composée de sources d'information présentant des résolutions temporelles différentes, ce qui permet difficilement d'appréhender les réponses morphologiques aux travaux d'aménagement successifs selon une chronologie stricte. Pour cette raison, nous avons choisi d'organiser ce chapitre selon une **structure analytique**, basée sur les trois types de données à disposition : **vertical, planimétrique, granulométrique**. Les liens de causalité, spatiaux et temporels, entre les ajustements affectant ces trois dimensions, ont été recherchés en synthèse du chapitre. Au sein de chacune des trois parties, les analyses ont été menées en plusieurs temps (fig. 2.5) :

Première partie (B) : Analyse des changements morphologiques verticaux

En première approche, l'**évolution générale de la morphologie en travers du lit corrigé** a été évaluée à partir d'un échantillon de profils en travers levés entre 1884 et 2009 (B/2.1). L'**évolution de la variabilité du talweg** et le **patron d'incision** ont ensuite été quantifiés grâce à cinq profils en long levés entre 1880 et 2009 (B/2.2). Les **volumes de sédiments érodés et déposés dans la bande active et sur les marges du Vieux Rhin contemporain** ont finalement été déterminés en exploitant trois séries de profils en travers levés entre 1950 et 2009, ainsi que des mesures actuelles d'épaisseurs de sédiments fins (B/2.3).

Deuxième partie (C) : Analyse des changements morphologiques planimétriques

Nous avons cherché, dans un premier temps, à comprendre les impacts des travaux de correction sur le tracé en plan du Rhin. L'analyse a porté sur toute la largeur de l'hydrosystème fluvial, soit environ 3 km. Elle a consisté à évaluer la **mobilité du Rhin sauvage** (C/2.1), et à analyser l'**évolution surfacique des unités physionomiques de la plaine rhénane**, en particulier les types de chenaux (C/2.2). Ce travail s'est basé sur des cartes représentant le tracé en plan du Rhin avant (1828, 1838) et après (1872, 1925) l'aménagement. Dans un second temps, nous avons analysé les changements morphologiques intervenus suite à la construction des épis et du barrage de Kembs, au sein de l'espace intra-digues de 250 m : l'**évolution surfacique des unités physionomiques du Vieux Rhin** a été caractérisée, en particulier la bande active, la végétation riveraine et les bancs (C/2.3). Ce travail a exploité des plans de la régularisation édités dans les années 1940 à 1960, ainsi que sept séries de photographies aériennes acquises entre 1956 et 2008.

Troisième partie (D) : Caractérisation de la structure granulométrique du lit

Nous avons étudié le **patron longitudinal d'affinement granulométrique** à partir de l'échantillonnage de la couche de surface des têtes de bancs du Vieux Rhin, et nous avons recherché les facteurs de contrôle de perturbation éventuelle de ce patron (D/2). Nous avons également caractérisé le **degré de pavage du lit**, grâce à l'échantillonnage des couches de surface et de subsurface de bancs (D/3).

Dans une **quatrième partie (E),** nous avons exploité les résultats obtenus dans les trois parties précédentes afin d'améliorer notre compréhension du **fonctionnement sédimentaire récent du Vieux Rhin**, grâce au bilan des flux de sédiments fins et grossiers intervenus dans le tronçon au cours des vingt dernières années.

En **synthèse (F)**, la **trajectoire temporelle d'évolution du Vieux Rhin depuis le début du 19ème siècle** est discutée (F/1). L'ensemble des informations obtenues dans le chapitre permet de fournir des **éléments de préconisations pour la restauration morpho-écologique, et des estimations sur la réactivité potentielle du Vieux Rhin aux futures actions** (F/2).

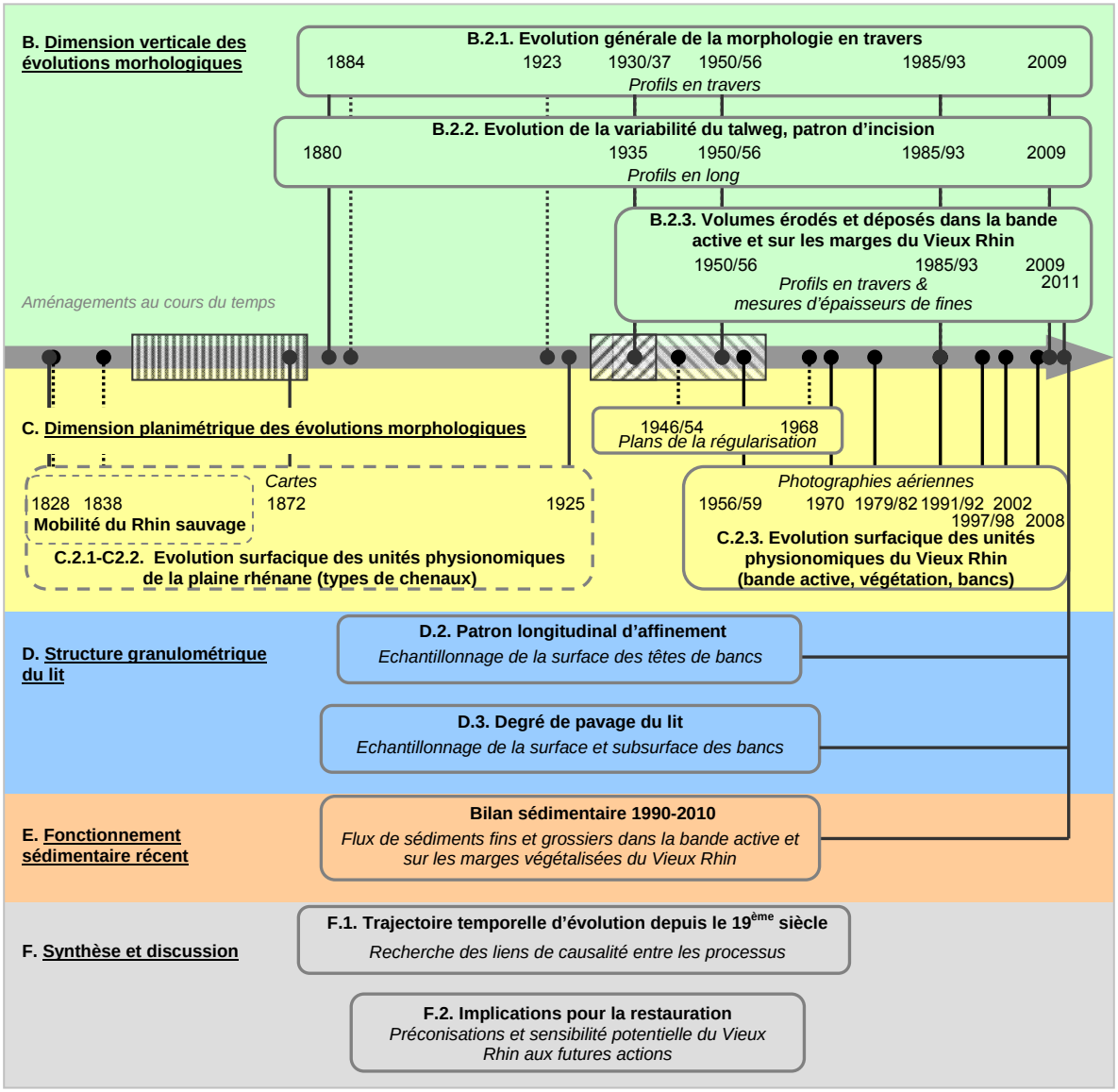


Figure 2.5 : Organisation du chapitre 2

B/ Analyse de l'évolution verticale du lit du Rhin (1880-2011)

1. Matériel et méthodes

1.1. Recensement des données verticales

1.1.1. Profils en long et en travers (1880-2009)

Les données topographiques ont été acquises auprès des archives et des services de gestion des eaux d'Alsace et du Baden-Württemberg. Six jeux de données ont été retenus, en fonction de leur date (avant et après les différents travaux d'aménagement), de leur résolution et du linéaire couvert :

- 1880/1884 : profils en long et en travers après la correction ;
- 1923 : profils en travers avant la régularisation ;
- 1930/37 : profils en long et en travers pendant la régularisation ;
- 1950/56 : profils en long et en travers à l'achèvement du Grand Canal d'Alsace ;
- 1985/93 : profils en long et en travers 30 ans après l'achèvement du Grand Canal d'Alsace ;
- 2009 : profils en long et en travers actuels.

L'ensemble des profils en long représente le **talweg** (tableau 2.1). Il est à noter que les profils du fond du lit sont très sensibles au déplacement des formes fluviales (surcreusements dans les coudes, alternances seuil-mouille…), contrairement aux profils de lignes d'eau qui ont pour effet de lisser les variations locales. Pour cette raison, les profils de talweg sont généralement peu exploités dans les expertises géomorphologiques, ou du moins ils n'autorisent pas d'extraire des tendances globales à partir d'observations locales (Couvert *et al.*, 1999). Dans la présente étude, les profils en long du talweg présentent l'intérêt de fournir une caractérisation de la variabilité des habitats aquatiques dans le lit corrigé, notamment avant la construction des épis.

Les profils en long de 1950/56, 1985/93 et 2009 sont issus des profils en travers à partir desquels le point le plus bas a été extrait (Béraud, 2012). Ces profils ont été levés tous les 200 m environ, et à la même position pour les trois dates. Les profils de 1880 et 1935 se présentaient quant à eux sous la forme d'une ligne ininterrompue, ils ont été saisis dans Excel en conservant les abscisses des séries récentes, tous les 200 m. La position identique de ces cinq jeux de données permet une comparaison diachronique directe du talweg, sans besoin de générer des points par interpolation linéaire (Rollet, 2007).

Année	Source	Format	Echelle	Secteur (PK)	Description
1880	WSA	Papier	1/200 1/20 000	174,1-220,8	Ligne ininterrompue : extraction d'1 levé/200 m
1935	E. Dillmann, SNS	Papier	1/100 1/20 000	178-220,8	Ligne ininterrompue : extraction d'1 levé/200 m
1950/56	WSA	Papier/ SIG	1/500 1/2 000	174,4- 214	Extraction des profils en travers : 1 levé/200 m, 197 levés
1985/93	WSA	SIG	1/500 1/2 000	174,4-179,8 (1985) 210,0-220,8 (1985) 180,04-209,93 (1993)	Extraction des profils en travers : 1 levé/200 m, 231 levés
2009	WSA	SIG	1/200 1/ 1000	174,1- 220,8	Extraction des profils en travers : 1 levé/200 m, 240 levés

Tableau 2.1 : Profils en long retenus pour l'analyse de l'évolution verticale du lit du Vieux Rhin (talweg)

Les profils en travers de 1884 ont été levés tous les 3 km environ (tableau 2.2). Les profils de 1923 ont été levés tous les 100 m, répartis sur six tronçons de 1 km de long. A ces profils était jointe une carte au 1/10 000ème, indiquant la profondeur du chenal et l'altitude des bancs, par des isolignes de 1 m. L'examen de cette carte indique que les six tronçons couverts par les profils fournissent une représentation spatiale correcte de la morphologie du lit de l'ensemble du Rhin corrigé. Enfin, les données de 1930/37 se composent de plusieurs centaines de profils levés tous les 100 m environ, et sur certains profils ont été superposées plusieurs dates.

Année	Source	Format	Echelle	Secteur (PK)	Description
1884	Arch. Dép. 68	Papier	1/100 1/1 000	174-218	env. 1 profil/3km, 21 profils *Altitude par rapport à la ligne d'eau d'étiage*
1923	Arch. Gén. Karlsruhe	Papier	1/200 1/2 000	178-182 196-198	1 profil /100 m/tronçon 1 km, 6 tronçons, 60 profils *Aucune altitude, ligne d'eau d'étiage*
1930/37	WSA	Papier	1/100 1/1 000	178-226	Plrs. centaines de profils et plrs. dates superposées, env. 1 profil/100 m
1950/56	WSA	Papier/ SIG	1/500 1/2 000	174,4- 214	1 profil/200 m, 197 profils env. 30 points/profil *Ligne d'eau non renseignée*
1985/93	WSA	SIG	1/500 1/2 000	174,4-179,8 (85) 210,0-220,8 (85) 180,04-209,93 (93)	1 profil/200 m, 231 profils env. 70 points/profil *Ligne d'eau non renseignée*
2009	WSA	SIG	1/200 1/ 1000	174,1- 220,8	1 profil/200 m, 240 profils env. 150 points/profil *Ligne d'eau non renseignée*

Tableau 2.2 : Profils en travers retenus pour l'analyse de l'évolution verticale du lit du Vieux Rhin

Les données topographiques ont toutes été collectées par des opérateurs allemands. Les systèmes de nivellement ayant changé depuis le 19ème siècle, des conversions ont été utilisées pour pouvoir comparer les séries en *Normal Null neues System*, qui correspond au système en application depuis 1950 (tableau 2.3).

Système de nivellement	Période d'application	Différence altimétrique avec le NN n.S.	Données concernées	Conversions appliquées
AP (*Amsterdamer Pegel*) Observatoire d'Amsterdam	19ème siècle	entre 9 et 11 cm entre Bâle et Breisach	1880	+ 10 cm
NN (*Normal Null*) Observatoire de Berlin	1879-1912	entre 5 et 6 cm avec le DHHN12	-	-
NN-Höhen ou DHHN12 Observatoire de Müncheberg	1912-1950	entre 10 et 11 cm entre Bâle et Breisach	1935 1930/37	+ 11 cm
NN n.S ou NN Höhen n.S. (*Normal Null neues System*)	1950-2009		1950/56 1985/93 2009	-
NHN ou DHHN92	En projet	entre 1 et 4 cm entre Bâle et Breisach	-	-

Tableau 2.3 : Systèmes de nivellement et conversions appliquées pour comparer les données dans le système NN n.S. (informations de R. Ostermann et H. Lehmacher, RPF, 2010) (d'après Johnstone, 2010)

1.1.2. Sondages d'épaisseurs de sédiments fins sur les marges (2011)

Wirtz et Bölscher (2008) ont analysé la dynamique de sédimentation de deux champs d'épis du Vieux Rhin près de Chalampé et Hartheim. L'évolution de ces secteurs a été caractérisée entre 2002 et 2007 au moyen de levés topographiques et de pièges à sédiments. Ces études sont très locales, les secteurs mesurant 50 m et 100 m de long. Dans la présente étude, nous avons cherché à analyser le phénomène de sédimentation des marges **sur l'ensemble du Vieux Rhin**.

Pour ce faire, nous avons sélectionné **55 profils en travers** parmi les 240 profils levés en 2009 (cf. tableau 2.2), soit au moins un profil par champ d'épis, et dix profils en amont de la barre d'Istein, de manière à caractériser tout le tronçon d'étude. Nous avons réalisé entre 2 et 9 sondages par profil, selon la largeur du champ d'épis et à chaque changement de topographie ou de type de végétation. Nous avons utilisé les **tiges d'un pénétromètre PANDA**. Le principe est simplement d'enfoncer à la verticale un train de tiges de 50 cm de long, en frappant sur une tête de battage (fig. 2.6). Un biais de mesure existe, dans le cas où l'enfoncement serait stoppé par un bloc isolé ou du bois mort enfoui avant d'avoir atteint le toit de galets. Compte-tenu du nombre total de sondages (321), nous avons toutefois considéré ce biais comme négligeable et n'intervenant pas dans le calcul des volumes de sédiments fins déposés sur les marges. Chaque point de mesure a été localisé avec un GPS de précision submétrique (Trimble GeoXH).

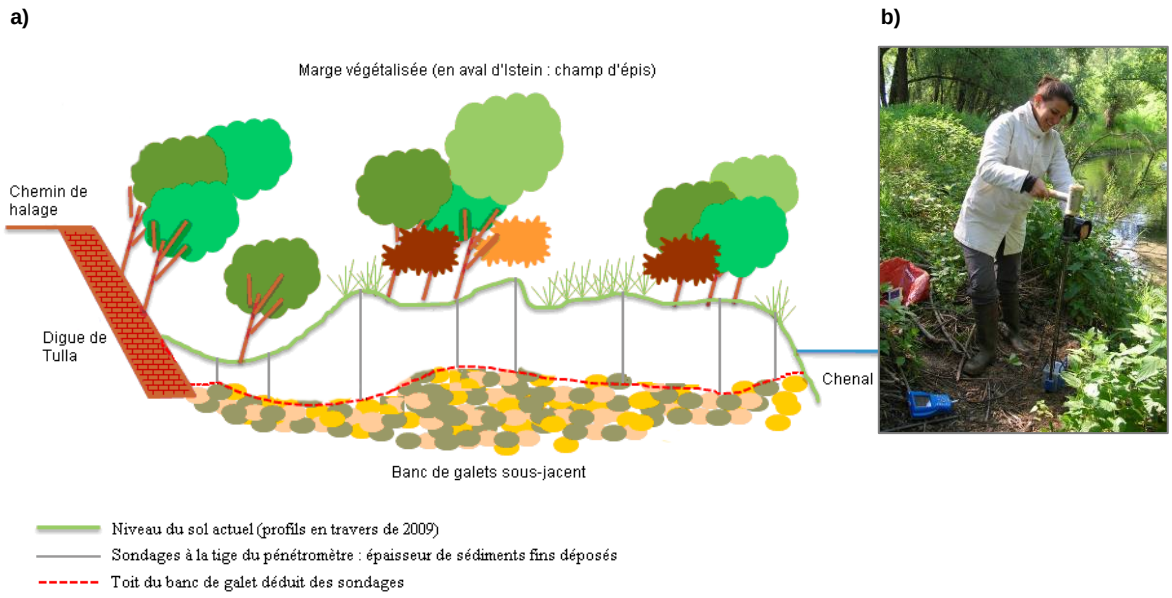


Figure 2.6 : a) Principe de la mesure des épaisseurs de sédiments fins sur une marge du Vieux Rhin (Ferrier, 2011). b) Mesure au pénétromètre PANDA (cliché V. Ferrier, 2011)

1.2. Méthodes d'analyse des données

L'analyse de l'évolution morphologique verticale du lit du Vieux Rhin a été menée en trois temps, qui sont décrits ci-après.

1.2.1. Analyse semi-quantitative de l'évolution de la section en travers (1884-2009)

Dans un premier temps, nous avons appréhendé **l'évolution générale de la section en travers entre les phases de correction et de régularisation**, grâce à l'examen des profils en travers de 1884 et 1923. Ces données ne contiennent pas d'information altimétrique et n'ont pas été levées exactement aux mêmes positions (cf. tableau 2.2), elles ne permettent donc pas de quantifier les changements par superposition des dates. Cependant, l'examen semi-quantitatif des données offre de précieux renseignements sur la diversité morphologique du lit corrigé, notamment la présence de hauts-fonds et de chenaux secondaires.

Nous avons ensuite évalué **l'évolution de la section en travers suite à la construction des épis et du barrage de Kembs**, grâce à l'analyse diachronique de 14 profils en travers, levés aux mêmes positions et superposés à quatre ou cinq dates entre 1931 et 2009. Ces profils ont été sélectionnés parmi la base de données (cf. tableau 2.2) en fonction de plusieurs critères (Johnstone, 2010) :

- un espacement relativement constant sur l'ensemble du Vieux Rhin ;
- une inclusion de certains profils dans les tronçons de suivi des expérimentations des projets INTERREG et EDF (cf. chapitre 1 ; C/4.3) ;

- une exclusion des profils présentant une forme atypique en comparaison avec les profils adjacents.

1.2.2. Analyse quantitative de l'évolution du profil en long (1880-2009)

Nous avons étudié **l'évolution de la variabilité du talweg** entre 1880 et 2009, en extrayant, pour chaque profil en long, les différences entre les altitudes réelles et les altitudes théoriques selon la droite de régression. Nous avons calculé l'écart-type de cette différence, afin d'obtenir un indice quantitatif de la variabilité. Nous avons aussi mis en évidence l'**incision du lit**, par superposition des profils de talweg, et nous avons analysé les patrons longitudinaux d'évolution par périodes.

1.2.3. Analyse quantitative des volumes érodés et déposés dans la bande active et sur les marges du Vieux Rhin contemporain (1950-2011)

Eléments bibliographiques sur l'évolution verticale du Vieux Rhin contemporain

Quelques études sur les ajustements verticaux du Vieux Rhin contemporain ont été menées depuis les années 1990, essentiellement dans le cadre du programme IRP. Par exemple, Hartmann *et al.* (1998) ont quantifié les volumes sédimentaires mobilisés dans le tronçon fluvial en comparant les profils en travers levés en 1950/56 et 1985/93. La balance totale étant positive, alors que le profil en long révèle un fond du lit essentiellement en incision, a conduit à conclure que **les dépôts sont localisés majoritairement sur les marges**, tandis que **les érosions concernent le chenal**. L'analyse de la composition granulométrique des champs d'épis et du chenal (Dittrich *et al.*, 2000 ; Ergenzinger et Bölscher, 2008 ; Dittrich *et al.*, 2010 ; Ferrier, 2011) a également mis en évidence **une certaine déconnexion des flux sédimentaires entre les deux compartiments**. Ces études ont montré que :

- le chenal est composé essentiellement de sédiments grossiers (D_m ~100 mm), remobilisés localement lors des fortes crues et maintenus dans la bande active ;
- les champs d'épis sont composés de sédiments fins (diamètre inférieur à 1,6 mm), provenant *a priori* de l'amont du barrage de Kembs et étant piégés par la végétation ayant colonisé les marges du Vieux Rhin ;
- les échanges sédimentaires entre les deux compartiments seraient faibles.

Schoneboom *et al.* (2010) ont complété la comparaison des profils en travers pour la période récente (1985/93-2009) en différenciant le chenal des champs d'épis et en calculant les volumes érodés et déposés dans ces deux compartiments. Dans le chenal, les auteurs ont identifié quatre tronçons fluviaux homogènes à tendance d'incision, de dépôt ou d'équilibre.

L'objectif de notre étude est d'améliorer la compréhension des flux sédimentaires dans la bande active et les marges végétalisées du Vieux Rhin depuis 1950, en particulier le rôle de la végétation sur le piégeage des fines. Pour ce faire, nous avons calculé les volumes érodés et déposés par

comparaison des profils en travers levés en 1950/56, 1985/93 et 2009, et nous avons reconstitué les volumes de fines déposées sur les marges à partir des mesures d'épaisseurs réalisées au pénétromètre (cf. fig. 2.6).

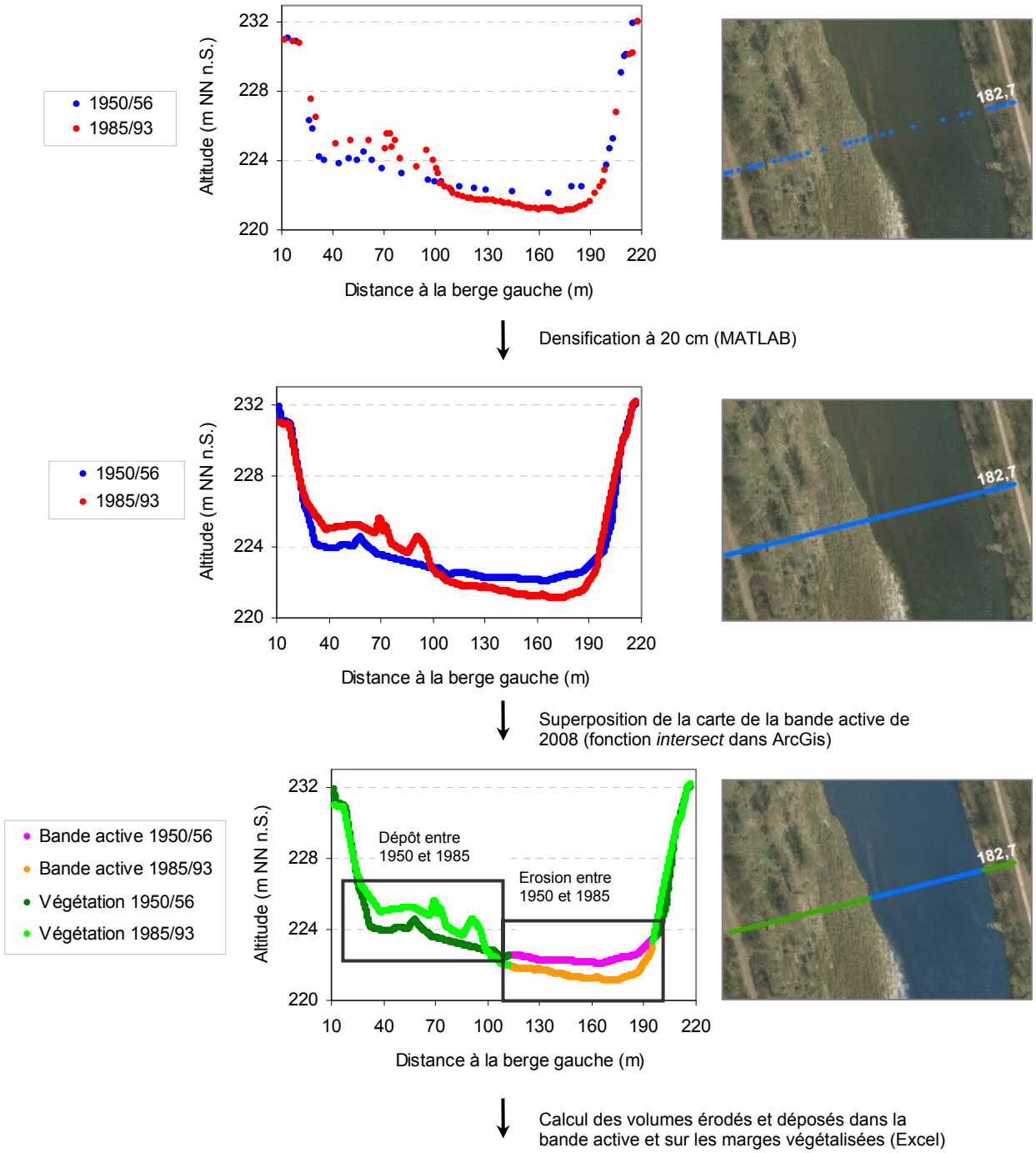
Méthode d'analyse des profils en travers (1950-2009)

La résolution des profils (de 30 à 150 points par profil, cf. tableau 2.2) a été homogénéisée par densification et interpolation à 20 cm à l'aide d'une application MATLAB (travail de D. Béal). Puis, dans ArcGis nous avons distingué la bande active des marges végétalisées, en superposant aux profils la carte de la bande active de 2008 réalisée pour l'étude de l'évolution planimétrique du Vieux Rhin (année la plus récente, considérée comme temps présent pour l'étude ; cf. C/1.2.2) (fig. 2.7). L'aire érodée ou déposée entre deux dates a été extraite dans Excel, par addition des rectangles élémentaires de 20 cm. Les volumes ont enfin été déduits de l'aire moyenne des profils amont et aval, multipliée par la demie-distance entre les profils (Schoneboom *et al.*, 2010) :

$$V_n = \left(\frac{A_{n-1} + A_n}{2} \right) * \frac{L_{n-1,n}}{2} + \left(\frac{A_n + A_{n+1}}{2} \right) * \frac{L_{n,n+1}}{2}$$

où V_n est le volume associé au profil en travers n (en m^3), calculé à partir de A_n l'aire du profil en travers n (en m²) et de $L_{n-1,n}$ la distance entre le profil n et le profil $n-1$ en amont (en m). En prenant pour exemple le PK 174,6 :

$$V_{174,6} = \left(\frac{A_{174,4} + A_{174,6}}{2} \right) * \frac{L_{174,4,174,6}}{2} + \left(\frac{A_{174,6} + A_{174,8}}{2} \right) * \frac{L_{174,6,174,8}}{2}$$



	Volume (m^3)
Bande active	- 12 654
Marge végétalisée	+ 16 647

Figure 2.7 : Description de la procédure de calcul des volumes de sédiments érodés et déposés dans la bande active et sur les marges végétalisées à partir des profils en travers. Exemple du PK 182,7 entre 1950/56 et 1985/93. Illustration sur l'ortho-photographie d'avril 2008

Méthode d'analyse des sondages d'épaisseurs de sédiments fins (2011)

Les profils d'épaisseurs de sédiments fins levés au pénétromètre ont été traités selon la même méthodologie que précédemment (interpolation des points de sondage à 20 cm, puis somme des rectangles élémentaires). Les volumes ont ensuite été déduits en multipliant l'aire du profil par la longueur du champ d'épis correspondant, ou en multipliant par la distance entre deux profils successifs dans le cas de plusieurs profils par champ d'épis. Les **taux de sédimentation** ont également été calculés en fonction de l'âge des groupements végétaux. Cet âge a été déterminé en superposant aux sondages d'épaisseurs les cartes de végétation réalisées pour l'étude de l'évolution planimétrique du Vieux Rhin (cf. C/1.2.2) : nous avons attribué un âge de 10 ans si le sondage se trouvait positionné sur une tâche de végétation existante en 2008 (année la plus récente, considérée comme temps présent pour l'étude) mais sur un banc de galets en 1998, de 17 ans si le sondage se trouvait sur un banc de galets en 1991, ceci jusqu'à 58 ans et au-delà pour l'année la plus ancienne (1950).

2. Résultats

2.1. L'évolution générale de la morphologie en travers du lit du Rhin (1884-2009)

2.1.1. La diversité morphologique en travers du lit corrigé

En 1884, l'essentiel des travaux de correction est achevé depuis environ 10 ans. Les profils en travers montrent **une forte hétérogénéité morphologique dans le lit corrigé**. En effet, tous les profils étudiés sont asymétriques ; 70 % sont composés d'au moins deux chenaux, et les 30 % avec un chenal unique présentent de larges hauts-fonds ou des bancs latéraux (fig. 2.8, a). En 1923, les profils montrent une hétérogénéité similaire : tous sont asymétriques, 60 % ont au moins deux chenaux et 40 % ont un chenal unique bordé par des hauts-fonds. Le pas d'échantillonnage des profils de 1923 (levés tous les 100 m sur des tronçons de 1 km de long) permet en outre d'appréhender la succession des formes fluviales et la sinuosité du talweg d'une rive à l'autre (fig. 2.8, b).

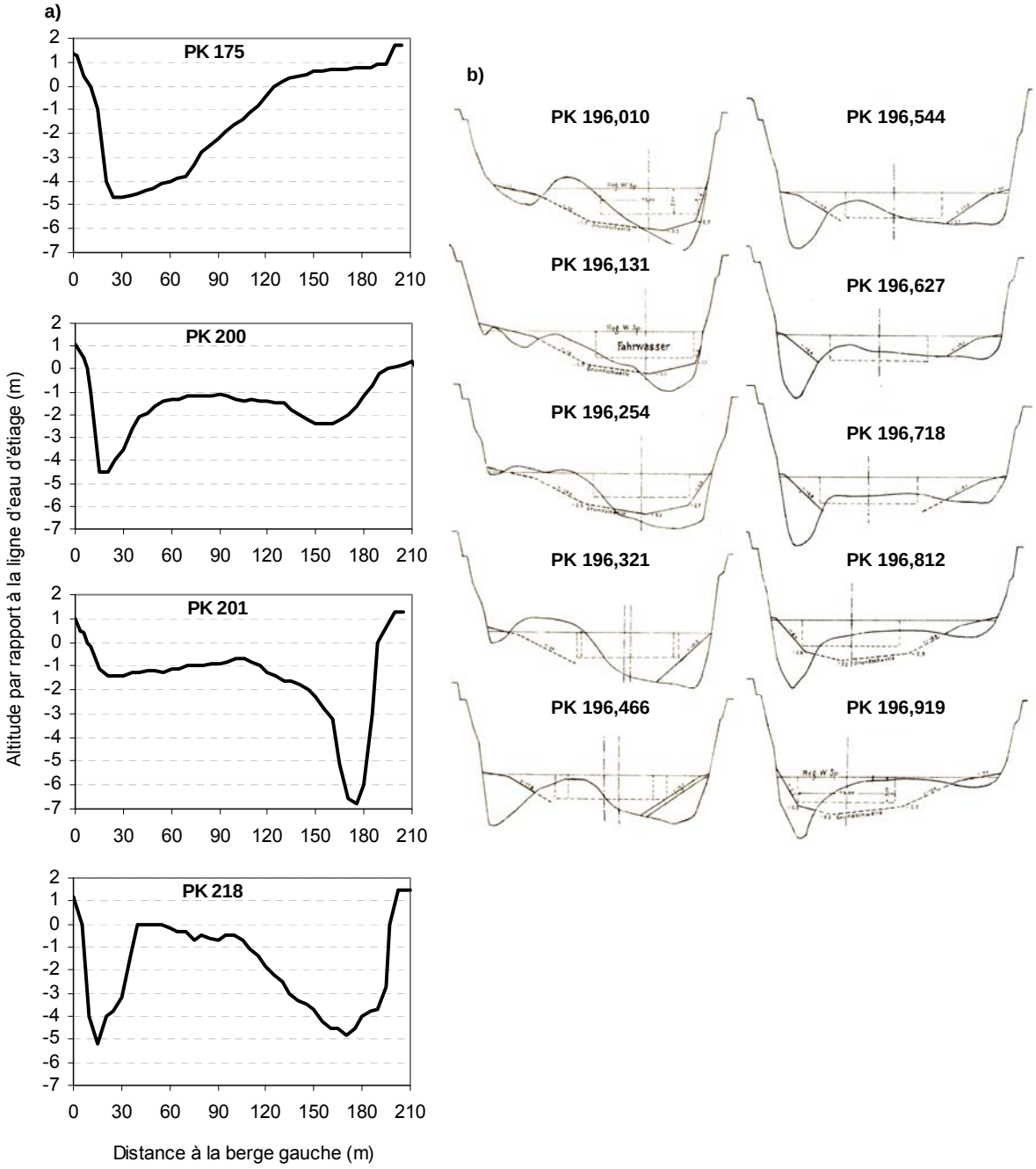


Figure 2.8 : Exemples de profils en travers en 1884 (a) et 1923 (b). La ligne d'eau d'étiage (*Niederwasser*) correspond à un débit de 540 m^3/s à Bâle (modifié d'après Johnstone, 2010)

2.1.2. La simplification du lit régularisé

Les évolutions observées sur les profils superposés entre 1931 et 2009 s'avèrent influencées par la morphologie initiale et par la présence ou non d'épis au droit du profil (Johnstone, 2010). Toutefois, la tendance dominante est une configuration à deux chenaux, constituée d'un banc ou d'un haut-fond médian, qui évolue en un seul chenal à fond plat et régulier. Il apparait ainsi que **la régularisation a fortement simplifié la morphologie de la section en travers**.

Nous remarquons **des changements très rapides** durant les premières années suivant la construction des épis, ce qui était finalement l'effet recherché par les aménageurs. Par exemple, le profil en travers du PK 205,820 montre davantage de changements en 3 ans (1931-1934) que sur une période de 16/22 ans (1934-1950/56) (fig. 2.9, b). Nous constatons également qu'**une différentiation s'opère progressivement entre le chenal et les champs d'épis** : les dépôts latéraux - soit les champs d'épis - s'exhaussent sur la quasi-totalité des profils étudiés (fig. 2.9). Le seul profil qui ne suit pas cette évolution est localisé en amont de la barre d'Istein (PK 175,6), là où aucun épi n'a été construit. Par ailleurs, si l'exhaussement débute dès l'implantation des épis (1931 à 1950/56), nous remarquons que le phénomène s'exprime essentiellement entre 1950/56 et 1985/93, après que les débits dans le Vieux Rhin aient été réduits avec la mise en service des biefs du Grand Canal d'Alsace. Ainsi, **l'exhaussement des marges du Vieux Rhin serait une conséquence conjointe de (i) la régularisation, ayant contraint les dépôts entre les épis, (ii) la réduction des débits par le barrage de Kembs, ayant permis à la végétation de coloniser les dépôts exondés** et d'amorcer un phénomène d'accrétion par piégeage des sédiments fins, du fait de l'augmentation de la rugosité.

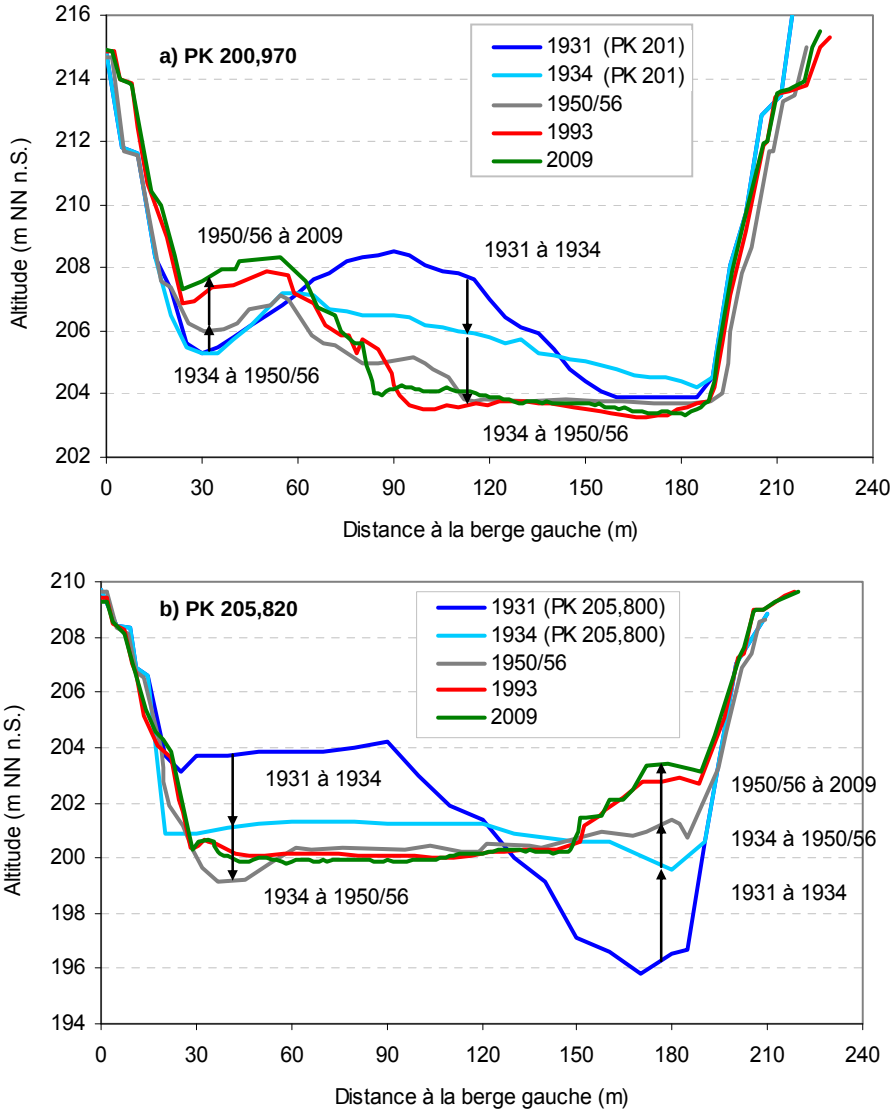


Figure 2.9 : Exemples d'évolution de profils en travers entre 1931 et 2009 (d'après Johnstone, 2010)

2.2. L'évolution de la variabilité du talweg et le patron d'incision du lit (1880-2009)

2.2.1. Le lissage du profil en long du talweg

Nous observons la présence de **deux ruptures de pente** sur le profil en long du talweg (fig. 2.10) : la première correspond à l'affleurement rocheux d'Istein (PK 178) ; elle est observée sur tous les profils à partir de 1935 (la barre d'Istein n'affleure pas encore en 1880). La seconde est localisée au niveau du futur bouchon d'Ottmarsheim (PK 194,8) (tableau 2.4).

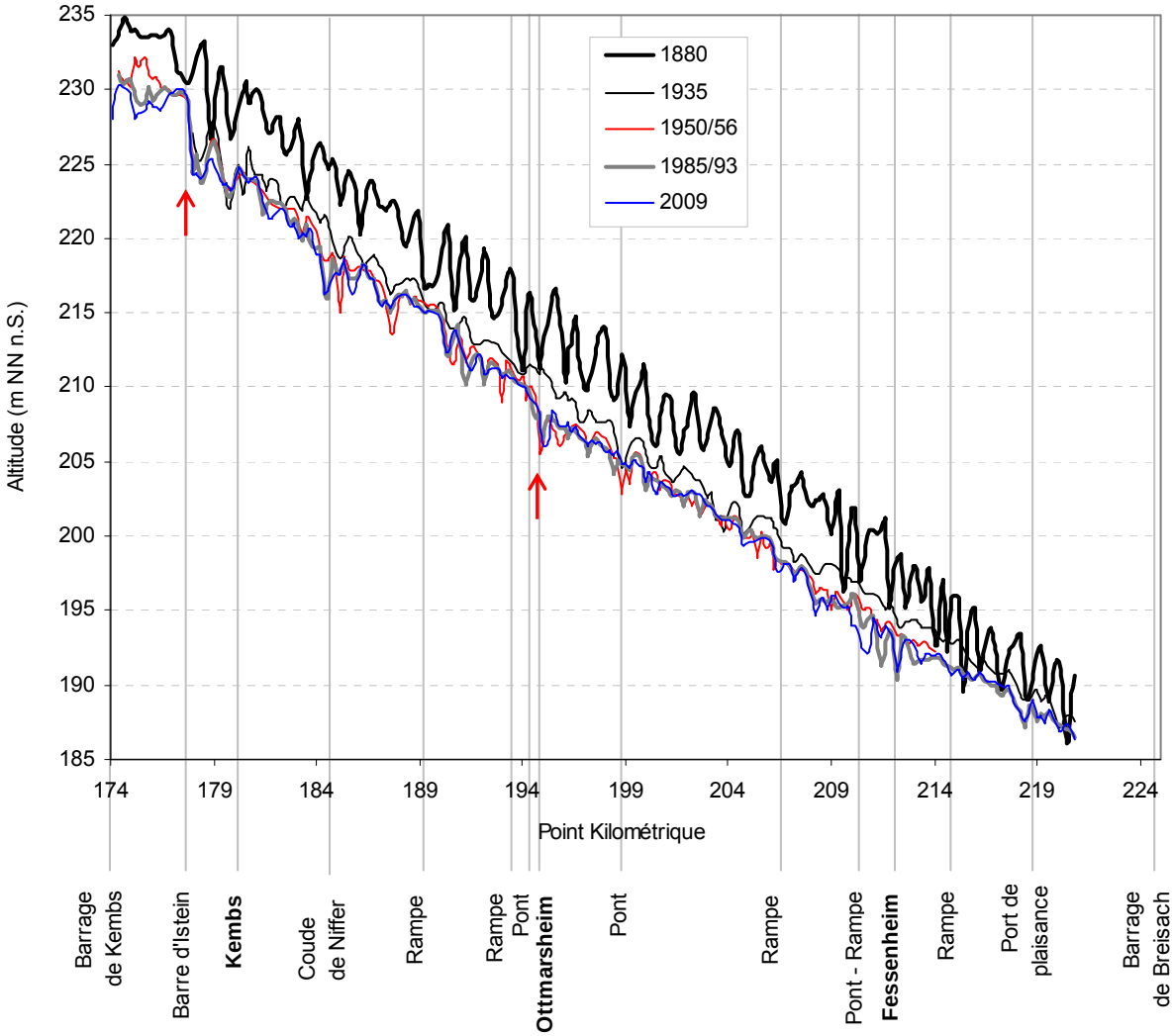


Figure 2.10 : Evolution du profil en long du talweg entre 1880 et 2009 (en m tous les 200 m). Les deux flèches indiquent les ruptures de pente

Année	Amont Ottmarsheim (PK 178-194,61)	Aval Ottmarsheim (PK 194,82-220,8)
1880	0,105	0,097
1935	0,096	0,087
1953	0,100	0,083
1989	0,100	0,086
2009	0,098	0,085

Tableau 2.4 : Evolution de la pente du talweg (en %) entre la barre d'Istein et le bouchon d'Ottmarsheim et en aval d'Ottmarsheim entre 1880 et 2009

Un premier examen de la figure 2.10 révèle une **profonde diminution de l'amplitude des alternances seuil-mouille** entre 1880 et les années ultérieures. Cette simplification est visible dès 1935, soit seulement quatre ans après la construction des premiers épis. L'écart-type de la variabilité confirme ces observations : nous constatons une réduction très nette entre 1880 et 1935 (tableau 2.5).

Année	Ecart type de la variabilité (m)
1880	1,66
1935	0,77
1950/56	0,98
1985/93	0,95
2009	0,91

Tableau 2.5 : Evolution de l'écart-type de la variabilité du talweg en aval de la barre d'Istein entre 1880 et 2009

En 1880, l'ensemble du profil en long est caractérisé par une alternance marquée de seuils et de mouilles, d'une amplitude moyenne de 5 m et d'une périodicité de 1 à 2 km (fig. 2.11).

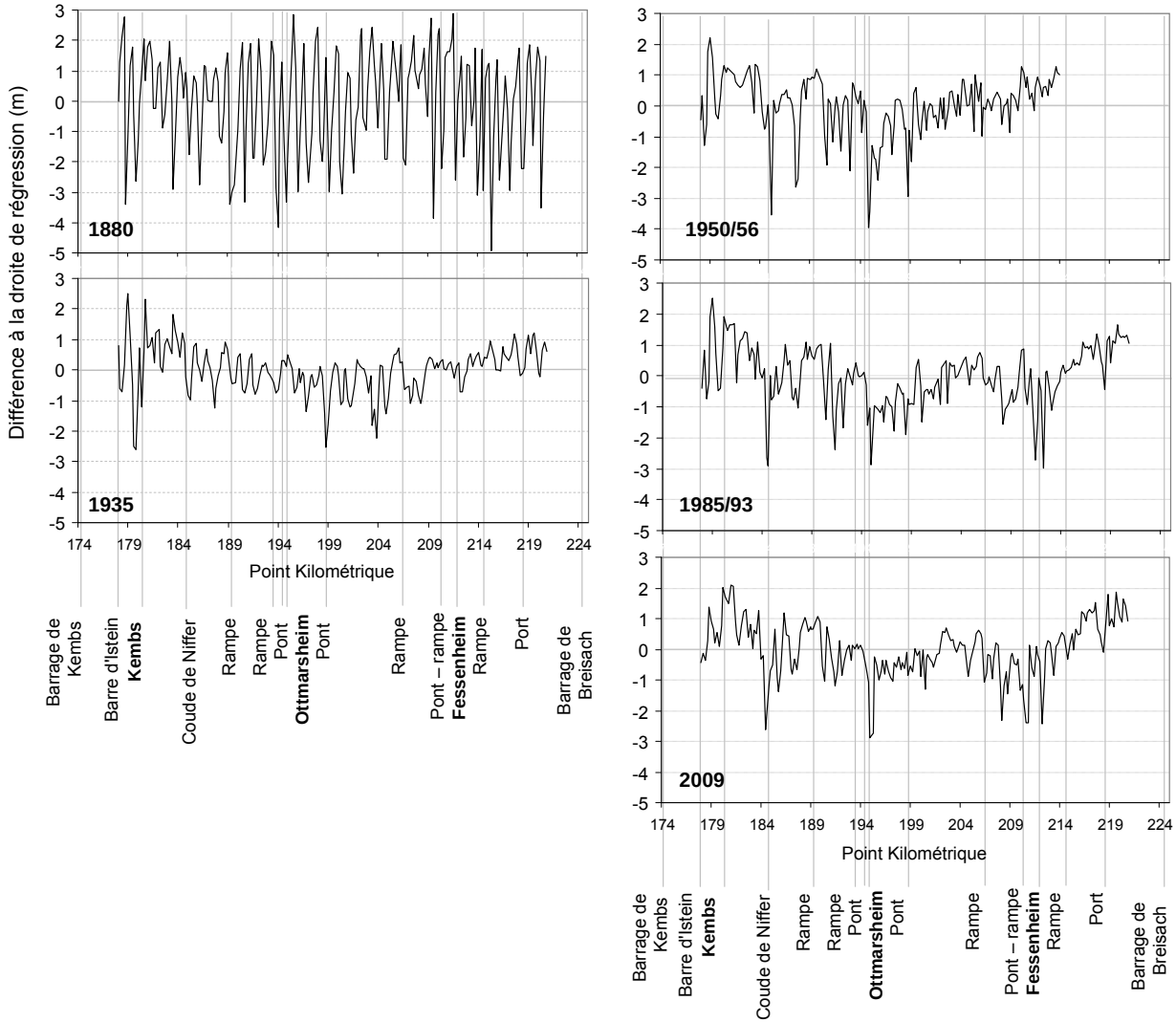


Figure 2.11 : Evolution de la variabilité du talweg en aval de la barre d'Istein entre 1880 et 2009 (en m tous les 200 m)

En 1935, l'amplitude dépasse rarement 2 m sur tout le linéaire (fig. 2.11). **Cette simplification drastique est très vraisemblablement le résultat de la régularisation, ainsi que de la correction qui a contribué à purger le chenal de sa charge grossière**. A partir de 1950, le lit enregistre de nouvelles séquences seuils-mouilles relativement irrégulières en longueur d'onde et en amplitude, sans toutefois atteindre le niveau de 1880 (fig. 2.11) : en 1950/56, le talweg est très irrégulier en amont du PK 200, et en 1985/93 et en 2009 le talweg est irrégulier sur l'ensemble du linéaire. **Il semblerait donc que le Vieux Rhin ait enregistré des remobilisations locales du fond du lit depuis la mise en service du barrage de Kembs**.

2.2.2. L'ampleur de l'incision du lit corrigé

L'analyse inter-dates révèle **une forte incision du lit suite aux travaux de correction** : le phénomène est particulièrement marqué avant 1950, avec des valeurs maximales de 7,6 et 5,4 m entre 1880 et 1935 et entre 1935 et 1950/56, respectivement (fig. 2.12, a). L'enfoncement progresse à une vitesse constante durant ces deux périodes, les valeurs médianes étant de **7,4 et 6,6 cm/an** (fig. 2.12, b). Il semblerait donc que **les épis n'aient pas eu d'effet, ni accélérateur ni freinant, sur l'incision**. Nous constatons en revanche une rupture à partir de 1950 : l'incision est stabilisée à une vitesse médiane de **0,4 à 0,5 cm/an**, soit environ 19 fois moins qu'avant 1950. Il semblerait ainsi que **la réduction des débits de crue par le barrage de Kembs ait eu un impact notable sur le ralentissement du processus**.

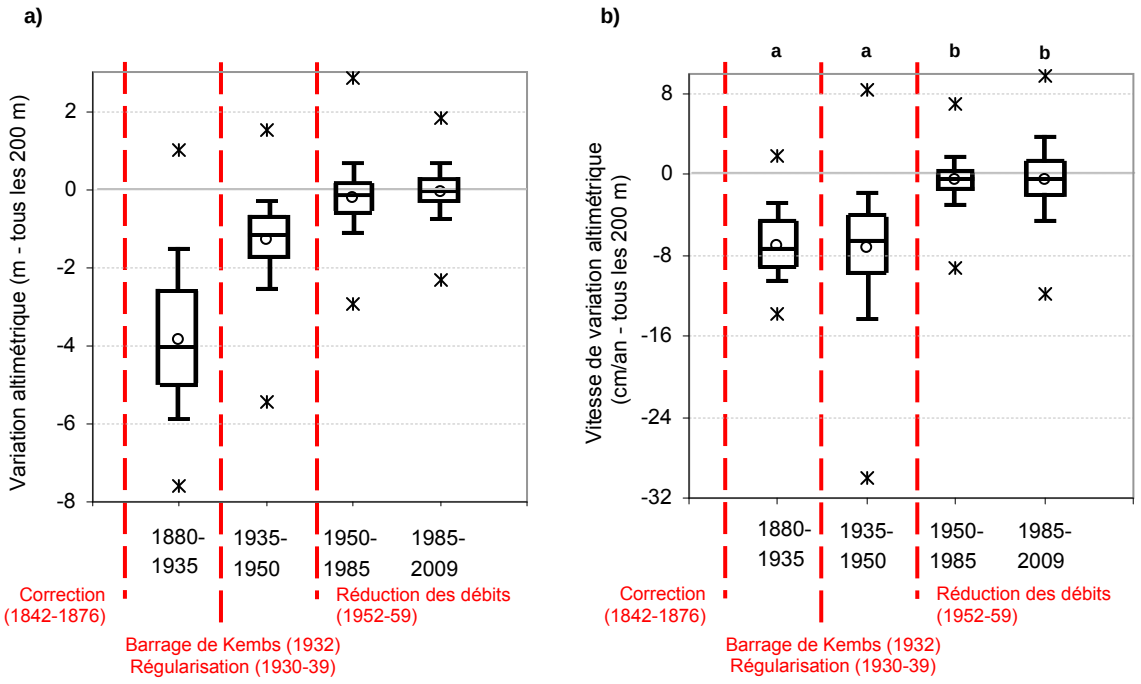


Figure 2.12 : Variations altimétriques du talweg entre 1880 et 2009 (tous les 200 m entre les PK 178 et 214 : n = 179) : a) Evolution de la variation (en m). b) Evolution de la vitesse de variation (en cm/an). Les lettres a et b indiquent les groupes homogènes d'après le test de Wilcoxon

Les valeurs minimales et maximales variant au cours du temps, nous amènent à étudier les **logiques spatiales d'évolution de l'incision** (fig. 2.13). Nous remarquons que la vitesse

d'incision est relativement constante sur la quasi-totalité du linéaire entre 1880 et 1935, hormis en aval du futur bouchon de Fessenheim où le phénomène est atténué. Cette répartition spatiale est sensiblement identique entre 1935 et 1950/56, hormis sur deux zones : l'amont du bouchon de Kembs, qui enregistre un ralentissement drastique de l'incision, et une section de 1,6 km située en aval immédiat du bouchon d'Ottmarsheim, qui connait une forte accélération. La réduction des pics de crue par le barrage de Kembs, en service dès 1932, pourrait être à l'origine du ralentissement de l'enfoncement entre le barrage et le bouchon de Kembs. Il est également possible que l'affleurement rocheux d'Istein, exhumé dans les années 1920, ait contribué à freiner l'incision entre Istein et le bouchon de Kembs. L'augmentation de l'incision observée sur la courte section en aval d'Ottmarsheim pourrait quant à elle être provoquée par les eaux peu chargées provenant du Grand Canal d'Alsace, rejoignant le Vieux Rhin par le canal de fuite d'Ottmarsheim et se réalimentant avec les matériaux du fond du lit (phénomène de *hungry water* décrit par Kondolf, 1997).

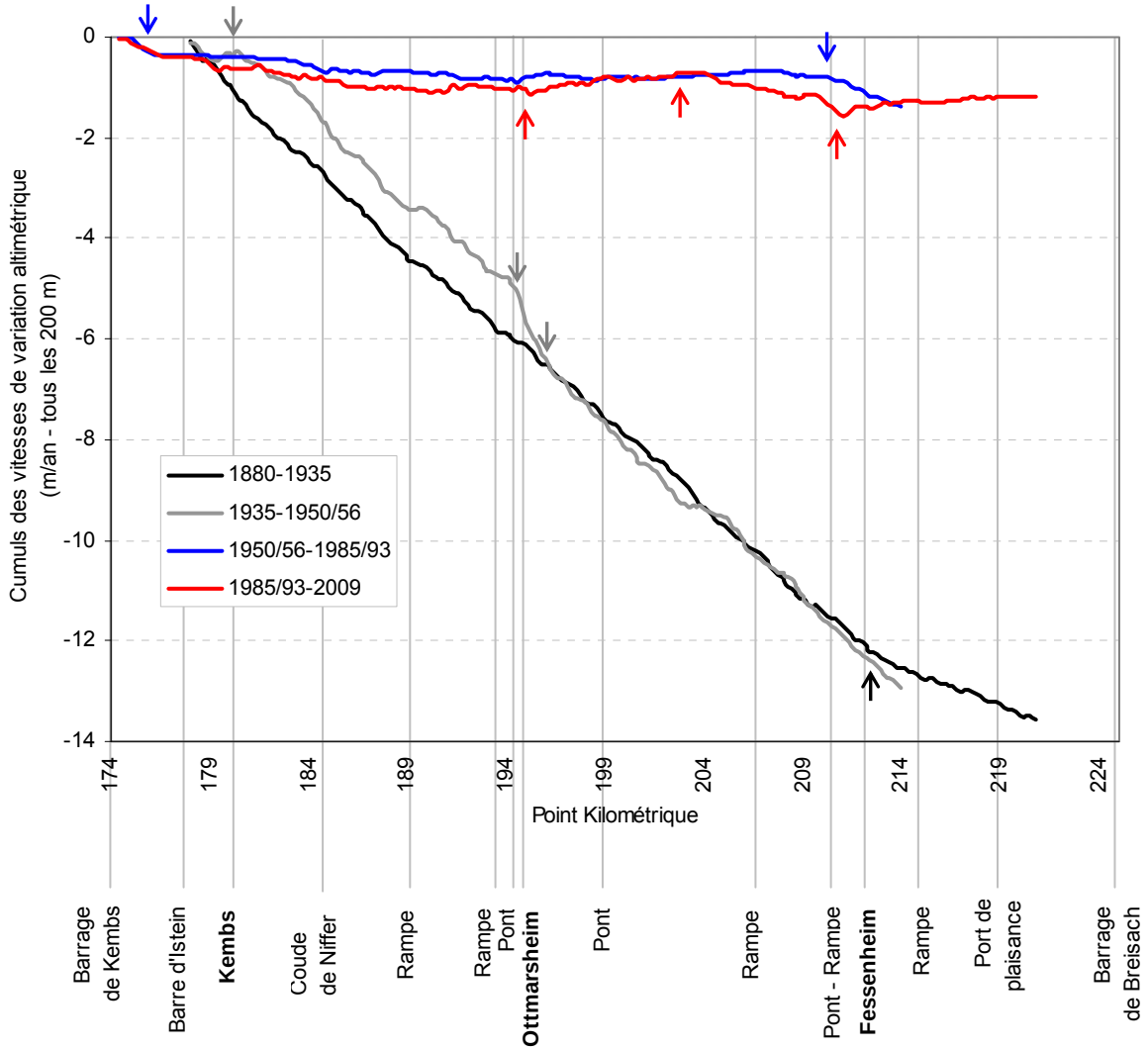


Figure 2.13 : Cumuls des vitesses de variation altimétrique du profil en long du barrage de Kembs au barrage de Breisach entre 1880 et 2009 (en m/an, tous les 200 m). Les flèches indiquent les ruptures détectées avec le test de Hubert

Ces éléments permettraient ainsi de renseigner à quel moment et sur quels secteurs les levés topographiques de 1950/56 ont été réalisés, ces informations précises étant inconnues jusqu'à présent :

- barrage de Kembs - bouchon de Kembs : réduction des débits en 1932 ;

➔ *levés topographiques entre 1950 et 1956*

- bouchon de Kembs - bouchon d'Ottmarsheim : semble être en débit total ;

➔ *levés topographiques entre 1950 et 1952* (car réduction des débits en 1952)

- aval du bouchon d'Ottmarsheim : semble être en débit total ;

➔ *levés topographiques entre 1952 et 1956* (car le canal de fuite d'Ottmarsheim était en service entre 1952 et 1956, avant la réduction des débits en 1956).

En résumé, nous mettons en évidence un **patron longitudinal d'incision stable entre 1880 et 1950/56**, hormis sur deux secteurs qui semblent avoir été contrôlés essentiellement par le chantier du Grand Canal d'Alsace. Après 1950, nous remarquons que les vitesses d'incision, très réduites, semblent être distribuées selon une alternance de tronçons homogènes à tendances d'érosion et de dépôt (fig. 2.13).

Ces observations sur l'évolution verticale du lit du Rhin déduites de l'analyse du talweg sont affinées pour la période contemporaine (post-1950) en quantifiant les volumes sédimentaires mobilisés sur toute la largeur du tronçon fluvial.

2.3. La dynamique sédimentaire de la bande active et des marges végétalisées du Vieux Rhin contemporain (1950-2011)

2.3.1. Evolution diachronique de la bande active et des marges végétalisées

Les processus concomitants d'incision de la bande active et d'exhaussement des marges végétalisées du Vieux Rhin sont observés depuis 1950. Ces deux processus ne se manifestent pas avec la même intensité, et évoluent différemment au cours de la période.

L'incision de la bande active

La vitesse médiane de changement vertical de la bande active est constante sur toute la période et égale à environ - 150 m^3/an (fig. 2.14). Cela correspond à une incision médiane de **0,7 cm/an**. Ce résultat est du même ordre de grandeur que la vitesse de 0,4 cm/an déduite de l'analyse du talweg (cf. fig. 2.12).

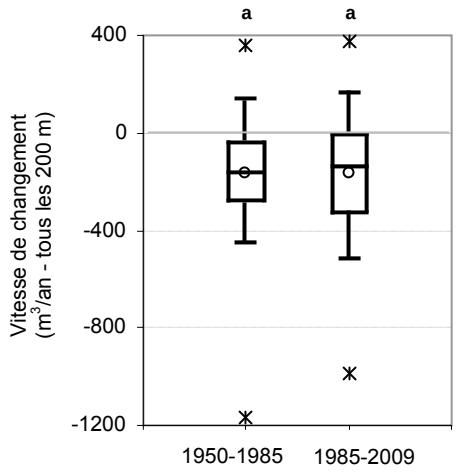


Figure 2.14 : Evolution de la vitesse de changement vertical dans la bande active entre 1950/56 et 2009 (en m^3/an, tous les 200 m jusqu'au PK 214 : n = 197)

L'exhaussement des marges végétalisées

L'exhaussement des marges est environ deux fois plus rapide que l'incision de la bande active, et il s'accélère au cours de la période. En effet, la vitesse médiane de changement vertical des marges augmente de + 277 à + 322 m^3/an, soit un accroissement de 16 % (fig. 2.15). Cela correspond à un exhaussement médian de **1,4 à 1,7 cm/an**.

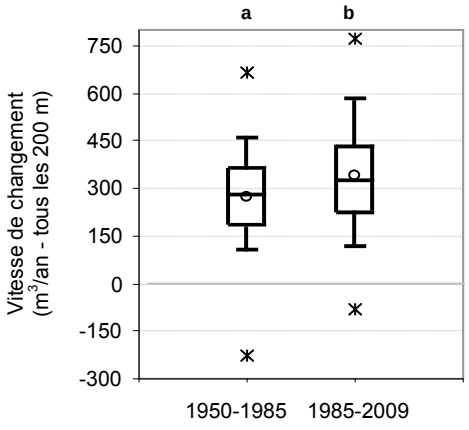


Figure 2.15 : Evolution de la vitesse de changement vertical sur les marges végétalisées entre 1950/56 et 2009 (en m^3/an, tous les 200 m jusqu'au PK 214 : n = 197)

Ces vitesses d'exhaussement constituent un premier indicateur de l'évolution verticale des marges. Il apparait également approprié d'analyser les taux de sédimentation selon l'âge des groupements végétaux, les études antérieures ayant montré que les marges végétalisées du Vieux Rhin sont composées de sédiments fins jusqu'à 3,5 m d'épaisseur (Dittrich *et al.*, 2000 ; Ergenzinger et Bölscher, 2008 ; Dittrich *et al.*, 2010 ; Ferrier, 2011). C'est pourquoi nous focalisons l'analyse suivante sur l'exploitation des mesures d'épaisseurs de fines réalisées au pénétromètre (cf. fig. 2.6).

Une relation inverse semble exister entre le taux de sédimentation et l'âge de la végétation (fig. 2.16). En effet, **les surfaces les plus récentes sédimentent rapidement** (taux médian de 5,2 et 8,1 cm/an pour la végétation âgée de moins de 17 ans), tandis que **les surfaces anciennes sédimentent plus lentement** (taux médian inférieur à 3,1 cm/an pour la végétation âgée de plus de 28 ans, dont un taux de 1,9 cm/an pour la végétation âgée de plus de 58 ans). Sur le Rhin près d'Erstein, au sud de Strasbourg, Carbiener *et al.* (1993) avaient estimé des taux encore plus faibles (entre 0,5 et 0,8 cm/an) dans une forêt alluviale beaucoup plus âgée (110 ans). Les valeurs que nous obtenons sur le tronçon d'étude sont dans les mêmes ordres de grandeur que celles déterminées sur des marges alluviales d'âge similaire telles que l'Ain (Berger, 2000 ; Piégay *et al.*, 2008) et la Garonne (Steiger *et al.*, 2001).

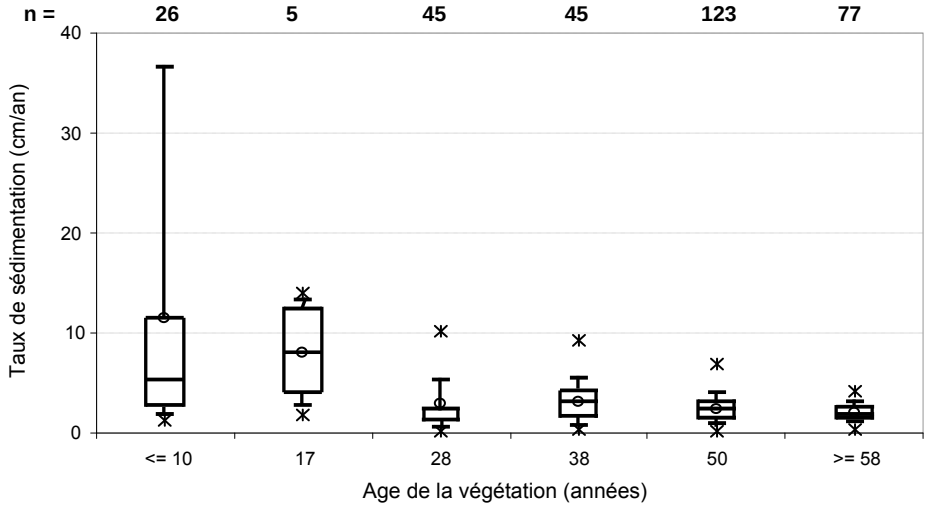


Figure 2.16 : Evolution du taux de sédimentation en fonction de l'âge de la végétation au droit de chaque sondage (en cm/an, n total = 321)

Le ralentissement de la sédimentation avec l'âge des peuplements est cohérent avec les descriptions de la littérature (Nanson et Beach, 1977 ; Berger, 2000 ; Steiger *et al.*, 2001 ; Piégay *et al.*, 2008), selon lesquelles les marges s'exhaussent par rapport au chenal au fur et à mesure que la végétation se développe et piège les fines, ce qui a pour effet de réduire la fréquence des débordements et donc de ralentir peu à peu l'aggradation. Dans notre cas, nous constatons que les peuplements anciens sont effectivement implantés à une altitude par rapport à la ligne d'eau d'étiage globalement supérieure en comparaison avec les peuplements récents (fig. 2.17, a). De plus, les peuplements anciens sont plutôt éloignés du chenal (fig. 2.17, b). Cette **structure spatiale transversale** pourrait constituer un second facteur explicatif des faibles taux de sédimentation observés en présence d'une végétation âgée : l'écoulement serait filtré par les espèces implantées à proximité immédiate du chenal, puis le flux d'eau contiendrait de moins en moins de sédiments au fur et à mesure de sa progression dans la forêt alluviale (Dufour, 2005).

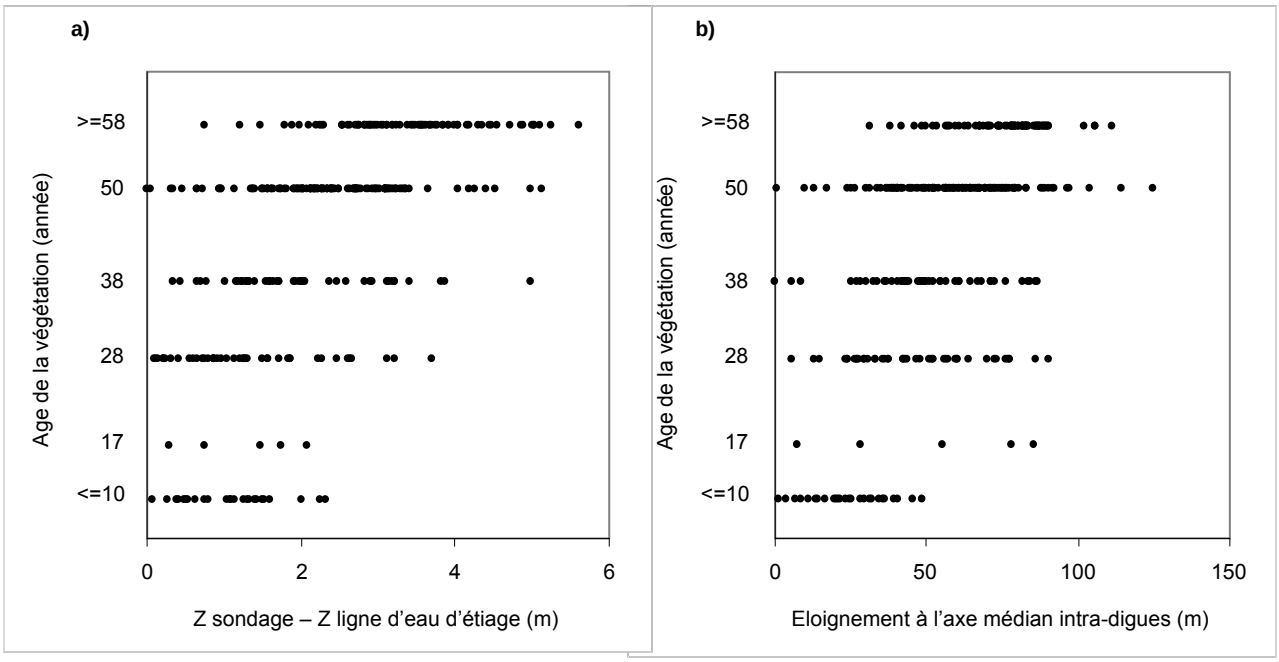


Figure 2.17 : Evolution de l'âge de la végétation en fonction de : a) l'altitude relative de chaque sondage par rapport à la ligne d'eau d'étiage (topographie de 2009), b) l'éloignement au chenal (axe médian intra-digues) (n total = 321)

Ces résultats, en accord avec la littérature, valideraient ainsi notre méthode de calcul des taux de sédimentation (cf. B/1.2.3), l'âge des groupements végétaux ayant été reconstitué à partir de photographies aériennes, ce qui est susceptible d'introduire des biais d'interprétation. En effet, nous avons attribué seulement six âges aux surfaces végétalisées identifiées sur les clichés, et nous avons supposé que la succession végétale était respectée, c'est-à-dire qu'il n'y a pas eu retour à un état non végétalisé entre deux séries de clichés. Les techniques classiques de datation de la végétation et des sédiments, telles que la dendrochronologie et les radionucléides (Dufour, 2005 ; Steiger *et al.*, 2001 ; Piégay *et al.*, 2008 ; Provensal *et al.*, 2010 ; Skalak et Pizzuto, 2010), donneraient l'âge des unités végétales et des dépôts avec plus de précision. Toutefois, notre procédure présente les avantages d'exploiter des données déjà disponibles et d'être extrêmement rapide à mettre en œuvre. De plus, les résultats satisfaisants confirment l'intérêt de la méthode.

Ayant démontré que la sédimentation a tendance à ralentir avec la maturation végétale, nous supposons que l'accélération de l'exhaussement des marges constatée à partir de la superposition des profils en travers entre 1950 et 2009 (cf. fig. 2.15) serait principalement dûe aux **trois crues majeures enregistrées depuis 1990**, qui ont vraisemblablement contribué à apporter de grandes quantités de sédiments fins au Vieux Rhin.

Finalement, la confrontation des volumes de sédiments déposés sur les marges, extraits des profils en travers entre 1950/56 et 2009 d'une part, et extraits des mesures au pénétromètre d'autre part, indique une cohérence entre les résultats : l'écart médian sur les volumes calculés à partir de ces deux jeux de données est de **18 %**. Ce résultat satisfaisant valide une fois de plus nos méthodes, et surtout, il démontre que **les dépôts accumulés sur les marges du Vieux Rhin depuis**

1950 sont essentiellement des sédiments fins. Ces résultats prouvent ainsi que **la végétation, qui s'est développée après la réduction des débits par le barrage de Kembs, constitue un facteur de contrôle de l'exhaussement des champs d'épis exondés**.

Dans le paragraphe suivant, nous cherchons à mettre en évidence les logiques longitudinales d'évolution des érosions et des dépôts, de manière à caractériser la variabilité des valeurs d'enfoncement et d'exhaussement observées dans la bande active et sur les marges végétalisées.

2.3.2. Patrons longitudinaux d'évolution de la bande active et des marges végétalisées

La bande active

L'analyse spatiale des volumes érodés et déposés dans la bande active révèle **un patron longitudinal stable depuis 1950** : entre 1950/56 et 1985/93, trois tronçons fluviaux homogènes à tendance d'incision, d'équilibre et d'incision sont observés successivement de l'amont vers l'aval (fig. 2.18). Entre 1985/93 et 2009, la bande active est stable spatialement, hormis dans la partie aval du Vieux Rhin, qui se trouve influencée par le barrage de Breisach à partir du PK 212, ce qui permet de définir un quatrième tronçon fluvial homogène, à tendance de dépôt. La partie amont connait également quelques évolutions, avec un léger ralentissement de l'incision en amont de la barre d'Istein, et un fort enfoncement au niveau du coude de Niffer (fig. 2.18). Les résultats obtenus pour la période récente (1985/93-2009) sont cohérents avec ceux de Schoneboom *et al.* (2010).

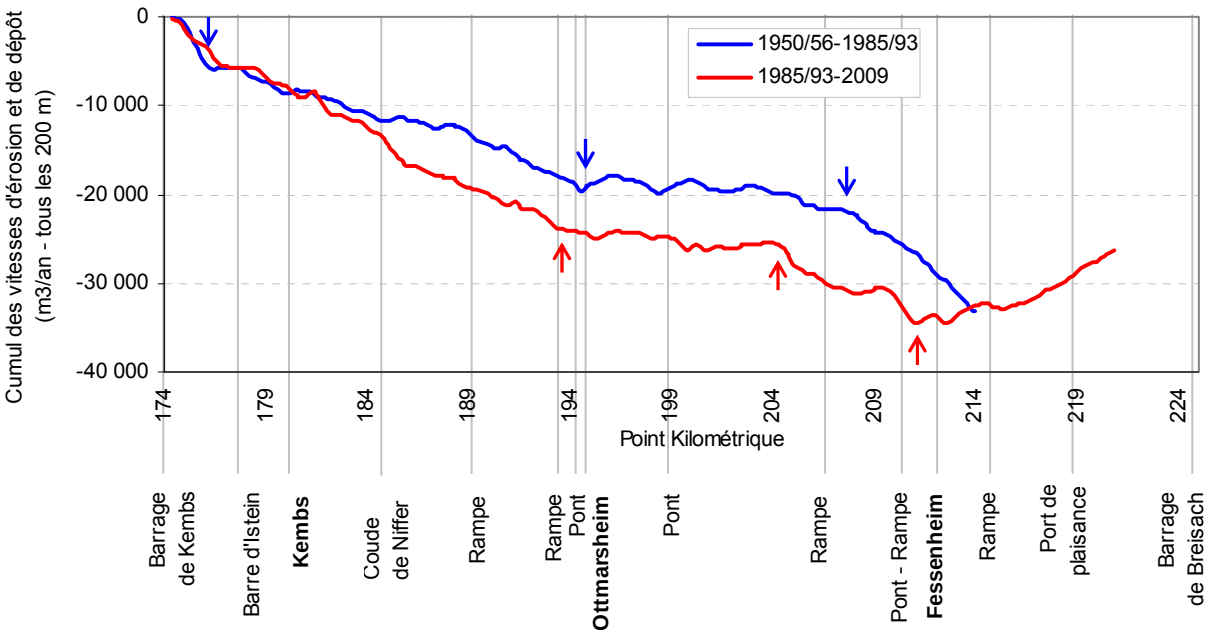


Figure 2.18 : Cumuls des vitesses d'érosion et de dépôt dans la bande active entre 1950/56 et 2009 (en m^3/an/profils en travers tous les 200 m : n = 197 ou 231). Les flèches indiquent les ruptures détectées avec le test de Hubert

Les marges végétalisées

L'analyse spatiale des volumes de dépôt extraits des profils en travers entre 1950/56 et 2009 d'une part, et extraits des mesures au pénétromètre d'autre part, indique une rupture au PK 199,42 (fig. 2.19) : en amont et en aval de ce point, l'écart médian entre les résultats issus des deux jeux de données est de **13 % et 21 %**, respectivement.

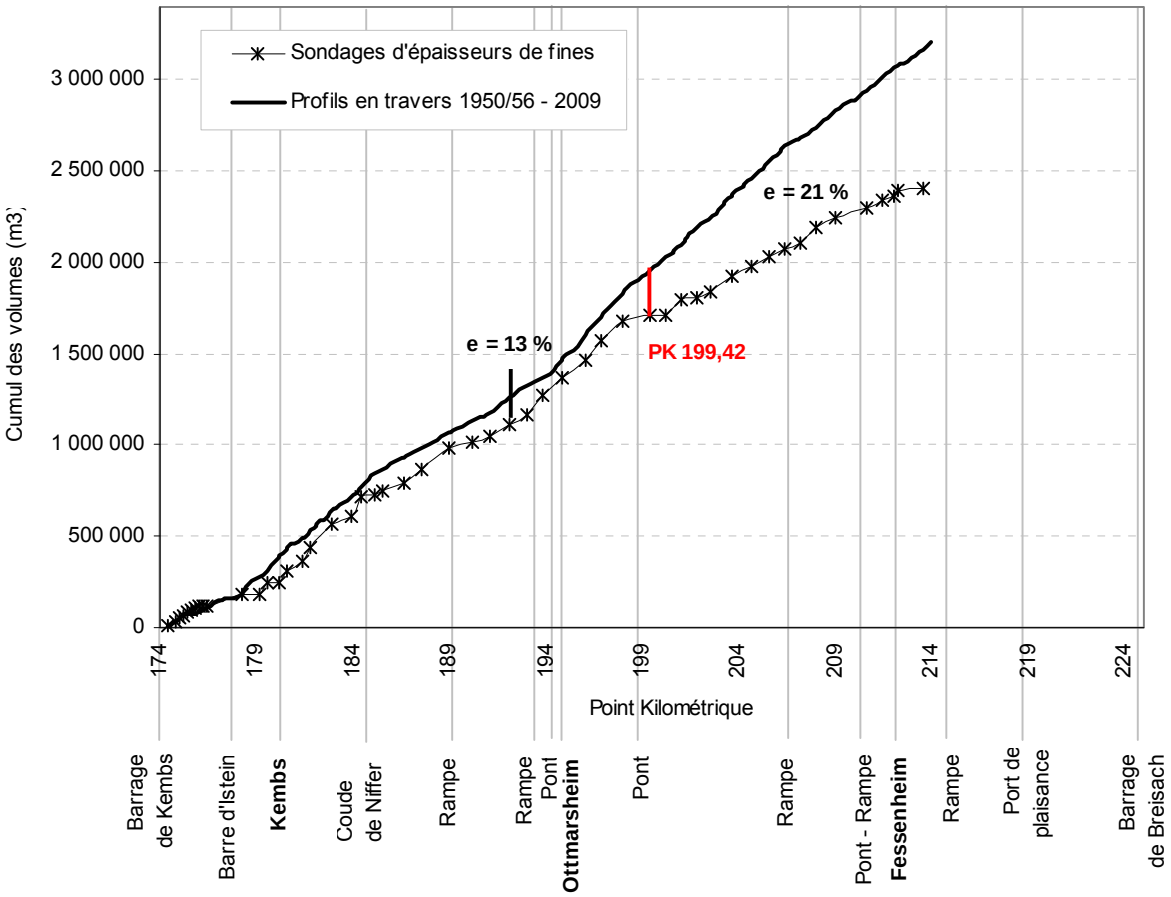


Figure 2.19 : Cumuls des volumes de sédiments déposés sur les marges depuis 1950 à partir de l'analyse des profils en travers et des sondages d'épaisseurs (en m^3/profil en travers tous les 200 m : n = 197)

Cette différence ne semble pas pouvoir être attribuée à un biais dans la méthode de sondage, le pas d'échantillonnage et le nombre moyen de sondages pénétrométriques par profil étant constant sur l'ensemble du Vieux Rhin. Ce résultat signifierait donc que la part de sédiments grossiers constituant les marges est plus importante dans la partie aval, et que la part de sédiments fins est plus faible (les épaisseurs médianes de fines sont effectivement de 1,1 m et 0,9 m en amont et en aval du PK 199,42, respectivement). Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce phénomène :

- *il y aurait davantage de sédiments grossiers dans la partie aval*, car le Rhin en aval du PK 194 (bouchon d'Ottmarsheim) a connu un débit total jusqu'en 1956, tandis que le Rhin en amont est déjà en débit réservé depuis 1952, voire 1932 entre le barrage de Kembs et le bouchon de Kembs. Il est alors probable que la crue de juin 1953, 20ème plus importante enregistrée à Bâle (3800 m^3/s, cf. tableau 1.3 dans le chapitre 1), ait continué à favoriser

le transport solide du chenal vers les champs d'épis, exhaussant ainsi les marges en matériau grossier avant la réduction des débits, et avant l'implantation de la végétation qui a amorcé par la suite la sédimentation des fines ;

- *il y aurait moins de sédiments fins dans la partie aval*, car les fines provenant *a priori* de l'amont du barrage de Kembs se seraient déposées préférentiellement dans la partie amont du Vieux Rhin. Par ailleurs, la partie aval ayant été plus longtemps en débit total, la végétation implantée sur les dépôts est donc plus jeune et a capté plus tardivement les sédiments fins. Sans doute d'autres caractéristiques, telles que la composition et la densité des groupements végétaux, peuvent contribuer à expliquer l'importance relative des dépôts grossiers en aval. Toutefois, la mesure de ces paramètres dépasse les limites de cette étude.

C/ Analyse de l'évolution planimétrique du Rhin (1828-2008)

1. Matériel et méthodes

1.1. Recensement des données planimétriques

1.1.1. Cartes du 19ème - début 20ème siècle

Quatre cartes du tracé en plan du Rhin ont été acquises auprès de la Bibliothèque Nationale et Universitaire de Strasbourg, de la Petite Camargue Alsacienne et des Archives Départementales du Haut-Rhin : deux cartes avant les travaux de correction (**1828 et 1838**) et deux cartes postérieures à cet aménagement (**1872 et 1925**) (tableau 2.6).

Les cartes du début du 19ème siècle avaient pour vocation de planifier les travaux et de délimiter la frontière (Raab, 1953 ; Römer, 1981). Pour ces raisons, il s'agit des **reproductions les plus précises du Rhin sauvage** en comparaison des cartes antérieures (Le Rouge en 1745, Cassini en 1784…), levées à une échelle trop petite pour restituer rigoureusement le tracé en plan (Bravard et Bethemont, 1989 ; Schmitt, 1995 ; Schmitt *et al.*, in prep.). Par ailleurs, la carte de 1828 avait déjà été exploitée par Kleinas (2003), Schmitt *et al.* (2007) et Schmitt (2010) pour la sectorisation longitudinale de la plaine alluviale du Rhin supérieur (cf. chapitre 1, C.2.2.), elle a donc été réutilisée dans cette étude. Les cartes de 1828 et 1838 se présentent sous la forme de 18 feuilles au 1/20 000ème entre Bâle et Lauterbourg, chaque feuille couvrant un linéaire d'environ 10 km et une largeur de 12 km.

Les travaux de correction ayant fixé la frontière, les levés cartographiques sont moins fréquents durant la seconde moitié du 19ème siècle. L'édition de 1872 représente l'hydrosystème fluvial vers la fin des travaux. Elle a été levée à la même échelle que les éditions antérieures, et est basée sur le même découpage en 18 feuilles. Les types d'unités cartographiées sont toutefois moins nombreux, et le tracé est moins détaillé. La carte de 1925, au 1/25 000ème, restitue le tracé en plan presque 50 ans après la fin de la correction.

Année	Source	Echelle	Nombre de feuilles	Couleurs	Légende	Travail cartographique
1828	BNU Strasbourg	1/20 000	6	non	oui	Unités physionomiques Talweg 1828
1838	PCA	1/20 000	6	oui	?	Talweg 1838
1872	PCA	1/20 000	6	oui	?	Unités physionomiques
1925	Arch. Dép. 68	1/25 000	4	oui	oui	Unités physionomiques

Tableau 2.6 : Cartes retenues pour l'analyse surfacique des unités physionomiques de la plaine rhénane

1.1.2. Plans de la régularisation (1946-1968)

La Direction des Travaux de Freiburg a édité une série de plans au 1/5 000ème localisant l'ensemble des ouvrages construits et projetés au cours de la régularisation. Chaque feuille couvre un linéaire d'environ 6 km. Les éditions de **1946 et 1954** ont été acquises auprès du WSA. Dans le même temps, le Port Autonome de Strasbourg publiait des plans d'avancement de l'aménagement hydro-électrique du Rhin. L'édition de **1968** a été acquise auprès du Service de la Navigation de Strasbourg dans le but de vérifier la localisation des épis et des seuils de fond effectivement construits et toujours en place après la guerre (tableau 2.7).

Année	Source	Echelle	Secteur (PK)	Nombre de feuilles	Couleurs	Légende	Travail cartographique
1946	WSA	1/5 000	178-196	3	oui	oui	Epis, seuils de fond, digues
1954	WSA	1/5 000	196-226	5	oui	oui	Epis, seuils de fond, digues
1968	SNS	1/20 000	Tout le Vieux Rhin	-	oui	oui	Validation des ouvrages en place en 1968

Tableau 2.7 : Cartes retenues pour l'analyse des ouvrages de la régularisation

1.1.3. Photographies aériennes (1956-2008)

Sept missions aériennes entre 1956 et 2008 ont été acquises auprès de l'IGN et d'EDF (tableau 2.8). Les variations hydrologiques ayant des conséquences directes sur les superficies de bancs et de bande active extraites des photographies (Rollet, 2007), une attention particulière a été portée pour sélectionner des missions présentant un débit similaire. Les débits à la date des prises de vue ont été tirés de la station de Rheinweiler (PK 186,18), qui enregistre les débits moyens journaliers depuis 1982. Les débits antérieurs ont été extrapolés à partir de la chronique de débits à +/- 2 jours sur la période 1982-2008. Il apparait ainsi que la quasi-totalité des missions correspond à un débit d'étiage inférieur à 54 m^3/s ; seule la mission de 1997 présente un débit de 160 m^3/s.

Année	*Date*	*Source*	*Echelle/ Résolution*	*Secteur (PK)*	*Couleurs*	Hydrologie moyenne journalière à Rheinweiler	
						Débit (m^3/s)	Hauteur d'eau (cm)
1956	10/04/56 22/04/59	EDF/ IGN	1/25 000	174,0-183,7 183,8-224,8	non	*37* *39*	174 166
1970	01/01	IGN	1/20 000	Tout le Vieux Rhin	non	*27*	148
1979	07/08/79 21/08/80 13/07/82	IGN	1/14 500	174,0-192,9 193,0-205,7 205,8-211,8 211,9-224,8	non	*39* *37* 53	173 178 182
1991	11/07/91 16/09/92	IGN	1/30 000	174,0-179,2 179,3-208,0 212,3-224,8	oui	35 54	173 186
1997	16/07/97 28/03/98 22/11/98	IGN	1/25 000	174,0-179,2 179,3-204,5 204,6-211,9 212,0-224,8	non	160 29 29	235 168 168
2002	02/06	IGN (BD ortho)	50 cm	Tout le Vieux Rhin	oui	35	172
2008	01/04 06/08	EDF	20 cm	Tout le Vieux Rhin Tout le Vieux Rhin	oui	39	175

37 : débit extrapolé à partir de la chronique de débits moyens journaliers à +/- 2 jours sur la période 1982-2008

Tableau 2.8 : Missions aériennes retenues pour l'analyse surfacique des unités physionomiques du Vieux Rhin

1.2. Intégration des données sous SIG et étude cartographique

Les données planimétriques ont subi des étapes successives de géoréférencement, cartographie des unités physionomiques et estimation des erreurs, avant de procéder aux statistiques spatiales (aide cartographique apportée par D. Hoenen).

1.2.1. Géoréférencement des données

Le géoréférencement implique l'identification de points de contrôle au sol (intersections de chemins, églises, ponts…), qui relient les emplacements de l'image à ceux d'un jeu de données déjà géoréférencé. L'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square error* : RMS) permet d'évaluer la qualité du recalage. A chaque point de contrôle est associé un résidu *r*, qui correspond à l'écart (en mètres) entre les emplacements de départ et d'arrivée (Winterbottom et Gilvear, 2000) :

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} r_i^{\,2}}{n}}$$

n : nombre de points de contrôle

Nous avons géoréférencé la carte de 1828 sur la BD ortho de 2002. Les éditions de 1838 et 1872 ont été référencées sur 1828, en utilisant des bornes de triangulation communes aux trois dates. L'édition de 1925 a été référencée sur la BD ortho de 2002. Les plans de 1946 et 1954 ont quant à eux été référencés en utilisant les bornes kilométriques qui jalonnent la rive allemande tous les 100 m. L'ensemble des cartes a ensuite été rectifié selon une transformation polynomiale d'ordre 1, afin de ne pas déformer les images. La qualité du géoéréférencement de cartes anciennes est peu évaluée dans la littérature. Récemment, un travail de reconstitution des limites forestières à partir des cartes de Cassini (Vallauri *et al.*, 2012) a révélé des écarts moyens entre les clochers Cassini et les clochers actuels de 281 m. Dans la présente étude, **la RMS de chaque feuille n'excède pas 19 m** (tableau 2.9). Nous pouvons considérer cette erreur comme correcte.

Année	Nombre moyen de points de contrôle / feuille	RMS max / feuille (m)
1828	9	17,1
1838	9	6,8
1872	11	14,5
1925	15	19,0
1946	7	3,2
1954	7	4,5
1968	-	-

Tableau 2.9 : Caractéristiques du géoréférencement des cartes et des plans

Contrairement aux cartes, les images aériennes sont susceptibles de présenter des déformations liées au relief et à l'appareil photographique (inclinaison de l'axe, distorsion de l'objectif). L'ortho-rectification consiste à supprimer ces déformations, afin de rendre l'image conforme en tous points à une projection orthogonale (Lafont et Troispoux, 2003). Cependant, compte-tenu des faibles variations de relief sur le site d'étude, nous n'avons pas jugé nécessaire d'ortho-rectifier les images. Le géoréférencement de l'ensemble des clichés a été réalisé sur la base de l'ortho-photographie d'avril 2008. Pour chaque cliché, nous avons identifié une quinzaine de points de contrôle au sol, localisés en priorité dans l'espace intra-digues, afin de minimiser les erreurs autour de l'objet d'étude (courbures d'épis, berges en enrochements…). Une transformation polynomiale d'ordre 1 a ensuite été appliquée, selon les recommandations d'Hugues *et al.* (2006) sur un secteur présentant de faibles variations de relief. **La RMS n'excède pas 5 m** (tableau 2.10), ce qui traduit un géoréférencement correct au regard de la littérature (Gurnell *et al.*, 1994 ; Dufour, 2005 ; Rollet, 2007).

Année	Date	Nombre moyen de points de contrôle / cliché	RMS max / cliché (m)
1956	10/04/56	12	4,5
	22/04/59	14	4,8
1970	01/01	16	3,7
1979	07/08/79	13	4,7
	21/08/80	17	5,0
	13/07/82	20	4,3
1991	11/07/91	20	3,4
	16/09/92	20	3,0
1997	16/07/97	12	4,6
	28/03/98	14	3,2
	22/11/98	14	4,4
2002	02/06	-	-
2008	01/04	-	-
	06/08	-	-

Tableau 2.10 : Données de géoréférencement des photographies aériennes

1.2.2. Travail cartographique

Cartographie de la mobilité du Rhin sauvage (1828-1838)

Le talweg représenté sur les cartes de 1828 et 1838 a été digitalisé manuellement. Les écarts entre les deux talwegs ont ensuite été mesurés tous les 500 m, par conversion du fichier de lignes de 1838 en fichier de points équidistants de 500 m, et projection orthogonale de ces points sur le talweg de 1828 (utilisation de l'outil *référencement linéaire* dans ArcGis) (fig. 2.20).

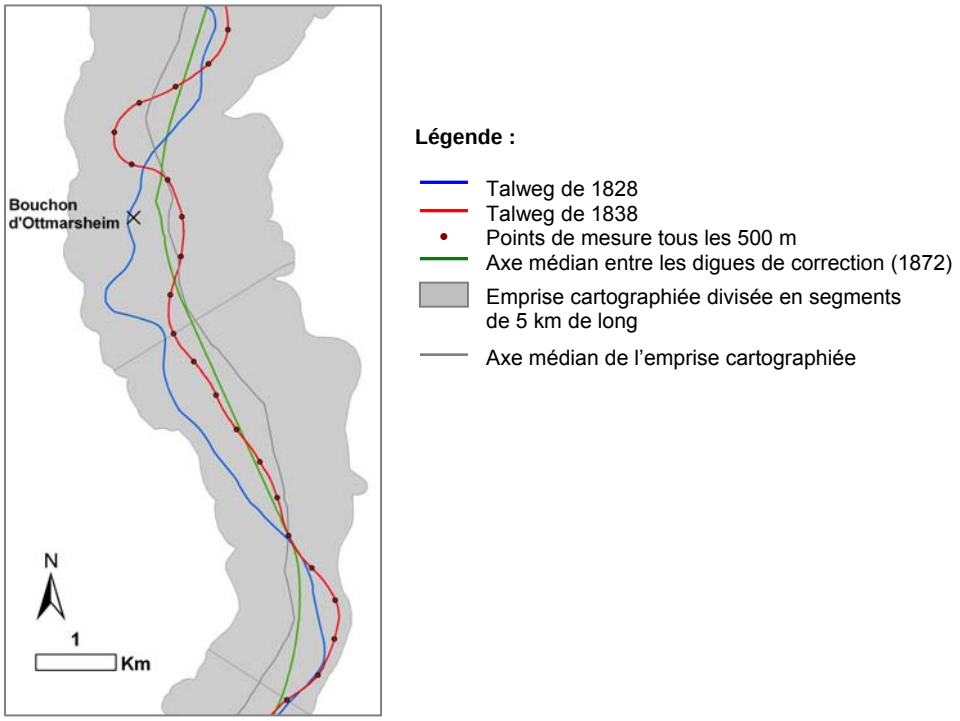


Figure 2.20 : Méthode de comparaison des talwegs de 1828 et 1838 et de l'axe médian entre les digues de la correction en 1872. Illustration dans le secteur d'Ottmarsheim

De plus, la sinuosité des deux talwegs a été calculée tous les 5 km en prenant pour référence l'axe médian de la plaine rhénane (extraction des longueurs tous les 5 km dans ArcGis). Ces sinuosités ont été comparées à celle du Rhin corrigé en 1872, qui a été calculée en utilisant l'axe médian entre les deux digues.

Cartographie des unités physionomiques de la plaine rhénane (1828-1925)

Nous avons délimité la « plaine rhénane » par les chenaux les plus éloignés de l'hydrosystème fluvial sur la carte de 1828, auxquels un tampon de 100 m a été appliqué. Le travail cartographique a été effectué manuellement au 1/8 000ème. Nous avons défini **huit unités éco-morphologiques et anthropiques** sur la base des informations tirées de la légende quand elle était disponible (cas des éditions de 1828 et 1925) et de l'interprétation des structures et des positions (tableau 2.11 et fig. 2.21).

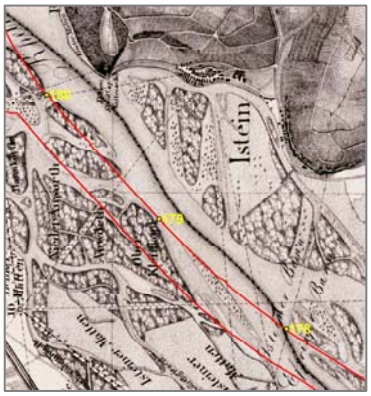
Type d'unités	Dénomination	Informations tirées de la légende (noms, couleurs)	Caractéristiques (structure et position)
Unités morphologiques	Chenaux en eau	*« Fliessendes Wasser » (eau courante)* en 1828 Bleu en 1872 et 1925	Connexion au chenal principal amont et/ou aval
	Bancs	*« Sand » (sable), « Anflug »* en 1828 Blanc en 1872 et 1925	En bordure ou au sein des chenaux eau
	Chenaux à sec	Blanc en 1872 et 1925	Anciens chenaux en eau et déconnexions
	Zones aquatiques déconnectées (mares)	*« Stehendes Wasser » (eau stagnante), « Sumpf » (marais)* en 1828 Bleu en 1872 et 1925	Déconnexion au chenal principal amont et aval
Unités végétales	Végétation ligneuse	*« Gebusch » (buisson), « Wald » (forêt)* en 1828 Vert en 1872 *« Feuillus », « Sapins », « Broussailles »* en 1925	Sur les îles et les marges
	Prairies, cultures	*« Ackerfeld » (champ), « Wiesen » (pré), « Reben » (vigne)* en 1828 Blanc en 1872 et 1925 *« Vergers », « Oseraies »* en 1925	Parcelles géométriques sur les marges
Unités anthropiques	Bâti	Variable	Variable
	Digues, déflecteurs	*« Damm » (digue), « Fluss Sporn » (déflecteur)* en 1828 Noir en 1872 et 1925	Structures linéaires

Tableau 2.11 : Définitions et caractéristiques des unités physionomiques de la plaine rhénane extraites des cartes

Au sein des chenaux en eau, nous avons distingué **cinq types** sur la base de la typologie élaborée par Kleinas (2003), Schmitt *et al.* (2007) et Schmitt (2010) à partir de critères hydrologiques, morphologiques et relatifs à l'occupation des sols (tableau 2.12). Le terme « défluents proches » est employé ici pour désigner des chenaux présentant une morphologie intermédiaire entre les anastomoses et les tresses, en termes de largeur, sinuosité, présence de bancs... Ces chenaux peuvent s'apparenter au type *« anabranche »* décrit par Nanson et Knighton (1996) (Schmitt *et al.*, in prep.).

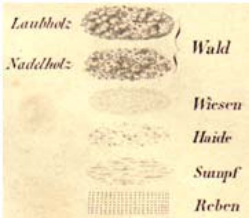
Types de chenaux / Critères	Tresses	Défluents proches connectés par l'amont	Défluents proches déconnectés par l'amont	Anastomoses connectées par l'amont	Anastomoses déconnectées par l'amont
Connexion au chenal principal	Amont et aval	Amont et aval	Aval	Amont et aval	Aval
Distance au chenal principal	< 0,5 km	0,5-1 km *ou* anciens chenaux de tressage moins parcourus par les écoulements après le déplacement du talweg		> 0,5-1 km (au-delà des digues de hautes eaux) *ou* entre deux bandes de tressage séparées par de larges îles végétalisées	
Sinuosité	Faible (1 à 1,2)	Faible (1,1 à 1,3)		Elevée (1,2 à 1,5 voire plus)	
Largeur, longueur	Variable	Relativement étroits et courts		Etroits à très étroits, parfois très longs (17 km au maximum)	
Occupation des sols	Bancs vifs dominants (gravier ou sable), végétation occupant moins de 50 % des berges	Bancs vifs (gravier ou sable), végétation occupant plus de 50 % des berges		Pas de bancs, végétation ou surfaces cultivées occupant quasiment 100 % des berges	

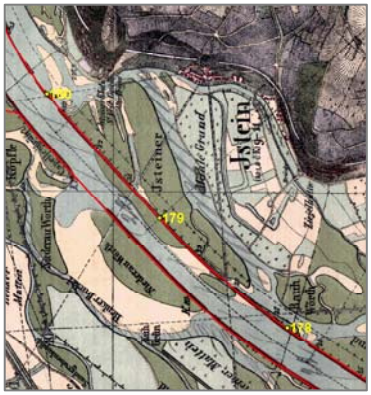
Tableau 2.12 : Critères de discrimination des types de chenaux extraits des cartes (modifié d'après Kleinas, 2003 ; Schmitt *et al.*, 2007 ; Schmitt, 2010)



Légende de la carte de 1828







Aucune légende sur la carte de 1872

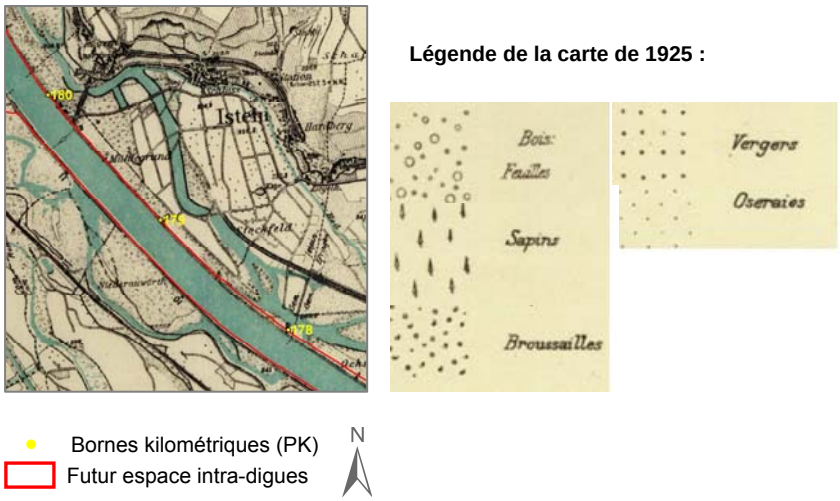


Figure 2.21 : Extrait des cartes de 1828, 1872 et 1925 dans le secteur d'Istein (PK 180). Les éléments de légende sont traduits dans le tableau 2.11

Cartographie des ouvrages de la régularisation (1946-1968)

Les ouvrages de la régularisation construits et projetés ont été digitalisés manuellement à partir des plans de 1946 et 1954. Le plan de 1968 a servi à vérifier les ouvrages toujours en place après la guerre. Il apparait ainsi que 290 ouvrages prévus, correspondant majoritairement à des seuils de fond, n'ont finalement pas été construits ou ont été détruits par manque d'entretien. Au total, le Vieux Rhin compte **722 épis, 122 seuils de fond et 35 digues longitudinales**.

Cartographie des unités physionomiques du Vieux Rhin (1956-2008)

Le travail de photo-interprétation a été réalisé manuellement, à la suite de tests de segmentation et de classification automatiques qui n'ont pas donné des résultats satisfaisants en termes de précision et de temps de traitement. Nous avons extrait **neuf unités éco-morphologiques et anthropiques**. Les classes ont été extraites au 1/3 000ème sur la base des différences de couleur, texture, structure et position, en adaptant les critères de reconnaissance développés par Girel (1986) et repris par Dufour (2005) sur la rivière d'Ain (tableau 2.13).

La BD ortho de 2002 a été insérée entre les missions de 1997 et 2008 afin de mesurer les effets de la crue de 1999 sur la bande active du Vieux Rhin. Pour cette année, seuls les bancs et le chenal en eau ont été cartographiés.

Type d'unités	Dénomination	Caractéristiques (couleur, texture…) (d'après Girel, 1986 et Dufour, 2005)
Unités morphologiques	Chenal en eau	Gris foncé-noir et lisse
	Bancs	Blanc et lisse
	Substratum rocheux émergé	Gris et rugueux
	Zones aquatiques déconnectées (mares)	Gris foncé-noir et lisse
Unités végétales	Herbacées	Gris, lisse et uniforme ou tâches éparses (pour les herbacées éparses sur les bancs)
	Buissons, arbustes	Gris foncé, plus ou moins rugueux (houppiers relativement individualisés)
	Arbres	Gris foncé, noir (ombres portées) et rugueux (houppiers individualisés)
Unités morphologiques et anthropiques	Affluents et entrants anthropiques	Variables
Unités anthropiques	Digues, épis, chemins, bâti	Variable

Tableau 2.13 : Définition et caractéristiques des unités physionomiques du Vieux Rhin extraites des photographies aériennes

1.2.3. Estimation des erreurs

Les erreurs pouvant être générées par la manipulation d'informations planimétriques sont de deux types : (i) les erreurs associées au traitement SIG des données, (ii) les erreurs associées aux éventuelles différences de débit à la date d'acquisition des données.

Evaluation des erreurs associées au traitement SIG des données

Pour le traitement des cartes comme des photographies aériennes, l'erreur associée à l'étape de digitalisation a été minimisée, dans la mesure où le travail a toujours été réalisé à la même échelle, et a été finalisé par le même opérateur. **Le biais induit par la digitalisation est donc considéré comme constant et négligeable dans la comparaison diachronique des métriques**. En revanche, l'étape de géoréférencement est susceptible d'introduire une erreur, inférieure à 19 m et 5 m pour les cartes et les photographies, respectivement (cf. tableaux 2.9 et 2.10). Etant donné que nous avons positionné les points de contrôle au sol de part et d'autre du Rhin, qui est orienté principalement nord-sud, nous en déduisons que le décalage planimétrique généré par le géoréférencement est orienté majoritairement est-ouest. Par conséquent, le déplacement nord-sud d'une portion de polygone d'un segment élémentaire *i* à un segment élémentaire *i+1* entre deux dates peut être considéré comme négligeable. **Le géoréférencement des images est donc considéré comme n'introduisant pas de biais dans la comparaison diachronique des métriques**. Le décalage est-ouest devra toutefois être pris en compte dans le cas d'intersections multi-dates, par exemple pour extraire des surfaces érodées et végétalisées (cf. bilan sédimentaire, partie E.). Dans ce cas, pour un segment élémentaire de 100 m de long, l'erreur maximale associée au traitement des photographies sera de 500 m².

Evaluation des erreurs associées aux différences de débit

L'erreur associée aux différences de débit est difficilement évaluable à partir des cartes car nous manquons d'informations sur les conditions de relevés. Toutefois, l'emprise spatiale de crues majeures étant représentée sur certaines éditions du 19ème siècle (ex. : l'emprise de la crue de 1852 a été indiquée sur une édition de 1869), nous émettons l'hypothèse que **le Rhin a été cartographié systématiquement au débit d'étiage**, soit environ 540 m^3/s à Bâle. Cette information parait suffisamment précise par rapport aux objectifs d'analyse des cartes (ex. : estimation de l'évolution générale des superficies de bancs et des types de chenaux entre 1828 et 1872).

L'analyse des photographies aériennes a en revanche été menée à un pas de temps plus fin et avec une plus grande précision. Or, les variations de débit ont des conséquences directes sur les superficies de bancs extraites des photographies : lorsque le débit augmente, toutes choses étant égales par ailleurs, la surface des bancs diminue. Il est donc important de s'assurer que les débits soient les plus similaires possibles pour permettre une comparaison diachronique (Rollet, 2007). Les superficies de bande active peuvent être également fortement surestimées pour des débits élevés, généralement supérieurs au débit de plein bord. Rollet (2007), dans son étude diachronique de l'évolution planimétrique des bancs de la basse vallée de l'Ain, a exclus la moitié des photographies initiales pour ne conserver que celles aux débits les plus similaires, correspondant à un débit inférieur à 30 m^3/s. Dans notre cas, **les six missions aériennes retenues pour l'analyse des superficies de bancs présentent un débit d'étiage similaire, inférieur à 54 m^3/s** (station de Rheinweiler). Ceci implique l'exclusion de la mission aérienne de 1997, correspondant à un débit de 160 m^3/s. Cette mission a néanmoins été intégrée à l'étude de la bande active, le débit étant largement inférieur au Q_2 (1400 m^3/s dans le Vieux Rhin), généralement assimilé au débit de plein bord (Amoros et Petts, 1993 ; Bravard et Petit, 1997).

2. Résultats

2.1. La mobilité du lit du Rhin sauvage (1828-1838)

Il apparait que **90 % des points mesurés présentent des écarts supérieurs à 28 m**, entre la position du talweg en 1828 et en 1838. **50 % des points montrent des écarts supérieurs à 142 m** (fig. 2.22, a). Ces valeurs sont très largement supérieures à l'erreur planimétrique associée au traitement cartographique. Les résultats mettent ainsi en évidence **la mobilité du Rhin avant les travaux de correction**.

Nous remarquons que la sinuosité du talweg est similaire en 1828 et en 1838 : l'indice de sinuosité présente une valeur médiane de 1,07 et 1,17, respectivement (fig. 2.22, b). La correction a évidemment eu pour effet de réduire la sinuosité : 50 % des données présentent même une valeur inférieure à 1 en 1872. Ce résultat, relativement étonnant pour un indice de sinuosité, est

expliqué par la méthode de calcul, le tracé du Rhin corrigé étant à certains endroits plus rectiligne que l'axe médian de la plaine rhénane qui a été utilisé comme référence (cf. fig. 2.20).

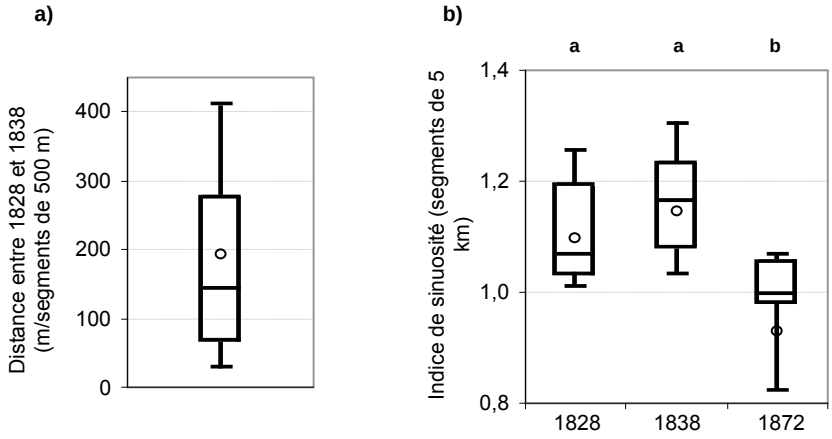


Figure 2.22 : a) Distribution des écarts entre les talwegs de 1828 et 1838 (tous les 500 m : n = 121). b) Indices de sinuosité en 1828, 1838 et 1872 (tous les 5 km : n = 11). Les lettres a et b indiquent les groupes homogènes d'après le test de Wilcoxon

2.2. L'évolution planimétrique de la plaine rhénane (1828-1925)

2.2.1. Evolution générale des unités physionomiques de la plaine rhénane

La comparaison des cartes met en évidence **un assèchement drastique des milieux aquatiques de la plaine rhénane entre 1828 et 1925**. En effet, le chenal en eau a enregistré une diminution de sa superficie de 2 099 ha, soit une baisse de 55 % (fig. 2.23). Les surfaces occupées par la végétation ont augmenté de 881 ha, soit une hausse de 17 %. Les chenaux à sec, qui n'apparaissent pas sur la carte de 1828, représentent 484 ha en 1925. Les bras morts ont augmenté de 183 ha, soit une hausse de 307 % ! 970 ha de bancs ont disparu, soit une baisse de 98 **%** ! Ces profondes modifications hydro-morphologiques sont associées à une augmentation des unités anthropiques, en particulier les digues et les déflecteurs qui ont augmenté de 175 ha, soit 164 %.

Nous remarquons que les changements s'expriment avec le plus d'intensité entre 1828 et 1872. Entre 1872 et 1925, les vitesses de changement sont plus faibles, mais les tendances générales d'évolution sont identiques (fig. 2.24). Seule la végétation enregistre une inversion de tendance, avec une diminution de superficie au cours de la seconde période, vraisemblablement induite par l'extension des surfaces cultivées (fig. 2.25).

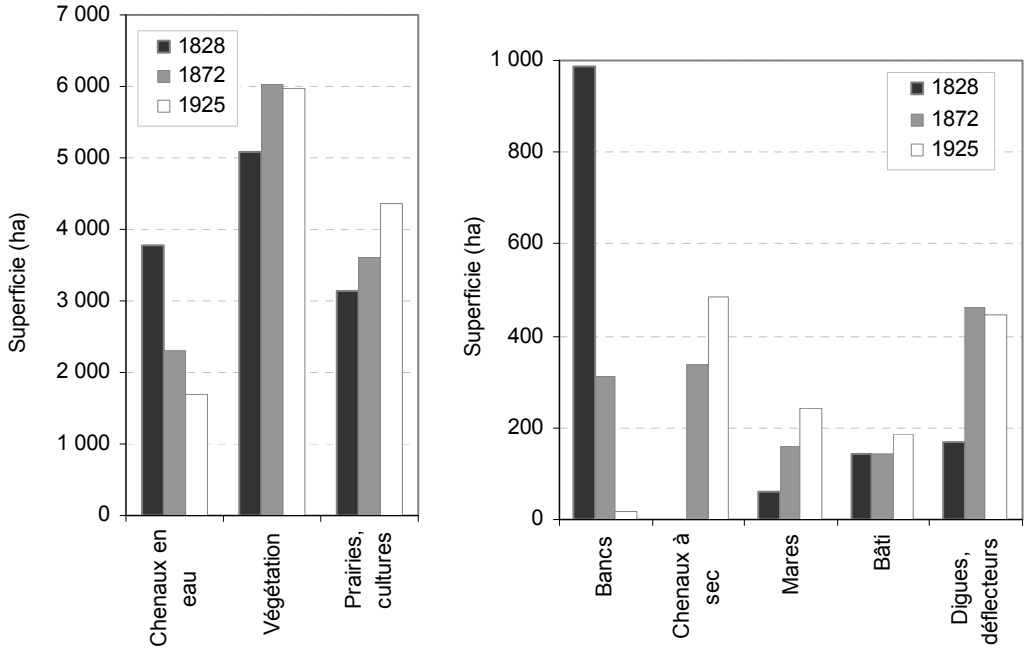


Figure 2.23 : Evolution des superficies totales des unités physionomiques de la plaine rhénane entre 1828 et 1925 : superficies supérieures (a) et inférieures (b) à 1000 ha (somme des segments élémentaires de 5 km : n total = 11)

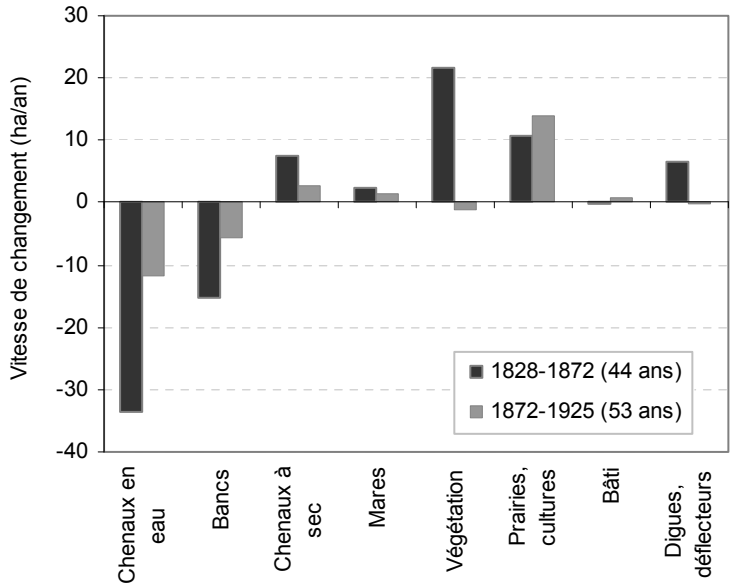


Figure 2.24 : Vitesses de changement des unités physionomiques de la plaine rhénane entre 1828 et 1925 (en ha/an, n total = 11)

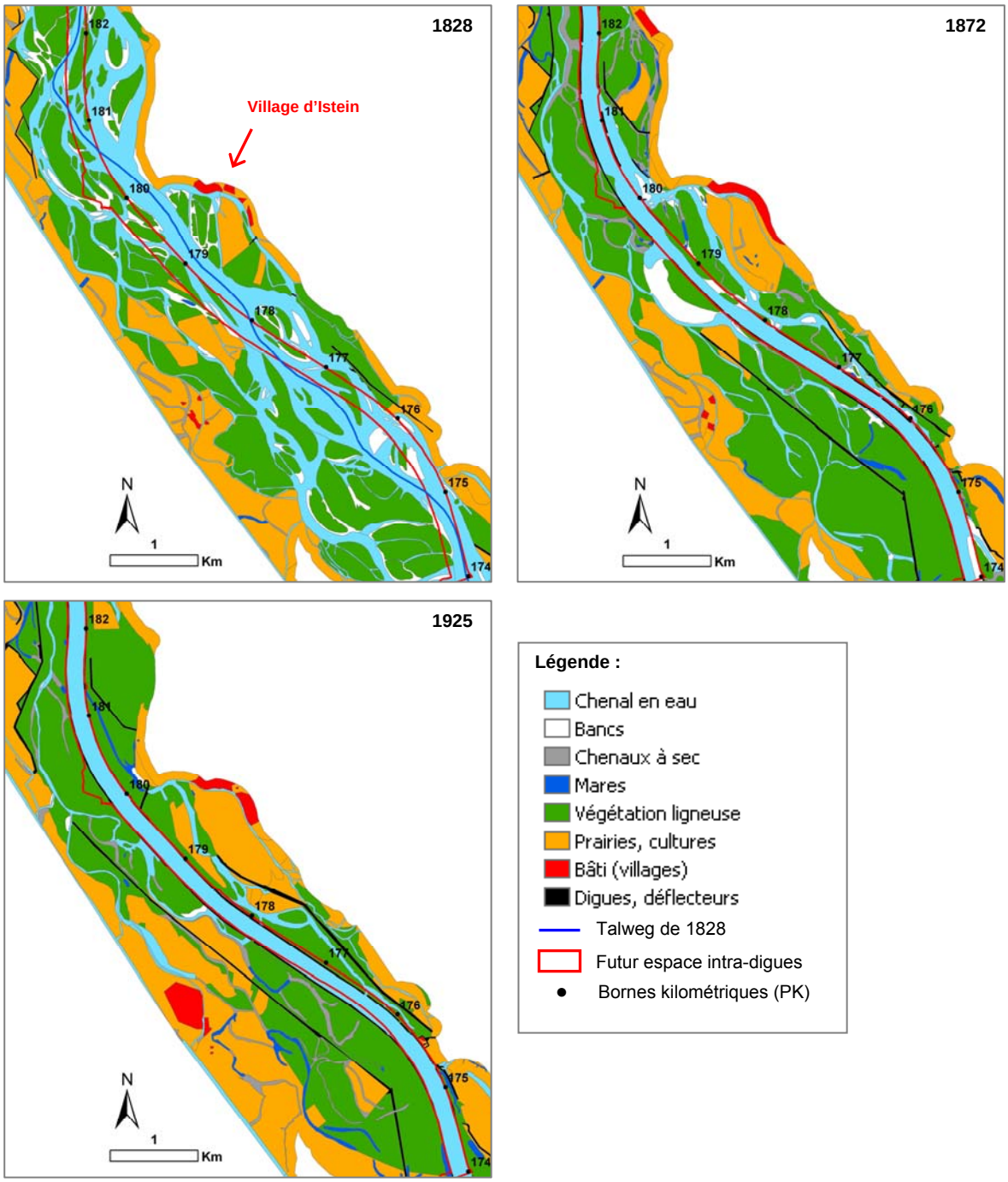


Figure 2.25 : Extrait des cartes de la plaine rhénane en 1828, 1872 et 1925 entre les PK 174 et 182

Ces résultats mettent ainsi en évidence **un temps de réponse de l'hydrosystème rhénan aux travaux de correction relativement long**, couvrant plusieurs décennies après la fin des travaux.

2.2.2. Evolution des types de chenaux

Nous observons logiquement **une disparition totale des tresses entre 1828 et 1925** (fig. 2.26, a), dans la mesure où les aménagements ont été réalisés à l'emplacement de la bande de tressage. Cette disparition s'exprime majoritairement avant 1872 (fig. 2.26, b). Les tresses constituent le

type prédominant de chenal en eau en 1828, ce qui explique l'observation précédente sur la superficie totale qui diminue sur toute la période 1828-1925, et majoritairement avant 1872 (cf. fig. 2.24). **L'évolution des autres types de chenaux apparait plus contrastée**, en termes de tendances et de vitesses. En effet, les défluents proches connectés et déconnectés par l'amont progressent jusqu'en 1872, puis ils diminuent et disparaissent, respectivement, jusqu'en 1925 (fig. 2.26, b). Les anastomoses connectées par l'amont montrent une évolution inverse : elles diminuent d'abord jusqu'en 1872, puis elles augmentent jusqu'en 1925. Les anastomoses déconnectées par l'amont progressent sur toute la période. Ainsi, **les anastomoses constituent le type prédominant de la plaine rhénane en 1925**.

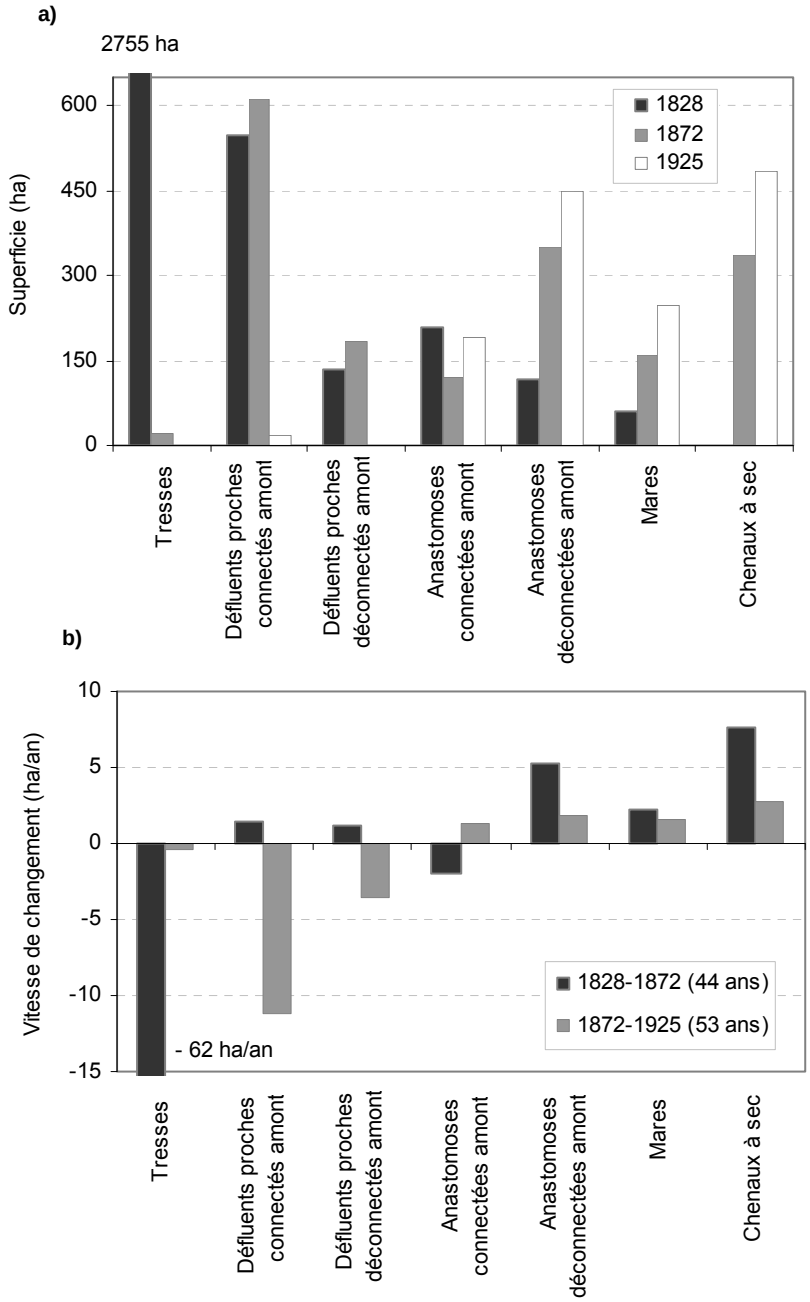


Figure 2.26 : a) Evolution des superficies totales des types de chenaux entre 1828 et 1925. b) Vitesses de changement des types de chenaux entre 1828 et 1925. L'évolution des mares et des chenaux à sec a également été renseignée (n total = 11)

Un schéma général d'évolution en deux temps peut être déduit de l'examen du tracé en plan (fig. 2.27). La bande de tressage principale est tout d'abord remplacée par un chenal unique rectifié entre 1828 et 1872. Les tresses localisées en position latérale évoluent essentiellement en des défluents proches connectés ou déconnectés par l'amont. Puis, entre 1872 et 1925 ces défluents proches évoluent en des bras morts, des chenaux à sec, des anastomoses ou ils sont colonisés par la végétation. Nous constatons que les anastomoses localisées à l'extérieur des digues de hautes eaux ont peu évolué entre 1828 et 1925 (partie ouest des cartes, fig. 2.27).

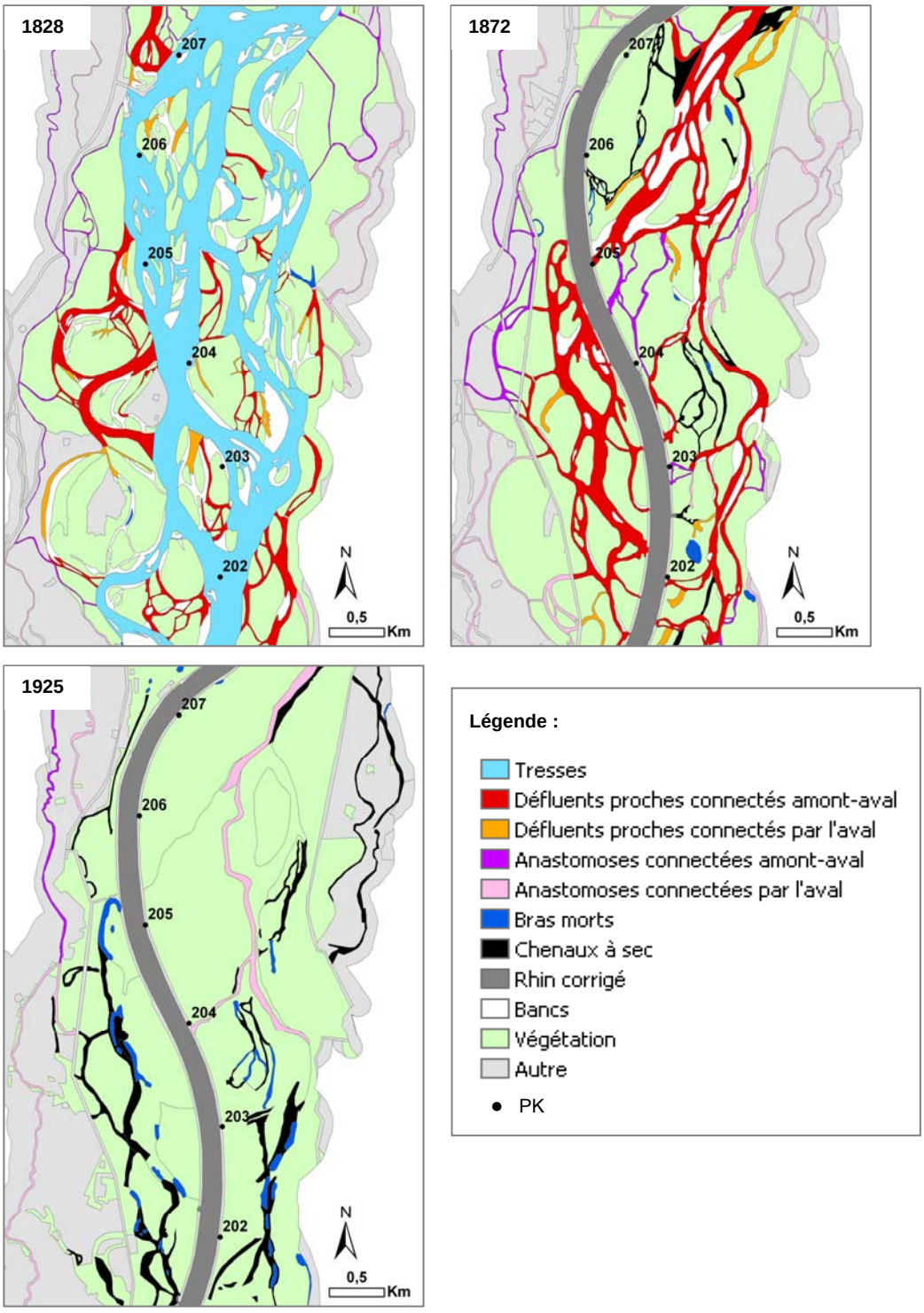
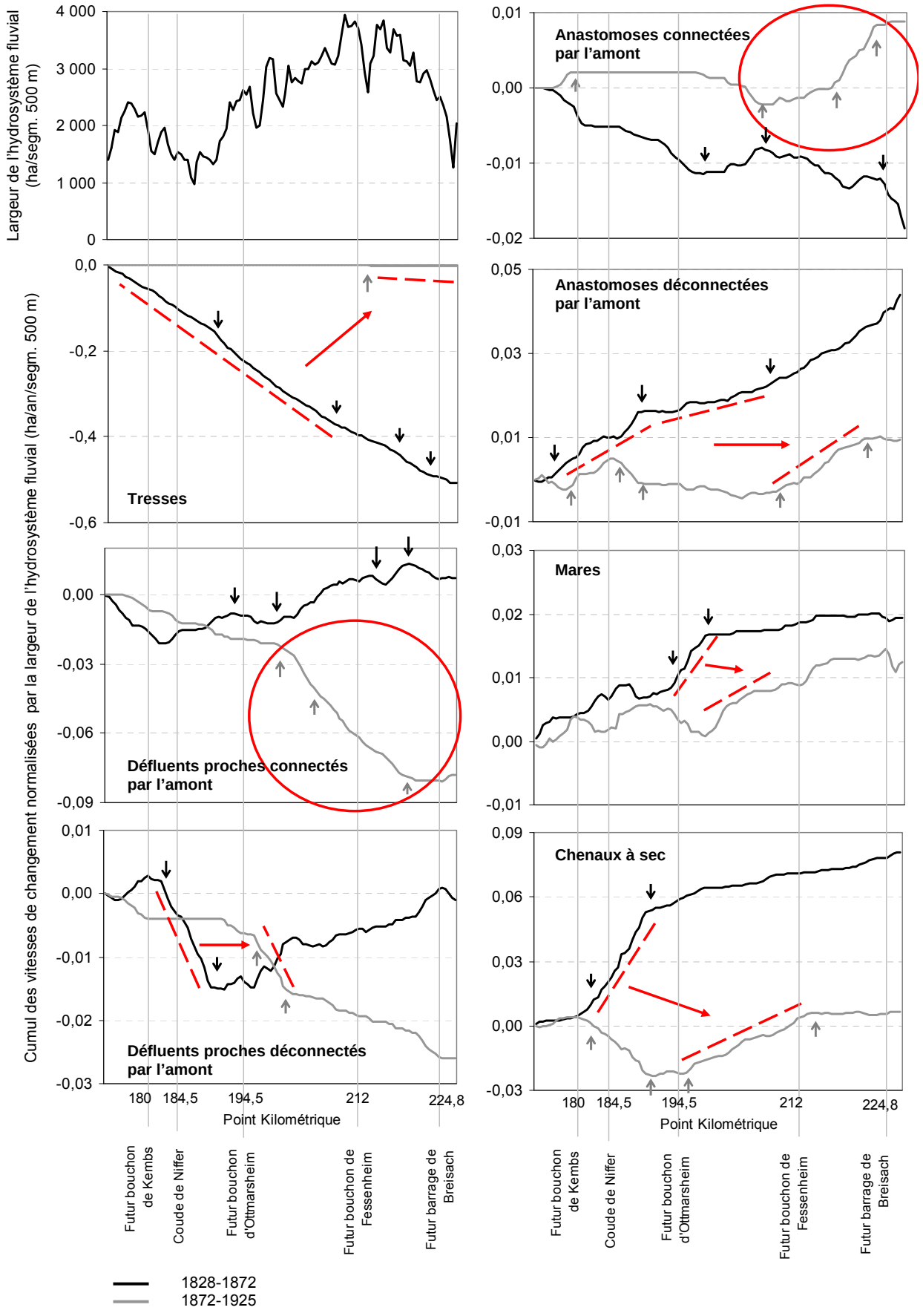


Figure 2.27 : Extrait de la cartographie des chenaux en 1828, 1872 et 1925 entre les PK 202 et 207

L'analyse spatiale semble révéler **un gradient amont-aval dans l'évolution de la répartition spatiale des changements de types de chenaux**. En effet, entre 1828 et 1872 les ajustements sont localisés principalement dans la partie amont du tronçon d'étude, globalement en amont du PK 195 (cas de la disparition des défluents proches déconnectés par l'amont, de la disparition des anastomoses connectées par l'amont, de l'apparition des chenaux à sec, fig. 2.28), ou ils se manifestent sur l'ensemble du linéaire (cas de la disparition des tresses et de l'apparition des anastomoses déconnectées par l'amont, fig. 2.28). Puis, entre 1872 et 1925 nous observons une stabilisation des changements dans la partie amont, et une propagation ou une apparition des changements dans la partie aval (cercles, pointillés et flèches rouges sur la figure 2.28). Par exemple, après 1872 les défluents proches disparaissent majoritairement en aval du PK 195 environ (secteur d'Ottmarsheim), de même que les bras morts et les chenaux à sec augmentent majoritairement en aval de ce point. Les anastomoses augmentent majoritairement en aval du PK 206 environ (entre Ottmarsheim et Fessenheim), et les tresses résiduelles disparaissent majoritairement en aval de ce point.

Sur la page suivante :

Figure 2.28 : Cumuls des vitesses de changement des types de chenaux normalisées par la largeur de l'hydrosystème fluvial entre 1828 et 1925 (en ha/an/segments élémentaires de 500 m : n = 107). Les flèches noires et grises indiquent les ruptures détectées avec le test de Hubert. Les cercles rouges localisent la prédominance de changements au cours d'une période, et les pointillés et flèches rouges mettent en évidence la propagation des changements vers l'aval


Largeur de l'hydrosystème fluvial (ha/segm. 500 m)
4 000
3 000
2 000
1 000
0
Cumul des vitesses de changement normalisées par la largeur de l'hydrosystème fluvial (ha/an/segm. 500 m)
Tresses
Défluents proches connectés par l'amont
Défluents proches déconnectés par l'amont
Anastomoses connectées par l'amont
Anastomoses déconnectées par l'amont
Mares
Chenaux à sec
180
184,5
194,5
212
224,8
Point Kilométrique
Futur bouchon de Kembs
Coude de Niffer
Futur bouchon d'Ottmarsheim
Futur bouchon de Fessenheim
Futur barrage de Breisach
1828-1872
1872-1925

2.3. L'évolution planimétrique du Vieux Rhin (1956-2008)

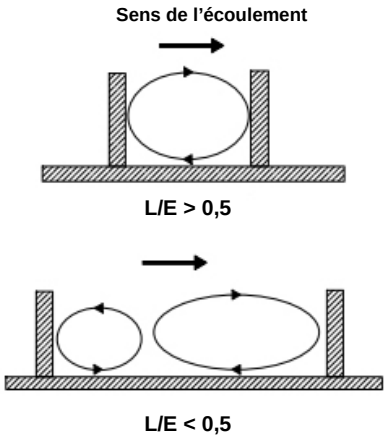
2.3.1. Préambule : l'impact des épis sur la morphologie en plan

Eléments bibliographiques sur les impacts morphologiques des épis

La littérature traitant des épis que nous sommes parvenus à rassembler pour les besoins de cette étude porte principalement sur la compréhension des processus hydrodynamiques entre les ouvrages, ainsi que des échanges de flux (sédiments, matières polluantes) entre le chenal et les champs d'épis (Uijttewaal *et al.*, 2001 ; Ten Brinke *et al.*, 2004 ; Weitbrecht, 2004 ; Tritthart *et al.*, 2009 ; Yossef et de Vriend, 2010). Ces études ont montré que l'écoulement qui provient du chenal principal se sépare dans le champ d'épis en un courant primaire, vortex à axe de rotation vertical. La diversion de l'écoulement par l'épi et par les berges est alors susceptible de créer un courant secondaire, au sens de rotation opposé au premier.

Le paramètre qui contrôle le patron hydrodynamique est le **ratio d'aspect** (*L* longueur de l'épi / *E* espacement entre deux épis). Il a été démontré dans des environnements portuaires (Booij, 1989 ; Langendoen *et al.*, 1994, cités par Sukhodolov *et al.*, 2002) et fluviaux (l'Elbe : Sukhodolov *et al.*, 2002) qu'un ratio d'aspect inférieur à 0,5 favorise plutôt une recirculation à un seul courant, et un ratio d'aspect supérieur à 0,5 favorise deux courants (fig. 2.29, a). Ce patron hydrodynamique conditionne à son tour le patron de dépôt entre les épis : à partir d'expériences en canal validées sur l'Elbe, Sukhodolov *et al.* (2002) ont montré que les épaisseurs de dépôt les plus importantes sont localisées au centre des courants, là où les vitesses sont les plus faibles. De plus, une recirculation à un courant favoriserait une distribution des sédiments uniforme sur toute la largeur du champ d'épis (classes 1, 6, 7 d'après Hinkel, 1999), alors qu'une recirculation à deux courants produirait un patron plus complexe (classes 2 à 5 d'après Hinkel, 1999) (fig. 2.29, b).

a)



b)

Class	Definition	Pattern
1	weak deposition	
2	downstream triangle-shaped deposition	
3	upstream triangle-shaped deposition	
4	downstream wave-shaped deposition	
5	upstream wave-shaped deposition	
6	uniform partial deposition	
7	uniform complete deposition	

Figure 2.29 : a) Schéma théorique du patron hydrodynamique entre deux épis en fonction du ratio d'aspect. b) Classification du patron morphologique entre deux épis établie par Hinkel (1999) sur l'Elbe. Deux courants de recirculation favoriseraient un patron dissymétrique (classes 2 à 5) (d'après Sukhodolov *et al.*, 2002)

Analyse statistique

Les 722 épis du Vieux Rhin ont été disposés en séries de 10 à 15 ouvrages successifs en aval de la barre d'Istein, chaque champ d'épis alternant de façon régulière entre les deux rives (fig. 2.30). Dans les convexités formées par le tracé des digues de la correction, aucun épi n'a été construit. Des exemples de sections sans épis sont donnés sur la figure 2.30 (cercles rouges), en rive droite sur 1,3 km en aval du PK 189 et sur 1,5 km en aval du PK 208, et en rive gauche sur 1,3 km en aval du PK 204,5.

Les épis mesurent entre 5 m et 105 m de longueur ; l'espacement entre les ouvrages est compris entre 26 m et 147 m. Cette variabilité est visible au sein de chaque champ d'épis : afin de forcer la sinuosité, les épis de début et de fin de champ sont plus courts que ceux de milieu de champ, ils sont également plus rapprochés. Des épis longs font face à des épis courts sur l'autre rive, voire à aucun épi ou à des amorces de seuils de fond (fig. 2.31).

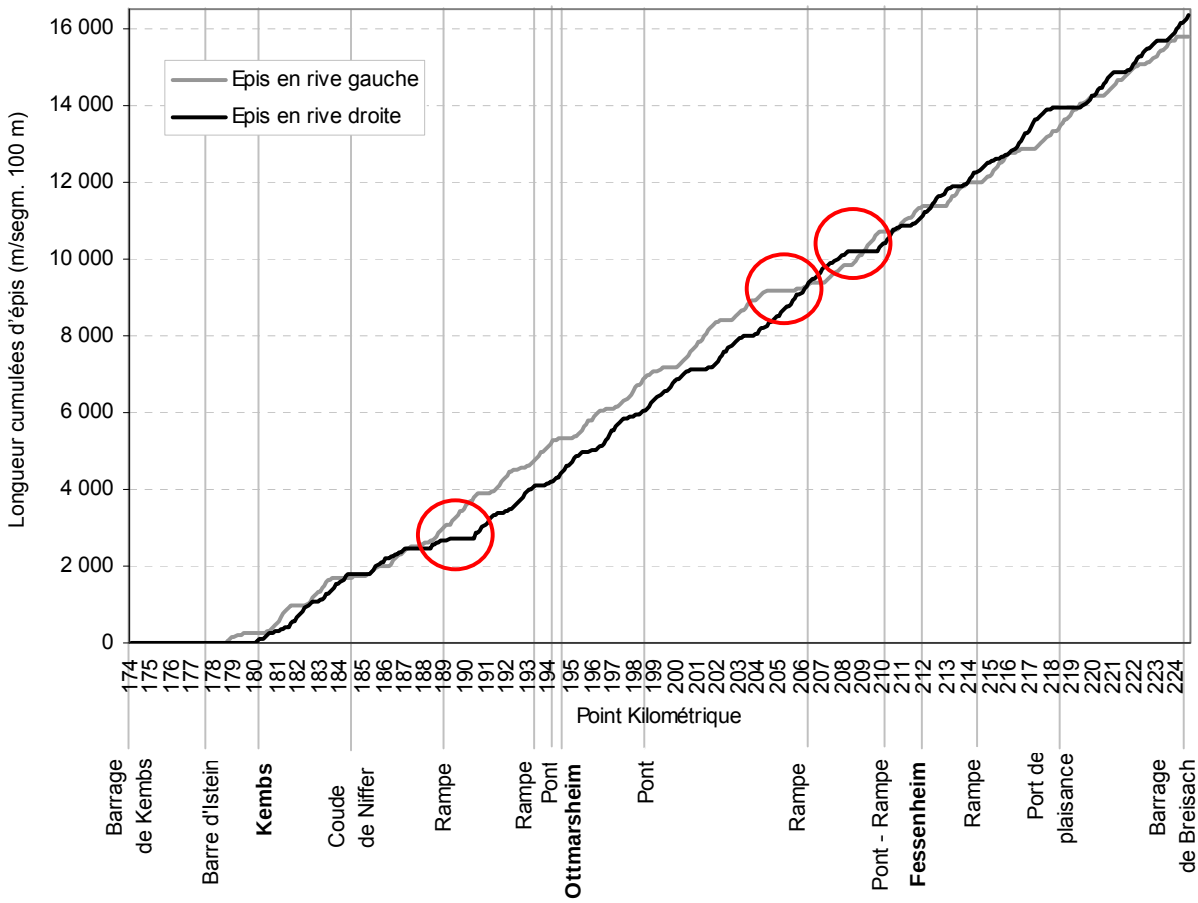


Figure 2.30 : Longueur cumulée des épis sur chaque rive (en m/segments élémentaires de 100 m : n = 510). Les cercles rouges localisent des sections où aucun épi n'a été construit

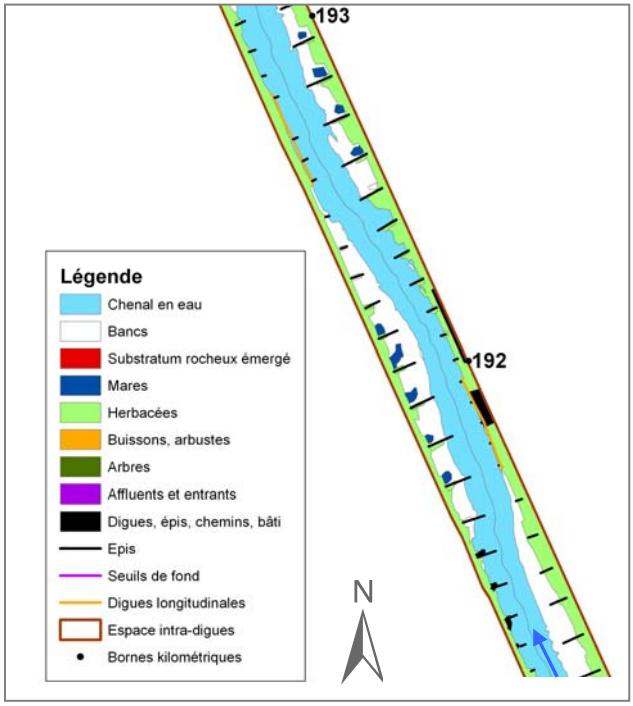


Figure 2.31 : Disposition des épis, seuils de fond et digues longitudinales sur la carte des unités physionomiques du Vieux Rhin en 1956. Illustration au PK 192

Il en résulte **un ratio d'aspect compris entre 0,05 et 0,92** sur l'ensemble du Vieux Rhin (valeur médiane de 0,47). La variabilité de ce ratio pourrait expliquer les différences observées dans les patrons de dépôt entre les épis, ces derniers apparaissant émergés sur la carte des unités physionomiques de 1956 (fig. 2.31). Nous avons en effet constaté une prédominance des patrons en « vague amont » (classe 5 d'après Hinkel, 1999 ; cf. fig. 2.29) et « uniformes partiels et totaux » (classes 6 et 7 d'après Hinkel, 1999 ; cf. fig. 2.29). Une étude systématique sur la correspondance entre les patrons de dépôt et les valeurs de ratio d'aspect pourrait déterminer si la loi du « ratio +/- 0,5 », établie dans les environnements sableux et sablo-graveleux des zones portuaires et de l'Elbe (cf. bibliographie précédente), s'applique aux lits graveleux tels que le Vieux Rhin.

Si une telle étude dépasse les limites de ce travail, nous pouvons d'ores et déjà remarquer que des facteurs supplémentaires interviennent et complexifient l'évolution morphologique du Vieux Rhin. En effet, la réduction des débits de crue a très vraisemblablement ralenti le processus de comblement des champs d'épis en sédiments grossiers. Il est d'ailleurs probable que des différences de patrons de dépôt existent entre les tronçons du Vieux Rhin passés en débit réservé à des dates différentes. Dans l'hypothèse où les champs d'épis auraient continué à se combler en éléments grossiers provenant du chenal principal même après la réduction des débits, passé cette étape c'est surtout la végétation qui a influencé leur évolution (cf. résultats de la partie B), en ayant fixé les marges dans un patron morphologique qui aurait sans doute été différent si le barrage de Kembs n'avait pas imposé un débit réservé.

Nous constatons que **les épis ont favorisé le développement de 84 % des superficies de bancs observées en 1956**, tous patrons de dépôt confondus. Les 16 % restants semblent expliqués par des facteurs locaux : ralentissement des écoulements en aval de la barre d'Istein (fig. 2.32, a), convexité du coude de Niffer (fig. 2.32, b), ou encore zone plus large favorisant les dépôts (exemple du bouchon d'Ottmarsheim, fig. 2.32, c). Nous remarquons également que **32 % des épis sont déjà végétalisés en 1956**. La végétalisation apparait peu marquée en aval du bouchon de Fessenheim, car ce secteur est passé en débit réservé plus tardivement.

Cette première analyse a mis en évidence l'impact des épis sur la formation de la quasi-totalité des dépôts du Vieux Rhin. La progression de la végétation sur les terrains exondés est déjà visible sur les clichés de 1956, soit seulement quelques années après la mise en débit réservé des différents tronçons. Nous nous proposons maintenant d'appréhender l'évolution diachronique générale des principales unités physionomiques du Vieux Rhin.

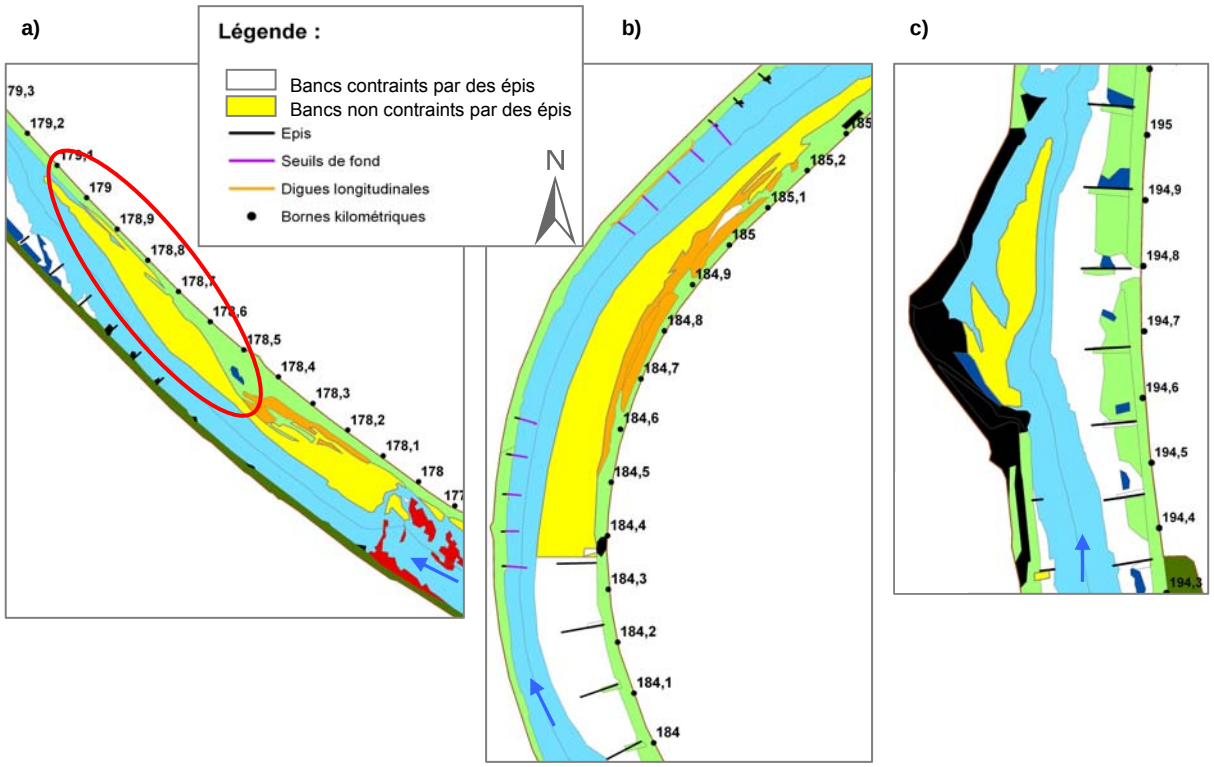


Figure 2.32 : Illustration de bancs non contraints par des épis sur la carte des unités physionomiques du Vieux Rhin en 1956 : aval de la barre d'Istein (a), coude de Niffer (b), bouchon d'Ottmarsheim (c). Le cercle rouge localise un banc « mixte », vraisemblablement induit à la fois par la barre d'Istein et par la convexité créée par les épis en rive gauche

2.3.2. Evolution diachronique générale des principales unités physionomiques

Entre 1956 et 2008, la bande active a connu une diminution de sa superficie de 141 ha, soit une baisse de **20 %**. Les surfaces occupées par la végétation ont augmenté de 159 ha, soit une hausse de **61 %** (fig. 2.33). La superficie des zones aquatiques déconnectées (mares) est relativement constante au cours de la période ; en 1956, des zones d'eau stagnante sont observées en aval immédiat de la plupart des épis exondés, signes de patrons de dépôt en « vague amont » (classe 5 d'après Hinkel, 1999 ; cf. fig. 2.29) en cours de comblement. Les surfaces anthropiques augmentent au cours des vingt premières années, avec la construction de rampes militaires, la consolidation des digues au niveau des bouchons… Elles tendent ensuite à diminuer, essentiellement par progression de la végétation sur ces terrains. Enfin, la légère variation de superficie du substratum rocheux émergé, qui constitue la barre d'Istein et un radier en amont, est attribuée aux faibles différences de débit entre les photographies aériennes et aux sédiments déposés localement sur ces affleurements.

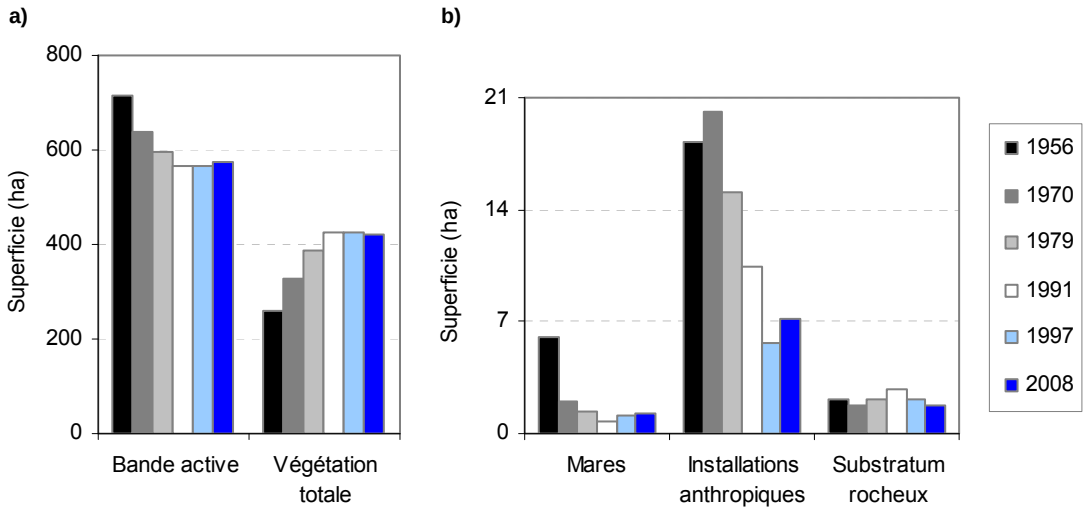


Figure 2.33 : Evolution des superficies totales des principales unités physionomiques du Vieux Rhin entre 1956 et 2008 : superficies supérieures (a) et inférieures (b) à 50 ha (somme des segments élémentaires de 100 m : n = 468)

Nous constatons que **l'évolution de la végétation est sensiblement différente entre les deux rives** (fig. 2.34) : en rive gauche, le stade buissonnant est toujours minoritaire au regard du stade arboré, alors qu'en rive droite la succession des trois unités végétales est plus nette.

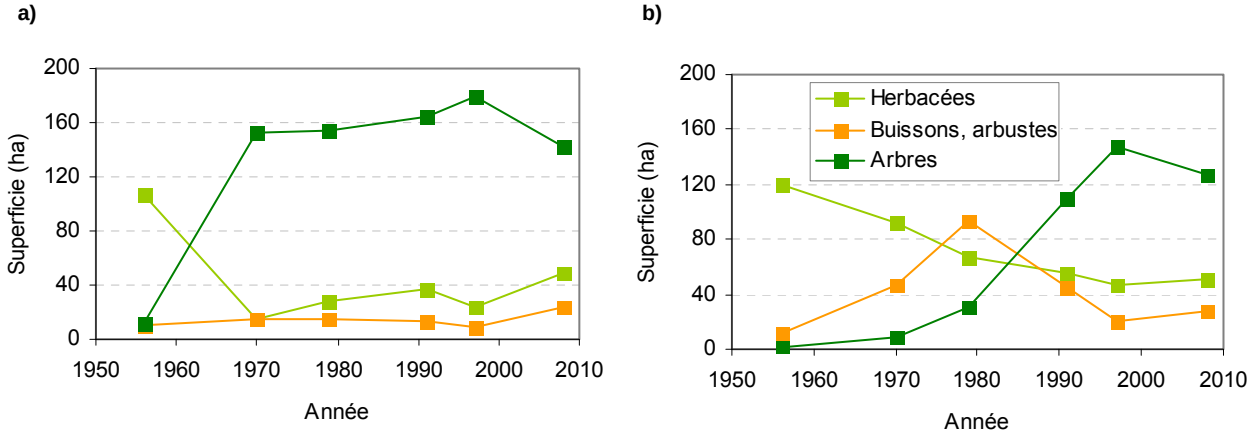


Figure 2.34 : Evolution des superficies totales d'herbacées, de buissons/arbustes et d'arbres entre 1956 et 2008 : rive gauche (a) et rive droite (b) (somme des segments élémentaires de 100 m : n = 468)

Les biais méthodologiques éventuels ne semblent pas expliquer cette dissymétrie. En effet, les ombres portées susceptibles de masquer certaines surfaces arbustives en rive gauche, en particulier sur les clichés de 1970, ont été corrigées manuellement. Par ailleurs, chaque cartographie a été examinée par rapport aux années antérieure et ultérieure, de manière à respecter une cohérence dans la succession végétale. Seule la cartographie de 2008 pourrait être discutée, car elle a été réalisée à une meilleure résolution (1/1 500ème au lieu du 1/3 000ème) et a fait l'objet d'une validation sur le terrain, ce qui explique que davantage de surfaces herbacées et arbustives aient été détectées au sein des surfaces arborées, qui se trouvent réduites. Cependant, ce biais concerne les deux rives, il n'influence donc pas la dissymétrie générale observée.

Le facteur explicatif serait plutôt lié à **des pratiques de gestion différentes entre les deux rives** : une étude réalisée par l'ILN (Späth *et al.*, 1997), portant sur l'évolution de la forêt alluviale sur cinq champs d'épis du Vieux Rhin, a montré que la rive gauche (française) a subi peu d'interventions susceptibles de modifier la structure des peuplements. En revanche, en rive droite (allemande), le service des Eaux et de la Navigation de Neuenburg a procédé à des coupes à blanc dans les années 1960 et 1980. Plus récemment, les actions ont consisté en des recépages ciblés de Saules et de Peupliers noirs âgés ou malades, pouvant être emportés lors des crues. Ces interventions ont pour effet d'éclaircir les espaces arborés au profit de la strate herbacée et buissonnante, dont le recouvrement au sol est plus dense. Il est probable que ces particularités de gestion mises en évidence localement puissent concerner l'ensemble du Vieux Rhin. Dans ce cas, ce facteur pourrait expliquer la succession végétale plus nette en rive allemande, et la fermeture du paysage plus rapide avec apparition précoce de ligneux en rive française.

Au-delà des dissymétries dans la distribution des unités végétales, il est important de retenir que la végétation, dans son ensemble, a colonisé rapidement les terrains exondés après la mise en débit réservé du Vieux Rhin. Ce processus de rétraction est appréhendé dans le détail avec l'analyse temporelle et spatiale de l'évolution de la bande active.

2.3.3. Evolution de la bande active

Analyse diachronique

Nous remarquons que **la rétraction de la bande active suit une loi d'évolution temporelle non linéaire** (fig. 2.35, a) : le phénomène est très important jusqu'en 1991, puis il devient asymptotique. Il est à noter que la variabilité des largeurs de bande active augmente nettement à partir de 1970, ce qui s'explique par la construction du barrage de Breisach en 1965, qui a eu pour effet d'élargir le lit mouillé sur plusieurs kilomètres en amont.

La rétraction a été particulièrement prononcée entre 1956 et 1970, avec une vitesse médiane de 1,4 m/an (fig. 2.35, b) ; **la réponse du tronçon à la réduction des débits en aval du barrage de Kembs a donc été immédiate**. Puis, entre 1970 et 1991 le phénomène ralentit à une vitesse médiane de 0,6 et 0,5 m/an. La période 1991-2008 se différencie par des valeurs médianes nulles ou positives ; cette inversion de tendance est vraisemblablement à attribuer aux crues majeures de 1994, 1999 et 2007, qui ont sans doute contribué à augmenter les érosions latérales. Ainsi, 10 % de la bande active connait un élargissement supérieur à 4,1 m/an entre 1997 et 2002.

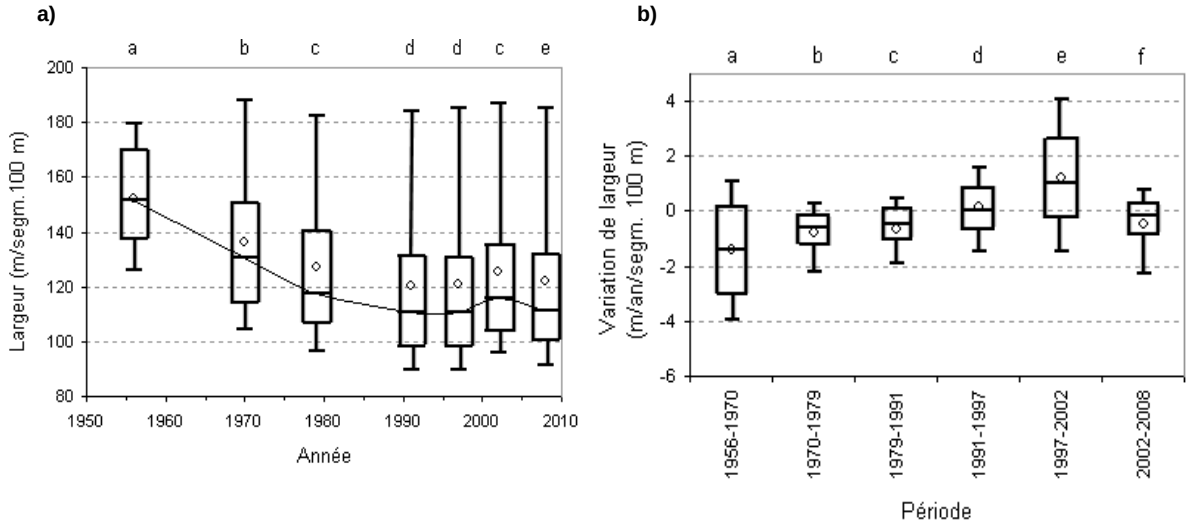


Figure 2.35 : a) Evolution des largeurs de bande active entre 1956 et 2008. b) Evolution des vitesses de variation : < 0 = rétraction, > 0 = élargissement (données renseignées par segments élémentaires de 100 m : n = 468). Les lettres a à f indiquent les groupes homogènes d'après le test de Wilcoxon

Analyse spatiale

Une rétraction longitudinalement contrastée

La rétraction de la bande active entre 1956 et 1970 s'opère de façon non synchrone le long du Vieux Rhin (fig. 2.36). Les plus fortes rétractions s'expriment en effet principalement sur trois tronçons : entre les PK 180 et 185 (bouchon de Kembs - coude de Niffer), entre les PK 188,5 et 195,5 (rampe de Petit-Landau - bouchon d'Ottmarsheim) et entre les PK 211 et 218 (rampe de Fessenheim - port de plaisance). L'aval du PK 218 connait un élargissement, provoqué par le remous du barrage de Breisach. Si deux de ces secteurs sont localisés dans la partie amont du Vieux Rhin, il ne semble néanmoins pas exister de gradient amont-aval quant à l'évolution temporelle de la répartition des secteurs concernés par la rétraction. En effet, **après 1970 la rétraction de la bande active tend à s'homogénéiser longitudinalement**, un nombre réduit de ruptures étant détecté sur les séries suivantes. En particulier, la répartition spatiale des vitesses de rétraction est quasiment la même entre 1970, 1979 et 1991. Entre 1991 et 1997, la bande active en amont du bouchon de Kembs connait un élargissement. Entre 1997 et 2002, c'est l'ensemble du linéaire en aval qui connait majoritairement un élargissement. Entre 2002 et 2008, ce même linéaire aval est globalement en rétraction. Il semblerait enfin que les trois tronçons préférentiels de rétraction observés sur la période la plus ancienne se retrouvent sur la période la plus récente, entre les PK 179 et 186, entre les PK 188 et 193 et entre les PK 210,5 et 212,5.

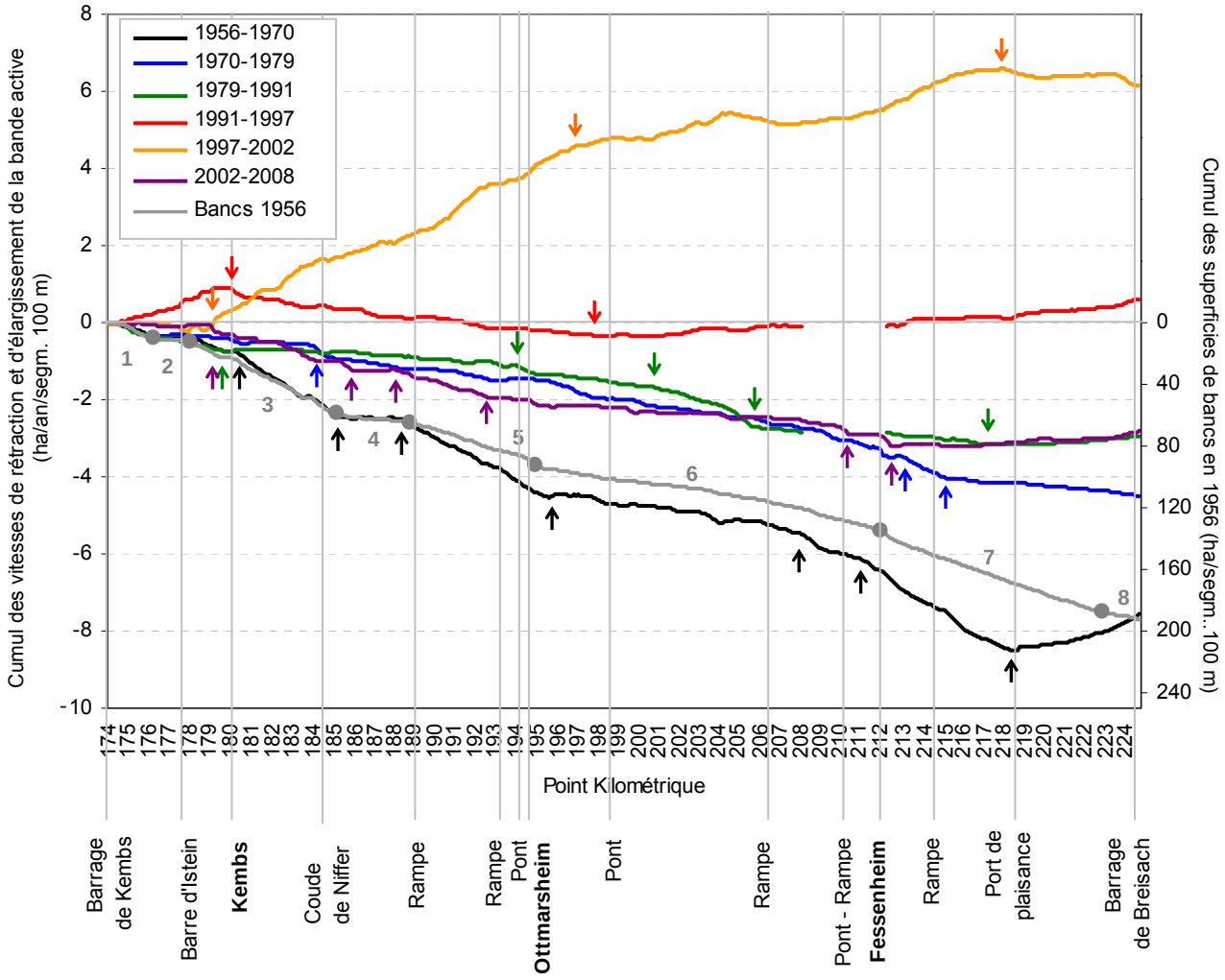


Figure 2.36 : Cumuls des vitesses de rétraction (valeurs négatives) et d'élargissement (valeurs positives) de la bande active entre 1956 et 2008 (en ha/an) et cumul des superficies de bancs en 1956 (en ha) (segments élémentaires de 100 m : n = 510). Les flèches indiquent les ruptures détectées avec le test de Hubert. Les points gris indiquent la position des ruptures détectées sur les superficies de bancs et les chiffres gris indiquent le numéro des tronçons fluviaux homogènes

Recherche des facteurs de contrôle de l'évolution de la bande active

L'absence d'un gradient amont-aval net tendrait à prouver que **la rétraction ne serait pas contrôlée par un déficit sédimentaire qui progresserait vers l'aval depuis le barrage de Kembs**. L'analyse spatiale indique néanmoins une végétalisation non synchrone entre 1956 et 1970. Pour cette période, les trois secteurs de forte rétraction présentent le point commun de comporter **des bancs de galets plus développés en 1956**, et donc des surfaces potentiellement colonisables par la végétation plus importantes (*tronçons fluviaux n° 3, 5 et 7* sur la figure 2.36). Ces secteurs ne sont pourtant pas caractérisés par une pente plus faible qui favoriserait le dépôt des sédiments. En revanche, pour chaque tronçon fluvial homogène nous pouvons mettre en évidence différents facteurs de contrôle.

Tout d'abord, la présence de bancs dans la partie amont du *tronçon n° 3* est vraisemblablement induite par le **ralentissement des écoulements en aval de la barre d'Istein**. Les **digues de la correction** dessinent également un tracé relativement sinueux sur l'ensemble du *tronçon n° 3* : le coude de Niffer présente le rayon de courbure le plus faible du Vieux Rhin (environ 800 m), et un grand banc est observé dans la convexité (cf. fig. 2.32). En sortie de courbe, un tronçon rectiligne favorise l'exportation des sédiments. Ces derniers sont susceptibles de se déposer sur le *tronçon n° 5* situé immédiatement en aval. Sur ce tronçon, pourtant rectiligne, il existe une sinuosité forcée par la **configuration des épis** : nous avons remarqué que les épis y sont plus longs et plus espacés que sur le tronçon en amont, ce qui favorise les dépôts. A titre de comparaison, il existe un tronçon rectiligne de 2 km en amont de la barre d'Istein, qui ne comporte aucun épi ; aucun banc n'y est observé. Enfin, sur le *tronçon n° 7*, l'importance des dépôts pourrait simplement être attribuée à la **réduction des débits plus tardive** en aval du bouchon de Fessenheim : les photographies aériennes ont été prises seulement quatre mois après la mise en débit réservé (en avril 1959), par conséquent la végétation n'avait pas encore colonisé les dépôts exondés.

A partir de 1970, la rétraction s'opère de façon plus homogène sur l'ensemble du Vieux Rhin, jusqu'en 1991. Les **infrastructures locales** (ponts, rampes militaires) ne semblent pas influencer le patron longitudinal de rétraction.

La position des secteurs d'élargissement apparus après 1991 nous incite à **rechercher l'effet des crues sur la morphologie de la bande active**. Depuis 1950, 61 crues d'une période de retour supérieure à 2 ans et 10 crues supérieures à la crue décennale ont été enregistrées à Bâle (fig. 2.37).

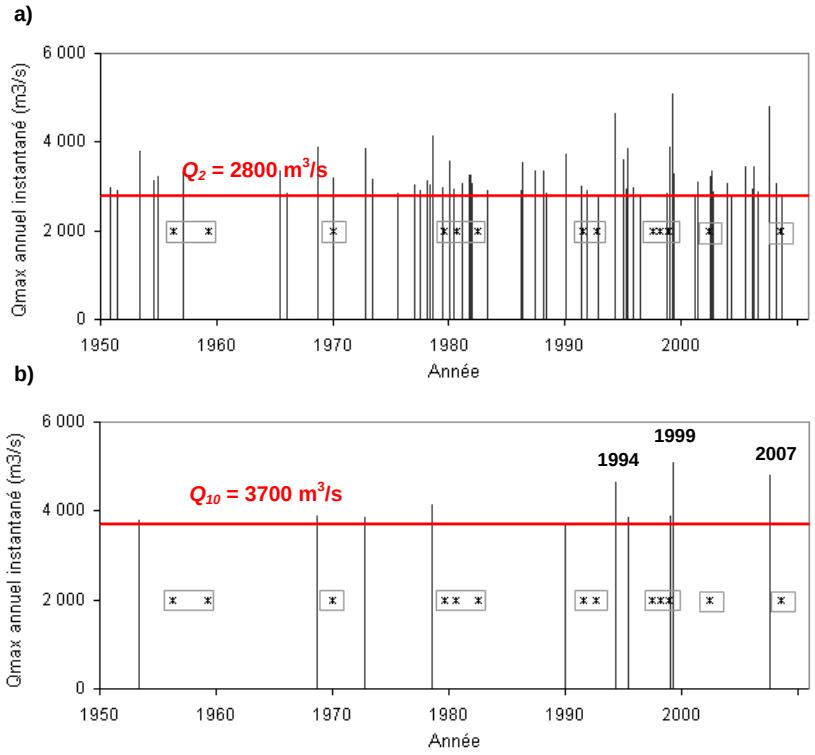


Figure 2.37 : Occurrence des crues supérieures à Q_2 = 2800 m³/s (a) et Q_{10} = 3700 m³/s (b) à Bâle depuis 1950. Les dates des campagnes aériennes sont indiquées par des croix

L'analyse diachronique semble indiquer que seules les crues survenues après 1991 sont corrélées à de nets élargissements, ou du moins, qu'**avant 1991 les élargissements de la bande active ont été « masqués » par le phénomène prépondérant de rétraction** (cf. fig. 2.36). L'analyse spatiale a révélé par ailleurs une prédominance des élargissements en amont du bouchon de Kembs entre 1991 et 1997 (cf. fig. 2.36), vraisemblablement attribués à la crue de 1994. En comparaison, la crue de 1999, plus fort épisode hydrologique enregistré depuis 1881, a provoqué des érosions latérales sur la quasi-totalité du linéaire en aval du bouchon de Kembs, la partie amont restant stable. Le calcul du ratio des largeurs de bande active en amont et en aval du bouchon de Kembs indique une valeur minimale en 1991 (0,88 pour une moyenne de 0,93 ; fig. 2.38). Ainsi, la crue de 1994 aurait eu pour effet d'ajuster la largeur de bande active dans la partie amont à la largeur dans la partie aval (ratio de 0,95 en 1997). La crue de 1999 a élargi la partie aval, mais l'ensemble du linéaire reste en équilibre (ratio de 0,93 en 2002). De plus, la crue de 1999 a vraisemblablement conduit au développement de nouveaux bancs, puisque les secteurs élargis connaissent une rétraction entre 2002 et 2008, c'est-à-dire que des dépôts apparus ont été végétalisés. La vitesse de rétraction reste toutefois inférieure aux périodes antérieures (cf. fig. 2.35, b). Ce phénomène pourrait être imputé à la crue de 2007 qui, si elle n'a globalement pas élargi la section fluviale, ne lui a pas permis de se rétracter de façon notable.

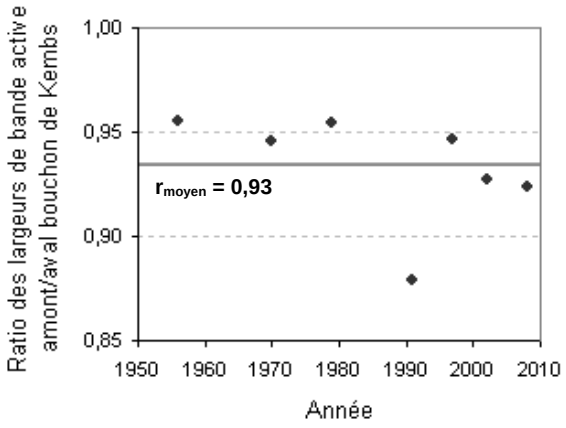


Figure 2.38 : Ratio des largeurs moyennes de bande active en amont et en aval du bouchon de Kembs (données renseignées par segments élémentaires de 100 m : n = 59 et 406 en amont et en aval)

L'analyse de l'évolution de la bande active a mis en évidence des élargissements et des rétractions successifs, témoignant de la formation de nouveaux bancs, et par conséquent d'une certaine mobilité de la charge de fond. Nous nous proposons d'évaluer ce transport solide résiduel grâce à l'étude de l'évolution planimétrique des bancs.

2.3.4. Evolution des bancs

Approche générale

Les superficies de bancs de galets ont fortement diminué depuis la réduction des débits par le barrage de Kembs : de 0,4 ha en 1956, la valeur médiane des superficies par segments élémentaires de 100 m devient nulle à partir de 1991 (fig. 2.39). Une augmentation est visible sur la valeur maximale entre 1991 et 1998, ainsi que sur le 75ème centile entre 1998 et 2002. Ce constat

est ainsi en accord avec les résultats du paragraphe précédent, où des phases successives d'élargissement et de rétraction de la bande active avaient été observées.

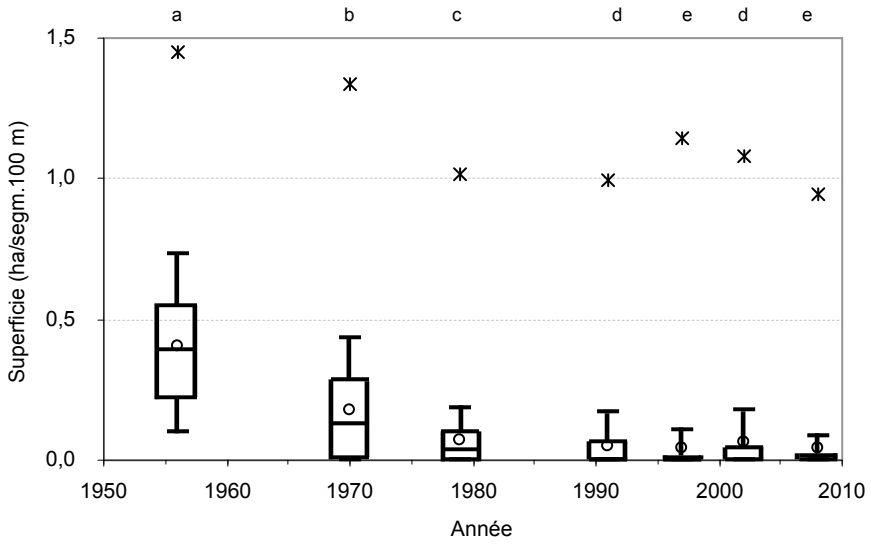


Figure 2.39 : Evolution des superficies de bancs entre 1956 et 2008 (en ha/segments élémentaires de 100 m : n = 432). Les lettres a à e indiquent les groupes homogènes d'après le test de Wilcoxon

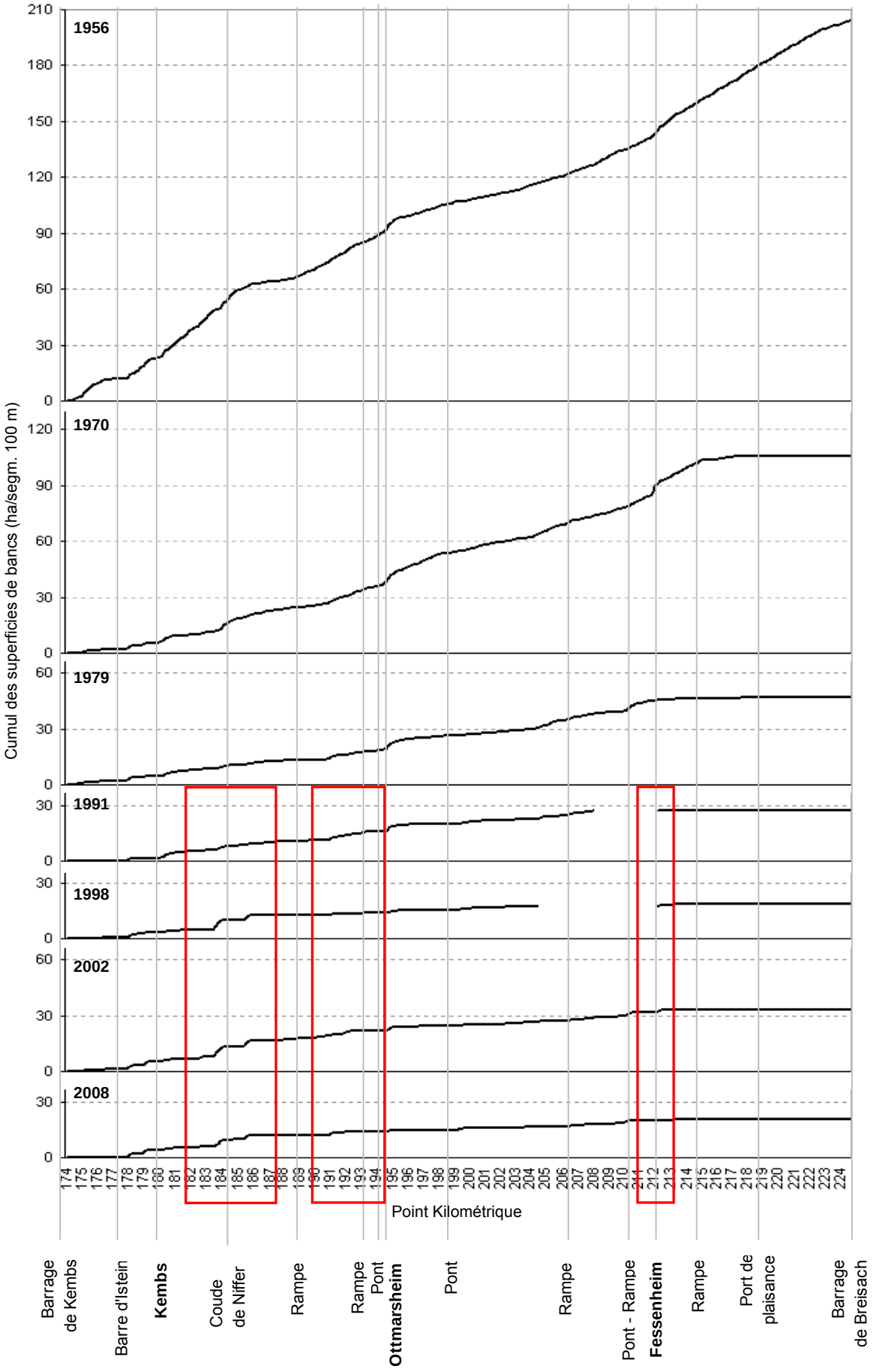
L'examen du patron longitudinal ne semble mettre en évidence **aucun gradient amont-aval dans l'apparition et la disparition des bancs** (fig. 2.40). Nous observons trois secteurs préférentiels de formation des bancs depuis les années 1990 (encadrés rouges). Il s'agit finalement de ceux mis en évidence dans l'étude de la bande active, localisés respectivement dans la partie amont, médiane et aval du linéaire. Nous nous proposons ainsi de focaliser l'analyse diachronique :

1. entre les PK 183 et 186 ;
2. entre les PK 191 et 193 ;
3. au PK 212.

Il est à noter que la partie amont du secteur n° 1, entre les PK 182,4 et 183,1, correspond au site-pilote de recharge sédimentaire du chenal mis en œuvre dans le projet INTERREG « Redynamisation du Vieux Rhin » (cf. chapitre 3). De plus, la partie aval du secteur n° 1, au niveau du PK 185,5, correspond à un site-pilote d'érosion contrôlée des berges de la rive gauche mis en œuvre dans le projet EDF « Erosion maitrisée ». De même, sur le secteur n° 2, entre les PK 190,5 et 191,5 correspond le second site-pilote d'érosion contrôlée des berges mis en œuvre par EDF.

Sur la page suivante :

Figure 2.37 : Cumuls des superficies de bancs entre 1956 et 2008 (en ha/segments élémentaires de 100 m : n = 510). Les encadrés rouges localisent les trois secteurs préférentiels d'apparition de bancs depuis les années 1990


1956
1970
1979
1991
1998
2002
2008
Cumul des superficies de bancs (ha/segm. 100 m)
Point Kilométrique
Barrage de Kembs
Barre d'Istein
Kembs
Coude de Niffer
Rampe
Rampe
Pont
Ottmarsheim
Pont
Rampe
Pont - Rampe
Fessenheim
Rampe
Port de plaisance
Barrage de Breisach

Evolution des bancs sur trois secteurs

Sur le secteur n° 1 (fig. 2.41), les dépôts se sont formés préférentiellement entre les épis et dans la convexité du coude de Niffer. La végétalisation consécutive à la mise en débit réservé du tronçon a été marquée jusqu'en 1979, et a entrainé une importante rétraction de la bande active. Des bancs médians apparaissent aux points d'inflexion entre 1979 et 1991, puis ces dépôts se développent et sont raccordés aux berges dans les années ultérieures. L'ensemble de ces surfaces est colonisé par la végétation depuis 2002.

Sur le secteur n° 2 (fig. 2.42), les premiers dépôts ont également été favorisés par les épis. Ils sont entièrement végétalisés en 1998, hormis un banc de faible superficie localisé en rive droite au PK 191. En rive gauche, un banc est apparu au point d'inflexion au PK 192 entre 1998 et 2002. Ces deux bancs sont colonisés par la végétation depuis 2002.

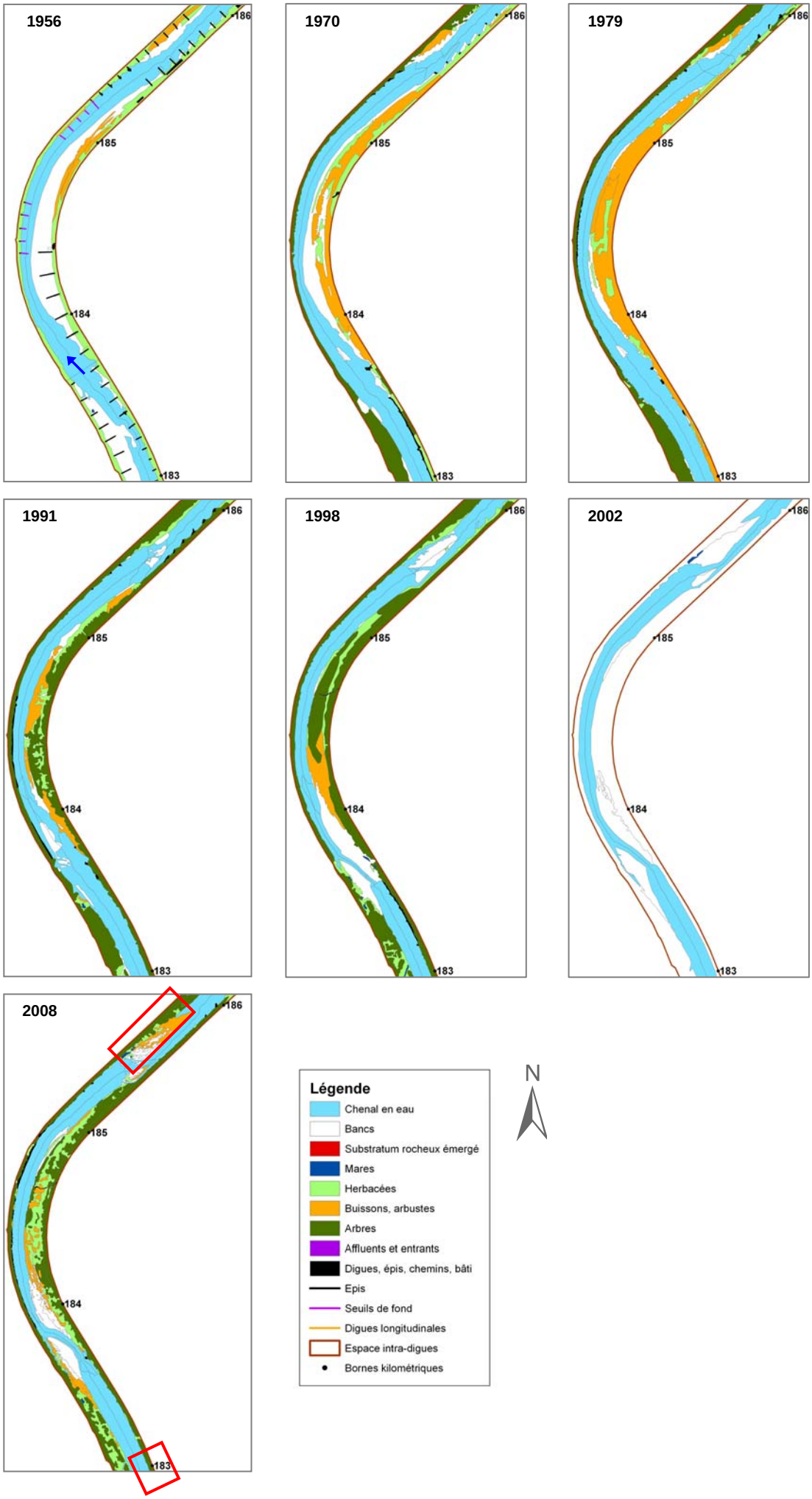
Enfin, sur le secteur n° 3 (fig. 2.43), la section fluviale plus large ainsi que le ralentissement des écoulements dans le bouchon de Fessenheim ont favorisé les dépôts à plusieurs reprises depuis 1956. La végétalisation du banc en rive droite apparu entre 1991 et 1998 a considérablement rétracté la bande active, et à moins d'érosions latérales, il est peu probable que de nouveaux dépôts se développent dans ce secteur.

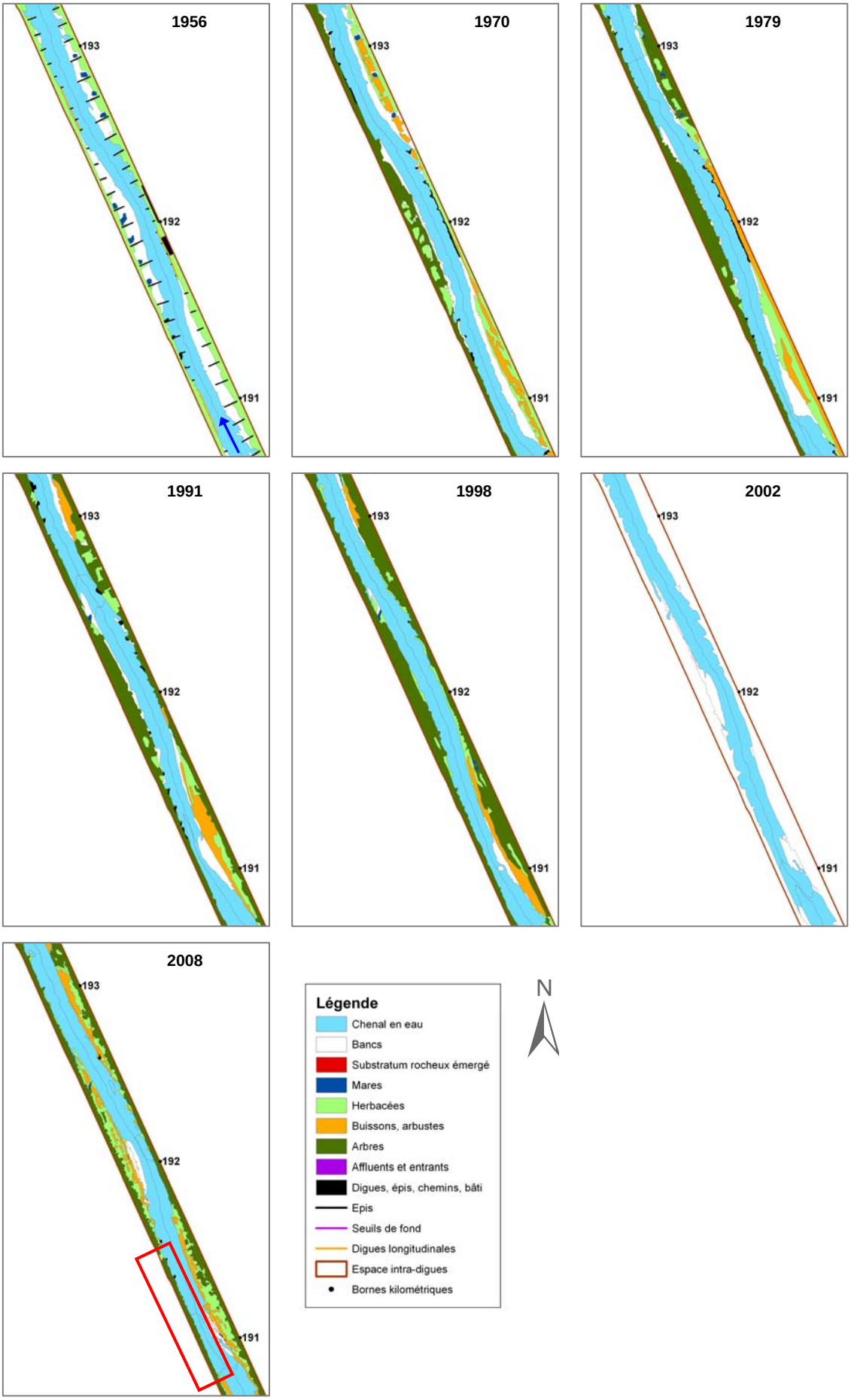
Sur les deux pages suivantes :

Figure 2.41 : Illustration de l'évolution planimétrique des bancs entre 1956 et 2008 entre les PK 183 et 186. Les encadrés rouges sur la carte de 2008 localisent les sites-pilotes de recharge sédimentaire et d'érosion maitrisée des berges des projets INTERREG et EDF

Figure 2.42 : Illustration de l'évolution planimétrique des bancs entre 1956 et 2008 entre les PK 191 et 193. L'encadré rouge sur la carte de 2008 localise le site-pilote d'érosion maitrisée des berges du projet EDF

En résumé, les sédiments déposés dans les convexités ont pour la plupart d'entre eux été végétalisés entre les années 1950 et 1990. Aujourd'hui, il ne subsiste que des résidus de bancs, sous la forme de cordons étroits bordant le chenal. Outre ces formes anciennes fixées par les aménagements et par les conditions hydrologiques, nous avons observé une relative dynamique sédimentaire *via* l'apparition de nouvelles formes, à la faveur des crues récentes. Ces dépôts se développent plutôt aux points d'inflexion, en des bancs latéraux ou médians qui se raccordent ensuite à la berge.


1956
1970
1979
1991
1998
2002
2008
186
185
184
183
Légende
Chenal en eau
Bancs
Substratum rocheux émergé
Mares
Herbacées
Buissons, arbustes
Arbres
Affluents et entrants
Digues, épis, chemins, bâti
Epis
Seuils de fond
Digues longitudinales
Espace intra-digues
Bornes kilométriques
N


1956
1970
1979
1991
1998
2002
2008
193
192
191
Légende
Chenal en eau
Bancs
Substratum rocheux émergé
Mares
Herbacées
Buissons, arbustes
Arbres
Affluents et entrants
Digues, épis, chemins, bâti
Epis
Seuils de fond
Digues longitudinales
Espace intra-digues
Bornes kilométriques
N

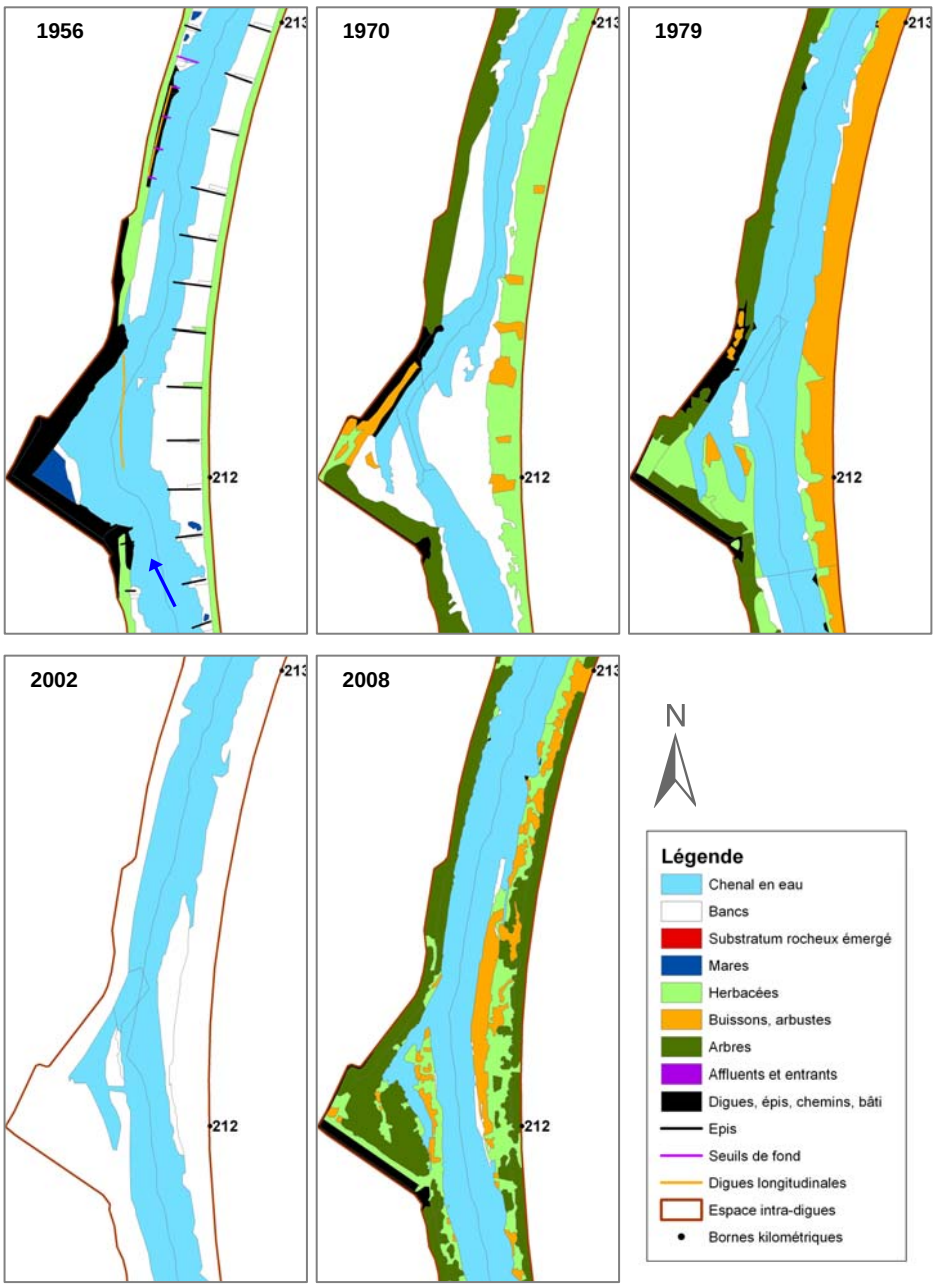


Figure 2.43 : Illustration de l'évolution planimétrique des bancs entre 1956 et 2008 au PK 212. Les années 1991 et 1998 sont manquantes sur ce secteur

Une migration des formes vers l'aval n'a pas été constatée sur le Vieux Rhin, dans la mesure où nous sommes en présence de dépôts locaux qui sont soit dispersés sur le fond du lit, soit colonisés par la végétation. Cependant, l'apparition de ces bancs semble témoigner d'**un transport solide encore actif**.

La mise en évidence de la relative mobilité des formes semble remettre en question l'hypothèse formulée en début de chapitre, sur le système fluvial figé par le développement d'un pavage lié à l'incision du lit. Dans la partie suivante, nous nous proposons de vérifier cette hypothèse en procédant à l'analyse de la structure granulométrique du lit du Vieux Rhin.

D/ Caractérisation granulométrique du lit du Vieux Rhin

De nombreux auteurs ont décrit le développement d'un front de pavage consécutif à des rectifications, à des constructions de barrages ou à toute autre intervention anthropique générant un déficit sédimentaire et donc une incision (Williams et Wolman, 1984 ; Brookes, 1988 ; Kondolf, 1997 ; Rollet, 2007). Dans le cas du Vieux Rhin, nous avons caractérisé le patron longitudinal d'affinement granulométrique du tronçon, puis nous avons recherché les facteurs de perturbation éventuelle de ce patron, naturels ou anthropiques. Nous avons ensuite quantifié et interprété le degré de pavage du lit sur plusieurs sites.

1. Eléments bibliographiques

1.1. L'affinement granulométrique longitudinal

La réduction de l'amont vers l'aval de la taille des particules constituant le fond du lit est un phénomène bien connu, qui a fait l'objet d'observations qualitatives dès le 16ème siècle par Leonard de Vinci (Gomez *et al.*, 2001). L'affinement granulométrique longitudinal (*downstream fining*) concerne aussi bien les lits graveleux que les lits sableux (Frings, 2008). Deux processus sont habituellement invoqués pour expliquer ce phénomène :

- l'**abrasion mécanique** : il s'agit de l'usure progressive des particules, notamment fonction de la lithologie (Werrity, 1992 ; Farrow et Sklar, 2004). Ce mécanisme peut conduire jusqu'à la transformation des sédiments grossiers transportés par charriage, en sédiments fins transportés en suspension (Benda et Dunne, 1997, cités par Chapuis, 2012) ;
- le **tri hydraulique** : il est lié aux différences de mise en mouvement, de transport et de dépôt des particules selon leur taille et leur forme (Russel, 1939, cité par Gomez *et al.*, 2001). Ce processus est souvent considéré comme prédominant sur l'abrasion, des études en canal expérimental ayant démontré que les taux d'abrasion n'étaient pas suffisants pour expliquer des taux d'affinement beaucoup plus importants observés dans la nature (Gomez *et al.*, 2001 ; Polito et Sklar, 2006).

L'affinement granulométrique a été modélisé pour la première fois en 1875 par H. Sternberg sur le Rhin entre Bâle et Mannheim. La loi de décroissance exponentielle établie par l'auteur est aujourd'hui largement utilisée dans la littérature (Church et Kellerhals, 1978 ; Knighton, 1999 ; Surian, 2002 ; Moussavi-Harami *et al.*, 2004 ; Rengers et Wohl, 2007 ; fig. 2.44 et tableau 2.14). Le modèle, décrivant initialement le seul processus d'abrasion, repose sur l'hypothèse que la perte de poids d'une particule est proportionnelle à son poids initial et à la distance parcourue. En assimilant la particule à une sphère de diamètre *D*, Sternberg (1875) montre que :

$$D = D_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}$$

avec :

D : diamètre caractéristique de la particule à la distance x (en mm)
D_0 : diamètre caractéristique de la particule pour x = 0 (en mm)
x : distance parcourue (en km)
α : coefficient empirique de diminution de taille (en km^{-1})

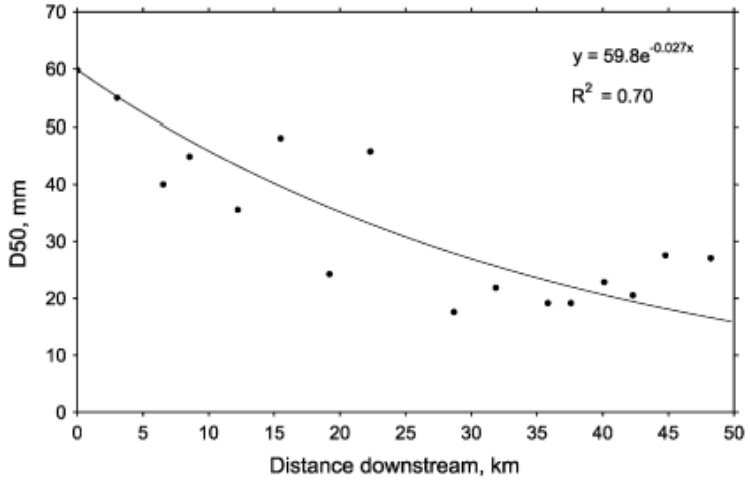


Figure 2.44 : Modèle exponentiel d'affinement sur un tronçon de la Piave (Italie) (Surian, 2002)

Le coefficient α exprime l'intensité de l'affinement. D'après Sternberg (1875), α est fonction de la lithologie et du poids volumique de la particule. Il a ensuite été admis que le coefficient α intègre les effets indifférenciés de l'abrasion et du tri hydraulique, chacun de ces processus entrainant une décroissance exponentielle de la taille des particules (Bradley *et al.*, 1972, cités par Church et Kellerhals, 1978). Le facteur de contrôle de l'affinement considéré comme prédominant est le **profil en long**, de forme typiquement concave, et dont la diminution de pente entraîne une décroissance de la compétence de la rivière à mettre en mouvement les sédiments (Rice, 1999 ; Gomez *et al.*, 2001). Ainsi, le coefficient α tend à diminuer de l'amont vers l'aval, des têtes de bassins jusqu'aux cours inférieurs des rivières (tableau 2.14).

L'affinement granulométrique observé sur le terrain est souvent plus complexe qu'un simple modèle de décroissance exponentielle. En effet, certains facteurs sont susceptibles d'introduire des discontinuités : les ruptures de pente (Ferguson et Ashworth, 1991), les apports latéraux ou la contribution d'affluents (Rice, 1999 ; Surian, 2002), ou encore les **interventions anthropiques**. Par exemple, Knigthon (1999) a constaté sur la Ringarooma River (Tasmanie) le passage d'un lit graveleux à un lit sableux consécutif à plusieurs décennies de rejets miniers dans le chenal. Surian (2002) a également mis en évidence l'impact des barrages sur le patron d'affinement de la Piave, avec la présence d'une structure sédimentaire plus grossière en aval de ces ouvrages. Sur le Missouri et le Colorado, Williams et Wolman (1984) ont également mesuré une augmentation du diamètre médian des particules après la construction de barrages. Le développement d'un front de pavage perturbant le modèle d'affinement a aussi été mis en évidence sur l'Ain (Rollet, 2007).

Référence	Cours d'eau	Longueur du tronçon (km) Position	Paramètre (Di)	Coefficient α (km^{-1})	r^2
Nordin *et al.* (1980)	Amazone	3300 Cours inférieur	D50	Légèrement négatif	nr
Church et Kellerhals (1978)	Peace River (Canada)	140 Cours moyen	Dm, D90	0,003 – 0,005	0,25 - 0,50
Rollet (2007)	Ain (France)	45 Cours inférieur	D50	0,006	nr
Gomez *et al.* (2001)	Waipaoa River (Nouvelle-Zélande)	64 Cours moyen	D50, D90	0,009 – 0,011	0,43 - 0,48
Knighton (1999)	Ringarooma River (Tasmanie)	65 Cours supérieur	D50, D95	0,009 – 0,012	nr
Frings *et al.* (2009)	Delta du Rhin (Pays-Bas)	80 Cours inférieur	Dm	0,011	0,46
Rengers et Wohl (2007)	Rio Chagres (Panama)	40 Cours supérieur	D50	0,013 – 0,017	nr
Surian (2002)	Piave (Italie)	50 Cours inférieur	D50, D84	0,027 – 0,028	0,70 - 0,80
Bradley *et al.* (1972)	Knik River (Alaska)	26 Tête de bassin	Dm	0,081	nr
Moussavi-Harami *et al.* (2004)	Mayan (Iran)	20 Tête de bassin	Dm, D50	0,081 – 0,090	0,88 - 0,87
	Dehbar (Iran)	18 Tête de bassin	D10, D30, D60	0,094 – 0,122	0,82 - 0,91
Ferguson et Ashworth (1991)	Allt Dubhaig (Ecosse)	2,3 Tête de bassin	D50	0,597	nr

nr : non renseigné

Tableau 2.14 : Exemples de coefficients α tirés de la littérature

1.2. La stratification verticale : armure et pavage

La granulométrie d'un lit à fond graveleux ne varie pas régulièrement avec la profondeur, mais est le plus souvent agencée en couches successives. La stratification verticale la plus répandue est **une couche de surface plus grossière que la couche de subsurface** qu'elle recouvre (fig. 2.45) (Kondolf *et al.*, 2003).

Le processus souvent énoncé pour expliquer la formation d'une surface grossière est le « vannage vers l'aval » (*downstream winnowing)*, qui implique la remobilisation sélective des particules fines à la faveur de débits trop faibles pour mobiliser les particules plus grossières (Gomez, 1984 ; Richards et Clifford, 1991 ; Kondolf *et al.*, 2003). La structure résultante est appelée **armure** (*armour layer, armoured bed*), protection temporaire des couches sous-jacentes contre l'érosion. Le **pavage** (*pavement, paved bed*) résulte du même processus ségrégatif, mais poussé à l'extrême et conduisant à une surface plus stable (Bravard et Petit, 1997). Malgré des différences terminologiques, la plupart des auteurs s'accorde à définir l'armure comme une surface *active*, mobilisable lors des épisodes de transport relativement fréquents (crue annuelle ou biennale), tandis que le pavage est une surface quasi *inactive*, protection semi-permanente mise en

mouvement uniquement lors des crues exceptionnelles (Bray et Church, 1980 ; Parker et Klingeman, 1982 ; Richards et Clifford, 1991). Des observations *in situ* indiquent également que les lits pavés se présentent généralement sous la forme d'éléments grossiers imbriqués les uns contre les autres de façon relativement plane et régulière, contrairement à un agencement « en tuiles » plutôt rencontré sur les lits non pavés (Malavoi *et al.*, 2011).

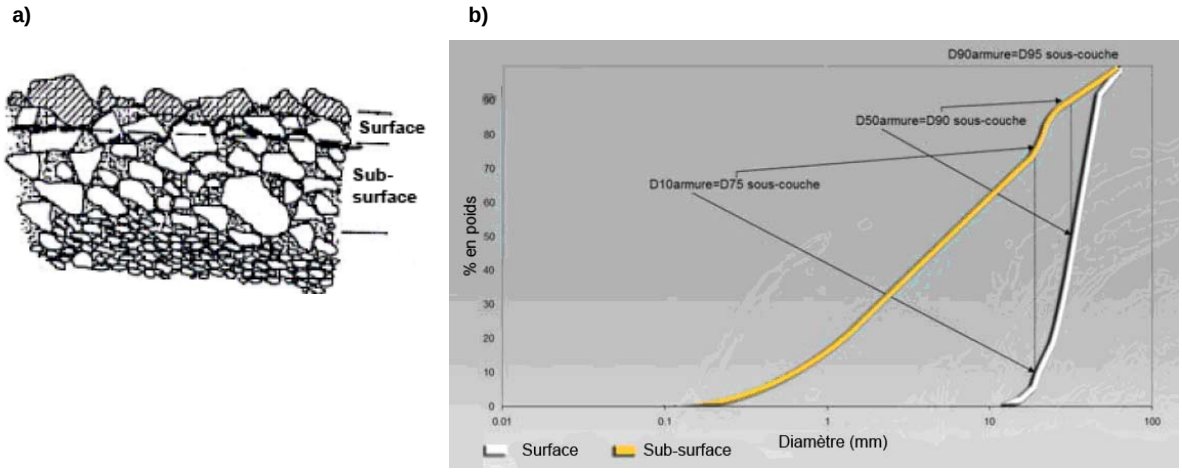


Figure 2.45 : Stratification verticale type d'un lit graveleux (*framework gravel*) : a) vue transversale : la couche de surface (le plus souvent armure ou pavage) protège la couche sous-jacente (d'après Church *et al.*, 1987). b) distribution granulométrique type d'une armure et d'une subsurface (d'après Klingeman et Emmet, 1982, tiré de Malavoi *et al.*, 2011)

Le vannage vers l'aval se produit typiquement en situation de déficit sédimentaire, lorsque les entrées sont inférieures à la capacité de transport (Bunte et Abt, 2001). La réduction des débits de crue peut également conduire à la formation d'une surface à ségrégation, en empêchant la mise en mouvement de la fraction grossière (Malavoi *et al.*, 2011). Ainsi, **un front de pavage est couramment observé en aval des barrages**, ces derniers ayant souvent pour effet de réduire à la fois la fourniture sédimentaire et l'amplitude des crues (Williams et Wolman, 1984 ; Kondolf, 1997 ; Surian, 2000). L'impact de ces ouvrages peut être ressenti plusieurs décennies après leur installation, et plusieurs dizaines de kilomètres en aval. Par exemple, Williams et Wolman (1984) ont constaté une augmentation de la taille des particules sur un tronçon inférieur à 10 km en aval du barrage Hoover (Colorado), un an après sa construction. Trois ans plus tard, le front de pavage était observé 20 km en aval ; puis ce front atteignait 70 km après 6 ans, et 135 km après 13 ans. D'après les auteurs, la stabilisation du processus peut prendre entre 1 et 10 ans.

Le **degré de pavage** est habituellement quantifié par le **ratio des D_{50} de la surface et de la subsurface**. Il avoisine 1 pour les cours d'eau montrant de forts apports sédimentaires. Si la capacité de transport excède les entrées, le ratio est d'environ 2 ; il peut être supérieur à 3 pour des rivières de montagne à haute énergie, ou lorsque les entrées sont nulles (Bunte et Abt, 2001). Bathurst (2007) a relevé des ratios largement supérieurs à 4. A l'inverse, Gomez *et al.* (2001) ont calculé un ratio de 1,4 sur une rivière en exhaussement suite à de forts apports solides. Quelques degrés de pavage tirés de la littérature sont donnés dans le tableau 2.15.

Référence	Cours d'eau	Degré de pavage
Gomez *et al.* (2001)	Waipaoa River (Nouvelle-Zélande)	1,4
AfW (1939)	Aare (Suisse)	1,52
Andrews (2000)	Virgin River (Etats-Unis)	1,79
Andrews (1994)	Sagehen Creek (Etats-Unis)	1,93
Rollet (2007)	Ain (France)	1,96-2,71
Church *et al.* (1987)	Fraser River, Canada	~ 2
Bakke *et al.* (1999)	Klamath Basin (Etats-Unis)	2,7-8,7
Barry *et al.* (2004)	South Fork Salmon River (Etats-Unis)	2,71
King *et al.* (2004)	Big Wood River (Etats-Unis)	4,64
Ryan *et al.* (2002)	St Louis (Etats-Unis)	11

Tableau 2.15 : Exemples de degrés de pavage tirés de la littérature. Les lignes grisées sont citées par Bathurst (2007)

2. Caractérisation du patron longitudinal d'affinement du Vieux Rhin

2.1. Matériel et méthodes

2.1.1. Choix des sites échantillonnés

L'étude de la structure granulométrique longitudinale d'un cours d'eau nécessite de disposer d'échantillons qui puissent être comparés d'un banc à l'autre, en s'affranchissant au maximum des variations locales. Un soin particulier doit donc être porté à échantillonner des unités sédimentaires similaires (Rice et Church, 1998). La plupart des études consacrées à l'affinement granulométrique ont été focalisées sur les **faciès grossiers des têtes de bancs** (Church et Kellerhals, 1978 ; Rice et Church, 1998 ; Surian, 2002 ; Rollet, 2007). Il existe en effet un phénomène d'affinement à l'échelle des bancs, de la tête vers la queue de ceux-ci (*downbar fining*) (Leopold et Wolman, 1957 ; Smith, 1974, cités par Rice et Church, 2010 ; Church et Jones, 1982). Les faciès des têtes de bancs sont souvent retenus car ils sont facilement identifiables et sont relativement proches de la compétence de l'écoulement (Rice et Church, 1998).

Entre 2009 et 2010, nous avons échantillonné les faciès grossiers de **22 têtes de bancs** du Vieux Rhin. Parmi les 267 surfaces de galets non végétalisées que nous avons extraites des photographies aériennes de 2008, les 22 bancs retenus pour l'analyse granulométrique sont les plus grands en termes de longueur et de superficie (fig. 2.46).

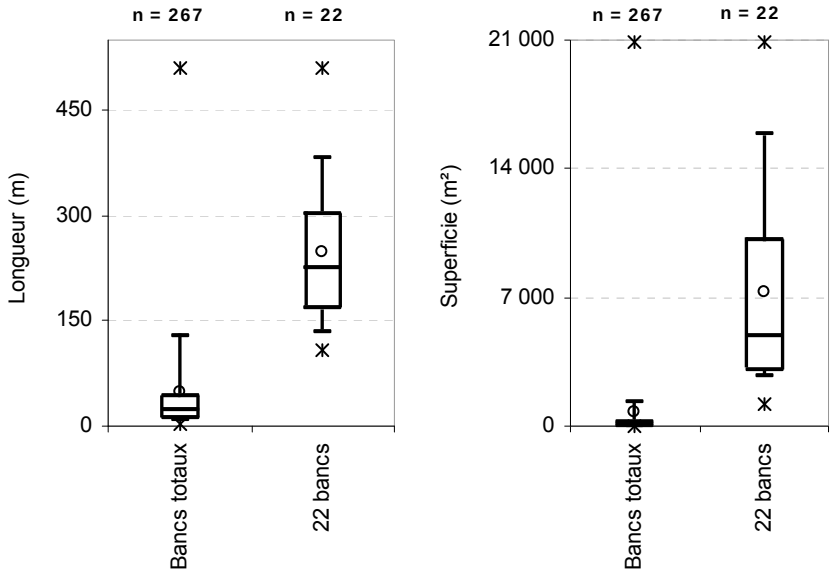


Figure 2.46 : Longueur et superficie de tous les bancs du Vieux Rhin (n = 267) et des 22 bancs sélectionnés pour l'analyse granulométrique (dimensions extraites de la carte des unités physionomiques de 2008)

2.1.2. Choix de la méthode d'échantillonnage

La caractérisation granulométrique peut se faire soit par comptage des particules (*pebble count*, Wolman, 1954), soit par pesée des fractions échantillonnées. Dans les deux cas, le paramètre de taille classiquement étudié est l'**axe *b*** (fig. 2.47, a). Celui-ci détermine le passage d'une particule à travers une maille donnée (Krumbein, 1941). La méthode de mesure la plus rapide sur le terrain consiste à passer les particules dans un gabarit percé de trous de côtés 8 à 128 mm, soit les classes granulométriques de Wentworth (1922) (fig. 2.47, b). Les trous carrés sont en cohérence avec les tamis à maille carrée traditionnellement utilisés pour les échantillonnages par pesée (fig. 2.47, c).



Figure 2.47 : a) Représentation des trois axes caractéristiques d'une particule : *a* (grand), *b* (intermédiaire), *c* (petit). b) Gabarit à trous carrés. c) Tamis à maille carrée (clichés F. Arnaud, V. Ferrier, 2011)

Différentes techniques permettent de caractériser la granulométrie de la couche de surface :

- **l'échantillonnage par grille** (*grid sampling*) (Wolman, 1954) est la méthode la plus couramment utilisée (Bunte et Abt, 2001). L'opérateur traverse la surface à échantillonner

et prélève les particules désignées par la pointe de sa chaussure ou localisées sous les nœuds d'une grille au sol définie par des décamètres, jusqu'à 100 particules ;

- **l'échantillonnage par transect** (*transect sampling*) (Muir, 1969) est dérivé de l'échantillonnage par grille. Par exemple, sur la Peace River (Etats-Unis), Church et Kellerhals (1978) ont échantillonné entre 1 et 4 transects par tête de bancs et 50 particules par transect ;
- **l'échantillonnage aérolaire** (*aeral sampling*) consiste à prélever toutes les particules sur une placette donnée. La variante la plus utilisée est le *paint-and-pick,* pour laquelle la placette est peinte avec un spray afin de s'assurer que seule la couche de surface est étudiée, puis toutes les particules peintes sont prélevées (Lane et Carlson, 1953) ;
- **l'échantillonnage volumétrique** (*volumetric sampling*) considère la couche de surface comme une structure tridimensionnelle, qui peut donc être contenue dans un volume. Cette définition pose une difficulté conceptuelle dans le cas d'une surface d'épaisseur équivalente à une particule (Church *et al.*, 1987). De plus, la masse à prélever pouvant atteindre plusieurs centaines de kilos pour que l'échantillon soit représentatif du faciès, effectuer une volumétrie de surface nécessiterait un grand faciès homogène, et serait très consommateur en temps et en effort (Bunte et Abt, 2001). Cette technique est donc peu utilisée ;
- **l'échantillonnage visuel** (*visual estimating*) caractérise qualitativement les classes granulométriques de la placette. Cette technique est particulièrement appréciée des biologistes car elle permet d'évaluer rapidement les gammes de substrat en place et exploitables par les poissons (Kondolf *et al.*, 2003). En France, Malavoi et Souchon (1989) ont proposé une méthode semi-quantitative basée sur l'échantillonnage de cellules de 1 à 1,5 m de côté disposées sur des transects. Le substrat est codé en six caractères : les deux premiers spécifient la fraction la plus grossière occupant au moins 10 % de la cellule, et les suivants indiquent la classe du ou des deux éléments dominants. Cependant, si la méthode visuelle est simple et rapide d'utilisation, elle se heurte à une subjectivité et à une non reproductibilité entre les opérateurs. De plus, les pourcentages de classes évalués visuellement ne peuvent pas être comparés aux déciles calculés statistiquement (Kondolf *et al.*, 2003). L'échantillonnage visuel est par conséquent réservé à la description de la structure générale d'une placette.

Il est à noter que l'échantillonnage aérolaire peut être exécuté à partir de photographies prises à la verticale de la surface et traitées au laboratoire afin d'extraire le contour des particules et de mesurer les axes (Graham *et al.*, 2005 ; Rollet, 2007 ; Chapuis, 2008 ; Graham *et al.*, 2010). Cette technique permet de gagner du temps sur le terrain quand il y a beaucoup d'échantillons. Dans notre cas, nous n'avons pas jugé nécessaire d'avoir recours à la photographie. Nous avons retenu **l'échantillonnage par grille (méthode de Wolman)**.

Sur chaque site, nous avons parcouru la placette en faisant des pas réguliers équivalant à deux fois le D_{max} afin d'éviter le double-comptage. Nous avons prélevé les particules les yeux fermés en pointant l'index, de manière à éviter le biais de sélection des plus grosses particules. Les axes *b* ont ensuite été mesurés au gabarit. Les résultats sont donnés sous la forme d'un « nombre de particules échantillonnées par grille » *(grid by number).*

Nous avons collecté entre 100 et 130 particules par site, ce qui est légèrement supérieur au nombre préconisé dans la littérature (entre 60 et 100 particules) pour une estimation précise du D_{50} et du D_m (Wolman, 1954 ; Hey et Thorne, 1983 ; Mosley et Tindale, 1985, cités par Rice et Church, 1998). L'erreur absolue (intervalle de confiance de 95 %) pour la détermination des D_{16} à D_{95} d'un échantillon de 100 particules est comprise entre ± 0,23 ϕ et ± 0,40 ϕ, soit un pourcentage d'erreur compris environ entre ± 16 % et ± 28 % (Rice et Church, 1996 ; Bunte et Abt, 2001).

2.2. Résultats

2.2.1. Modèle d'affinement longitudinal observé

L'examen des 22 têtes de bancs indique **une diminution de la taille des particules de l'amont vers l'aval** (fig. 2.48). Le modèle de décroissance exponentielle fournit une meilleure représentation statistique des variations du D_{84} par rapport au D_{50} (r^2 = 0,46 contre r^2 = 0,35). Les lois linéaire et puissance ont été également testées, les r^2 obtenus sont dans les mêmes ordres de grandeur (r^2 = 0,48 et 0,34 pour la relation linéaire, r^2 = 0,44 et 0,32 pour la relation puissance pour le D_{84} et le D_{50}, respectivement). Selon le modèle exponentiel, le coefficient α est de **0,023 et 0,021 km^{-1}** pour le D_{84} et le D_{50}, respectivement. Ces coefficients sont cohérents avec la littérature, en particulier les études de cas portant sur le cours supérieur des rivières (cf. tableau 2.14).

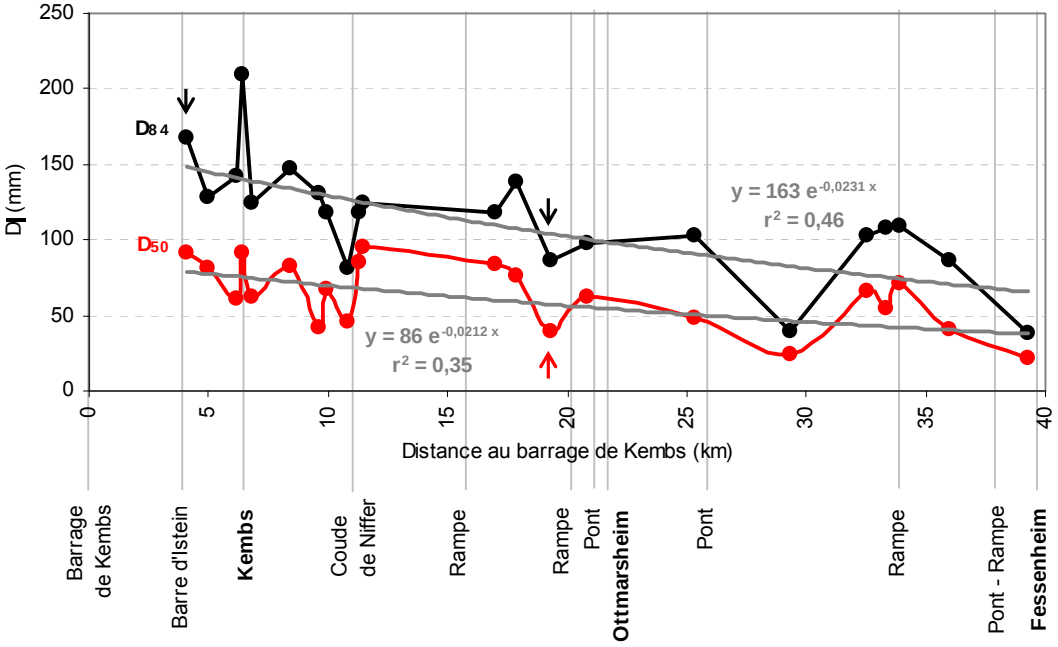


Figure 2.48 : Variation longitudinale du D_{50} et du D_{84} des 22 têtes de bancs échantillonnées. Les flèches indiquent les ruptures détectées avec le test de Hubert

Les relations statistiques sont relativement faibles (faibles r^2, fig. 2.48), ce qui suggère une grande variabilité granulométrique inter-bancs. Le test de Hubert détecte par ailleurs une rupture au PK 193,28. Ces éléments nous conduisent à rechercher les facteurs susceptibles de perturber le modèle d'affinement du Vieux Rhin.

2.2.2. Recherche des facteurs de contrôle de l'affinement

La discontinuité identifiée au PK 193,28 pourrait être expliquée par la **rupture de pente** observée dans ce secteur (au niveau du bouchon d'Ottmarsheim ; cf. fig. 2.10 et tableau 2.4). Il est également probable que les **structures anthropiques** jalonnant le linéaire (rampes miliaires, ponts…) perturbent localement le patron d'affinement. En revanche, les **affluents** du Vieux Rhin, le Hodbach-Feuerbach et la Kander, ne semblent pas intervenir dans le fonctionnement sédimentaire du tronçon, étant donné les faibles dimensions de ces deux rivières (bassins versants de 72 et 99 km² ; Q_{100} de 30 et 60 m^3/s, respectivement) et le fait que de nombreuses protections de berges suppriment les possibilités de recharge par érosion latérale (ECOTEC, 2006 ; G. Ströhlein, WSA, communication personnelle).

Au-delà de ces facteurs locaux, la question est surtout que **nous comparons des formes fluviales différentes** : certaines **anciennes, figées** par les épis et par l'implantation du barrage de Kembs qui a modifié les conditions des variables de contrôle, et d'autres **récentes**, **potentiellement en mouvement** au cours des vingt dernières années (cf. partie précédente sur l'étude de l'évolution des superficies de bancs). Nous serions donc en présence de **deux cortèges sédimentaires**. L'examen de l'âge des bancs extrait des cartes diachroniques confirme que **les valeurs élevées des D_{50} correspondent majoritairement à des bancs anciens, et inversement** (fig. 2.49).

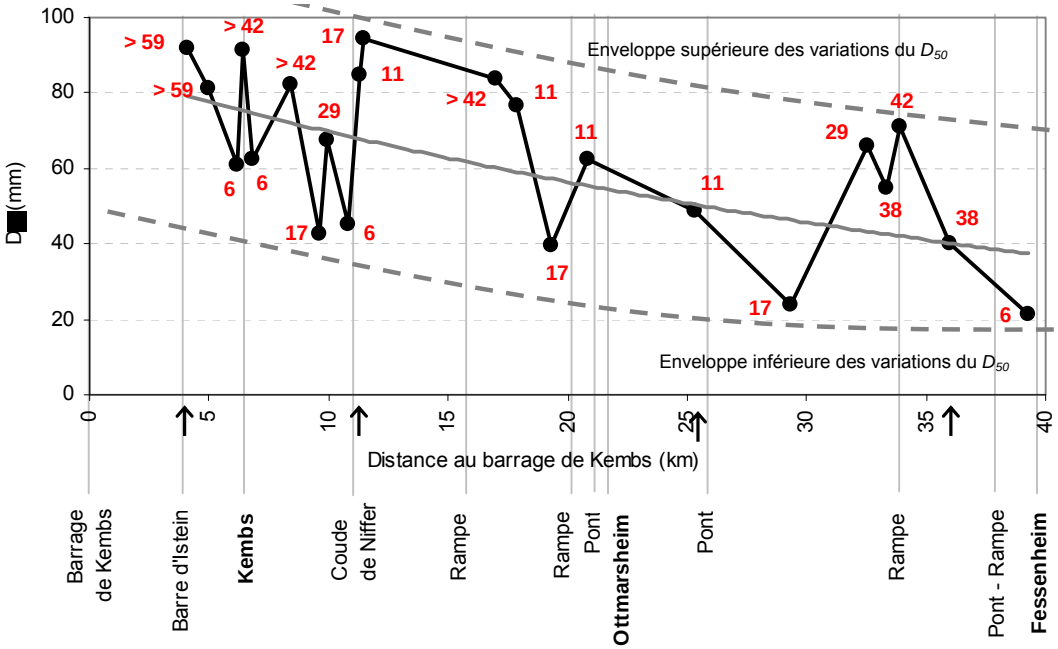


Figure 2.49 : Age des bancs (en rouge) extrait des cartographies diachroniques. Les bancs anciens sont majoritairement proches de l'enveloppe supérieure des variations du D_{50} et les bancs récents sont plutôt

proches de l'enveloppe inférieure. Les flèches sur l'axe des abscisses indiquent la localisation des quatre échantillonnages volumétriques décrits en D/3.1.1

De plus, les enveloppes inférieures et supérieures des variations du D_{50} sont quasiment parallèles, signifiant que ces deux cortèges suivraient un modèle d'affinement similaire.

3. Caractérisation du degré de pavage du lit

3.1. Matériel et méthodes

3.1.1. Choix des sites échantillonnés

Nous avons sélectionné quatre bancs localisés à intervalles réguliers sur le tronçon d'étude : (i) en aval de la barre d'Istein (PK 178,2), (ii) en aval du coude de Niffer (PK 185,56, correspondant à un site-pilote d'érosion maitrisée des berges du projet EDF ; cf. fig. 2.41), (iii) à la hauteur du village de Neuenburg (PK 199,42), (iv) en amont du pont de Fessenheim (PK 210,2). Nous avons échantillonné en milieu de banc et à proximité du chenal, de manière à être le plus représentatif possible du pavage du lit mouillé.

3.1.2. Choix de la méthode d'échantillonnage

La couche de subsurface étant tridimensionnelle, la technique la plus couramment utilisée pour sa caractérisation est la volumétrie (Church *et al.*, 1987). Kellerhalls et Bray (1971) ont cependant observé sur un lit non stratifié l'équivalence des distributions granulométriques obtenues par volumétrie et par comptage des particules. Buffington (1996, cité par Bunte et Abt, 2001) a alors proposé d'adapter la méthode de Wolman pour caractériser la couche de subsurface. Rollet (2007) a confronté cette technique à la volumétrie traditionnelle pour calculer le degré de pavage des bancs de l'Ain. Les écarts importants montrent que la méthode de Wolman a tendance à sous-estimer les particules grossières de la subsurface et à donner un indice de pavage plus élevé. L'**échantillonnage volumétrique** a finalement été retenu pour analyser la couche de subsurface des bancs du Vieux Rhin car il permet non seulement de déterminer le pavage, mais aussi de quantifier le volume de fines constituant la matrice, information nécessaire pour aborder ultérieurement le bilan sédimentaire (cf. partie E). La couche de surface a été caractérisée selon la méthode de Wolman de 100 particules, déjà mise en œuvre pour la caractérisation de l'affinement granulométrique longitudinal (cf. partie précédente).

3.1.3. Description de l'échantillonnage volumétrique

Nous avons calculé la masse de sédiments nécessaire pour que l'échantillon volumétrique soit représentatif de la placette en utilisant l'équation empirique de Church *et al.* (1987), la plus fréquemment utilisée dans la littérature (Bunte et Abt, 2001) (tableau 2.16) :

$$m_s = 2{,}882 \cdot D_{max} - 47{,}6$$

avec :

m_s (en kg) et D_{max} (en mm) l'axe *b* moyen des 30 plus grosses particules de la surface échantillonnée

Site	D_{max} (mm)	Volume requis (kg)	Volume traité (kg)
PK 178,2	87,1	203	213
PK 185,56	77,3	175	271
PK 199,42	69,4	152	276
PK 210,2	66,8	145	245

Tableau 2.16 : Caractéristiques des quatre échantillons granulométriques traités par volumétrie

Après décapage de la couche de surface, nous avons échantillonné la couche de subsurface en creusant sur une épaisseur d'au moins deux fois le D_{max}, selon les recommandations de Diplas et Fripp (1992). Les particules d'axe *b* supérieur à 8 mm ont été pesées sur place au moyen d'une balance électronique d'une capacité de 50 kg (précision au gramme) suspendue à un trépied. Les particules supérieures à 45 mm ont été triées au gabarit, et celles comprises entre 8 et 45 mm ont été passées dans des tamis successifs. La fraction inférieure à 8 mm a été pesée et sous-échantillonnée : plus de 6 kg ont été ramenés au laboratoire pour un tamisage sur colonne jusqu'à 1,6 mm (Ferrier, 2011). La fréquence des masses étudiées au laboratoire a finalement été rapportée à leur proportion dans l'échantillon de départ. Les résultats sont donnés sous la forme d'une « masse de particules échantillonnées par volume » *(volume by weight).*

Le calcul du degré de pavage nécessite d'utiliser au préalable des facteurs de conversion afin d'homogénéiser les deux techniques volumétriques et « Wolman » (Bunte et Abt, 2001). Le « modèle du cube plein » (*model of densely packed cubes*) de Kellerhals et Bray (1971) propose d'appliquer le facteur $1/D^3$ pour passer de la masse au nombre. Puis, le facteur D^3 permet de convertir la méthode volumétrique en la méthode par grille. Une fois simplifié, ce facteur donne 1, ce qui signifie que les distributions granulométriques obtenues par volumétrie et par la méthode de Wolman peuvent être exploitées telles quelles pour le calcul du degré de pavage.

3.2. Résultats

Pour trois échantillons (PK 178,2, 199,42 et 210,2), nous remarquons que les sédiments composant la couche de surface sont mieux triés que ceux de la couche de subsurface, résultat de l'élimination d'une importante fraction de fines par tri hydraulique (fig. 2.50). Le quatrième échantillon (PK 185,56) montre deux distributions très similaires. Cette structure pourrait être qualifiée d'**ouverte** (*coarse open framework* ; Bunte et Abt, 2001), sans infiltration de fines entre les interstices.

Il semblerait que ce mode de construction différent puisse s'expliquer par la localisation du site : le banc du PK 185,56 est positionné en aval immédiat du coude de Niffer, qui est caractérisé par des forces tractrices élevées et par une importante incision du lit depuis 1985 (cf. fig. 2.18). Le matériau grossier déstocké pourrait avoir engraissé le banc en aval sous la forme d'un front progradant, sans distinction entre les couches de surface et de subsurface. Il est par ailleurs intéressant de noter que la structure granulométrique de ce banc, qui correspond à un site-pilote choisi par EDF pour réactiver les processus d'érosion latérale et le développement d'un chenal secondaire, est plutôt favorable à une remobilisation des sédiments, sans doute supérieure aux autres secteurs qui sont davantage pavés.

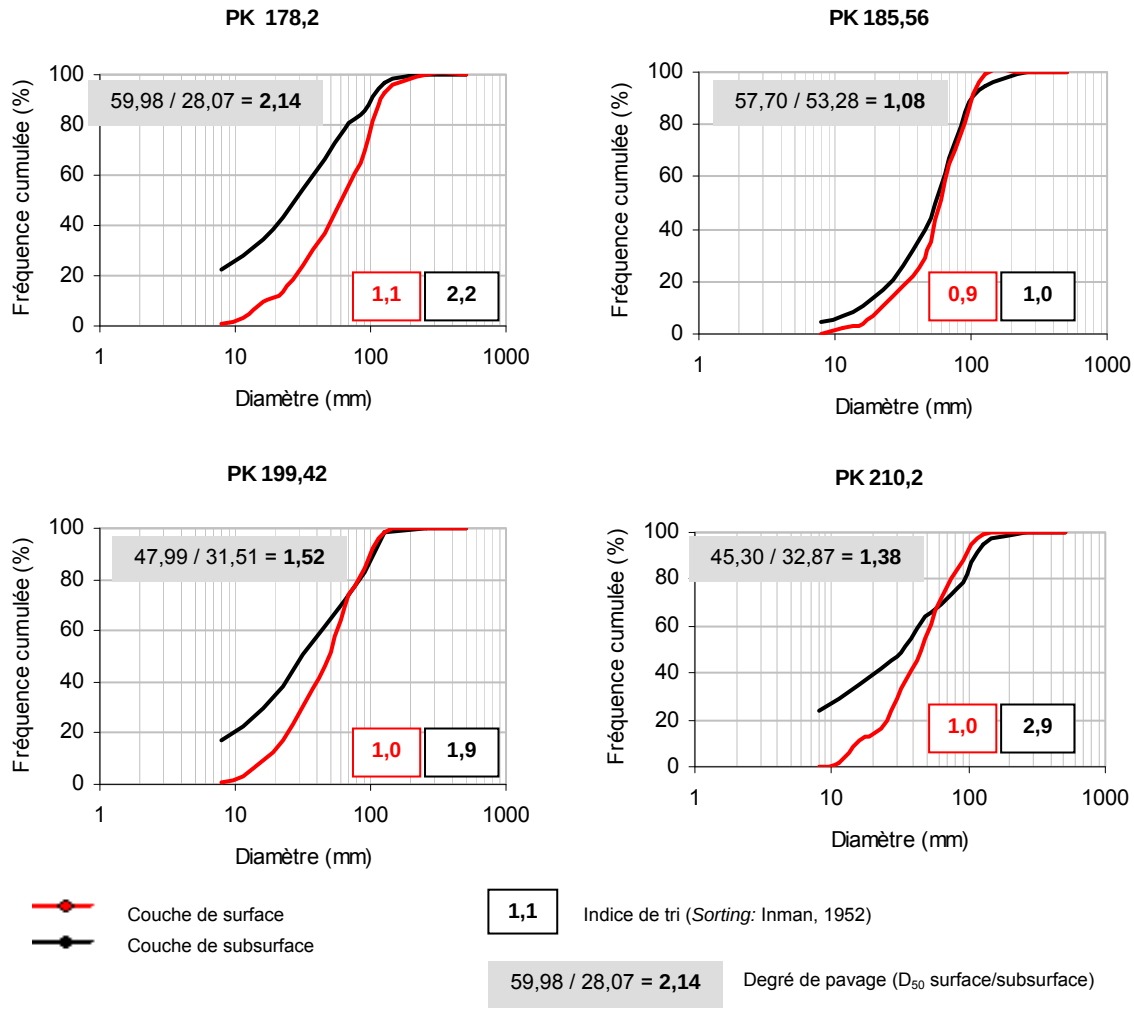


Figure 2.50 : Caractéristiques granulométriques des quatre bancs échantillonnés

En effet, le degré de pavage du banc localisé au PK 185,56 avoisine la valeur 1, étant donné la similarité dans la composition granulométrique des deux couches (fig. 2.50). Le degré de pavage des trois autres bancs apparait plus élevé (entre 1,38 et 2,14), mais ces valeurs restent faibles en comparaison de celles tirées de la littérature (cf. tableau 2.15) alors que nous avions choisi de caractériser la couche de subsurface par échantillonnage volumétrique, connu pour fournir des valeurs de percentiles plus élevées qu'un échantillonnage de type Wolman. Ces résultats tendraient à prouver que nous sommes en présence d'**un pavage dynamique**. Par ailleurs, les

observations de terrain démontrent un agencement des particules en tuiles, cette structure étant plutôt rencontrée sur des lits non pavés (fig. 2.51) (Malavoi *et al.*, 2011).



Figure 2.51 : Phénomène de tuilage sur le banc du PK 183,95 (cliché F. Arnaud, 2011)

En résumé, l'analyse du patron longitudinal d'affinement granulométrique du Vieux Rhin a révélé un coefficient de diminution de taille α d'environ 0,022 km^{-1}, cohérent avec la littérature. Ce patron est néanmoins assez fortement perturbé, vraisemblablement par l'effet de facteurs locaux (pente du lit, présence de structures anthropiques) et également par la dynamique résiduelle de la charge de fond, une partie semblant encore en transit tandis que l'autre partie, ancienne, parait avoir été « figée » par les aménagements. Les échantillonnages volumétriques ont par ailleurs révélé un pavage dynamique, confirmant les possibilités de remobilisation de la charge. Ces résultats tendent ainsi à démontrer que **si le lit du Vieux Rhin est ajusté aux perturbations anthropiques passées, il est encore en évolution**. Notamment, le lit a été réactif aux crues de 1994, 1999 et 2007. Afin d'améliorer notre compréhension du fonctionnement sédimentaire récent, nous proposons donc à présent d'établir le bilan des flux de sédiments fins et grossiers intervenus au cours des vingt dernières années dans la bande active et sur les marges végétalisées du Vieux Rhin.

E/ Analyse du fonctionnement sédimentaire récent du Vieux Rhin (1990-2010)

Les parties précédentes ont mis en évidence l'existence de deux types de flux sédimentaires concernant deux compartiments différents du Vieux Rhin : les sédiments grossiers (D_{50} ~ 50 mm ; cf. fig. 2.50) transitant essentiellement dans la bande active, et les sédiments fins (diamètre inférieur à 1,6 mm) stockés sur les marges végétalisées.

La dernière partie de ce chapitre a pour objectif de localiser et de quantifier les entrées et les stocks sédimentaires impliqués dans le fonctionnement morphologique du Vieux Rhin au cours des vingt dernières années. L'établissement d'un bilan différencié des sédiments fins et grossiers vise à améliorer notre compréhension de ces deux flux, ainsi que des évolutions contrastées du lit mineur et des marges. Le bilan annuel moyen établi dans le lit mineur est discuté en tenant compte des estimations de la capacité de transport par charriage existantes (EDF R&D, 2009).

1. Matériel et méthodes

1.1. Justification de la démarche retenue

Un bilan sédimentaire décrit les entrées, le transport, le stockage et les sorties de sédiments au sein d'un système donné. Qu'ils soient qualitatifs (évaluation des interactions entre les processus) ou quantitatifs (description des vitesses et des amplitudes de changement), les bilans sédimentaires reposent tous sur **l'équation de continuité du transfert des sédiments** (Reid et Dunne, 2003 ; Rollet, 2007) :

Débit solide aval = Débit solide amont + Variation du stock sédimentaire

Le débit solide sortant du système est égal au débit solide entrant, auquel sont ajoutés les apports provenant des affluents, de l'incision du lit et des érosions latérales, et auquel sont soustraits les sédiments stockés dans le lit mineur et sur les marges (fig. 2.52).

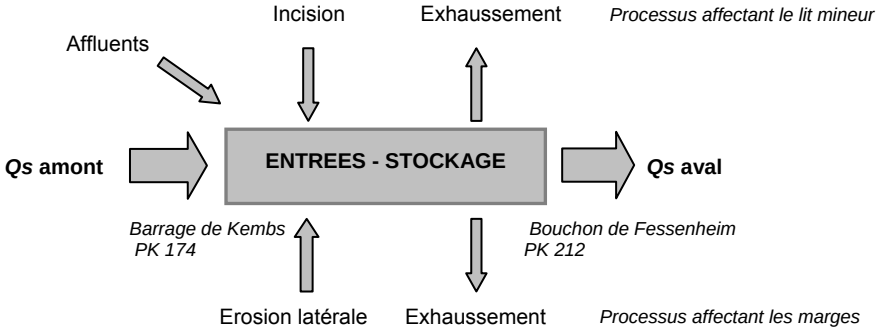


Figure 2.52 : Termes du bilan sédimentaire du Vieux Rhin entre le barrage de Kembs et le bouchon de Fessenheim. Le secteur aval, contrôlé par le barrage de Breisach, n'a pas été intégré au bilan

Un bilan sédimentaire peut être établi en intégrant les différentes dimensions du système fluvial, planimétrique et/ou verticale. Un **bilan morphologique** consiste à prendre en compte à la fois les changements planimétriques et verticaux intervenus au sein du tronçon (Brewer et Passmore, 2002 ; Rollet, 2007) : la superposition de photographies aériennes ou de cartes permet d'extraire les surfaces érodées ou déposées entre deux dates, puis ces données en deux dimensions sont converties en trois dimensions en exploitant des suivis topographiques levés à la même période. Le bilan morphologique global est finalement calculé par addition des volumes de dépôt et d'érosion.

Cette technique se révèle particulièrement adaptée pour étudier le fonctionnement sédimentaire récent du Vieux Rhin, dans la mesure où nous disposons de photographies aériennes acquises en 1991/92 et en 2008 (cf. C/1.1.3), ainsi que de profils en travers levés en 1985/93 et en 2009 (cf. B/1.1.1), complétés sur les marges végétalisées par des mesures d'épaisseurs de sédiments fins réalisées en 2011 (cf. B/1.1.2). En confrontant ces données, nous pouvons ainsi déterminer les volumes de sédiments fins et grossiers mobilisés au cours des vingt dernières années entre le barrage de Kembs (PK 174) et le bouchon de Fessenheim (PK 212). L'aval de Fessenheim, essentiellement contrôlé par le remous du barrage de Breisach, a été exclu de l'analyse (fig. 2.52).

Le calcul du bilan sédimentaire nécessite au préalable de quantifier les entrées et les stockages au cours de la période.

1.2. Quantification des entrées sédimentaires

1.2.1. Apports sédimentaires issus de l'amont et des affluents

L'analyse de la dynamique sédimentaire du Rhin en amont du barrage de Kembs ainsi que des impacts du barrage sur les débits solides (cf. chapitre 1 ; C/3.4.3) a révélé que les apports de sédiments grossiers depuis l'amont peuvent être considérés comme négligeables. 330 000 m^3 de sédiments fins auraient en revanche transité par le barrage depuis 1990 (EDF-CIH, 2005 ; ECOTEC, 2006 ; cf. chapitre 1 ; C/3.4.3).

La charge provenant des deux affluents du Vieux Rhin, le Hodbach-Feuerbach et la Kander, n'a pas été quantifiée dans la présente étude, cependant elle peut être considérée comme négligeable compte-tenu de la petite taille de ces rivières et du fait que de nombreuses protections de berges mises en place sur ces affluents suppriment les possibilités de recharge latérale (ECOTEC, 2006 ; G. Ströhlein, WSA, communication personnelle).

La comparaison des profils en travers entre 1985/93 et 2009 a révélé un bilan des sédiments érodés dans la bande active entre le barrage de Kembs et le bouchon de Fessenheim de 709 050 m^3. Cette perte de sédiments est générée par deux processus, l'**incision du fond du lit** et les **érosions latérales**. Il nous faut donc déterminer la contribution de ces deux processus aux apports en sédiments fins et grossiers.

1.2.2. Apports sédimentaires issus des érosions latérales

Les volumes sédimentaires apportés au lit mineur par érosion latérale ont été quantifiés en suivant quatre étapes successives :

1. *extraction des surfaces érodées :* nous avons superposé les cartes de 1991/92 et 2008 dans ArcGis (fonction *intersect*). Les zones de végétation devenues bande active en 2008 ont ainsi été considérées comme des surfaces érodées. Nous avons appliqué un seuil de 500 m² aux superficies extraites par segments élémentaires de 100 m, afin de tenir compte de l'erreur de 5 m associée au géoréférencement des images (cf. C/1.2.1) ;
2. *calcul des hauteurs de berges érodées :* nous avons superposé les surfaces érodées aux profils en travers de 1985/93, puis nous avons extrait les altitudes minimales et maximales de ces segments de profils considérés comme érodés. Nous en avons déduit les hauteurs de berges affectées par le processus ;
3. *détermination de la part de sédiments fins et grossiers constituant les berges :* d'après les observations de terrain et l'analyse rétrospective, nous faisons l'hypothèse que le haut des berges du Vieux Rhin est constitué exclusivement de sédiments fins piégés par la végétation, et que le bas des berges est composé de sédiments grossiers qui ont été déposés entre les épis avant la réduction des débits et avant la colonisation végétale. Nous avons retenu une épaisseur de fines de 0,7 m, soit la valeur médiane des épaisseurs mesurées au pénétromètre en bordure du lit mouillé (application d'un tampon de 15 m dans ArcGis pour sélectionner les sondages pénétrométriques localisés en bordure du chenal). Les épaisseurs de sédiments grossiers ont ensuite été déduites des hauteurs totales de berges précédemment calculées, en soustrayant 0,7 m ;
4. *calcul des volumes :* le volume total de sédiments fins et grossiers ayant été apportés par érosion latérale a été obtenu par multiplication des épaisseurs avec les surfaces érodées, et par somme des volumes élémentaires tous les 100 m.

Au terme de la procédure, il apparait que 220 180 m^3 de sédiments ont été apportés par érosion latérale au cours des vingt dernières années, dont 99 580 m^3 correspondant à la couche de sédiments fins, et 120 600 m^3 à la couche de sédiments grossiers.

1.2.3. Apports sédimentaires issus de l'incision du lit

Nous avons déduit de la différence entre le volume total de sédiments érodés dans la bande active entre 1985/93 et 2009 (709 050 m^3) et les apports par érosion latérale, un volume apporté par l'incision du lit de 488 870 m^3.

Par ailleurs, grâce aux échantillonnages volumétriques réalisés pour la détermination du degré de pavage du lit (cf. D/3.1.3), nous connaissons le pourcentage de matrice (diamètre inférieur à 1,6 mm) constituant la couche de subsurface : pour trois des bancs, la matrice représente entre 8 et 11 % de l'échantillon total. Le quatrième banc, correspondant au PK 185,56, est caractérisé par une

matrice de seulement 3,9 %. Nous avons déjà discuté la particularité de ce banc, situé en aval immédiat du coude de Niffer et ayant vraisemblablement été engraissé par un front progradant sans distinction entre les couches de surface et de subsurface. En excluant ce site, nous retenons donc un pourcentage de matrice moyen de 9,3 %. Cette valeur appliquée au total de sédiments érodés au fond du lit (488 870 m^3) révèle que 45 470 m^3 de sédiments fins et 443 400 m^3 de sédiments grossiers ont été apportés par ce processus au cours des vingt dernières années.

Nous faisons l'hypothèse que les matériaux de la berge, hormis les sédiments fins piégés par la végétation, correspondent à un dépôt hérité de précédents échanges avec le lit mineur, et présentent donc la même granulométrie que les matériaux composant la couche de subsurface du lit mineur. En appliquant le pourcentage de matrice de 9,3 % au total des sédiments grossiers apportés par érosion latérale calculé précédemment (120 600 m^3), nous obtenons un volume de matrice de 11 220 m^3. Cela correspond donc à 109 380 m^3 de sédiments grossiers et 110 800 m^3 de sédiments fins (99 580 m^3 calculés précédemment + 11 220 m^3) qui ont été apportés par érosion latérale.

1.3. Quantification du stockage sédimentaire

1.3.1. Stockage sédimentaire dans le lit mineur

La comparaison des profils en travers entre 1985/93 et 2009 a révélé un bilan des sédiments stockés dans la bande active entre le barrage de Kembs et le bouchon de Fessenheim de 77 080 m^3. En appliquant le pourcentage de matrice de 9,3 %, nous obtenons 7 170 m^3 de sédiments fins et 69 910 m^3 de sédiments grossiers qui ont été stockés dans le lit mineur.

1.3.2. Stockage sédimentaire sur les marges

La comparaison des profils en travers entre 1985/93 et 2009 a révélé un bilan des sédiments stockés sur les marges végétalisées de 1 055 980 m^3. Nous avons constaté une différence de 173 700 m^3 avec l'étude de Schoneboom *et al.* (2010), ces auteurs ayant exploité les mêmes séries de profils en travers, mais ayant appliqué une méthodologie différente. En effet, les auteurs ont basé le découpage du Vieux Rhin sur les *champs d'épis,* identifiés par photo-interprétation et validés sur le terrain. Selon ce découpage, les bancs de sédiments grossiers fixés par la végétation pionnière ont donc été inclus dans le compartiment « bande active ». L'inclusion de ces secteurs en exhaussement compense ainsi une partie de l'incision du fond du lit, ce qui conduit à un bilan total plus élevé de 173 700 m^3 dans la bande active. Dans notre étude basée sur la *végétation,* ces secteurs composés de sédiments grossiers ont été inclus dans le compartiment « marges végétalisées ».

D'autre part, la confrontation des volumes déduits des sondages pénétrométriques ainsi que des profils en travers a montré que le reste des sédiments composant les marges est constitué de sédiments fins (cf. fig. 2.19). En appliquant le pourcentage de matrice de 9,3 %, 157 550 m^3 de

sédiments grossiers ont donc été stockés en transit et végétalisés, et 898 430 m^3 de sédiments fins ont été stockés sur les marges (16 150 m^3 composant la matrice des secteurs grossiers végétalisés + 882 280 m^3 composant le reste des marges).

2. Résultats

La compilation des informations précédentes permet de construire le bilan des flux de sédiments fins et grossiers intervenus dans le Vieux Rhin entre le barrage de Kembs et le bouchon de Fessenheim. Les volumes totaux ont été divisés par 20 pour établir le bilan annuel moyen sur la période 1990-2010.

Le bilan des sédiments fins (fig. 2.53) révèle la prédominance du stockage sédimentaire sur les marges. Les volumes mobilisés montrent que l'essentiel de la fourniture sédimentaire provient de l'amont du barrage de Kembs. Cependant, le bilan comporte des inconnues. D'après la littérature, il est très vraisemblable que le flux total de sédiments fins ayant transité dans le Vieux Rhin soit nettement supérieur au volume stocké sur les marges.

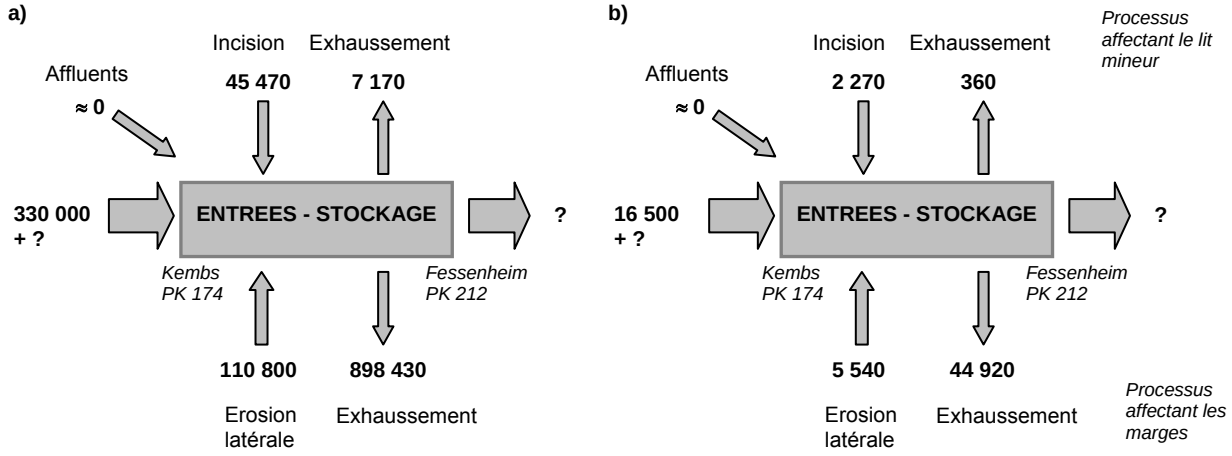


Figure 2.53 : Bilan des sédiments fins mobilisés entre le barrage de Kembs et le bouchon de Fessenheim entre 1990 et 2010 : a) Volumes totaux (en m^3). b) Volumes annuels moyens (en m^3/an)

Le bilan des sédiments grossiers met en évidence **un déficit sédimentaire de 16 270 m^3/an** (fig. 2.54, b). L'incision du lit contribue à 80 % des entrées sédimentaires, les 20 % restants étant apportés par érosion latérale. Cette proportion non négligeable amène donc à nuancer les conclusions de la littérature citées dans ce chapitre, sur la déconnexion des flux sédimentaires entre les marges et le chenal (Dittrich *et al.*, 2000, 2010).

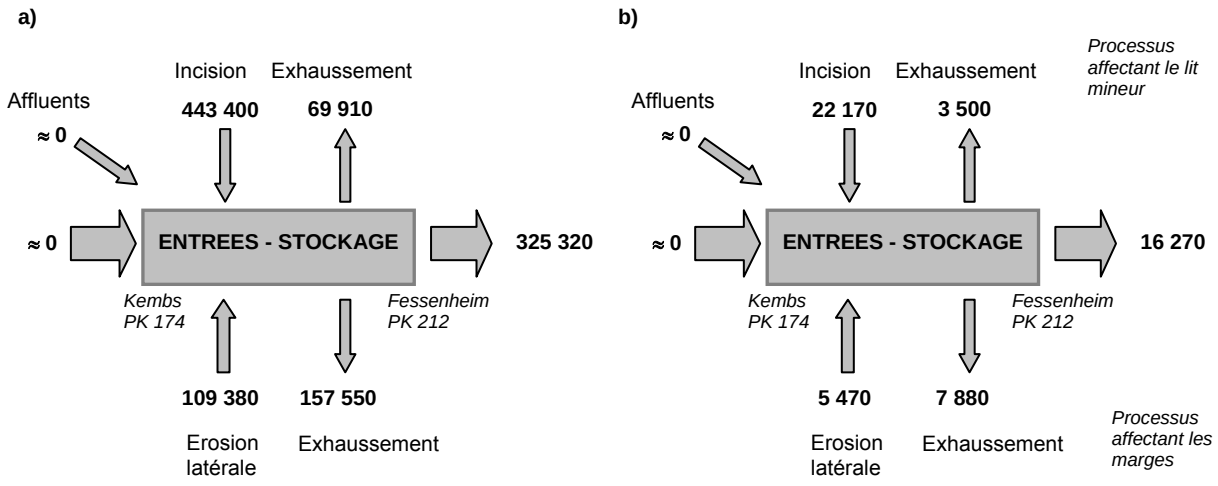


Figure 2.54 : Bilan des sédiments grossiers mobilisés entre le barrage de Kembs et le bouchon de Fessenheim entre 1990 et 2010 : a) Volumes totaux (en m^3). b) Volumes annuels moyens (en m^3/an)

Par ailleurs, EDF R&D (2009) a estimé la capacité de transport solide par charriage du Vieux Rhin à partir des formules de Meyer-Peter et Müller (1948) et Lefort (2005). Les deux formules donnent des résultats sensiblement différents, mais avec des variations similaires en amont et en aval du PK 198 (tableau 2.16).

	Bilan sédimentaire (Arnaud, 2012)	Capacité de transport par charriage (EDF R&D, 2009)	
		Meyer-Peter et Müller (1948)	Lefort (2005)
Amont du PK 198	13 030	23 000	52 000
Aval du PK 198	3 240	1 500	16 000

Tableau 2.16 : Comparaison du budget des sédiments grossiers (Arnaud, 2012) et de la capacité de transport solide par charriage (EDF R&D, 2009) en amont et en aval du PK 198

Le bilan des sédiments grossiers que nous avons établi entre 1990 et 2010 se situerait ainsi **dans la fourchette basse de la capacité de transport** (tableau 2.16). Ce résultat a du sens, puisque la capacité de transport a été calculée en choisissant un diamètre de particules représentatif du chemin de halage bordant le Vieux Rhin (D_m = 25 mm), alors que le bilan sédimentaire a démontré que l'essentiel des sédiments est apporté au lit mineur par l'incision du fond, ce dernier étant composé de sédiments beaucoup plus grossiers (D_m des têtes de bancs variant entre 102 mm et 54 mm de l'amont vers l'aval, cf. fig. 2.49), moins facilement mobilisables. En outre, si le déficit sédimentaire estimé entre 1990 et 2010 atteint quasiment la capacité de transport, cela confirme que **les processus d'incision du lit et d'érosion latérale alimentent à eux seuls le Vieux Rhin en charge grossière, en l'absence d'apports depuis l'amont du barrage de Kembs et depuis les affluents**.

F/ Synthèse et discussion générale

1. La trajectoire temporelle d'évolution du Vieux Rhin depuis le 19ème siècle

Ce chapitre a permis de retracer l'évolution morphologique du Rhin entre Kembs et Breisach depuis le 19ème siècle. Les travaux de correction ont profondément modifié l'hydrosystème fluvial et ont concentré les ajustements ultérieurs dans le Rhin corrigé. Dans ce paragraphe, nous discutons d'abord les changements intervenus dans la plaine rhénane entre 1828 et 1925, puis dans le Vieux Rhin entre 1930 et 2011. Le bilan des ajustements est finalement dressé, et la trajectoire temporelle d'évolution est reconstituée.

1.1. L'évolution morphologique de l'hydrosystème fluvial entre 1828 et 1925

1.1.1. Une incision dans le lit corrigé qui contrôle l'assèchement de l'hydrosystème

L'analyse des cartes anciennes (cf. C/2.1 et 2.2) a permis de mettre en évidence **la mobilité du Rhin sauvage** ainsi que les impacts morphologiques de la correction : entre 1828 et 1925, nous avons constaté **un assèchement drastique de la plaine rhénane et une profonde simplification du style fluvial**, par augmentation des surfaces végétalisées, disparition totale des tresses, augmentation des déconnexions amont des chenaux, des bras morts et des chenaux à sec. Si la majeure partie des changements est enregistrée avant 1872, les différents types de chenaux continuent à évoluer plusieurs décennies après la fin des travaux. Nous avons montré **un gradient amont-aval** dans l'évolution de la répartition des changements : entre 1828 et 1872 la majorité des ajustements se manifeste dans la partie amont du tronçon d'étude, jusqu'au PK 195, puis entre 1872 et 1925 ce secteur est stabilisé et les ajustements s'expriment en aval.

Nous émettons l'hypothèse que ce gradient amont-aval est contrôlé par le gradient d'incision du lit corrigé, qui entraine l'abaissement du niveau de la nappe d'accompagnement et la diminution de la fréquence des débordements. Quelques études se sont intéressées à l'évolution du toit de la nappe avec la correction (Gendrin *et al.*, 1957 ; Simler *et al.*, 1979 ; Augelmann, 2000). Mais, les données piézométriques anciennes sont rares, et restreintes à quelques secteurs. Les données limnimétriques sont en revanche beaucoup plus nombreuses. Plusieurs travaux ont ainsi montré l'abaissement du niveau d'étiage dans le Rhin corrigé (Marchal et Delmas, 1959 ; Bensing, 1966 ; CHR, 1977 ; Gallusser et Schenker, 1992). Si la tendance est une légère propagation du phénomène vers l'aval entre 1828-1880 et 1880-1920 (la zone maximale d'incision se situe au PK 199 au cours de la seconde période alors qu'elle était localisée au PK 186 au cours de la première période ; fig. 2.55, b), il apparait que la partie terminale du tronçon d'étude, en aval du PK 215, est globalement moins affectée par l'enfoncement (fig. 2.55, b). Cette observation concorde avec notre analyse des variations altimétriques du talweg (cf. B/2.2.2) qui a montré, entre 1880 et 1935, une incision importante en amont du PK 212 et un ralentissement en aval. La comparaison

des patrons longitudinaux d'évolution verticale et planimétrique (fig. 2.56) amène ainsi à valider notre hypothèse d'**un gradient amont-aval d'assèchement de l'hydrosystème fluvial qui est contrôlé par le gradient amont-aval d'enfoncement du lit corrigé**.

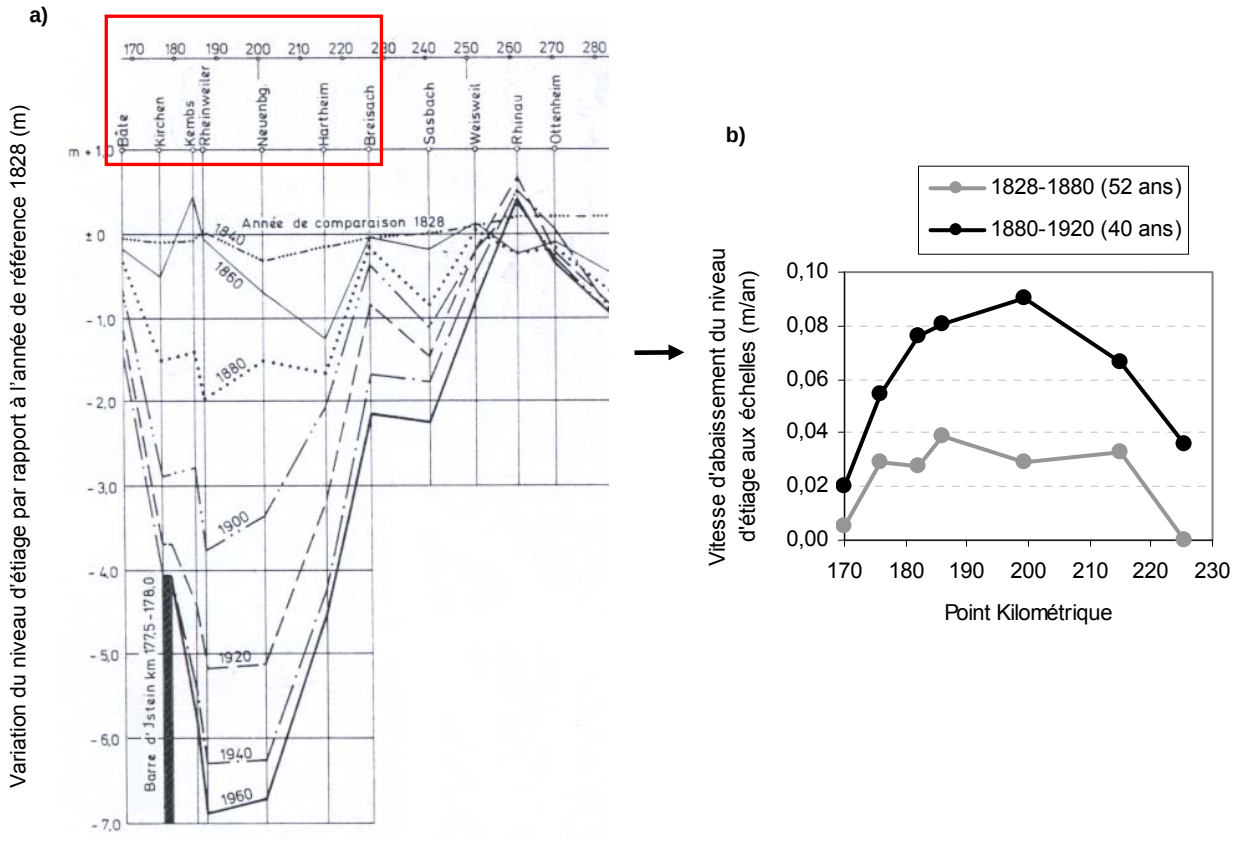
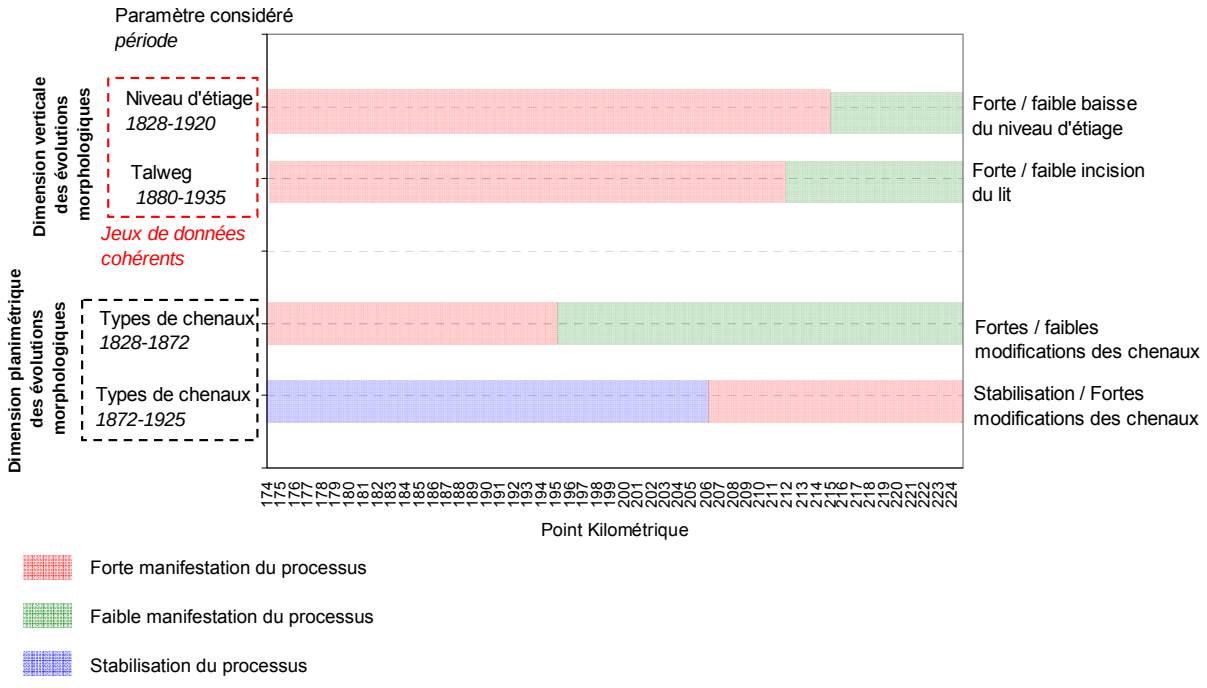


Figure 2.55 : a) Variations du niveau d'étiage (540 m^3/s à Bâle) aux échelles limnimétriques entre les PK 170 et 280 depuis 1828. L'encadré rouge localise le tronçon d'étude (d'après CHR, 1977). b) Abaissement du niveau d'étiage par périodes entre 1828 et 1920



Sur la page précédente :

Figure 2.56 : Représentation schématique des patrons longitudinaux d'évolution morphologique verticale et planimétrique mis en évidence dans le chapitre 2 au cours du 19ème siècle et de la première moitié du 20ème siècle. Les limites entre les tronçons fluviaux homogènes correspondent aux ruptures détectées avec le test de Hubert

Tous les chenaux n'ont pas été asséchés avec la correction : dans la partie aval du tronçon d'étude, qui a été la moins affectée par l'incision, les anastomoses apparaissent à la suite d'ajustements des chenaux de type « tresses » et « défluents proches ». Les anastomoses constituent le type prédominant en 1925.

1.1.2. Un prolongement d'une trajectoire temporelle naturelle ?

L'analyse des cartes a montré **le passage de chenaux en tresses à des chenaux anastomosés entre 1828 et 1925**. Ce phénomène est particulièrement prononcé dans la partie terminale du tronçon d'étude, à la hauteur de Breisach. L'augmentation du caractère anastomosé dans ce secteur avait déjà été observée par Ollive (2007) entre les 16ème et 18ème siècles. L'auteur avait attribué cette évolution à deux phénomènes : (i) *la défluviation de la bande de tressage*, conduisant à la stabilisation et à l'amalgamation des îles ainsi qu'à la réduction de la largeur des chenaux ; (ii) *l'avulsion et la bifurcation*, c'est-à-dire l'engraissement d'un banc médian conduisant à la dérivation du chenal principal tandis que l'ancien lit devient une anastomose alimentée par le drainage de l'aquifère et par les submersions (Smith *et al.*, 1989 ; Makaske *et al.*, 2002, cités par Schmitt, 2010). Sur une temporalité plus longue, les anastomoses rhénanes correspondent à des anciens chenaux de tressage post-glaciaires et holocènes, voire même à d'anciens talwegs partiellement comblés par des sédiments fins après défluviation. Schmitt (2010) évoque une « **métamorphose fluviale** », l'héritage du tressage expliquant le système anastomosé.

Finalement, nos résultats semblent indiquer que **la trajectoire temporelle d'évolution du Rhin corrigé se situerait dans le prolongement de sa trajectoire naturelle**. **La correction aurait eu pour effet d'accélérer un processus naturel de transition des tresses vers les anastomoses observé sur une temporalité plus longue**. Cette perspective se justifie si nous considérons les effets de la correction comme une défluviation « forcée », dans le sens où une partie de la bande de tressage a été concentrée entre les digues de basses eaux, ce qui a entrainé une perte des connectivités latérale et longitudinale (par déconnexion totale, amont ou aval des bras secondaires), conduisant à la stabilisation des tresses latérales et à l'amalgamation des îles ; ces phénomènes étant observés lors de défluviations naturelles.

L'incision du lit du Rhin corrigé est également à replacer dans le contexte des changements géomorphologiques enregistrés durant l'Holocène, ayant abouti à un enfoncement maximal de 25 m entre Bâle et Breisach (Schmitt, 2010) (cf. chapitre 1 ; C/2.1). Le secteur de Breisach se situe d'autre part à l'interface des zones « en tresses » et « en tresses et anastomoses » décrites par Carbiener (1969, 1970, 1983) et retravaillées par Schmitt (2010) : ce secteur terminal, bien que dominé par les tresses, présentait très probablement certaines caractéristiques morphologiques d'un style anastomosé avant les travaux de correction.

1.2. L'évolution morphologique du Vieux Rhin entre 1930 et 2011

1.2.1. L'héritage de la correction et de la régularisation

Alors que les données topographiques antérieures à 1930 ont montré une diversité morphologique dans le Rhin corrigé (cf. B/2.1.1), les données ultérieures ont mis en évidence **une simplification drastique de la section en travers et un lissage du profil en long du fait de la régularisation** (cf. B/2.1.2). Ces modifications se sont produites dès les premières années après la construction des épis. Dans le même temps, le lit a continué à s'enfoncer, à une vitesse constante d'environ 7 cm/an depuis la correction (cf. B.2.2.2).

La mise en service du barrage de Kembs et des biefs du Grand Canal d'Alsace marque une rupture nette dans les ajustements : la période post-1950 est caractérisée par un ralentissement de la vitesse d'incision à 0,4 cm/an (cf. B/2.2.2). L'exploitation des photographies aériennes (cf. C/2.3) a montré par ailleurs que **la réponse du Vieux Rhin à la réduction des débits a été quasiment immédiate** : l'exondation et la végétalisation des dépôts contraints entre les épis a entrainé une importante rétraction de la bande active au cours des vingt premières années, qui s'est poursuivi jusqu'au début des années 1990 (**temps de relaxation**). Les élargissements éventuels survenus avant 1990 ont ainsi été largement compensés par le processus prépondérant de rétraction. Ce dernier s'est accompagné de l'exhaussement des champs d'épis, par piégeage des sédiments fins dans la végétation, mis en évidence par la comparaison diachronique des profils en travers et par les mesures pénétrométriques des épaisseurs de fines (cf. B/2.3), et confirmé par la littérature (Dittrich *et al.*, 2000 ; Ergenzinger et Bölscher, 2008 ; Dittrich *et al.*, 2010 ; Ferrier, 2011). Cet exhaussement tend à accentuer une certaine déconnexion entre le lit mineur et les milieux annexes. Après 1990, la bande active semble **ajustée aux conditions de débits** imposées par le barrage de Kembs, mais elle est réactive aux crues extrêmes survenues durant la période, ce qui a été notamment attesté par des érosions du fond du lit (cf. B/2.3) et des berges (cf. C/2.3.3) (fig. 2.57).

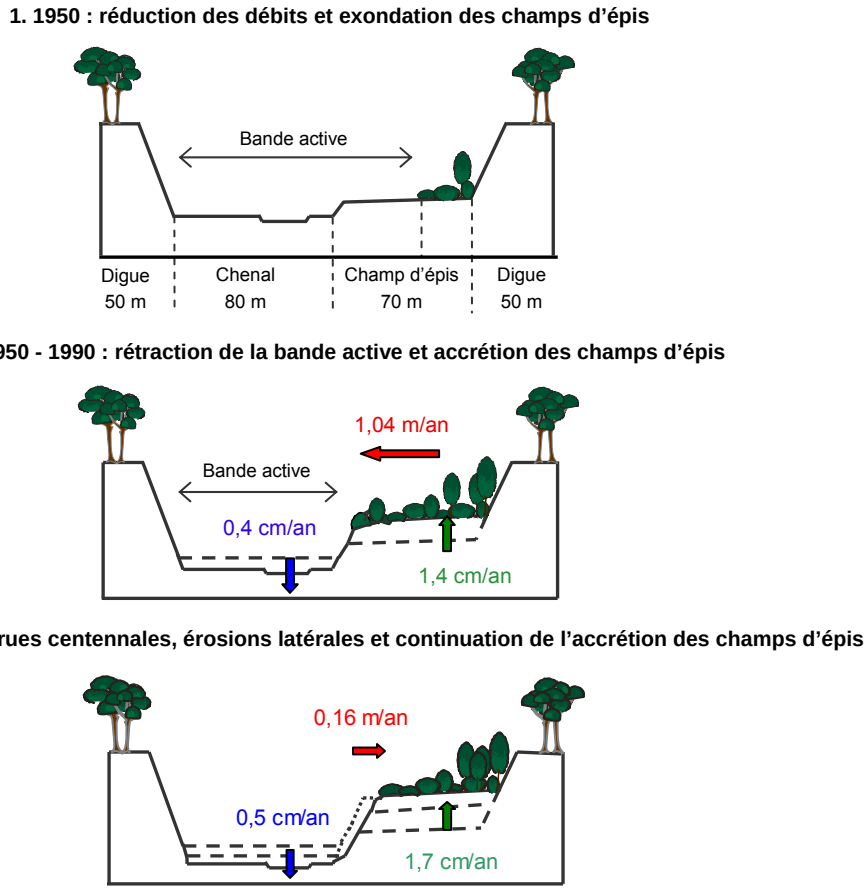


Figure 2.57 : Représentation schématique de l'évolution de la section fluviale depuis 1950. Les vitesses (en m/an et cm/an dans les dimensions transversale et verticale, respectivement) correspondent aux valeurs médianes déduites de la comparaison des profils en travers (1950/56-1985/93, 1985/93-2009) tous les 200 m et des photographies aériennes (1956-1991, 1991-2008) tous les 100 m

Les analyses des superficies de bancs (cf. C/2.3.4) et de la structure granulométrique du lit (cf. D/) ont enfin montré **la dynamique morphologique résiduelle du Vieux Rhin** : une partie de la charge de fond semble en transit sur un fond partiellement pavé, tandis que l'autre partie se trouve « figée » par les aménagements.

1.2.2. Les logiques spatio-temporelles et les liens de causalité entre les processus

S'il y a eu prédominance du phénomène de rétraction de la bande active dans la partie amont du tronçon d'étude entre 1956 et 1970 (cas des deux secteurs localisés en amont du PK 195,5 ; fig. 2.58), en l'absence de comparaison possible avec une période antérieure nous n'avons pas pu conclure quant à l'existence d'un gradient amont-aval dans l'évolution temporelle de la rétraction. L'analyse des périodes ultérieures n'a révélé aucune propagation vers l'aval du phénomène. **Ainsi, la rétraction de la bande active ne parait pas contrôlée par un déficit sédimentaire** qui progresserait vers l'aval depuis le barrage de Kembs. Cette absence de gradient, également constatée dans l'étude des changements verticaux (cf. fig. 2.58), tend à prouver que **le barrage de Kembs n'a pas aggravé le déficit sédimentaire existant** (estimé à environ 16 000 m^3/an entre le barrage de Kembs et le bouchon de Fessenheim, cf. E/2), ou du moins, que **les**

effets de la réduction des crues morphogènes ont prédominé sur les effets de la réduction des débits solides.

Il semble néanmoins exister **un lien spatial entre l'incision et la rétraction**. En effet, nous remarquons que les trois secteurs fortement rétractés entre 1956 et 1970 et entre 2002 et 2008 sont localisés dans les parties amont et médiane du tronçon d'étude, lesquelles ont été le plus incisées depuis 1950 (fig. 2.58). Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cette éventuelle causalité :

Pour la période ancienne (1956-1970), nous avons constaté que les trois secteurs de forte rétraction présentent le point commun de comporter des bancs latéraux plus développés en 1956, dont la formation semble avoir été contrôlée par des facteurs locaux (configuration des épis, sinuosité des digues de la correction…) (cf. C/2.3.3). Une hypothèse est que **l'incision du lit aurait favorisé le « perchement » de ces bancs latéraux**, étant moins fréquemment inondés et donc plus facilement colonisables par la végétation pionnière (Liébault et Piégay, 2002 ; Dufour, 2005). Pour la période récente (2002-2008), l'apparition puis la végétalisation de bancs médians aux points d'inflexion tendrait à prouver que **l'incision aurait participé à engraisser les formes par déstockage du fond**. Dans une moindre mesure, ces bancs auraient également été alimentés par les **érosions latérales**, le bilan sédimentaire ayant montré que ce phénomène contribue à 20 % des apports en charge grossière.

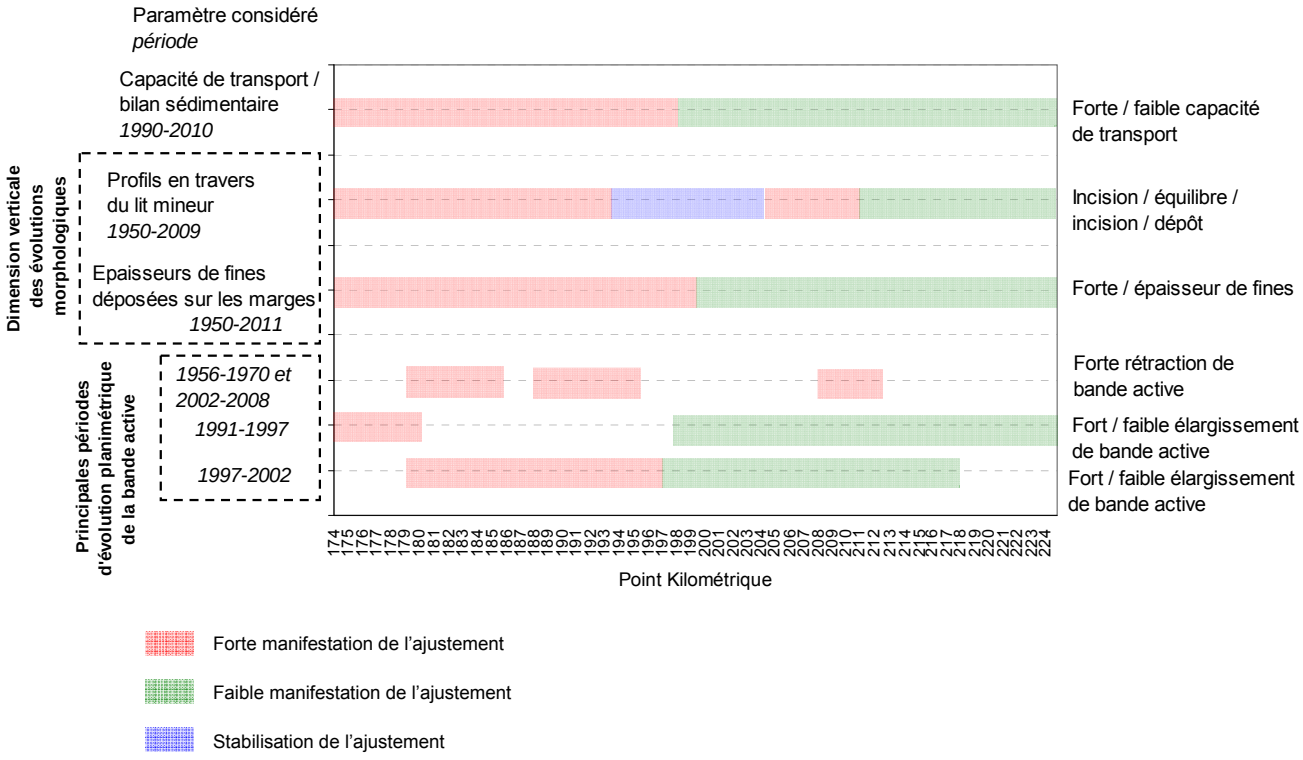


Figure 2.58 : Représentation schématique des patrons longitudinaux d'évolution morphologique verticale et planimétrique mis en évidence dans le chapitre 2 au cours de la seconde moitié du 20ème siècle. Les limites entre les tronçons fluviaux homogènes correspondent aux ruptures détectées avec le test de Hubert

Il est également probable qu'**une boucle de rétroaction positive se soit mise en place entre l'incision et la rétraction**, la rétraction ayant pour effet de concentrer les écoulements, ce qui aurait augmenté les forces tractrices au fond du chenal et de fait augmenté l'incision (Tsujimoto et Kitamura, 1996, cités par Rollet, 2007). Notons que Béraud (2012) a simulé l'évolution de la répartition des contraintes au fond en fonction des changements de géométrie et de végétation entre 1950 et 2009 à l'aide du logiciel 1D RubarBE développé par l'IRSTEA. L'auteur a mis en évidence une élévation de la ligne d'eau en crue durant la période, du fait de la rétraction. La contrainte au fond simulée avec la géométrie de 2009 est également plus importante dans les deux secteurs de forte incision localisés dans les parties amont et médiane du tronçon d'étude, en comparaison avec les deux autres secteurs, concernés par un dépôt et par un équilibre (cf. fig. 2.58).

La validation de ces hypothèses de causalité nécessiterait de disposer de données verticales et planimétriques collectées à un pas de temps identique pour pouvoir retracer finement la chronologie des processus, ce qui n'a pas été possible dans la présente étude. Cependant, nous retenons que si une boucle de rétroaction s'est mise en place, cela n'a pas inversé la tendance générale d'évolution qui est **un ralentissement drastique de la vitesse d'incision à partir de 1950, à une valeur 19 fois inférieure à celle d'avant la réduction des débits** (cf. B/2.2.2).

1.3. Le bilan des changements morphologiques depuis le 19ème siècle

La multitude de modifications des variables du système fluvial mise en évidence dans ce chapitre aboutit à **un ensemble complexe d'ajustements morphologiques sous contrôles naturels** (héritages géomorphologiques holocènes, détérioration climatique du Petit Age Glaciaire…) **et anthropiques** (aménagement du bassin versant suisse, correction, régularisation, canalisation) **depuis le 19ème siècle** (fig. 2.59).

Il est intéressant de montrer, sur la figure 2.59, l'existence de liens de causalité entre les modifications morphologiques ou climatiques et la mise en œuvre des phases d'aménagement (les trois phases d'aménagement successives ont été décrites dans le chapitre 1 ; C/3). En effet, les travaux hydrauliques engagés en amont de Bâle, tout comme la correction en aval, ont été guidés principalement par le contexte anthropo-climatique du début du 19ème siècle, qui a accru la dynamique fluviale et aggravé les conditions de vie des populations riveraines (inondations, maladies, problèmes de fixation de la frontière… Werner, 1928 ; Tricart et Bravard, 1991 ; Kintz, 2001). La régularisation a quant à elle été entreprise après que l'exportation des sédiments érodés au fond du lit corrigé ait augmenté l'instabilité des formes, incompatible avec la navigation (Humbert et Descombes, 1985). Enfin, la construction du barrage de Kembs et du Grand Canal d'Alsace est intervenue essentiellement après l'exhumation de l'affleurement rocheux d'Istein, infranchissable par les bateaux (Humbert et Descombes, 1985).

Si le compartiment biologique n'est pas l'objet d'étude principal de cette thèse, il est possible de déduire des perturbations en cascade des variables morphologiques composant l'hydrosystème

fluvial, une altération de la réponse biologique. Nous avons montré par exemple que la perte de connectivité longitudinale, verticale et latérale provoquée par l'incision du lit corrigé a eu pour effet de modifier les types de chenaux et d'assécher les zones aquatiques de la plaine rhénane (cf. fig. 2.59). Cela a entrainé un appauvrissement drastique des biocénoses de ces milieux, comme décrit dans la littérature (Carbiener, 1983 ; Carbiener et Dillmann, 1992).

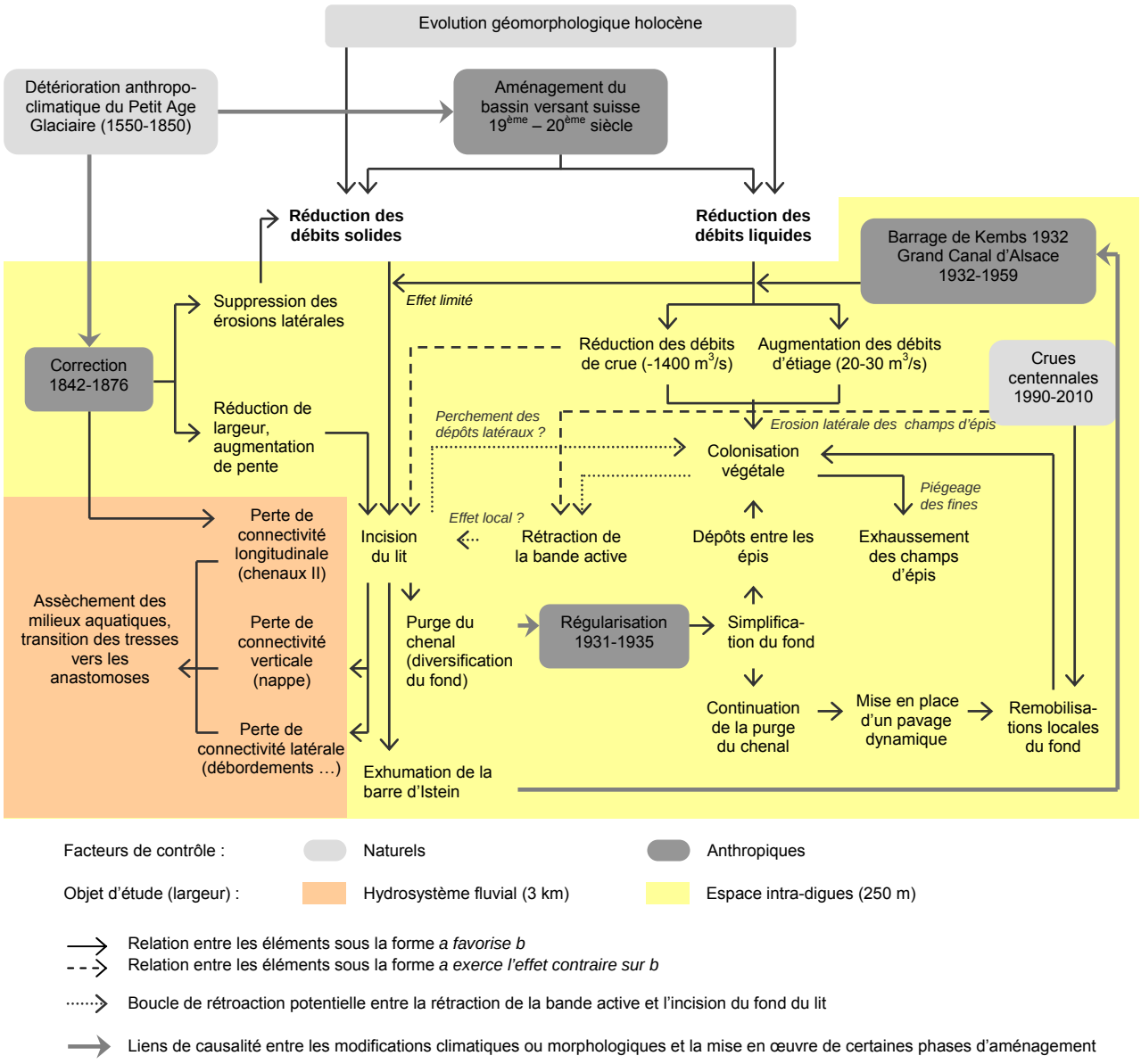


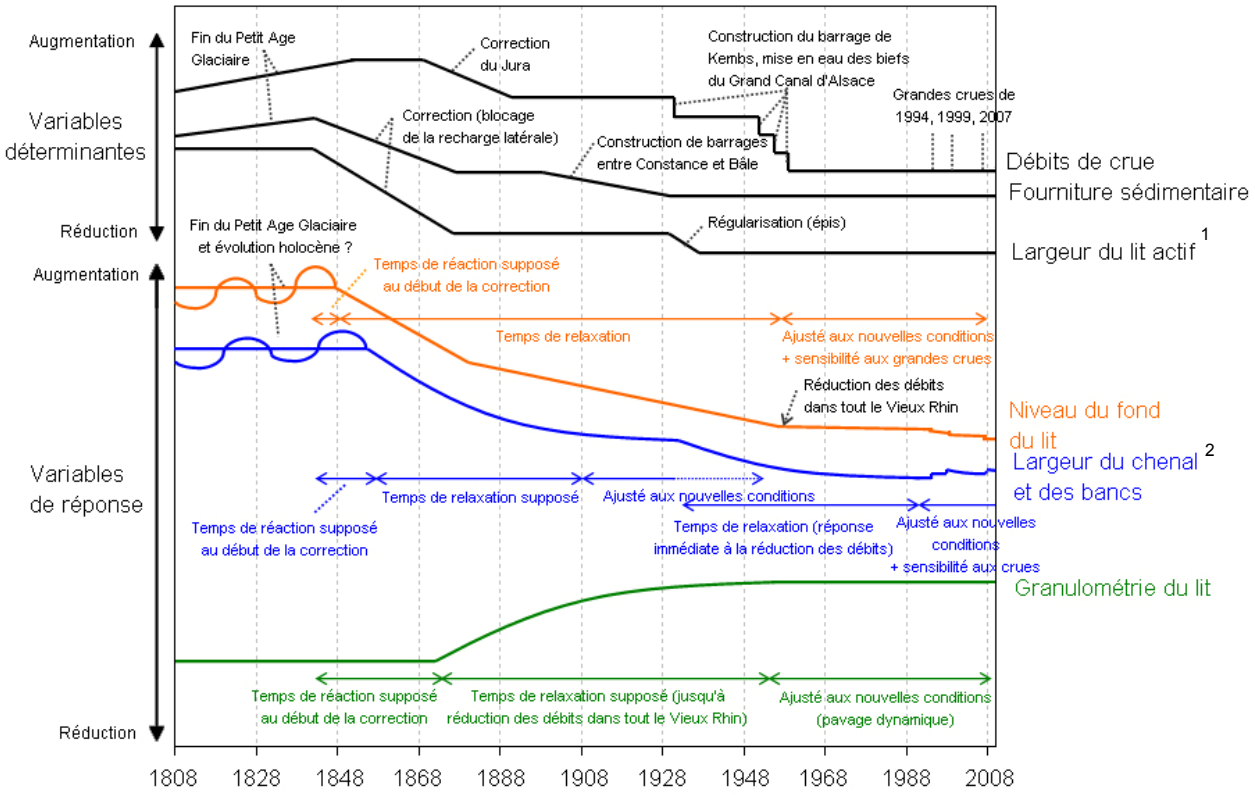
Figure 2.59 : Synthèse des ajustements morphologiques sous contrôles naturels et anthropiques mis en évidence dans ce chapitre. Les facteurs explicatifs de la mise en œuvre des aménagements ont été renseignés

Nous synthétisons à présent la chronologie des modifications des facteurs de contrôle de l'hydrosystème fluvial d'une part, et des ajustements morphologiques d'autre part, grâce au tracé de la trajectoire temporelle d'évolution.

1.4. La caractérisation de la trajectoire temporelle d'évolution du Vieux Rhin

Il apparait, au terme de ce chapitre, que **l'expression des variables déterminant la morphologie du Vieux Rhin (débits liquides, fourniture sédimentaire**, **largeur du lit actif) n'est pas stable dans le temps** (fig. 2.60). En effet, depuis le 19ème siècle, ces facteurs ont varié soit **progressivement** (ex. : augmentation supposée de la fourniture sédimentaire et des débits liquides au cours du Petit Age Glaciaire), soit **brutalement** (ex. : réduction des débits liquides avec la canalisation, diminution de la largeur du lit actif avec la régularisation). Cette variation a été dans la plupart des cas **permanente**, hormis les épisodes de crue qui constituent une variation **temporaire**. Enfin, la variation a été **monotone**, c'est-à-dire qu'elle a évolué toujours dans le même sens (diminution de la largeur du lit actif avec les différents aménagements), ou **fluctuante** (augmentation supposée de la fourniture sédimentaire et des débits liquides au Petit Age Glaciaire, puis diminution avec les différents aménagements). Ces types de variations sont explicités par Dufour (2005) et Dufour et Piégay (2009) (cf. fig. 1.14 dans le chapitre 1).

Les changements morphologiques intervenus à la suite des modifications des facteurs de contrôle permettent de dessiner une **trajectoire temporelle d'évolution complexe** (fig. 2.60) : la réponse des variables morphologiques a été **synchrone** (ex. : rétraction de la bande active après la mise en débit réservé) ou est supposée **décalée dans le temps** (incision dans le lit corrigé, réduction de la largeur totale de chenaux et de bancs dans la plaine rhénane, augmentation de la granulométrie du lit). Ces évolutions révèlent ainsi qu'un **seuil** a été atteint dans le niveau de résistance aux perturbations. Le Vieux Rhin s'est montré **sensible au changement**. Le tronçon fluvial semble à présent ajusté aux nouvelles conditions des variables de contrôle, mais il reste réactif aux crues.



[1] Le « lit actif » désigne l'espace où est concentré l'essentiel de la dynamique fluviale postérieure à un aménagement (ex. de la correction : espace intra-digues de 250 m ; ex. de la régularisation : chenal de 75 m de large où se poursuit l'incision). Cet espace est différent de la « bande active » (ici nommée « largeur du chenal et des bancs »), car à l'extérieur des digues de la correction il subsistait des chenaux en eau et quelques bancs non végétalisés ; de même après la régularisation, des échanges de sédiments se produisaient du centre du chenal vers les champs d'épis latéraux immergés. Le lit actif a été renseigné en tant que « variable déterminante » des ajustements morphologiques car il a été directement modifié par les aménagements, comme les deux autres variables de contrôle, débits de crue et fourniture sédimentaire.

[2] La « largeur du chenal et des bancs » restitue l'évolution de cette variable depuis le 19ème siècle dans le but d'indiquer une continuité dans les ajustements, bien que l'emprise étudiée soit différente au cours de la période (plaine rhénane de 3 km au 19ème siècle, espace intra-digues de 250 m au 20ème siècle).

Figure 2.60 : Représentation schématique de la trajectoire temporelle d'évolution du Rhin entre Kembs et Breisach depuis le 19ème siècle (modifié d'après Dufour et Piégay, 2009). L'amplitude des ajustements (ordonnées) est en unités relatives

2. Les implications pour la restauration du Vieux Rhin

L'hypothèse que nous avions formulée en début de chapitre, sur le pavage statique et le fait que les formes fluviales actuelles sont figées, apparait invalidée en partie à l'issue de nos analyses. Le Vieux Rhin, ajusté aux nouvelles conditions des variables de contrôle, montre en effet une dynamique morphologique, certes modeste mais réelle, caractérisée par des érosions latérales et du fond du lit, et par la construction de nouveaux bancs en réponse à des crues majeures. **Ces ajustements, encore actifs, permettent d'envisager une restauration des processus morphologiques dans le Vieux Rhin**.

L'analyse rétrospective a permis d'apporter un certain nombre d'informations quantifiées sur les réponses morphologiques aux perturbations anthropiques, notamment sur l'évolution des

différents types de chenaux avec les travaux de correction, l'homogénéisation de la section en travers avec la régularisation, la vitesse de rétraction de la bande active du fait de la réduction des débits, la granulométrie élevée du fond du lit et le déficit sédimentaire. Ces éléments consolident et complètent le diagnostic de la dégradation du tronçon établi qualitativement dans les études antérieures (Humbert et Descombes, 1985 ; Maire, 1997 ; Peiry, 2003 ; ECOTEC, 2004, 2006). Nos résultats pointent ainsi **trois principaux dysfonctionnements hydro-morphologiques actuels à l'origine de la réduction des fonctionnalités écologiques dans le Vieux Rhin** :

- **le faible transport solide**, qui altère les processus fluviaux, le renouvellement des formes et affecte la dynamique des écosystèmes aquatiques et terrestres ;
- **la faible largeur du lit actif**, qui limite les possibilités de diversification des formes et des habitats aquatiques, quand bien même les apports sédimentaires seraient augmentés ;
- **la réduction de l'amplitude des crues**, qui diminue la fréquence de remobilisation de la charge de fond, caractérisée par une granulométrie très grossière.

Il importera de concentrer les stratégies de restauration futures sur ces trois points. Les patrons longitudinaux d'évolution (cf. fig. 2.56 et 2.58) ont par ailleurs révélé que **la partie amont du Vieux Rhin (en amont du PK 198) est la plus dynamique**. C'est également sur ce secteur que la pente, et donc la capacité de transport, est la plus élevée (EDF R&D, 2009). Cela constitue des arguments pour **privilégier les interventions futures sur la partie amont, d'autant que la partie aval bénéficiera, à terme, des effets de ces actions**.

Finalement, la trajectoire temporelle d'évolution reconstituée dans ce chapitre est utile pour **aider à évaluer la sensibilité potentielle du Vieux Rhin aux futures opérations**, si elles étaient entreprises à large échelle et sur le long terme. Les hypothèses portent sur :

- *l'évolution éventuelle de chenaux secondaires restaurés* : il est évident qu'il n'existera pas de symétrie entre le temps d'ajustement des chenaux de la plaine rhénane aux pressions anthropiques du 19ème siècle, et le temps d'ajustement du Vieux Rhin actuel à des opérations de restauration. Cependant, la diversité des milieux aquatiques observée au début du 19ème siècle, et les transformations des types de chenaux mises en évidence jusqu'au début du 20ème siècle, fournissent des indications sur la réactivité de l'hydrosystème fluvial à des modifications des variables de contrôle. A une échelle réduite en comparaison de l'emprise spatiale originelle, on pourra espérer recouvrer une diversification fonctionnelle des habitats et des unités végétales aquatiques et terrestres en augmentant les apports sédimentaires et en élargissant la section fluviale, favorisant ainsi le développement de zones de dépôt, de chenaux latéraux et d'annexes hydrauliques.
- *l'évolution éventuelle de bancs nouvellement développés* : les vitesses de rétraction de la bande active ainsi que les taux de sédimentation des surfaces végétalisées obtenus dans ce chapitre peuvent aider à anticiper, selon la fréquence des évènements hydrologiques, la probable colonisation végétale et l'accrétion des formes fluviales qui seront restaurées. L'analyse diachronique de l'évolution planimétrique des bancs a également montré que les dépôts apparus au cours des vingt dernières années se sont développés majoritairement

aux points d'inflexion, en des bancs latéraux ou médians qui ont ensuite été raccordés à la berge, sans une nette migration de la charge vers l'aval.

Cependant, des inconnues demeurent quant à l'évolution future du Vieux Rhin. En effet, comment prédire le transport solide, et le développement des formes fluviales associées à ce transport, sachant que les apports sédimentaires seront potentiellement issus du lit majeur et présenteront de fait une granulométrie plus fine que le pavage en place ? Si le transit sédimentaire et la mobilité latérale sont des facteurs très importants de diversification des milieux alluviaux, quels sont les risques associés à une trop grande mobilité du lit ? Quels volumes de recharge préconiser alors, compte-tenu des risques sociétaux potentiels et des bénéfices morphologiques et écologiques visés ? Pour répondre à ces questions prospectives, nous nous trouvons face à une absence de référence dans l'évolution morphologique passée de l'hydrosystème fluvial. La nécessité de procéder à **une expérimentation sur un site-pilote du Vieux Rhin**, et d'en évaluer les effets grâce à un suivi géomorphologique, apparait clairement dans ce contexte. C'est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 3

Géomorphologie expérimentale - Suivi géomorphologique de l'expérience de recharge sédimentaire du Vieux Rhin

Un test de recharge sédimentaire a été conduit dans le chenal du Vieux Rhin, dans le but de déterminer la sensibilité du tronçon à ce type d'opération et ainsi évaluer la faisabilité d'une restauration des processus morpho-écologiques à grande échelle et sur le moyen à long terme. L'enjeu est de pouvoir comprendre les modes (bancs mobiles, engraissement de banc existant, nappage du fond…) et les caractéristiques (taille des sédiments mobilisés, vitesses…) de propagation de la charge artificiellement introduite. Le suivi permet également de calibrer les modèles hydrauliques développés dans le projet INTERREG, ces derniers devant servir à élaborer des scénarios de restauration. Ce chapitre débute ainsi par un état de l'art des opérations de recharge sédimentaire et des suivis déjà menés à travers le monde. Puis, les modalités de mise en œuvre de la recharge expérimentale et du suivi géomorphologique sont présentées. Les résultats du suivi permettent de discuter la pertinence du choix de l'action, à travers l'analyse des effets morphologiques induits, des risques environnementaux et des premiers gains écologiques observés. Au terme de cette réflexion, des indicateurs sont proposés dans une perspective d'évaluation de la restauration du Vieux Rhin sur le long terme.

A/ Eléments bibliographiques sur les recharges sédimentaires et leurs suivis scientifiques

1. Des exemples d'opérations de recharge sédimentaire

La recharge sédimentaire par injection artificielle de charge grossière représente un moyen de limiter les effets écologiques et économiques induits par un transport solide très déficitaire, à la suite notamment de l'interruption du transit par des barrages ou d'extractions sévères de granulats. Ces effets se traduisent le plus souvent par une incision du lit, conduisant à la dégradation des habitats piscicoles et à la fragilisation des ouvrages implantés en lit mineur (Kondolf et Matthews, 1993 ; Rollet, 2007).

Cette pratique de restauration, de plus en plus courante, a été développée à la fin des années 1960 en Californie, où les enjeux écologiques et économiques sont particulièrement forts du fait d'importantes populations de salmonidés présentes dans ces cours d'eau et de la pêche commerciale qui en dépend dans le Pacifique (Rollet, 2007 ; Gaeuman, 2012). Les principaux objectifs sont de réduire la taille du substrat (*bed fining*) pour améliorer la qualité des frayères, augmenter la mobilité sédimentaire pour faciliter le lessivage des fines des couches de surface et de subsurface, et reconstruire une topographie de radiers et de mouilles afin de diversifier les habitats (Sklar *et al.*, 2009). Environ 380 000 m^3 de graviers ont ainsi été introduits dans la Trinity River et dans les rivières de la Central Valley (bassins de la Sacramento River et de la San Joaquin River) entre 1968 et 2004, à travers 114 projets (Kondolf *et al.*, 2005). Les données disponibles pour la moitié des projets recensés permettent d'estimer le coût de ces actions à 9,8 millions de dollars pour l'achat, le transport et l'injection des sédiments (Kondolf *et al.*, 2005).

La recharge sédimentaire n'a pas uniquement une portée écologique. Ainsi, sur le Rhin en aval d'Iffezheim (dixième et dernier barrage de la chaîne hydro-électrique du Rhin supérieur, construit en 1977), l'objectif des recharges est de stabiliser le fond du lit en cours d'incision afin d'assurer la sécurité des infrastructures (piles de pont, écluses…) et la navigabilité du tronçon fluvial (tirant d'eau constant) (Kuhl, 1992). La recharge constitue ici une alternative à la construction d'un onzième barrage, qui aurait stoppé l'incision au droit d'Iffezheim mais l'aurait reporté en aval. Depuis 1978, environ 170 000 m^3 de graviers sont injectés annuellement, ce qui représentait en 2003 un volume total de 4 508 782 m^3 et un coût moyen de 3,96 millions d'euros/an, soit un coût total de 99 millions d'euros sur 25 ans (WSA, 2003). Il s'agit du plus important programme de recharge sédimentaire au monde (Kondolf *et al.*, 2005).

La granulométrie injectée en aval du barrage d'Iffezheim est proche de celle du lit naturel (0-63 mm). Les sédiments sont déversés en bandes successives d'environ 10 m de large et 25 cm d'épaisseur sur le fond depuis des barges à clapets. L'opération est assistée par un bateau de sondages bathymétriques qui lève des profils en travers après chaque clapage afin de déterminer l'emplacement de la bande suivante (WSA, 2003 ; CHR, 2009) (fig. 3.1).

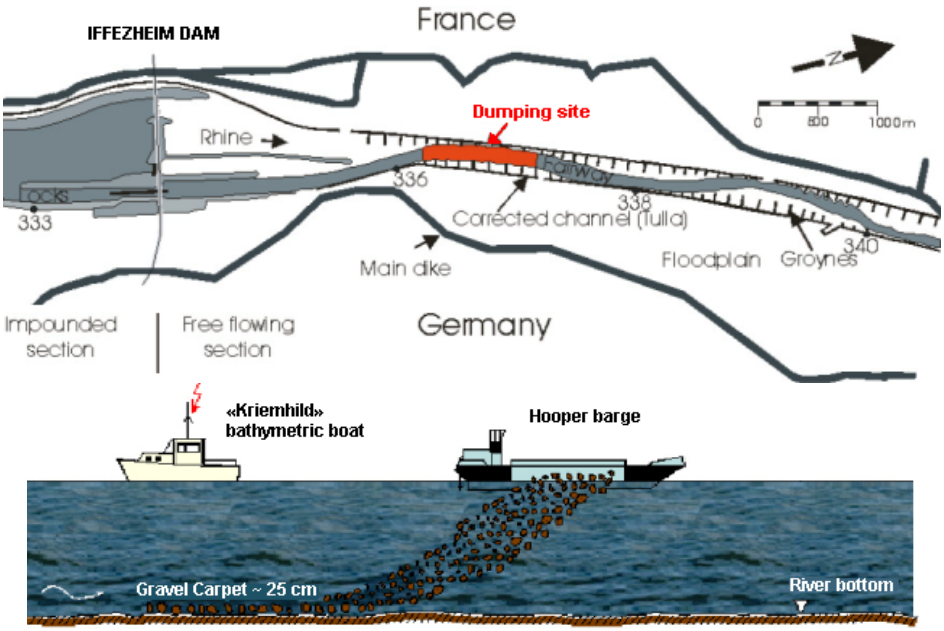


Figure 3.1 : Procédé de recharge sédimentaire en aval du barrage d'Iffezheim (d'après CHR, 2009)

Une opération similaire est actuellement expérimentée sur les secteurs en incision du Danube. Dans ce cas là, le lit est stabilisé par l'ajout de sédiments plus grossiers (*granulometric bed improvement* ; Jungwirth, 2008). Il est prévu d'injecter, à terme, 2,2 millions de m^3 de graviers compris entre 40 et 70 mm de diamètre (D_m = 52 mm) sous la forme d'un tapis de 25 cm d'épaisseur sur le fond du lit (D_m = 26 mm). La couche grossière ainsi formée (D_m = 39 mm) devrait permettre de réduire l'enfoncement de 90 %, les 10 % restants (40 000 m^3) devant être compensés par une injection annuelle (Hengl *et al.*, 2009) (fig. 3.2).

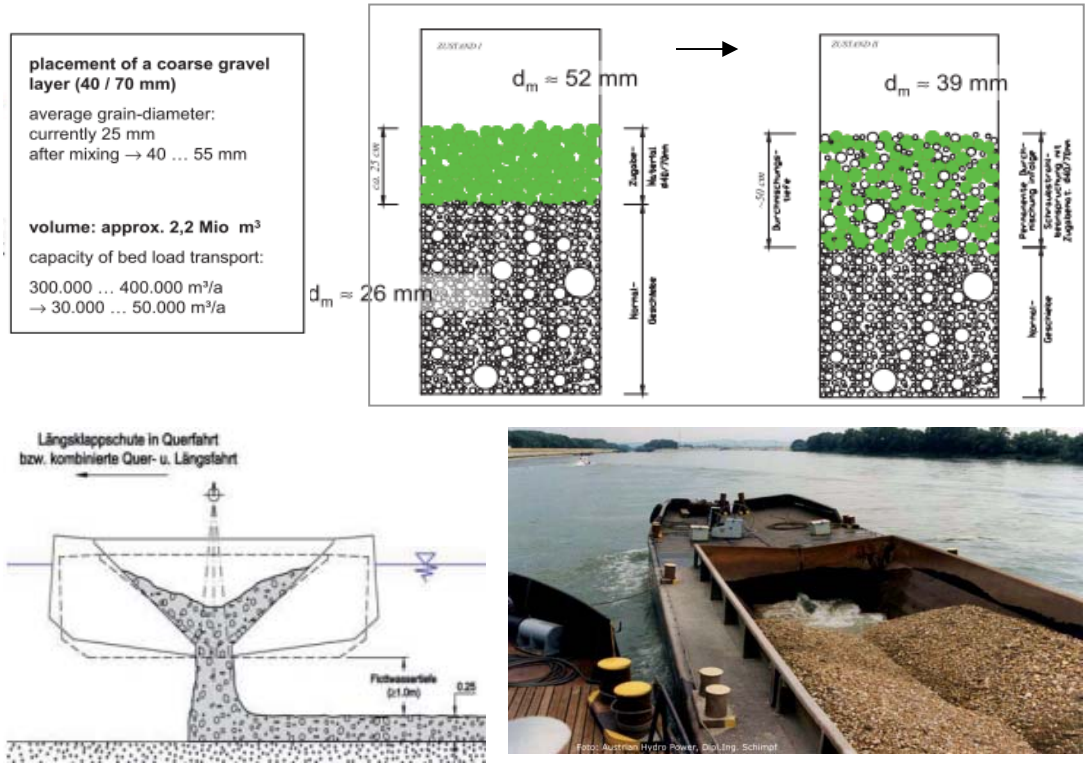


Figure 3.2 : Procédé d'introduction de sédiments grossiers dans le cadre du projet d'aménagement intégré du Danube en aval de Vienne (*granulometric bed improvement)* (d'après Jungwirth, 2008)

La Meuse mitoyenne (fleuve-frontière entre la Belgique et les Pays-Bas) fait également l'objet de recharges sédimentaires dans le cadre d'une gestion intégrée permettant de satisfaire à des objectifs de protection contre les inondations et de restauration écologique : depuis 2007, environ 500 000 m^3 de tout-venant extrait d'élargissements du lit mineur entrepris afin de lutter contre les inondations ont été déposés sur les radiers, dans le but de stopper l'incision et diversifier le fond du lit au droit des sites et en aval (Van Looy, 2006, 2012).

De très nombreuses recharges sédimentaires d'ampleur diverse ont finalement été réalisées sur d'autres tronçons fluviaux aménagés. 10 000 m^3 et 12 000 m^3 de graviers ont par exemple été injectés récemment dans l'Aar, afin de pallier à un déficit d'environ 20 000 m^3/an en aval de barrages (fig. 3.3, a) (Schälchli *et al.*, 2010). La basse vallée de l'Ain a également fait l'objet de plusieurs interventions, dans le but de prévenir la progression d'un déficit sédimentaire de 15 000 m^3/an et ses effets sur le profil en long et sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques et riverains ; depuis 2005, 94 600 m^3 de graviers ont ainsi été introduits dans l'ensemble de la basse vallée (Rollet *et al.*, accepté ; Morandi, 2010). Enfin, sur la Mur (Autriche), une expérimentation consistant à coupler la suppression des protections de berges et la remise en eau d'une annexe hydraulique a été conduite en 2006, sur un tronçon pilote de 1 km. Dans ce cas là, l'injection artificielle des déblais excavés lors de la restauration de l'annexe vient compléter la recharge naturelle induite par les érosions latérales (Kloesch *et al.*, 2008) (fig. 3.3, b).

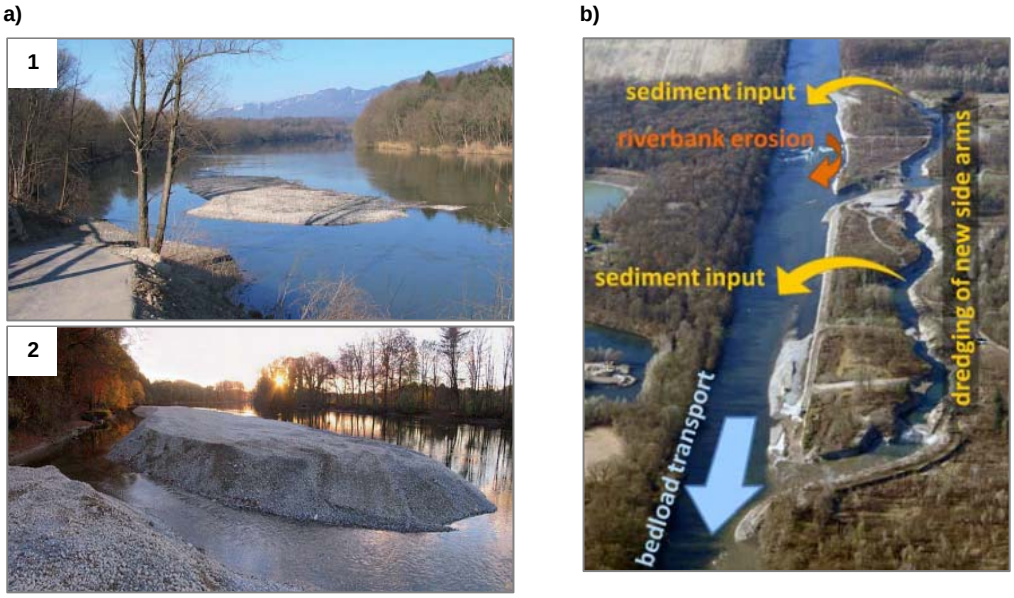


Figure 3.3 : a) Recharge sédimentaire de l'Aar : 12 000 m^3 (canton de Soleure, janvier 2005) (1) et 10 000 m^3 (canton de Berne, novembre 2005) (2) (Schälchli *et al.*, 2010). b) Recharge sédimentaire de la Mur par injection artificielle et érosion latérale (Kloesch *et al.*, 2008)

Malgré l'augmentation des retours d'expérience, la recharge sédimentaire reste une action empirique qui est associée à un grand nombre d'incertitudes. Plusieurs questions se posent en amont de ce type d'opération (Krause et Mc Bain, 2003, cités par Bunte, 2004 et Lejot, 2008 ; Harvey *et al.*, 2005 ; Adam *et al.*, 2007, Gaeuman, 2012) :

- Quelle gamme granulométrique optimale introduire ?

- Où prélever les sédiments ?
- Quelle quantité de sédiments est nécessaire pour entrevoir des effets morphologiques sur le long terme ?
- Comment estimer le comportement des sédiments introduits en fonction des faciès impactés ? Plus généralement, comment choisir le site de recharge le plus approprié ?
- Quelle est la durabilité de l'action ?
- Quelle sont les techniques de recharge les plus appropriées ?
- Quelle est la période la plus favorable pour entreprendre la recharge ?
- Quelle est la précision des modèles pour anticiper les réponses morphologiques et écologiques du tronçon fluvial restauré ?

L'ensemble de ces questionnements souligne l'importance de mettre en place des **programmes de suivi et d'évaluation**, de manière à identifier les déficits encore existants et améliorer les actions futures, selon une logique adaptative (Woolsey *et al.*, 2005).

2. Le suivi scientifique des recharges sédimentaires

Des « structures » thématiques, spatiales et temporelles bien définies constituent l'ossature d'une démarche de suivi (Morandi, 2010 ; Morandi et Piégay, 2012).

2.1. Définition des structures de suivi

Les milieux **biotiques** et **abiotiques** sont les deux **compartiments thématiques** généralement intégrés au suivi et à l'évaluation d'une opération de restauration. Par exemple, le suivi scientifique accompagnant le programme d'aménagement du Danube est structuré en quatre à cinq volets relatifs à ces deux compartiments (fig. 3.4) : le dispositif prend en compte les effets de corrélation et de rétroaction entre les variables, dans le but d'optimiser l'élaboration de modèles prédictifs de la réponse des écosystèmes (Schabuss *et al.*, 2008).

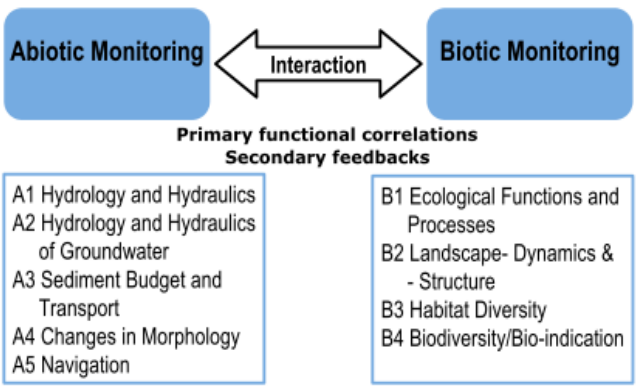


Figure 3.4 : Structure thématique du programme de suivi accompagnant le projet d'aménagement intégré du Danube en aval de Vienne (Schabuss *et al.*, 2008)

Les structures spatiales et temporelles d'un suivi constituent les deux autres pivots de la démarche. Celles-ci font référence au nombre de sites ou de stations et à leur localisation, ainsi qu'à la durée et à la fréquence des mesures (ponctuelles, continues, discontinues régulières ou irrégulières) (Morandi et Piégay, 2012).

La **structure temporelle** de suivi la plus fréquemment rencontrée suit une logique **« avant-après »** (*Before-After*, Green, 1979, cité par Roni, 2005). Elle consiste, littéralement, à caractériser et comparer l'état du site pré- et post-intervention. Récemment, une analyse des opérations de restauration conduites en France depuis les années 1990 (Morandi et Piégay, 2012) a révélé que l'évaluation s'appuie dans la majorité des cas sur la caractérisation d'un état avant travaux, et bien souvent sur seulement un ou deux états après, en années 1 et 2. Seulement 10 % des projets sont évalués pendant plus de quatre ans, avec quelques exceptions dépassant dix ans (cas des restaurations du Rhône et du Drugeon). En terme de fréquence, certains guides opérationnels (Adam *et al.*, 2007) préconisent un suivi morphologique discontinu et régulier de trois ans, avec une campagne supplémentaire si une crue supérieure au Q_5 survient durant l'intervalle. Les structures temporelles plus denses sont rares : seulement 13 % des suivis hydro-morphologiques recensés comportent plusieurs campagnes annuelles (Morandi et Piégay, 2012). Le manque de moyens financiers et humains, ainsi que les contraintes métrologiques, conditionnent le plus souvent la fréquence temporelle des mesures (Bash et Ryan, 2002 ; Kondolf *et al.*, 2007 ; Roni et Beechie, 2012).

Il est possible de compléter la logique « avant-après » par un suivi reposant sur une **logique spatiale « contrôle-impact »** (*Control-Impact*), qui consiste à évaluer un site de contrôle en même temps que le site restauré (*i.e. impacté*). L'intérêt de ce site témoin est d'aider à différencier les effets directement liés à l'action de restauration, de ceux liés à la variabilité naturelle (Smith *et al.*, 1993, cités par Roni, 2005). Cependant, ce type de suivi est encore peu appliqué : en France, il ne concerne que 30 % des projets recensés (Morandi et Piégay, 2012). Au-delà des contraintes financières, ce manque pourrait trouver son explication dans la question complexe du **référentiel**. En effet, que la référence soit « d'écart », c'est-à-dire un site de contrôle non restauré et dégradé duquel s'éloigner, ou « d'objectif », c'est-à-dire un site de contrôle non dégradé représentant l'état optimal à atteindre (Morandi et Piégay, 2012), il est souvent difficile de sélectionner des sites analogues en termes de géologie, de climat, de position dans le bassin versant, de pressions anthropiques et de fonctionnement hydro-morphologique et écologique (Palmer *et al.*, 2005). Par conséquent, les sites de contrôle sont le plus souvent choisis à proximité du secteur à restaurer, en amont ou en aval. Cette localisation implique cependant que les sites subissent eux aussi, à terme, les effets de la restauration (Morandi, 2010).

Les paramètres et les techniques mobilisables pour évaluer les effets d'une recharge sédimentaire sont extrêmement diverses, et dépendent des objectifs du projet. Dans le cas de l'expérimentation conduite sur le Vieux Rhin, les risques potentiels associés à la propagation vers l'aval de la charge artificiellement introduite (reprise de l'incision du lit, modification des conditions d'écoulement et aggravation des inondations…) ont conduit à concentrer le suivi sur le **compartiment géomorphologique** ; le suivi du compartiment écologique étant planifié ultérieurement. Le

paragraphe suivant dresse un aperçu des méthodes couramment utilisées pour le suivi géomorphologique d'opérations de recharge sédimentaire.

2.2. Exemples de suivis géomorphologiques de recharges sédimentaires

Bunte (2004) et Kondolf et Minear (2004) suggèrent de **concentrer le suivi sur les paramètres physiques directement influencés par l'opération de recharge**, à savoir **la granulométrie du substrat, la géométrie du lit et les conditions d'habitat (surfaces de frai piscicole notamment)**. Par ailleurs, les auteurs indiquent qu'une recharge sédimentaire n'a pas seulement une finalité écologique, elle offre également l'opportunité de collecter des données empiriques sur **le transport solide**, ce qui est fondamental pour valider les modèles, construire des bilans sédimentaires et définir des plans de gestion. Un aperçu des questions posées selon les quatre thématiques précédemment citées, et des méthodes et paramètres permettant de répondre à ces questionnements, est donné dans le tableau 3.1 (Bunte, 2004).

Théma-tique	Questions posées	Paramètres	Méthodes de mesure
Substrat	- La distribution de la nouvelle granulométrie est-elle adaptée au frai ?	Distribution granulométrique de la surface	Comptage de particules
Géométrie	- L'inondation du lit majeur commence-t-elle au débit de plein bord ? - Le lit s'incise-t-il ou s'exhausse-t-il localement ? - Le profil en long est-il celui prédit par les modèles ? - Les sédiments sont-ils stockés dans un tronçon auparavant en déficit sédimentaire ? - La création d'habitats tronque-t-elle d'autres habitats ?	Profil en travers Profil en long	Topographie
Conditions d'habitat	- Le nombre et la taille des radiers et des bancs ont-ils augmenté ? - Des processus indésirables se développent-ils, par exemple une instabilité des berges ou un comblement des mouilles ? - Les aires potentielles de frai augmentent-elles et sont-elles aussi étendues que prévues ? - D'autres habitats augmentent-ils (abri, nourriture…) ?	Superficie des unités géomorphologiques et sédimentaires	Topographie, cartographie de terrain, imagerie aérienne
Transport solide	- Quelles sont les profondeurs d'érosion du fond au débit de plein bord ?	Répartition des volumes sédimentaires : érosion / dépôt	Topographie, cartographie de terrain, imagerie aérienne / LIDAR, chaînes d'érosion
	- Quelle est la distance parcourue par le sédiment injecté ? - Le gravier est-il resté sur le site d'injection ou a-t-il été exporté vers l'aval ? - Quels sont les bénéfices sur les aires potentielles de frai en aval ?	Distances de déplacement	Traceurs radio
	- Le gravier est-il mobile au débit de plein bord ? - Les conditions de débit des aires de frai sont-elles adaptées ? - D'autres aires potentielles d'habitat ont-elles des conditions adaptées pour remplir leurs fonctions ? - Les conditions de débit sont-elles celles prédites par les modèles ?	Débit d'entrainement des particules / hydraulique	Profils en travers, traceurs peints
	- Les modèles prédisent-ils correctement les volumes de transport ?	Transport solide annuel	Prélèvements volumétriques, formules

Tableau 3.1 : Questions posées, paramètres et méthodes couramment employés pour le suivi d'une recharge sédimentaire (d'après Bunte, 2004)

Le couplage des méthodes de mesure, en particulier pour quantifier les modes de transport de la charge artificiellement introduite, a fait ses preuves dans de nombreux programmes d'évaluation. Les recharges sédimentaires de l'Ain ont par exemple été suivies par imagerie à très haute

résolution spatiale associée à des relevés topographiques de terrain. Ces données ont permis de générer des modèles bathymétriques et d'extraire de ces modèles un certain nombre d'indicateurs (répartition des masses d'eau pour un même débit, évolution de la largeur du chenal…) aidant à mieux comprendre les différents processus impliqués dans le transfert de la charge (tableau 3.2) (Lejot, 2008).

Question posée	Processus évalué	Secteur concerné	Indicateur	Paramètre
Quel est l'impact de la recharge sur les substratums rocheux de fond de chenal ?	Déficit sédimentaire	Chenal	Présence et évolution de dalles et affleurements rocheux	Superficie
Quel est l'impact de la recharge sur la topographie du lit mouillé ?	Incision / exhaussement	Chenal	Evolution des hauteurs d'eau pour un même débit	Bathymétrie
Quelles sont les distances de déplacement ?	Mobilité sédimentaire	Chenal	Répartition des masses d'eau pour un même débit	Bathymétrie
La recharge a-t-elle un impact sur la répartition des écoulements ?	Elargissement / rétraction	Chenal	Evolution de la largeur du chenal	Superficie
La recharge permet-elle la création de nouveaux bancs ?	Erosion / engraissement	Bancs de galets	Présence et évolution des bancs de galets	Superficie

Tableau 3.2 : Questions posées, indicateurs et paramètres associés au suivi des recharges sédimentaires de l'Ain (d'après Lejot, 2008)

La mobilité des matériaux grossiers injectés dans le Danube a quant à elle été mesurée à l'aide de traceurs radio, à une fréquence hebdomadaire pendant un an. Le dispositif a été couplé à des géophones et des pièges à sédiments (Liedermann *et al.*, 2011). Sur la Mur, le suivi s'est également basé sur des traceurs radio insérés dans des particules artificielles, ainsi que sur des pièges à sédiments, des relevés bathymétriques et topographiques, un enregistrement vidéo et des mesures tensiométriques et piézométriques des berges (Kloesch *et al.*, 2008). Enfin, sur le Rhin en aval du barrage d'Iffezheim, une expérience de traçage a été conduite en 1996 afin de mieux comprendre le transport des sédiments et ainsi optimiser les modalités de recharge (BFG et WSA Freiburg 2006, cités par CHR, 2009) : 28 000 m^3 de matériaux exogènes, de couleur, structure et forme facilement identifiables parmi les sédiments naturels, ont été déversés dans le Rhin. Des carottages dans le lit jusqu'à 1,5 m de profondeur ont ensuite été réalisés au cours de six campagnes entre 1996 et 2001, afin de déterminer la position des traceurs. L'expérience a révélé des vitesses de déplacement comprises entre 2 et 6 km par an (BFG et WSA Freiburg 2006, cités par CHR, 2009).

Davantage d'informations sur les techniques de mesure listées dans le tableau 3.1, ainsi que sur la variété d'autres méthodes couramment employées en géomorphologie fluviale et pouvant être transposées au suivi d'une expérience de recharge sédimentaire, seront trouvées dans les synthèses de Harrelson *et al.* (1994), Edwards et Glysson (1999), Bunte et Abt (2001) et Kondolf et Piégay (2003).

B/ L'expérience de recharge sédimentaire du Vieux Rhin

1. Les enjeux et les questionnements de la recharge expérimentale

La multitude de risques potentiels associés à la manipulation du compartiment physique et identifiés par les gestionnaires du Rhin en amont des actions de restauration forme un cadre de réflexion complexe. Ces risques concernent la sécurité des personnes (compatibilité de l'introduction artificielle de sédiments avec le fonctionnement des casiers de rétention des crues en cours de construction dans le projet IRP), la protection des berges et des ouvrages existants (ponts, barrage de Breisach…), la stabilité du fond du lit :

- *risque d'élévation de la ligne d'eau* si le sédiment injecté n'était pas mis en mouvement, ce qui serait défavorable à la croissance végétale dans les casiers de rétention IRP, la végétation étant un élément indispensable au principe du ralentissement dynamique des crues ;
- *risque de végétalisation du sédiment injecté*, ce qui limiterait encore davantage sa remobilisation ;
- *risque de déstabilisation du pavage* et reprise éventuelle de l'incision du lit ;
- *risque de sapement des berges ;*
- *risque d'altération des habitats et espèces Natura 2000 identifiés en rive allemande ;*
- *risque de transfert vers l'aval trop rapide et de mise en danger des ouvrages existants.*

L'intérêt d'une expérimentation « grandeur nature » a vu le jour dans ce contexte. L'action consiste à tester des modalités de recharge (granulométrie des sédiments introduits, volume introduit…) et éprouver des modes d'évaluation des effets de cette recharge (fréquence temporelle du suivi, choix des méthodes de mesure…) à petite échelle, pour pouvoir envisager, selon les résultats du suivi, la définition d'un programme de restauration à grande échelle et sur le long terme. L'enjeu de l'expérimentation est donc double. Il s'agit de (1) **mener une analyse des risques encourus**, afin d'évaluer la faisabilité d'actions de plus grande ampleur, (2) **mettre au point des méthodes permettant de mesurer les changements morphologiques et les gains écologiques**. Ces enjeux se déclinent en plusieurs questions scientifiques, auxquelles le suivi tentera de répondre (tableau 3.3).

	Thématique	Questions posées
Risques environnementaux	Elévation de la ligne d'eau (compatibilité avec les casiers IRP)	Quel est l'impact de la recharge sur les conditions d'écoulement du tronçon ? Y aura-t-il des crues morphogènes ?
	Végétalisation du dépôt (compatibilité avec les casiers IRP)	Le sédiment injecté sera-t-il végétalisé ?
	Transfert rapide vers l'aval et mise en danger des ouvrages	Quelles sont les distances de déplacement ?
	Sapements de berges, altération des milieux riverains	Quelles sont les trajectoires de déplacement ?
	Déstabilisation du pavage	Quel est l'impact de la recharge sur le fond du lit (reprise de l'incision) ?
Gains morpho-écologiques	Substrat	La recharge permet-elle une diversification et un affinement du substrat ?
	Géométrie du lit	La recharge permet-elle un mobilité du fond du lit et une diversification des méso-habitats ?

Tableau 3.3 : Questions scientifiques posées en amont de l'expérience de recharge sédimentaire du Vieux Rhin

2. La mise en œuvre de la recharge expérimentale

La phase préliminaire de l'expérimentation (2009-2010) a consisté à apporter des éléments de réponse aux questions listées en A/1. L'étude de faisabilité a été confiée à la société SOGREAH Consultants, en collaboration avec les partenaires du projet INTERREG.

Quelle granulométrie introduire ? Où prélever les sédiments ?

Les principaux enjeux de l'expérimentation engagée sur le Vieux Rhin étant (i) de recharger le chenal en matériaux plus fins que le pavage en place, (ii) d'étudier les mécanismes de transport de sédiments pouvant provenir dans le futur d'érosions latérales, il convient donc d'**injecter une granulométrie la plus représentative des matériaux des berges**. Pour ce faire, l'expérimentation a été réalisée en collaboration avec le projet IRP. Le décaissement de la rive droite présentait en effet les avantages de mettre à disposition des sédiments situés à proximité immédiate du chenal, représentatifs des alluvions naturelles, et de constituer une source durable pour d'éventuelles recharges futures. Les sédiments ont été prélevés dans la **zone d'excavation du casier n° 3**, dont le chantier a démarré en 2010 en amont du PK 182,5. Le matériau a été injecté **sans tri préalable**. Des sondages granulométriques effectués sur le site avant les travaux (Dittrich *et al.*, 2010) avaient révélé une distribution verticale relativement homogène : le D_{50} est compris **entre 12 et 46 mm** de 1,06 à 10,11 m de profondeur. Seul un horizon à 6,06 m présente une granulométrie beaucoup plus grossière (D_{50} de 112 mm) (fig. 3.5).

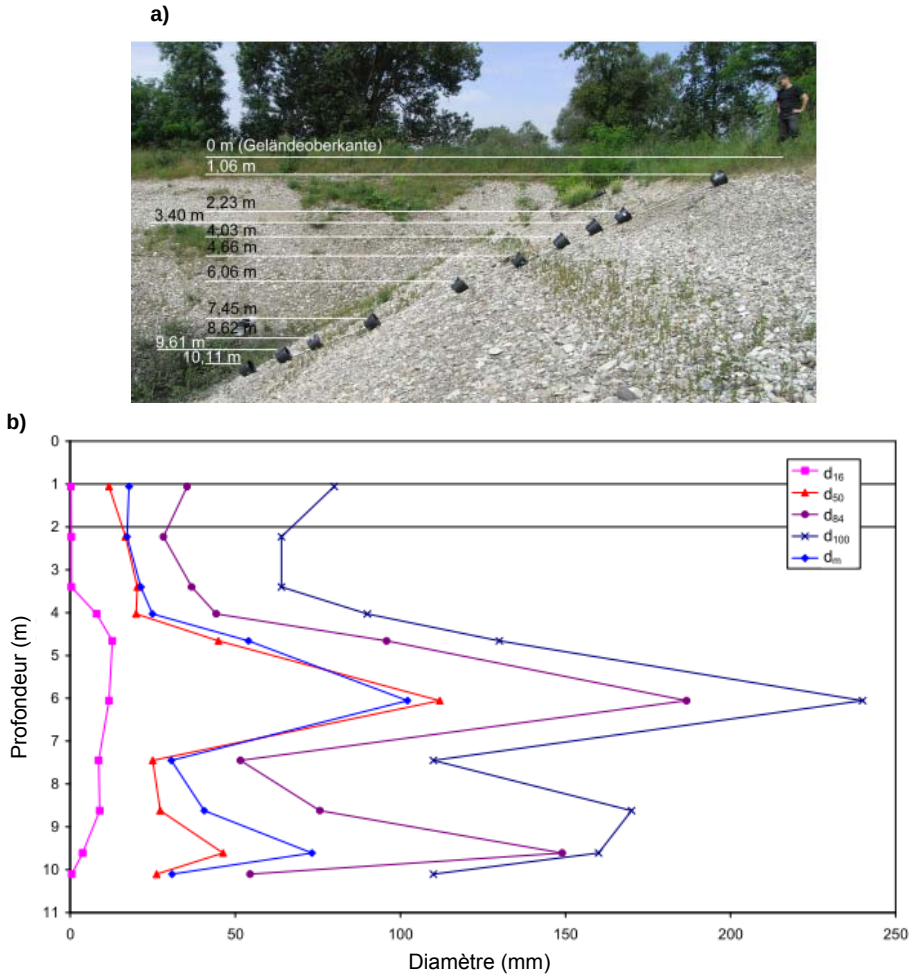


Figure 3.5 : a) Sondages granulométriques effectués à dix profondeurs différentes dans la zone d'excavation avant les travaux. b) Distribution granulométrique des dix sondages (d'après Dittrich *et al.*, 2010)

Quel volume introduire ? Quel est le site de recharge le plus approprié ? Quelle est la durabilité de l'action ?

Le volume de sédiments à introduire a été déterminé de manière à ce que la charge puisse être mise en mouvement lors de crues fréquentes (entre Q_1 et Q_5), mais sans être exportée vers l'aval trop rapidement de façon à voir apparaitre de nouvelles formes fluviales. Pour ces raisons, il a été choisi d'injecter au minimum une fois le transport solide annuel, soit **23 000 m^3** (capacité de transport annuelle estimée par EDF R&D, 2009).

La brèche d'évacuation hydraulique au PK 182,41 a été utilisée comme rampe d'accès pour le transport des sédiments de la zone d'excavation vers le chenal, afin de minimiser les coûts de transport ainsi que l'impact environnemental des travaux. Cette portion du Vieux Rhin s'est en outre avérée intéressante pour mener l'expérience car les conditions morpho-dynamiques y sont relativement homogènes, ce qui garantit l'acquisition de données de terrain stables pour calibrer les modèles. Par ailleurs, ce site est localisé dans la partie amont du Vieux Rhin (7 km en aval du barrage de Kembs), la charge artificiellement introduite devrait ainsi résider assez longtemps dans le tronçon et faire bénéficier, à terme, les secteurs en aval.

Quelles la technique de recharge la plus appropriée ? Quelle est la période d'intervention la plus favorable ?

Les sédiments ont été introduits sous la forme d'un **dépôt unique, étroit et allongé, déconnecté de la rive allemande** (fig. 3.6, a). Les simulations effectuées par SOGREAH Consultants et par l'IRSTEA ont en effet montré que cette configuration supprimait *a priori* le risque de formation de courants secondaires et de sapements de berges en rive droite, tout en favorisant la reprise des matériaux du côté du chenal, sans risque d'incision du fond du lit car la section n'est pas beaucoup rétrécie. De plus, l'incidence sur la ligne d'eau respecterait la tolérance de 10 cm imposée par le projet IRP, afin de ne pas contrarier la croissance végétale dans le casier en amont.

Le dépôt injecté est de forme trapézoïdale, de **620 m de long, 11 à 15 m de large, 2 à 3 m de haut,** dont 1 m émergeanu au-dessus de la ligne d'eau en débit réservé pour éviter la végétalisation si aucune crue n'était enregistrée avant la fin de la première période végétative (fig. 3.6, a). Une largeur de 2 m a été respectée entre le dépôt et la rive allemande. La rampe d'accès au dépôt a été retirée à la fin des travaux, de manière à déconnecter complètement le dépôt de la berge.

Compte-tenu des hautes eaux estivales (juin et juillet) et des contraintes environnementales saisonnières (reproduction piscicole entre novembre et juin), la période d'intervention idéale se situe entre août et octobre. La demande d'autorisation a été acceptée au premier semestre 2010, et les travaux ont été réalisés en **octobre 2010** par l'entreprise Vinci Construction, sous la maitrise d'œuvre du bureau d'études Sinbio. Le chantier a duré trois semaines (fig. 3.6., b).

Les effets morphologiques de l'expérience ont été mesurés au cours d'un suivi géomorphologique combinant quatre types de mesures complémentaires (**imagerie aérienne, mesures topographiques et bathymétriques, traçage sédimentaire, granulométrie du substrat**). Le paragraphe suivant décrit le dispositif.

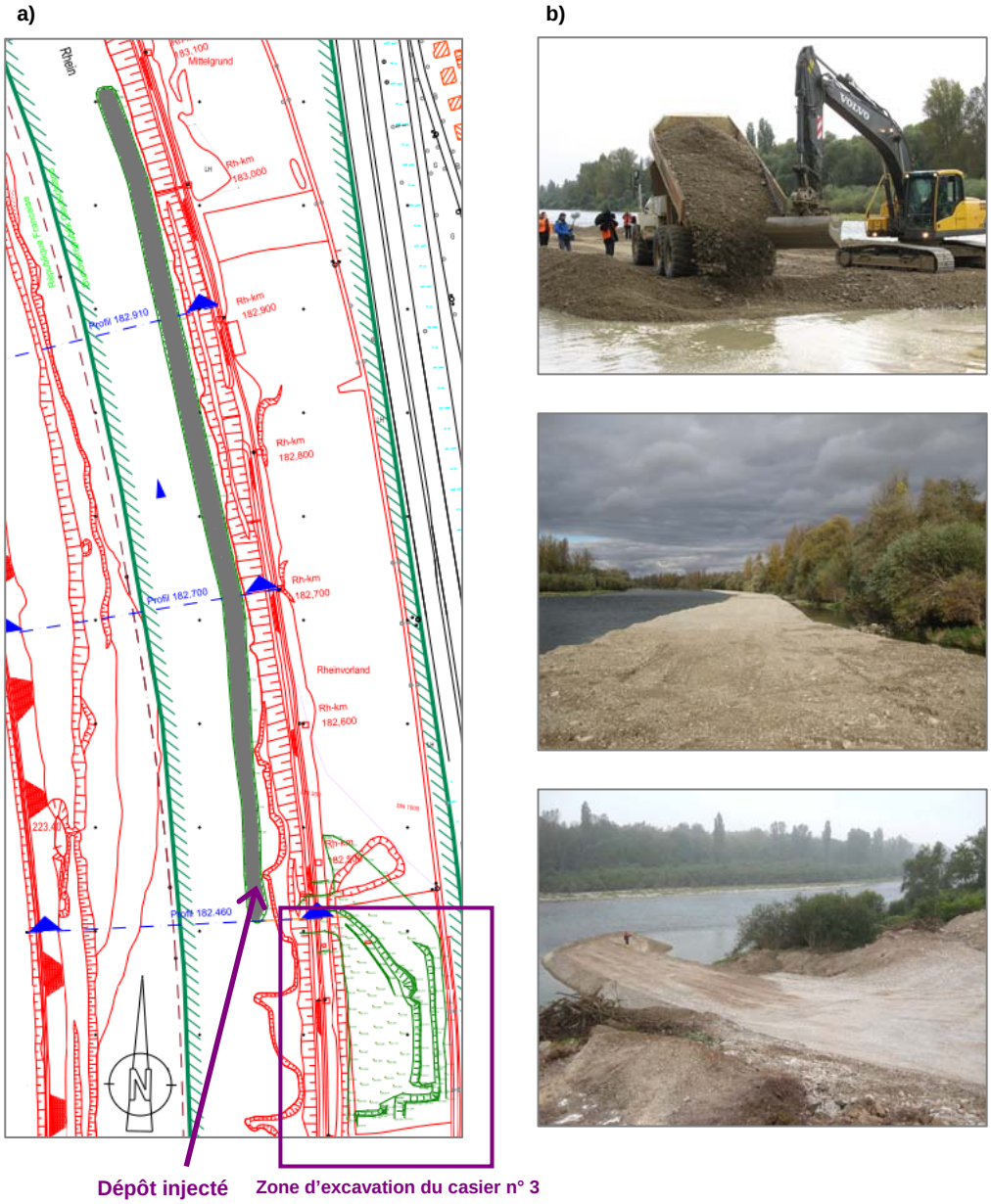


Figure 3.6 : a) Extrait du plan de recollement de Vinci Construction indiquant la position du dépôt injecté (04/11/10). Les sédiments ont été introduits entre les PK 182,46 et 183,08. b) Vues du chantier (clichés F. Arnaud, 2010)

3. La mise en œuvre du suivi géomorphologique

3.1. La structure thématique du suivi et les objectifs

Les effets morphologiques de l'expérience de recharge sédimentaire ont été évalués à travers trois thématiques principales : **l'évolution de la géométrie du lit, le transport de la charge introduite et les changements granulométriques du substrat**. Ces trois thématiques, ainsi que les méthodes mobilisées au sein de chacune d'elles, permettent de répondre à des objectifs complémentaires (fig. 3.7).

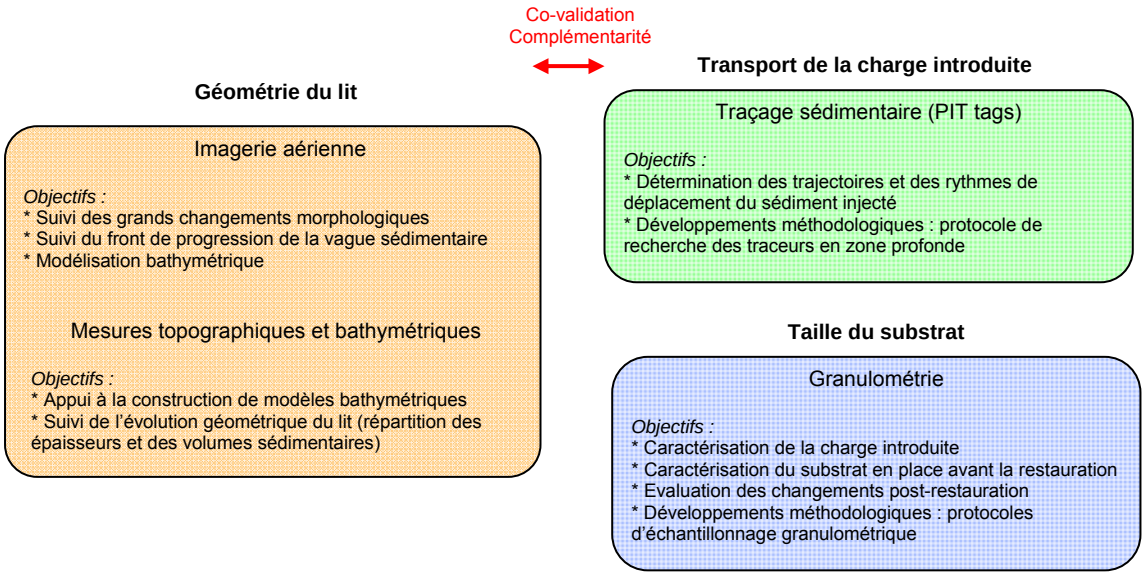


Figure 3.7 : Structure thématique et objectifs du suivi géomorphologique

L'**imagerie aérienne** constitue une première source d'informations pour **identifier les grands changements morphologiques** (disparition et apparition de bancs, mobilité des seuils…) et pour **détecter le front de progression de la vague sédimentaire**. Les images servent également à construire des **modèles bathymétriques**, par analyse de la valeur radiométrique des pixels et extraction des profondeurs.

Les **levés bathymétriques** permettent de **calibrer les modèles** précédemment cités. Couplés à la **topographie des berges**, ils restituent finement les **changements de géométrie du lit**, par analyse de la répartition des épaisseurs et des volumes déposés et érodés entre deux états.

Le **traçage par transpondeurs passifs (PIT tags)** permet de **déterminer les trajectoires spatiales et les rythmes temporels de déplacement du sédiment injecté**. La technique a pour objectifs de compléter les observations déduites des deux précédentes méthodes. L'acquisition de ces données de transport solide aide en outre à évaluer les risques hydrauliques associés à la recharge, ainsi que la durabilité de l'action. L'enjeu associé au suivi des transpondeurs passifs est également **méthodologique,** puisque le Vieux Rhin constitue un cas nouveau pour la mise en œuvre de cette technique, qu'il s'agisse de l'environnement considéré (chenal de 100 m de large, 80 % du site en zone profonde), du cadre d'application (évaluation d'une action de restauration), ou encore de l'ampleur de l'expérience (1494 traceurs déployés).

Enfin, un effet attendu de la recharge expérimentale est l'affinement du substrat caractérisant le fond du lit, le sédiment injecté devant peu à peu recouvrir le pavage en place et constituer des surfaces potentielles de frai. Le **suivi granulométrique** doit donc permettre d'**évaluer les changements de taille du substrat**. Il repose sur une caractérisation (i) de la charge introduite, (ii) du substrat en place avant restauration, (iii) des variations granulométriques post-restauration. L'objectif est également **méthodologique** : quelle technique d'échantillonnage granulométrique,

discriminant les changements sur de grandes surfaces, facile à mettre en œuvre et reproductible, devra-t-on retenir pour les suivis ultérieurs ?

3.2. Les structures temporelle et spatiale du suivi

Nous avons adopté **une structure temporelle « avant-après », évènementielle** (*i.e.* discontinue et irrégulière). Nous avons défini **un tronçon de suivi de 4 km de long**, en prévision de la progression de la vague sédimentaire vers l'aval, et pour ainsi permettre une évaluation des effets de l'expérience durant plusieurs années. En effet, d'après la littérature, la vitesse de propagation de la charge de fond dans ce type de cours d'eau est généralement de l'ordre de quelques centaines de mètres par an (Petit *et al.*, 1996 ; Liébault, 2003 ; Rollet, 2007 ; Chapuis, 2012). Par conséquent, tant qu'elle n'est pas affectée par la recharge, la partie aval du tronçon de suivi constitue **un site de contrôle** de la partie amont, notamment pour évaluer les premières modifications granulométriques du substrat.

Trois états ont été caractérisés pendant la durée de la thèse (fig. 3.8) :

- un **état « zéro » avant l'injection (E0)**, entre avril 2008 et septembre 2010 ;
- un **état « zéro bis » après l'injection et avant les crues (E0+)**, en novembre 2010 ;
- un **état 1 après la première crue (E1)** : une crue d'une période de retour d'environ deux ans est survenue le **9 décembre 2010 (Q_{max} = 2484 m³/s à Bâle ~ Q_2 = 2800 m³/s)**, soit seulement trois semaines après la constitution de l'état zéro bis. Elle a été suivie d'un autre épisode de crue le 13 janvier 2011 (Q_{max} = 1976 m³/s à Bâle). L'état 1 a été caractérisé entre mai 2011 et octobre 2011.

Deux épisodes de crue potentiellement morphogènes (*i.e.* égaux ou supérieurs au débit-seuil de mise en mouvement de 1950 m³/s à Bâle) ont été enregistrés depuis octobre 2011 (le 23 décembre 2011 et le 6 janvier 2012, Q_{max} respectivement de 2283 m³/s et 2273 m³/s enregistré à Bâle), amenant à caractériser un état 2 durant l'été 2012. Pour des raisons de temps, cette dernière campagne n'a cependant pas été intégrée à ce travail de thèse.

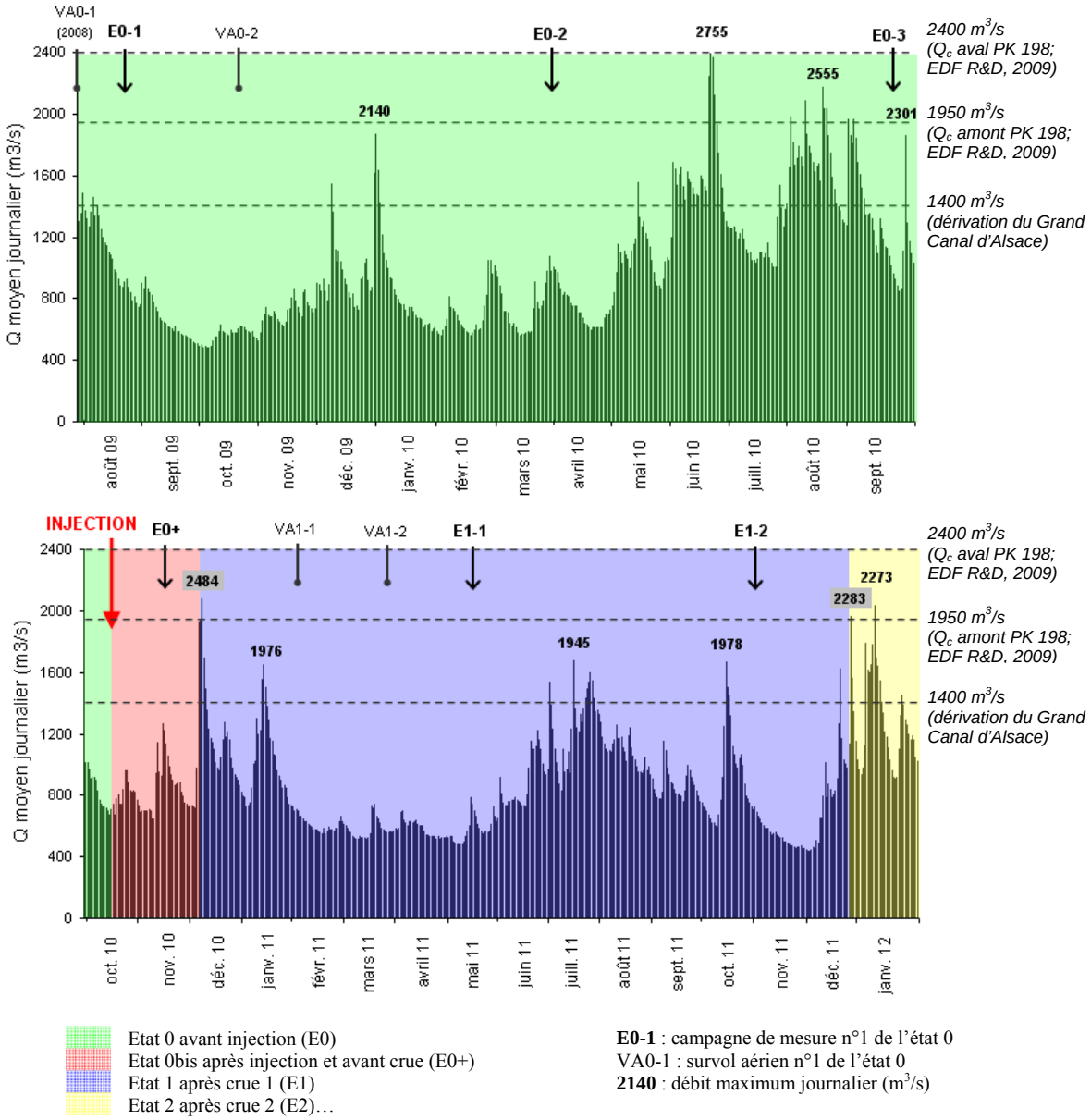


Figure 3.8 : Représentation de la structure temporelle du programme de suivi sur l'hydrogramme des débits journaliers à Bâle entre août 2009 et janvier 2012. Les campagnes E0, VA, etc. sont décrites en B/3.3

3.3. Les méthodes de suivi mises en œuvre

3.3.1. Suivi par imagerie aérienne

Nous avons tout d'abord exploité les ortho-photographies d'avril et août 2008 (VA0-1) produites par le cabinet de géomètres Guelle et Fuchs pour EDF (cf. chapitre 2 ; C/1.1.3). Puis, nous avons mandaté la société PARACOM (R. Montagnon) pour réaliser un vol aérien en octobre 2009 (VA0-2). Un autre vol a été effectué en janvier 2011 (VA1-1). Il présentait beaucoup d'ombres qui masquaient une partie du chenal, il a donc été suivi d'un autre vol en mars 2011 (VA1-2).

Chaque campagne d'acquisition a fait l'objet d'un vol à haute (600 m) et basse (300 m) altitude, permettant d'obtenir des images dont la résolution est respectivement de 13 et 6 cm. 35 et 60 clichés ont été acquis pour chacun des deux vols. Les clichés du vol haut ont été géoréférencés à partir des ortho-photographies de 2008, puis ont servi à leur tour au géoréférencement des clichés du vol bas (travail de D. Béal et C. Alonso).

3.3.2. Suivi par mesures topographiques et bathymétriques

Acquisition des données

Nous avons levé une série de **profils en travers** espacés de 40 m dans le lit mineur et de 100 m sur les berges. Ces profils ont été complétés par des **relevés plus denses au niveau des bancs de galets**.

Sur les zones émergées et peu profondes du tronçon de suivi, les levés ont été effectués à haute résolution (1 point tous les 3 m) par un opérateur à pied équipé d'un **GPS différentiel** (DGPS Trimble 5800 RTK) (fig. 3.9, a et b). Les levés en zones profondes ont été faits par bateau au moyen d'un **écho-sondeur mono-faisceau couplé à un GPS** (Leica) (fig. 3.10, c). L'écho-sondeur enregistre une trame en continu.

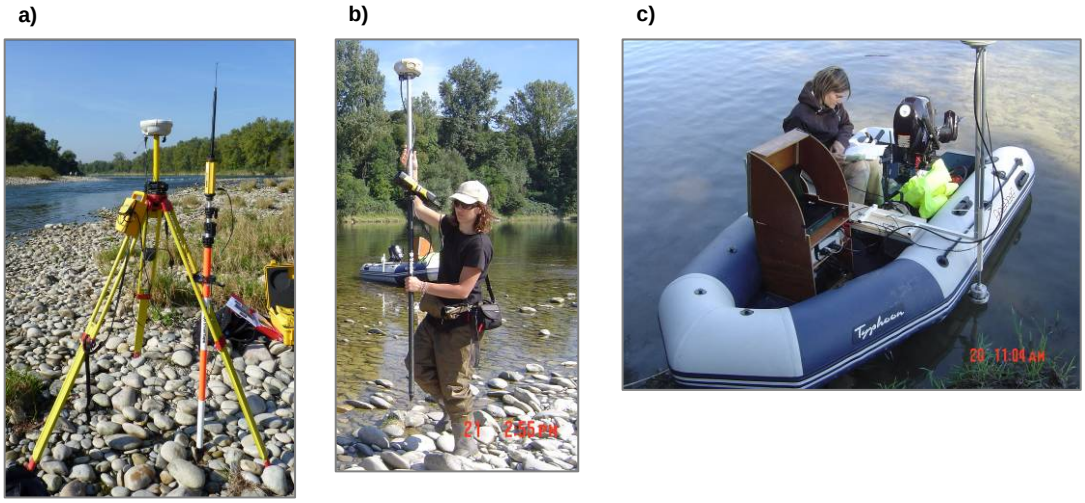


Figure 3.9 : Matériel utilisé pour le suivi topographique et bathymétrique : a) et b) Système DGPS base-mobile pour le suivi des zones émergées et peu profondes. b) Système écho-sondeur-GPS pour le suivi des zones profondes (clichés F. Arnaud, D. Béal, 2009-2010)

La caractérisation de l'état zéro des zones émergées et peu profondes a été effectuée en août 2009 (E0-1). Elle a été complétée dans les zones sous forêt en mars 2010 (E0-2), de manière à pouvoir prospecter en l'absence de feuillage parasitant le signal GPS. Puis, la bathymétrie des zones profondes a été réalisée en septembre 2010 (E0-3). Les profils en travers levés par le RPF en 2009 (cf. chapitre 2 ; B/1.1.1) ont été intégrés à la base de données. L'état zéro topographique et bathymétrique établi sur 4 km est ainsi composé de 39 profils en travers au niveau des berges, de 88 profils en travers dans le lit mineur, et de la topographie densifiée de six bancs (fig. 3.10, a).

L'état zéro bis (E0+) a été limité au site d'injection, soit un linéaire de 600 m, en levant les mêmes profils que pour l'état zéro. Il est ainsi composé de 17 profils en travers (fig. 3.10, b).

Enfin, l'état 1 (E1-1) s'étend jusqu'au premier banc en aval du site d'injection remanié par la crue, soit un linéaire de 1,3 km et 26 profils en travers (fig. 3.10, c).

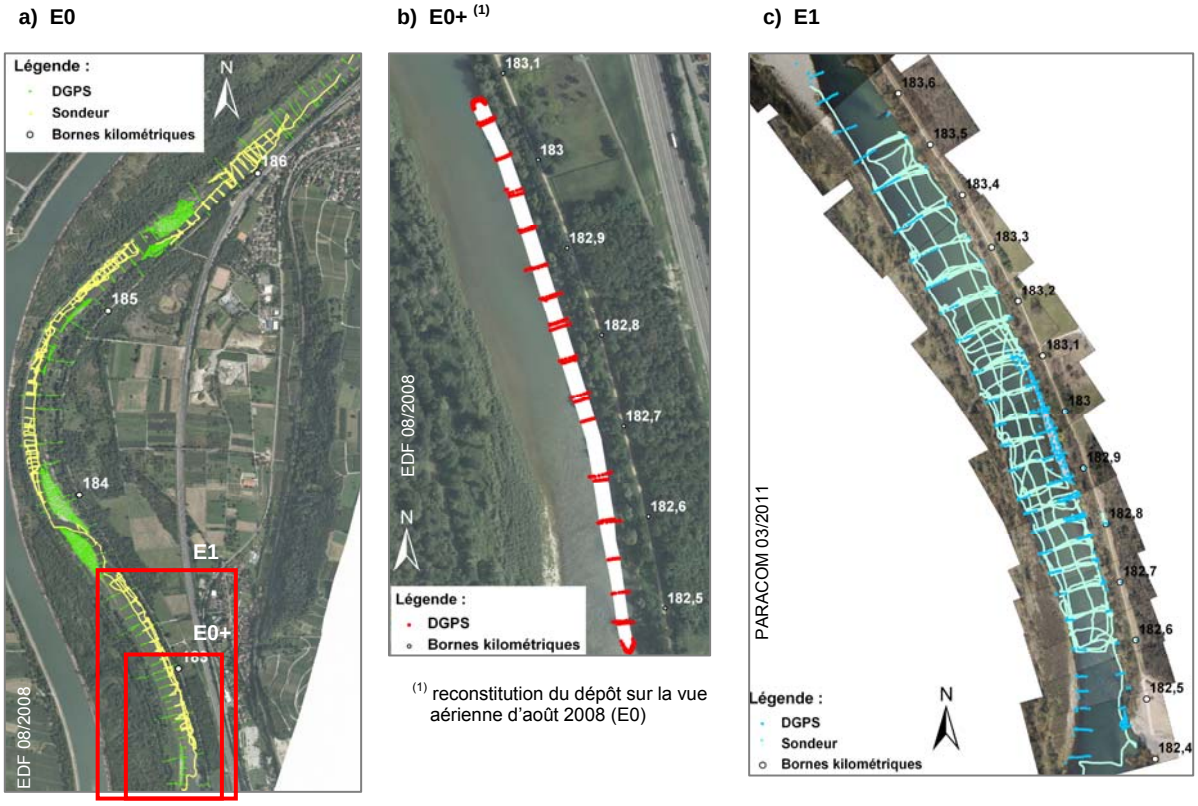


Figure 3.10 : Suivi topographique et bathymétrique par DGPS et écho-sondeur : a) Etat zéro caractérisé sur le tronçon de 4 km. b) Etat zéro bis caractérisé sur le site d'injection (600 m). c) Etat 1 caractérisé au droit du site d'injection remanié par la crue et jusqu'aux bancs alternés en aval (1,3 km)

Traitement des données et précision des levés

Le GPS utilisé pour les levés topographiques fonctionne en temps réel et localise les points avec une précision centimétrique. Le système est différentiel, c'est-à-dire que la position de l'ensemble du semis de points mesurés avec le récepteur mobile dépend de la position du récepteur de base. Le post-traitement des coordonnées de la base a été effectué à l'aide du logiciel Trimble Business Center, en exploitant des stations du Réseau GNSS Permanent, gérées par l'IGN et localisées à moins de 50 km du site d'étude. La qualité du post-traitement a été évaluée en comparant la position de repères d'une campagne à l'autre (clous fixés au sol, marques de peinture…) ainsi qu'en vérifiant la position de bornes kilométriques levées à chaque campagne et dont les coordonnées sont connues. Après post-traitement, la précision verticale est inférieure à 5 cm pour tous les repères et les bornes kilométriques.

Le GPS utilisé en couplage avec l'écho-sondeur sur le bateau fonctionne également en temps réel. En revanche, le semis de points ne nécessite pas de post-traitement car le récepteur mobile n'est

pas relié à une base, il est en télécommunication directe avec le réseau GNSS du service privé Orphéon. La précision est également centimétrique.

La trame des points levés avec l'écho-sondeur a été post-traitée afin de supprimer les erreurs intrinsèques au mode d'acquisition. Celles-ci sont principalement dues à la présence d'algues sur le fond du lit, et au tangage du bateau. La trame a été nettoyée sous MATLAB, en éliminant les profondeurs aberrantes et en se basant sur les levés DGPS dans les secteurs également sondés à pied. La précision verticale est estimée à 10 cm après nettoyage (travail de D. Béal).

Les profils en travers levés aux différents états ne sont pas directement superposables, leur localisation pouvant varier de 4 à 5 m d'une campagne à l'autre. Ces écarts ont été corrigés, pour chaque profil et pour chaque état, en projetant les points sur un même axe à l'aide d'une application MATLAB (travail de D. Béal). Les épaisseurs de dépôt et d'érosion ont ensuite pu être déduites des superpositions.

Pour chaque profil, l'aire érodée ou déposée entre deux états a été extraite, puis le volume total a été calculé en multipliant l'aire par la distance avec le profil aval et en sommant les volumes élémentaires. La superposition des états zéro et zéro bis permet ainsi de **reconstituer 94 % du volume de sédiments artificiellement introduits**. En effet, le volume total calculé est de 21 641 m^3, contre 22 958 m^3 annoncés par Vinci Construction. Cet écart de 6 % semble expliqué en partie par la marge d'erreur associée aux mesures topographiques et bathymétriques, si l'on considère une précision verticale de 10 cm appliquée à un dépôt de 15 m de large et 620 m de long (*i.e.* une marge d'erreur de 930 m^3). En outre, il est logique que le volume calculé soit légèrement inférieur au volume théorique introduit, car le sédiment injecté semblait contenir beaucoup de fines, qui ont très certainement été tassées par les engins de chantier pendant la mise en place du dépôt.

La superposition des profils aux états zéro bis et 1 aboutit quant à elle à une perte de 3 965 m^3 sur les 21 641 m^3 calculés précédemment, soit 18 %. Outre la marge d'erreur associée aux mesures, il parait logique que le volume reconstitué après la crue soit inférieur au volume introduit, une partie des sédiments fins ayant pu être exportée en aval du tronçon de suivi.

3.3.3. Suivi par traçage sédimentaire

Eléments bibliographiques sur le traçage de particules

Les premiers traçages sédimentaires sont anciens (Richardson, 1902, cité par Sear *et al.*, 2000) et leur utilisation n'a cessé de croître depuis les années 1950. Une variété de traceurs a en effet été employée dans des environnements fluviaux et littoraux, par exemple des particules peintes (Leopold *et al.*, 1966 ; Petit, 1987 ; Hassan *et al.*, 1992 ; Lenzi, 2004 ; Mao et Surian, 2010), des sédiments exogènes (Mosley, 1978 ; Kondolf et Matthews, 1986), des traceurs magnétiques ou à noyau de fer (Ashworth et Ferguson, 1989 ; Schmidt et Ergenzinger, 1992 ; Church et Hassan, 2002 ; Houbrechts *et al.*, 2011), des radiotransmetteurs (Ergenzinger *et al.*, 1989 ; Habersack,

2001 ; MacNamara et Borden, 2004) et des transpondeurs passifs (Nichols, 2004 ; Lamarre *et al.*, 2005 ; Rollet *et al.*, 2008 ; Camenen *et al.*, 2010 ; Liébault *et al.*, 2012). Chacune de ces méthodes présente certains avantages et inconvénients, selon des critères principaux de coût, de longévité, de reproductibilité, de distance de détection et de taux de retour (Sear *et al.*, 2000 ; Hassan et Ergenzinger, 2003).

Le traçage sédimentaire a été appliqué récemment au suivi d'opérations de restauration (cf. A/1.2.2) : des sédiments exogènes ont été injectés dans le Rhin en aval du barrage d'Iffezheim (BFG et WSA Freiburg 2006, cités par CHR, 2009) et des radiotransmetteurs ont été déployés sur le Danube (Liedermann *et al.*, 2011) et la Mur (Kloesch *et al.*, 2008). Cependant, la première technique présente l'inconvénient d'être limitée au suivi des particules restées en surface, ce qui entraine de faibles taux de retour si les particules ont été recouvertes (Sear *et al.*, 2000), à moins de mettre en place un dispositif de prélèvement sur l'ensemble de l'épaisseur de la couche active, comme ce fut le cas à Iffezheim. De plus, la deuxième technique, en dépit de sa grande performance, s'avère très coûteuse (plus de 100 dollars l'unité ; Burke et Jepson, 2006) et elle reste limitée au traçage de grosses particules en raison de la taille de ces traceurs. C'est pourquoi nous avons décidé de tester la technique des **transpondeurs passifs** pour évaluer le déplacement de la charge introduite dans le Vieux Rhin.

Principes méthodologiques des transpondeurs passifs (PIT tags)

Les transpondeurs passifs (*Passive Integrated Transponders* : PIT tags) sont des traceurs RFID (*Radio Frequency IDentification*) développés par TIRIS Technology et distribués par Texas Instruments. Ils ont tout d'abord été utilisés par les biologistes dans les années 1990 pour le suivi des populations de poissons (Prentice *et al.*, 1990 ; Skalski *et al.*, 1998), puis ils ont été appliqués dans les années 2000 au traçage des sédiments en rivière (Nichols, 2004 ; Lamarre *et al.*, 2005 ; Rollet, 2007 ; Lamarre et Roy, 2008 ; Chapuis, 2012 ; Liébault *et al.*, 2012) et en zone littorale (Allan *et al.*, 2006).

Les PIT tags se présentent sous la forme de capsules de verre hermétiquement scellées, de taille et de fréquence variables. Le modèle retenu fait 23,1 mm de long, 3,85 mm de diamètre et est codé à 134 kHz. Le choix de la version RI-TRP-WRHP autorise la lecture et l'écriture, ce qui permet à l'utilisateur de différencier chaque traceur par son identifiant. Celui-ci réagit à un signal électromagnétique envoyé par une unité de contrôle reliée à une antenne de détection. Chaque fois qu'un traceur est détecté, l'unité de contrôle émet un signal sonore et l'identifiant est affiché sur le boitier de lecture (Rollet, 2007).

La technique des transpondeurs passifs offre de nombreux avantages : elle est très performante (fort taux de détection des traceurs, tableau 3.4), elle permet de localiser les particules exposées ou enfouies, elle individualise chaque particule, elle est peu coûteuse (3,82 euros l'unité), résistante, durable (50 ans d'après Texas Instruments) et non polluante (Rollet, 2007).

Cependant, la technique présente un certain nombre de contraintes, dont la taille du traceur, qui impose d'équiper des particules suffisamment épaisses pour pouvoir le contenir et pour ne pas

être trop fragilisées au moment du perçage. Les autres contraintes permettent d'expliquer les traceurs non retrouvés (Lamarre *et al.*, 2005 ; Rollet, 2007) :

- un enfouissement supérieur à la portée de l'antenne, qui est généralement de 25 cm (tableau 3.4) ;
- une recherche non exhaustive, en raison de la surface à prospecter par rapport à la petite taille de l'antenne (tableau 3.4) ;
- une dispersion en aval de la zone d'étude, ou un piégeage dans des secteurs trop profonds pour pouvoir être prospectés à pied ;
- deux traceurs trop près pour pouvoir être détectés individuellement ;
- une abrasion durant le transport et un bris des particules équipées.

Référence	Cours d'eau (largeur, m)		Nbre de PIT tags	D_{50} PIT tags (mm)	Antenne de détection		Protocole de déploiement des PIT tags	Protocole de recherche des PIT tags			Taux de retour (%)	Distance de transport (m)
					Taille (cm)	Portée (cm)		Durée (mois)	Nbre. recherches / épisodes de crue	B/C (1)		
Lamarre *et al.*, 2005	Moras	7	204	85	50	25	un par un sur 36 transects dans le lit + aléatoirement	8	2 / 2	B, C	96-87	nr
Rollet, 2007	Ain	100	400	79	50	25	2*4 amas de 50 PIT sur 2 transects sur le banc	12	1 / 2 ($> Q_{1,5}$)	B	36	moy. 40
Rollet, 2007	Ain	75	150	99	50	25	3 amas de 50 PIT dans le chenal	12	1 / 2 ($> Q_{1,5}$)	C	25	moy. 30
Lamarre et Roy, 2008	Spruce Creek	6	196	86	50	25	un par un aléatoirement dans le lit	42	5 / 5 ($> 0,5\ Q_{pb}$)	B, C	83-57	moy. 2-8
Rollet *et al.*, 2008	Moras	6	214	80	50	25	un par un aléatoirement dans le lit	27	4 / plrs. épisodes compétents	B, C	87-90	max. > 500
Camenen *et al.*, 2010	Arc	70	300	nr	50	25	6 amas de 50 PIT sur le banc + bordure de chenal II + enterré	10 et 1	3 / 3 lâchers	B	80-12	max. > 100
Houbrechts *et al.*, 2011	Rulles	10	100	75	nr	nr	nr	24	8 crues ($> Q_c$)	nr	nr	max. 33
Chapuis, 2012	Durance	250	232	49	84	45	un par un sur 5 transects sur le banc + galets peints	5	1 / 1 (Q_4)	B	41	moy. 90
Liébault *et al.*, 2012	Bouinenc	24	451	53	60	80	un par un sur 8 transects dans le lit + galets peints	26	3 / 3 (17 évts. > Q_c)	B, C	89-45	moy. 336-75
Arnaud, 2012	Rhin	100	1494	71	50 et 50 * 100	25 et 100	un par un sur 30 transects + 19 amas de 50 PIT sur 7 transects sur le site d'injection	11	2 / 4 (Q_2 + 3 évts. > Q_c)	B, C	42	moy. 147 max. 665

(1) B : recherche sur les bancs ; C : recherche dans le chenal
nr : non renseigné

Tableau 3.4 : Recensement d'études sur le traçage de particules en rivière par transpondeurs passifs (PIT tags). Les caractéristiques de la présente étude ont été renseignées

Les particules sont généralement déposées sur le site selon deux protocoles (tableau 3.4) : elles peuvent être disposées une à une, aléatoirement dans le lit ou sur des transects, ce qui permet de détecter chaque traceur plus facilement (Lamarre *et al.*, 2005) ; ou elles peuvent être déposées en

amas de plusieurs dizaines de particules, ce qui permet d'obtenir une observation statistique de traceurs soumis aux mêmes conditions hydrauliques (Camenen *et al.*, 2010).

La technique des transpondeurs passifs a été employée jusqu'à présent essentiellement sur des systèmes fluviaux de taille modeste (bande active entre 6 m et 100 m de large, la Durance faisant exception, tableau 3.4), et les recherches ont toujours été limitées aux zones émergées et peu profondes (tableau 3.4). Le Vieux Rhin constitue un cas d'étude nouveau pour l'utilisation de cette technique, compte-tenu de l'importance du plan d'eau (80 % du site en zone profonde). Les protocoles de recherche ont dû être adaptés en conséquence.

Utilisation des transpondeurs passifs pour le suivi de la recharge expérimentale

Préparation et mise en place des traceurs

3115 particules ont été collectées en juillet 2010 dans le casier de décaissement à proximité du site d'injection en prévision des bris de particules pendant la préparation. Le travail de perçage, insertion des traceurs, rebouchage à l'enduit de façade waterproof, mesure des trois axes et pesée, a été confié au personnel de l'ESAT (Etablissement et Service d'Aide par le Travail) de Bartenheim (fig. 3.11, a). **1494 particules ont ainsi été équipées**.

La formule de Church *et al.* (1987) a été utilisée afin de convertir les axes des particules mesurés par l'ESAT à la règle, en axes mesurés au gabarit, de manière à travailler dans le même système de mesure que les échantillonnages granulométriques réalisés dans le reste de la thèse (fig. 3.11, b). La taille des particules équipées varie de 35 mm à 147 mm (**D_{50} de 71 mm**). Les traceurs sont presque équi-répartis entre les trois classes granulométriques de 45 mm à 128 mm (fig. 3.11, c).

Les traceurs ont été disposés sur le dépôt injecté en novembre 2010 selon deux protocoles (fig. 3.12, a) :

- 976 traceurs déposés en 19 **amas de 50 particules** le long de 7 transects équidistants de 100 m (3 amas par transect) (fig. 3.12, b) ;
- 518 traceurs déposés **individuellement** le long de 30 transects équidistants de 20 m (17 particules par transect).

La position de chaque amas et de chaque particule a été levée au DGPS (fig. 3.12, c). Nous avons essayé de respecter la distribution granulométrique de l'ensemble des particules équipées à l'échelle de chaque amas et transect.

Sur la page suivante :

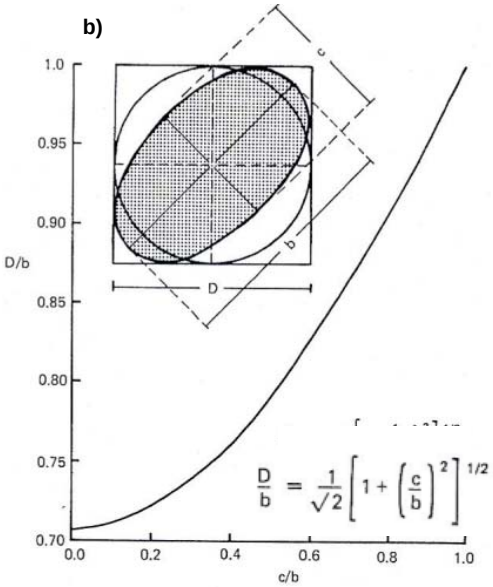
Figure 3.11 : a) Vérification de l'identifiant des particules équipées par l'ESAT (cliché F. Arnaud, 2010). b) Formule de Church *et al.* (1987) reliant les axes *b* et *c*, et la taille *D* de la maille. c) Caractéristiques granulométriques des particules équipées

Figure 3.12 : Disposition des traceurs sur le site d'injection : a) Localisation des transects de particules individuelles et des amas de 50 particules (reconstitution du dépôt sur la vue aérienne d'août 2008). b) Vue d'un amas. c) Relevé de la position de chaque traceur par DGPS (clichés F. Arnaud, D. Béal, 2010)

a)



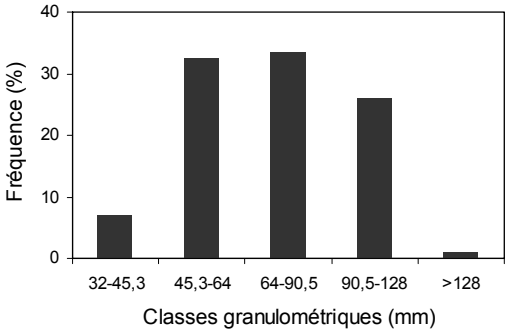
b)



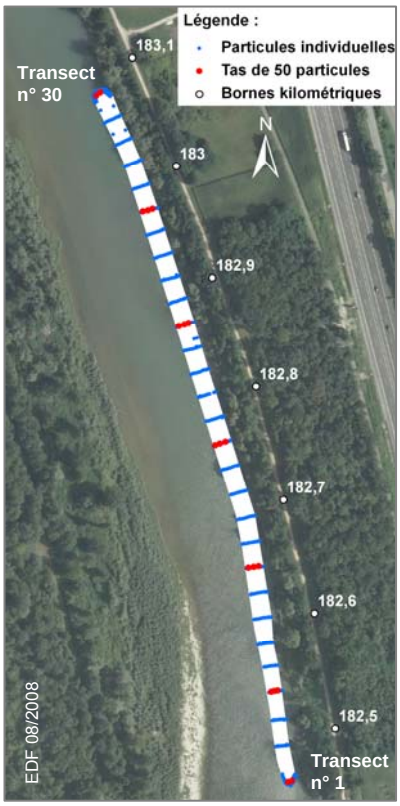
c)

Décile	Diamètre (mm)
D10	47
D25	55
D50	71
D75	93
D84	105
D90	114

	Diamètre (mm)	Masse (g)
min	35	78
max	147	7300



a)



b)



c)



Protocole de recherche des traceurs

80 % du site d'étude présente des profondeurs supérieures à 60 cm. Nous avons donc mis en place deux protocoles afin de nous adapter à cette contrainte :

- **une recherche « classique » dans les zones émergées et peu profondes**, par un opérateur à pied équipé d'une antenne de détection de 50 cm de diamètre et de 25 cm de portée, muni d'un GPS (fig. 3.13, a) ;
- **une recherche en bateau dans les zones profondes**, grâce à une antenne de détection de 50 * 100 cm et de 1 m de portée, tractée derrière le bateau par une corde (fig. 3.13, b et c). La prospection a été réalisée en suivant des profils en long afin de garder constantes la direction (nord-sud) et la distance (7,5 m) entre l'antenne et le GPS embarqué. L'antenne devant reposer en permanence au fond du lit, nous avons en outre été contraints de prospecter en coupant le moteur, soit uniquement à la descente. La position de chaque traceur a ensuite été corrigée au laboratoire en retirant 7,5 m de coordonnée y, soit la distance séparant l'antenne du GPS selon l'axe nord-sud.

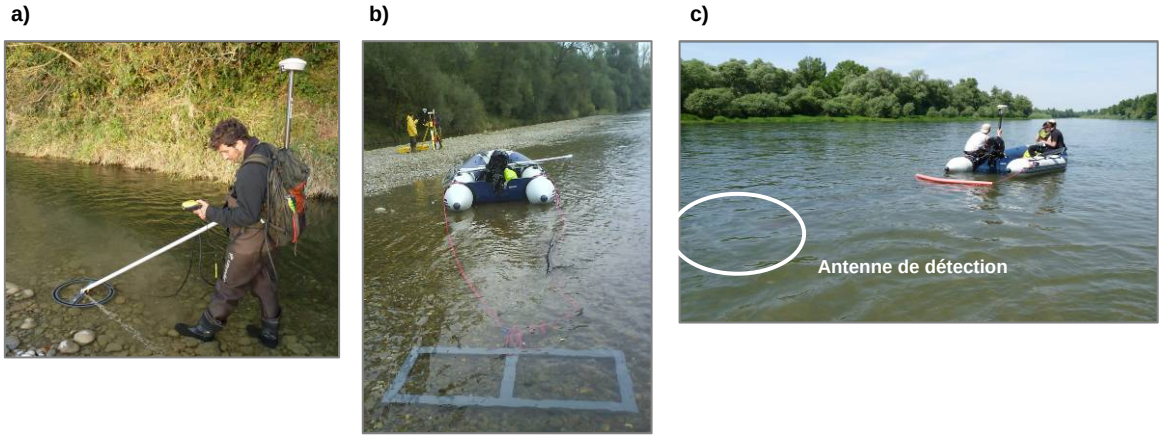


Figure 3.13 : Protocoles de recherche des transpondeurs passifs : a) à pied. b) et c) en bateau (clichés F. Arnaud, D. Béal, 2011)

La précision des protocoles de recherche des traceurs a été évaluée en mai 2011 (E1-1) grâce à l'analyse des doublons retrouvés. Pour ce faire, les prospections ont été effectuées simultanément par deux équipes à pied et une équipe en bateau. Selon les disponibilités en matériel, trois types de GPS ont été utilisés : un DGPS (Trimble 5800 RTK, précision centimétrique), un GPS submétrique (Trimble GeoXH, précision centimétrique à décimétrique) et un GPS plus commun, grand public de précision métrique (Garmin). A l'issue de cinq jours de recherche, **164 doublons** (triplets…) ont été détectés. Ils conduisent à étudier neuf combinaisons des différents appareillages mis en œuvre par bateau ou à pied (fig. 3.14).

L'analyse de ces traceurs révèle des distances entre les doublons détectés au DGPS ou au GeoXH inférieures à 5 m : les valeurs médianes issues de deux doublons détectés à pied avec ces matériels sont de 1 m et 1,1 m ; la valeur médiane issue de deux doublons détectés à pied et par bateau est de 3,2 m, de même que la valeur médiane issue de deux doublons détectés par bateau. Les distances entre les doublons impliquant du matériel Garmin sont en revanche beaucoup moins

satisfaisantes, puisqu'elles atteignent 189 m en valeur médiane. Dans le cas des doublons « DGPS-Garmin » détectés par bateau, il apparait que les points Garmin ont été trouvés systématiquement en amont des points DGPS. Dans la mesure où les recherches ont été effectuées de l'amont vers l'aval, il semble ainsi que le temps de positionnement du matériel Garmin soit incompatible avec la vitesse de déplacement du bateau. En outre, les mauvais résultats obtenus à pied avec cet appareil pourraient être expliqués par un effet de masque par la végétation bordant les zones prospectées.

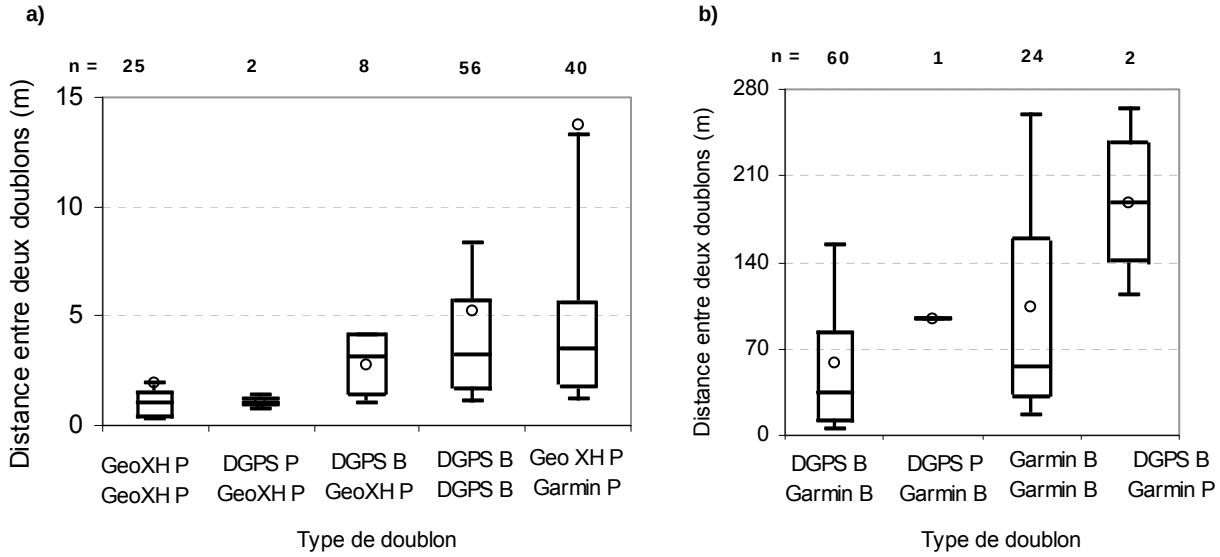


Figure 3.14 : Analyse des distances entre les doublons détectés par bateau (B) ou à pied (P) avec un DGPS, un GPS GeoXH ou un GPS Garmin : statistiques inférieures (a) ou supérieures (b) à 15 m

La comparaison des différents appareillages permet ainsi de **valider les protocoles de recherche à pied et par bateau, équipés d'un DGPS ou d'un GeoXH**. Les distances entre les doublons conduisent à estimer **une erreur de positionnement de 5 m**, qui pourrait être expliquée par le fait que l'antenne tractée par le bateau ne se trouve pas systématiquement à 7,5 m du DGPS embarqué et dirigée selon l'axe nord-sud (correction appliquée aux coordonnées de tous les traceurs retrouvés par bateau). Cette erreur de positionnement ne s'applique évidemment pas aux traceurs retrouvés à pied, cependant ces derniers sont minoritaires (30 % du total de traceurs retrouvés).

Une autre campagne a été réalisée en octobre 2011 (E1-2) afin d'augmenter le taux de détection des traceurs. Les recherches ont été effectuées par une équipe à terre équipée du GeoXH et par une équipe en bateau équipée du DGPS et de deux antennes de détection : l'antenne de 50 * 100 cm était classiquement tractée derrière le bateau, et une antenne de 50 cm de diamètre était positionnée sur le côté du bateau, maintenue au fond du lit par un opérateur. Les traceurs retrouvés avec cette antenne ont ensuite été corrigés au laboratoire en retirant 1,5 m de coordonnée x, soit la distance séparant l'antenne du DGPS selon l'axe est-ouest.

Méthode d'analyse des traceurs retrouvés

L'analyse des traceurs a porté principalement sur **les distances et les trajectoires de déplacement**, après projection du nuage de points sous ArcGis et tracé des trajectoires (utilisation

de l'outil *oursin* pour convertir les deux fichiers de points en novembre 2010 et mai-octobre 2011 en un fichier de lignes indiquant les trajectoires parcourues entre les deux dates). Les distances et les trajectoires ont été étudiées en fonction de la position initiale des traceurs, dans les dimensions longitudinale et transversale.

La **relation éventuelle entre la distance de transport et la taille des particules** a également été analysée. Concernant ce point, des doutes existent sur la précision des axes des particules mesurés par l'ESAT ; les données ont été fournies tous les 5 mm, et la reconnaissance des trois axes a pu générer des erreurs de mesure. Pour cette raison, nous avons également mené l'analyse en exploitant les mesures de **masse des particules** ; ces données sont précises au gramme, et moins d'erreurs de lecture sont possibles. La relation entre masse et distance de déplacement a en outre été explorée par plusieurs auteurs (Carling *et al.*, 1992 ; Schmidt et Ergenzinger, 1992 ; Schmidt et Gintz, 1995).

3.3.4. Suivi granulométrique

Les techniques d'échantillonnage de la couche de surface ont été présentées dans le chapitre 2 (cf. D/2.1.2). La méthode de Wolman sur la base d'échantillons de 100 particules s'est révélée la mieux adaptée pour caractériser le patron d'affinement granulométrique du Vieux Rhin. Cependant, si un échantillonnage par tête de banc est nécessaire et suffisant pour caractériser la structure granulométrique longitudinale d'un tronçon fluvial de 50 km, à l'échelle du site de recharge et des bancs localisés sur le tronçon de suivi, les questions de **nombre**, de **taille** et de **représentativité spatiale des échantillons** se posent.

Eléments bibliographiques sur les structures spatiales d'échantillonnage granulométrique

Les structures spatiales se réfèrent aux patrons selon lesquels les particules individuelles (dans le cas de comptage de particules) ou les groupes de particules (dans le cas d'échantillonnages aréolaires ou volumétriques) sont prélevées, afin de constituer un échantillon (Bunte et Abt, 2001). Des structures spatiales différentes peuvent générer des résultats granulométriques différents sur un même tronçon (Mosley et Tindale, 1985, cités par Bunte et Abt, 2001). Il est donc important de sélectionner la structure la plus appropriée à son terrain d'étude, compte-tenu de la surface à prospecter, de l'homogénéité granulométrique, de l'erreur tolérée et des objectifs du suivi (Bunte et Abt, 2001).

Il existe trois principales structures spatiales d'échantillonnage (Bunte et Abt, 2001) :

- *intégrée :* l'ensemble du tronçon est échantillonné, sans différenciation entre les unités morphologiques[1] ou sédimentaires[2], et en appliquant une méthode d'échantillonnage systématique ;
- *stratifiée :* la distinction est faite entre les unités morphologiques ou sédimentaires, et une méthode d'échantillonnage différente peut être appliquée au sein de chaque unité ;

- *focalisée :* l'échantillonnage est concentré sur une petite surface, par exemple une zone d'accélération des écoulements près d'un ouvrage hydraulique ou une zone de fines dans une mouille.

[1] Les **unités sédimentaires** sont des surfaces dont la granulométrie est uniforme. Une unité sédimentaire (ou **faciès**) peut comprendre plusieurs unités morphologiques. Par exemple, le faciès grossier d'une tête de banc s'étend généralement jusqu'au radier adjacent (fig. 3.15) (Bunte et Abt, 2001).

[2] Les **unités morphologiques** sont des surfaces présentant des caractéristiques géométriques (profil en long et en travers) et hydrodynamiques (hauteur d'eau, localisation des courants hélicoïdaux) similaires. Il s'agit des radiers, des mouilles et des bancs. Une même unité morphologique peut inclure plusieurs unités sédimentaires. Par exemple, un banc est le plus souvent structuré selon un affinement granulométrique longitudinal et transversal (fig. 3.15) (Bunte et Abt, 2001).

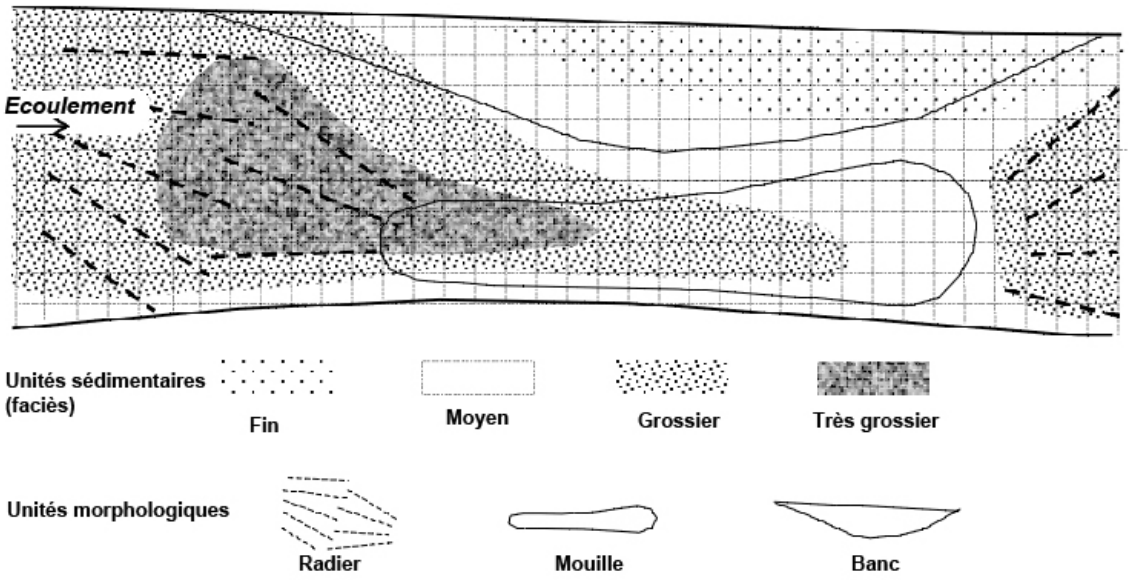


Figure 3.15 : Représentation schématique des unités sédimentaires et morphologiques d'un tronçon fluvial. Une grille systématique a été superposée pour réaliser un échantillonnage spatialement intégré (cf. fig. 3.16, b) (d'après Bunte et Abt, 2001)

L'échantillonnage spatialement intégré présente l'avantage de fournir un $\boldsymbol{D_i}$ **global du tronçon**. Cette information est utile pour **détecter des changements temporels** (Lisle *et al.*, 1993, cités par Bunte et Abt, 2001), elle est donc particulièrement adaptée au suivi d'une opération de recharge sédimentaire. De plus, des méthodes statistiques, basées sur le diamètre moyen D_m et la déviation standard s^2, permettent de différencier *a posteriori* les unités géomorphologiques ou sédimentaires parfois difficilement identifiables *a priori* (Bunte et Abt, 2001).

L'analyse statistique suppose que les particules soient collectées aléatoirement. Ceci peut être effectué selon quatre méthodes différentes : en prélevant entièrement au hasard, en s'appuyant sur une grille systématique, en superposant des grilles (sous-échantillonnage) ou en prélevant dans des cellules. Ainsi, la combinaison de ces méthodes avec les structures spatialement intégrées et stratifiées conduit à huit principaux types d'échantillonnage granulométrique (fig. 3.16) (Bunte et Abt, 2001).

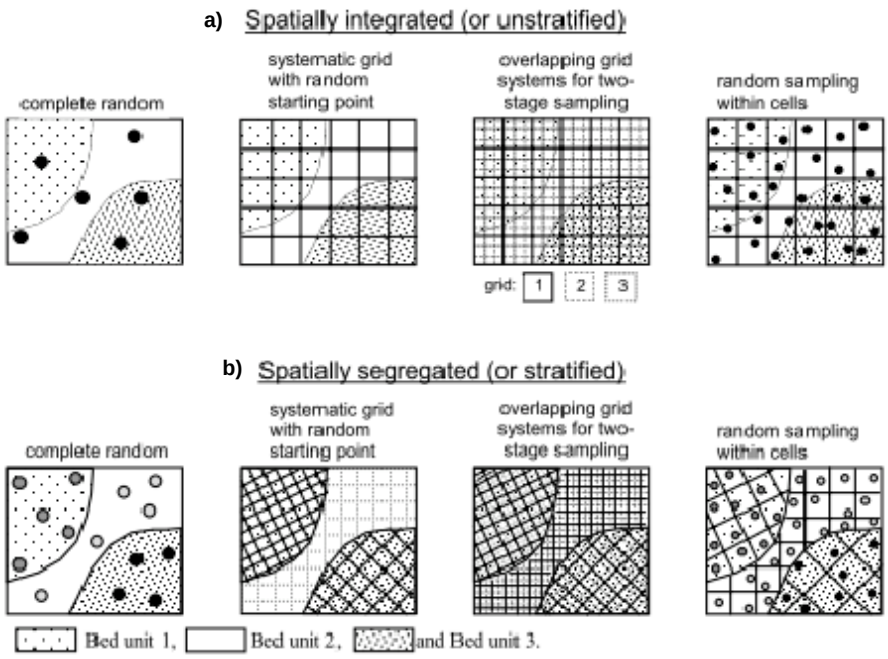


Figure 3.16 : Représentation schématique des huit types d'échantillonnage granulométrique (Bunte et Abt, 2001)

L'échantillonnage entièrement aléatoire (fig. 3.16, 1) est généralement réservé aux granulométries homogènes (Bunte et Abt, 2001). La méthode des diagonales (*zig-zag method*) consiste par exemple à parcourir le lit d'une rive à l'autre, en collectant aléatoirement jusqu'à 100 particules (Bevenger et King, 1995). Toutefois, ce type d'échantillon présente les inconvénients d'être peu représentatif du tronçon si le lit est hétérogène, et surtout il n'est pas reproductible dans le temps. C'est pourquoi les échantillonnages par grille ou par cellule (fig. 3.16, 2 et 3 et 4) sont généralement préférés. Ces dernières approches posent la question de la **taille de la maille**, qui détermine la taille de l'échantillon. En effet, il est important de s'assurer que le pas d'espace permette d'échantillonner suffisamment de particules, de manière à obtenir une bonne estimation des percentiles au sein de chaque unité voire sur l'ensemble du tronçon (Bunte et Abt, 2001).

Rice et Church (1996) ont utilisé la méthode du *bootstrap* pour déterminer la relation entre la taille de l'échantillon et les erreurs des percentiles, à partir d'une base de données comportant les mesures d'axes de 3500 particules collectées sur la Mamquam River (Canada). Le *bootstrap* procède par ré-échantillonnages successifs, de différentes tailles n au sein de l'échantillon de départ, et un grand nombre de fois r. Par exemple, pour $r = 200$, le *bootstrap* calcule 200 valeurs de chaque percentile D_{16}, D_{50}, D_{84}… pour des tailles $n = 50, 100, 500$… (Bunte et Abt, 2001). L'erreur standard autour du percentile D_i est donnée par la déviation standard s_i :

$$s_i = \frac{\sum^{r} \left(D_i - D_{im}\right)^2}{r - 1}$$

Une loi de régression puissance est ensuite ajustée entre s_i et n ; elle permet de déterminer la taille d'échantillon nécessaire pour obtenir une erreur pré-spécifiée autour d'un percentile donné. Les

auteurs ont ainsi montré que le gain en précision n'est plus significatif au-delà de 400 particules : l'erreur absolue (intervalle de confiance de 95 %) pour la détermination du D_5 est d'environ ± 0,30 ϕ, soit un pourcentage d'erreur d'environ ± 20 % ; l'erreur absolue pour la détermination des D_{50}, D_{75} et D_{84} est d'environ ± 0,12 ϕ, soit un pourcentage d'erreur d'environ ± 8 % (Bunte et Abt, 2001). Pour rappel (cf. chapitre 2 ; D/2.1.2), l'erreur absolue pour la détermination des D_{16} à D_{95} d'un échantillon composé de 100 particules est comprise entre ± 0,23 ϕ et ± 0,40 ϕ, soit un pourcentage d'erreur compris environ entre ± 16 % et ± 28 % (Rice et Church, 1996 ; Bunte et Abt, 2001).

Développement d'une méthode pour le suivi granulométrique de la recharge

Principes méthodologiques

Pour l'étude du patron sédimentaire longitudinal du Vieux Rhin (cf. chapitre 2 ; D/2), les têtes de bancs avaient été caractérisées en appliquant un échantillonnage par grille (méthode de Wolman) sur le faciès le plus grossier, et en prélevant au moins 100 particules. Cette méthode nécessite deux opérateurs et dure environ 20 minutes par échantillon. Pour le suivi de la recharge expérimentale, nous avons cherché à **augmenter la surface prospectée** afin de pouvoir mesurer les changements sur la totalité des bancs, voire dans le chenal, mais en veillant à **ne pas trop rallonger la durée d'échantillonnage**. Nous avons donc choisi d'augmenter le nombre d'échantillons et de réduire leur taille, tout en nous assurant que l'échantillon total collecté au sein de chaque unité est suffisamment grand pour une estimation statistique correcte des percentiles.

Compte-tenu de ces éléments, nous avons choisi d'adopter une **structure spatialement intégrée, basée sur la collecte aléatoire de 10 particules dans des cellules espacées de 10 à 20 m**. Nous avons également échantillonné **dans le chenal**, jusqu'à atteindre une profondeur de prospection de 80 cm. La durée d'échantillonnage est d'environ 2 h pour 30 cellules, avec deux opérateurs. Nous avons complété ce dispositif par des **échantillonnages de type Wolman de 100 particules chacun en tête, milieu et queue des bancs**.

Acquisition des données

L'état zéro granulométrique (E0-1 à E0-3) a été caractérisé par 317 échantillons de 10 particules répartis sur les six bancs et les zones peu profondes du tronçon de 4 km, ainsi que 18 échantillons de type Wolman de 100 particules en tête, milieu et queue des six bancs présents sur le tronçon. Entre 10 et 63 échantillons de 10 particules ont ainsi été prélevés sur chaque unité morphologique (banc ou chenal) (fig. 3.17, a et tableau 3.5).

L'état zéro bis (E0+) a été caractérisé par 5 échantillons de type Wolman de 100 particules collectés sur le dépôt généré lors de l'injection, de manière à obtenir une estimation de la granulométrie du sédiment injecté, bien que la surface du dépôt ait été travaillée par les engins de chantier (fig. 3.17, b et tableau 3.5).

Enfin, lors du suivi de l'état 1 (E1-1 et E1-2), nous avons concentré nos efforts sur la caractérisation granulométrique des zones émergées et peu profondes de la partie terminale du site d'injection remanié par la crue. 186 échantillons de 10 particules répartis sur le banc résiduel et dans le chenal, et 4 échantillons de type Wolman de 100 particules répartis sur le banc résiduel ont ainsi collectés (fig. 17, c et tableau 3.5). Comme la vague sédimentaire n'a pas encore atteint les deux bancs alternés en aval du site d'injection, ces derniers sont peu susceptibles d'avoir enregistré des changements granulométriques, ils n'ont donc pas été caractérisés.

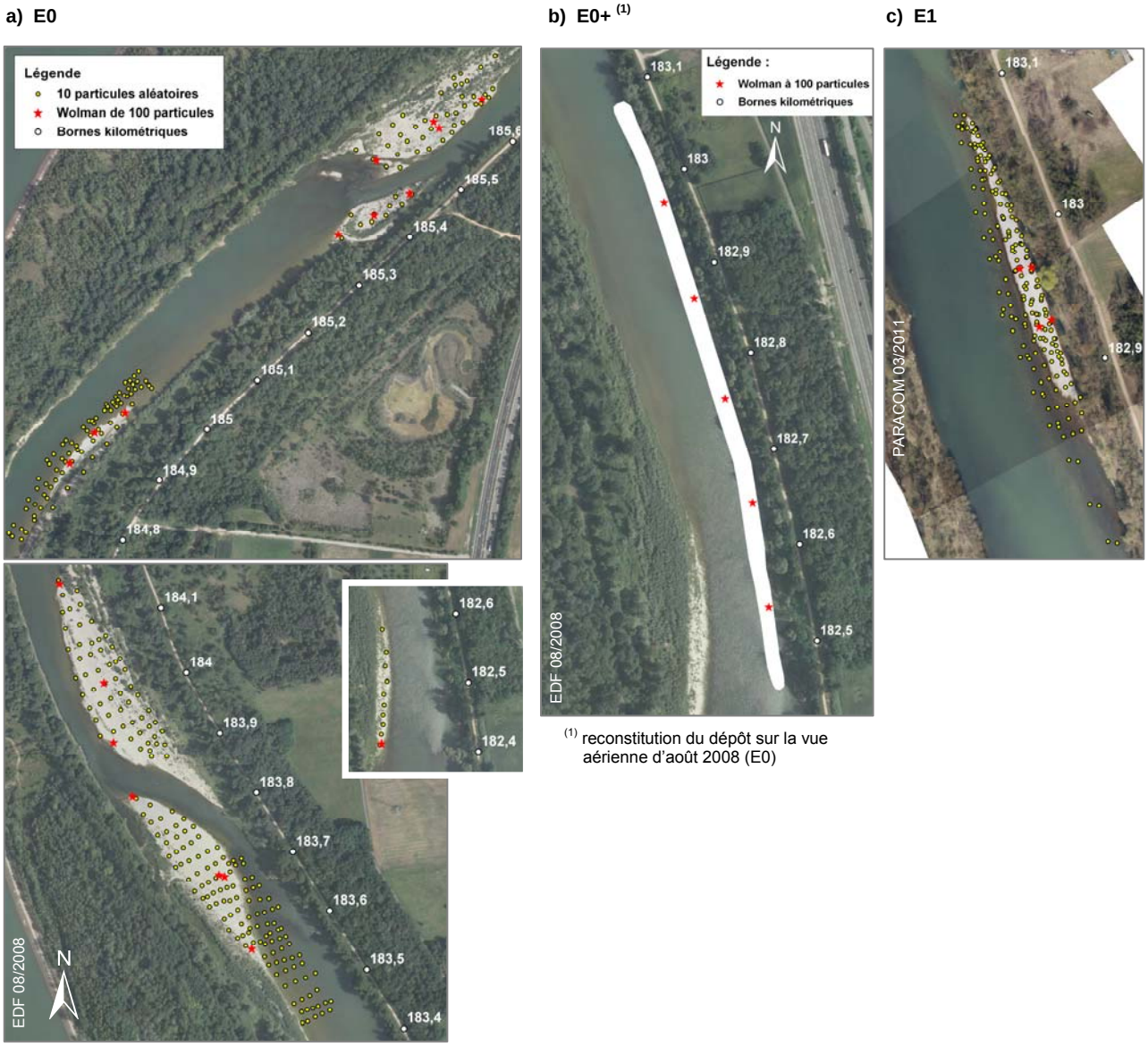


Figure 3.17 : Suivi granulométrique selon une structure spatialement intégrée en cellules de 10 particules et échantillonnages de type Wolman de 100 particules chacun : a) Etat zéro caractérisé sur les six bancs du tronçon de 4 km et dans le chenal sur deux secteurs. b) Etat zéro bis caractérisé sur le site d'injection (600 m). c) Etat 1 caractérisé dans la partie terminale du site d'injection remanié par la crue (200 m)

Etat	PK RG : rive gauche RD : rive droite	Unité morphologique B : banc CH : chenal	Nbre. d'échan. de 10 part. aléatoires	Nbre. d'échan. Wolman de 100 part.
E0	PK 182,5 RG	B	10	1
	PK 183,8 RG	B	56	4
	PK 183,8 RG	CH	63	
	PK 184 RD	B	58	3
	PK 184,8 RD	B	21	3
	PK 184,8 RD	CH	59	
	PK 185,4 RD	B	10	3
	PK 185,56 RG	B	40	4
	Total		*317*	*18*
E0+	Site d'injection (PK (182,5-183)	B		5
E1	Partie terminale du site d'injection (PK 183)	B & CH	186	4

Tableau 3.5 : Recensement des échantillons collectés pour le suivi granulométrique

Méthodes d'analyse des données

Le principal objectif du suivi granulométrique est de parvenir à évaluer les changements de substrat générés par la dispersion de la charge, le sédiment injecté présentant une granulométrie plus fine que le pavage en place. Pour répondre à cet objectif, deux types d'analyse ont été menés.

La première analyse est la **détermination du D_{50} global de chaque unité morphologique (banc et chenal)**, dans le but de détecter des changements granulométriques temporels, avant et après l'opération de recharge, à l'échelle des unités. Pour cela, nous avons sommé les échantillons de 10 particules collectés au sein des unités morphologiques, puis nous avons calculé la distribution granulométrique globale de chaque unité à partir de ces sommes.

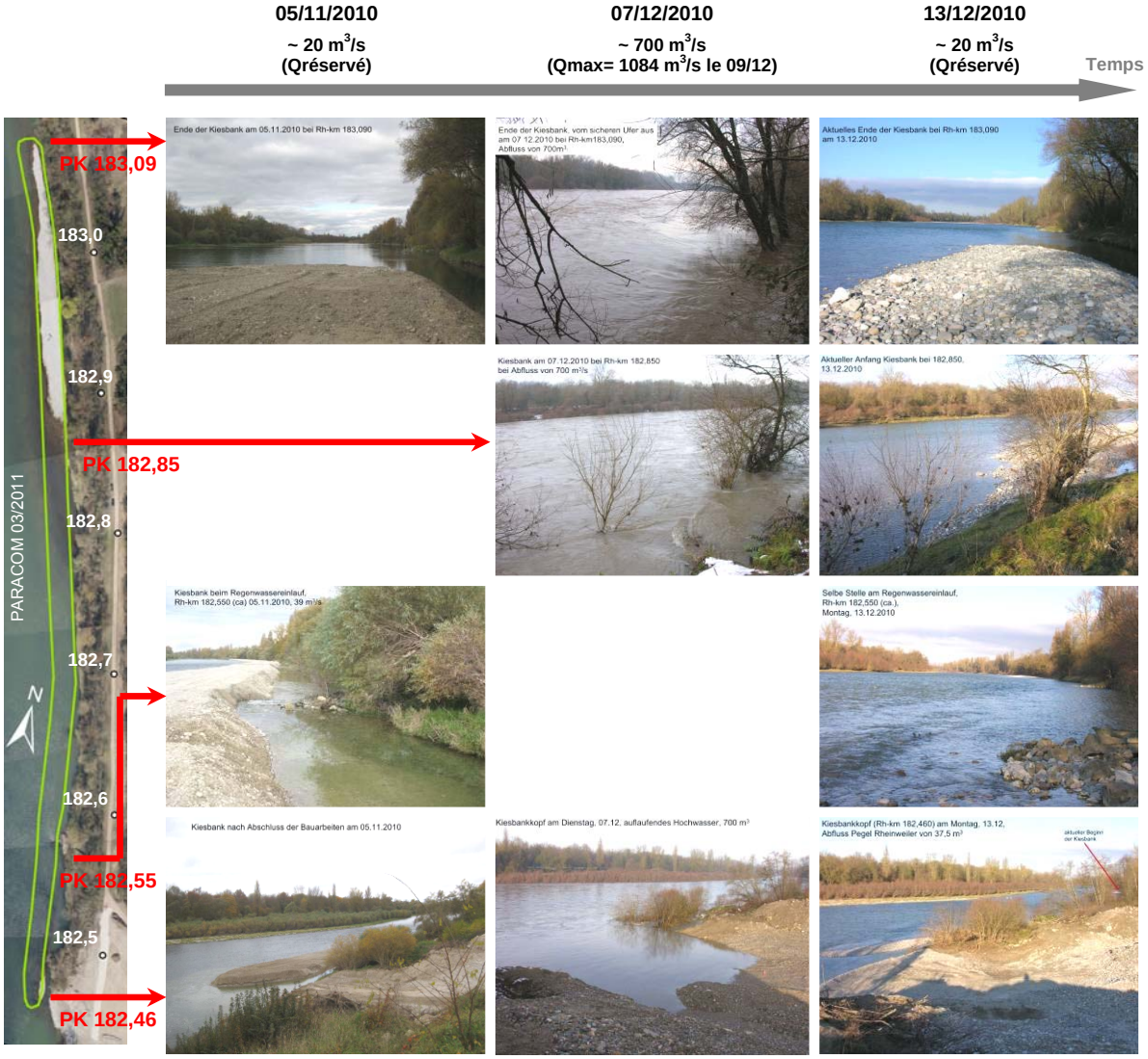
La deuxième analyse a consisté à **comparer les résultats issus des deux méthodes d'échantillonnage** (spatialement intégrée en cellules de 10 particules aléatoires, et Wolman de 100 particules en tête, milieu et queue de banc) : sur chaque banc, nous avons sommé les échantillons de 10 particules d'une part, et ceux de type Wolman de 100 particules d'autre part, et nous avons comparé les distributions obtenues à partir des deux jeux de données. L'objectif de cette analyse est méthodologique. Il s'agit en effet de déterminer le mode d'échantillonnage le plus adapté au suivi des changements granulométriques : faut-il collecter sur la surface complète du banc, ou se focaliser sur les deux ou trois unités sédimentaires les plus contrastées ?

C/ Résultats du suivi géomorphologique de la recharge expérimentale

1. Analyse de l'influence de la recharge sur la géométrie du lit

1.1. Résultats de l'imagerie

La crue du 9 décembre 2010 a profondément modifié la morphologie du site d'injection. En effet, à la place du dépôt de 620 m de long, 11 à 15 m de large et émergeant 1 m au-dessus de l'eau, il ne subsiste dans la partie terminale qu'un banc de 200 m de long, 4 à 15 m de large et émergeant au maximum de 0,5 m. Dans la partie amont du site d'injection, le dépôt initial a laissé place à un petit banc résiduel de 20 m de long et 4 m de large (fig. 3.18). Les observations ont été faites pour des débits comparables.

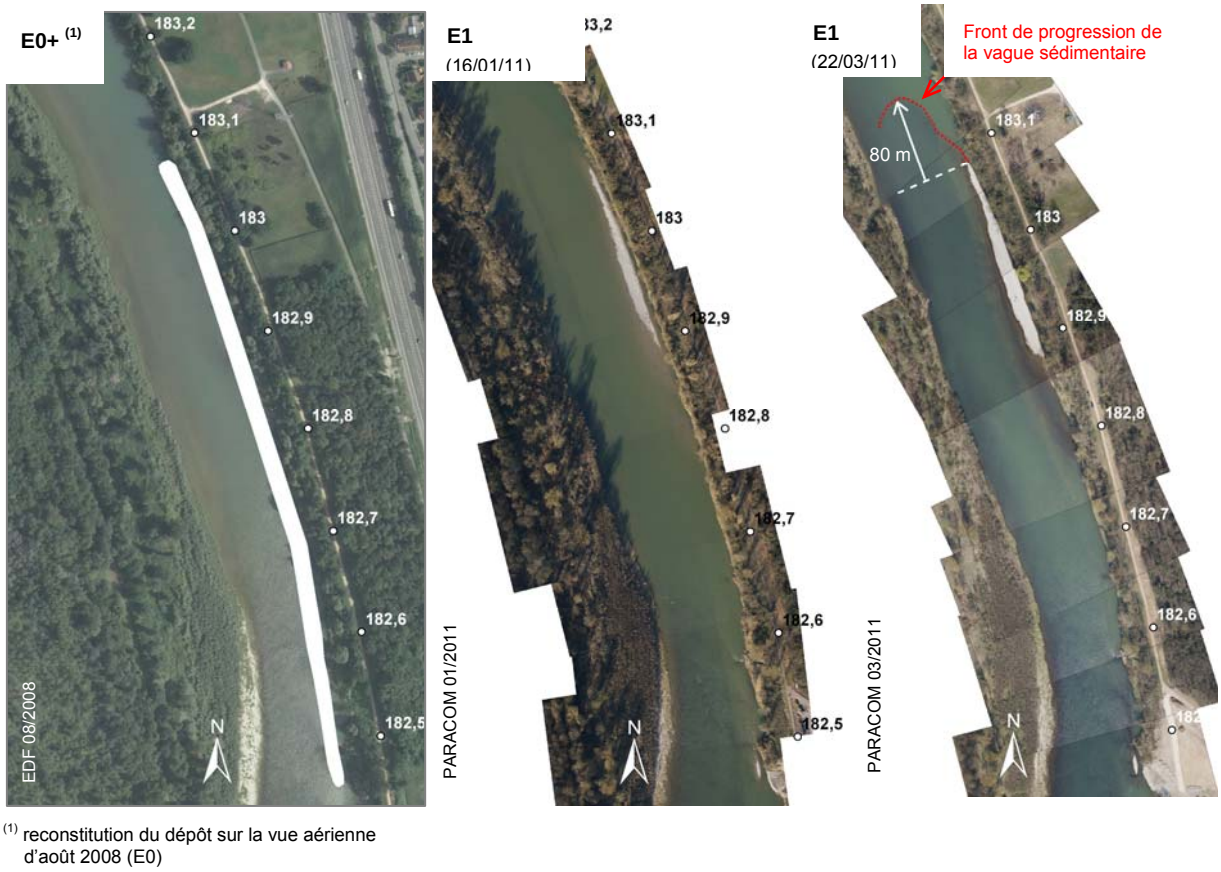


○ Bornes kilométriques

— Contour du dépôt injecté en novembre 2010

Sur la page précédente :

Figure 3.18 : Etat du site d'injection avant, pendant et après la crue du 7-9 décembre 2010. Vues de la partie amont (PK 182,46 et 182,55), médiane (PK 182,85) et aval (PK 183,09) (clichés R. Ostermann, RPF)



(1) reconstitution du dépôt sur la vue aérienne d'août 2008 (E0)

Figure 3.19 : Suivi par imagerie aérienne : le front de progression de la vague sédimentaire est visible sur la vue aérienne du 22/03/2011

La comparaison des prises de vue avant et après la crue permet d'évaluer le déplacement de la charge. Le front de la vague sédimentaire est en effet visible sur les images de mars 2011, il se situe **80 m en aval de la terminaison initiale du dépôt** (fig. 3.19). Par ailleurs, hormis les bancs résiduels identifiés dans les parties amont et aval, les images ne révèlent l'apparition d'aucun autre banc.

La modélisation bathymétrique à partir de l'analyse de la valeur radiométrique des pixels des images et l'extraction des profondeurs est en cours de développement dans le projet INTERREG (Béal *et al.*, 2011, 2012), les résultats ne seront pas présentés ici. L'analyse des levés *in situ* permet d'ores et déjà d'évaluer finement l'évolution morphologique du chenal.

1.2. Résultats des mesures topographiques et bathymétriques

Les profils en travers topographiques et bathymétriques confirment et affinent les constats établis précédemment avec les photographies. En effet, nous avons remarqué que les changements de géométrie concernent les 18 premiers profils en travers levés dans la partie amont du tronçon de

suivi, soit un linéaire de 700 m, c'est-à-dire jusqu'à 80 m en aval de la terminaison initiale du dépôt injecté (fig. 3.20). La présentation des résultats qui suit est ainsi focalisée sur ces 18 profils.

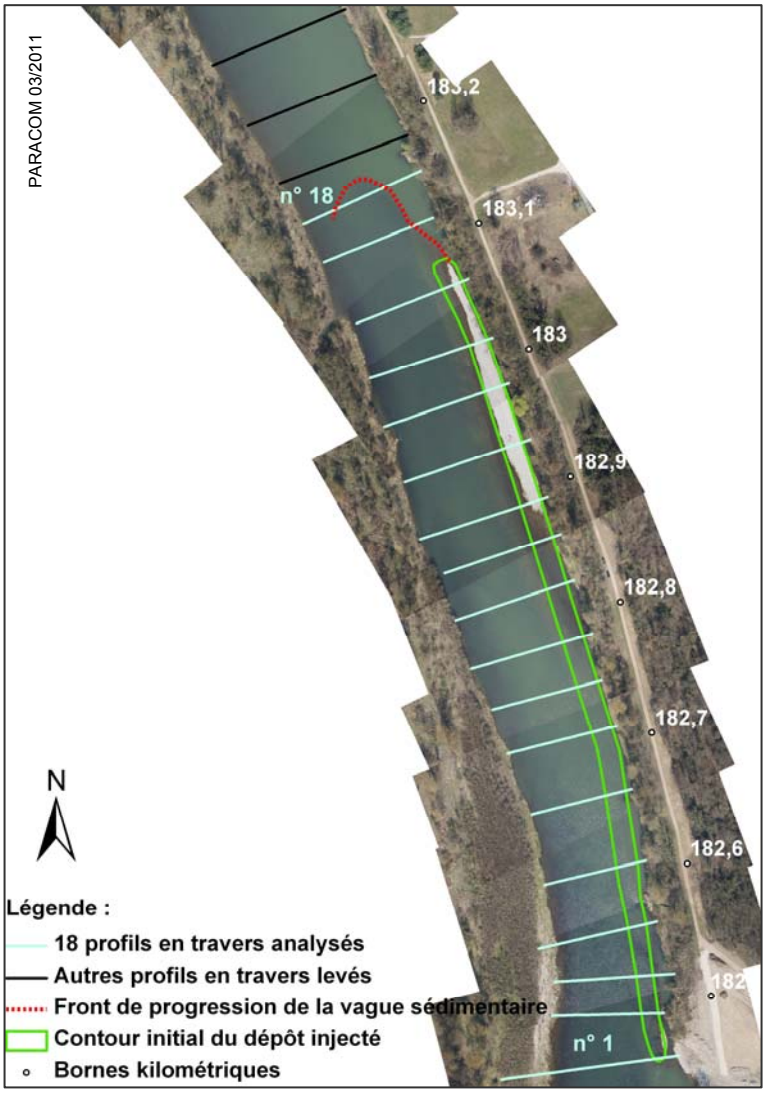
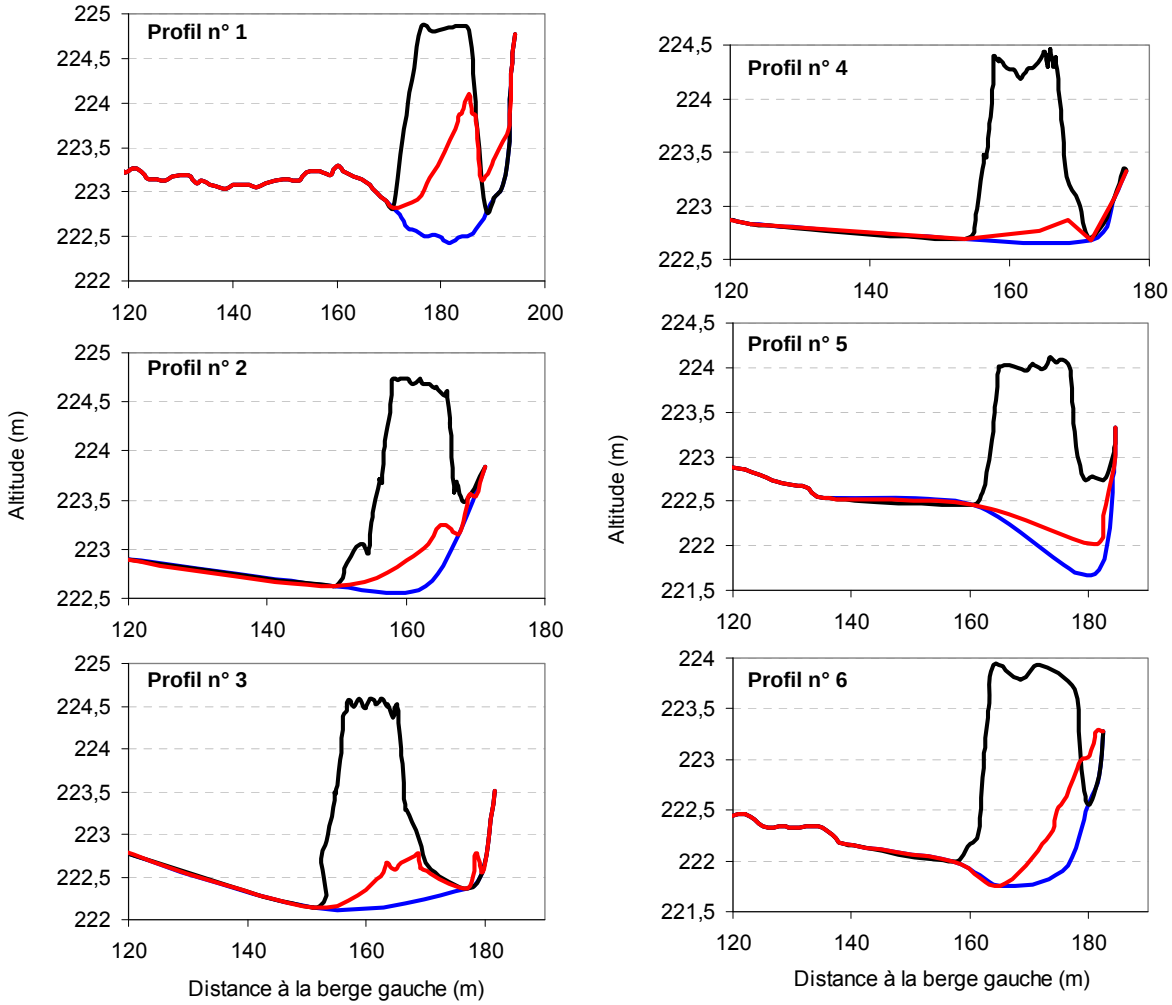


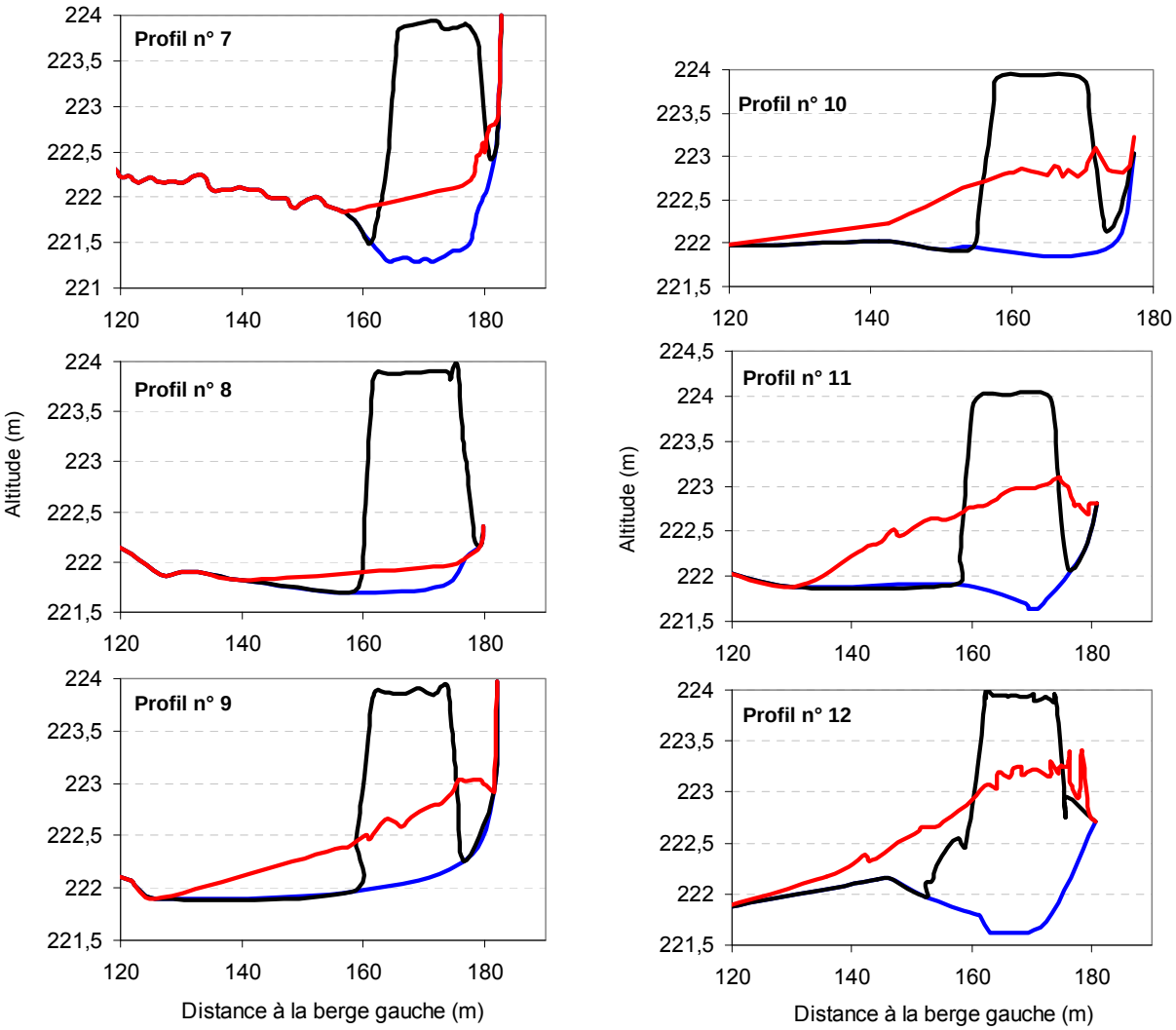
Figure 3.20 : Position des 18 profils en travers topographiques et bathymétriques dont les résultats sont présentés dans le chapitre 3

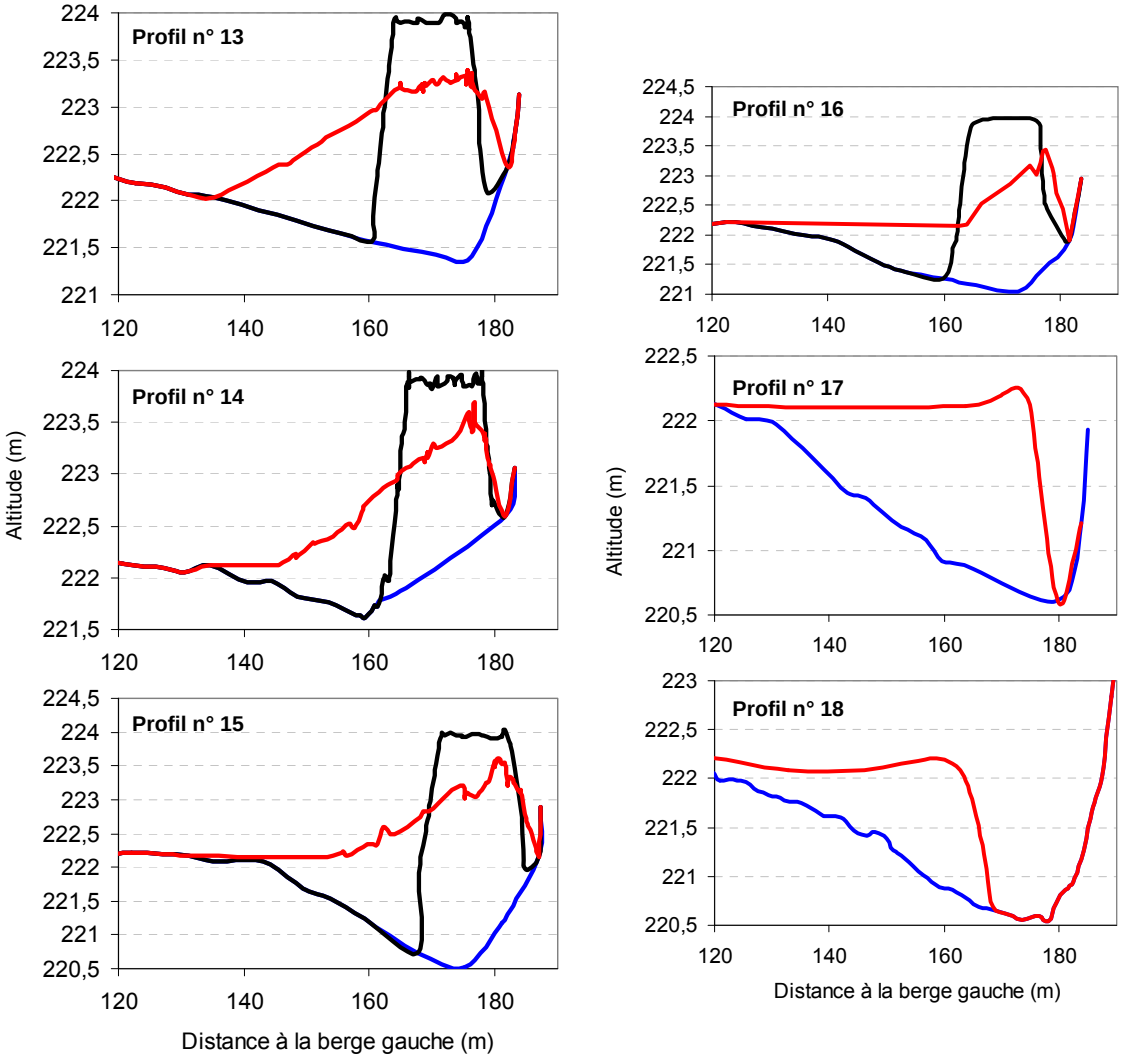
L'essentiel du sédiment injecté entre les profils n° 1 et 9 a été exporté vers l'aval, comme en témoigne la superposition des profils pré- et post-crue (fig. 3.21). **Entre les profils n° 10 et 16, le dépôt initial est encore en place sur une hauteur de 1 à 2 m. Il semble avoir subi un étalement gravitaire du côté du chenal**. Cette partie du tronçon de suivi a en outre reçu les sédiments provenant du déstockage de la charge à l'amont. Ainsi, **le fond du lit entre les profils n° 10 et 16 a enregistré un exhaussement compris entre 0,5 et 1 m et une translation du talweg vers la rive gauche**. Enfin, **le front de progression de la vague sédimentaire, caractérisé par les profils n° 17 et 18, montre une épaisseur d'environ 1,5 m**.

Sur les trois pages suivantes :

Figure 3.21 : Profils en travers topographiques et bathymétriques n°1 (amont) à 18 (aval) levés sur le tronçon de recharge avant les travaux (état zéro, bleu), après les travaux (état zéro bis, noir) et après la crue de décembre 2010 (état 1, rouge)


Profil n° 1
Profil n° 2
Profil n° 3
Profil n° 4
Profil n° 5
Profil n° 6
Altitude (m)
Distance à la berge gauche (m)
Etat zéro (avant l'injection)
Etat zéro bis (après l'injection et avant les crues)
Etat 1 (après les premières crues)


Profil n° 7
Profil n° 8
Profil n° 9
Profil n° 10
Profil n° 11
Profil n° 12
Altitude (m)
Distance à la berge gauche (m)



Les épaisseurs de dépôt et d'érosion mises en évidence ici sont significatives, dans la mesure où elles sont largement supérieures à la marge d'erreur associée aux levés topographiques et bathymétriques qui est d'environ 10 cm.

Par ailleurs, l'analyse des volumes sédimentaires mobilisés sur toute la largeur du lit mineur entre les états 0 et 1 indique un fond du lit quasiment en équilibre en amont du profil n° 9 (fig. 3.22), ce qui confirme que **le tronçon de recharge a été vanné sur les premiers 300 m amont**.

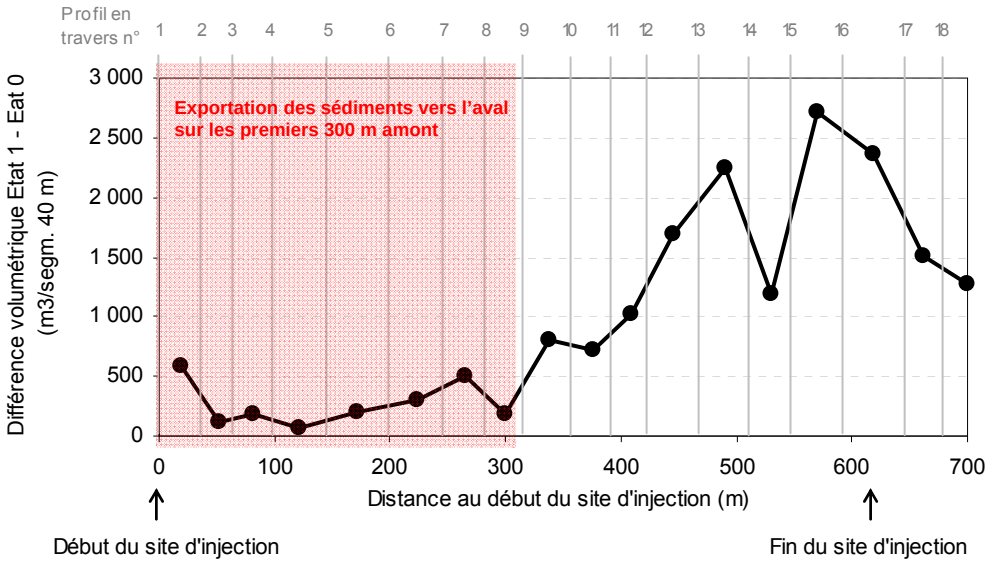


Figure 3.22 : Différence volumétrique entre les états 0 et 1 extraite des profils en travers (en m^3 par segments élémentaires d'environ 40 m)

Nous complétons à présent ces observations établies sur les changements de géométrie en quantifiant le déplacement des particules introduites grâce aux résultats du traçage sédimentaire.

2. Analyse du transport des particules introduites

2.1. Taux de détection des traceurs

La recherche des traceurs effectuée au cours de deux campagnes en mai 2011 et octobre 2011 a été entreprise entre la tête du dépôt avant qu'il soit repris par la crue de décembre 2010, et 100 m après sa terminaison aval, soit **un linéaire de 720 m et une surface prospectée de 6,1 ha** (fig. 3.23). Les deux bancs alternés localisés 400 m en aval du site d'injection ont également été prospectés. L'absence de traceurs confirme que **la vague sédimentaire n'a pas encore atteint ces bancs**.

Le taux de détection obtenu en mai 2011 est de **25 % (soit 373 traceurs)**. En octobre 2011, nous avons retrouvé 255 traceurs communs à la campagne précédente. Ces doublons ont servi à **déterminer si la charge s'est déplacée entre les deux campagnes**, sachant que deux crues potentiellement morphogènes (*i.e.* égales ou supérieures au débit-seuil de mise en mouvement de 1950 m^3/s à Bâle) sont survenues entre les deux mesures (cf. fig. 3.8) : le 14 juillet et le 10 octobre, un Q_{max} respectivement de 1945 m^3/s et 1978 m^3/s a été enregistré à Bâle. Il apparait que **84 % de ces traceurs ont été retrouvés à moins de 5 m de leur position en mai**, ce qui correspond à la marge d'erreur détectée lors des tests méthodologiques préliminaires ; 7 % ont été retrouvés entre 5 et 10 m ; 3 % entre 10 et 50 m ; 3 % entre 50 et 200 m ; et 3 % en position aberrante (retrouvés en amont de leur position initiale, et à plus de 5 m). Certains traceurs se seraient donc déplacés depuis mai, mais il s'agirait d'un **transport partiel de la charge injectée**, au regard des faibles pourcentages obtenus pour les distances de déplacement supérieures à 5 m.

Le taux de détection obtenu en sommant les traceurs retrouvés à l'issue des deux campagnes est de **42 % (soit 632 traceurs)**.

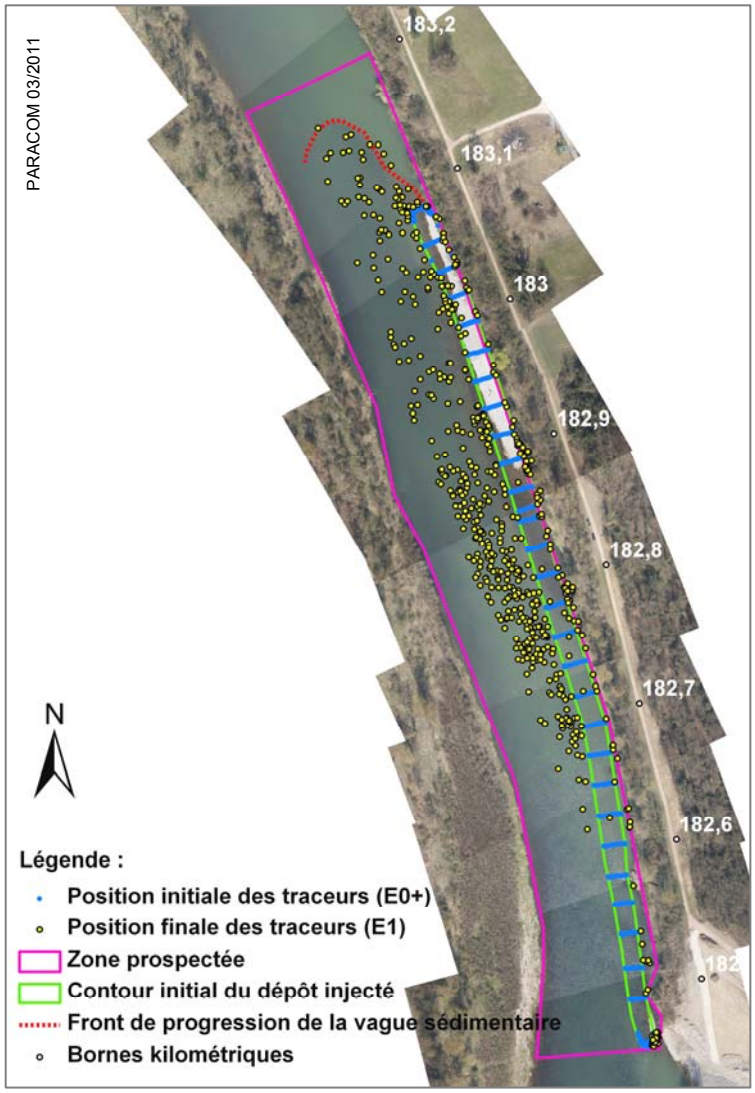


Figure 3.23 : Position des 632 traceurs retrouvés suite aux campagnes de prospection de mai 2011 et octobre 2011

Nous remarquons que le taux de détection tend à diminuer de l'amont vers l'aval (fig. 3.24). En effet, les traceurs qui avaient été déposés dans le tiers amont du site d'injection (entre les transects n° 1 et 12, soit environ 220 m) ont été plus fréquemment retrouvés (taux de retour de 41 % à 82 % selon les transects) que les traceurs qui avaient été déposés dans les deux tiers aval du site (entre les transects n° 13 et 30, soit environ 380 m, taux de retour de 0 % à 67 %). Ce résultat pourrait être expliqué par la progression de la charge déstockée en amont, qui aurait enfoui les traceurs localisés en aval. Les épaisseurs de dépôt mises en évidence par le suivi topographique (cf. précédemment : 0,5 - 2 m) sont en effet supérieures à la portée des antennes de détection (0,25 - 1 m), dans le cas de traceurs enfouis.

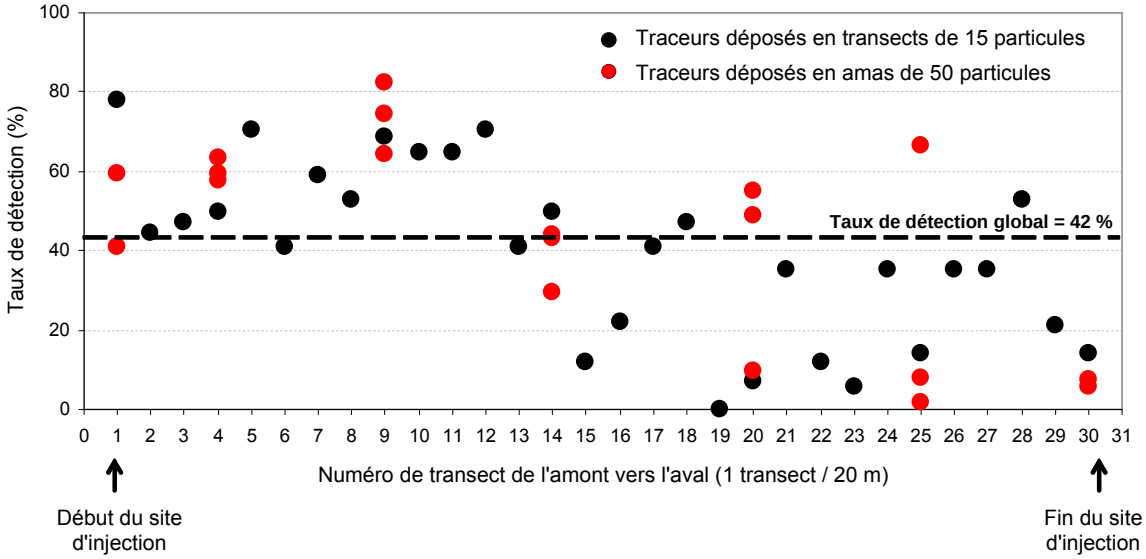


Figure 3.24 : Variation longitudinale du taux de détection en fonction de la position initiale des traceurs

2.2. Distances et trajectoires de déplacement des traceurs

Les 632 traceurs retrouvés ont parcouru en moyenne 147 m et au maximum 665 m au cours de la période d'étude (fig. 3.25).

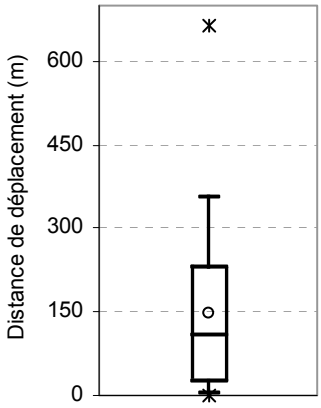


Figure 3.25 : Distances parcourues par les 632 traceurs retrouvés

Nous constatons que 12 % des traceurs ont parcouru moins de 5 m. Ceux-ci avaient tous été déposés en bordure du banc injecté ; les vecteurs étant dirigés systématiquement vers l'extérieur du banc, ces déplacements résulteraient d'un phénomène de **glissement de talus** plutôt que d'un véritable transport particulaire. Par ailleurs, nous avons remarqué de faibles taux de détection des traceurs qui avaient été déposés sur les bords, ce qui tendrait à confirmer que les particules ont parcouru une petite distance en glissant le long du talus (cas des traceurs retrouvés à moins de 5 m) et ont pu être enfouies trop profondément pour pouvoir être détectées (fig. 3.26). En outre, les faibles distances de transport engendrées par les glissements de talus renforcent la valeur de 5 m estimée lors des tests méthodologiques préliminaires, en-dessous de laquelle les déplacements ont été considérés comme non significatifs.

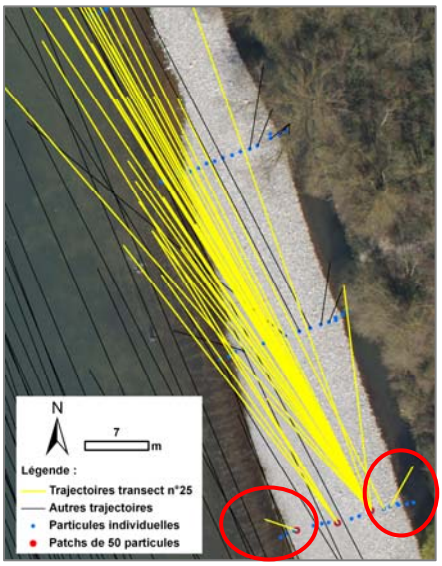


Figure 3.26 : Exemples de trajectoires de déplacement des traceurs et mise en évidence du phénomène de glissement de talus (entourés rouges) au niveau du transect n° 25

Il apparait enfin que l'ensemble des distances de transport suit une **distribution exponentielle** (fig. 3.27).

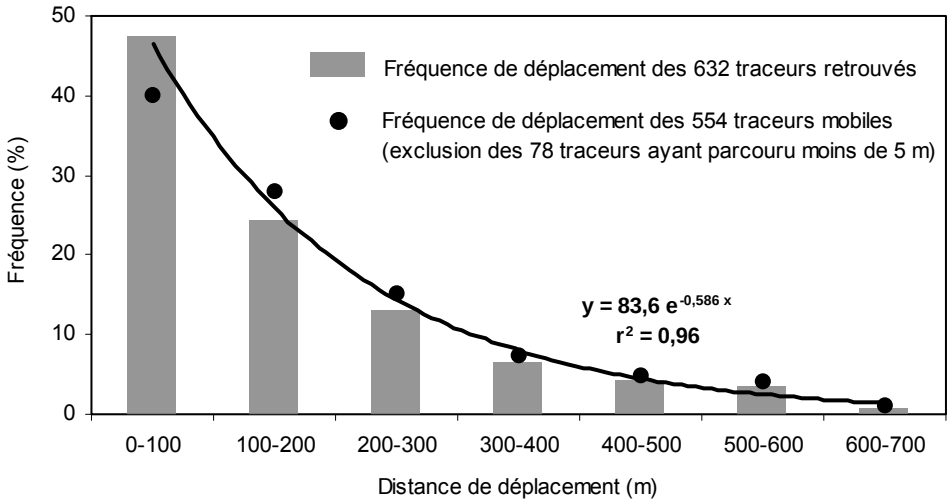


Figure 3.27 : Histogramme des fréquences de déplacement des traceurs

2.3. Distances de déplacement et taille des particules

Le suivi des particules déposées en amas permet de disposer d'une observation statistique de traceurs soumis aux mêmes conditions hydrauliques (Camenen *et al.*, 2010). Or, au sein de chaque amas, nous constatons une grande variabilité dans les distances (et les trajectoires) de déplacement, en particulier pour les amas qui avaient été déposés dans le tiers amont du site d'injection (amas n° 1 à 8 ; fig. 3.28). Cette variabilité nous amène à étudier le lien éventuel existant entre la taille des particules équipées et la distance parcourue.

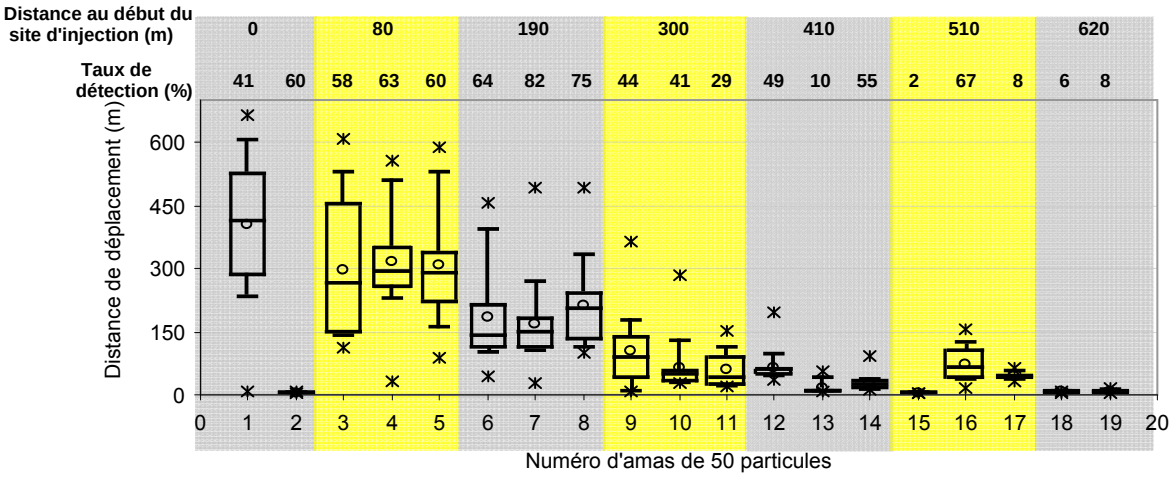


Figure 3.28 : Distances de déplacement des traceurs déposés en amas de 50 particules (pour la localisation de chaque amas, se référer à la fig. 3.12, a)

Des régressions linéaires effectuées entre la distance de déplacement et l'axe *b* d'une part, et la masse d'autre part, donnent des résultats identiques : pour 12 amas, les coefficients de détermination sont tous faibles, seuls 3 sur 12 sont supérieurs à 0,09. La relation est même contraire pour les 7 autres amas, avec toujours de faibles r^2. Ainsi, **il ne semble pas exister de relation claire entre la taille des particules et la distance parcourue**.

2.4. Logiques spatiales de déplacement des traceurs

L'examen des vecteurs de déplacement indique que **74 % des particules équipées ont été dispersées vers le centre du chenal**. Celles-ci ont également parcouru les plus grandes distances, d'un facteur d'environ 10 en comparaison de celles qui ont été exportées vers la rive droite (fig. 3.29). Les vitesses d'écoulement dirigées vers le chenal étaient vraisemblablement plus importantes.

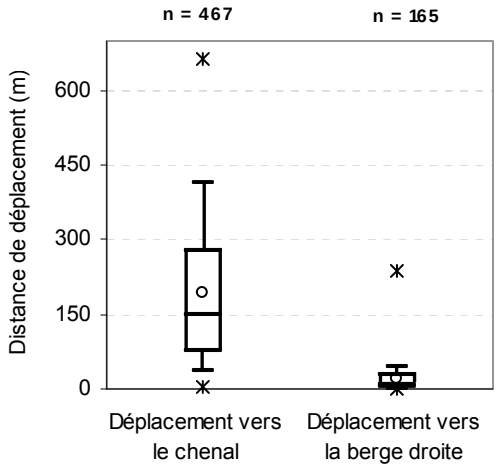


Figure 3.29 : Distances de déplacement des traceurs transportés vers le chenal ou vers la berge droite

2.4.1. Influence de la position latérale initiale sur le déplacement

L'analyse de la position initiale des traceurs révèle une frontière située à 38 % de la longueur des transects, en-dessous de laquelle les particules ont été transportées exclusivement vers le chenal (fig. 3.30). Il est probable que les traceurs déplacés vers la rive droite aient été piégés dans les mouilles à l'emplacement de l'ancien chenal secondaire ou derrière les épis, et ne soient plus mobilisés lors des prochaines crues.

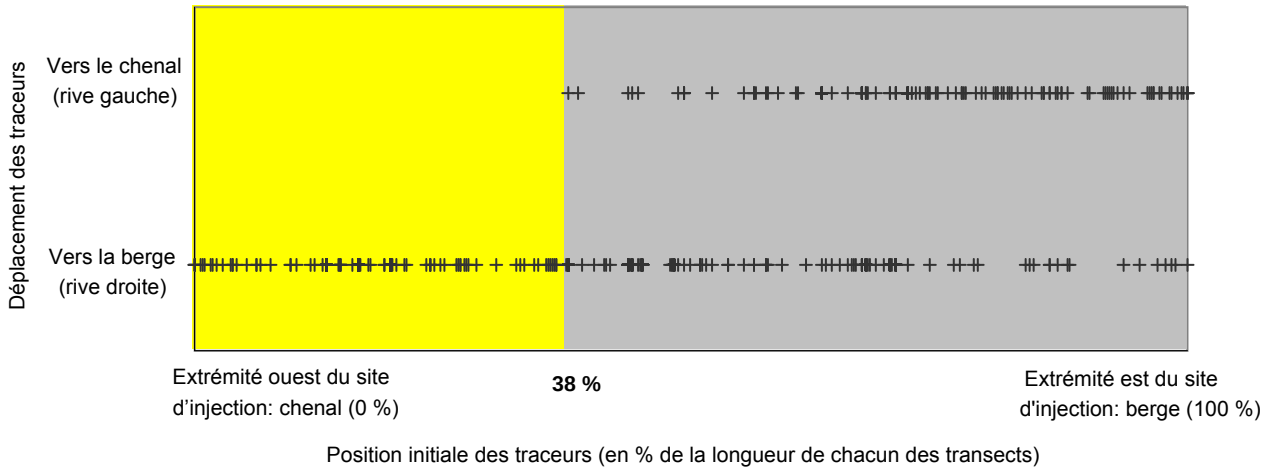


Figure 3.30 : Déplacement vers le chenal ou vers la berge droite en fonction de la position transversale initiale des traceurs

2.4.2. Influence de la position longitudinale initiale sur le déplacement

Nous remarquons qu'un gradient amont-aval se dessine dans la répartition des distances de transport (fig. 3.31) : **les traceurs qui avaient été déposés dans la partie amont du site d'injection se sont globalement déplacés plus loin que les traceurs qui avaient été déposés dans la partie aval**. Les particules introduites en amont auraient ainsi été soumises aux vitesses/contraintes les plus importantes.

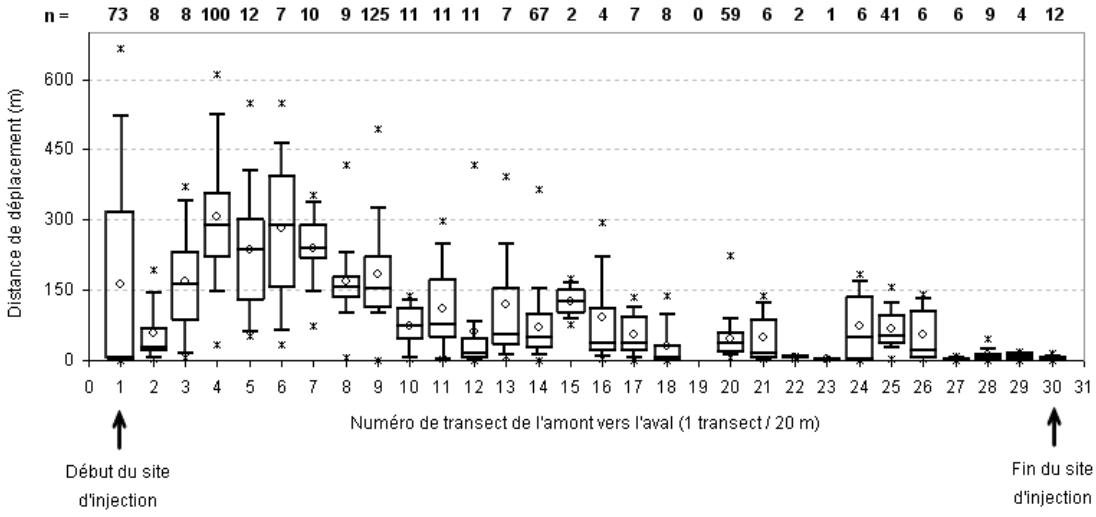


Figure 3.31 : Variation des distances de déplacement en fonction de la position longitudinale initiale des traceurs

Cependant, quelles que soient la position initiale et la distance parcourue, il est intéressant de remarquer que **les traceurs ont été retrouvés préférentiellement dans la partie médiane du tronçon d'injection**, soit entre les profils en travers topographiques et bathymétriques n° 7 et 13 (fig. 3.32). Ce résultat est cohérent avec l'analyse des changements de géométrie du lit qui avait révélé une exportation de la charge introduite dans la moitié amont du tronçon d'injection, et un dépôt dans la moitié aval et au-delà. En outre, la position des traceurs retrouvés le plus loin est cohérente avec la position du front de progression de la vague sédimentaire identifié sur les photographies aériennes.

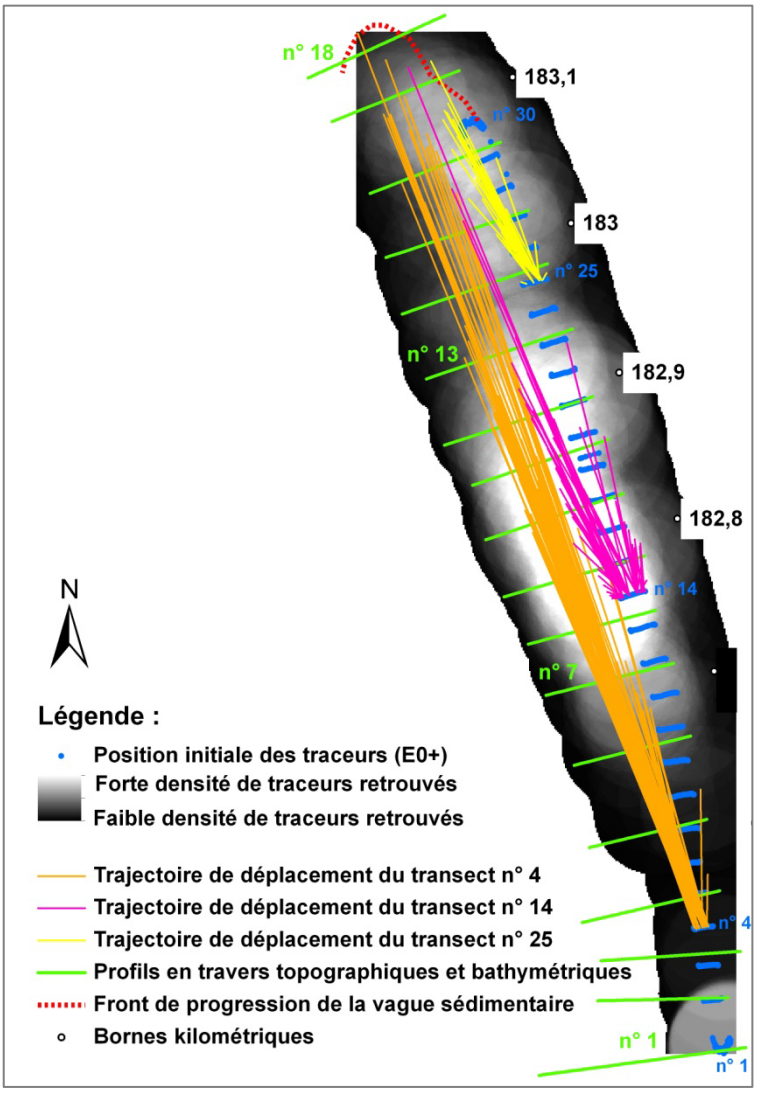


Figure 3.32 : Densité des traceurs retrouvés et exemples de trajectoires de déplacement

3. Analyse de l'influence de la recharge sur la taille du substrat

Les images aériennes ainsi que la position des traceurs retrouvés lors de l'état 1 ont permis de localiser le front de progression de la vague sédimentaire 80 m en aval de la terminaison initiale du dépôt. Par conséquent, les bancs localisés en aval n'ont pas encore enregistré de changements granulométriques. Les résultats concernant le suivi granulométrique obtenus à l'issue des états zéro, zéro bis et 1 sont cependant utiles pour (i) **caractériser le sédiment injecté**, (ii) **établir un**

premier bilan « avant-après » par comparaison du substrat en place sur les bancs et dans le chenal avant la recharge et du substrat au droit du site d'injection remanié par la crue, (iii) **avancer sur les questions méthodologiques relatives aux structures spatiales d'échantillonnage** afin d'optimiser les suivis ultérieurs en termes de temps de mesure et de pertinence des indicateurs extraits de ces mesures.

3.1. Caractérisation du sédiment injecté

Bien que la surface du dépôt injecté en novembre 2010 ait été travaillée par les engins de chantier, nous remarquons qu'elle était représentative d'une partie de la masse sédimentaire. Le D_{50} des cinq échantillons de 100 particules de type Wolman collectés sur la surface du dépôt (E0+) est en effet compris entre **13 et 19 mm**. Ces valeurs sont cohérentes avec deux des quatre échantillons de 100 particules de type Wolman collectés sur le site d'injection remanié par la crue (E1), présentant un D_{50} de **15 et 16 mm** (fig. 3.33). Les deux autres échantillons collectés après la crue montrent une granulométrie plus grossière, avec un D_{50} de **45 et 48 mm**. L'ensemble de ces valeurs concorde avec les sondages réalisés dans la zone d'excavation avant les travaux (Dittrich *et al.*, 2010), indiquant un D_{50} entre 12 et 46 mm à neuf profondeurs différentes (cf. fig. 3.5).

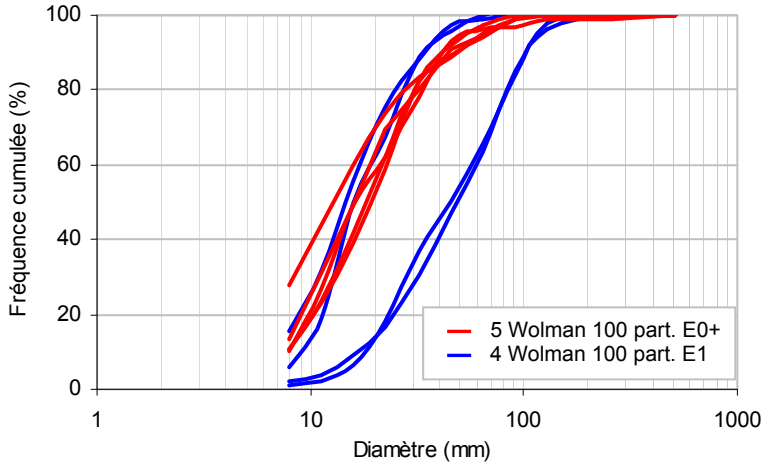


Figure 3.33 : Distribution granulométrique des échantillons de 100 particules de type Wolman collectés aux états zéro bis (E0+) et 1 (E1)

3.2. Evaluation des variations granulométriques avant-après recharge

Sur chaque banc et dans le chenal, la somme des échantillons de 10 particules permet de disposer d'un total largement supérieur à 100 (tableau 3.6). Les percentiles calculés sur ces sommes permettent de déterminer le D_{50} global de chaque unité morphologique.

Il apparait ainsi que les six bancs du tronçon de suivi échantillonnés lors de l'état zéro présentent un D_{50} global compris entre 22 et 83 mm. Le D_{50} global des deux secteurs échantillonnés dans le chenal est logiquement supérieur à celui des bancs : il est de 98 mm contre 52 mm au niveau du PK 183,8, et de 42 mm contre 22 mm au niveau du PK 184,8.

La partie terminale du site d'injection remanié par la crue et échantillonnée lors de l'état 1 présente un D_{50} global de 27 mm. Ce substrat est donc **jusqu'à plus de 3,5 fois plus fin** que les formes anciennes échantillonnées lors de l'état zéro (cas du chenal au PK 183,8) (tableau 3.6).

Etat	PK RG : rive gauche RD : rive droite	Unité morphologique B : banc CH : chenal	Nbre. d'échan. de 10 part. aléatoires	∑échan. de 10 part. aléatoires	D_{50} ∑échan. de 10 part. aléatoires (mm)
E0	PK 182,5 RG	B	10	100	83
	PK 183,8 RG	B	56	562	52
	PK 183,8 RG	CH	63	637	98
	PK 184 RD	B	58	581	65
	PK 184,8 RD	B	21	213	22
	PK 184,8 RD	CH	59	589	42
	PK 185,4 RD	B	10	101	45
	PK 185,56 RG	B	40	401	51
E1	Partie terminale du site d'injection (PK 183)	B & CH	186	1871	27

Tableau 3.6 : D_{50} des sommes d'échantillons de 10 particules collectés aux états zéro (E0) et 1 (E1) sur chaque unité morphologique (banc et chenal)

3.3. Comparaison des deux méthodes d'échantillonnage granulométrique

Sur chaque banc, il apparait que les distributions granulométriques calculées à partir de la somme des échantillons de 10 particules d'une part, et de la somme des échantillons de type Wolman de 100 particules d'autre part, sont proches (fig. 3.34) : **les différences sur le D_{50} sont comprises entre 1 et 36 %** (tableau 3.7).

Etat	PK RG : rive gauche RD : rive droite	Unité morphologique B : banc CH : chenal	∑échan. de 10 part. aléatoires	Σ échan. Wolman de 100 part.	D_{50} Σ échan. de 10 part. aléatoires (mm)	D_{50} Σ échan. Wolman de 100 part. (mm)	% Diff D_{50}
E0	PK 182,5 RG	B	100	103	83	82	1
	PK 183,8 RG	B	562	431	52	43	21
	PK 184 RD	B	581	322	65	66	1
	PK 184,8 RD	B	213	339	22	28	22
	PK 185,4 RD	B	101	319	45	70	36
	PK 185,56 RG	B	401	405	51	77	34
E1	Partie terminale du site d'injection (PK 183)	B & CH	1871	444	27	24	11

Tableau 3.7 : Comparaison des D_{50} calculés selon les deux méthodes d'échantillonnage aux états zéro (E0) et 1 (E1) sur chaque secteur

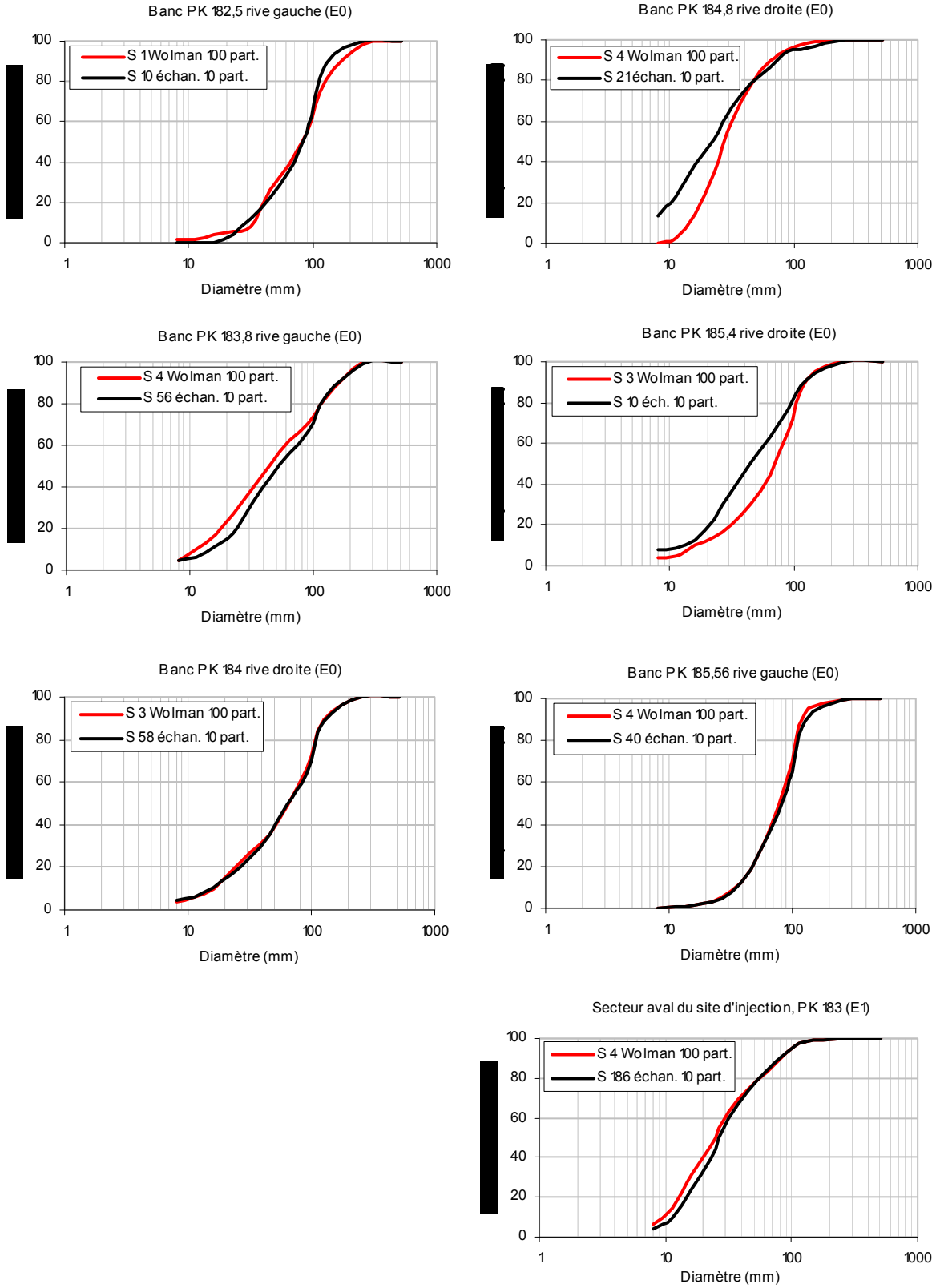


Figure 3.34 : Comparaison des distributions granulométriques calculées selon les deux méthodes d'échantillonnage et sur chaque secteur aux états zéro (E0) et 1 (E1)

Une analyse complémentaire à cette première comparaison des deux méthodes d'échantillonnage serait d'appliquer des *bootstrap* sur le total des cellules de 10 particules collectées sur chaque banc, voire sur les cellules localisées autour de chaque Wolman de 100 particules collecté en tête, milieu et queue des bancs, afin d'optimiser le maillage de l'échantillonnage spatialement intégré. Il s'agirait en effet de déterminer quelle taille minimale devraient avoir les cellules échantillonnées (espacement des cellules c_i et taille des sous-échantillons n_i) pour obtenir une estimation statistique du *Di* comparable entre les deux méthodes. Cette approche dépasse toutefois le cadre de la présente thèse. Des perspectives de recherche supplémentaires sont discutées plus en détail dans le chapitre suivant.

D/ Synthèse et discussion sur le suivi géomorphologique de la recharge expérimentale

1. Les apports scientifiques et méthodologiques du suivi

Nous synthétisons en D/1.1 les résultats obtenus à l'issue des quatre méthodes de mesure mobilisées pour analyser l'évolution du tronçon de recharge. Outre ce suivi géomorphologique, basé principalement sur l'acquisition de données *in situ*, une approche complémentaire, basée sur la **modélisation hydro-sédimentaire**, a été développée par l'IRSTEA dans le projet INTERREG (Béraud, 2012), afin d'aider à évaluer la pertinence de l'action et définir des scénarios de restauration sur le long terme, sur la base des simulations. Quelques résultats obtenus selon cette approche sont exploités en D/1.2 pour aider à interpréter les changements morphologiques observés *in situ*.

1.1 L'intérêt de l'imagerie aérienne et des mesures *in situ*

Les images aériennes et les relevés *in situ* acquis entre 2008 et 2011 dans le cadre du suivi géomorphologique ont permis de mesurer les premiers effets de la recharge expérimentale sur la géométrie du lit, sur le déplacement du sédiment injecté et sur la granulométrie du substrat.

1.1.1. Les apports du suivi de la géométrie du lit et du transport solide

Les méthodes employées, d'une part pour le suivi de l'évolution de la géométrie du lit (imagerie aérienne et mesures topographiques et bathymétriques), d'autre part pour le suivi de la mobilité de la charge introduite (traçage sédimentaire), ont permis d'établir des liens cohérents. **Cela confirme la pertinence et la complémentarité des techniques mobilisées à deux échelles, la forme fluviale et la particule**. Le suivi a en effet permis d'apporter les éléments de connaissance suivants :

Les débits compris entre **500 et 600 m^3/s** dans le Vieux Rhin (cas des deux épisodes de crue survenus entre mai 2011 et octobre 2011) semblent entrainer un **transport « partiel »** de la charge, avec tout au plus des remaniements locaux qui enfouissent et délogent une partie des particules. Ce constat validerait ainsi l'estimation du débit-seuil de mise en mouvement, d'une valeur de 550 m^3/s sur cette partie du Vieux Rhin (EDF R&D 2009).

Les changements morphologiques observés après la crue biennale du 9 décembre 2010, où **1100 m^3/s** ont transité dans le Vieux Rhin, démontrent que des conditions de **transport « généralisé »** (*full mobility* ; Frey et Church, 2010, cités par Chapuis, 2012) ont été atteintes. En effet, la quasi-totalité du sédiment injecté dans la moitié amont du tronçon de recharge (premiers 300 m) a été exportée vers l'aval. D'après les résultats du traçage, les sédiments déstockés se sont déposés principalement dans la partie médiane du tronçon de recharge (220 m entre les profils en travers

topographiques et bathymétriques n° 7 et 13), quelle que soit la position initiale des particules. Ceci met en lumière le processus de migration de la forme fluviale vers l'aval. Le même phénomène avait été observé sur un banc de convexité de la rivière d'Ain (Rollet, 2007), où des traceurs déployés dans la partie amont du banc avaient été retrouvés au même niveau que les traceurs déployés plus en aval. Dans le cas du Rhin, le sédiment érodé en amont a été dispersé vers le centre du chenal, et a nappé le fond sur des épaisseurs variant entre 50 cm et 1 m. L'exhaussement du centre du chenal a également été favorisé par des glissements de talus intervenus sur le bord ouest de la forme injectée. Il est cependant difficile de dissocier la part de dépôt provenant de ces étalements gravitaires, de la part de dépôt provenant du déstockage à l'amont. La conséquence de ces deux phénomènes est un comblement de l'ancien lit et une translation du talweg vers la rive gauche. Enfin, le front de dispersion de la vague sédimentaire se situe 80 m en aval de la fin initiale du site d'injection. Dans cette partie terminale, les épaisseurs de dépôt atteignent 1,5 m.

Le traçage sédimentaire a par ailleurs révélé **une absence de tri granulométrique en conditions de transport généralisé**, entre les classes de 45 mm à 128 mm. Cependant, il est important de rappeler que ce suivi rend compte de la mobilité des particules au sein d'une forme artificielle. Après ces premiers épisodes de crue, la géométrie du chenal et l'imbrication des particules sur le fond du lit sont à présent « naturelles », et un transport sélectif sera susceptible de se produire lors des crues ultérieures. De même, des modèles exponentiels, puissances ou gamma de distribution des distances de déplacement pourront être testés à l'issue des prochaines campagnes de mesure (Hassan *et al.*, 1991 ; Gintz *et al.*, 1996, cités par Liébault *et al.*, 2012 ; Lamarre et Roy, 2008).

Le suivi a également contribué à apporter des éléments méthodologiques nouveaux pour la quantification du transport solide. En effet, le taux de détection que nous avons obtenu à l'issue du traçage des particules injectées (42 %) est satisfaisant, au regard de ceux obtenus sur des systèmes fluviaux de dimension avoisinant ou dépassant celle du Vieux Rhin, tels que l'Ain (25 et 36 % ; Rollet, 2007) et la Durance (41 % ; Chapuis, 2012). **Ces résultats encourageants confirment le potentiel d'utilisation des transpondeurs passifs pour le traçage sédimentaire dans un chenal large et profond comme le Vieux Rhin**. Plusieurs améliorations restent cependant à apporter au protocole de recherche des traceurs par bateau. En effet, pour l'instant les moyens humains et matériels ne sont pas optimisés : le système de détection et le DGPS ne sont pas couplés, et l'enregistrement n'est pas automatique. Le relevé de la position mobilise un opérateur, et l'identifiant de chaque traceur doit être noté sur un carnet par un autre opérateur. Ces opérations manuelles peuvent générer des erreurs, susceptibles d'expliquer les traceurs retrouvés en position aberrante, et elles sont consommatrices en personnel. **Le couplage des équipements et l'automatisation de l'enregistrement mériteraient d'être développés**. Il s'agit d'une vraie piste à explorer, car à l'heure actuelle aucune société ne commercialise un tel dispositif.

58 % des traceurs n'ont pas été retrouvés à l'issue des campagnes de recherche. Il est peu vraisemblable que ces traceurs aient migré en aval de la zone prospectée, au regard de la position du front de dispersion de la vague sédimentaire extraite des images aériennes, des relevés

topographiques, et enfin de l'absence de « trainée » dans la position des traceurs retrouvés. Les traceurs manquants auront plutôt été enfouis, du fait (i) du remaniement de la masse sédimentaire, (ii) du phénomène de glissement de talus, sous une épaisseur supérieure à la portée des antennes, comme en témoigne la superposition des profils topographiques. Les traceurs non retrouvés ont également pu être manqués lors des recherches. En effet, même si la seconde campagne a été consacrée exclusivement à la recherche des traceurs pendant cinq jours, il demeure difficile d'être exhaustif dans un chenal large de 100 fois la taille de l'antenne de détection. Mais, il est important de souligner que les particules non retrouvées pourront l'être lors des prochains suivis, quand le substrat aura été à nouveau remanié par les crues.

1.1.2. Les apports du suivi du substrat

Les analyses menées lors du suivi granulométrique ont permis de caractériser la distribution du sédiment injecté, d'établir un premier bilan « avant-après » des effets de la recharge sur la taille du substrat, et d'amorcer des recherches sur la comparaison des méthodes d'échantillonnage.

Les premiers résultats ont révélé que le matériau injecté (D_{50} = 27 mm) est jusqu'à plus de 3,5 fois plus fin que le substrat caractérisant le fond du lit avant l'intervention (D_{50} = 98 mm). D'autres variations granulométriques seront attendues au cours des prochaines crues du fait du phénomène de tri durant la dispersion de la charge.

La comparaison des deux méthodes de mesure, par échantillonnage spatialement intégré en cellules de 10 particules aléatoires réparties sur toute la surface des bancs d'une part, et échantillonnages de type Wolman de 100 particules réalisés en tête, milieu et queue des bancs d'autre part, a indiqué des distributions granulométriques cohérentes. La prochaine analyse à entreprendre afin d'améliorer les futures campagnes de suivi et consolider les indicateurs qui seront extraits des mesures, serait d'optimiser le maillage de l'échantillonnage spatialement intégré en procédant par *bootstrap* (Rice et Church, 1996) sur le total des échantillons, dans le but de déterminer quelle taille minimale devraient avoir les cellules pour obtenir une estimation statistique du *Di* comparable entre les deux méthodes. Une autre piste à explorer serait de tester la discrimination statistique *a posteriori* des unités sédimentaires au sein des unités morphologiques (banc, chenal) échantillonnées en cellules de 10 particules. La procédure, décrite par Bunte et Abt (2001), est basée sur le test *Z* de Fisher appliqué aux couples de cellules adjacentes c_i et c_{i+1} échantillonnés sur chaque unité morphologique. Ce test consiste à détecter l'existence d'une différence statistique entre les diamètres moyens D_{mi} et D_{mi+1}, et donc l'existence d'une limite sédimentaire entre les deux cellules. La carte des unités sédimentaires ainsi constituée serait alors utile pour identifier des changements granulométriques temporels, par comparaison des cartes obtenues à chaque état du suivi.

1.2. L'intérêt de la modélisation hydraulique

C. Béraud (2012) a simulé la recharge expérimentale sur la base du logiciel 2D Rubar20ts développé par l'IRSTEA. Les données topographiques et bathymétriques que nous avons collectées aux états zéro et zéro bis ont servi à calibrer le modèle. En retour, la modélisation est susceptible de fournir des informations sur la configuration des écoulements en crue (hauteurs d'eau, champs des vitesses, contraintes au fond), ce patron hydraulique étant difficilement mesurable sur le terrain. Nous avons cherché à exploiter quelques résultats issus des simulations pour tenter d'affiner notre interprétation des changements morphologiques observés *in situ*.

La comparaison des lignes de courant du champ hydrodynamique avec les trajectoires de déplacement des traceurs semble révéler une analogie pour les traceurs qui avaient été déposés en bordure du dépôt (cas de la trajectoire n° 1, fig. 3.35 ; Béraud, 2012). Le phénomène de glissement de talus serait donc plus important que considéré lors des analyses précédentes, dans la mesure où les glissements initient la mise en mouvement de la forme, en emportant dans un premier temps les sédiments vers le centre du chenal, où ces derniers sont ensuite exportés vers l'aval suivant la direction du champ des vitesses (Béraud, 2012). La superposition des lignes de courant et des trajectoires de déplacement des traceurs permet également de corriger *a posteriori* les trajectoires rectilignes fournies par ArcGis. Cette correction affecte peu l'analyse statistique des distances de transport menée précédemment (cf. C/2.2), étant donné que les traceurs sont restés sur le tronçon de recharge, qui est globalement rectiligne. En revanche, il sera important de prendre en compte ce paramètre lors des prochains suivis, quand les traceurs auront été transportés jusque dans le coude de Niffer.

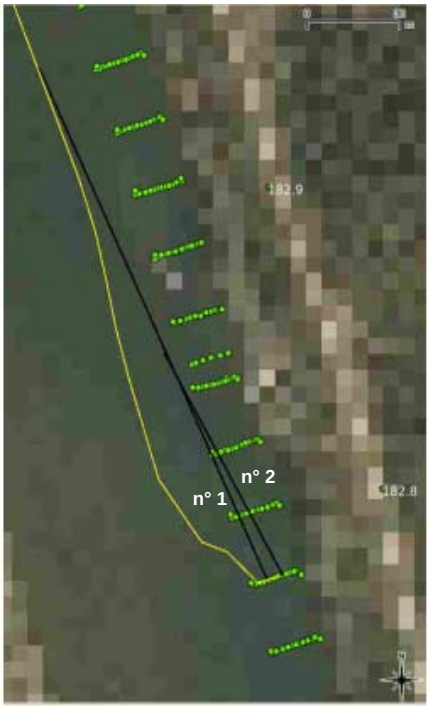


Figure 3.35 : Ligne de courant (en jaune) et trajectoires de déplacement des traceurs (en noir) (Béraud, 2012)

Nous nous attendions à observer des valeurs de contraintes au fond plus élevées dans la partie amont du tronçon de recharge, au regard du suivi topographique et des distances de déplacement des traceurs. Les simulations ne semblent pas l'indiquer (fig. 3.36). Il est probable que la maille du modèle, égale à 10 m transversalement, limite les possibilités de reconstitution des conditions hydrodynamiques contribuant à la mise en mouvement d'un dépôt injecté de 15 m de large. Béraud (2012) conclut que le modèle ne permet actuellement de rendre compte que partiellement des transferts transversaux et de reproduire les volumes sédimentaires exportés vers l'aval.

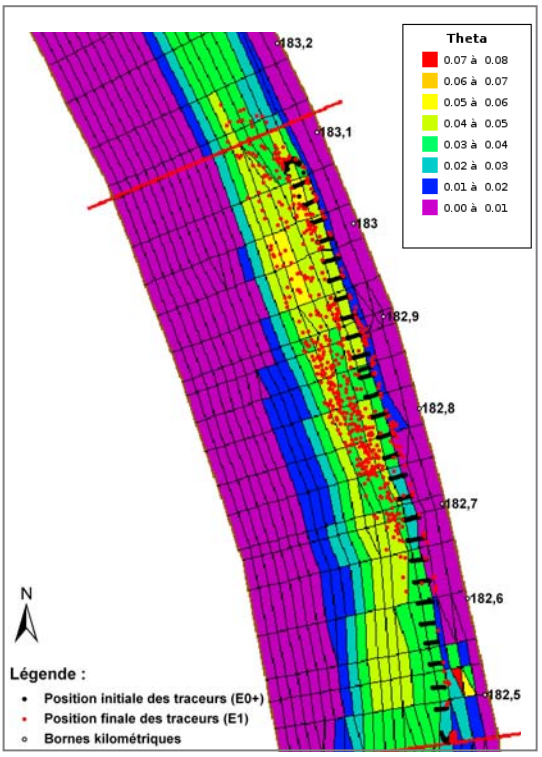


Figure 3.36 : Contrainte au fond adimensionnelle et mobilité des traceurs : la contrainte au fond a été calculée en injectant en condition limite amont du modèle l'hydrogramme de crue de la station de Rheinweiler entre novembre 2010 et février 2011 (modifié d'après Béraud, 2012)

2. Les apports opérationnels du suivi

Un des enjeux de la recharge expérimentale était d'analyser les risques environnementaux liés à la manipulation du compartiment physique avant de pouvoir envisager des opérations de restauration de plus grande ampleur. A l'issue des résultats du suivi géomorphologique, il semblerait que **ces risques soient modérés** (tableau 3.8) :

Les deux risques immédiats liés au fonctionnement des casiers IRP ont en effet été écartés avec l'épisode de crue de décembre 2010 qui a remobilisé rapidement le sédiment injecté et a évité sa végétalisation. Les trois risques à plus long terme liés (i) à la mise en danger des ouvrages existants (ponts, barrage de Breisach…) du fait d'un déplacement éventuellement trop rapide de la charge vers l'aval, (ii) aux sapements de berges pouvant conduire à l'altération des habitats riverains, (iii) à la déstabilisation du pavage et à la reprise de l'incision du lit, semblent modérés au regard du mode de propagation de la vague sédimentaire, par nappage du fond, avec une

vitesse de progression standard au regard de la littérature (~ 300 m/an) et sans générer une incision.

	Risques	Question posée	Méthodes utilisées	Paramètres étudiés	Résultats du suivi / risques
Echéance immédiate (compatibilité avec les casiers IRP)	Elévation de la ligne d'eau	Quel est l'impact de la recharge sur les conditions d'écoulement ? Y aura-t-il des crues morphogènes ?	Imagerie aérienne, hydrologie	Morphologie du tronçon de suivi, débits	Risque écarté
	Végétalisation du dépôt	Le sédiment injecté sera-t-il végétalisé ?	Imagerie aérienne, hydrologie	Morphologie du tronçon de suivi, débits	Risque écarté
Echéance à court terme (suivi de 2 ans) ➔ hypothèses de long terme	Transfert rapide vers l'aval et mise en danger des ouvrages	Quelles sont les distances de déplacement ?	Transpondeurs passifs	Distances de déplacement	Risque modéré
			Mesures topographiques et bathymétriques	Répartition des épaisseurs et volumes sédimentaires	Risque modéré
	Sapements de berges, altération des milieux riverains	Quelles sont les trajectoires de déplacement ?	Transpondeurs passifs	Trajectoires de déplacement (longueurs, directions)	Risque modéré
	Déstabilisation du pavage	Quel est l'impact de la recharge sur le fond du lit (reprise de l'incision) ?	Mesures topographiques et bathymétriques	Répartition des érosions et des dépôts	Risque modéré

Tableau 3.8 : Synthèse des risques environnementaux identifiés en amont de l'expérience et résultats du suivi

Il sera important de poursuivre le suivi à la suite des prochaines crues morphogènes afin de consolider ces conclusions sur le long terme. Les résultats de cette première phase apparaissent en tout cas satisfaisants par rapport à la pertinence de l'action (choix du site, choix de la forme injectée, remise en mouvement pour une crue finalement modeste). Cette validation partielle des modalités de recharge encourage à réitérer l'opération à plus grande échelle, de manière à pouvoir observer de vrais gains sur les habitats (sur la granulométrie du substrat et sur les formes fluviales).

En effet, à l'heure actuelle il apparait difficile d'évaluer les gains morphologiques et écologiques de la recharge (tableau 3.9), dans la mesure où ce premier observé restitue la mise en mouvement d'une forme artificielle. La charge est à présent en place pour observer une évolution « naturelle » à la suite des prochaines crues. Des bénéfices sur les habitats sont espérés ultérieurement.

Les premiers résultats obtenus à l'issue du suivi permettent d'ores et déjà de s'attendre à une mobilité du fond du lit et à un affinement du substrat, ce qui constitue les deux éléments fondamentaux pour augmenter les surfaces piscicoles fonctionnelles. Cependant, les changements que nous avons mis en évidence s'avèrent limités spatialement : le sédiment remanié est finalement resté sur le tronçon de recharge ; les distances de transport, de l'ordre de quelques centaines de mètres, sont globalement inférieures aux superficies couvertes par les différents méso-habitats, cartographiés dans une précédente étude (Arnaud *et al.*, 2010), ainsi qu'aux distances inter-seuils qui sont de l'ordre de 1 000 m (fig. 3.37).

	Thématique	Question posée	Méthodes utilisées	Paramètres étudiés	Résultats du suivi / gains
Echéance à court terme (suivi de 2 ans) ↑ hypothèses de long terme	Substrat	La recharge permet-elle une diversification et un affinement du substrat ?	Echantillonnage spatialement intégré, Wolman	D_{50}, D_m…	Gain probable
	Géométrie du lit	La recharge permet-elle une mobilité du fond du lit et une diversification des méso-habitats ?	Levés topographiques, imagerie aérienne	Répartition des volumes sédimentaires, superficies de faciès	Gain probable

Tableau 3.9 : Synthèse des gains morpho-écologique identifiés en amont de l'expérience et résultats du suivi

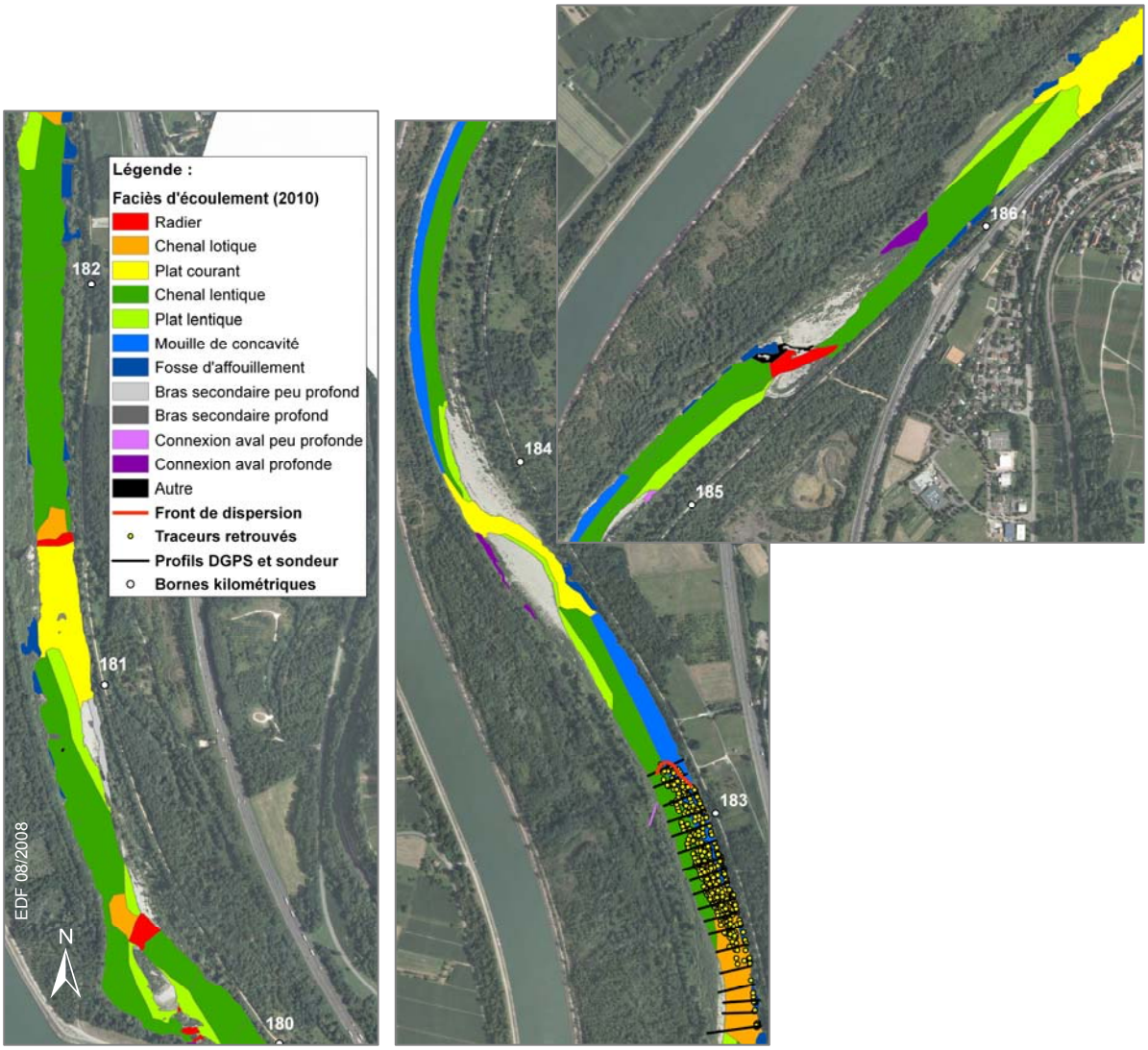


Figure 3.37 : Cartographie des faciès d'écoulement entre le bouchon de Kembs (PK 180) et la fin du tronçon de suivi (PK 186,5) (d'après Arnaud *et al.*, 2010). Les profils en travers topographiques et la position des traceurs retrouvés et du front de la vague sédimentaire ont été indiqués

Nous pensons qu'il sera nécessaire d'**injecter de plus grands volumes, pour que la recharge bénéficie à des tronçons plus longs**. Cette préconisation est appuyée par le fait que la charge a tendance à se disperser sur le fond plutôt qu'à translater. Si le phénomène présente l'avantage d'affecter presque toute la largeur de la section, l'épaisseur du nappage apparait limitée en

comparaison de l'épaisseur injectée, et cette épaisseur tend à diminuer au fur et à mesure de la propagation de la charge vers l'aval. En outre, la dispersion a tendance à prédominer sur la translation quand les volumes injectés sont augmentés (Sklar *et al.*, 2009). Il sera donc d'autant plus important d'injecter davantage de matériaux, pour restaurer le fond du lit sur une épaisseur suffisante.

La dernière partie de ce chapitre ouvre la réflexion sur les indicateurs pouvant permettre d'évaluer les effets morphologiques de futures opérations de recharge sédimentaire entreprises sur le Vieux Rhin. Pour ce faire, nous dressons tout d'abord un état de l'art des indicateurs couramment employés pour la caractérisation de l'état hydro-morphologique et écologique des cours d'eau. Puis, grâce aux études antérieures et aux résultats du suivi géomorphologique présenté dans ce chapitre, nous proposons un jeu d'indicateurs exploitables pour le suivi et l'évaluation des futures actions.

E/ Vers l'élaboration d'indicateurs pour l'évaluation de la restauration du Vieux Rhin

1. Eléments bibliographiques sur les indicateurs d'évaluation

1.1. Définitions

Un indicateur se définit, au sens large, comme **une grandeur observable et mesurable, qui fournit des informations sur l'état d'un système et sur les processus qui le régissent** (Lorenz *et al.*, 1997). Il peut être quantitatif, semi-quantitatif ou qualitatif. De plus, **un indicateur représente de manière simplifiée des processus complexes**, et sa principale fonction est d'**aider à la communication,** dans la mesure où il contribue à favoriser les échanges d'information entre les différents acteurs impliqués dans un projet (Smeets et Weterings, 1999).

Les indicateurs utilisés dans le cadre d'opérations de restauration servent à **évaluer si les résultats de l'action sont positifs ou non**. Morandi et Piégay (2011) constatent une confusion fréquente entre « indicateur » et « paramètre » : le paramètre renvoie à une donnée brute, tandis que l'indicateur peut être une combinaison de plusieurs paramètres, et il intègre la notion d'**évolution par rapport à une référence temporelle (l'état du site avant restauration) ou spatiale (l'état d'un site de contrôle)** (Morandi, 2010).

Le nombre d'indicateurs potentiellement utilisables dans le contexte de la restauration est virtuellement infini, sélectionner les plus pertinents n'est donc pas une tâche aisée (Cairns *et al.*, 1993). Il est pourtant indispensable d'apporter le plus grand soin à leur choix, si l'on souhaite mettre en place un suivi sur le long terme. Ainsi, un bon indicateur devrait présenter le plus grand nombre de propriétés parmi les suivantes (Cairns *et al.*, 1993 ; Bakkes *et al.*, 1994 ; Lorenz *et al.*, 1997 ; Bazin et Barnaud, 2002 ; Palmer *et al.*, 2005 ; Woolsey *et al.*, 2005) :

- *détermine si les objectifs fixés au début du projet ont été atteints ;*
- *facile à mesurer :* défini opérationnellement et mesuré selon une procédure standard, avec de faibles marges d'erreur ;
- *facile à interpréter :* réponse théorique connue ;
- *sensible aux ajustements analysés :* réponse différenciée aux perturbations naturelles et anthropiques et faible variabilité de la réponse ;
- *en adéquation spatiale avec la réalité du projet* : fréquence spatiale d'échantillonnage définie en fonction de la résolution souhaitée et de la vitesse de propagation des changements ;
- *en adéquation temporelle avec la réalité du projet :* fréquence temporelle d'échantillonnage définie en fonction de l'hydrologie et du type de restauration, et fournissant une information suffisamment rapide pour adapter la gestion ;

- *biologiquement et socialement pertinent ;*
- *intégratif :* représente des gradients clés et résume les informations de plusieurs indicateurs non mesurés ;
- *potentiellement mesurable en continu ;*
- *permettant de prédire des changements en réponse à une perturbation ;*
- *direct :* fournit une information plus précise ;
- *peu couteux et minimisant les efforts de mesure ;*
- *non destructif ;*
- *existence de références ou de valeurs indicatives ;*
- *applicable à beaucoup de sites :* base pour le transfert des connaissances.

1.2. Catégories d'indicateurs d'évaluation utilisés en restauration

Le choix de la catégorie d'indicateurs dépend des questions auxquelles le suivi tente de répondre. En effet, si la question est de savoir si la restauration a entrainé de réels **changements écologiques**, des **indicateurs biologiques** seront utilisés. Aussi appelés biomarqueurs, ce sont sans doute les plus connus, car c'est essentiellement sur eux que s'appuie la DCE pour définir le *« bon état écologique »* des masses d'eau (Morandi, 2010). Les indicateurs mesurés sur les cours d'eau français sont l'Indice Biologique Global Normalisé (IBGN), l'Indice Biologique Diatomées (IBD) et l'Indice Poissons Rivière (IPR) (MEEDDAT, 2009). Par ailleurs, la présence/absence et la fréquence d'espèces emblématiques comme le Castor, la Loutre, le Saumon ou le Martin-pêcheur, sont des indicateurs souvent mis en avant dans les programmes de restauration, car plus marquants pour le grand public (Woolsey *et al.*, 2005).

Si la question est de savoir si la restauration a entrainé des **changements morphologiques,** en faisant l'hypothèse que ces derniers entraineront des changements biologiques sans doute non visibles immédiatement mais à plus long terme, des **indicateurs abiotiques** seront utilisés. Ceux-ci sont considérés comme pionniers en matière d'évaluation, permettant de détecter les premiers signes d'une évolution du site restauré. Ce sont ces indicateurs qui sont développés sur le Vieux Rhin, en raison des multiples risques liés aux changements morphologiques associés à la manipulation du compartiment physique.

Contrairement aux indicateurs biologiques, aucun indicateur abiotique standard n'est imposé par la DCE dans la mesure où la physico-chimie et l'hydro-morphologie interviennent surtout comme facteurs explicatifs des conditions biologiques (MEEDDAT, 2009). De nombreux outils de caractérisation hydro-morphologique des cours d'eau ont cependant été développés au niveau régional. En France, chaque grand bassin a élaboré sa méthode à partir de 1990 : QUALPHY (évaluation de la QUALité PHYsique des cours d'eau) dans le bassin Rhin-Meuse, SEQ Physique (Système d'Evaluation de la Qualité des eaux) en Artois-Picardie, EVACE (EValuation

de l'Anthropisation des Cours d'Eau) en Adour-Garonne, ROM (Réseau d'Observation des Milieux) et REH (Réseau d'Evaluation des Habitats) en Loire-Bretagne (Barnetche *et al.*, 2010). Il existe également des outils focalisés sur les méso-habitats, tels que l'Indice d'Attractivité Morphodynamique (Degiorgi *et al.*, 2002) et la clé de détermination des faciès d'écoulement (Malavoi et Souchon, 2002). Les outils SYRAH-CE (SYstème Relationnel d'Audit Hydromorphologique des Cours d'Eau) et CarHyCE (Caractérisation de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau) sont en développement depuis 2006, dans le but d'harmoniser l'ensemble de ces méthodes à l'échelle nationale (Chandesris *et al.*, 2008 ; Barnetche *et al.*, 2010). Des approches similaires ont été développées à l'étranger, par exemple en Angleterre (*River Habitat Survey* ; Raven *et al.*, 2002), Allemagne (*LAWA-vor-Ort* ; Raven *et al.*, 2002), Espagne (*Indice Hydrogeomorfologico ;* Ollero *et al.*, 2007), Italie (*Morphological Quality Index* ; Rinaldi *et al.*, 2011), et hors du champ d'application de la DCE, en Suisse (*Système Modulaire Gradué, méthode Ecomorphologie* ; Zeh Weissmann *et al.*, 2009), Australie (*River Styles Framework ;* Brierley et Fryirs, 2005), Etats-Unis (*Natural Channel Design* ; Rosgen, 1994, 1996). Nous notons que ces méthodes ne sont pas centrées sur l'évaluation des actions de restauration à proprement parlé (Morandi, 2010). Elles constituent néanmoins un cadre utile pour l'élaboration d'indicateurs de l'évolution morphologique d'un site restauré.

Enfin, mentionnons l'existence d'une troisième catégorie indicielle, les **indicateurs d'évaluation socio-économique** qui, ici encore, ne sont pas spécifiquement centrés sur les opérations de restauration. La réflexion est plus globale, sur la manière de passer des valeurs écologiques à des valeurs économiques et sociales, à travers notamment l'analyse du prix à payer pour améliorer les fonctions écologiques ou récréatives des écosystèmes (Cauglhan et Oakley, 2001, cités par Morandi, 2010).

1.3. Modes d'utilisation d'indicateurs dans un projet de restauration

Les valeurs prises par les indicateurs permettent d'estimer le degré de réussite de l'action de restauration, en fonction de chacun des objectifs fixés au démarrage d'un projet. Woolsey *et al.* (2005) proposent de dresser une **matrice d'évaluation**, renseignant les couples de valeurs « avant-après travaux » obtenus pour chaque indicateur (fig. 3.38, a). La matrice distingue cinq catégories, correspondant à une amélioration ou à une dégradation plus ou moins importante du site restauré par rapport à son état initial (fig. 3.38, b).

a)

Valeur après aménagement \ Valeur avant aménagement	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.0	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0.1	+	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0.2	+	+	0	–	–	–	–	–	–	–	–
0.3	+	+	+	0	–	–	–	–	–	–	–
0.4	+	+	+	+	0	–	–	–	–	–	–
0.5	++	++	+	+	+	0	–	–	–	–	–
0.6	++	++	++	+	+	+	0	–	–	–	–
0.7	++	++	++	++	++	+	+	0	–	–	–
0.8	+++	+++	++	++	++	++	+	+	0	–	–
0.9	+++	+++	+++	+++	+++	++	++	++	++	0	–
1.0	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	0

b)

Symbole	Variation	Signification
–	Dégradation, échec	La différence entre l'état après aménagement et l'état initial est négative.
0	Absence de modification, statu quo	La différence entre l'état après aménagement et l'état initial est nulle.
+	Légère amélioration, faible succès	La différence entre l'état après aménagement et l'état initial est positive. L'attribution de la catégorie dépend de l'état initial.
++	Amélioration moyenne, succès moyen	La différence entre l'état après aménagement et l'état initial est positive. L'attribution de la catégorie dépend de l'état initial.
+++	Forte amélioration, succès important	La différence entre l'état après aménagement et l'état initial est positive. L'attribution de la catégorie dépend de l'état initial.

Figure 3.38 : a) Matrice d'évaluation renseignant les couples de valeurs standardisées des indicateurs avant et après travaux. b) Définition des catégories d'amélioration ou de dégradation du site restauré par rapport à son état initial (Woolsey *et al.*, 2005)

La synthèse des résultats sous la forme d'un **diagramme-radar** permet d'offrir une vision générale de la réussite du projet (fig. 3.39) : les différents domaines d'objectifs sont placés autour de cercles emboités, de rayon croissant selon le degré d'accomplissement (fig. 3.39) (Woolsey *et al.*, 2005).

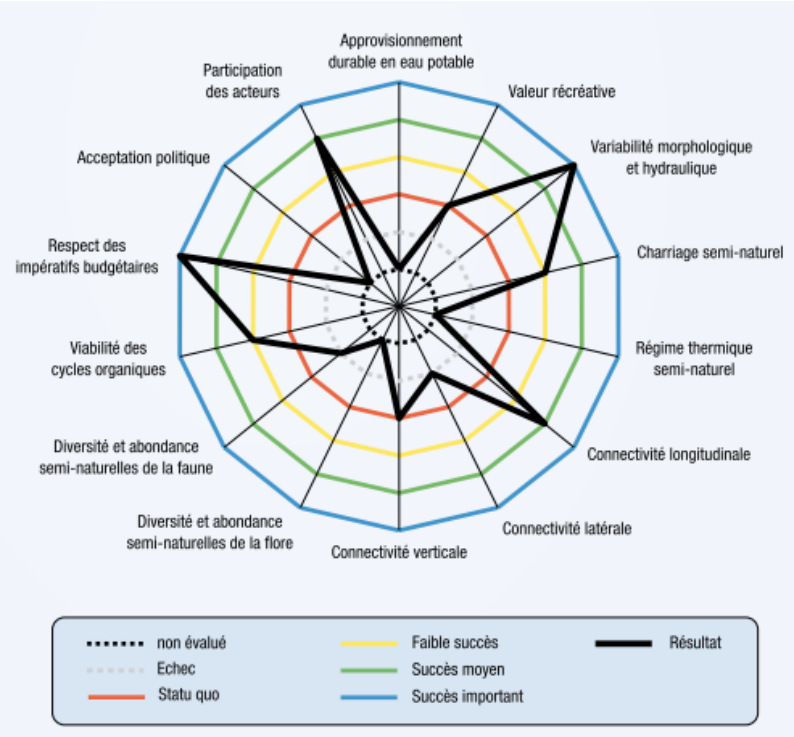


Figure 3.39 : Représentation en diagramme-radar des résultats d'une action de restauration : le projet présenté à titre d'exemple a particulièrement bien réussi dans les domaines « variabilité morphologique et hydraulique », «connectivité longitudinale » et « respect des impératifs budgétaires » ; la « connectivité latérale » et « diversité et abondance semi-naturelles » sont moins probants (Woolsey *et al.*, 2005)

2. Proposition d'indicateurs d'évaluation pour la restauration du Vieux Rhin

Etant donné que la fonction principale des indicateurs est de déterminer si les objectifs formulés au début du projet ont été atteints, il apparait important de rappeler ici les enjeux motivant la restauration morpho-écologique du fleuve.

2.1. Rappel des objectifs de la restauration du Vieux Rhin

Le diagnostic de la dégradation hydro-morphologique du Vieux Rhin établi qualitativement lors d'études antérieures (Humbert et Descombes, 1985 ; Maire, 1997 ; Peiry, 2003 ; ECOTEC, 2004, 2006) et complété par une analyse quantitative dans le cadre du chapitre 2 de la présente thèse, a mis en évidence trois principaux dysfonctionnements sur lesquels concentrer les efforts de restauration (cf. chapitre 2 ; F/2) :

1. **le faible transport solide**, qui altère les processus fluviaux, le renouvellement des formes et affecte la dynamique alluviale des écosystèmes aquatiques et terrestres ;
2. **la faible largeur du lit actif**, qui limite les possibilités de diversification des formes et des habitats aquatiques, quand bien même les apports sédimentaires seraient augmentés ;
3. **la réduction de l'amplitude des crues**, qui diminue la fréquence de remobilisation de la charge de fond, caractérisée par une granulométrie très grossière.

Les expérimentations engagées en 2009 dans les projets INTERREG « Redynamisation du Vieux Rhin » et EDF « Erosion maîtrisée » (Piégay *et al.*, 2010 ; Clutier *et al.*, 2012 ; cf. chapitre 1 ; C/4.3) ont été orientées avec justesse sur les deux premiers points précédemment évoqués. Ces interventions consistent en une introduction artificielle de sédiments, dont le suivi géomorphologique a fait l'objet du présent chapitre, et en des recharges assistées par érosion latérale. En outre, l'apport artificiel (par injection) ou naturel (par érosion des berges) de sédiments plus fins que le pavage en place permet dans une certaine mesure d'intégrer le troisième point précédemment cité, puisque la remobilisation de ces graviers nécessitera moins de compétence des écoulements.

Ces opérations répétées à grande échelle devraient permettre de dynamiser les processus morphologiques et d'améliorer, à terme, la qualité des écosystèmes composant les compartiments aquatique et terrestre du tronçon fluvial (Peiry, 2003 ; ECOTEC, 2004, 2006 ; Piégay *et al.*, 2010) :

Pour le compartiment aquatique, l'enjeu principal est d'augmenter la richesse et l'abondance des communautés de poissons, notamment le Saumon atlantique. Cela nécessite un fond du lit plus mobile, bien oxygéné et non colmaté, un substrat de granulométrie plus fine, mieux adaptée au frai, et une diversification des types de faciès d'écoulement (rapports vitesse/profondeur).

Pour le compartiment terrestre, il s'agit de favoriser le renouvellement de la végétation riveraine, avec la réapparition des stades pionniers de la succession alluviale sur les bancs mobiles. Les bancs mobiles devraient également constituer de nouveaux milieux fonctionnels pour les invertébrés terrestres et l'avifaune nicheuse. L'avifaune des falaises d'érosion, telle que le Martin-pêcheur, devrait bénéficier de nouveaux habitats grâce à la réactivation des processus latéraux. De plus, la richesse spécifique des annexes hydrauliques serait accrue grâce à l'amélioration des connectivités avec le chenal principal et la nappe.

Les enjeux motivant la restauration du Vieux Rhin peuvent ainsi être déclinés en **six objectifs morpho-écologiques** (fig. 3.40). Les risques hydrauliques analysés dans ce chapitre (cf. D/2) ainsi que les enjeux ayant trait à l'augmentation de la valeur récréative du tronçon fluvial (bancs de graviers, variété d'écoulements, chenaux multiples = paysages attractifs, zones de baignade et de repos… Piquette, in prep.) aboutissent à **cinq objectifs sociétaux**. Enfin, le respect des contraintes budgétaires constitue **un objectif économique** général. Ces trois domaines d'objectifs caractérisent le champ des contraintes de la durabilité évoqué par Woolsey *et al.* (2005 ; cf. chapitre 1 ; fig. 1.19).

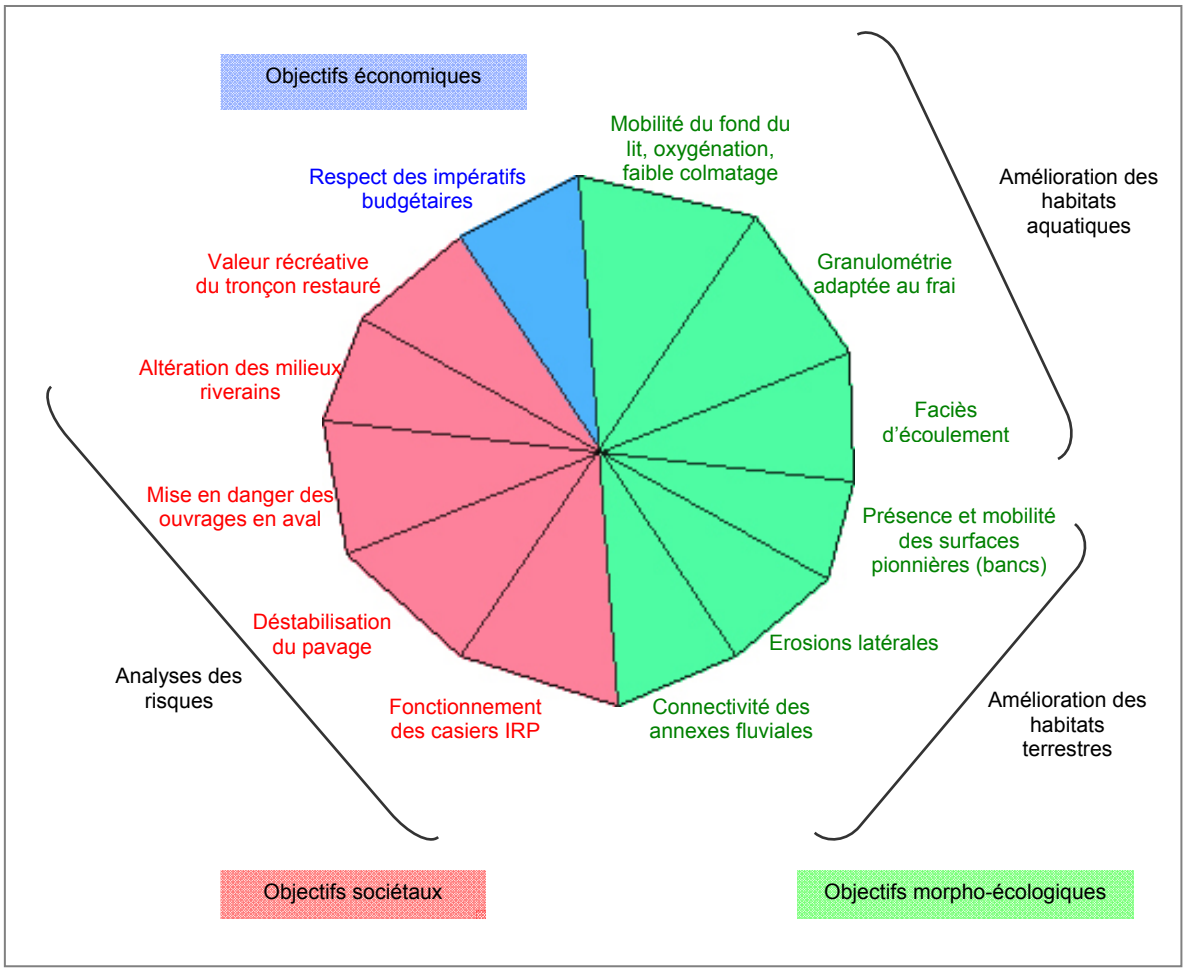


Figure 3.40 : Synthèse des objectifs morpho-écologiques, sociétaux et économiques identifiés pour la restauration du Vieux Rhin

2.2. Proposition d'indicateurs physiques d'évaluation de la restauration

Des indicateurs de suivi environnemental ont été définis en 2006 par le bureau d'études ECOTEC afin d'évaluer les opérations de restauration engagées par EDF dans le cadre du renouvellement de concession de l'aménagement de Kembs. Une douzaine d'indicateurs physiques propose ainsi de mesurer les effets du relèvement du débit réservé et de l'érosion contrôlée des berges sur différentes temporalités, de l'immédiat au long terme (tableau 3.10). Certains de ces indicateurs visent à estimer le transport solide dans le tronçon fluvial restauré, généré par les apports issus des érosions latérales et le renouvellement des formes fluviales associé à ce transport (« mobilité du lit », « présence de bancs », « niches d'érosion latérale », « indice de tressage »). D'autres indicateurs sont focalisés sur la caractérisation des zones exploitables par les populations de poissons (« indice de colmatage du substrat », « surface et qualité de l'habitat piscicole »).

Les méthodes de mesure des indicateurs proposés par ECOTEC (2006) reposent essentiellement sur l'imagerie aérienne et sur des observations semi-quantitatives *in situ* (tableau 3.10).

Indicateur	Type	Evolution attendue/valeur initiale	Echéance[1]	Méthodes et protocoles de suivi	Périodicité du suivi
Hydrologie	*Facteur explicatif du milieu*			Contrôle du débit réservé	En continu
Température de l'eau	*Facteur explicatif du milieu*			Enregistreurs en zones lotiques et annexes hydrauliques	Cycle annuel couplé au suivi biologique
Profondeurs, vitesses, Fr, Re	*Facteur d'analyse du milieu*			Mesures sur des transects	A définir (tous les 6 ans ?)
Mobilité du lit	Qualitatif	Augm.	Moyen terme	Imagerie aérienne	Tous les 6 ans et après les grandes crues ?
Indice de colmatage du substrat	Qualitatif	Réd.	Moyen à long terme	A définir (observations sur stations ?)	Tous les 6 ans ?
Types de faciès d'écoulement	Semi-quantitatif	Augm., diversification	Immédiat, puis évolution liée à l'érosion maîtrisée	Imagerie aérienne, observations de terrain	Tous les 6 ans et après les grandes crues ?
Surface et qualité de l'habitat piscicole	Quantitatif	Augm.	Moyen terme	Mesures sur des transects, modélisation	Tous les 6 ans ?
Présence de bancs	Semi-quantitatif	Augm.	Moyen terme	Imagerie aérienne	Tous les 6 ans et après les grandes crues ?
Niches d'érosion latérale	Quantitatif	Augm. (13 km à terme)	Long terme	Imagerie aérienne, observations de terrain	Tous les 6 ans et après les grandes crues ?
Surface mouillée	Quantitatif	Augm.	Immédiat	Imagerie aérienne, mesures GPS	Tous les 6 ans et après les grandes crues ?
Indice de tressage	Semi-quantitatif	Augm.	Long terme	Imagerie aérienne	Tous les 6 ans et après les grandes crues ?
Connectivité des milieux annexes	Quantitatif	Augm. nombre de jours de connexion	Court terme puis évolution liée à l'érosion maîtrisée	Modélisation	En continu (déduit de l'hydrologie et de la modélisation)

[1] immédiat = < 5 ans ; court terme = 5-10 ans ; moyen terme = 10-15 ans ; long terme = 25 ans

Tableau 3.10 : Synthèse des indicateurs proposés par ECOTEC (2006) pour le suivi du milieu physique

Les données obtenues dans ce chapitre, concernant les effets de la recharge expérimentale sur la géométrie du lit, sur le déplacement des particules et sur la granulométrie du substrat, nous permettent de proposer un **jeu d'indicateurs physiques d'évaluation quantitative des futures recharges sédimentaires** (tableau 3.11). En outre, l'exploitation de l'état « zéro éco-morphologique » réalisé sur l'ensemble du Vieux Rhin par imagerie aérienne et validation *in situ* dans le cadre d'une étude préliminaire aux actions de restauration engagées par EDF (Arnaud *et al.*, 2010) permet d'**ajouter le relèvement du débit réservé et l'érosion maîtrisée des berges aux actions pouvant être évaluées grâce à ces indicateurs** (cas des trois derniers indicateurs listés dans le tableau 3.11).

Certains des indicateurs proposés ici sont communs à la liste d'ECOTEC (2006) (« mobilité du lit », « présence de bancs », « faciès d'écoulement »…). L'apport en est que les méthodes de mesure sont complétées grâce aux protocoles de terrain éprouvés lors du suivi géomorphologique de la recharge expérimentale. De plus, les indicateurs ont été élaborés pour permettre d'évaluer directement (X) l'atteinte d'un objectif, ou indirectement (*) l'atteinte d'un ou plusieurs objectifs appartenant aux domaines définis précédemment. L'atteinte de l'objectif lié à la valeur récréative du tronçon fluvial sera éventuellement examinée à travers l'ensemble des indicateurs proposés.

Caractéristiques des indicateurs					Domaines d'objectifs évalués par l'indicateur									
					Objectifs morpho-écologiques						Objectifs sociétaux			
					Amélioration des habitats aquatiques			Amélioration des habitats terrestres			Analyse des risques			Valeur récréative du tronçon fluvial restauré
Thème	Paramètres étudiés	Type	Evolution attendue/ valeur initiale	Méthodes de mesure	Mobilité du fond, oxygénation, faible colmatage	Granulo-métrie adaptée au frai	Faciès d'écoule-ment diversifiés	Présence et mobilité de surfaces pionnières (bancs)	Erosions latérales	Connecti-vité des annexes fluviales	Fonctionne-ment des casiers IRP	Déstabi-lisation du pavage	Mise en danger des ouvrages, altération des milieux riverains	
Mobilité du lit	* Distances et trajectoires de déplacement * Répartition des volumes sédimentaires	Quantitatif	Augmentation	* Traceurs * Mesures topo/ bathy, imagerie aérienne (modèles bathy)	X		*	*				X (altitude du fond du lit)	X	X
Taille du substrat	D_{50}, D_m…	Quantitatif	Réduction	Echantillonnage spatialement intégré, Wolman ➔ à optimiser	*	X	*							X
Faciès d'écoulement (vitesses, profondeurs)	Présence / absence, %, superficies	Quantitatif	Diversification	Mesures topo/ bathy, imagerie aérienne, observations *in situ*	*		X				X (ligne d'eau)			X
Présence de bancs	Superficie	Quantitatif	Augmentation	Imagerie aérienne	*			X						X
Niches d'érosion latérale	Longueur	Quantitatif	Augmentation	Imagerie aérienne, observations *in situ*					X	*				X
Linéaire de berges artificialisées	Longueur	Quantitatif	Réduction	Imagerie aérienne, observations *in situ*					X	*				X
Surface mouillée	Superficie	Quantitatif	Augmentation ?	Imagerie aérienne, observations *in situ*						X				X

Tableau 3.11 : Indicateurs d'évaluation morpho-écologique et sociétale proposés dans la présente étude

Conclusion générale

A/ La trajectoire temporelle d'évolution d'un tronçon fluvial anthropisé et les implications pour la gestion

Les ajustements géomorphologiques enregistrés par des systèmes fluviaux consécutivement à des changements climatiques et/ou des perturbations anthropiques survenus depuis 150 ans ont été largement étudiés dans la littérature, en particulier ceux portant sur les cours d'eau européens alpins et périalpins (Tricart et Bravard, 1991 ; Bravard et Peiry, 1993 ; Marston *et al.*, 1995 ; Warner, 2000 ; Liébault et Piégay, 2002 ; Arnaud-Fassetta, 2003 ; Surian et Rinaldi, 2003). La modification du style fluvial, l'incision du lit et la rétraction de la bande active communément constatées dans ces cas résultent le plus souvent de la conjonction de trois facteurs ayant affecté les débits liquides et la fourniture sédimentaire : la fin de la détérioration climatique du Petit Age Glaciaire (1550-1850), les changements d'occupation des sols (déprise agro-pastorale essentiellement, dans la partie supérieure des bassins versants), et les aménagements du lit mineur (chenalisation, régularisation, extractions de granulats et/ou construction de barrages).

Dans le cas du Rhin entre Kembs et Breisach, il apparait que les principales évolutions morphologiques observées au cours du 19ème siècle et au début du 20ème siècle, et mises en évidence dans le chapitre 2 de la présente thèse, ne sont pas dues uniquement aux travaux de correction entrepris à cette époque (1842-1876). L'assèchement de la plaine rhénane, la modification de la complexité du tracé en plan de l'hydrosystème et l'incision du lit sont en effet à analyser sous l'angle d'une temporalité plus longue. Celle-ci intéresse l'évolution post-würmienne du profil en long, qui a abouti à un enfoncement jusqu'à 25 m dans cette moitié méridionale du Rhin supérieur (Schmitt, 2010), et la métamorphose fluviale des tresses vers les anastomoses qui s'est opérée au cours de l'Holocène, essentiellement dans la partie terminale du tronçon d'étude (Ollive, 2007 ; Schmitt, 2010).

La régularisation et la construction du barrage de Kembs effectuées dans le lit du Rhin corrigé entre 1930 et 1959 sont intervenues dans des conditions de débits vraisemblablement déjà modifiées du fait des facteurs précédemment cités : travaux de correction antérieurs qui ont contribué à purger le système d'une partie de sa charge grossière et à mettre en place un pavage d'incision (Peiry, 2003), chenalisations et constructions de barrages entreprises dans le bassin versant en amont de Bâle à partir de 1868 (Chavaz et Gygax, 1964 ; Kolly, 1959). La mise en service du barrage de Kembs a en outre largement conditionné l'évolution morphologique ultérieure du Vieux Rhin, principalement de deux façons : (i) en favorisant la végétalisation des champs d'épis exondés après la mise en débit réservé, ce qui a conduit à une rétraction de la bande active de 20 %, (ii) en ralentissant la vitesse d'incision du lit jusqu'à une valeur médiane inférieure à 19 fois celle d'avant l'implantation du barrage, ce phénomène étant vraisemblablement expliqué par une réduction de la fréquence de dépassement des débits-seuils de mise en mouvement de la charge de fond (550 et 1000 m^3/s dans les secteurs amont et aval du Vieux Rhin, respectivement ; EDF R&D, 2009) d'un facteur 22 et 58.

Au terme de l'analyse rétrospective menée dans le chapitre 2 de la présente thèse, **trois principales altérations hydro-morphologiques étant à l'origine de la perte de fonctionnalités écologiques ont été identifiées : (i) le transport solide déficitaire (~ 16 000 m^3/an), sur un fond de lit grossier et partiellement pavé, (ii) la faible largeur du corridor fluvial, (iii) la réduction de l'amplitude des crues du fait de la dérivation de 1400 m^3/s dans le Grand Canal d'Alsace**. Le Vieux Rhin présente néanmoins une dynamique morphologique résiduelle, caractérisée par des érosions des berges et du fond du lit et par la formation de nouveaux bancs en réponse aux fortes crues, en particulier aux trois crues centennales enregistrées en 1994, 1999 et 2007. Le diagnostic des dysfonctionnements que nous avons établi aide à concentrer les futurs efforts de restauration sur les processus effectivement dégradés, et à formuler des objectifs d'intervention réalistes qui tiennent compte des changements, réversibles ou irréversibles, et des besoins sociétaux actuels (Dufour et Piégay, 2009).

Il apparait que **la reconstitution de la trajectoire temporelle d'évolution du Vieux Rhin démontre l'insuffisance de la notion d'état de référence** (historique, statique), face à des pressions anthropiques anciennes et actuelles, ainsi que des réponses morphologiques qui se sont exprimées jusqu'à un seuil dépassant vraisemblablement les possibilités de retour à la situation originelle (occupation anthropique de la plaine alluviale, incision du lit de 7 m...). Un état de référence historique est pourtant évoqué dans l'une des sept « orientations fondamentales » du SAGE Ill-Nappe-Rhin approuvé en 2005 (CLE, 2005). Celui-ci vise en effet *« le maintien ou la restauration d'un fonctionnement hydrologique et écologique du Rhin et de ses zones humides le plus proche possible de l'état naturel, soit avant les travaux de canalisation et après la rectification,* ***en 1927****».* Cette référence a été choisie en considérant uniquement la modification des débits liquides induite par la construction du barrage de Kembs qui a débuté en 1928, et les effets de ce dernier sur l'état des connectivités hydrologiques de la plaine rhénane (SOGREAH, 2003). Cette année de référence perd de son intérêt si les modifications morphologiques, conséquences de processus plus anciens comme démontré dans la présente thèse, sont prises en compte.

La trajectoire complexe d'évolution du Vieux Rhin et la non réversibilité de certains processus et de certaines formes associées encouragent ainsi à penser la restauration du tronçon fluvial, non pas comme un retour vers un état de référence historique et idéalisé, qui consisterait à placer le curseur de l'état souhaité sur une échelle chronologique « avant-après perturbations », mais plutôt à se fixer comme objectif une *« dynamique de référence »* (Dufour, 2005), c'est-à-dire à raisonner sur une **échelle de processus et de fonctionnalités morpho-écologiques**, en termes de diversification des habitats aquatiques et terrestres, de complexification des unités paysagères, d'amélioration des connectivités…

Le diagnostic des dégradations ayant été posé, et les objectifs de restauration clarifiés, **quelles stratégies préconiser alors pour la gestion d'un tronçon fluvial altéré ?** S'agit-il d'augmenter la fourniture sédimentaire, dans le cas d'un tronçon fluvial en déficit, et d'augmenter la puissance fluviale, dans le cas d'un tronçon fluvial en excès, de manière à tendre vers les conditions d'équilibre dynamique d'une rivière « naturelle » (fig. 4.1, flèches pleines) ? Ou peut-on envisager une stratégie de « miniaturisation » des conditions des variables de contrôle, qui consisterait à

réduire la puissance fluviale dans le cas d'un tronçon en déficit, et à réduire la fourniture sédimentaire dans le cas d'un tronçon en excès (fig. 4.1, flèches pointillées) ? (Schmidt et Wilcock, 2008)

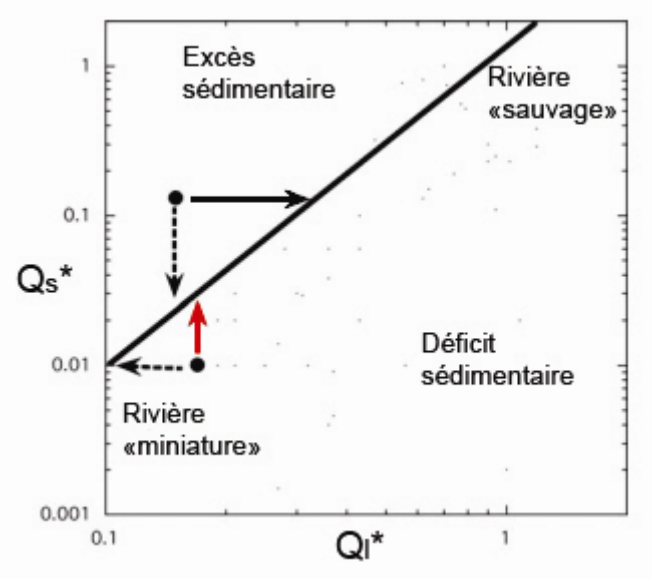


Figure 4.1 : Diagramme de modification des débits liquides (*Ql) et solides (*Qs**) étant à l'origine d'un déficit ou d'un excès sédimentaires. Les deux points noirs représentent des tronçons fluviaux théoriques. Les flèches pleines indiquent des modifications de la fourniture sédimentaire ou du régime des crues nécessaires pour tendre vers les conditions d'équilibre dynamique d'une rivière « naturelle ». Les flèches pointillées indiquent des modifications conduisant à une « miniaturisation » des conditions des variables de contrôle (d'après Schmidt et Wilcock, 2008)**

Dans le cas du Vieux Rhin, compte-tenu des trois principaux dysfonctionnements cités précédemment, défavorables à la qualité et à la diversité des habitats aquatiques et terrestres pionniers, le parti pris par les membres du groupe de travail du projet INTERREG a été d'**augmenter les apports sédimentaires et de fournir au chenal une granulométrie plus fine que le pavage en place** (fig. 4.1, flèche pleine rouge).

B/ Le retour d'expérience apporté par le suivi géomorphologique de la recharge sédimentaire

La manipulation du compartiment physique qui intéresse les opérations de restauration des processus fluviaux régissant le fonctionnement des hydrosystèmes soulève un certain nombre d'incertitudes quant aux effets morphologiques et écologiques des actions, aux risques hydrauliques potentiels et à la comptabilité de ces opérations avec les autres usages liés au cours d'eau. La nécessité de procéder à des expérimentations sur des sites pilotes, éventuellement assorties de modélisations numériques et/ou physiques, afin d'évaluer la pertinence de l'action et la faisabilité de la réitérer à plus large échelle et dans une perspective durable, apparait clairement. Un projet de restauration conduit de manière adaptative permet en outre, grâce aux résultats du

suivi scientifique accompagnant les actions, d'identifier les objectifs encore à atteindre et d'engager si nécessaire des mesures correctives pour améliorer l'efficacité des opérations (Woolsey *et al.*, 2005). Ce type d'approche a déjà été mis en œuvre sur le Rhône (Henry et Amoros, 1995 ; Amoros *et al.*, 2005 ; Gaydou *et al.*, 2009 ; Moiroud et Bravard, 2012), le Danube (Habersack *et al.*, 2008 ; Jungwirth, 2008) ou encore le Colorado (Schmidt, 2012).

L'expérience de recharge sédimentaire engagée sur le Vieux Rhin en novembre 2010, dont l'étude du suivi géomorphologique réalisé entre 2008 et 2011 a fait l'objet du chapitre 3 de la présente thèse, a consisté à mener une première analyse des risques encourus et à éprouver des méthodes permettant de mesurer les changements morphologiques et les premiers gains écologiques observés suite à la crue biennale de décembre 2010. L'imagerie aérienne, les levés topographiques et bathymétriques, le traçage sédimentaire et le suivi granulométrique ont démontré leur pertinence et leur complémentarité pour mesurer les premiers effets de la recharge sur la géométrie du lit, pour quantifier le déplacement du sédiment injecté et pour évaluer les changements de substrat. La comparaison des données collectées aux différents états a ainsi mis en évidence une exportation des sédiments sur la moitié amont du tronçon de recharge (premiers 300 m), tandis que le front de dispersion de la vague sédimentaire est localisé 80 m en aval de la terminaison initiale du dépôt injecté. Les particules individuelles ont enregistré des déplacements moyens de 147 m et maximaux de 665 m. Ces résultats sont cohérents avec les distances de transport annuelles de la charge de fond renseignées dans la littérature (Petit *et al.*, 1996 ; Liébault, 2003 ; Rollet, 2007 ; Chapuis, 2012). Les mesures granulométriques réalisées au droit du site d'injection remanié par la crue (D_{50} = 27 mm) ont également révélé un affinement du fond du lit jusqu'à plus de 3,5 fois la taille du pavage en place (D_{50} = 98 mm).

Les risques hydrauliques immédiats, liés à la probable modification des conditions d'écoulement et à la compatibilité de l'opération de recharge avec le fonctionnement des casiers latéraux de rétention des crues, ont été écartés suite à la dispersion relativement rapide des sédiments. Les autres risques s'exprimant sur une période de temps plus longue, concernant la mise en danger éventuelle des ouvrages en aval (ponts, barrage de Breisach…) ainsi que des berges, et la reprise potentielle de l'incision par déstabilisation du pavage, pointent la nécessité de poursuivre l'acquisition de données *in situ* couplées à l'imagerie aérienne. La forme artificiellement introduite et remaniée est en effet en place pour observer une évolution « naturelle » au cours des prochaines crues morphogènes.

Les résultats obtenus à l'issue de la première phase de suivi se révèlent encourageants vis-à-vis de la pertinence des modalités de mise en œuvre de l'action. Le site de recharge, la forme injectée, le volume, la mobilité des sédiments introduits, ces derniers étant partiellement mis en mouvement pour un débit compris entre 500 et 600 m^3/s, tel qu'estimé par EDF R&D (2009), confirment en effet que les objectifs formulés en amont de l'expérience ont été atteints en partie. Grâce aux premiers apports méthodologiques fournis par cette phase de suivi, et à la lumière de la littérature (ECOTEC, 2006 ; Arnaud *et al.*, 2010), sept indicateurs ont finalement été proposés, dans le but d'évaluer sur le long terme l'atteinte de six objectifs morpho-écologiques liés à l'amélioration de la qualité des habitats aquatiques et terrestres. Ces objectifs concernent la mobilité du lit, la présence

d'un substrat de granulométrie adaptée au frai piscicole, la diversité des faciès d'écoulement, la présence de bancs, d'érosions latérales et la connectivité hydrologique des annexes fluviales.

C/ Les perspectives

Les dysfonctionnements hydro-morphologiques identifiés sur le Vieux Rhin ont conduit à concentrer les expérimentations *in situ* et les modélisations numériques et physiques engagées dans les projets INTERREG « Redynamisation du Vieux Rhin » et EDF « Erosion maîtrisée » (Piégay *et al.*, 2010 ; Clutier *et al.*, 2012) sur deux types de recharges sédimentaires : (i) l'introduction artificielle dans le chenal, (ii) l'érosion latérale contrôlée, par une suppression des protections de berges et une initiation éventuelle du processus érosif au moyen de structures artificielles. Ces deux interventions visent à restaurer le transit sédimentaire et la dynamique alluviale associée à ce transit, en apportant des matériaux d'une granulométrie plus fine que le pavage en place.

Au terme des approches géomorphologiques historique et expérimentale développées dans la présente thèse, et à la lumière des études menées dans les projets INTERREG et EDF, **quels scénarios de restauration proposer afin d'améliorer les fonctionnalités morpho-écologiques du Vieux Rhin**, dans l'objectif d'atteinte du bon potentiel écologique sur cette masse d'eau fortement modifiée d'ici 2027 ?

La question de la **durabilité** de la restauration soulève quatre principaux points en vue de la proposition d'un plan de gestion du Vieux Rhin : i) **la définition des sources sédimentaires** est primordiale, dans la mesure où une opération de recharge d'un tronçon fluvial en déficit sédimentaire est, de manière inhérente, un processus sans fin (Harvey *et al.*, 2005). ii) La durabilité doit également être envisagée à travers **l'emprise spatiale potentiellement affectée** par la restauration : d'un côté, le succès de l'opération repose sur la mobilité du gravier introduit, qui contribue à diversifier les habitats associés au déplacement de la charge, mais d'un autre côté une propagation vers l'aval trop rapide est susceptible de réduire significativement l'efficacité dans le temps de l'opération, que les gestionnaires devront répéter fréquemment (Kondolf et Minear, 2004 ; Rollet *et al.*, accepté). iii) Le point conditionnant également le caractère durable de la restauration concerne **la quantité de sédiments à introduire**. La détermination des volumes est dépendante des objectifs du projet, et peut être plus ou moins complexe. Par exemple, sur la Campbell River (Canada), le volume de la recharge a simplement été calculé à partir du produit des surfaces de frai piscicole à restaurer et de la profondeur de graviers nécessaire au frai (Gaeuman, 2012). Spécifier les volumes est considérablement plus difficile quand le matériau injecté est supposé supporter des objectifs géomorphologiques sur le long terme, tels que favoriser le développement de nouveaux bancs et réactiver la dynamique alluviale de tronçons en aval (Gaeuman, 2012). iv) Le dernier point relatif à la durabilité de la restauration porte sur **la granulométrie du sédiment injecté**. Ce paramètre est essentiel car il conditionne la mobilité de la charge. De plus, le choix de la granulométrie est souvent régi par des considérations écologiques, en particulier le frai des populations piscicoles (Gaeuman, 2012). Dans ce cas, il a été démontré

que les femelles salmonidés (saumons et truites) sont capables de déplacer des particules présentant un diamètre médian jusqu'à 10 % de leur longueur (Kondolf et Wolman, 1993). La granulométrie appropriée peut donc être déduite en fonction de la taille des individus (Kondolf et Minear, 2004). La granulométrie est en outre connectée au volume à introduire ; des modélisations peuvent aider à déterminer les modalités de recharge optimales en termes de volumes à apporter et de taille des particules à privilégier, de manière à obtenir une granulométrie du fond du lit à l'équilibre et dans une gamme appropriée au frai. Des simulations effectuées sur la Trinity River (Californie) ont par exemple suggéré que l'introduction sur le long terme d'environ 9 000 tonnes de sédiments grossiers compris entre 10 et 125 mm de diamètre résulterait en une réduction significative de la taille du substrat constituant la surface du lit, tout en injectant un volume de sédiments relativement modeste (Gaeuman, 2012).

Dans le cas du Vieux Rhin, les différentes investigations menées dans la présente thèse ainsi que les conclusions apportées par le groupe de travail INTERREG dans la phase finale du projet (le rapport final est en cours d'élaboration à la date de rendu de ce manuscrit) permettent de formuler les préconisations suivantes pour une restauration durable des processus morpho-écologiques :

Il conviendra de concentrer les futures recharges sédimentaires sur la partie amont du Vieux Rhin (en amont du PK 198), l'analyse rétrospective ayant montré que ce secteur est le plus dynamique en termes de modifications morphologiques observées dans la bande active et de capacité de transport liée à la pente plus forte (EDF R&D, 2009). Le secteur aval devrait également bénéficier, à terme, des effets de ces actions au fur et à mesure du transit vers l'aval du matériau injecté.

Il est recommandé de recharger le chenal en sédiments provenant du lit majeur, l'expérimentation *in situ* ayant montré que ce matériau non trié, de granulométrie plus fine que le pavage en place, est mobile et affine le fond du lit une fois les fines vannées. Cette ressource, située à proximité immédiate du chenal, permettrait de minimiser les coûts relatifs au prélèvement, au transport et à l'injection des matériaux, ainsi que les impacts écologiques associés aux manipulations mécaniques lors des travaux.

Il est possible de procéder à une estimation simple du volume de sédiments à introduire : en considérant un recouvrement minimum du fond du lit de 50 cm (la recharge expérimentale ayant montré que le fond du lit est peu diversifié en-dessous de cette épaisseur, qui correspond environ à l'épaisseur de graviers mobilisée par une femelle salmonidé pour constituer une frayère ; Marchildon *et al.*, 2011), sur une largeur de lit mineur de 100 m, et portant sur 30 à 40 % du linéaire, soit 15 à 20 km, localisés dans la partie amont du Vieux Rhin de manière à ce que l'ensemble du tronçon en bénéficie ; c'est ainsi **entre 750 000 et 1 000 000 m^3 de matériaux qui devraient être apportés au Vieux Rhin**. Cette estimation est très inférieure aux volumes totaux introduits sur d'autres tronçons fluviaux en déficit sédimentaire, par exemple le Rhin en aval du barrage d'Iffezheim (WSA, 2003) et le Danube en aval de Vienne (Jungwirth, 2008). L'estimation fournie ici correspondrait à une recharge de l'ordre de **50 000 m^3/km**. Ce volume pourrait être

introduit progressivement par tranches de 25 000 m^3 afin que les matériaux puissent être remis en mouvement pour des crues fréquentes, comme démontré à l'issue de la première phase de suivi.

La recharge sédimentaire ne conduira pas à une diversification des formes et des habitats du lit mineur sans un élargissement de ce dernier. L'analyse historique a en effet mis en évidence la simplification drastique de la morphologie de la section fluviale après la mise en place des épis. **Des sites d'élargissement sélectionnés en aval des sites de recharge artificielle constitueraient des zones de ralentissement de la propagation de la charge, contribuant à la durabilité de l'opération**, et surtout à la complexification des formes fluviales (bancs médians, chenaux latéraux…) et des unités paysagères dans ces secteurs élargis. L'augmentation de la largeur du corridor fluvial, par suppression de certains champs d'épis et/ou érosion contrôlée des berges, permettrait également de réactiver des processus latéraux et de restaurer ainsi des habitats riverains pionniers.

Les sources sédimentaires potentiellement exploitables pour la recharge sont multiples. Les matériaux pourraient en effet provenir :

- des sites d'érosion latérale contrôlée en rive gauche, gérés par EDF ;
- des casiers de rétention des crues en rive droite, dans le cadre du projet IRP ;
- de la charge grossière accumulée entre les épis quand le Vieux Rhin écoulait encore la totalité du débit, et localisée sous les sédiments fins piégés par la végétation qui a colonisé ces secteurs après la mise en débit réservé ;
- des anciens stocks de graviers constitués lors de la construction du Grand Canal d'Alsace, localisés sur « l'île du Rhin » entre le Canal et le Vieux Rhin.

Le choix des sites potentiels de recharge artificielle et d'élargissement du lit mineur devra faire l'objet d'une approche planifiée intégrant (i) la quantification précise des volumes pouvant être apportés par chacune des sources sédimentaires précédemment identifiées, (ii) l'évaluation des gains et des pertes morpho-écologiques liées aux usages actuels, au cas par cas suivant les secteurs, (iii) le coût des opérations.

Enfin, **le choix du scénario de restauration optimal, incluant les modalités d'élargissement et d'introduction de la charge** (engraissement de banc existant pour initier le processus érosif en berge opposée, nappage du fond…), **les volumes impliqués et l'échéancier sur le long terme, devra être guidé par les résultats des modèles**. Ces derniers seront particulièrement importants pour anticiper la réponse du chenal aux élargissements et dimensionner ces secteurs, car si la section fluviale est trop élargie, les sédiments introduits risquent d'être végétalisés.

L'élargissement du lit mineur étant une action de restauration nouvelle sur le Vieux Rhin, il serait pertinent de conserver l'approche adaptative développée pour l'expérience de recharge analysée dans la présente thèse, en procédant dans un premier temps à un test grandeur nature. Le suivi de l'expérience permettrait d'évaluer les effets de l'élargissement sur le transport solide, l'apparition

de formes fluviales et la diversification des habitats. Le site-pilote serait localisé en aval immédiat d'un site de recharge préalablement défini. L'opération bénéficierait par ailleurs du retour d'expérience apporté par différentes opérations d'élargissement déjà entreprises en Europe, par exemple sur le Rhône (Moiroud et Bravard, 2012), le Danube (Kloesch *et al.*, 2011), l'Isar (Belau, 2002), la Drau (Habersack et Piégay, 2008) ou encore la Thur (Woolsey *et al.*, 2005).

Enfin, les interventions futures pouvant porter sur la fourniture sédimentaire, la largeur du lit actif et/ou la granulométrie du fond du lit, **la question de la trajectoire potentielle de restauration du Vieux Rhin est posée** (fig. 4.2).

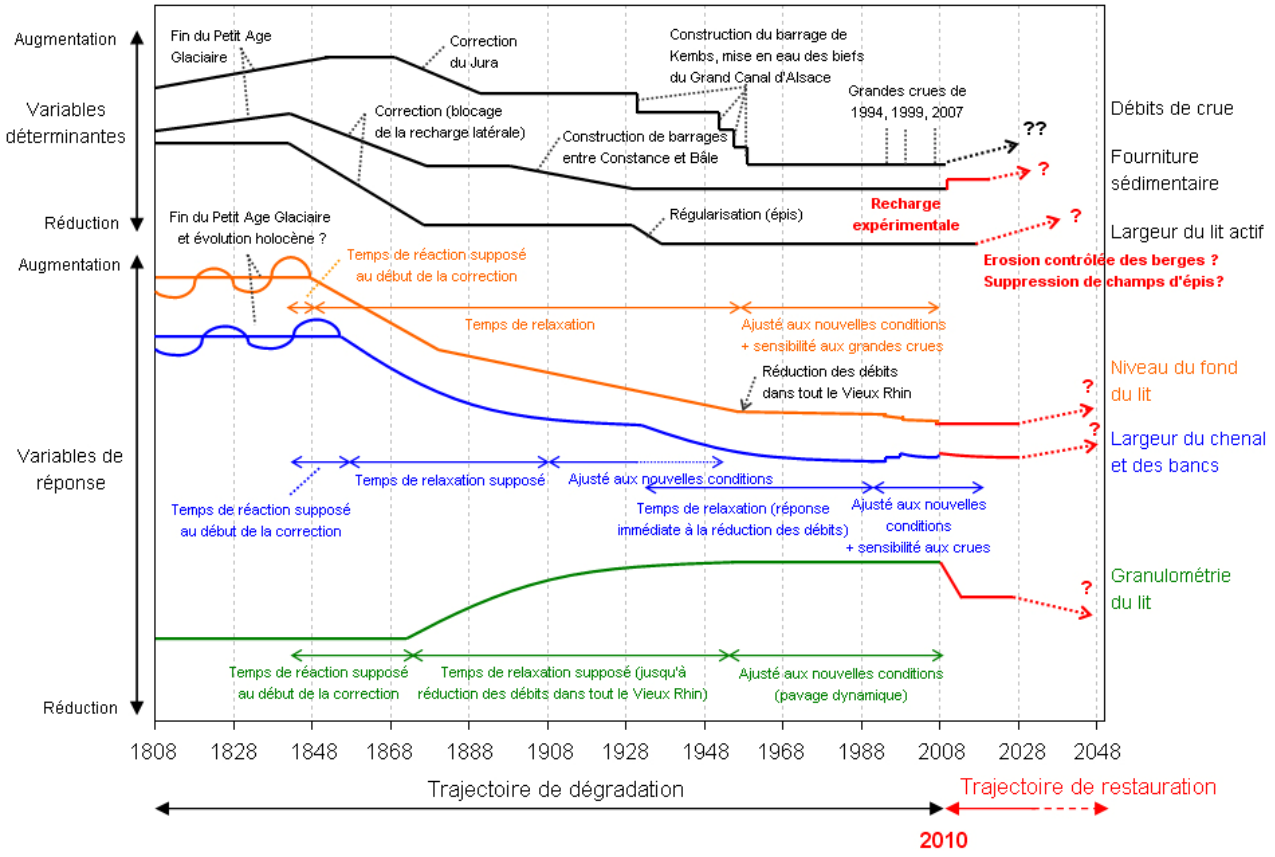


Figure 4.2 : Représentation schématique des trajectoires temporelles de dégradation et de restauration du Rhin entre Kembs et Breisach (modifié d'après Dufour et Piégay, 2009). L'amplitude des ajustements observés (dégradation) ou supposés (restauration) est en unités relatives

Les préconisations opérationnelles formulées précédemment sont le fruit d'investigations scientifiques ayant bénéficié d'échanges avec les différents acteurs impliqués dans la gestion du fleuve. La concertation et l'interdisciplinarité apparaissent indispensables à la gestion intégrée et adaptative des hydrosystèmes fluviaux. Des démarches transversales similaires, mobilisant la géomorphologie fluviale, historique et expérimentale, la modélisation hydraulique et l'écologie, et aboutissant à la production d'indicateurs d'évaluation environnementale, devraient être engagées prochainement en vue de la restauration d'autres tronçons fluviaux anthropisés, comme par exemple la basse vallée de l'Ain et le Rhône aval.

Bibliographie

Adam P., Malavoi J.R., Debiais N., 2006. Retour d'expérience d'opérations de restauration de cours d'eau et de leurs annexes, menées sur le bassin RMC. Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, 129 p. + annexes.

Adam P., Malavoi J.R., Debiais N., 2007. Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau. Agence de l'Eau Seine-Normandie, 160 p.

Alava C., 2009. Impact sur les débits réservés de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques. Mise en conformité des aménagements hydroélectriques de l'Unité de Production Sud-Ouest. Rapport final de travail de fin d'études, Ecole Centrale de Lyon, 83 p.

Alber A., Piégay H., 2011. Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: application to the Rhône basin (France). *Geomorphology*, 125: 343-360.

Allan J.C., Hart R., Tranquili J.V., 2006. The use of Passive Integrated Transponder (PIT) tags to trace cobble transport in a mixed sand-and-gravel beach on the high-energy Oregon coast, USA. *Marine Geology*, 232: 63-86.

Amoros C., Elger A., Dufour S., Grosprêtre L., Piégay H., Henry C.P., 2005. Flood scouring and groundwater supply in side-channel rehabilitation of the Rhône river, France. *Archiv für Hydrobiologie*, Supplementband 155: 147-167.

Amoros C., Petts G.E., 1993. Hydrosystèmes fluviaux. Masson, Paris, 300 p.

Amoros C., Roux A.L., 1988. Interaction between water bodies within the floodplains of large rivers: function and development of connectivity. In: Schreiber K.F. [eds], *Connectivity in Landscape Ecology*, Münstersche Geographische Arbeiten, 29: 125-130.

Amtes für Wasserwirtschaft (AfW), 1939. Untersuchungen in der Natur über Bettbildung, Geschiebe und Schwebe-stoffuhrung. Mitteil. 33, Bern, Schweiz.

Andrews E.D., 1994. Marginal bed-load transport in a gravel bed stream, Sagehen Creek, California. *Water Resources Research*, 30 (7): 2241-2250.

Andrews E.D., 2000. Bed material transport in the Virgin River, Utah. *Water Resources Research*, 36 (2): 585-596.

Antoine A., 1922. L'aménagement du Rhin de Bâle à Strasbourg. Berger-Levrault, Nancy-Paris-Strasbourg, 35 p.

Arnaud F., Béal D., Schmitt L., Piégay H., Rollet A.J., Hoenen D., 2010. Suivi de la recharge sédimentaire du Vieux Rhin par érosion maîtrisée. Rapport d'étape semestriel, version 2, avril 2010, 92 p.

Arnaud-Fassetta G., 2003. River channel changes in the Rhône Delta (France) since the end of the Little Ice Age; geomorphological adjustment to hydroclimatic change and natural resource management. *Catena*, 51: 141-172.

Arnaud-Fassetta G., Quisserne D., Antonelli C., 2003. Downstream grain-size distribution of surficial bed material and its hydro-geomorphological significance in a large and regulated river: the Rhône River in its delta area (France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 9 (1): 33-49.

Ashworth P.J., Ferguson R.I., 1989. Size selective entrainment of bedload in gravel bed streams. *Water Resources Research,* 25: 627-634.

Augelmann A., 2000. Évolution hydrographique et hydrologique en plaine de la Hardt et en plaine de l'Ill. Office National des Forêts, Paris, *Les dossiers forestiers*, 8: 146 p.

Bakke P.D., Basdekas P.O., Dawdy D.R., Klingeman P.C., 1999. Calibrated Parker-Klingeman model for gravel transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125 (6): 657-660.

Bakkes J.A., Van Den Born G.J., Helder J.C., Swart R.J., Hope C.W., Parker J.D.E., 1994. An overview of environmental indicators: state of the art and perspectives. Environmental Assessment Sub-Programme, UNEP, Nairobi, 72 p.

Baran P., Leroyer-Gravet F., 2007. Le débit, élément-clé de la vie des cours d'eau. Bilan des altérations et des possibilités de restauration. Editions Onema, Focus, avril 2007, 20 p.

Barnetche C., Forst C., Peress J., 2010. La restauration des cours d'eau. Recueil d'expériences sur l'hydromorphologie. Onema, 364 p.

Barry J.J., Buffington J.M., King J.G., 2004. A general power equation for predicting bed-load transport rates in gravel bed rivers. *Water Resources Research*, 40, W10401.

Bash J., Ryan C., 2002. Stream restoration and enhancement projects: is anyone monitoring? *Environmental Management*, 29 (6): 877-885.

Bathurst J.C., 2007. Effect of coarse surface layer on bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133 (11): 1192-1205.

Bazin P., Barnaud G., 2002. Du suivi à l'évaluation : à la recherche d'indicateurs opérationnels en écologie de la restauration. *Rev. Ecol. (Terre Vie)*, suppl. 9: 201-224.

Béal D., Arnaud F., Piégay H., Rollet A.J., Schmitt L., 2012. Geomorphological monitoring of an experimental sediment reintroduction in the Old Rhine between Kembs and Breisach dams (France, Germany). *European Geosciences Union General Assembly*, april 22-27, 2012, Vienna, Austria.

Béal D., Piégay H., Arnaud F., Schmitt L., Rollet A.J., 2011. Use of aerial high resolution visible imagery to produce channel bathymetry: a multi temporal and spatial study over the Upper Rhine by-passed section. *American Geophysical Union Fall Meeting*, december 5-9, 2011, San Francisco, USA.

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.

Belau M., 2002. La revitalisation de l'Isar à Munich. *Colloque tripartite « Une chance pour le Rhin Supérieur - la mise en œuvre de la Directive Cadre Eau sur le Vieux Rhin »*, 16 février 2002, Colmar, France, 26.

Belleville A., 2009. Etude d'hydrologie - le Rhin à Kembs (36 494 km²) - période [1900-2008]. Rapport EDF DTG D4166/RAP/2007-00049-C.

Benda L., Dunne T., 1997. Stochastic forcing of sediment routing and storage in channel networks. *Water Resources Research*, 33 (12): 2865-2880.

Bensing W., 1966. Gewässerkundliche Probleme beim Ausbau des Oberrheins (Problèmes hydrologiques liés à l'aménagement du cours supérieur du Rhin. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen Nr. 10, Heft 4, 85-102. Traduit en français par le Service de la Navigation Strasbourg en 1978.

Béraud C., 2012. Modélisation numérique des impacts de recharges sédimentaires en rivière aménagée. Cas du Vieux-Rhin entre Kembs et Breisach. *Thèse de Doctorat*, Université Lyon 1 Claude Bernard, 248 p.

Berger B., 2000. Variabilité spatiale de la sédimentation dans les zones pionnières de la forêt alluviale de la vallée de l'Ain. Mémoire de Maîtrise, Université Jean Moulin Lyon 3, 96 p.

Bethemont J., 2000. Les grands fleuves : entre nature et société. Armand Colin, Paris, 255 p.

Bevenger G.S., King R.M., 1995. A pebble count procedure for accessing watershed cumulative effects. *Research Paper n° RM-RP-319*, U.S. Dept. Agri., Forest service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins, Colorado, 17 p.

BFG, WSA Freiburg, 2006. Tracerversuch Iffezheim. Bericht BfG-1530, Bundesanstalt für Gewässerkunde und Wasser- und Schifffahrtsamt Freiburg, Koblenz.

Bledsoe B.P., 2010. Sediment supply and the upland-stream connection. *Workshop "Episodic Streams: Imperatives for Assessment and Environmental Planning in California"*, Southern California Coastal Water Research Project (SCCWRP), Santa Ana, CA, november 7-9, 2010.

Bölscher J., Ergenzinger P.J., Obenauf P., 2005. Hydraulic, sedimentological and ecological problems of multifunctional riparian forest management - RIPFOR - The scientific report. Instituts für Geographische Wissenschaften der Freien Universität Berlin, Berliner Geographische Abhandlungen, Heft 65, 145 p.

Bombino G., Gurnell A.M., Tamburino V., Zema D.A., Zimbone S.M., 2007. A method for assessing channelization effects on riparian vegetation in a mediterranean environment. *River Research and Applications,* 23: 613-630.

Booij R., 1989. Exchange of mass in harbours. *Proceedings of 23rd IAHR Congress*, Ottawa, D69-D74.

Boon P.J., Calow P., Petts G.E., 1992. River conservation and management. John Wiley & Sons, Chichester.

Borland W.M., 1960. Stream channel stability. United States Bureau of Reclamation, Denver.

Bradley W.C., Fahnestock R.K., Rowekamp E.T., 1972. Coarse sediment transport by flood flows on Knik River, Alaska. *Geological Society of America Bulletin*, 83: 1261-1284.

Brandt S.A., 2000. Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 40: 375-401.

Bravard J.P., 1994. L'incision des lits fluviaux : du phénomène morphodynamique naturel et réversible aux impacts irréversibles. *Revue de Géographie de Lyon*, 69 (1): 5-10.

Bravard J.P., 1998. Le temps et l'espace dans les systèmes fluviaux, deux dimensions spécifiques de l'approche géomorphologique. *Annales de Géographie*, 599: 3-15.

Bravard J.P., 2006. La lône, l'aménageur, l'écologue et le géographe, 40 ans de gestion du Rhône. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 83: 368-380.

Bravard J.P., Bethemont J., 1989. Cartography of rivers in France. In: Petts G.E. [eds], *Historical Change of Large Alluvial Rivers: Western Europe*, John Wiley & Sons, Chichester, 95-111.

Bravard J.P., Kondolf G.M., Piégay H., 1999. Environmental and societal effects of channel incision and remedial strategies. In: Darby S.E. & Simon A. [eds], *Incised Rivers Channels*, John Wiley & Sons, Chichester, 303-342.

Bravard J.P., Peiry J.L., 1993. La disparition du tressage fluvial dans les Alpes françaises sous l'effet de l'aménagement des cours d'eau (19-20ème siècle). *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl.-Bd., 88: 67-79.

Bravard J.P., Petit F., 1997. Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial. Armand Colin, Masson, Paris, 222 p.

Bray D.I., Church M., 1980. Armored versus paved gravel beds. *Journal of the Hydraulics Division,* 106: 1937-1940.

Brewer P.A., Passmore D.G., 2002. Sediment budgeting techniques in gravel-bed rivers. In: Jones S.J. & Frostick L.E. [eds], *Sediment Flux to Basins: Causes, Controls and Consequences*, Geological Society, London, special publications, 191: 97-113.

Brierley G.J, Fryirs K.A., Boulton A., Cullum C., 2008. Working with change: the importance of evolutionary perspectives in framing the trajectory of river adjustment. In: Brierley G.J. & Fryirs K.A. [eds], *River Futures: an Integrative Scientific Approach to River Repair*, Island Press, Washington, 65-84.

Brierley G.J., Fryirs K.A., 2005. *Geomorphology and river management: applications of the River Styles Framework*. Blackwell, Oxford, 398 p.

Brookes A., 1988. Channelized rivers: perspectives for environmental management. John Wiley & Sons, Chichester, 326 p.

Brooks A.P., Brierley G.J., 2004. Framing realistic river rehabilitation targets in light of altered sediment supply and transport relationships: lessons from East Gippsland, Australia. *Geomorphology*, 58:107-123.

Buffington J.M., 1996. An alternative method for determining subsurface grain size distributions of gravel-bedded river. Eos Trans. AGU, 77 (46), Fall Meeting Suppl., Abstract 250.

Buisson C., 2003. La seconde jeunesse du Vieux-Rhin. Suppl. n° 1, *Citoyen Nature*, 2: 16 p.

Bunte K., 2004. State of science review - Gravel mitigation and augmentation below hydroelectric dams: a geomorphological perspective. *Report submitted to the Stream Systems Technology Center*, U.S. Dept. Agri., Forest service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado, 144 p.

Bunte K., Abt S., 2001. Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics and streambed monitoring. *General Technical Report n° RMRS-GTR-74*, U.S. Dept. Agri., Forest service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado, 428 p.

Burke B.J., Jepson M.A., 2006. Performance of passive integrated transponder tags and radio tags in determining dam passage behavior of adult Chinook salmon and steelhead. *North American Journal of Fisheries Management,* 26: 742-752.

Cadol D., Rathburn S. L., Cooper D. J., 2010. Aerial photographic analysis of channel narrowing and vegetation expansion in Canyon De Chelly National Monument, Arizona, USA, 1935-2004. *River Research and Applications*, doi: 10.1002/rra.1399.

Cairns J., 1991. The status of the theoretical and applied science of restoration ecology. *The Environmental Professional*, 13: 186-194.

Cairns J.Jr., McCormick P.V., Niederlehner B.R., 1993. A proposed framework for developing indicators of ecosystem health. *Hydrobiologia*, 263: 1-44.

Camenen B., Le Coz J., Paquier A., Lagouy M., 2010. An estimation of gravel mobility over an alpine river gravel bar (Arc en Maurienne, France) using PIT tag tracers. In: Dittrich A., Koll K., Aberle J., Geisenhainer P. [eds], *5th International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2010)*, Bundesanstalt für Wasserbau, Braunschweig, Germany, 953-960.

Carbiener P., Carbiener R, Vogt H., 1993. Relations entre topographie, nature sédimentaire des dépôts et phytocénose dans le lit alluvial majeur sous forêt du Rhin dans le fossé rhénan : forêt de la Sommerley (commune d'Erstein). *Revue de Géographie de l'Est*, 33 (4): 297-311.

Carbiener R., 1969. Le grand Ried d'Alsace : écologie d'un paysage. *Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse*, 1: 15-44.

Carbiener R., 1970. Un exemple de type forestier exceptionnel pour l'Europe occidentale : la forêt du lit majeur du Rhin au niveau du fossé rhénan (*Fraxino-Ulmetum*). Intérêt écologique et biogéographique. Comparaison à d'autres forêts thermophiles. *Vegetatio*, 97-148.

Carbiener R., 1974. Le Rhin et l'Alsace. Histoire de l'évolution des rapports entre l'homme et un grand fleuve. *Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse*, 4: 61-69.

Carbiener R., 1983. Le grand Ried Central d'Alsace : écologie et évolution d'une zone humide d'origine fluviale rhénane. *Bull. Ecol.*, 14: 249-277.

Carbiener R., Dillmann E., 1992. Cas type de Rhinau-Daubensand : l'évolution du paysage rhénan dans la région de Rhinau, au coeur du secteur des Giessen, des Muhlbach et Brunnenwasser. In: Gallusser W.A. &

Schenker A. [eds], *Die Auen am Oberrhein/Les zones alluviales du Rhin supérieur*, Birkhäuser, Bâle, 113-136.

Cardoso A.H., Neves G.O., 1994. Evaluation de formules existantes : prévision du transport solide total. *La Houille Blanche*, 4: 13-22.

Carling P.A., Kelsey A., Glaister M.S., 1992. Effect of bed roughness, particle shape and orientation on initial motion criteria. In: Billi P., Hey R.D., Thorne C.R., Tacconi P. [eds], *Dynamics of Gravel-Bed Rivers*, John Wiley & Sons, Chichester, 23-37.

Carson R., 1962. Silent spring. Boston MA: Houghton Mifflin.

Caughlan L., Oakley K.L., 2001. Cost consideration for long-term ecological monitoring. *Ecological Indicators*, 1: 123-134.

Chandesris A., Mengin N., Malavoi J.R., Souchon Y., Pella H., Wasson J.G., 2008. SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau. Principes et méthodes. Version V 3.1. Appui scientifique à la mise en œuvre de la Directive Cadre européenne sur l'Eau, Cemagref Lyon, 64 p. + annexes.

Chapuis M., 2012. Mobilité des sédiments fluviaux grossiers dans les systèmes fortement anthropisés : éléments pour la gestion de la basse vallée de la Durance. *Thèse de Doctorat*, Aix-Marseille Université, 244 p.

Chapuis, 2008. Contribution à l'étude du transport solide par charriage en conditions naturelles (torrent du Bouinenc, Alpes-de-Haute-Provence) : mise en place de la technique de traçage de particules par radio-identification. Mémoire de Master 2, Université Joseph Fourier, Grenoble, 54 p.

Chavaz F., Gygax S., 1964. La deuxième correction des eaux du Jura. *Bulletin Technique de la Suisse Romande*, 9: 173-184.

Chin A., 2006. Urban transformation of river landscapes in a global context. *Geomorphology*, 79: 460-487.

Church M., 1995. Geomorphic response to river flow regulation: case studies and time-scales. *Regulated Rivers: Research & Management*, 11: 3-22.

Church M., 2002. Geomorphic thresholds in riverine landscapes. *Freshwater Biology*, 47 (4): 541-557.

Church M., Hassan M.A., 2002. Mobility of bed material in Harris Creek. *Water Resources Research*, 38 (11), 1237, doi: 10.1029/2001WR000753.

Church M., Jones D., 1982. Channel bars in gravel-bed rivers. In: Hey R.D., Bathurst J.C., Thorne C.R. [eds], *Gravel-bed Rivers*, John Wiley & Sons, Chichester, 291-338.

Church M., Kellerhals R., 1978. On the statistics of grain size variation along a gravel river. *Canadian Journal of Earth Science*, 15: 1151-1160.

Church M., McLean D.G., Wolcott J.F., 1987. River bed gravels: sampling and analysis. In: Thorne C.R., Bathurst J.C., Hey R.D. [eds], *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*, John Wiley & Sons, Chichester, 43-88.

Clutier A., Aelbrecht D., El Kadi Abderrezzak K., Die Moran A., Pinte K., Barillier A., 2012. Restauration du transport sédimentaire dans le Vieux Rhin par érosion maîtrisée des berges. *International Conference on Integrative Sciences and Sustainable Development of Rivers*, june 26-28, 2012, Lyon, France.

Collilieux G., Bravard J.P., Moiroud C., Doutriaux E., 2008. The use of historical maps in the management of the « margins » of the Rhône River, France. The pilot case of a restoration project, Montélimar by-passed reach. In: Federzoni L. & Masotti L. [eds], *Proceedings of the Conference « Il paesaggio dei tecnici. Attualità della cartografia storica per il governo delle acque »*, april 3-4, 2008, Venice, Italy.

Commission d'Etude des Crues du Rhin (CECR), 1978. Rapport final. Première partie: texte, deuxième partie : annexes au rapport final ; troisième partie : rapport des délégations, quatrième partie : liste des documents relatifs à des échelles et à d'autres données.

Commission des travaux pour la régularisation du Rhin entre Strasbourg/Kehl et Istein, 1953. Essais et études sur un mode rationnel de construction des épis du Haut-Rhin, 17 p.

Commission Internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin (CHR), 2009. Erosion, transport and deposition of sediment - case study Rhine. Rapport n° II-20, Lelystad, 222 p.

Commission Internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin (CHR), 1977. Le bassin du Rhin. Monographie hydrologique. Tome A : textes, tome B : tableaux, tome C : cartes et graphiques.

Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR), 2001. Conférence ministérielle sur le Rhin 2001. Rhin 2020 - Programme pour le développement durable du Rhin. Coblence, 27 p.

Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR), 2003a. Le Rhin remonte la pente. Bilan du Programme d'Action Rhin. Coblence, 31 p.

Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR), 2003b. Carte du milieu physique du Rhin. Coblence, 51 p. + annexes.

Commission Locale de l'Eau (CLE), 2005. Le SAGE Ill – Nappe – Rhin. Région Alsace, 128 p. + annexes.

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.

Cotillon A.C., Piégay H., 2012. Réussir le développement durable du fleuve Rhône, la science dans le débat public. *International Conference on Integrative Sciences and Sustainable Development of Rivers*, june 26-28, 2012, Lyon, France.

Couvert B., Lefort P., Peiry J.L., Belleudy P., 1999. La gestion des rivières, transport solide et atterrissements : guide méthodologique. Les études des Agences de l'Eau n° 65, Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, 96 p.

D'Arçon, 1789. Projet général sur les moyens de parvenir à concentrer les dérivations du Rhin dans un lit invariable. 140 p.

DCE, 2005. District Hydrographique International RHIN. Secteur de travail international du Rhin Supérieur. Rapport de l'état des lieux. Document principal, 10 mars 2005. Direction Régionale de l'Environnement d'Alsace, Strasbourg, 113 p.

De Gravelaine F., 1979. Pollution : l'Europe a mal au Rhin. *L'Unité*, 343: 10-13.

Decoville-Faller M., 1961. Les transformations du réseau hydrographique réalisées depuis un siècle dans la région de Neuf-Brisach. *Regio Basiliensis*, 2: 113-134.

Degiorgi F., Morillas N., Grandmottet J.P., 2002. Méthode standard d'analyse de la qualité de l'habitat aquatique à l'échelle de la station : l'IAM. *Teleos*, 7 p.

Degoutte G., 2006. Diagnostic, aménagement et gestion des rivières. Hydraulique et morphologie fluviales appliquées. Tec & Doc, Paris, 394 p.

Descombes, 1981. L'aménagement du cours du Rhin. In : Ayçoberry P. & Ferro M. [eds], *Une histoire du Rhin*, Paris, 351-374.

Die Moran A., 2012. Physical model experiments for sediment transport restoration in the old rhine through induced bank erosion. *International Journal of Sediment Research.*

Diplas P., Fripp J., 1992. Properties of various sediment sampling procedures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118 (7): 955-970.

Dister E., 1992. La maîtrise des crues par la renaturation des plaines alluviales du Rhin Supérieur. *Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse*, 824: 73-82.

Dittrich A., Hartmann G., Träbing K., Koll K., 2000. Rückhalteraum Weil-Breisach: Bewertung der morphologischen und hydraulischen Auswirkungen der Hochwasserereignisse 1999 im Rhein zwischen Märk und Breisach. Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, 3 tomes + annexes.

Dittrich A., Marek M., Specht F.J., Dippe D., 2005. Hydraulische Berechnungen und morphodynamische Entwicklung für den Rhein zwischen Märkt und Breisach. Bericht Nr. 904. Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, 117 p.

Dittrich A., Koll K., Kunz C., 2010. Historische Entwicklung des südlichen Oberrheins unter morphologischen Gesichtspunkten. Bericht Nr. 985. Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, 38 p.

Downs P.W., Gregory K.J., 1993. The sensitivity of river channels in the landscape system. In: Allison R.J. & Thomas D.S.G. [eds], *Landscape Sensitivity*, John Wiley & Sons, Chichester, 15-30.

Downs P.W., Gregory K.J., 2004. River channel management. Towards sustainable catchment hydrosystems. Arnold, London, 395 p.

Doyle M.W., Stanley E.H., Orr C.H., Selle A.R., Sethi S.A., Harbor J.M., 2005. Stream response to small dam removal: lessons from Heartland. *Geomorphology*, 71: 227-244.

Dpt. Féd. Int., 1929. La régularisation du Rhin entre Bâle et Strasbourg. Buchdruckerei Neukomm & Salchrath, Bern, 24: 32 planches.

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.

Dufour S., 2005. Contrôles naturels et anthropiques de la dynamique des forêts riveraines des cours d'eau du bassin rhodanien (Ain, Arve, Drôme et Rhône). *Thèse de Doctorat*, Université Jean Moulin Lyon 3, 244 p.

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.

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.

ECOTEC, 2004. Inventaire des études préalables à un élargissement du Rhin en rive gauche. Chavanod, 35 p.

ECOTEC, 2006. Etude d'impact pour la demande de concession de Kembs. Rapport final, Chavanod, 576 p.

EDF R&D, 2009. Estimation de la capacité de transport solide par charriage dans le Vieux Rhin. LNHE, Chatou, 30 p.

EDF, 1982. Kembs : 1932-1982. EDF GRPH « Rhin », Saint-Louis, 35 p.

EDF, 2007. Kembs : concilier énergie renouvelable, navigation et écosystèmes. EDF, Unité de Prduction Est, Mulhouse, 8 p.

EDF, 2009. Nam Theun 2: a model project for sustainable development. EDF's Hydro engineering magazine, *Architectes de l'eau*, 8: 24-25.

EDF, 2012. L'énergie hydraulique, première des énergies renouvelables du Groupe EDF. Dossier de presse, avril 2012, Paris, 24 p.

EDF-CIH, 2005. Renouvellement de Kembs. Etude complémentaire au dossier de renouvellement suisse. Analyse des évolutions de sédimentation dans le Rhin, de la confluence avec la Birse en Suisse au barrage de Kembs. Le Bourget-du-Lac, 11 p.

Edwards T.K., Glysson G.D., 1999. Field methods for measurement of fluvial sediment. *Techniques of Water-Resources Investigations of the USGS*, Book 3, Applications of Hydraulics, Chapter C2. USGS, Reston, Virginia, 89 p.

Einstein H.A., 1950. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service, Washington DC, 71.

Ergenzinger P., Bölscher J., 2008. Untersuchungen zur Interaktion von Auenvegetation und Sedimenttransport am Oberrhein, Untersuchungsgebiet Hartheim und Chalampé. Teilbericht 2 und 3, Sedimentologie 2007. Institut für Geographische Wissenschaften, Freie Universität Berlin, 159 p.

Ergenzinger P., Schmidt K.H., Busskamp R., 1989. The pebble transmitter system (PETS): first results of a technique for studying coarse material erosion, transport and deposition. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 33: 503-508.

Farrow J.W., Sklar L.S., 2004. Lithologic influence and experimental variability in gravel abrasion: Implications for predicting rates of downstream fining of river bed sediments. Eos Trans. AGU, 85 (47), Fall Meeting Suppl., Abstract H53C-1277.

Ferguson R.I., Ashworth P.J., 1991. Slope-induced changes in channel character along a gravel-bed stream: the Allt Dubhaig, Scotland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16: 65-82.

Ferrier V., 2011. Impacts hydro-géomorphologiques des aménagements humains sur le Vieux Rhin. Etude des atterrissements du Vieux Rhin entre Huningue et Breisach : analyse pénétrométrique, granulométrie des champs d'épis et du chenal, propositions de restauration. Mémoire de Master 2, Université Lumière Lyon 2, 174 p.

Frey P., Church M., 2010. Gravel transport in granular perspective. *Gravel-bed Rivers VII.*

Friedman J.M., Osterkamp W.R., Scott M.L., Auble G.T., 1998. Downstream effects of dams on channel geometry and bottomland vegetation: regional pattern in the Great Plains. *Wetlands*, 18 (4): 619-633.

Frings R.M., 2008. Downstream fining in large sand-bed rivers. *Earth Science Reviews*, 87 (1): 39-60.

Frings R.M., Berbee B.M., Erkens G., Kleinhans M.G., Gouw M.J.P., 2009. Human-induced changes in bed shear stress and bed grain size in the river Waal (The Netherlands) during the past 900 years. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34: 503-514.

Gaeuman D., 2012. Mitigating downstream effects of dams. In: Church M., Biron P.M., Roy A.G. [eds], *Gravel-bed Rivers. Processes, Tools, Environments*, John Wiley & Sons, Chichester, 182-189.

Galay V.J., 1983. Causes of river bed degradation. *Water Resources Research*, 19: 1057-1090.

Gallusser W.A., Schenker A., 1992. Die Auen am Oberrhein/Les zones alluviales du Rhin supérieur, Birkhäuser, Bâle, 192 p.

Gaydou P., Bravard J.P., Collilieux G., Desmet M., Doutriaux E., Fruchart F., Moiroud C., Provansal M., 2009. La réactivation de la dynamique fluviale du Rhône. Des premiers tests au schéma directeur de ré-élargissement. *Actes du colloque « Les grands fleuves vont à la mer », 22èmes entretiens du Centre Jacques Cartier*, 30 novembre-1er décembre 2009, Lyon, France.

Gendrin P., Millot G., Simler L., 1957. Etude de la nappe phréatique de la plaine du Haut-Rhin. Mémoires du Service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine, 15: 40 p.

Ghezzi C., 1926. Die Abflussverhältnisse des Rheins in Basel. Eidg. Departement des Innern, Mitteilungen des Amtes für Wasserwirtschaft, Bern, 82 p.

Gilvear D.J., Waters T.M., Milner A.M., 1997. Image analysis of aerial photography to quantify the effect of gold placer mining on channel morphology, Interior Alaska. In: Lane S.N., Richards K.S., Chandler J.H. [eds], *Landform Monitoring, Modelling and Analysis*, John Wiley & Sons, Chichester, 195-216.

Girel J., 1986. Télédétection et cartographie à grande échelle de la végétation alluviale : exemple de la basse vallée de l'Ain. In: Roux A.L. [eds], *Document de Cartographie Ecologique, recherches interdisciplinaires sur les écosystèmes de la basse-plaine de l'Ain (France) : potentialités évolutives et gestion*, 29: 45-74.

Girel J., Vautier F., Peiry J.L., 2003. Biodiversity and land use history of the alpine riparian

landscapes (the example of the Isère river valley, France). In: Mander U. & Antrop M. [eds], *Multifunctional Landscapes, Volume 3: Continuity and Change*, WIT-Press, International series on Advances in Ecological Sciences, Southampton, 167-200.

Gomez B., 1984. Typology of segregated (armoured/paved) surfaces: some comments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 9: 19-24.

Gomez B., Rosser B.J., Peacock D.H., Hicks D.M., Palmer J.A., 2001. Downstream fining in a rapidly aggrading gravel bed river. *Water Resources Research*, 37 (6): 1813-1823.

Grad C., 1909. L'Alsace : le pays et ses habitants. Hachette, Paris, 492 p.

Graf W.L., 1977. The rate law in fluvial geomorphology. *American Journal of Science*, 277: 178-191.

Graf W.L., 1979. Mining and channel response. *Annals of the Association of American Geographers*, 69 (2): 262-275.

Graf W.L., 2006. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology*, 79: 336-360.

Graham D.J., Reid I., Rice S.P., 2005. Automated sizing of coarse-grained sediments: Image-processing procedures. *Mathematical Geology,* 37: 1-28.

Graham D.J., Rollet A.J., Piégay H., Rice S.P., 2010. Maximizing the accuracy of image-based surface sediment sampling techniques. *Water Resources Research*, 46, W02508, doi: 10.1029/2008WR006940.

Grant G.E., 2012. The geomorphic response of gravel-bed rivers to dams: perspectives and prospects. In: Church M., Biron P., Roy A. [eds], *Gravel-bed Rivers: Processes, Tools, Environments*, John Wiley & Sons, Chichester, 165-181.

Grant G.E., Schmidt J.C., Lewis S.L., 2003. A geological framework for interpreting downstream effects of dams on rivers. In: O'Connor J.E. & Grant G.E. [eds], *Water Science and Application 7*, American Geophysical Union, 209-225.

Green R.H., 1979. Sampling design and statistical methods for environmental biologists. John Wiley & Sons, Chichester.

Gregory K.J., 2006. The human role in changing river channels. *Geomorphology*, 79: 172-191.

Gregory S., 2008. River restoration: restoring dynamic riverine processes in a changing world … or … erecting monuments to our good intentions. In: Gumiero B., Rinaldi M., Fokkens B. [eds], *4th ECRR International Conference on River Restoration*, june 16-21, 2008, Venice, Italy, 35-46.

Grosprêtre L., 2011. Etude et gestion des impacts hydrogéomorphologiques de la périurbanisation. L'exemple du bassin de l'Izeron dans l'Ouest lyonnais. *Thèse de Doctorat*, Université Lumière Lyon 2, 280 p.

Gurnell A.M., Downward S.R., Jones R., 1994. Channel planform change on the river Dee meanders, 1876-1992. *Regulated Rivers: Research & Management*, 9: 187-204.

Gurnell A.M., Peiry J.L., Petts G.E., 2003. Using historical data in fluvial geomorphology. In*:* Kondolf G.M & Piégay H. [eds], *Tools in Fluvial Geomorphology*, John Wiley & Sons, Chichester, 77-100.

Habersack H., Hauer C., Liedermann M., Tritthart M., 2008. Modelling and monitoring aid management of the Austrian Danube. *Water 21* (12): 29-31.

Habersack H., Piégay H., 2008. River restoration in the Alps and their surroundings: past experience and future challenges. In: Rinaldi M., Habersack H., Piegay H. [eds], *Gravel-bed Rivers 6: From Process Understanding to the Restoration of Mountain Rivers*, Elsevier, Amsterdam, 703-737.

Habersack H.M., 2001. Radio-tracking gravel particles in a large braided river in New Zealand: a field test of the stochastic theory of bed load transport proposed by Einstein. *Hydrological Processes*, 15: 377-391.

Halbert C.L., Lee K.N., 1991. Implementing adaptive management. *The Northwest Environmental Journal,* 7:1 36-150.

Harrelson C.C., Rawlins C.L., Potyondy J.P., 1994. Stream channel reference sites: an illustrated guide to field technique. *General Technical Report n° RM-245*, U.S. Dept. Agri., Forest service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado.

Hartmann G., Dittrich A., Träbing K., 1998. Untersuchungen zum Vorlandabtrag zwischen Märkt und Karpfenhod. Schlussbericht. Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, 78 p. + annexes.

Harvey B., McBain S., Reiser D., Rempel L., Sklar L., Lave R., 2005. Key uncertainties in gravel augmentation: geomorphological and biological research needs for effective river restoration. CALFED Science and Ecosystem Restoration Programs, Sacramento, 92 p.

Hassan M.A., Church M., Ashworth P.J., 1992. Virtual rate and mean distance of travel of individual clasts in gravel-bed channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17: 617-627.

Hassan M.A., Ergenzinger P., 2003. Use of tracers in fluvial geomorphology. In*:* Kondolf G.M & Piégay H. [eds], *Tools in Fluvial Geomorphology*, John Wiley & Sons, Chichester, 397-423.

Hengl M., Huber B., Krouzecky N., 2009. The Integrated River Engineering Project on the Danube to the East of Vienna, river bed stabilisation by coarsening of bed material - section model tests. Theme A-3 Sediment Transport and Fluvial Processes. *33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment*, 9-14 august 2009, Vancouver, Canada.

Henry C.P., Amoros C., 1995. Restoration ecology of riverine wetlands: I. A scientific base. *Environmental Management*, 19: 891-902.

Hey R.D., Thorne C.R., 1983. Accuracy of surface samples from gravel bed material. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109: 842-851.

Hilborn R., 1992. Can fisheries agencies learn from experience? *Fisheries,* 17 (4): 6-14.

Hinkel J., 1999. Die Ermittlung vegetationsfreier Flächen entlang der Elbeufer aus Luftbildern und ihre Korrelation mit der Flußgeometrie und dem Uferverbau. Technical University, Karlsruhe.

Hirth C., 1971. Eléments d'explication à la formation des Rieds ello-rhénans au nord de Colmar du début du post-glaciaire à la canalisation du Rhin au 19ème siècle. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Colmar*, 54: 21-44.

Hjulström F., 1935. Studies in the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris. *Bulletin of the Geological Institute*, University of Uppsala, 25: 221-527.

Hohensinner S., Habersack H., Jungwirth M., Zauner G., 2004. Reconstruction of the characteristics of a natural alluvial river-floodplain system and hydromorphological changes following human modifications: the Danube River (1812-1991). *River Research and Applications*, 20: 25-41.

Hohensinner S., Jungwirth M., Muhar S., Habersack H., 2005. Historical analyses: a foundation for developing and evaluating river-type specific restoration programs. *International Journal of River Basin Management*, 3 (2): 87-96.

Holling C. S., 1978. Adaptive environmental assessment and management. John Wiley & Sons, New York, 377 p.

Honsell M., 1885. Atlas zum dritten heft : Die Korrektion des Oberrheines von der Schweizer bis zur Gr. Hessischen Grenze. Beitrage zur hydrologie des Grossherzogthums Baden. Enthaltend : Eine Karte des Oberrheines in fünf Blättern und acht figurentaffeln. Karlsruhe.

Houbrechts G., Levecq Y., Vanderheyden V., Petit F., 2011. Long-term bedload mobility in gravel-bed rivers using iron slag as a tracer. *Geomorphology*, 126: 233-244.

Huber B., Hengl M., Krouzecky N., 2011. Effects of anthropogenous morphological changes to the bed stability of the Danube River. *28th Danubia-Adria-Symposium on Advances in Experimental Mechanics*, september 28- october 1st, 2011, Siofok, Hungary.

Hubert P., Carbonnel J.P., Chaouche A., 1989. Segmentation des séries hydro-météorologiques. Application à des séries de précipitation et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 110: 349-367.

Hudson P.F., Middelkoop H., Stouthamer E., 2008. Flood management along the Lower Mississippi and Rhine Rivers (The Netherlands) and the continuum of geomorphic adjustment. *Geomorphology*, 101: 209-236.

Hughes F.M., Colston R.A., Mountford J.O., 2005. Restoring riparian ecosystems: the challenge of accommodating variability and designing restoration trajectories. *Ecology and Society*, 10 (1): 12.

Hughes M.L., McDowell P.F., Marcus W.A., 2006. Accuracy assessment of georectified aerial photographs: implications for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology*, 74: 1-16.

Humbert J., Descombes R., 1985. Rhin. *Encyclopédie de l'Alsace*, Strasbourg, 6391-6400.

Jamme G., 1969. Cours d'hydraulique fluviale. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 197 p.

Johnson C.W., 1997. Equilibrium response of riparian vegetation to flow regulation in the Platte River, Nebraska. *Regulated Rivers: Research & Management*, 13: 403-415.

Johnstone K., 2010. Impacts hydro-géomorphologiques des aménagements humains : étude historique du Rhin Supérieur entre Bâle et Breisach, 1800-2009. Mémoire de Master 1, Université Lumière Lyon 2, 154 p.

Jung J., Schlumberger C., 1936. Soulèvement des alluvions du Rhin par des intrusions salines diapires de Haute-Alsace. Déformation de la surface de la basse terrasse du Rhin et tectonique du bassin salifère de Haute-Alsace. *Bulletin du Service de la Carte géologique d'Alsace et de Lorraine*, tome 3.

Jungwirth M., 2008. The "Integrated River Engineering Project for the Danube East of Vienna" and its effects on the ecology of the river-floodplain system. *Proceedings of the Biodiversity of Surface Waters, Floodplains and Groundwater Conference*, october 29-30, 2008, Bonn, Germany.

Jungwirth M., 2012. The Danube, a European cross-border alpine river: history, present status and future restoration needs. *International Conference on Integrative Sciences and Sustainable*

Development of Rivers, june 26-28, 2012, Lyon, France.

Jungwirth M., Muhar S., Schmutz S., 2002. Re-establishing and assessing ecological integrity in riverine landscapes. *Freshwater Biology*, 47: 867-887.

Kaufmann J., 1954. Le Rhin de Bâle à Lauterbourg au cours des âges. Ses vicissitudes, son avenir, son importance pour la région mulhousienne. *Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse*, 116-132.

Kellerhals R., Bray D.I., 1971. Sampling procedures for coarse fluvial sediments. *Journal of the Hydraulics Division,* 97: 1165-1180.

Kern K., 1992. Rehabilitation of streams in South-West Germany. In: Boon P.J., Calow P., Petts G.E. [eds], *River Conservation and Management*, John Wiley & Sons, Chichester, 321-336.

King J.G., Emmett W.W., Whiting P.J., Kenworthy R.P., Barry J.J., 2004. Sediment transport data and related information for selected coarse-bed streams and rivers in Idaho. *General Technical Report n° RMRS-GTR-131*, U.S. Dept. Agri., Forest service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado.

Kintz J.P., 1982-2003. Nouveau dictionnaire de biographie alsacienne. *Fédération des sociétés d'histoire et d'archéologie d'Alsace,* Strasbourg, vol. 42, 4434 p.

Kleinas C., 2003. L'évolution du style fluvial du Rhin supérieur de Bâle à Lauterbourg. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 54 p.

Klingeman P.C., Emmett W.W., 1982. Gravel bedload transport processes. In: Hey R.D., Bathurst J.C., Thorne C.R. [eds], *Gravel-bed Rivers*, John Wiley & Sons, Chichester, 141-169.

Kloesch M., Liedermann M., Habersack H., 2011. Riverbank erosion processes within a major bank restoration project. In: Habersack H., Schober B., Walling D. [eds], *International Conference on the Status and Future of the World's Large Rivers*, april 11-14, 2011, Vienna, Austria, Abstract Book, 287.

Kloesch M., Tritthart M., Liedermann M., Habersack H., 2008. Sediment input and self-initiated riverbank erosion to mitigate channel incision: methods for monitoring the effectiveness of a new management technique. In: Gumiero B., Rinaldi M., Fokkens B. [eds], *4th ECRR International Conference on River Restoration*, june 16-21, 2008, Venice, Italy, 505-512.

Knighton A.D., 1984. Fluvial forms and processes. Edward Arnold, London, 218 p.

Knighton A.D., 1999. The gravel-sand transition in a disturbed catchment. *Geomorphology*, 27: 325-341.

Koll K., Koll K., Dittrich A., 2010. Sediment transport over static armour layers and its impact on bed stability. In: Dittrich A., Koll K., Aberle J., Geisenhainer P. [eds], *5th International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2010)*, Bundesanstalt für Wasserbau, Braunschweig, Germany, 929-936.

Kolly L., 1959. L'aménagement du Rhin de Bâle au lac de Constance. *La Houille Blanche*, 2: 167-176.

Kondolf G.M., 1997. Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*, 21 (4): 533-551.

Kondolf G.M., 2011. The *espace de liberté* and restoration of fluvial process: when can the river restore itself and when must we intervene? In: Boon P.J. & Raven P.J. [eds], *River Conservation and Management,* Wiley-Blackwell, Chichester, 225-241.

Kondolf G.M., Anderson S., Lave R., Pagano L., Merenlender A., Bernhardt E.S., 2007. Two decades of river restoration in California: what can we learn? *Restoration Ecology*, 15 (3): 516-523.

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.

Kondolf G.M., Boulton A., O'Daniel S., Poole G., Rahel F., Stanley E., Wohl E., Bang A., Carlstrom J., Cristoni C., Huber H., Koljonen S., Louhi P., Nakamura K., 2006. Process-based ecological river restoration: visualising three-dimensional connectivity and dynamic vectors to recover lost linkages. *Ecology and Society*, 11 (2): 17.

Kondolf G.M., Larson M., 1995. Historical channel analysis and its application to riparian and aquatic habitat restoration. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 5: 109-126.

Kondolf G.M., Lisle T.E., Wolman G.M., 2003. Bed sediment measurement. In: Kondolf G.M. & Piégay H. [eds], *Tools in Fluvial Geomorphology*, John Wiley & Sons, Chichester, 347-396.

Kondolf G.M., Matthews W.V.G., 1986. Transport of tracer gravels on a coastal California river. *Journal of Hydrology*, 85: 265-280.

Kondolf G.M., Matthews W.V.G., 1993. Management of coarse sediment on regulated rivers. Water Resources Center, University of California Report n° 80, 123 p.

Kondolf G.M., Minear J.T., 2004. Coarse sediment augmentation on the Trinity River below Lewiston dam: geomorphic perspectives and review of past projects. Report to the Trinity River Restoration Program, Weaverville, 67 p.

Kondolf G.M., Minear J.T., McBain S., Krause A., Falzone A., Lutrick E., 2005. Gravel augmentation to improve salmonid habitat in rivers: general geomorphic considerations and experiences from Northern California. San Francisco Estuary and Watershed Science, 38 p.

Kondolf G.M., Piégay H., 2003. Tools in Fluvial Geomorphology. John Wiley & Sons, Chichester.

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., Wolman M.G., 1993. The sizes of salmonid spawning gravels. *Water Resources Research*, 29 (7): 2275-2285.

Krause A., McBain S., 2003. Summary of Trinity River Restoration Program. Sediment management briefing for the may 29, 2003 meeting in Weaverville, Bureau of Reclamation, 13 p.

Krumbein W.C., 1941. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 11 (2): 64-72.

Kuhl D., 1992. 14 years artificial grain feeding in the Rhine downstream the barrage Iffezheim. *Proceedings of the 5th International Symposium on River Sedimentation*, Karlsruhe, Germany, 1121-1129.

Lafont C., Troispoux G., 2003. Orthophotographies : définition et mise en œuvre appliquée à la BD ORTHO de l'IGN. CERTU, Lyon, 123 p.

Lamarre H., Macvicar B., Roy A., 2005. Using Passive Intergrated Transpondeur (PIT) tags to investigate sediment transport in gravel-bed rivers. *Journal of Sedimentary Research*, 75: 736-741.

Lamarre H., Roy A.G., 2008. The role of morphology on the displacement of particles in a step-pool river system. *Geomorphology*, 99: 270-279.

Landon N., 1999. L'évolution contemporaine du profil en long des affluents du Rhône moyen, constat régional et analyse d'un hydrosystème complexe, la Drôme. *Thèse de Doctorat en Géographie et Aménagement du Territoire*, Université Paris-Sorbonne, 560 p.

Lane E.W., 1955. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Paper 745, Vol. 81, 17 p.

Lane E.W., Carlson E.J., 1953. Some factors affecting the stability of canals constructed in coarse granular material. *Proceedings of the 5th IAHR Congress*, 37-48.

Langendoen E.J., Kranenburg C., Booij R., 1994. Flow patterns and exchange of matter in tidal harbours. *Journal of Hydraulics Research*, 32 (2): 259-269.

Large A.R.G., Petts G.E., 1996. Historical channel-floodplain dynamics along the River Trent. Implications for river rehabilitation. *Applied Geography*, 16 (3): 191-209.

Lefoulon, R., 1959. L'aménagement du Rhin sur le tronçon entre Bale et Strasbourg. *La Houille Blanche*, 2: 203-206.

Lejot J., 2008. Suivi des formes fluviales par télédétection très haute résolution. Application aux programmes de restauration de la basse vallée de l'Ain et du Haut-Rhône (Chautagne). *Thèse de Doctorat*, Université Lumière Lyon 2, 257 p.

Lenzi M.A., 2004. Displacement and transport of marked pebbles, cobbles and boulders during floods in a steep mountain stream. *Hydrological Processes*, 18: 1899-1914.

Leopold L.B., Emmett W.W., Myrick R.M., 1966. Channel and hillslope processes in a semi-arid area, New Mexico. *USGS Professional Paper 352-G*, 193-253.

Leopold L.B., Wolman M.G., 1957. River channel patterns - braided, meandering, and straight. *USGS Professional Paper 282-B*, 39-85.

Leteurtrois J.P., Ravard J.L., Rozen G., Schneiter B., Winter L., 2006. Rapport sur le renouvellement des concessions hydroélectriques. Conseil général des mines, Conseil général des ponts et chaussées, Inspection générale des finances, 55 p.

Lévy M., 1982. Les aménagements du cours du Rhin au fil des siècles dans la plaine Alsace-Bade et en particulier dans la région Benfeld-Rhinau. Mémoire de Maîtrise, UFR de Géographie de Strasbourg, 77 p.

Li L., Lu X., Zhongyuan C., 2007. River channel change during the last 50 years in the middle Yangtze River, the Jianli reach. *Geomorphology,* 85: 185-196.

Libault A., 1924. Le Rhin et le Grand Canal d'Alsace. Berger-Levrault, Nancy-Paris-Strasbourg, chapitre 5: 34-69.

Liébault F., 2003. Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massifs du Diois et des Baronnies). *Thèse de Doctorat*, Université Lumière Lyon 2, 357 p.

Liébault F., Bellot H., Chapuis M., Klotz S., Deschâtres M., 2012. Bedload tracing in a high-sediment-load mountain stream. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37: 385-399.

Liébault F., Piégay H., 2002. Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers and streams of Southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27: 425-444.

Liedermann M., Tritthart M., Habersack H., 2011. Measured and modelled transport paths of artificial tracer stones at a large gravel bed river. In: Engineers Australia [eds], *34th IAHR Congress*, 26 june-1st july 2011, Brisbane, Australia, 3606-2612.

Lisle T.E., Iseya F., Ikeda H., 1993. Response of channel with alternate bars to a decrease in supply of mixed-size bed load: a flume experiment. *Water Resources Research*, 29 (11): 3623-3629.

Lorenz C.M., Van Dijk G.M., Van Hattum A.G.M., Cofino W.P., 1997. Concepts in river ecology: implications for indicator development. *Regulated Rivers: Research & Management*, 13: 501-516.

MacNamara J., Borden C., 2004. Observations on the movement of coarse gravel using implanted motion-sensing radio transmitters. *Hydrological Processes,* 18: 1871-1884.

Magalligan F.J., Nislow K.H., 2005. Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology,* 71: 61-78.

Maire G., 1997. Evolution des objectifs d'aménagement du Rhin et de ses espaces riverains aux XIXème et XXème siècles. In: Racine P. [eds], *colloque « Fleuves, rivières et canaux dans l'Europe occidentale et médiane »*, 1-2 décembre 1995, Association Interuniversitaire de l'Est et C.R.D.P. de Nancy, 445-454.

Makaske B., Smith D.G., Berendsen H.J.A., 2002. Avulsions, channel evolution and floodplain sedimentation rates of the anastomosing upper Columbia River, British Columbia, Canada. *Sedimentology*, 49, 1049-1071, doi: 10.1046/j.1365-3091.2002.00489.

Malavoi J.R., Adam P., 2007. La restauration hydromorphologique des cours d'eau : concepts et principes de mise en œuvre. *Ingénieries*, 50: 49-61.

Malavoi J.R., Garnier C.C., Landon N., Recking A., Baran P., 2011. Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière. Onema-Cemagref Lyon, Toulouse, Grenoble, Ministère chargé de l'écologie, Université Lyon 2, Collection Comprendre pour agir, 216 p.

Malavoi J.R., Souchon Y., 1989. Méthodologie de description et quantification des variables morphodynamiques d'un cours d'eau à fond caillouteux. *Revue Géographique de Lyon*, 64 (4): 252-259.

Malavoi J.R., Souchon Y., 2002. Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques. *Note Technique. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 365: 1-16.

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.

Mao L., Surian N., 2010. Observations on sediment mobility in a large gravel-bed river. *Geomorphology*, 114: 326-337.

Marchal M., Delmas G., 1959. L'aménagement du Rhin à courant libre de Bâle à Lauterbourg. *La Houille Blanche*, 2: 177-202.

Marchildon M.A., Annable W.K., Imhof J.G., Power M., 2011. A high-resolution hydrodynamic investigation of brown trout (*Salmo trutta*) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) redds. *River Research and Applications*, 27: 345-359.

Marston R.A., Girel J., Pautou G., Piégay H., Bravard J.P., Arneson C., 1995. Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France. *Geomorphology*, 13: 121-131.

Martin C.W., Johnson W.C., 1987. Historical channel narrowing and riparian vegetation expansion in the Medicine Lodge river basin, Kansas, 1871-1983. *Annals of the Association of American Geographers*, 77 (3): 436-449.

Meixner H., Schnauder I., Bölscher J., Iordache V., 2006. Hydraulic, sedimentological and ecological problems of multifunctional riparian forest management - RIPFOR - Guidelines for end-users. Instituts für Geographische Wissenschaften der Freien Universität Berlin, Berliner Geographische Abhandlungen, Heft 66, 168 p.

Meyer-Peter E., Mueller R., 1948. Formulas for bed-load transport. *Proceedings of the 2nd Meeting IAHR*, Stockholm, 39-64.

Middelkoop H., 1997. Embanked floodplains in the Netherlands. *Thèse de Doctorat*, Université d'Utrecht.

Migneret M., 1862. Description du département du Bas-Rhin, publiée avec le concours du Conseil Général. Berger-Levrault et fils, Strasbourg, 3 tomes.

Mika S., Hoyle J., Kyle G., Howell T., Wolfenden B., Ryder D., Keating D., Boulton A., Brierley G., Brooks A., Fryirs K., Leishman M., Sanders M., Arthington A., Creese R., Dahm

M., Miller C., Pusey B., Spink A., 2010. Inside the "black box" of river restoration: using catchment history to identify disturbance and response mechanisms to set targets for process-based restoration. *Ecology and Society*, 15 (4): 20 p.

Mikos M., 1994. The downstream fining of gravel-bed sediments in the alpine Rhine River. In: Ergenzinger P. & Schmidt K.H. [eds], *Dynamics and Geomorphology of Mountain Rivers*, Springer-Verlag, Berlin, Notes in Earth Sciences, vol. 52, 93-108.

Millennium Ecosystem Assessment (MEA), 2005. Ecosystems and human well-being: synthesis. Island Press, Washington DC.

Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT), 2009. Guide technique actualisant les règles d'évaluation de l'état des eaux douces de surface de métropole, mars 2009, 74 p.

Ministerium für Umwelt und Verkehr, 1997. Programme Intégré Rhin : protection contre les crues et régénération du milieu alluvial dans la plaine du Rhin Supérieur. Gewässerdirektion Südlicher Oberrhein/Hochrhein, Lahr, 19 p.

Miramont C., Jorda M., Pichard G., 1998. Évolution historique de la morphogenèse et de la dynamique fluviale d'une rivière méditerranéenne : l'exemple de la moyenne Durance (France du sud-est). *Géographie physique et Quaternaire*, 52: 381-392.

Moiroud C., Bravard J.P., 2012. Réactivation par la dynamique fluviale des marges alluviales du Rhône : de l'approche méthodologique aux premiers sites pilotes. *International Conference on Integrative Sciences and Sustainable Development of Rivers*, june 26-28, 2012, Lyon, France.

Molinas A., Wu B., 2001. Transport of sediment in large sand-bed rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 39 (2): 135-146.

Morandi B., 2010. L'évaluation des opérations de restauration écologique de rivières. Étude des pratiques françaises dans le domaine. Mémoire de Master 2, Université Lumière Lyon 2, 66 p. + 268 p. annexes.

Morandi B., Piégay H., 2011. Les restaurations de rivières sur Internet : premier bilan. *Natures Sciences Sociétés*, 19: 224-235.

Morandi B., Piégay H., 2012. Approche globale et critique de la restauration des cours d'eau en France et à l'étranger : du concept à l'évaluation. Eléments méthodologiques et premiers résultats. Rapport d'étape n° 1, ONEMA - UMR 5600 EVS, Lyon, 86 p.

Mosley M.P., 1978. Bed material transport in the Tamaki River near Dannevirke, North Island, New Zealand. *New Zealand Journal of Science*, 21: 619-626.

Mosley M.P., Tindale D.S., 1985. Sediment variability and bed material sampling in gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10: 465-482.

Moussavi-Harami R., Mahboubi A., Khanehbad M., 2004. Analysis of controls on downstream fining along three gravel-bed rivers in the Band-e-Golestan drainage basin NE Iran. *Geomorphology*, 61: 143-153.

Muhar S., Jungwirth M., 1998. Habitat integrity of running waters - assessment criteria and their biological relevance. *Hydrobiologia*, 386: 195-202.

Muhar S., Schmutz S., Jungwirth M., 1995. River restoration concepts – goals and perspectives. *Hydrobiologia*, 303: 183-194.

Muir T.C., 1969. Sampling and analysis of coarse riverbed sediments. *Proceedings of the 4th Mississippi State University Water Resources Research Institute Conference*, april 8-9, 1969, Mississippi State University, 73-83.

Nanson G.C., Beach H.F., 1977. Forest succession and sedimentation on a meandering-river floodplain, northeast British Columbia, Canada. *Journal of Biogeography*, 4: 229-251.

Nanson G.C., Knighton A.D., 1996. Anabranching rivers: their cause, character and classification. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21: 217-239.

Newson M.D., Large A.R.G., 2006. "Natural" rivers, "hydromorphological quality" and river restoration: a challenging new agenda for applied fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31 (13): 1606-1624.

Nichols M.H., 2004. A radio frequency identification system for monitoring coarse sediment particle displacement. *Applied Engineering in Agriculture*, 20 (6): 783-787.

Nivière B., Giamboni M., Innocent C., Winter T., 2006. Kinematic evolution of a tectonic wedge above a flat-lying décollement: the Alpine foreland at the interface between the Jura Mountains (Northern Alps) and the Upper Rhine graben. *Geology*, 34 (6): 469-472.

Nordin C.F., Meade R.H., Curtis W.F., Bosio N.J., Landim P.M.B., 1980. Size distribution of Amazon River bed sediment. *Nature*, 286: 52-53.

Olden J.D., Naiman R.J., 2010. Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshwater Biology*, 55: 86-107.

Olivier J.L., 2004. Historique des voies navigables en France : des enseignements à tirer. In : Conseil Général des Ponts et Chaussées [eds], *colloque « Le renouveau de la voie d'eau »*, 14 octobre 2004, Lille, 56-77.

Olivier J.M., Lamouroux N., 2009. Suivi scientifique du programme décennal de restauration hydraulique et écologique du Rhône : un observatoire dynamique de l'état écologique du fleuve - Rapport d'étape 2009. Université Lyon 1, Cemagref, 278 p.

Olivier J.M., Lamouroux N., Castella E., Mérigoux S., Piégay H., Forcellini M., Fruget J.F., Paillex A., Riquier J., Sagnes P., Segura S., 2011. Assessment of the Rhône River - Methodological approach and first results. *7th Symposium for European Freshwater Sciences*, june 27-1st july, 2011, Girona, Spain.

Ollero A., 2010. Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain. *Geomorphology,* 117: 247-260.

Ollero A., Ballarin D., Diaz E., Mora D., Sanchez M., Acin V., Echeverria M.T., Granado D., Ibisate A., Sanchez L., Sanchez N., 2007. Un indice hydrogeomorfologico (IHG) para la evaluacion del estado ecologico de sistemas fluviales. *Geographicalia*, 52: 113-141.

Ollive V., 2007. Dynamique d'occupation anthropique et dynamique alluviale du Rhin au cours de l'Holocène. Géoarchéologie du site d'Oedenburg (Haut-Rhin, France). *Thèse de Doctorat en Sciences de la Terre*, Université de Bourgogne, 305 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., Allan J.D., Lake P.S., Alexander G., Brooks S., Carr J., Clayton S., Dahm C., Follstad Shah J., Galat D.J., Gloss S., Goodwin P., Hart D.H., Hassett B., Jenkinson R., Kondolf G.M., Lave R., Meyer J.L., O'Donnell T.K., Pagano L., Srivastava P., Sudduth E., 2005. Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of Applied Ecology*, 42: 208-217.

Parker G., Klingeman P.C., 1982. On why gravel bed streams are paved. *Water Resources Research*, 18 (5): 1409-1423.

Peiry J.L., 1987. Dynamique fluviale historique de l'Arve dans le bassin de Cluses (Haute-Savoie). *112ème Congrès national des Sociétés savantes*, Lyon, 95-108.

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 p.

Perrow M.R., Skeate E.R., Leeming D., England J., Tomlinson M.L., 2008. Uncertainty surrounding the ecological targets and response of river ands stream restoration. In: Darby S. & Sear D. [eds], *River Restoration: Managing the Uncertainty in Restoring Physical Habitat*, John Wiley & Sons, Chichester, 139-163.

Peterken G.F., 1996. Natural woodland: ecology and conservation in Northern temperate regions. University Press, Cambridge, 523 p.

Petit F., 1987. The relationship between shear stress and the shaping of the bed of a pebble-loaded river, La Rulles, Ardenne. *Catena*, 14: 453-468.

Petit F., Poinsard D., Bravard J.P., 1996. Channel incision, gravel mining and bedload transport in the Rhône river upstream of Lyon, France ("canal de Miribel"). *Catena*, 26: 209-226.

Petts G.E., 1979. Complex response of river channel morphology subsequent to reservoir construction. *Progress in Physical Geography*, 3: 329-362.

Petts G.E., Gurnell A.M., 2005. Dams and geomorphology: research progress and future directions. *Geomorphology*, 71: 27-47.

Piégay H., Aelbrecht D., Béal D., Alonso C., Arnaud F., Barillier A., Béraud C., Billard C., Bouchard J.P., Brousse G., Burlet D., Camenen B., Clutier A., Combroux I., Di-Moran A., Dietrich L., Dittrich A., El Kadi Abderrazzak K., Garnier A., Hoenen D., Huppmann O., Johnstone K., Kniebiely P., Koll K., Laperrousaz E., Le Coz J., Merckling L., Paquier A., Pinte K., Piquette E., Pfarr U., Pleis B., Ostermann R., Rollet A.J., Schmitt L., Trémolières M., Wintz M., 2010. Restauration morpho-dynamique et redynamisation d'une section court-circuitée du Rhin à l'aval du barrage de Kembs (projets INTERREG/EDF). *32èmes journées de l'hydraulique de la Société Hydrotechnique de France : Environnement et hydro-électricité*, 6-7 octobre 2010, Lyon, France.

Piégay H., Béal D., Rollet A.J., Arnaud F., Schmitt L., and the INTERREG Old Rhine Project Team, 2009. The "Redynamisation of the Old Rhine", an international and interdisciplinary INTERREG project focused on channel braiding restoration - 2009-2013. *European Geosciences Union General Assembly*, april 19-24, 2009, Vienna, Austria.

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.

Piégay H., Hupp C.R., Citterio A., Dufour S., Moulin B., Walling D.E., 2008. Spatial and temporal variability in sedimentation rates associated with cutoff channel infill deposits: Ain River, France. *Water Resources Research*, 44, W05420, doi: 10.1029/2006WR005260.

Piquette E., in prep. Le Rhin : un non-lieu ? Le cas du secteur Huningue-Neuf-Brisach. *Thèse de*

Doctorat, Centre de Recherche et d'Etude en Sciences Sociales, Université de Strasbourg.

Poindron P.Y., 1984. Rhin: le tout-à-l'égout de l'Europe. *L'Unité*, 556: 14-16.

Poinsard D., Salvador P.G., 1993. Histoire de l'endiguement du Rhône à l'aval de Lyon. In: D. Erudition [eds], *colloque « Le fleuve et ses métamorphoses »*, 13-15 mai 1992, Lyon, 299-314.

Poitrat R., 1950. L'aménagement du Rhin pour la navigation et la production d'énergie hydro-électrique. Conférence faite le 30 mars 1950 à la Chambre de Commerce de Strasbourg, 41 p.

Poitrat R., 1952. Nouvelles méthodes d'entretien des ouvrages de la régularisation du Rhin. *Travau*x, 274-288.

Polito P.J., Sklar L.S., 2006. Correlating field and laboratory rates of particle abrasion, Rio Medio, Sangre de Cristo Mountains, New Mexico. Eos Trans. AGU, 87 (52), Fall Meeting Suppl., Abstract H51G-0554.

Prentice E.F., Flagg T.A., McCutcheon C.S., 1990. Feasibility of using implantable passive integrated transponder (PIT) tags in salmonids. *American Fisheries Society Symposium*, 7: 317-322.

Preusser F., 2008. Characterisation and evolution of the River Rhine system. *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw*, 87 (1): 7-19.

Provansal M., Villiet J., Eyrolle F., Raccasi G., Gurriaran R., Antonelli C., 2010. High-resolution evaluation of recent bank accretion rate of the managed Rhone: a case study by multi-proxy approach. *Geomorphology*, 117: 287-297.

Przedwojski B., Blazejewski R., Pilarczyk K.W., 1995. River training techniques: fundamentals, techniques and applications. Balkema, the Netherlands, 686 p.

Raab K.O., 1953. Hundert Jahre Badische Katastervermessung. Mitteilungen des Deutschen Vereins für Vermessungwesen. Landesverein Baden, Sonderheft, 94 p.

Raccasi G., 2008. Mutations géomorphologiques récentes du Rhône aval, recherches en vue de la restauration hydraulique et de la gestion des crues. Thèse de Géographie physique, Aix Marseille Université, 334 p.

Raven P.J., Holmes N.T.H., Charrier P., Dawson F.H., Naura M., Boon P.J., 2002. Towards a harmonized approach for hydromorphological assessment of rivers in Europe: a qualitative comparison of three survey methods. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 12: 405-424.

Reckendorfer W., Schmalfuss R., Baumgartner C., Habersack H., Hohensinner S., Jungwirth M., Schiemer F., 2005. The integrated river engineering project fort the free-flowing Danube in the Austrian alluvial zone national park: contradictory goals and mutual solutions. *Archiv für Hydrobiologie,* suppl. 55: 613-630.

Recking A., Liébault F., Peteuil C., Jolimet T., 2012. Testing bedload transport equations with consideration of time scales. *Earth Surface Processes and Landforms,* 37: 774-789.

Reid L.M., Dunne T., 2003. Sediment budgets as an organizing framework in fluvial geomorphology. In: Kondolf G.M & Piégay H. [eds], *Tools in Fluvial Geomorphology*, John Wiley & Sons, Chichester, 463-500.

Rengers F., Wohl E., 2007. Trends of grain sizes on gravel bars in the Rio Chagres, Panama. *Geomorphology*, 83: 282-293.

Reynolds C.S., Carling P.A., Beven K.J., 1991. Flow in river channels: new insights into hydraulic retention. *Archiv für Hydrobiologie*, 121 (2): 171-179.

Rice S.P., 1999. The nature and controls on downstream fining within sedimentary links. *Journal of Sedimentary Research*, 69: 32-39.

Rice S.P., Church M., 1996. Sampling surficial fluvial gravels: the precision of size distribution percentile estimates. *Journal of Sedimentary Research*, 66: 654-665.

Rice S.P., Church M., 1998. Grain size along two gravel-bed rivers: statistical variation, spatial pattern and sedimentary links. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 345-363.

Rice S.P., Church M., 2010. Grain-size sorting within river bars in relation to downstream fining along a wandering channel. *Sedimentology*, 27: 232-251.

Richards K.S., Clifford N., 1991. Fluvial geomorphology: structured beds in gravelly rivers. *Progress in Physical Geography*, 15 (4): 407-422.

Richardson N.M., 1902. An experiment on the movements of a load of brickbats deposited on the Chesil Beach. *Proceedings of the Dorset Natural History and Antiquarian Field Club*, 23: 123-133.

Rickenmann D., 1991. Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering,* 117 (11): 1419-1439.

Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussettini M., 2011. Guidebook for the evaluation of stream morphological conditions by the Morphological Quality Index (IQM). Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Rome, 84 p.

Robbins C.H., Simon A., 1983. Man-induced channel adjustment in Tennessee streams.

USGS Water-Resources Investigations Report n° 82-4098, 129 p.

Roche P., 1991. Le saumon du Rhin : habitats et stocks potentiels en partie française. Conseil Supérieur de la Pêche, Délégation Régionale de Metz, 36 p.

Rollet A.J., 2007. Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain. *Thèse de Doctorat*, Université Jean Moulin Lyon 3, 305 p.

Rollet A.J., MacVicar B., Piégay H., Roy A., 2008. L'utilisation de transpondeurs passifs pour l'estimation du transport sédimentaire: premiers retours d'expérience. *La Houille Blanche*, 4: 110-116.

Rollet A.J., Piégay H., Lejot J., Bornette G., Dufour S., Persat H., accepté. Integrating process-thinking and long term perspective in restoration of dammed reaches: lessons from the sediment reintroduction experiences on the Ain River pilot site, France. *River Research and Applications.*

Römer G., 1981. Die Oberrheinlande in alten Landkarten. Vom Dreissigjährigen Krieg bis Tulla (1618-1828). Eine Ausstellung der Badischen Landesbibliothek. Selbstverlag der Badischen Landesbibliothek, Karlsruhe, 131 p.

Roni P., 2005. Monitoring stream and watershed restoration. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 350 p.

Roni P., Beechie T., 2012. Stream and watershed restoration a guide to restoring riverine processes and habitats. John Wiley & Sons, Chichester, doi: 10.1002/9781118406618.

Rosgen D.L., 1994. A classification of natural rivers. *Catena*, 22: 169-199.

Rosgen D.L., 1996. Applied River Morphology. Wildland Hydrology, Pagosa Springs, Colorado, 385 p.

Roux A.L., 1982. Cartographie polythématique appliquée à la gestion écologique des eaux ; étude d'un hydrosystème fluvial : le Haut-Rhône français. Editions CNRS, Lyon, 116 p.

Russell R.D., 1939. Effects of transportation on sedimentary particles. In: Trask P.D [eds], *Recent Marine Sediments*, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, 33-47.

Ryan S.E., Porth L.S., Troendle C.A., 2002. Defining phases of bedload transport using piecewise regression. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27 (9): 971-990.

Salignat O., 2012. La prise en compte par EDF des aspects environnementaux et sociaux dans les projets hydroélectriques à l'international : l'exemple de Nam Theun 2 (Laos). *International Conference on Integrative Sciences and Sustainable Development of Rivers*, june 26-28, 2012, Lyon, France.

Sarr D.A., 2002. Riparian livestock exclosure research in the western United States: a critique and some recommendations. *Environmental Management*, 30 (4): 516-526.

Schabuss M., Schiemer F., Habersack H., Liedermann M., 2008. A comprehensive monitoring concept for a large river restoration project on the Austrian Danube. *6th European Conference on Ecological Restoration,* september 8-12, 2008, Ghent, Belgium.

Schäfer W., 1973. Der Oberrhein, sterbende Landschaft. *Natur und Museum,* 103: 1-29.

Schälchli U., Breitenstein M., Kirchhofer A., 2010. Kiesschüttungen zur Reaktivierung des Geschiebehaushalts der Aare - die kieslaichenden Fische freut's. *Wasser Energie Luft*, 102: 209-213.

Schmidt J.C., Wilcock P.R., 2008. Metrics for assessing the downstream effects of dams. *Water Resources Research,* 44, W04404, doi: 10.1029/2006WR005092.

Schmidt K.H., Ergenzinger P., 1992. Bedload entrainment, travel lengths, step lengths, rest periods-studied with passive (irons, magnetic) and active (radio) tracer techniques. *Earth Surface Processes and Landforms,* 17: 147-165.

Schmidt K.H., Gintz D., 1995. Results of bedload tracer experiments in a mountain river. In*:* Hickin E.J. [eds], *River Geomorphology*, John Wiley & Sons, Chichester, 145-158.

Schmidt J.C., 2012. The past, present, and future of the Colorado River. *International Conference on Integrative Sciences and Sustainable Development of Rivers*, june 26-28, 2012, Lyon, France.

Schmitt L., 1995. Approche méthodologique pour une restauration des anciens bras du Rhin. Mémoire de Maîtrise, UFR de Géographie de Strasbourg, 73 p.

Schmitt L., 2010. Dynamique fluviale et gestion environnementale durable des hydrosystèmes. Application à une grande plaine alluviale (Rhin-Ill, Alsace) et à un hydrosystème périurbain (Yzeron, Ouest lyonnais). Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Lumière Lyon 2, 296 p.

Schmitt L., Kleinas C., Carozza J.M., Piégay H., 2007. Longitudinal evolution of the channel pattern of the Rhine between Basel and Lauterbourg before rectification (France-Germany). *Meeting of the "Large Rivers Group" of the International Association of Geomorphology*, june 24th - july 1st, 2007, Lyon, France.

Schmitt L., Kleinas C., Piégay H., Carozza J.M., in prep. Longitudinal evolution of the Upper Rhine channel pattern and their controlling factor.

Schmitt L., Lebeau M., Trémolières M., Defraeye S., Coli C., Denny E., Beck T., Dillinger M., Dor J.C., Gombert P., Gueidan A., Manne S., Party J.P., Perrotey P., Piquette M., Roeck U., Schnitzler A., Sonnet O., Vauclin V., Weiss M., Zacher N., Wilms P., 2009. Le « Polder » d'Erstein : objectifs, aménagements et retour d'expérience sur cinq ans de fonctionnement et de suivi scientifique environnemental (Rhin, France). *Ingénieries Eau-Agriculture-Territoires*, n° spécial, 67-84.

Schmitt L., Trémolières M., Blum C., Dister E., Pfarr U. *et al.*, 2012. 30 years of restoration works on the two sides of the Upper Rhine River: feedback and future challenges. *International Conference on Integrative Sciences and Sustainable Development of Rivers*, june 26-28, 2012, Lyon, France.

Schneider G., 1966. Zusammenfassende darstellung der Rheinregulierung Strassburg/Kehl-Istein. Baukommission des Unternehmens "Regulierung des Rheins zwischen Strassburg/Kehl und Istein", Freiburg, 477 p.

Schnitzler-Lenoble A., 2002. Écologie des forêts naturelles d'Europe. Biodiversité, sylvigénèse, valeur patrimoniale des forêts primaires. Tec & Doc, Lavoisier, Paris, 271 p.

Schoneboom T, Geisenhainer P., Dittrich A., 2010. Analyse der Rheinprofile zwischen Märkt und Breisach, Rhein km 174.400 bis Rhein km 224.400 der Jahre 1993, 1999 und 2009. Bericht Nr. 998. Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, 22 p. + annexes.

Schoor M.M., Wolfert H.P., Maas G.J., Middelkoop H., Lambeek J.J.P., 1999. Potential for floodplain rehabilitation based on historical maps and present-day processes along the River Rhine, The Netherlands. In: Marriott S.B. & Alexander J. [eds], *Floodplains: Interdisciplinary Approaches*, Geological Society, London, special publications, 163: 123-137.

Schumm S.A., 1969. River metamorphosis. *Journal of the Hydraulic Division,* HYI: 255-63.

Schumm S.A., 1977. The fluvial system. John Wiley & Sons, Chichester, 338 p.

Schumm S.A., 1991. To interpret the earth: ten ways to be wrong. University Press, Cambridge, 142 p.

Schwartz R., Kozerski H.P., 2003. Entry and deposits of suspended particulate matter in groyne fields of the Middle Elbe and its ecological relevance. *Acta Hydrochim. Hydrobiol.*, 31 (4-5): 391-399.

Sear D.A., Lee M.W.E., Oakey R.J., Carling P.A., Collins M.B., 2000. Coarse sediment tracing technology in littoral and fluvial environments. In: Foster I.D.L. [eds], *Tracers in Geomorphology*, John Wiley & Sons, Chichester, 21-55.

Simler L., Valentin J., Duprat A., 1979. La nappe phréatique de la plaine du Rhin en Alsace. Université Louis Pasteur, Institut de Géologie, Strasbourg, 266 p.

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., Darby S.E., 1999. The nature and significance of incised river channel. In: Darby S.E. & Simon A., [eds], *Incised River Channels: Processes, Forms, Engineering and Management*, John Wiley & Sons, Chichester, 3-18.

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.

Skalak K., Pizzuto J., 2010. The distribution and residence time of suspended sediment stored within the channel margins of a gravel-bed bedrock river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35: 435-446.

Skalski J.R., Smith S.G., Iwamoto R.N., Williams J.G., Hoffman A., 1998. Use of passive integrated transponder tags to estimate survival of migrant juvenile salmonids in the Snake and Columbia rivers. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55: 1484-1493.

Sklar L.S., Fadde J., Venditti J.G., Nelson P., Wydzga M.A., Cui Y., Dietrich W.E., 2009. Translation and dispersion of sediment pulses in flume experiments simulating gravel augmentation below dams. *Water Resources Research*, 45, W08439, doi: 10.1029/2008WR007346.

Smeets E., Weterings R., 1999. Environmental indicators: typology and overview. *Technical Report n° 25,* European Environment Agency, Copenhagen, 19 p.

Smith L.M., Winkley B.R., 1996. The response of the Lower Mississippi River to river engineering. *Engineering Geology*, 45: 433-455.

Smith N.D., 1974. Sedimentology and bar formation in the Upper Kicking Horse River, a braided outwash stream. *Journal of Geology*, 82: 205-223.

Smith N.D., Cross T.A., Dufficy J.P., Clough S.R., 1989. Anatomy of an avulsion. *Sedimentology*, 36: 1-23.

Smith P.E., Orvos D.R., Cairns J., 1993. Impact assessment using the before-after-control-impact (BACI) model: concerns and

comments. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 50: 627-637.

SOGREAH, 2003. Etude préalable au SAGE Ill – Nappe – Rhin. Débits nécessaires à la restauration des écosystèmes aquatiques en plaine d'Alsace. Région Alsace, Direction de l'Agriculture, de la Forêt, du Tourisme et de l'Environnement, n° 0 84 5267, mai 2003, 100 p.

Souchon Y., Nicolas V., 2011. Barrages et seuils : principaux impacts environnementaux. Onema-Cemagref, Vincennes, Antony, 28 p.

Späth V., Zimmermann R., Spengler K.H., 1997. Untersuchungen zur Entstehung und Entwicklungsdynamik von Auenwäldern auf Buhnenfeldern südlich Breisach. Institut für Landschaftsökologie und Naturschutz, Bühl, 49 p.

Steiger J., Gurnell A.M., Ergenzinger P., Snelder D., 2001. Sedimentation in the riparian zone of an incising river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26 (1): 91-108.

Sternberg H., 1875. Untersuchungen Über Längen- und Querprofil geschiebeführender Flüsse. *Zeitschrift für Bauwesen*, XXV: 483-506.

Stewardson M., Rutherfurd 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.

Stillwater Sciences, 2002. Merced River corridor restoration plan. Stillwater Sciences, Berkeley, 245 p.

Stillwater Sciences, 2005. Conceptual restoration design for the Merced River Ranch. Volume I: conceptual design report. Merced River Corridor Restoration Plan Phase IV: Dredger Tailings Reach, Technical Memorandum n° 6, Stillwater Sciences, Berkeley, 141 p.

Stillwater Sciences, 2006. Merced River Ranch channel floodplain restoration: post implementation monitoring plan. Merced River Corridor Restoration Plan Phase IV: Dredger Tailings Reach, Technical Memorandum n° 9, Stillwater Sciences, Berkeley, 72 p.

Sukhodolov A., Uijttewaal W.S.J., Engelhardt C., 2002. On the correspondence between morphological and hydrodynamical patterns of groyne fields. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27: 289-305.

Surian N., 1999. Channel changes due to river regulation: the case of the Piave River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24: 1135-1151.

Surian N., 2000. Sediment size in a gravel-bed river (Piave River, Italy): longitudinal, vertical and temporal variability. In: Lenzi M.A. [eds], *Dynamics of Water and Sediments in Mountain Basins*, Quaderni di Idronomia Montana, 20: 131-143.

Surian N., 2002. Downstream variation in grain size along an Alpine river: analysis of controls and processes. *Geomorphology*, 43: 137-149.

Surian N., Rinaldi M., 2003. Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology*, 50: 307-326.

Ten Brinke W.B.M., Bolwidt L.J., Snippen E., Van Hal L.W.J., 2001. Sedimentbalans Rijntakken 2000. Rijkswaterstaat/RIZA report 2001, 043, Centraal Bureau voor de Statistiek, Arnhem, The Netherlands.

Ten Brinke W.B.M., Schulze F.H., Van der Weer P., 2004. Sand exchange between groyne-field beaches and the navigation channel of the Dutch Rhine: the impact of navigation versus river flow. *River Research and Applications*, 20: 899-928.

Thompson D.M., 2002. Long-term effect of instream habitat-improvement structures on channel morphology along the Blackledge and Salmon Rivers, Connecticut, USA. *Environmental Management*, 29: 250-265. doi: 10.1007/s00267-001-0069-0.

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.

Trémolières M., Schnitzler A., Carbiener D., 2002. Quel système de référence pour la restauration des systèmes alluviaux rhénans ? *Rev. Ecol. (Terre Vie)*, suppl. 9: 131-145.

Tricart J., Bravard J.P., 1991. Le cours périalpin du Rhin, du Rhône et du Danube : aménagement fluvial et dérives de l'environnement. *Annales de Géographie*, 561-562: 668-713.

Tritthart M., Liedermann M., Habersack H., 2009. Modelling spatio-temporal flow characteristics in groyne fields. *River Research and Applications*, 25: 62-81.

Tritthart M., Liedermann M., Schober B., Habersack H., 2011. Numerical modelling of sediment transport and morphodynamics in the Danube River. In: Habersack H., Schober B., Walling D. [eds], *International Conference on the Status and Future of the World's Large Rivers*, april 11-14, 2011, Vienna, Austria, Abstract Book, 175.

Tsujimoto T., Kitamura T., 1996. Rotational degradation and growth of vegetation along a stream. *International Conference on*

New/Emerging Concepts for Rivers "Rivertech 96", Chicago, Illinois, 632-657.

Tulla J.G., 1825. Mémoire sur la rectification du cours du Rhin. *Journal de la Société des Sciences, Agriculture et Arts de Strasbourg*, 5-69.

Uehlinger U., Wantzen K.M., Leuven R.S.E.W., Arndt H., 2008. The Rhine River basin. In: Tockner K., Robinson C.T., Uehlinger U. [eds], *Rivers of Europe*, Academic Press, London, 199-245.

Uijttewaal W.S.J., Lehmann D., Van Mazijk A., 2001. Exchange process between a river and its groyne fields: model experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127: 928-936.

Vallauri D., Grel A., Granier E., Dupouey J.L., 2012. Les forêts de Cassini. Analyse quantitative et comparaison avec les forêts actuelles. Rapport WWF/INRA, Marseille, 64 p.

Van Looy K., 2006. River restoration & biodiversity conservation. A disorder approach. Research Institute for Nature and Forest, Brussels, 392 p.

Van Looy K., 2012. Le projet de restauration sur la Meuse Mitoyenne : conceptualisation et réalisation d'une nouvelle morphologie pour un grand fleuve. *Cafés Fluviaux*, 6 juillet 2012, ENS de Lyon.

Vannote R.L., Minshall G.W., Cummins K.W., Sedell J.R., Cushing C.E., 1980. The River Continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37: 130-137.

Viollet P.L., 2010. Aménagements hydroélectriques. Doc. BE 8 580, 14 p.

Vogt H., 1980. Le relief en Alsace. Etude géomorphologique du rebord sud-occidental du fossé rhénan. *Thèse de Doctorat*, ULP Strasbourg, Editions Oberlin, 239 p.

Vogt H., 1984. Les milieux naturels de l'Alsace. In: Humbert J., Nonn H., Paul P., Vogt H. [eds], *Toute l'Alsace. La terre et les hommes*, Editions Mars et Mercure, 7-37.

Walser E., 1959. Le bassin du Rhin à l'amont de Bâle et l'influence des lacs sur le régime du fleuve. *La Houille Blanche*, 2: 115-124.

Walters C. J., 1986. Issues of adaptive management of renewable resources. Macmillan, New York, 374 p.

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.

Warner R.F., 2000. Gross channel changes along the Durance River, Southern France, over the last 100 years using cartographic data. *Regulated Rivers: Research & Management*, 16: 141-157.

Wasson J.G., Malavoi J.R., Maridet L., Souchon Y., Paulin L., 1998. Impacts écologiques de la chenalisation des rivières. Cemagref eds, Coll. « Etudes » : Gestion des milieux aquatiques, n° 14, 158 p.

Weitbrecht V., 2004. Influence of dead-water zones on the dispersive mass transport in rivers. *Thèse de Doctorat*, Université de Karlsruhe, 129 p.

Wentworth C.K., 1922. A scale grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30: 377-392.

Werner L.G., 1928. Les divagations du Rhin dans le Haut-Rhin. *Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse*, 184-193.

Werrity A., 1992. Downstream fining in a gravel bed river in Southern Poland: lithological controls and the role of abrasion. In: Billi P., Hey R.D., Thorne C.R., Tacconi P. [eds], *Dynamics of Gravel-Bed Rivers*, John Wiley & Sons, Chichester, 333-346.

Wetzlar H.J., 2002. Vision pour le Vieux Rhin d'un point de vue limnologique. *Colloque tripartite « Une chance pour le Rhin Supérieur - la mise en œuvre de la Directive Cadre Eau sur le Vieux Rhin »*, 16 février 2002, Colmar, France, 19-20.

Williams G.P., Wolman M.G., 1984. Downstream effects of dams on alluvial rivers. *USGS circular 781,* 48 p.

Winterbottom S.J., Gilvear D.J., 2000. A GIS-based approach to mapping probabilities of river bank erosion: Regulated River Tummel, Scotland. *Regulated Rivers: Research & Management,* 16: 127-140

Wirtz C., Bölscher J., 2008. Untersuchungen zur Interaktion von Auenvegetation und Sedimenttransport am Oberrhein, Untersuchungsgebiet Hartheim und Chalampé. Teilbericht 1, Morphodynamik 2007. Institut für Geographische Wissenschaften, Freie Universität Berlin, 94 p. + annexes.

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., 2012. The complexity of the real in the context of the field tradition in geomorphology. *43rd Annual Binghamton Geomorphology Symposium "The Field Tradition in Geomorphology"*, september 21-23, 2012, Jackson Hole, Wyoming, USA.

Wohl E., Merritts D.J., 2007. What is a natural river? *Geography Compass*, 1 (4): 871-900.

Wohl E.P., Angermeier L., Bledsoe B., Kondolf G.M., MacDonnell L., Merritt D.M., Palmer M.A., Poff N.L., Tarboton D., 2005. River restoration. *Water Resources Research*, 41, W10301, doi: 10.1029/2005WR003985.

Wolman M.G., 1954. A method of sampling coarse river-bed material. *Transactions of the American Geophysical Union*, 35 (6): 951-956.

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 p.

Woolsey S.,Capelli F., Gonser T., Hoehn E., Hostmann M., Junker B., Paetzold A., Roulier C., Schweizer S., Tiegs S.D., Tockner K., Weber C., Peter A., 2007. A strategy to assess river restoration success. *Freshwater Biology*, 52: 752-769.

World Commission on Dams (WCD), 2000. Dams and development: a new framework for decision making. Earthscan Ltd, Sterling, 404 p.

WSA, 2003. 1978-2003 : 25 ans d'apport en débit solide à Iffezheim- Bilan. Rapport à la 10ème réunion du Comité de la Commission Permanente, Strasbourg, 13 p.

WWF/IUCN, 2000. Forest landscape restoration. *WWF/IUCN 1st international workshop on forest restoration initiative "Forests Reborn"*, july 3-5, 2000, Segovia, Spain.

Yossef M.F.M., 2005. Morphodynamics of rivers with groynes. *Thèse de Doctorat*, Université de Technologie de Delft, 225 p.

Yossef M.F.M., De Vriend H.J., 2010. Sediment exchange between a river and its groyne fields: a mobile-bed experiment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136 (9): 610-625.

Zeh Weissmann H., Könitzer C., Bertiller A., 2009. Ecomorphologie des cours d'eau suisses. Etat du lit, des berges et des rives. Résultats des relevés écomorphologiques (avril 2009). Etat de l'environnement n° 0926, Office Fédéral de l'Environnement, Berne, 100 p.

Liste des figures

Figure 1.1 : Organisation générale du manuscrit 19

Figure 1.2 : Aménagement hydro-électrique du Rhin supérieur entre Kembs et Iffezheim : huit usines sont implantées en dérivation et deux usines sont implantées en ligne (d'après *www.encyclopedie.bseditions.fr*) 26

Figure 1.3 : Emboîtement schématisé de l'hydrosystème fluvial dans le système fluvial (d'après Amoros et Petts, 1993 ; Rollet, 2007 ; Morandi et Piégay, 2012)..... 27

Figure 1.4 : Exemples d'interactions entre les variables hiérarchisées du système fluvial et les actions anthropiques (modifié d'après Thorne, 1997 et Bledsoe, 2010)..... 28

Figure 1.5 : a) Balance de Lane illustrée par Borland (1960). b) Déséquilibre de la balance avec l'anthropisation des cours d'eau (modifié d'après Bledsoe, 2010) 29

Figure 1.6 : Evolution de la ligne d'eau d'étiage sur la South Fork Forked Deer River : la chenalisation a été réalisée entre la confluence et la station 1 en 1967-68. La station 3 se trouve à 21 km en amont de la station 1 (Robbins et Simon, 1983, d'après Simon et Rinaldi, 2006) 30

Figure 1.7 : Comparaison des caractéristiques de trois régimes hydrologiques théoriques : régime naturel de type pluvial, régime artificiel en aval d'un grand barrage écrêteur de crue, régime de débit réservé en aval d'une dérivation de centrale hydro-électrique (d'après Baran et Leroyer-Gravet, 2007) 32

Figure 1.8 : Diagramme de modification des débits liquides (Q_l*) et solides (Q_s*) étant à l'origine d'un déficit ou d'un excès sédimentaire en aval de barrages. Les diagonales représentent l'équilibre dynamique ($I^* = 1$) pour D^* = 0.65, 1 et 1.2. Chaque point représente un tronçon de rivière, et chaque figuré renvoie à une rivière différente dans la base de données (d'après Schmidt et Wilcock, 2008) 33

Figure 1.9 : Scénarios d'évolution d'un tronçon fluvial en aval d'un barrage, en réponse aux modifications relatives des débits liquides (Q_l) et solides (Q_s). L'importance des modifications décroit de l'amont vers l'aval (d'après Petts et Gurnell, 2005 basé sur Schumm, 1969)..... 34

Figure 1.10 : Modèles d'ajustement de tronçons fluviaux aménagés : a) Fonction hyperbolique d'incision en aval de barrages. b) Fonction hyperbolique de rétraction en aval de barrages (Williams et Wolman, 1984). c) Fonction exponentielle d'incision après des changements d'occupation des sols (phase 1) et des barrages et extractions (phase 2) (Surian et Rinaldi, 2003)..... 35

Figure 1.11 : Modèle conceptuel des liens entre les compartiments physiques et biologiques dans les systèmes alluviaux (d'après Stillwater Sciences, 2005)..... 36

Figure 1.12 : Illustration des impacts de l'incision ou de la chenalisation sur les habitats et biocénoses liés au cours d'eau : situation avant (a) et après (b) aménagement (d'après une réalisation de L. Terraz, DREAL Franche-Comté, 2003 ; Adam *et al.*, 2006) 38

Figure 1.13 : Options de gestion selon l'état de dégradation d'un tronçon fluvial (d'après Boon *et al.*, 1992)..... 40

Figure 1.14 : Remise en cause de la réversibilité des processus avec le concept de trajectoire temporelle d'évolution (d'après Dufour et Piégay, 2009)..... 41

Figure 1.15 : Cadre conceptuel pour la définition d'objectifs de restauration (d'après Dufour et Piégay, 2009 ; Dufour *et al.*, 2010) 42

Figure 1.16 : Trajectoires temporelles de dégradation et de restauration proposées par Sarr (2002) et transposées par Kondolf *et al.* (2008) pour modéliser la réponse piscicole d'une suppression de barrage : a) dégradation réversible et restauration symétrique. b) dégradation irréversible. c) dégradation réversible et restauration asymétrique 44

Figure 1.17 : Cadre conceptuel des trajectoires temporelles de restauration des compartiments physiques et biologiques à la suite de la suppression d'un barrage (Doyle *et al.*, 2005) 45

Figure 1.18 : Principe de la gestion adaptative appliquée à la restauration des cours d'eau (modifié d'après Stillwater Sciences, 2005)..... 46

Figure 1.19 : Champ des contraintes de la durabilité (d'après Woolsey *et al.*, 2005) 47

Figure 1.20 : Sectorisation longitudinale du système fluvial rhénan et localisation du tronçon d'étude 52

Figure 1.21 : Gradient longitudinal du Rhin supérieur entre Bâle et Maxau et caractérisation synthétique des secteurs du Rhin sauvage (1828) (d'après Carbiener, 1970 ; Carbiener et Dillmann, 1992 ; Schmitt, 2010) 55

Figure 1.22 : Evolution des secteurs du Rhin supérieur en fonction de la pente et de l'évolution verticale holocène (modifié d'après Schmitt, 2010) 56

Figure 1.23 : Débits moyens mensuels interannuels et module du Rhin à Bâle sur la période 1891-2008 57

Figure 1.24 : a) Crues du Rhin à Bâle entre 1808 et 2008 (débits maximum annuels instantanés). b) 20 plus grandes crues enregistrées à Bâle depuis 1808 (débits maximum mensuels instantanés) ; les lignes grisées concernent la période avant 1890 57

Figure 1.25 : Le Rhin en tresses et anastomoses vers 1830 : vue vers l'amont depuis le rocher d'Istein (peinture de P. Birmann, 1758-1844) 59

Figure 1.26 : Evolution du tracé en plan du Rhin au niveau d'Istein entre 1843 (a) et 1884 (b) (d'après Honsell, 1885) 60

Figure 1.27 : Exemples de digues de correction construites en 1840, 1860 (a) et après 1880 (b) (d'après Honsell, 1885) 60

Figure 1.28 : Vue de la barre d'Istein depuis l'aval (cliché F. Arnaud, 2009) 61

Figure 1.29 : Effets de la correction au niveau du rocher d'Istein : a) Rocher d'Istein au début du 19ème siècle (peinture présentée sur le panneau d'information du rocher d'Istein, date inconnue). b) Rocher d'Istein en 2010. c) Echelle des hautes eaux : la crue de septembre 1852 (5642 m^3/s) a atteint 1,36 m au-dessus du sol. A la fin de la correction, le lit s'est incisé et la plus grande crue jamais enregistrée, en juin 1876 (5700 m^3/s), est 89 cm plus bas que celle de 1852 (clichés F. Arnaud, 2010) 61

Figure 1.30 : Cartes postales éditées par les défenseurs du projet du canal latéral (années 1920, fourni par E. Dillmann) 62

Figure 1.31 : Plans schématiques de disposition des ouvrages de la régularisation : a) Informations sur les matériaux de construction. Les profils a-a, b-b et c-c sont montrés dans la fig. 1.32, a (d'après Schneider, 1966). b) Informations sur les distances entre les ouvrages et sur la largeur du chenal navigable (en mètres) (d'après Dpt. Féd. Int., 1929) 63

Figure 1.32 : a) Profils schématiques des épis (d'après Dpt. Féd. Int., 1929 ; Commission des travaux, 1953). b) Installation des gabions en fascinage (environ 1935, carte postale fournie par E. Dillmann) 64

Figure 1.33 : Expérimentation portant sur la mise en place d'un pavage artificiel en aval du canal de fuite de Kembs en 1949 : a) Plan schématique de localisation. b) et c) Vues des barges de déversement des matériaux. d) Vue des matériaux entre 15 et 38 cm de diamètre (Schneider, 1966) 65

Figure 1.34 : a) Chantier de Kembs : machine à bétonner les talus (1930). b) Chantier d'Ottmarsheim : vue sur le Grand Canal d'Alsace et le Vieux Rhin (environ 1950) (cartes postales fournies par E. Dillmann) 66

Figure 1.35 : Plan de situation du Vieux Rhin et du Grand Canal d'Alsace. Les années de construction des biefs successifs du Grand Canal d'Alsace et de réduction des débits dans les tronçons du Vieux Rhin correspondants sont indiquées 67

Figure 1.36 : Débits maximum annuels instantanés à Bâle et dans le Vieux Rhin entre 1928 et 2008. Le débit maximal entonné dans le Grand Canal d'Alsace a été augmenté par paliers, de 850 m^3/s à 1400 m^3/s 68

Figure 1.37 : Vision des Organisations Non Gouvernementales pour la restauration du Vieux Rhin (d'après Buisson, 2003) 73

Figure 1.38 : Acteurs et champs thématiques inclus dans le projet INTERREG. Les champs grisés ont été traités dans la thèse (d'après Piégay *et al.*, 2009) 75

Figure 1.39 : Principe de la restauration du Vieux Rhin envisagée dans le projet INTERREG (d'après Piégay *et al.*, 2010) 75

Figure 2.1 : Description des méthodes de désagrégation et d'agrégation spatiale pour l'identification de tronçons fluviaux homogènes selon la procédure d'Alber et Piégay (2011). Exemple des superficies de bancs en 1956 extraites à un pas de 100 m. Illustration entre les PK 175 et 179 81

Figure 2.2 : Description de la méthode de génération des segments élémentaires selon la procédure d'Alber et Piégay (2011). Exemple de la segmentation de l'espace intra-digues à un pas de 100 m. Illustration sur l'ortho-photographie d'août 2008 au droit de la barre d'Istein 81

Figure 2.3 : Principe du graphique en boîte (*boxplot*) 82

Figure 2.4 : Principe du graphique cumulé. Les flèches indiquent les ruptures détectées avec le test de Hubert. Les lieux indiqués en gras sur l'axe des abscisses correspondent aux trois « bouchons » de Kembs, Ottmarsheim et Fessenheim 83

Figure 2.5 : Organisation du chapitre 2 85

Figure 2.6 : a) Principe de la mesure des épaisseurs de sédiments fins sur une marge du Vieux Rhin (Ferrier, 2011). b) Mesure au pénétromètre PANDA (cliché V. Ferrier, 2011) 89

Figure 2.7 : Description de la procédure de calcul des volumes de sédiments érodés et déposés dans la bande active et sur les marges végétalisées à partir des profils en travers. Exemple du PK 182,7 entre 1950/56 et 1985/93. Illustration sur l'ortho-photographie d'avril 2008 92

Figure 2.8 : Exemples de profils en travers en 1884 (a) et 1923 (b). La ligne d'eau d'étiage (*Niederwasser*) correspond à un débit de 540 m^3/s à Bâle (modifié d'après Johnstone, 2010) 94

Figure 2.9 : Exemples d'évolution de profils en travers entre 1931 et 2009 (d'après Johnstone, 2010) 95

Figure 2.10 : Evolution du profil en long du talweg entre 1880 et 2009 (en m tous les 200 m). Les deux flèches indiquent les ruptures de pente 96

Figure 2.11 : Evolution de la variabilité du talweg en aval de la barre d'Istein entre 1880 et 2009 (en m tous les 200 m) 97

Figure 2.12 : Variations altimétriques du talweg entre 1880 et 2009 (tous les 200 m entre les PK 178 et 214 : n = 179) : a) Evolution de la variation (en m). b) Evolution de la vitesse de variation (en cm/an). Les lettres a et b indiquent les groupes homogènes d'après le test de Wilcoxon 98

Figure 2.13 : Cumuls des vitesses de variation altimétrique du profil en long du barrage de Kembs au barrage de Breisach entre 1880 et 2009 (en m/an, tous les 200 m). Les flèches indiquent les ruptures détectées avec le test de Hubert 99

Figure 2.14 : Evolution de la vitesse de changement vertical dans la bande active entre 1950/56 et 2009 (en m^3/an, tous les 200 m jusqu'au PK 214 : n = 197) 101

Figure 2.15 : Evolution de la vitesse de changement vertical sur les marges végétalisées entre 1950/56 et 2009 (en m^3/an, tous les 200 m jusqu'au PK 214 : n = 197) 101

Figure 2.16 : Evolution du taux de sédimentation en fonction de l'âge de la végétation au droit de chaque sondage (en cm/an, n total = 321) 102

Figure 2.17 : Evolution de l'âge de la végétation en fonction de : a) l'altitude relative de chaque sondage par rapport à la ligne d'eau d'étiage (topographie de 2009), b) l'éloignement au chenal (axe médian intra-digues) (n total = 321) 103

Figure 2.18 : Cumuls des vitesses d'érosion et de dépôt dans la bande active entre 1950/56 et 2009 (en m^3/an/profils en travers tous les 200 m : n = 197 ou 231). Les flèches indiquent les ruptures détectées avec le test de Hubert 104

Figure 2.19 : Cumuls des volumes de sédiments déposés sur les marges depuis 1950 à partir de l'analyse des profils en travers et des sondages d'épaisseurs (en m^3/profil en travers tous les 200 m : n = 197) 105

Figure 2.20 : Méthode de comparaison des talwegs de 1828 et 1838 et de l'axe médian entre les digues de la correction en 1872. Illustration dans le secteur d'Ottmarsheim 111

Figure 2.21 : Extrait des cartes de 1828, 1872 et 1925 dans le secteur d'Istein (PK 180). Les éléments de légende sont traduits dans le tableau 2.11 114

Figure 2.22 : a) Distribution des écarts entre les talwegs de 1828 et 1838 (tous les 500 m : n = 121). b) Indices de sinuosité en 1828, 1838 et 1872 (tous les 5 km : n = 11). Les lettres a et b indiquent les groupes homogènes d'après le test de Wilcoxon 117

Figure 2.23 : Evolution des superficies totales des unités physionomiques de la plaine rhénane entre 1828 et 1925 : superficies supérieures (a) et inférieures (b) à 1000 ha (somme des segments élémentaires de 5 km : n total = 11) 118

Figure 2.24 : Vitesses de changement des unités physionomiques de la plaine rhénane entre 1828 et 1925 (en ha/an, n total = 11) 118

Figure 2.25 : Extrait des cartes de la plaine rhénane en 1828, 1872 et 1925 entre les PK 174 et 182 119

Figure 2.26 : a) Evolution des superficies totales des types de chenaux entre 1828 et 1925. b) Vitesses de changement des types de chenaux entre 1828 et 1925. L'évolution des mares et des chenaux à sec a également été renseignée (n total = 11) 120

Figure 2.27 : Extrait de la cartographie des chenaux en 1828, 1872 et 1925 entre les PK 202 et 207 121

Figure 2.28 : Cumuls des vitesses de changement des types de chenaux normalisées par la largeur de l'hydrosystème fluvial entre 1828 et 1925 (en ha/an/segments élémentaires de 500 m : n = 107). Les flèches noires et grises indiquent les ruptures détectées avec le test de Hubert. Les cercles rouges localisent la prédominance de changements au cours d'une période, et les pointillés et flèches rouges mettent en évidence la propagation des changements vers l'aval 122

Figure 2.29 : a) Schéma théorique du patron hydrodynamique entre deux épis en fonction du ratio d'aspect. b) Classification du patron morphologique entre deux épis établie par Hinkel (1999) sur l'Elbe. Deux courants de recirculation favoriseraient un patron dissymétrique (classes 2 à 5) (d'après Sukhodolov *et al.*, 2002) 125

Figure 2.30 : Longueur cumulée des épis sur chaque rive (en m/segments élémentaires de 100 m : n = 510). Les cercles rouges localisent des sections où aucun épi n'a été construit..... 126

Figure 2.31 : Disposition des épis, seuils de fond et digues longitudinales sur la carte des unités physionomiques du Vieux Rhin en 1956. Illustration au PK 192..... 126

Figure 2.32 : Illustration de bancs non contraints par des épis sur la carte des unités physionomiques du Vieux Rhin en 1956 : aval de la barre d'Istein (a), coude de Niffer (b), bouchon d'Ottmarsheim (c). Le cercle rouge localise un banc « mixte », vraisemblablement induit à la fois par la barre d'Istein et par la convexité créée par les épis en rive gauche..... 128

Figure 2.33 : Evolution des superficies totales des principales unités physionomiques du Vieux Rhin entre 1956 et 2008 : superficies supérieures (a) et inférieures (b) à 50 ha (somme des segments élémentaires de 100 m : n = 468)..... 129

Figure 2.34 : Evolution des superficies totales d'herbacées, de buissons/arbustes et d'arbres entre 1956 et 2008 : rive gauche (a) et rive droite (b) (somme des segments élémentaires de 100 m : n = 468)..... 129

Figure 2.35 : a) Evolution des largeurs de bande active entre 1956 et 2008. b) Evolution des vitesses de variation : < 0 = rétraction, > 0 = élargissement (données renseignées par segments élémentaires de 100 m : n = 468). Les lettres a à f indiquent les groupes homogènes d'après le test de Wilcoxon..... 131

Figure 2.36 : Cumuls des vitesses de rétraction (valeurs négatives) et d'élargissement (valeurs positives) de la bande active entre 1956 et 2008 (en ha/an) et cumul des superficies de bancs en 1956 (en ha) (segments élémentaires de 100 m : n = 510). Les flèches indiquent les ruptures détectées avec le test de Hubert. Les points gris indiquent la position des ruptures détectées sur les superficies de bancs et les chiffres gris indiquent le numéro des tronçons fluviaux homogènes..... 132

Figure 2.37 : Occurrence des crues supérieures à Q_2 = 2800 m^3/s (a) et Q_{10} = 3700 m^3/s (b) à Bâle depuis 1950. Les dates des campagnes aériennes sont indiquées par des croix 133

Figure 2.38 : Ratio des largeurs moyennes de bande active en amont et en aval du bouchon de Kembs (données renseignées par segments élémentaires de 100 m : n = 59 et 406 en amont et en aval)..... 134

Figure 2.39 : Evolution des superficies de bancs entre 1956 et 2008 (en ha/segments élémentaires de 100 m : n = 432). Les lettres a à e indiquent les groupes homogènes d'après le test de Wilcoxon 135

Figure 2.37 : Cumuls des superficies de bancs entre 1956 et 2008 (en ha/segments élémentaires de 100 m : n = 510). Les encadrés rouges localisent les trois secteurs préférentiels d'apparition de bancs depuis les années 1990 135

Figure 2.41 : Illustration de l'évolution planimétrique des bancs entre 1956 et 2008 entre les PK 183 et 186. Les encadrés rouges sur la carte de 2008 localisent les sites-pilotes de recharge sédimentaire et d'érosion maitrisée des berges des projets INTERREG et EDF..... 137

Figure 2.42 : Illustration de l'évolution planimétrique des bancs entre 1956 et 2008 entre les PK 191 et 193. L'encadré rouge sur la carte de 2008 localise le site-pilote d'érosion maitrisée des berges du projet EDF..... 137

Figure 2.43 : Illustration de l'évolution planimétrique des bancs entre 1956 et 2008 au PK 212. Les années 1991 et 1998 sont manquantes sur ce secteur..... 140

Figure 2.44 : Modèle exponentiel d'affinement sur un tronçon de la Piave (Italie) (Surian, 2002)..... 142

Figure 2.45 : Stratification verticale type d'un lit graveleux (*framework gravel*) : a) vue transversale : la couche de surface (le plus souvent armure ou pavage) protège la couche sous-jacente (d'après Church *et al.*, 1987). b)

distribution granulométrique type d'une armure et d'une subsurface (d'après Klingeman et Emmet, 1982, tiré de Malavoi *et al.*, 2011) 144

Figure 2.46 : Longueur et superficie de tous les bancs du Vieux Rhin (n = 267) et des 22 bancs sélectionnés pour l'analyse granulométrique (dimensions extraites de la carte des unités physionomiques de 2008) 146

Figure 2.47 : a) Représentation des trois axes caractéristiques d'une particule : *a* (grand), *b* (intermédiaire), *c* (petit). b) Gabarit à trous carrés. c) Tamis à maille carrée (clichés F. Arnaud, V. Ferrier, 2011) 146

Figure 2.48 : Variation longitudinale du D_{50} et du D_{84} des 22 têtes de bancs échantillonnées. Les flèches indiquent les ruptures détectées avec le test de Hubert 148

Figure 2.49 : Age des bancs (en rouge) extrait des cartographies diachroniques. Les bancs anciens sont majoritairement proches de l'enveloppe supérieure des variations du D_{50} et les bancs récents sont plutôt proches de l'enveloppe inférieure. Les flèches sur l'axe des abscisses indiquent la localisation des quatre échantillonnages volumétriques décrits en D/3.1.1 149

Figure 2.50 : Caractéristiques granulométriques des quatre bancs échantillonnés 152

Figure 2.51 : Phénomène de tuilage sur le banc du PK 183,95 (cliché F. Arnaud, 2011) 153

Figure 2.52 : Termes du bilan sédimentaire du Vieux Rhin entre le barrage de Kembs et le bouchon de Fessenheim. Le secteur aval, contrôlé par le barrage de Breisach, n'a pas été intégré au bilan 154

Figure 2.53 : Bilan des sédiments fins mobilisés entre le barrage de Kembs et le bouchon de Fessenheim entre 1990 et 2010 : a) Volumes totaux (en m^3). b) Volumes annuels moyens (en m^3/an) 158

Figure 2.54 : Bilan des sédiments grossiers mobilisés entre le barrage de Kembs et le bouchon de Fessenheim entre 1990 et 2010 : a) Volumes totaux (en m^3). b) Volumes annuels moyens (en m^3/an) 159

Figure 2.55 : a) Variations du niveau d'étiage (540 m^3/s à Bâle) aux échelles limnimétriques entre les PK 170 et 280 depuis 1828. L'encadré rouge localise le tronçon d'étude (d'après CHR, 1977). b) Abaissement du niveau d'étiage par périodes entre 1828 et 1920 161

Figure 2.56 : Représentation schématique des patrons longitudinaux d'évolution morphologique verticale et planimétrique mis en évidence dans le chapitre 2 au cours du 19ème siècle et de la première moitié du 20ème siècle. Les limites entre les tronçons fluviaux homogènes correspondent aux ruptures détectées avec le test de Hubert 162

Figure 2.57 : Représentation schématique de l'évolution de la section fluviale depuis 1950. Les vitesses (en m/an et cm/an dans les dimensions transversale et verticale, respectivement) correspondent aux valeurs médianes déduites de la comparaison des profils en travers (1950/56-1985/93, 1985/93-2009) tous les 200 m et des photographies aériennes (1956-1991, 1991-2008) tous les 100 m 164

Figure 2.58 : Représentation schématique des patrons longitudinaux d'évolution morphologique verticale et planimétrique mis en évidence dans le chapitre 2 au cours de la seconde moitié du 20ème siècle. Les limites entre les tronçons fluviaux homogènes correspondent aux ruptures détectées avec le test de Hubert 165

Figure 2.59 : Synthèse des ajustements morphologiques sous contrôles naturels et anthropiques mis en évidence dans ce chapitre. Les facteurs explicatifs de la mise en œuvre des aménagements ont été renseignés 167

Figure 2.60 : Représentation schématique de la trajectoire temporelle d'évolution du Rhin entre Kembs et Breisach depuis le 19ème siècle (modifié d'après Dufour et Piégay, 2009). L'amplitude des ajustements (ordonnées) est en unités relatives 169

Figure 3.1 : Procédé de recharge sédimentaire en aval du barrage d'Iffezheim (d'après CHR, 2009) 176

Figure 3.2 : Procédé d'introduction de sédiments grossiers dans le cadre du projet d'aménagement intégré du Danube en aval de Vienne (*granulometric bed improvement)* (d'après Jungwirth, 2008) 176

Figure 3.3 : a) Recharge sédimentaire de l'Aar : 12 000 m^3 (canton de Soleure, janvier 2005) (1) et 10 000 m^3 (canton de Berne, novembre 2005) (2) (Schälchli *et al.*, 2010). b) Recharge sédimentaire de la Mur par injection artificielle et érosion latérale (Kloesch *et al.*, 2008) 177

Figure 3.4 : Structure thématique du programme de suivi accompagnant le projet d'aménagement intégré du Danube en aval de Vienne (Schabuss *et al.*, 2008) 178

Figure 3.5 : a) Sondages granulométriques effectués à dix profondeurs différentes dans la zone d'excavation avant les travaux. b) Distribution granulométrique des dix sondages (d'après Dittrich *et al.*, 2010) 184

Figure 3.6 : a) Extrait du plan de recollement de Vinci Construction indiquant la position du dépôt injecté (04/11/10). Les sédiments ont été introduits entre les PK 182,46 et 183,08. b) Vues du chantier (clichés F. Arnaud, 2010) 186

Figure 3.7 : Structure thématique et objectifs du suivi géomorphologique 187

Figure 3.8 : Représentation de la structure temporelle du programme de suivi sur l'hydrogramme des débits journaliers à Bâle entre août 2009 et janvier 2012. Les campagnes E0, VA, etc. sont décrites en B/3.3 189

Figure 3.9 : Matériel utilisé pour le suivi topographique et bathymétrique : a) et b) Système DGPS base-mobile pour le suivi des zones émergées et peu profondes. b) Système écho-sondeur-GPS pour le suivi des zones profondes (clichés F. Arnaud, D. Béal, 2009-2010) 190

Figure 3.10 : Suivi topographique et bathymétrique par DGPS et écho-sondeur : a) Etat zéro caractérisé sur le tronçon de 4 km. b) Etat zéro bis caractérisé sur le site d'injection (600 m). c) Etat 1 caractérisé au droit du site d'injection remanié par la crue et jusqu'aux bancs alternés en aval (1,3 km) 191

Figure 3.11 : a) Vérification de l'identifiant des particules équipées par l'ESAT (cliché F. Arnaud, 2010). b) Formule de Church *et al.* (1987) reliant les axes *b* et *c*, et la taille *D* de la maille. c) Caractéristiques granulométriques des particules équipées 195

Figure 3.12 : Disposition des traceurs sur le site d'injection : a) Localisation des transects de particules individuelles et des amas de 50 particules (reconstitution du dépôt sur la vue aérienne d'août 2008). b) Vue d'un amas. c) Relevé de la position de chaque traceur par DGPS (clichés F. Arnaud, D. Béal, 2010) 195

Figure 3.13 : Protocoles de recherche des transpondeurs passifs : a) à pied. b) et c) en bateau (clichés F. Arnaud, D. Béal, 2011) 197

Figure 3.14 : Analyse des distances entre les doublons détectés par bateau (B) ou à pied (P) avec un DGPS, un GPS GeoXH ou un GPS Garmin : statistiques inférieures (a) ou supérieures (b) à 15 m 198

Figure 3.15 : Représentation schématique des unités sédimentaires et morphologiques d'un tronçon fluvial. Une grille systématique a été superposée pour réaliser un échantillonnage spatialement intégré (cf. fig. 3.16, b) (d'après Bunte et Abt, 2001) 200

Figure 3.16 : Représentation schématique des huit types d'échantillonnage granulométrique (Bunte et Abt, 2001) 201

Figure 3.17 : Suivi granulométrique selon une structure spatialement intégrée en cellules de 10 particules et échantillonnages de type Wolman de 100 particules chacun : a) Etat zéro caractérisé sur les six bancs du tronçon de 4 km et dans le chenal sur deux secteurs. b) Etat zéro bis caractérisé sur le site d'injection (600 m). c) Etat 1 caractérisé dans la partie terminale du site d'injection remanié par la crue (200 m) 203

Figure 3.18 : Etat du site d'injection avant, pendant et après la crue du 7-9 décembre 2010. Vues de la partie amont (PK 182,46 et 182,55), médiane (PK 182,85) et aval (PK 183,09) (clichés R. Ostermann, RPF) 206

Figure 3.19 : Suivi par imagerie aérienne : le front de progression de la vague sédimentaire est visible sur la vue aérienne du 22/03/2011 206

Figure 3.20 : Position des 18 profils en travers topographiques et bathymétriques dont les résultats sont présentés dans le chapitre 3 207

Figure 3.21 : Profils en travers topographiques et bathymétriques n°1 (amont) à 18 (aval) levés sur le tronçon de recharge avant les travaux (état zéro, bleu), après les travaux (état zéro bis, noir) et après la crue de décembre 2010 (état 1, rouge) 207

Figure 3.22 : Différence volumétrique entre les états 0 et 1 extraite des profils en travers (en m^3 par segments élémentaires d'environ 40 m) 211

Figure 3.23 : Position des 632 traceurs retrouvés suite aux campagnes de prospection de mai 2011 et octobre 2011 212

Figure 3.24 : Variation longitudinale du taux de détection en fonction de la position initiale des traceurs 213

Figure 3.25 : Distances parcourues par les 632 traceurs retrouvés 213

Figure 3.26 : Exemples de trajectoires de déplacement des traceurs et mise en évidence du phénomène de glissement de talus (entourés rouges) au niveau du transect n° 25 214

Figure 3.27 : Histogramme des fréquences de déplacement des traceurs 214

Figure 3.28 : Distances de déplacement des traceurs déposés en amas de 50 particules (pour la localisation de chaque amas, se référer à la fig. 3.12, a) 215

Figure 3.29 : Distances de déplacement des traceurs transportés vers le chenal ou vers la berge droite 215

Figure 3.30 : Déplacement vers le chenal ou vers la berge droite en fonction de la position transversale initiale des traceurs 216

Figure 3.31 : Variation des distances de déplacement en fonction de la position longitudinale initiale des traceurs 216

Figure 3.32 : Densité des traceurs retrouvés et exemples de trajectoires de déplacement 217

Figure 3.33 : Distribution granulométrique des échantillons de 100 particules de type Wolman collectés aux états zéro bis (E0+) et 1 (E1) 218

Figure 3.34 : Comparaison des distributions granulométriques calculées selon les deux méthodes d'échantillonnage et sur chaque secteur aux états zéro (E0) et 1 (E1)..... 220

Figure 3.35 : Ligne de courant (en jaune) et trajectoires de déplacement des traceurs (en noir) (Béraud, 2012) 225

Figure 3.36 : Contrainte au fond adimensionnelle et mobilité des traceurs : la contrainte au fond a été calculée en injectant en condition limite amont du modèle l'hydrogramme de crue de la station de Rheinweiler entre novembre 2010 et février 2011 (modifié d'après Béraud, 2012)..... 226

Figure 3.37 : Cartographie des faciès d'écoulement entre le bouchon de Kembs (PK 180) et la fin du tronçon de suivi (PK 186,5) (d'après Arnaud *et al.*, 2010). Les profils en travers topographiques et la position des traceurs retrouvés et du front de la vague sédimentaire ont été indiqués 228

Figure 3.38 : a) Matrice d'évaluation renseignant les couples de valeurs standardisées des indicateurs avant et après travaux. b) Définition des catégories d'amélioration ou de dégradation du site restauré par rapport à son état initial (Woolsey *et al.*, 2005)..... 233

Figure 3.39 : Représentation en diagramme-radar des résultats d'une action de restauration : le projet présenté à titre d'exemple a particulièrement bien réussi dans les domaines « variabilité morphologique et hydraulique », «connectivité longitudinale » et « respect des impératifs budgétaires » ; la « connectivité latérale » et « diversité et abondance semi-naturelles » sont moins probants (Woolsey *et al.*, 2005)..... 233

Figure 3.40 : Synthèse des objectifs morpho-écologiques, sociétaux et économiques identifiés pour la restauration du Vieux Rhin 235

Figure 4.1 : Diagramme de modification des débits liquides (*Ql**) et solides (*Qs**) étant à l'origine d'un déficit ou d'un excès sédimentaires. Les deux points noirs représentent des tronçons fluviaux théoriques. Les flèches pleines indiquent des modifications de la fourniture sédimentaire ou du régime des crues nécessaires pour tendre vers les conditions d'équilibre dynamique d'une rivière « naturelle ». Les flèches pointillées indiquent des modifications conduisant à une « miniaturisation » des conditions des variables de contrôle (d'après Schmidt et Wilcock, 2008) 243

Figure 4.2 : Représentation schématique des trajectoires temporelles de dégradation et de restauration du Rhin entre Kembs et Breisach (modifié d'après Dufour et Piégay, 2009). L'amplitude des ajustements observés (dégradation) ou supposés (restauration) est en unités relatives 248

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Impacts écologiques et socio-économiques liés à l'incision d'un tronçon fluvial aménagé (d'après Bravard *et al.*, 1999) 37

Tableau 1.2 : Principales options de restauration physique des cours d'eau selon la nature des altérations hydro-morphologiques (modifié d'après Habersack et Piégay, 2008) 43

Tableau 1.3 : Débits instantanés du Rhin à Bâle sur la période 1891-2008 (ajustement de Pearson III, OFEV) .. 57

Tableau 2.1 : Profils en long retenus pour l'analyse de l'évolution verticale du lit du Vieux Rhin (talweg)..... 87

Tableau 2.2 : Profils en travers retenus pour l'analyse de l'évolution verticale du lit du Vieux Rhin 87

Tableau 2.3 : Systèmes de nivellement et conversions appliquées pour comparer les données dans le système NN n.S. (informations de R. Ostermann et H. Lehmacher, RPF, 2010) (d'après Johnstone, 2010) 88

Tableau 2.4 : Evolution de la pente du talweg (en %) entre la barre d'Istein et le bouchon d'Ottmarsheim et en aval d'Ottmarsheim entre 1880 et 2009..... 96

Tableau 2.5 : Evolution de l'écart-type de la variabilité du talweg en aval de la barre d'Istein entre 1880 et 200997

Tableau 2.6 : Cartes retenues pour l'analyse surfacique des unités physionomiques de la plaine rhénane 107

Tableau 2.7 : Cartes retenues pour l'analyse des ouvrages de la régularisation..... 108

Tableau 2.8 : Missions aériennes retenues pour l'analyse surfacique des unités physionomiques du Vieux Rhin 109

Tableau 2.9 : Caractéristiques du géoréférencement des cartes et des plans..... 110

Tableau 2.10 : Données de géoréférencement des photographies aériennes 111

Tableau 2.11 : Définitions et caractéristiques des unités physionomiques de la plaine rhénane extraites des cartes 112

Tableau 2.12 : Critères de discrimination des types de chenaux extraits des cartes (modifié d'après Kleinas, 2003 ; Schmitt *et al.*, 2007 ; Schmitt, 2010)..... 113

Tableau 2.13 : Définition et caractéristiques des unités physionomiques du Vieux Rhin extraites des photographies aériennes..... 115

Tableau 2.14 : Exemples de coefficients tirés de la littérature..... 143

Tableau 2.15 : Exemples de degrés de pavage tirés de la littérature. Les lignes grisées sont citées par Bathurst (2007)..... 145

Tableau 2.16 : Comparaison du budget des sédiments grossiers (Arnaud, 2012) et de la capacité de transport solide par charriage (EDF R&D, 2009) en amont et en aval du PK 198..... 159

Tableau 3.1 : Questions posées, paramètres et méthodes couramment employés pour le suivi d'une recharge sédimentaire (d'après Bunte, 2004)..... 180

Tableau 3.2 : Questions posées, indicateurs et paramètres associés au suivi des recharges sédimentaires de l'Ain (d'après Lejot, 2008) 181

Tableau 3.3 : Questions scientifiques posées en amont de l'expérience de recharge sédimentaire du Vieux Rhin 183

Tableau 3.4 : Recensement d'études sur le traçage de particules en rivière par transpondeurs passifs (PIT tags). Les caractéristiques de la présente étude ont été renseignées 194

Tableau 3.5 : Recensement des échantillons collectés pour le suivi granulométrique..... 204

Tableau 3.6 : D_{50} des sommes d'échantillons de 10 particules collectés aux états zéro (E0) et 1 (E1) sur chaque unité morphologique (banc et chenal)..... 219

Tableau 3.7 : Comparaison des D_{50} calculés selon les deux méthodes d'échantillonnage aux états zéro (E0) et 1 (E1) sur chaque secteur 219

Tableau 3.8 : Synthèse des risques environnementaux identifiés en amont de l'expérience et résultats du suivi 227

Tableau 3.9 : Synthèse des gains morpho-écologique identifiés en amont de l'expérience et résultats du suivi . 228
Tableau 3.10 : Synthèse des indicateurs proposés par ECOTEC (2006) pour le suivi du milieu physique 236
Tableau 3.11 : Indicateurs d'évaluation morpho-écologique et sociétale proposés dans la présente étude 238

Résumé

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)

Le Rhin dans son parcours franco-allemand a été aménagé depuis deux siècles pour la protection contre les inondations, la navigation et la production hydro-électrique. La rectification (19ème siècle), la régularisation (1930) et la construction du Grand Canal d'Alsace (1928-1959) ont profondément altéré le fonctionnement hydro-sédimentaire du « Vieux Rhin », tronçon de 50 km court-circuité entre les barrages de Kembs et de Breisach, conduisant à une réduction de la complexité du tracé en plan, une incision, un pavage du fond du lit et une simplification des habitats aquatiques et riverains. La possibilité de restaurer le transport sédimentaire et la dynamique alluviale du Vieux Rhin est évaluée au sein de projets portés par la Région Alsace et EDF. Dans ce cadre, la présente thèse repose sur deux types d'approches de la géomorphologie fluviale, historique et expérimentale, afin de répondre à la problématique de restauration morpho-écologique du tronçon fluvial. Ce travail, basé sur la collecte de données anciennes et de terrain, ainsi que sur la quantification des évolutions morphologiques à différents niveaux scalaires, a conduit à une meilleure compréhension de la trajectoire temporelle d'ajustement de l'hydrosystème et à une estimation de sa sensibilité aux changements. Le suivi géomorphologique d'un test de recharge sédimentaire conduit sur un site-pilote a servi également à évaluer la pertinence de ce type d'intervention, à travers l'analyse des bénéfices et des risques environnementaux potentiels. L'ensemble des résultats obtenus a permis d'apporter aux gestionnaires des éléments d'aide à la réflexion pour orienter les stratégies de restauration ainsi que des indicateurs physiques d'évaluation des futures actions.

Mots-clés : géomorphologie fluviale ; Vieux Rhin ; altérations anthropiques ; restauration morpho-écologique ; analyse rétrospective ; recharge sédimentaire expérimentale ; suivi géomorphologique

Historical and experimental geomorphology for the process-based restoration of a modified fluvial system: the Old Rhine between Kembs and Breisach (France, Germany)

The Upper Rhine River has undergone several anthropogenic modifications since the last two centuries for flood protection, navigation and hydropower generation. Channel rectification, groyne fields and lateral "Grand Canal of Alsace" construction heavily altered the hydro-sedimentary functioning of the 50 km-long "Old Rhine" by-passed between Kembs and Breisach: channel pattern simplification, bed incision, armouring and ecological habitats alterations. Two complementary projects have been initiated to restore the sediment transport and the reach alluvial dynamics. This thesis investigated space-time and experimental geomorphic approaches within the morpho-ecological restoration of a modified fluvial system. The archive and field data-based work aimed at understanding the Old Rhine historical trajectory. The geomorphological monitoring of a gravel input experiment also consisted in evaluating environmental benefits and potential risks for society and proposing physical assessment indicators. Results will help river stakeholders to define strategies to restore morphological processes and associated ecological functions in the Old Rhine.

Keywords: fluvial geomorphology; Old Rhine; anthropogenic modifications; morpho-ecological restoration; space-time analysis; sediment input experiment ; geomorphological monitoring

Résumé

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)

Le Rhin dans son parcours franco-allemand a été aménagé depuis deux siècles pour la protection contre les inondations, la navigation et la production hydro-électrique. La rectification (19ème siècle), la régularisation (1930) et la construction du Grand Canal d'Alsace (1928-1959) ont profondément altéré le fonctionnement hydro-sédimentaire du « Vieux Rhin », tronçon de 50 km court-circuité entre les barrages de Kembs et de Breisach, conduisant à une réduction de la complexité du tracé en plan, une incision, un pavage du fond du lit et une simplification des habitats aquatiques et riverains. La possibilité de restaurer le transport sédimentaire et la dynamique alluviale du Vieux Rhin est évaluée au sein de projets portés par la Région Alsace et EDF. Dans ce cadre, la présente thèse repose sur deux types d'approches de la géomorphologie fluviale, historique et expérimentale, afin de répondre à la problématique de restauration morpho-écologique du tronçon fluvial. Ce travail, basé sur la collecte de données anciennes et de terrain, ainsi que sur la quantification des évolutions morphologiques à différents niveaux scalaires, a conduit à une meilleure compréhension de la trajectoire temporelle d'ajustement de l'hydrosystème et à une estimation de sa sensibilité aux changements. Le suivi géomorphologique d'un test de recharge sédimentaire conduit sur un site-pilote a servi également à évaluer la pertinence de ce type d'intervention, à travers l'analyse des bénéfices et des risques environnementaux potentiels. L'ensemble des résultats obtenus a permis d'apporter aux gestionnaires des éléments d'aide à la réflexion pour orienter les stratégies de restauration ainsi que des indicateurs physiques d'évaluation des futures actions.

Mots-clés : géomorphologie fluviale ; Vieux Rhin ; altérations anthropiques ; restauration morpho-écologique ; analyse rétrospective ; recharge sédimentaire expérimentale ; suivi géomorphologique

Historical and experimental geomorphology for the process-based restoration of a modified fluvial system: the Old Rhine between Kembs and Breisach (France, Germany)

The Upper Rhine River has undergone several anthropogenic modifications since the last two centuries for flood protection, navigation and hydropower generation. Channel rectification, groyne fields and lateral "Grand Canal of Alsace" construction heavily altered the hydro-sedimentary functioning of the 50 km-long "Old Rhine" by-passed between Kembs and Breisach: channel pattern simplification, bed incision, armouring and ecological habitats alterations. Two complementary projects have been initiated to restore the sediment transport and the reach alluvial dynamics. This thesis investigated space-time and experimental geomorphic approaches within the morpho-ecological restoration of a modified fluvial system. The archive and field data-based work aimed at understanding the Old Rhine historical trajectory. The geomorphological monitoring of a gravel input experiment also consisted in evaluating environmental benefits and potential risks for society and proposing physical assessment indicators. Results will help river stakeholders to define strategies to restore morphological processes and associated ecological functions in the Old Rhine.

Keywords: fluvial geomorphology; Old Rhine; anthropogenic modifications; morpho-ecological restoration; space-time analysis; sediment input experiment ; geomorphological monitoring