UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

ÉCOLE DOCTORALE 413

UMR 7362 LIVE - CNRS - ENGESS

THÈSE présentée par :

David ESCHBACH

soutenue le : **25 septembre 2017**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Strasbourg**

Discipline/ Spécialité : Géographie / Géomorphologie fluviale

Trajectoire temporelle et monitoring hydro-morphologique d'une anastomose rhénane restaurée

Le Bauerngrundwasser dans l'île du Rohrschollen (Strasbourg, France)

THÈSE dirigée par :
M. SCHMITT Laurent — Professeur, Université de Strasbourg

RAPPORTEURS :
M. PETIT François — Professeur émérite, Université de Liège, Belgique
MM. GAUTIER Emmanuelle — Professeure, Université Panthéon-Sorbonne, Paris

---

AUTRES MEMBRES DU JURY :
MM. LANDES Tania — Maître de conférences, INSA de Strasbourg
M. WANTZEN Karl Mathias — Professeur, Université Francois Rabelais, Tours

Université de Strasbourg
École Doctorale 413
Sciences de la Terre et de l'Environnement
Laboratoire Image Ville Environnement, UMR 7362 – Unistra – CNRS

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Docteur de l'Université de Strasbourg

Spécialité : Géomorphologie fluviale

par

David ESCHBACH

Trajectoire temporelle et monitoring hydro-morphologique d'une anastomose rhénane restaurée : le Bauerngrundwasser dans l'île du Rohrschollen (Strasbourg, France)

Soutenue le 25 septembre 2017 devant le jury constitué de :

François Petit	*Professeur émérite, Université de Liège, Belgique*	Rapporteur
Emmanuèle Gautier	*Professeure, Université Panthéon-Sorbonne, Paris*	Rapporteur
Laurent Schmitt	*Professeur, Faculté de Géographie, Strasbourg*	Directeur
Tania Landes	*Maître de conférences, INSA de Strasbourg*	Examinateur
Karl Matthias Wantzen	*Professeur, Université François Rabelais, Tours*	Examinateur
Frédéric Lonchampt	*Eurométropole de Strasbourg*	Invité

AVANT-PROPOS

D'où vient cette curiosité, qualifiée d'*obscure* par les uns, de *déterministe* par les autres, qui donne à la **géographie** tout son intérêt et au **géographe** tout son sens ? Comment naît cet attrait, quasi-vicéral, pour une portion de terre sauvage lovée au milieu d'une autoroute fluviale ? Pourquoi, comme un fleuve avant la chute, certains choix sont impassibles, presque naturels, ignorants les turbulences à venir ? C'est dans cet état d'esprit, avec mon sac de questions, mes *waders* et ma tarrière, que j'ai sauté dans l'embarcation de cette aventure. Mais c'est grâce à la confiance et au soutien de mon directeur, **Laurent SCHMITT**, que j'ai pu garder le cap, au gré des méandres et des sinuosités du parcours. Parfois coincé derrière un embacle ou échoué sur un banc gravier, il m'a remis à flot, sans pour autant hésiter à me « jeter à l'eau » s'il le jugait nécessaire. J'ai accepté le défi ! « *La foi de beaucoup d'hommes est une affaire de géographie* » (J.-J. Rousseau).

J'ai une pensée toute particulière pour **Laurent PFISTER** (LIST, Luxembourg), **Gwenaël IMFELD** (LHYGES, Strasbourg) et **Pierre GRUSSENMEYER** (INSA, Strasbourg). Par leur humilité, leur rigueur et leur passion, ils m'ont donné le goût du travail bien fait et m'ont transmis leur amour pour la recherche. Vos avis, vos remarques et vos critiques ont largement contribué à mon émancipation scientifique. Merci d'avoir consacré un peu de temps à mes travaux. J'espère que nos collaborations perdureront au-delà de la thèse.

Je remercie les rapporteurs **François PETIT** et **Emmanuèle GAUTIER** ainsi que les examinateurs **Tania LANDES** et **Karl Matthias WANTZEN** d'avoir accepté d'évaluer ce travail malgré des emplois du temps bien remplis. Merci également à **Frédéric LONCHAMPT,** gestionnaire de la Réserve Naturelle, d'avoir accepté notre invitation.

Je souhaite exprimer toute ma sympathie à **Sylvain PAYRAUDEAU** (ENGEES, Strasbourg) et **Sylvain WEILL** (LHYGES, Strasbourg) pour leur ouverture d'esprit et l'intérêt qu'ils ont témoigné à l'égard de mes thématiques de recherche. Merci à **Estelle BAEHREL** (LIVE, Strasbourg) et à **Martine TRAUTTMANN** (EOST, Strasbourg) qui contribuent, au jour le jour, à créer une atmosphère de travail agréable et conviviale tout en assurant avec efficacité le bon déroulement de la recherche.

Dans la catégorie des « super-associés-de-terrain » la pagaie d'or revient sans hésiter à **Michèle TRÉMOLIÈRES** (LIVE, Strasbourg). Du haut de son éméritat et de ses 1 m 20 (les bras levés !), il faut s'accrocher pour la suivre, sur le terrain comme en amphi ! Je n'oublierai jamais sa bonne humeur contagieuse, sa sympathie à mon égard et tous ces bons moments passés sur le Zodiac, les pieds dans la vase, les mains dans l'eau….même quand le thermomètre affichait des températures bien en-dessous de zéro ! La deuxième place est attribuée à **Stoil CHAPKANSKI**. Croissants sous le bras, souriant et plein d'entrain (même à 5h du mat !), c'est tout naturellement qu'il a donné de son temps pour m'accompagner sur le terrain (pour le meilleur comme pour le pire, mais toujours dans la joie et la bonne humeur). Enfin, un grand merci à **Alexandre HUBENY** pour sa complicité et sa motivation sans faille, sur le terrain comme dans la vie.

Le travail de terrain a été une partie importante de cette thèse et je tiens à remercier toutes les personnes qui y ont participé, de gré ou de force (!). Merci à **Arnaud, Dan, Jérôme, Jordan, Léa, Samuel, Therry** ainsi qu'à toute l'équipe TRIO de l'INSA : les permanents (**Mathieu, Pierre, Samuel**), les stagiaires (**Bahna, Étienne, Julie**) et les doctorant(e)s qui se sont impliqué(e)s dans les campagnes de terrain.

Je remercie toutes les personnes qui ont fortement contribuées à rendre ce travail agréable : il y a surtout **Franck** (le vieux poto, qui mis à part son penchant pour la géographie humaine, a suivi le même parcours, essuyé les mêmes galères et présente les mêmes symptômes que moi !) et le couple **Schwartz-mer** (les 2 dinosaures de la recherche qui m'ont fait aimer la géographie). Je remercie **Simon, Wissal, Filsa et Nishi** d'avoir supporté le massacre frénétique des touches de mon clavier, **Dominique** (pour son amitié inconditionnelle), **Sophie** (pour son entrain habituel), **Adrien** (pour sa motivation perpétuelle), **Aurélie** (pour son enthousiasme à toute épreuve), **Jennifer** (pour son avis tranché sur tout), **Fanny** (pour son rire horrible), **Sébastien** (pour son débit de conneries incontrôlables), **Valentin** (pour nos discussions de cailloutophiles) et **Cécile** (pour son optimisme sans faille).

Dans la catégorie des inqualifiables, j'ai nommé **Guillaume** (du stage à la thèse, il a bien vite dépassé le maître), **Céline** (parfois psy, parfois dentiste, souvent chez elle, régulièrement chez nous, elle est bien plus que la simple voisine du 4ième !) et **Déborah** : d'un soutien indéfectible, toujours à l'écoute et de bons conseils, elle est ma soupape de décompression et contribue « au fil de l'eau » à mon équilibre. Pour la suite des évènements : « *All the best* » !

Si cette thèse est maintenant inscrite dans mon ADN, elle a aussi marqué mon entourage. Toujours à l'écoute des choses incompréhensibles qui ont été au cœur de mes propos durant ces 4 dernières années, je profite de ces quelques lignes pour exprimer toute ma gratitude à mon beau-frère **Antoine**, à mes parents **M.-Thérèse et Gérard**, ainsi qu'à mes beaux-parents **Pascale et Yves**.

Assis devant l'écran d'ordinateur, couché sur le clavier ou flânant dans les tas de papiers, quand il y a un chat dans les parages il n'est pas bon d'écrire une thèse. Et surtout s'il insiste pour participer… à sa manière : « *[…] le profil en long dans la partie lhds_kd7$jh* qsei __ _eè – jha=(ufd§ !vsmlàç__gj a une tendance à l'exhaussement […]*». Merci ! Il faut bien l'admettre, à l'instar du fameux F.D.C. Willard (Hetherington et Willard, 1975[1]), la petite écaille de tortue chez qui je vis (oui oui) mériterait bien sa place en 2ième auteur de toutes mes publis. En revanche, si vous trouvez des fautes dans ce manuscrit, merci de lui faire remonter l'information.

Enfin, une place de choix pour remercier ma tendre moitié qui partage ma vie depuis 12 ans (déjà !). Elle est ma substance qui donne du sens à mon existence. Son amour inconditionnel, son épaule rassurante et son soutien à toute épreuve m'ont accompagné jusqu'ici. Si beaucoup de choses ont été sacrifiées ces dernières années (voyages, soirées, week-ends), la *To Do List* est pleine à craquer et le meilleur reste à venir…

[1] J.-H. Hetherington, F.D.C. Willard, 1975, Two-,three-, and four atom exchanges effects in bcc ^{3}He, In *Physical review letters* 35 (21); http://www.slate.fr/story/130556/chat-auteur-etude-scientifique

RÉSUMÉ

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet LIFE+ qui vise à restaurer le fonctionnement hydromorphologique d'un hydrosystème rhénan. Une étude planimétrique couplée à des analyses hydromorphologiques et sédimentologiques ont permis (i) d'améliorer la compréhension des dynamiques d'ajustement passées et (ii) d'identifier les principales limites du projet. Les évolutions morphologiques post-restauration ont été suivies à l'aide d'une combinaison de méthodes géodésiques et géomorphologiques afin de déterminer précisément les volumes déposés / exportés à différentes échelles spatio-temporelles. Enfin, la thermographie infra-rouge aéroportée a permis de mettre en évidence les liens entre la répartition spatiale des anomalies thermiques, les caractéristiques morphodynamiques et les héritages géomorphologiques. L'approche interdisciplinaire développée dans ce travail a permis de guider les choix opérationnels pour optimiser le suivi et l'évaluation des restaurations fonctionnelles futures.

Mots-clés - Rhin Supérieur ; Restauration fonctionnelle ; Hydromorphologie ; Monitoring ; Trajectoire temporelle longue; Modélisation 3D ; Infra-rouge thermique ; Interdisciplinarité ; Indicateur de fonctionnement ; Efficacité ; Durabilité.

ABSTRACT

This study is part of a LIFE+ project which aims to restore hydromorphological functioning of a Rhine hydrosystem. A planimetric study combined with hydromorphological and sedimentological analysis allowed to (i) improve understanding of past adjustment dynamics and (ii) identify main limitations of the project. Post-restoration morphological changes were monitored by geodesic and geomorphological methods combination in order to determine accurate volumes of sediment deposited / exported at different spatio-temporal scales. Finally, airborne thermal-infrared was used to highlight the relationship between spatial distribution of thermal anomalies, morphodynamic characteristics and inherited geomorphological features. Interdisciplinary approach leaded in this study was able to guide decision-makers choices in order to optimise the monitoring and assess future functional restorations.

Keywords – Upper Rhine; Functional restoration; Hydromorphology; Monitoring; Long-term temporal trajectory; 3-D modelling; Thermal infrared; Interdisciplinarity; Functional indicators; Efficiency; Sustainability.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS **7**

RÉSUMÉ **9**

ABSTRACT **11**

TABLE DES MATIÈRES **13**

INTRODUCTION **17**

CHAPITRE 1 ..... **21**

RESTAURATION FONCTIONNELLE D'ANNEXES HYDRAULIQUES DE GRANDS FLEUVES. ÉTAT DES CONNAISSANCES, CONTEXTES GÉOGRAPHIQUE ET OPÉRATIONNEL, ENJEUX ET OBJECTIFS SCIENTIFIQUES **21**

1 Cadre thématique *23*

1.1 Les lits majeurs des grands fleuves 23

1.1.1 Terminologie 23

1.1.2 Fonctionnement 23

1.1.3 Mesures de protection 25

1.2 Restaurer les milieux dégradés 26

1.2.1 De la prise de conscience des impacts sur les milieux alluviaux 26

1.2.2 … à l'émergence du concept de restauration 27

2 Contexte géographique *31*

2.1 Le Rhin supérieur 31

2.1.1 Caractéristiques générales 31

2.1.2 Histoire des aménagements 33

2.1.2.1 La correction 33

2.1.2.2 La régularisation 36

2.1.2.3 La canalisation 36

2.1.2.4 Conséquences actuelles des aménagements 38

2.2 L'île artificielle du Rohrschollen 38

2.2.1 Situation générale 38

2.2.2 Principe de fonctionnement 38

2.3 L'anastomose du Bauerngrundwasser 39

3 Cadre opérationnel *41*

3.1 Le projet européen LIFE+ et le partenariat gestion-recherche 41

3.2 Les travaux de restauration 42

3.2.1 Ouvrage hydraulique 42

3.2.2 Chenal de connexion amont 43

3.2.3 Ouvrage de restitution 43

3.3 Le suivi scientifique 44

4 Enjeux scientifique *45*

4.1 Problématique 45

4.2 Axes de recherche, hypothèses, objectifs 46

4.2.1 Histoire de l'île du Rohrschollen et imbrication de la restauration dans la trajectoire temporelle longue de l'hydrosystème (Axe 1) 46

4.2.2 Améliorations méthodologiques pour le monitoring géomorphologique des chenaux anastomosés actifs (Axe 2) 46

4.2.3 Influence de l'activité morpho-sédimentaire présente et passée sur la répartition des exfiltrations phréatiques d'un hydrosystème anastomosé restauré (Axe 3) 47

4.2.4 Intérêts scientifiques et opérationnels d'une approche interdisciplinaire pour le suivi et l'évaluation de la restauration fonctionnelle d'anastomose (Axe 4) 47

Conclusion *48*

CHAPITRE 2 ..... **49**

ÉVOLUTION HYDROMORPHOLOGIQUE DE L'ÎLE DU ROHRSCHOLLEN DEPUIS LE DÉBUT DU XVIII^{ÈME} SIÈCLE **49**

Abstract *51*

1 Introduction *51*

2 Study area *53*

3 Material and methods *55*

3.1 Planimetric analysis 55

3.2 Analysis of vertical data 56

3.2.1 Limnimetric and piezometric analysis 56
3.2.2 Palaeochannel corings 56
3.2.3 Pit excavations 56
3.3 Characteristics of the sediments 57
3.3.1 Grain size analysis 57
3.3.2 Geochemical and organic pollutants analyses 57
3.3.3 Depositional chronology 58
3.3.4 Flooding frequency assessment 58
4 Results and discussion 59
4.1 Hydromorphological dynamics before the beginning of the correction works (up to ca. 1833) 59
4.2 Hydromorphological disturbances during the correction works (1833-1876) 61
4.2.1 Main channel adjustments 61
4.2.2 Lateral channel adjustments and filling processes 63
4.2.3 Geochemistry of the sediment filling 65
4.3 Adjustments since the end of the correction works (after 1876) 67
4.4 Using Rhine long-term trajectory to enhance efficiency and sustainability: learning from the past to infer restoration guidelines 68
5 Acknowledgments 70
6 References 71
7 Tableau des contributions 77
CHAPITRE 3 79
COMBINAISON DE MÉTHODES GÉODÉSIQUES ET GÉOMORPHOLOGIQUES POUR LE DÉVELOPPEMENT D'INDICATEURS FONCTIONNELS 79
Abstract 81
Key words 81
1 Introduction 82
2 Study site 84
3 Material and methods 85
3.1 Geodetic survey 85
3.1.1 TLS and SfM comparison 85
3.1.2 Topographical data 85
3.1.3 Point-clouds comparison 86
3.2 Geomorphological survey 86
3.2.1 Grain size survey 86
3.2.2 RFID tracking 86
3.2.3 Geomorphic unit survey 86
3.2.4 Survey of lateral and vertical adjustments 87
4 Results 88
4.1 Multiscale sediment budgets (I_q) 88
4.1.1 Sediment budget close to the three curvature sectors 88
4.1.2 Sediment budget along the whole channel 89
4.2 Lateral channel evolution (I_{ler}) 90
4.3 Vertical variation (I_{vv}) 91
4.4 Evolution of geomorphic units (I_{gu}) 92
4.5 Grain size variation and bedload dynamics (I_{bd}) 92
5 Discussion 94
5.1 Methodological contribution: relevance of geodetic methods for an accurate morphodynamic river survey ... 94
5.2 Thematic contribution: combining geodetic survey to geomorphological methods in restored small active lateral channels 95
5.3 Methodological recommendations, relevance of the used indicators and perspectives 95
6 Acknowledgments 97
7 References 97
8 Tableau des contributions 102
CHAPITRE 4 103
SUIVI DES ÉCHANGES NAPPE-RIVIÈRE PAR THERMOGRAPHIE INFRA-ROUGE AÉROPORTÉE 103
Abstract 106
Keywords 106
1 Introduction 106
2 Study area 108
3 Material and methods 109
3.1 Historical analysis 109

3.2 Image acquisition 110
3.3 Image processing 110
3.4 Image analysis 111
3.5 Statistical analysis 112
4 Results 112
4.1 Thermal variations in the new channel 112
4.2 Thermal variations in the old channel 115
5 Discussion 117
5.1 Factors controlling the spatial distribution of thermal signatures along a morphodynamic anastomosing (new channel) 117
5.2 Factors controlling the spatial distribution of thermal signatures along a large stable anastomosing channel (old channel) 117
5.3 Outlook on future research avenues and methodological recommendations 119
6 Conclusion 119
7 Acknowledgements 120
8 References 120
9 Tableau des contributions 124
CHAPITRE 5 125
MONITORING INTERDISCIPLINAIRE, ÉVALUATION DE LA RESTAURATION ET TENDANCES ÉVOLUTIVES FUTURES 125
1 Monitoring interdisciplinaire 127
1.1 Cadre méthodologique 127
1.2 Détermination des tâches pour le suivi de la restauration de l'île du Rohrschollen 127
2 Suivi géomorphologique 132
2.3 Chaînes d'érosion 132
2.3.1 Objectifs 132
2.3.2 Méthodes 132
2.3.3 Résultats - Limites 132
2.4 Débit critique de mise en mouvement 133
2.4.1 Objectifs 133
2.4.2 Méthodes 133
2.4.3 Résultats - Interprétation 134
2.4.4 Limites et perspectives 135
2.5 Évolution morphologique du Bauerngrundwasser 135
2.5.1 Objectifs 135
2.5.2 Méthodes 135
2.5.3 Résultats - Interprétation 135
2.5.4 Limites et perspectives 136
3 Suivi des évolutions hydrologiques, hydrogéologiques et des échanges nappe-rivière 137
3.1 Objectifs 137
3.2 Suivi limnimétrique 137
3.2.1 Méthodes 137
3.2.2 Résultats - Interprétation 137
3.3 Suivi piézométrique 139
3.3.1 Méthodes 139
3.3.2 Résultats - Interprétation 139
3.4 Suivi des échanges nappe-rivière 140
3.4.1 Méthodes 140
3.4.2 Résultats - Interprétation 140
4 Représentation interdisciplinaire des résultats écologiques 144
4.1 Objectifs 144
4.2 Méthodes 144
4.3 Exemple de résultats 144
5 Synthèse générale 146
5.1 Évaluation de la restauration 146
5.2 Tendances évolutives futures 148
CONCLUSION 151

LISTE DES FIGURES 157

LISTE DES TABLEAUX 163

INTRODUCTION

À l'instar de nombreux fleuves d'Europe, la **fonctionnalité hydro-morphologique** du Rhin a été fortement impactée par une succession d'aménagements. Le Rhin Supérieur méridional, de Bâle à Iffezheim, est le tronçon le plus anthropisé du fleuve. En rive française, plus de 80% des milieux riverains et des zones humides caractéristiques de l'hydrosystème fluvial ont disparu au profit d'espaces urbains, agricoles et portuaires (Carbiener D., 2003; Cioc, 2009). Des lambeaux de forêts alluviales typiques subsistent de façon sporadique le long de la bande rhénane (Carbiener et Trémolières, 2003; Uehlinger *et al.*, 2009). Dans ces **milieux relictuels**, les processus hydromorphologiques à l'origine du renouvellement de la mosaïque alluviale ont été interrompus. L'amplitude des battements de nappe, au préalable élevée, a été considérablement abaissée, provoquant notamment une atténuation des échanges nappe-rivière. Corrélativement, le caractère hygrophile des écosystèmes forestiers a progressivement décliné et les bras secondaires, en grande partie déconnectés de la dynamique hydrologique du fleuve, se sont colmatés. **L'ensemble de ces perturbations affecte l'île du Rohrschollen**. Située au sud-est de la ville de Strasbourg, l'île a été artificiellement créée en 1970 lors de la construction de la centrale hydro-électrique. Le Rohrschollen est parcouru par une ancienne annexe hydraulique rhénane : le Bauerngrundwasser. Entre 2012 et 2016, le site a fait l'objet d'un ambitieux **projet européen LIFE+ de restauration des habitats alluviaux.**

Ce projet de restauration a pour objectif de **redynamiser les habitats alluviaux typiques du milieu rhénan**. Plus précisément, il vise à recréer un fonctionnement hydrologique contrasté et une **fonctionnalité hydro-morphologique élevée** : submersions dynamiques, processus d'érosion-transport-dépôt sédimentaires, redynamisation de l'aquifère... Pour atteindre cet objectif, une prise d'eau a été construite au sud de l'île et un nouveau chenal a été creusé afin de reconnecter le Bauerngrundwasser au Rhin. La dynamique hydrologique, simulée par l'ouvrage hydraulique, permet d'injecter des débits variant entre 2 et 80 $m^3.s^{-1}$ en fonction des débits du Rhin.

À l'interface des sciences de la terre et du vivant, le champ scientifique de la **restauration des cours d'eau** se développe de façon exponentielle, notamment en Europe depuis l'adoption de la DCE (DCE, 2000; Pont *et al.*, 2009). Néanmoins, face à l'accroissement récent des actions de restauration et au **manque de recul général** par rapport à ce type d'action de gestion, de nombreux travaux ont tenté d'élaborer des principes de restauration tout en soulignant la nécessité de mettre en place des suivis et des évaluations pour **améliorer l'efficacité des restaurations futures** (Berger, 1997; Brierley and Fryirs, 2008; Dufour and Piégay, 2009; Palmer *et al.*, 2005), dans une perspective durable.

Afin de renforcer la compréhension de la dynamique hydromorphologique des milieux restaurés, une démarche interdisciplinaire, basée sur le monitoring du fonctionnement hydromorphologique de l'île du Rohrschollen, a été développée dans le cadre de ce travail. L'objectif principal est de **contribuer à la réflexion scientifique sur les suivis fonctionnels des habitats de milieux fluviaux restaurés et de fournir des recommandations opérationnelles**.

Dans un **premier chapitre**, nous présenterons le cadre thématique, géographique et opérationnel de ce travail. Une dernière section, consacrée au positionnement scientifique,

présentera les quatre axes de recherches sur lesquelles nous avons adossé nos travaux pour répondre à la problématique. Chaque axe fait l'objet d'un chapitre :

- **Axe 1 :** histoire de l'hydrosystème et imbrication de la restauration dans la trajectoire temporelle pluriséculaire ;
- **Axe 2 :** améliorations méthodologiques pour le monitoring déomorphologique des chenaux actifs en lit majeur ;
- **Axe 3 :** influence de l'activité morpho-sédimentaire présente et passée sur la répartition spatiale des exfiltrations phréatiques d'un hydrosystème anastomosé restauré ;
- **Axe 4** : intérêt de l'approche interdisciplinaire pour le suivi fonctionnel d'un hydrosystème fluvial.

Le **deuxième chapitre** s'appuie sur un article soumis dans la revue *Hydrology and Earth System Sciences*. L'approche interdisciplinaire développée dans ce chapitre doit permettre de positionner le projet de restauration dans sa trajectoire temporelle longue. Nous montrons l'importance de tenir compte des évolutions hydro-morphologiques passées pour identifier les principaux facteurs de contrôle ainsi que le temps de réponse lié aux perturbations fonctionnelles induites par les aménagements. Les données historiques (cartes, textes, hydrologie) complétées par des prospections *in situ*, l'analyse des processus et de la composition géochimique des sédiments fins doivent permettre d'identifier les principales limites du projet et de proposer des recommandations opérationnelles pour renforcer l'efficacité et la durabilité de la restauration et améliorer les restaurations futurs.

Le **troisième chapitre** a fait l'objet d'un article en cours de soumission dans la revue *Geomorphology*. Outre l'intérêt de combiner les approches géodésiques avec des méthodes géomorphologiques pour suivre les ajustements hydromorphologiques induits par la restauration. Cette partie vise à produire des indicateurs fonctionnels, facilement comparables et transposables, pour évaluer les effets de la restauration et optimiser la qualité des suivis futurs (à moyen et long termes). Des facteurs limitants ont aussi pu être identifiés.

Le **quatrième chapitre** correspond à un article publié dans la revue *Hydrological Processes*. Ce chapitre propose une adaptation méthodologique de l'image infrarouge thermique aéroportée pour le suivi des échanges nappe-rivière de chenaux anastomosés. Cette démarche expérimentale a montré son intérêt pour caractériser les échanges nappe-rivière dans les espaces riverains des grands fleuves et identifier les facteurs de contrôle des exfiltrations phréatiques. En outre, nous avons pu formuler certaines recommandations méthodologiques quant à son utilisation en milieu alluvial anastomosé.

Dans le cadre d'une réflexion sur la pertinence du protocole mis en œuvre et l'évaluation de la démarche menée sur l'île du Rohrschollen, nous présentons le monitoring, les méthodes et les limites du suivi scientifique dans le **cinquième chapitre**. Des recommandations opérationnelles sont proposées en vue d'améliorer les modalités de gestion et optimiser les gains environnementaux.

La **conclusion générale** fait la synthèse des enseignements, des limites et des perspectives de cette étude, notamment pour un suivi à moyen et long termes, dont une perspective de transposition vers d'autres sites restaurés.

Ce travail a également fait l'objet de **publications complémentaires** ainsi que de **communications dans des colloques** nationaux et internationaux. Deux articles et sept résumés de conférences, dont deux résumés longs, sont présentés dans les annexes.

CHAPITRE 1

RESTAURATION FONCTIONNELLE D'ANNEXES HYDRAULIQUES DE GRANDS FLEUVES. ÉTAT DES CONNAISSANCES, CONTEXTES GÉOGRAPHIQUE ET OPÉRATIONNEL, ENJEUX ET OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

Résumé - À l'image de nombreux grands fleuves du monde et d'Europe, le Rhin a souffert de la convoitise des Hommes. Initialement redouté pour ses crues, le fleuve est aujourd'hui domestiqué par l'Homme, notamment dans sa partie méridionale où son débit a été mis à contribution pour la production hydro-électrique. Deux siècles d'anthropisation ont entraîné les dysfonctionnements hydromorphologiques suivants : perturbation de la dynamique hydrologique, arrêt de la mobilité latérale, généralisation d'une sédimentation fine, diminution des échanges nappe-rivière, régression de la biodiversité alluviale… Il faut attendre les années 1970 pour que la question de la restauration des milieux impactés, dont les dégradations notables sont largement identifiées par la communauté scientifique, soit prise en compte par les décideurs. Cette dynamique croissante a été intensifiée à partir de 2000 par l'adoption de la Directive Cadre sur l'Eau. Les actions de restauration, d'ampleur variée, se sont multipliées, mais restent néanmoins entachées d'incertitudes : quel état de référence viser ? Quels fonctionnements cibler ? Comment évaluer l'efficacité et la durabilité des actions de restauration ?

1 CADRE THÉMATIQUE

1.1 Les lits majeurs des grands fleuves

En vue de l'importance de la terminologie permettant de définir les milieux riverains des cours d'eau (ripisylve, forêt alluviale, corridor forestier…), il nous paraît utile de caractériser ce milieu et de définir la terminologie adaptée à notre recherche.

1.1.1 Terminologie

Caractérisées par une dynamique propre, les marges alluviales sont définies dans l'ouvrage de Piégay *et al.* (2003) comme « *une bande de terre qui borde un cours d'eau* » ou de façon plus large comme « *le compartiment terrestre de l'hydrosystème* ». Si l'on s'appuie plus précisément sur les définitions de Pautou *et al.* (2003) et Carbiener (1970, 1983), le milieu riverain des grands fleuves est défini comme « *un écosystème forestier dominé par des essences ligneuses, qui bordent le chenal principal et les chenaux secondaires* ». Il s'agit d'un ensemble forestier subdivisé en sous-ensembles écologiques qui présentent des caractéristiques fonctionnelles spécifiques (régime hydrique, dynamiques géomorphologiques et pédologiques).

La forte interdépendance des compartiments terrestre, aquatique et souterrain qui composent les lits majeurs nous amène à utiliser une terminologie plus large qui présente l'avantage d'englober les trois compartiments, et qui, dans notre cas, paraît plus adaptée à notre utilisation. Dans ce manuscrit, nous adopterons donc les termes de « **milieux riverains** », « **milieux alluviaux** » ou encore « **lit majeur** ».

L'hydromorphologie est le terme spécifique dédié aux études de ces milieux (Malavoi et Bravard, 2010). Faisant partie des *Sciences de la Terre*, cette discipline est née des travaux pionniers de Jean Tricart (1952) ou de Leopold *et al.* (1957) et constitue une sous-branche de la géographie physique. En définitive, c'est une discipline à l'interface de la géologie, la sédimentologie, l'hydraulique et l'hydrologie (Calvet *et al.*, 2007), et est étroitement liée à l'écologie fluviale (Malavoi et Bravard, 2010). Plus récemment, la DCE (2000) a introduit l'expression « *géomorphologie fluviale* » pour désigner la science qui s'intéresse à la fois aux **processus physiques** et aux **formes** qui en résultent dans les milieux fluviaux.

Le présent travail s'inscrit dans ce champ disciplinaire tout en étant articulé avec les disciplines connexes citées plus haut. Cette position ne se restreint pas pour autant au milieu abiotique, car des liens interdisciplinaires sont présentés/proposés dans le dernier chapitre.

1.1.2 Fonctionnement

À l'interface des milieux terrestre et aquatique, les lits majeurs se caractérisent comme un **ensemble fonctionnel** en interaction permanente avec le cours d'eau, notamment grâce aux flux de matières (liquides et solides) et aux variations d'énergie (Amoros et Petts, 1993 ; Fig. 1.1). Ces interactions naissent de la **dynamique hydrologique et géomorphologique** qui contrôle la diversité et la productivité biologiques, à différentes échelles spatiales et temporelles (Trémolières *et al.*, 2002 ; Ward et Stanford, 1995). De nombreux auteurs qualifient ces milieux de « *systèmes alluviaux* » tant les interactions et les interconnexions entre les différents compartiments de l'hydrosystème sont structurantes pour le maintien et le développement des biocénoses alluviales (Amoros *et al.*, 1987 ; Bravard *et al.*, 1986 ; Carbiener, 2007 ; Lewis, 1990 ; Schnitzler-Lenoble et Carbiener, 2007 ; Ward et Stanford, 1995).

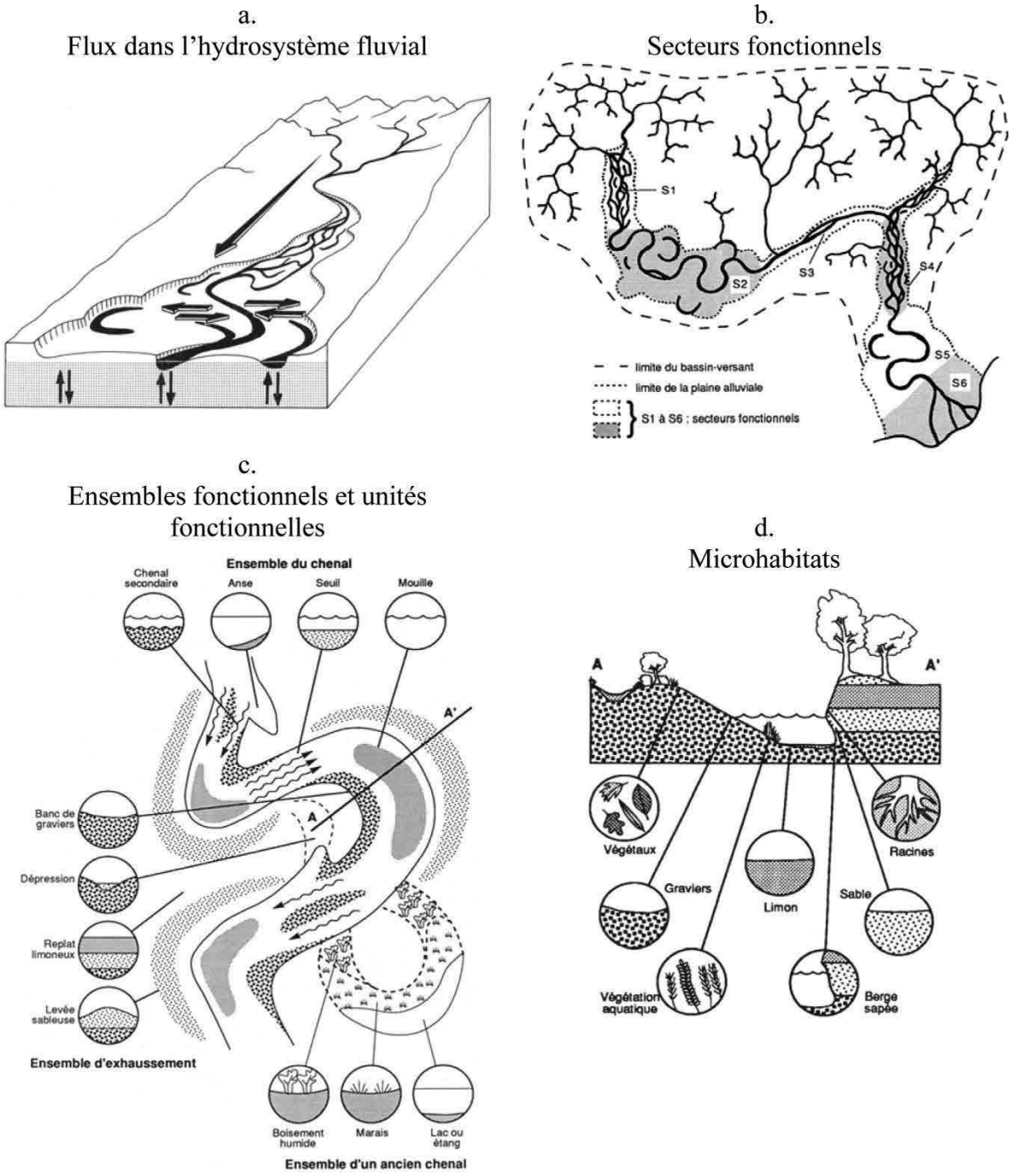


Figure 1. 1 - L'hydrosystème fluvial abordé à différentes échelles spatiales : a. Flux bidirectionnels (latéraux et verticaux) d'un hydrosystème ; b. Délimitation des secteurs fonctionnels au sein d'un même bassin versant ; c. Identification des ensembles et des unités fonctionnels au sein d'un secteur fonctionnel (correspond au secteur S2 dans b.) ; d. Microhabitats présents dans plusieurs unités fonctionnelles (profil AA' dans c.). Synthèse schématique reprise d'Amoros et Petts (1993) et adaptée par Schmitt (2010).

La dynamique hydrologique dans le lit majeur est notamment caractérisée par l'intensité et la fréquence des submersions. Ces facteurs contrôlent les flux de matière et structurent l'espace alluvial. Dans les milieux alluviaux, la pulsation des crues (*flood-pulse*) contrôle en grande partie la continuité hydrologique entre les compartiments et constitue le moteur de la morphodynamique fluviale (Bayley *et al.*, 1991 ; Junk *et al.*, 1989 ; Tockner, 2009 ; Ward et Stanford, 1995) : des échanges horizontaux (lit mineur-lit majeur) et des échanges verticaux (nappe-rivière) (Fig. 1.1-a).

La dynamique géomorphologique correspond à l'ensemble des processus physiques qui régissent le fonctionnement du cours d'eau (formes, processus), contrôlent la répartition des habitats et régulent la réponse des biocénoses alluviales (Dufour *et al.*, 2007 ; Malavoi *et al.*, 2006). En oscillation constante autour d'une tendance moyenne, les évolutions géomorphologiques répondent à deux variables fondamentales identifiées par Schumm (1977) :

- **les variables de contrôle** que sont le débit liquide et le débit solide contrôlent l'évolution physique du milieu ;
- **les variables de réponse** comme la largeur, la profondeur ou la sinuosité s'ajustent en fonction des variables de contrôle.

Le rapport entre le **débit solide** et le **débit liquide** oscille constamment et affecte la morphodynamique et les processus d'érosion-dépôt du cours d'eau. De cette oscillation résultent des ajustements morphologiques d'intensités et de fréquences variables dans le temps et dans l'espace. Les ajustements verticaux et latéraux contrôlent la fourniture sédimentaire par érosion du lit et des berges, ce qui est notamment à l'origine de la diversité morphologique et des habitats (Fig. 1.1-c). Dans une moindre mesure, les embâcles contribuent également au maintien de la complexité hydromorphologique (Sear *et al.*, 2010) (Fig. 1.1-d).

Sur les rives du cours d'eau et dans les lits majeurs, les ajustements se traduisent généralement par des dépôts successifs. Les enregistrements sédimentaires, quand ils ne sont pas bioturbés, permettent d'établir la chronologie des évolutions passées et d'appréhender les dynamiques d'ajustements hydromorphologiques (naturelles ou anthropiques) à des échelles de temps longues (Macaire, 1990).

1.1.3 Mesures de protection

L'importante diversité des habitats et de la biodiversité des plaines alluviales rend ces espaces particulièrement sensibles aux perturbations anthropiques. Considérés comme des *Hotspots* de la biodiversité à l'échelle mondiale, les milieux riverains des grands fleuves font aujourd'hui l'objet d'importantes mesures de conservation. Dès 1975, la convention RAMSAR soutient **la conservation et la restauration de milieux naturels remarquables** et contribue à **assurer la protection préliminaire des milieux alluviaux** (Hein *et al.*, 2016). La France a ratifié la convention en 1986 et compte aujourd'hui pas moins de 45 sites protégés par RAMSAR, dont le Rhin Supérieur, sur un linéaire de 170 km (www.ramsar.org).

À l'échelle nationale, la loi du 22 juillet 1960 relative à la création des parcs nationaux a permis de mettre en place les premiers instruments de conservation en faveur de la protection des espaces naturels sensibles. La Charte de l'environnement attribue à ces espaces une valeur constitutionnelle de « *patrimoine commun des êtres humains* ». Mais c'est essentiellement la convention RAMSAR qui offre un cadre à l'action nationale pour la **conservation** et **l'utilisation rationnelle** des zones humides (Landelle, 2007). Une « *Stratégie Nationale de création d'aires protégées* », relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (Grenelle I), s'appuie sur un ensemble de mesures contractuelles ou réglementaires ainsi qu'une maîtrise foncière. Des outils opérationnels permettent de diagnostiquer l'état écologique et les caractéristiques géologiques du milieu, son importance dans le contexte économique et social et d'identifier les principales menaces (www.zones-humides.eaufrance.fr). Le choix des outils de protection est varié et dépend des priorités nationales, des spécificités régionales et de l'ambition des acteurs locaux.

1.2 Restaurer les milieux dégradés

1.2.1 De la prise de conscience des impacts sur les milieux alluviaux …

La prise de conscience du rôle de l'Homme dans les changements environnementaux est née dans les années 1950, notamment à travers les travaux de Thomas (1956). La même année, plusieurs études mettent en relation les réponses d'ajustement des cours d'eau avec l'anthropisation croissante des bassins versants (Leopold, 1957 ; Strahler, 1956). Plus tard, ce sont notamment les travaux de Gregory (1974, 1992) et de Chin (2006) qui synthétisent les impacts de l'agriculture intensive, de la déforestation et de l'urbanisation exponentielle sur l'activité hydromorphologique des cours d'eau.

Nilsson *et al.* (2005) dressent un constat alarmant sur la fragmentation des grands cours d'eau à l'échelle mondiale. Dans l'hémisphère nord, Dynesius et Nilsson (1994) observent que 77 % du débit total des 139 plus grands fleuves ont été affectés par la construction de barrages, de réservoirs ou de systèmes de dérivation. Le changement de **fonctionnement hydrologique** qui s'ensuit modifie les conditions de submersion des lits majeurs, fragmente les habitats et altère le potentiel d'autoépuration des zones inondables.

Des **perturbations morphologiques** majeures sont induites par la chenalisation, par exemple la diminution de la sinuosité. Dans ce cas, la pente, les forces tractrices et les vitesses augmentent, entraînant fréquemment un approfondissement du profil en long et corrélativement une perturbation des processus d'érosion-transport-dépôt. Les conséquences s'étendent généralement au-delà des tronçons corrigés et se traduisent par une incision régressive vers l'amont (Bravard, 1994 ; Strahler, 1956). La déconnexion lit mineur – lit majeur a donc tendance à s'étendre longitudinalement.

L'altération de la dynamique hydromorphologique impacte l'ensemble du fonctionnement de l'hydrosystème. Ces perturbations sont d'autant plus marquées dans les plaines alluviales dont la **sensibilité aux changements** est maximale (Petts *et al.*, 1989). Dans ces milieux, les aménagements affectent directement ou indirectement les **connectivités** dans les quatre dimensions de l'hydrosystème fluvial (Amoros et Petts, 1993 ; Ward, 1989 ; Fig. 1.2) :

- **latéralement :** échanges liquides et solides entre le chenal et le lit majeur adjacent. Ces échanges favorisent le transfert des nutriments et de la matière organique, et contribuent au maintien de l'hétérogénéité des habitats ;
- **verticalement :** échanges entre les eaux de surface et la nappe phréatique. Ces processus contrôlent la répartition spatiale des anomalies thermiques dans les cours d'eau ;
- **longitudinalement :** solidarité amont-aval qui contrôle les processus abiotiques (continuité sédimentaire longitudinale souvent perturbée par la construction de barrages) et biotiques (migration des espèces) ;
- **temporellement :** contrôle la dynamique des trois dimensions précitées qui sont susceptibles d'évoluer au cours du temps et sur des échelles temporelles variées : temps d'ajustement ou de résilience de l'hydrosystème, trajectoire temporelle plus ou moins complexe…

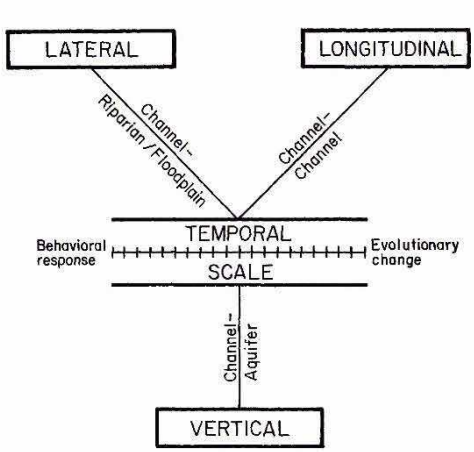


Figure 1. 2 - Les quatre dimensions prises en compte dans la conceptualisation des interactions des hydrosystèmes fluviaux (Ward, 1989).

En Europe, de nombreuses études font état des changements environnementaux liés aux **perturbations fonctionnelles** des milieux alluviaux, notamment sur les fleuves soumis à de fortes pressions anthropiques (Tricart et Bravard, 1991), comme sur le Rhône (Bravard *et al.*, 1986, 2008 ; Dufour, 2007 ; Fruget et Dessaix, 2003), le Danube (Hohensinner *et al.*, 2004, 2011) et le Rhin (Meyer, 2013 ; Schmitt, 2001 ; Trémolières *et al.*, 1994). Sur la bande rhénane, et plus précisément sur le tronçon alsaco-badois, ce sont notamment les travaux pionniers de Carbiener (1970, 1983, 1991, 2007), Carbiener et Dillmann (1992) et Schnitzler (1994) qui sont à l'origine d'une réelle prise de conscience des scientifiques et des gestionnaires.

1.2.2 … à l'émergence du concept de restauration

Les premières publications qui mentionnent la *restauration des cours d'eau* apparaissent essentiellement dans les pays nord-américains entre 1970 et 1990. Renforcé par l'impulsion de la DCE, l'intérêt pour ce nouveau domaine de recherche prend de l'importance en Europe puis dans le monde, notamment à partir de 2004 où le nombre de publications par an est fréquemment supérieur à 100 (Holmes, 1998 ; Morandi, 2014 ; Fig. 1.3).

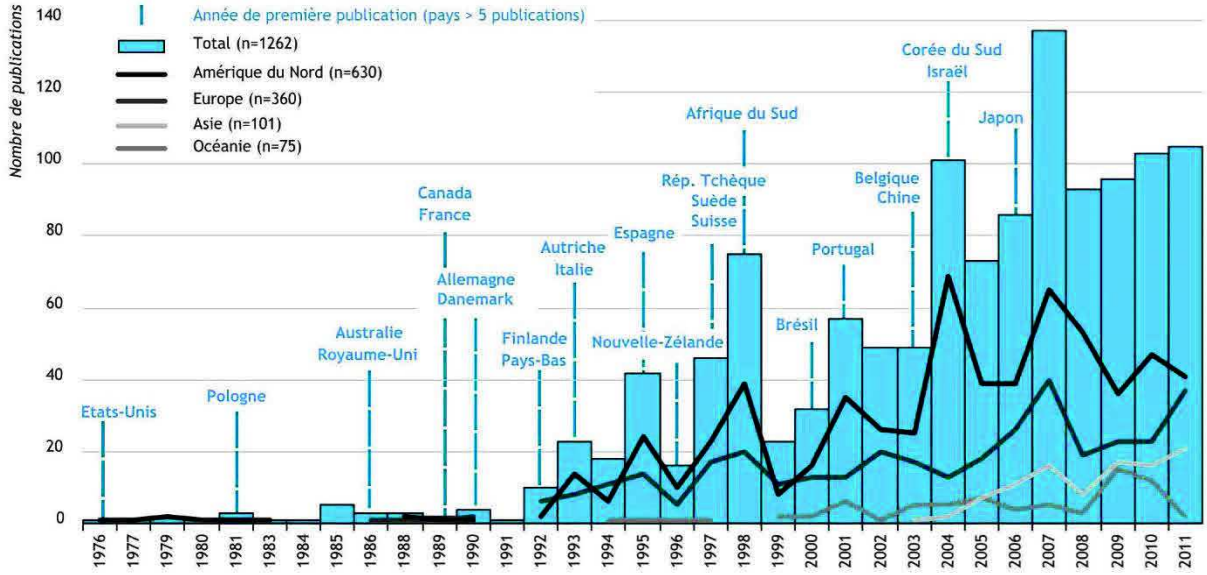


Figure 1. 3 - Graphique chronologique issu des travaux de Morandi (2014). Nombre de publications scientifiques internationales dans le domaine de la restauration de rivières sur la période 1982-2011 (Web of Science et Scopus). Le nom des pays correspond à la date de première publication.

Si le concept et le champ disciplinaire qui s'y rattachent sont actuellement en plein développement (Cairns et Heckmann, 1996 ; Palmer *et al.*, 2005), les premières définitions sont proposées au début des années 1990. **Cairns** (1991) définit la restauration comme « *the complete structural and functional return to a pre-disturbance state* ». Sur cette base, le **National Research Concil** propose en 1992 une définition plus étoffée : « *Restoration means returning an ecosystem to a close approximation of its condition prior to disturbance. Accomplishing restoration means ensuring that ecosystem structure and function are recreated or repaired, and that natural dynamic ecosystem processes are operating effectively again* ». Mais l'émergence des premières réflexions autour du concept de restauration soulève de nombreuses questions, notamment en termes de définition des objectifs, de pratique et d'évaluation de la restauration (Morandi, 2014).

À l'aube du XXI^{ième} siècle, le concept de restauration tend à évoluer. De nombreux auteurs comme Schiemer *et al.* (1999), Downs et Kondolf (2002) ou encore Palmer *et al.* (2005), montrent l'intérêt de restaurer les **dynamiques hydrologiques et géomorphologiques** en tenant compte de **l'hydrosystème dans son ensemble** (comprenant les chenaux et les espaces riverains). Wohl *et al.* (2005) ont également contribué à préciser les contours du concept. Selon lui, la restauration doit « *participe[r] à la réparation de l'intégrité écologique en rétablissant les processus hydrologiques, géomorphologiques et écologiques* ». De cette **dimension holistique** découle une réelle volonté de reconsidérer l'hydrosystème comme un espace fonctionnel où il est possible de recréer les processus et les fonctions à l'origine du développement et du maintien de la diversité des biocénoses.

Les premières actions de restauration menées dans les 1980-90 s'appuient sur un **état de référence statique** qui correspond à un état du milieu avant les premières perturbations (Cairns, 1991). Cette approche ne tient pas compte de l'histoire, souvent complexe, de l'hydrosystème, ce qui peut conduire, à terme, à l'échec de la restauration (Kondolf *et al.*, 2001 ; Palmer *et al.*, 2005). Chaque hydrosystème suit une trajectoire temporelle différente caractérisée par une superposition de tendances d'évolution à long terme et de fluctuations à court terme. Il apparaît donc nécessaire de définir un **fonctionnement de référence pré-perturbation** replacé dans la **trajectoire temporelle d'évolution** de l'hydrosystème (Dufour et Piégay, 2009). Reconstruire l'histoire de l'hydrosystème permet d'évaluer le degré de perturbation qui résulte de l'héritage complexe d'impacts multiples superposés dans le temps et dans l'espace. Cette démarche doit donc permettre (i) d'identifier les principaux **facteurs de contrôle** des ajustements hydromorphologiques passés, (ii) de définir le **type et l'ampleur des ajustements**, et (iii) de **définir les objectifs** de la restauration, notamment en termes d'efficacité et de durabilité.

Par ailleurs, tenir de compte de la trajectoire temporelle d'évolution de l'hydrosystème permet d'identifier l'importance et la complexité des perturbations passées, qui revêtent généralement un caractère **irréversible** (Mika *et al.*, 2010). Dans ce cas, le retour à un fonctionnement de pré-perturbation n'est pas pertinent. Il convient alors d'identifier le(s) fonctionnement(s) ciblé(s) pour définir une trajectoire temporelle appropriée dans le cadre de la restauration (Hughes *et al.* 2005, Kondolf *et al.*, 2006 ; Trémolières *et al.*, 2002). Un modèle d'évolution tenant compte de la dynamique d'ajustement des milieux et de la trajectoire temporelle passée est proposé par Dufour et Piégay (2009 ; Fig. 1.4).

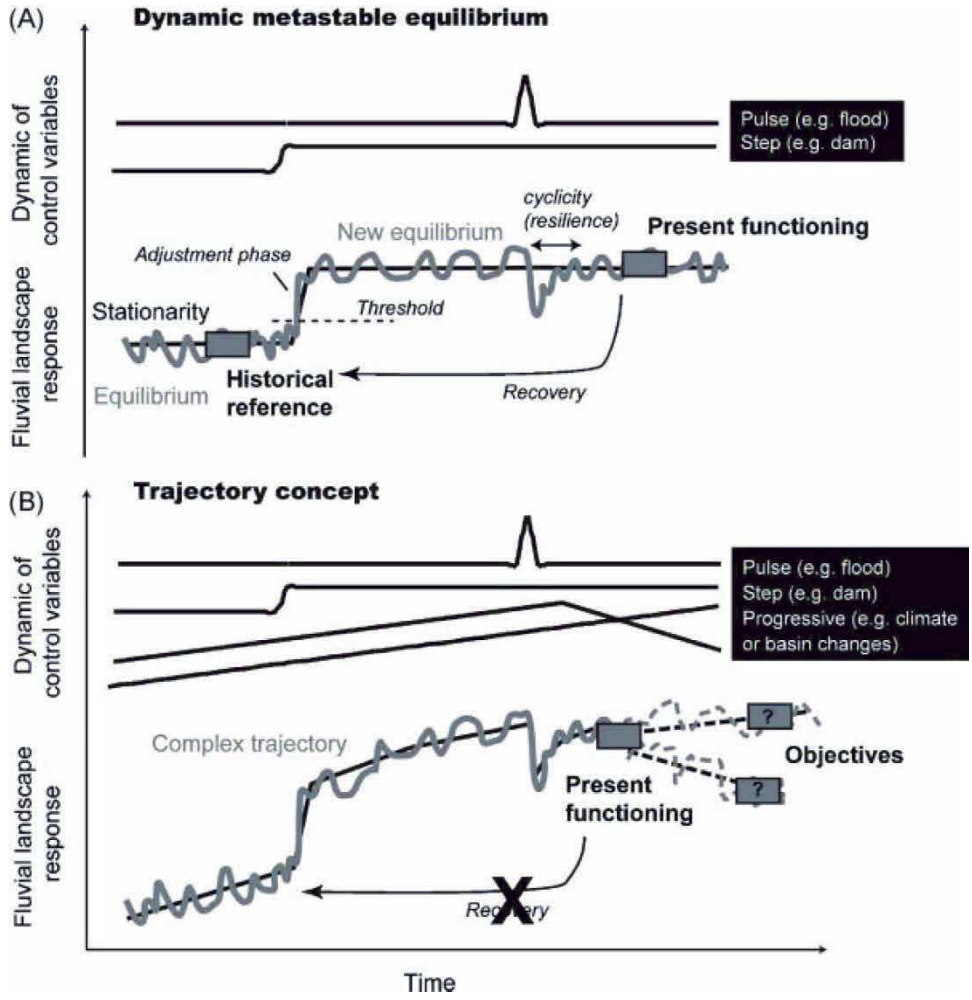


Figure 1. 4 - Schéma conceptuel développé par Dufour et Piégay (2009) synthétisant l'évolution d'un hydrosystème soumis à différentes perturbations (encadré noir). A: Concept d'équilibre dynamique métastable (Knighton, 1984 ; Schumm, 1977). B: Concept de trajectoire temporelle d'évolution.

Si les trajectoires temporelles sont reconnues par de nombreux auteurs comme une **dimension-clef pour définir les objectifs de restauration** (Arnaud *et al.*, 2015 ; Diaz-Redondo *et al.*, 2017 ; Mika *et al.*, 2010 ; Palmer et al ., 2005 ; Wohl *et al.*, 2005), l'intégration du temps long dans les projets de restauration reste encore lacunaire (Fig. 1.5). En 2015, moins de 10 % de l'ensemble des publications scientifiques qui traite de la restauration des cours d'eau tient compte de la dimension historique contre 20 % pour les publications européennes.

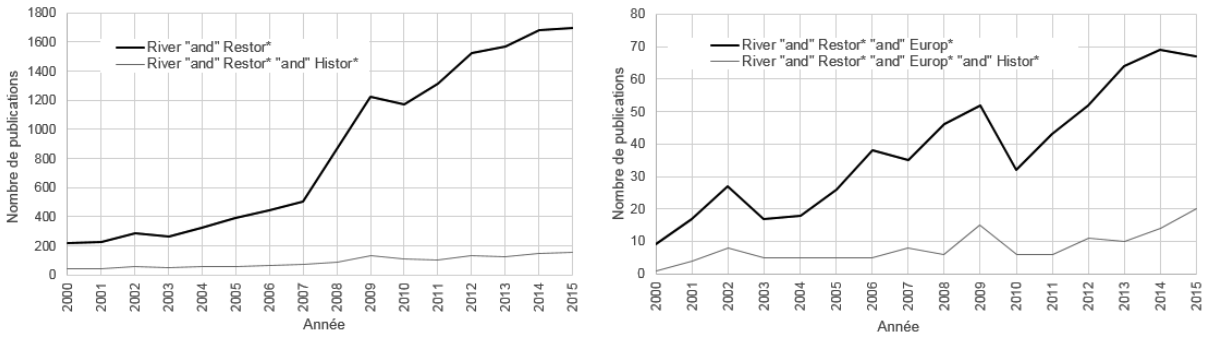


Figure 1. 5 - Nombre d'articles scientifiques publiés dans le monde (graphique de gauche) et en Europe (graphique de droite) qui traitent de « river restoration » (trait noir) et qui intègrent également les aspects historiques (trait gris).

Aujourd'hui, le manque de recul dans le domaine de la restauration fonctionnelle des systèmes fluviaux complexes (Charles et Kalaora, 2003 ; England *et al.*, 2007) nécessite la mise en place de suivis environnementaux pré- et post-restauration à long terme pour pérenniser les actions entreprises et pour évaluer l'**efficacité** de la restauration et la **durabilité** des actions entreprises (Berger, 1997; Downs et Kondolf, 2002 ; Palmer *et al.*, 2005). De plus, comme les suivis reposent sur des indicateurs, la question de la performance de ces derniers est essentielle pour réaliser des suivis.

2 CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE

2.1 Le Rhin supérieur

2.1.1 Caractéristiques générales

Avec une longueur totale de 1 250 km, un bassin versant de 185 260 km² et un module interannuel à l'estuaire de 2 300 $m^3.s^{-1}$, le Rhin est le 9ième plus grand fleuve du continent eurasien et le 3ième d'Europe après la Volga et le Danube.

L'ensemble du cours du Rhin est subdivisé en cinq sous-bassins qui se différencient par leurs particularités géomorphologiques et géologiques (Uehlinger *et al.*, 2009). Le **Rhin Alpin** correspond au sous-bassin situé le plus en amont. Il couvre une superficie de 6 516 km² dont 1.4 % est couverte de glaciers. C'est au niveau du lac Toma, situé à 2 343 m dans le massif du Gothard que le Rhin (nommé *Vorderrhein*) prend sa source. Il est rejoint à Reichenau (alt. 583 m) par l'*Hinterrhein,* qui naît du glacier Paradis situé à 2 400 m d'altitude dans le massif du *Rheinwald*. Plus en aval s'écoule le Rhin alpin jusqu'au lac de Constance (*Bodensee* ; Fig. 1.6 ; 396 m).

Entre le lac de Constance et Bâle s'écoule le **Haut Rhin**. Confiné entre les massifs de la Forêt-Noire et du Jura, il traverse des substrats contrastés comme les calcaires du Jura et le granite de la Forêt-Noire. Après une chute de 21 m à Shaffhausen, sa pente augmente jusqu'à atteindre 1.3 % dans sa partie aval, notamment après la confluence avec l'Aare, principal affluant du Rhin sur ce tronçon.

À Bâle, le fleuve entre dans la vaste plaine du fossé d'effondrement rhénan dont l'extrémité aval se situe à Bingen. Bordé à l'est par la Forêt-Noire et à l'ouest par les Vosges, il prend le nom de **Rhin Supérieur** sur plus de 300 km. À l'état naturel, la pente est de l'ordre de 0.1 % entre Bâle et Strasbourg et s'adoucit dans la partie aval pour atteindre ~ 0.025 % (Uehlinger *et al.*, 2009). L'Ill, le Neckar et le Main sont ses principaux affluents.

Entre Bingen et Coblence, qui correspond au **Rhin Moyen**, le fleuve franchit le Massif schisteux rhénan sous la forme d'une gorge de 200 à 300 m de large. La pente est d'environ 0.04 %. Ses principaux affluents sont la Lahn et la Moselle.

Dans la partie aval, le fleuve correspond successivement au **Rhin inférieur** puis au **Delta du Rhin.** Les pentes sont de l'ordre de 0.023 % à l'aval de Bonn, et atteignent 0.008 % dans la partie aval (Uehlinger *et al.*, 2009). Le Rhin reçoit les eaux de la Ruhr, de l'Emscher et de la Lippe. Dans le delta, le fleuve se divise en trois branches (Ijssl, Lek et Waal) qui rejoignent la mer du Nord sur la côte ouest des Pays-Bas.

La présente recherche concerne le **tronçon alsaco-badois du Rhin Supérieur**. Sur ce linéaire, le style fluvial passe successivement d'un secteur à tresses (entre Bâle et Neuf-Brisach), à un secteur à tresses et anastomoses (entre Neuf-Brisach et Strasbourg), à tresses et à méandres naissants (entre Strasbourg et Lauterbourg), puis enfin à méandres (à l'aval de Lauterbourg) (Fig. 1.9).

Pour lutter contre les inondations, l'insalubrité, améliorer la navigation et favoriser l'agriculture, ce tronçon a fait l'objet de nombreux travaux d'aménagement dès le début du XIXième siècle. Aujourd'hui, il s'agit du secteur le plus anthropisé du fleuve, en particulier entre Kembs et Iffezheim qui constitue l'un des linéaires fluviaux les plus artificialisés au monde.

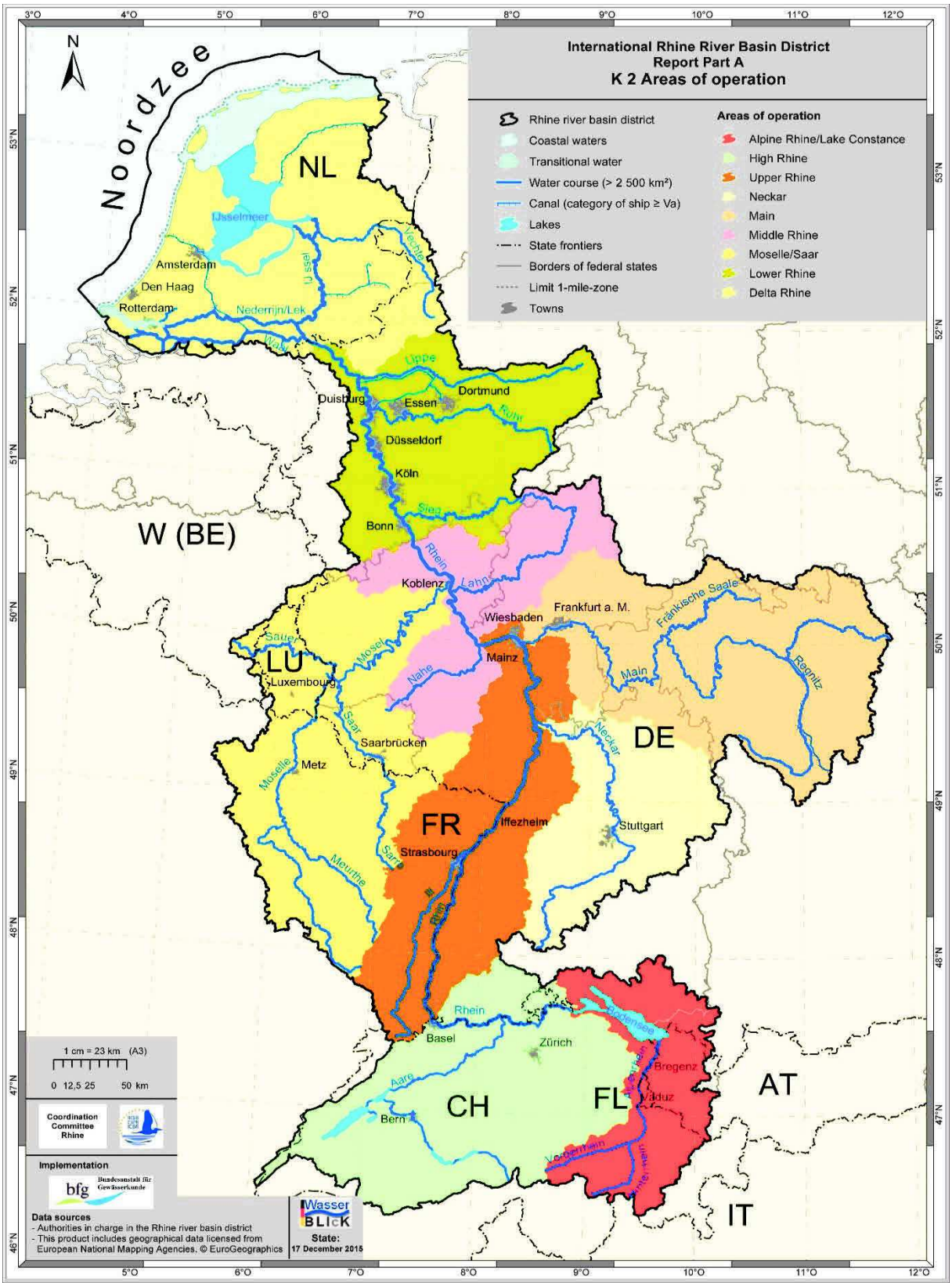


Figure 1. 6 - Bassin versant et sous-bassins versants du Rhin (ICPR, 2015).

2.1.2 Histoire des aménagements

Sur un linéaire de 125 km, le Rhin entre Bâle et Strasbourg s'abaisse de 107 m. Cet abaissement important explique, entre autres, les complications rencontrées autrefois pour la navigation et la violence des inondations (Lefoulon, 1959).

La littérature ancienne montre que face à la menace des inondations, les sociétés riveraines ont mené des aménagements dès la fin du XVIII^{ième} siècle, sur les berges ou dans les lits majeurs, au moyen de levées de terre, de fascines et de tunages (Champion, 1863 ; Fischbach, 1878). Mais ces ouvrages ont été sporadiques le long du fleuve et n'ont pas permis d'enrayer les dégâts causés par les inondations.

La fin du XVIII^{ième} siècle marque un tournant dans la planification de la domestication du fleuve. Dans le but de lutter efficacement contre les inondations, les premiers projets d'ensemble ont vu le jour : celui d'**Abraham de Clinchamp** en 1765, puis celui de **Hell** en 1787, et enfin celui du **Général d'Arçon** en 1789. Si le projet de Hell propose une adaptation des aménagements d'Abraham de Clinchamp en faveur de la navigabilité du fleuve, celui du Général d'Arçon vise à stabiliser le lit mineur notamment pour fixer la frontière franco-allemande, mais également pour favoriser l'agriculture et diminuer le risque d'épidémie lié à l'importance des zones humides (Maire, 1996). Initialement cantonné à la rive française du fleuve, le projet a pris une dimension internationale et s'élargit de la Suisse à la Hollande.

Le projet du Colonel **Johann-Gottfried Tulla** est finalement adopté en 1840 (Tulla, 1825). À cette première phase d'aménagements (**1842-1876 : correction**) va succéder une période d'amélioration du projet initial (**1930-1936 : régularisation**), suivie d'une dernière phase de travaux (**1928-1977 : canalisation**) dont résulte le paysage fluvial actuel. Depuis les années 1980 a débuté une 4^{ième} phase d'aménagement qui consiste à la fois à restaurer le fonctionnement hydro-morphologique et écologique du fleuve et à écrêter les crues, pour corriger les impacts de la canalisation.

2.1.2.1 La correction

Les travaux de Tulla ont consisté en une profonde restructuration de l'hydrosystème, dont les espaces compartimentés furent destinés à des fonctions déterminées (Bernhardt, 2000 ; Herget *et al.*, 2005). Entre Bâle et Mannheim, le Rhin est corrigé de la manière suivante (Fig. 1.7) :

- le réseau des chenaux multiples est remplacé par un **chenal principal unique** d'une largeur de 200 m. Les chenaux latéraux sont déconnectés en partie et les méandres (en aval de Seltz) sont recoupés ;
- le chenal principal est ceinturé entre des digues dites « submersibles » pour permettre les **débordements dans le lit majeur** ;
- des digues dites de « hautes eaux » ou d'« inondations », situées à ~ 1-2 km de part et d'autre du lit mineur, délimitent un nouveau lit majeur également rétréci (Fig. 1.8).

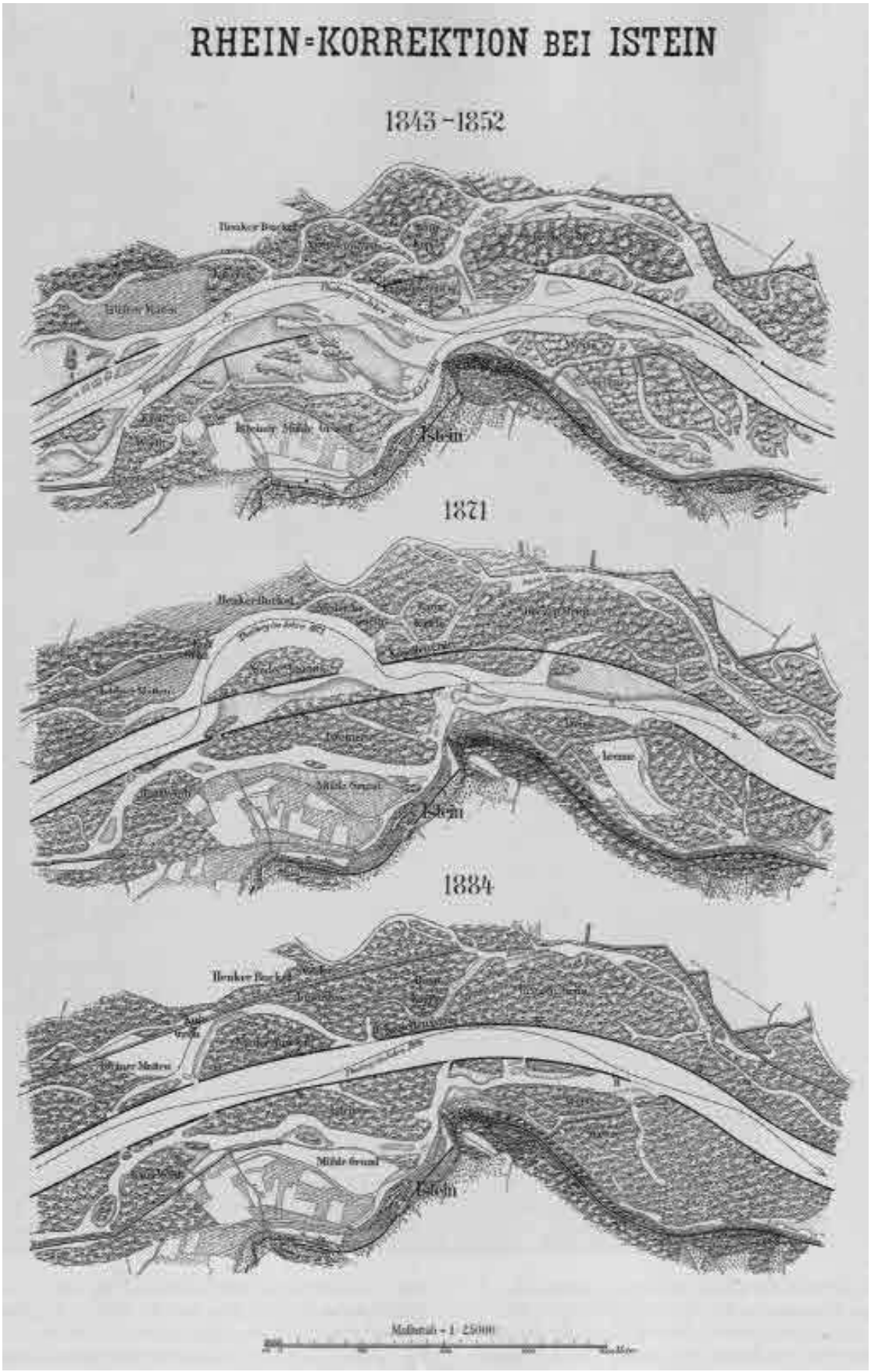


Figure 1. 7 - Exemple de simplification du tracé du Rhin par les travaux de correction de Tulla et Honsell (Honsell, 1885; Repris dans Herget et al., 2005)

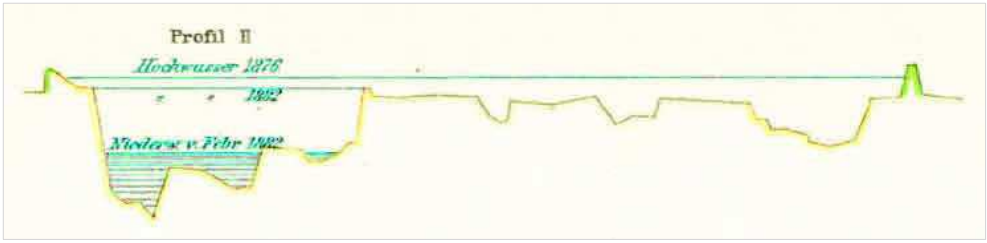


Figure 1. 8 - Profil en travers entre Gross-Kembs et Klein-Kembs présentant les digues submersibles au niveau des berges du lit mineur et les digues des hautes eaux (vert). Carte de 1889 fournie par Dillmann.

La simplification du tracé a diminué la longueur du fleuve de 32 km (soit 14 % entre Bâle et Lauterbourg), entraînant une augmentation de la pente, des forces tractrices et de la puissance fluviale et, corrélativement, l'incision du cours d'eau (Marchal et Delmas, 1959). Ce phénomène est volontaire et recherché par l'ingénieur, mais il a été renforcé par le rétrécissement du lit mineur et l'arrêt de la fourniture sédimentaire par érosion des berges. En cela, l'ingénieur poursuit deux objectifs :

- augmenter le débit à pleins bords pour atténuer les submersions ;
- favoriser la sédimentation fine dans les annexes hydrauliques lors des inondations.

L'ensemble de ces objectifs a été atteint sur la majeure partie du linéaire. Néanmoins, l'incision dans la partie amont a atteint localement 7 m (comme à Chalampé, situé à 10 km au sud de Bâle ; Fig. 1.9) et a fait apparaître la **barre rocheuse d'Istein,** qui stoppa l'incision et empêcha la navigation jusqu'au port de Bâle dès la fin du XIX^{ième} siècle (Marchal et Delmas, 1959). En outre, la circulation sur le Rhin, bien qu'améliorée par les travaux de correction, resta compliquée notamment en période d'étiage. Pour pallier cette contrainte, le projet de « *régularisation* » fut adopté en 1905.

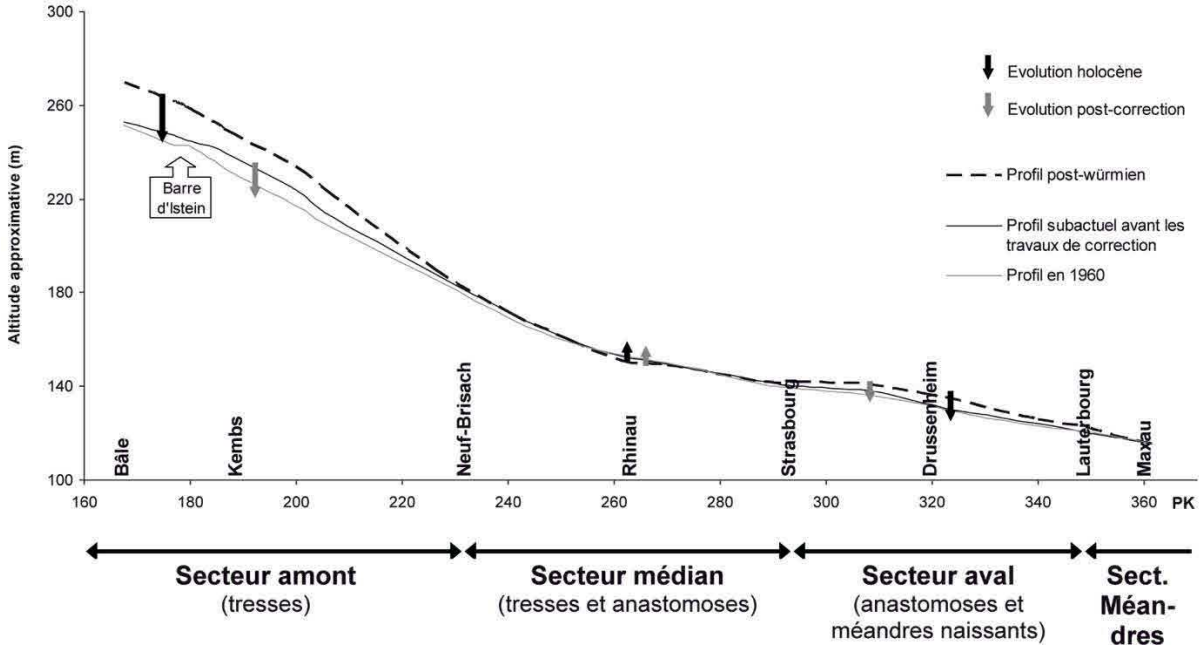


Figure 1. 9 - Profil en long diachronique et sectorisation longitudinale des deux tiers méridionaux du Rhin Supérieur d'après Schmitt (2001), adapté de Carbiener et Dillmann (1992).

2.1.2.2 La régularisation

L'objectif des travaux de régularisation était de garantir un tirant d'eau minimum pour permettre la navigation sur l'ensemble du Rhin corrigé, même en basses eaux. Le projet de **l'ingénieur badois Honsell** a été retenu. Il a consisté à construire des **champs d'épis latéraux alternés** pour favoriser « *l'auto-curage* » des hauts-fonds (Fig. 1.10). Des rampes de fond ont aussi été mises en place pour limiter l'incision, ce qui fût un échec (Marchal et Delmas, 1959). Les premiers travaux menés à l'aval de Strasbourg furent concluants et ont donc été étendus dès 1930 en amont (Schneider, 1966). Mais le problème de la barre d'Istein n'était pas résolu. La seule solution envisageable était la construction d'un bief de contournement. Les décideurs et les ingénieurs voient dans ce nouveau projet une réelle opportunité de combiner au contournement de la barre d'Istein la production hydro-électrique, dont les avancées techniques dans le domaine étaient en plein essor (Maire, 1996). Bientôt, un nouveau projet d'ensemble a été retenu avec un double objectif : reconnecter Bâle au trafic fluvial et produire de l'hydro-électrique sur l'ensemble du linéaire de Bâle à Strasbourg.

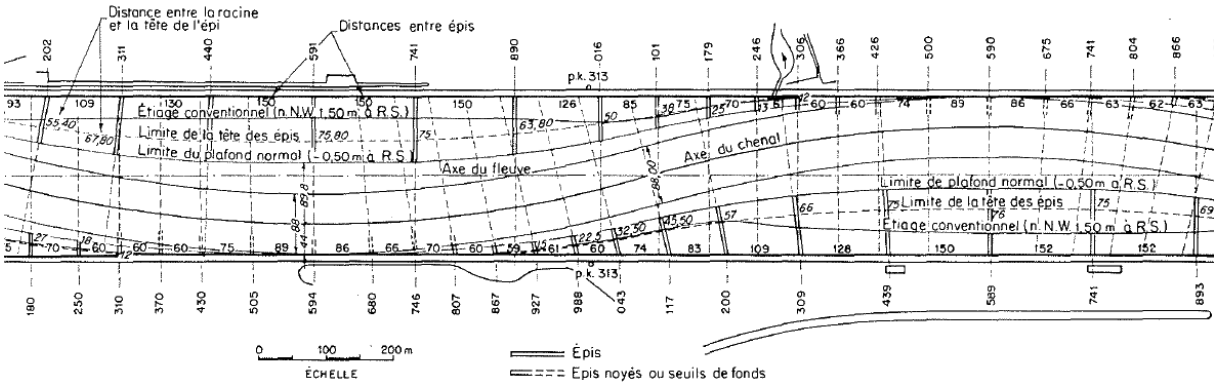


Figure 1. 10 - Plan du lit corrigé du Rhin montrant le projet de régularisation (Marchal et Delmas, 1959).

2.1.2.3 La canalisation

L'anthropisation du Rhin Supérieur est maximale au début du XXième siècle. Avec le **traité de Versailles en 1919** qui donne à la France la possibilité d'exploiter l'énergie hydraulique du fleuve (Herget *et al.*, 2005), la dernière phase d'aménagement a été lancée en 1928. **Le Grand Canal d'Alsace** (GCA) est construit sur la rive gauche du fleuve. Quatre centrales hydro-électriques ont été construites sur le tronçon Kembs – Breisach entre 1952 et 1959 (Fig. 1.11-1).

À l'aval de Bâle, un barrage de dérivation permet de court-circuiter le fleuve et dériver la quasi-totalité des débits dans le GCA. Seule une vingtaine de $m^3.s^{-1}$ sont injectées dans le Vieux-Rhin. Cette situation hydrologique particulière impacte la nappe phréatique dont le niveau s'abaisse considérablement, provoquant des préjudices aux agriculteurs de la plaine rhénane. Pour pallier cette conséquence inattendue, deux solutions sont retenues : 1. à partir de 1963, quatre nouvelles centrales hydro-électriques sont construites « en feston » jusqu'à Strasbourg (Fig. 1.11-2), puis « en ligne » pour celles de Gambsheim et d'Iffezheim (Fig. 1.11-3), et 2. des seuils et des barrages agricoles sont construits dans les tronçons de Vieux-Rhin afin de rehausser artificiellement le toit de la nappe. Au total, le tronçon entre Bâle et Mannheim compte dix centrales hydro-électriques (Dister *et al.*, 1990).

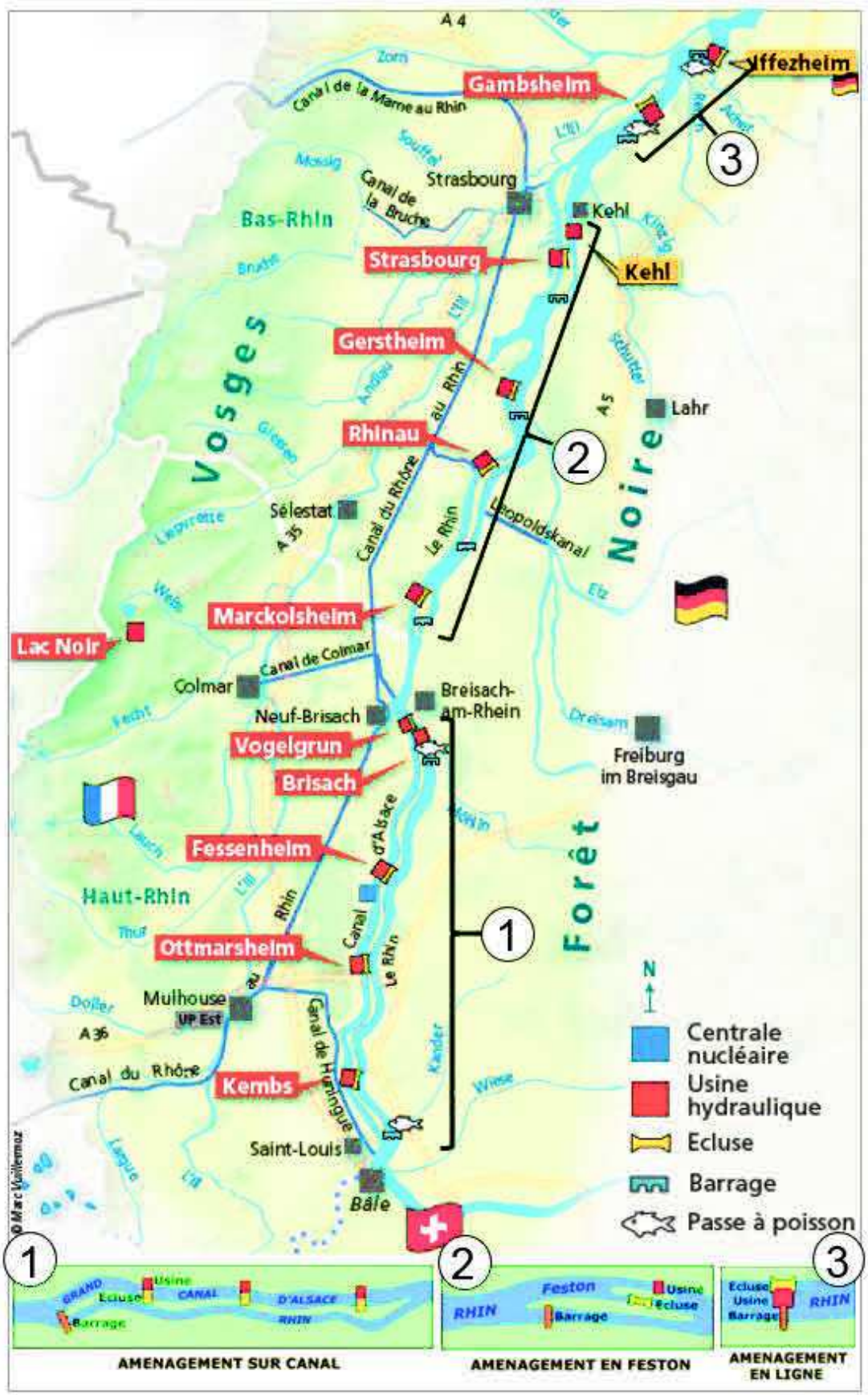


Figure 1. 11 - Localisation et types d'aménagements sur le Rhin Supérieur, entre Kembs et Iffezheim (adapté de edf-alsace).

2.1.2.4 Conséquences actuelles des aménagements

Ces trois aménagements successifs ont profondément marqué le paysage du Rhin Supérieur. Les fonctionnements hydrologiques et géomorphologiques ont été radicalement modifiés, et de façon **irréversible**. Les aménagements n'ont finalement pas permis d'écarter le risque d'inondation. Le problème a été déplacé à l'aval d'Iffezheim (Dister *et al.*, 1990). Le **temps de transit des crues** s'est accéléré et le pic de crue peut coïncider avec ceux des affluents du Rhin Supérieur (Neckar, Main, Moselle), augmentant considérablement le risque d'inondation entre Maxau et Worms (Dister, 1986 ; Lammersen *et al.*, 2002). Dès 1982, de nouveaux travaux sont engagés entre Bâle et Worms pour aménager des **zones de rétention de crues** dans les espaces de l'ancien lit majeur du Rhin. L'objectif est ambitieux : plus de 288 Moi de m^3 doivent être stockés dans une plaine d'inondation dont la surface a été divisée par 6 (1 800 km^2 en 1828 contre 300 km^2 actuellement ; Lammersen *et al.*, 2002). En outre, l'érosion progressive en aval d'Iffezheim, liée au déficit sédimentaire, est contrecarrée par des recharges sédimentaires régulières réalisées par l'Allemagne (Fig. 1.12). Les volumes moyens injectés atteignent annuellement ~ 170 000 m^3, ce qui pose la question de la durabilité de la gestion du fleuve (Kondolf, 1997 ; Kuhn, 1992).

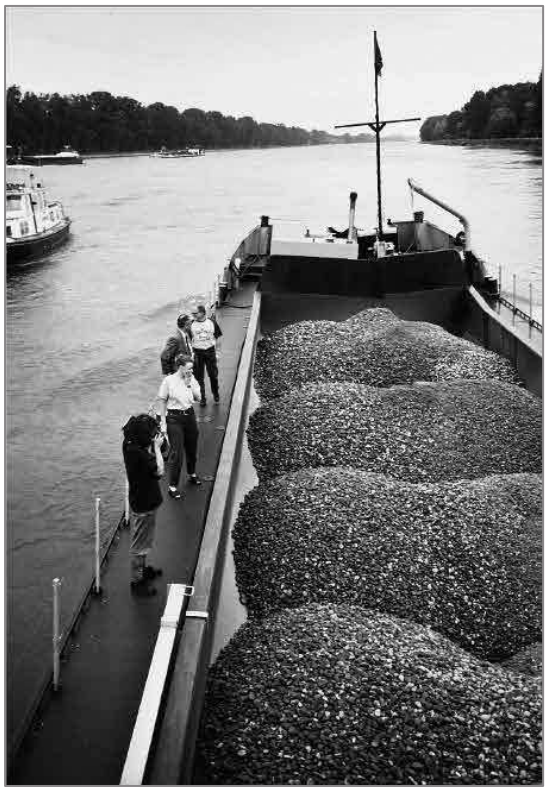


Figure 1. 12 - Recharge sédimentaire à l'aval de la centrale hydro-électrique d'Iffezheim (Kondolf, 1997)

2.2 L'île artificielle du Rohrschollen

2.2.1 Situation générale

Située à 8 km au sud-est de la ville de Strasbourg, l'île artificielle du Rohrschollen résulte de l'aménagement en feston lié à la construction de la centrale hydro-électrique. En 1970, lors de la construction du bief d'amenée, 314 ha de forêt (initialement rattachés à la forêt du Neuhof) ont été isolés. Située sur la rive ouest du fleuve corrigé, l'île s'étend sur 5.3 km le long de la frontière franco-allemande et atteint 750 m dans sa partie la plus large.

La première demande relative à « la protection de la nature » de l'île du Rohrschollen a été déposée par le Conseil municipal de Strasbourg en 1977. Mais ce n'est qu'en 1997 que le site a été classé en Réserve Naturelle Nationale (décret ministériel n°97-209 du 4 mars). Cette dernière est gérée par la Ville de Strasbourg.

2.2.2 Principe de fonctionnement

Localisé au niveau de la pointe sud de l'île, un **barrage de dérivation** (Fig. 1.14-3) a été construit perpendiculairement au Rhin corrigé, sur la frontière franco-allemande. Il permet de dériver la majorité du débit du Rhin dans le bief d'amenée afin d'alimenter la centrale hydro-électrique (Fig. 1.14).

À l'étiage, seuls 13 $m^3.s^{-1}$ sont injectés dans le Vieux-Rhin par une micro-turbine située au droit du barrage de dérivation. Jusqu'à 1 550 $m^3.s^{-1}$, le débit restant est acheminé vers la **centrale**

hydro-électrique qui peut produire annuellement environ 800 GWh (www.edf.fr). Lorsque le débit dépasse la capacité de turbinage, le surplus est déversé dans le Vieux-Rhin par le barrage de dérivation.

Le **barrage agricole** de Kehl (Fig. 1.14-1), situé au nord de l'île, a été construit en 1985. Il permet de maintenir le niveau du Vieux-Rhin à 140 m Normal Null (NN). L'objectif premier est de maintenir la nappe phréatique à un niveau élevé pour les besoins de l'agriculture. Mais le barrage permet également d'utiliser l'île du Rohrschollen et le Vieux-Rhin comme zone de rétention de crues. Lorsque le débit du Rhin dépasse 2 800 $m^3.s^{-1}$ ($Q_{Vieux\text{-}Rhin}$ > 1237 $m^3.s^{-1}$), une manœuvre exceptionnelle au droit du barrage agricole permet d'écrêter les crues les plus importantes (vidange du Vieux-Rhin pour un stockage maximum). En fonction de la durée et du volume d'eau retenu, toute ou partie de l'île est submergée. Le niveau d'eau peut être rehaussé de 6 m au maximum au-dessus du niveau normal (146 m. NN), ce qui survient généralement pour les crues décennales. Avec une capacité de rétention de 37 millions de m^3, le site du Rohrschollen présente le volume de rétention le plus important du Rhin Supérieur. Le protocole de gestion de l'île du Rohrschollen est synthétisé dans le tableau 1.1.

Tableau 1. 1 - Gestion des crues sur le site du Rohrschollen depuis 1985.

Q RHINE ($M^3.S^{-1}$)	TURBINE FLOW	OLD RHINE ($M^3.S^{-1}$)	AGRICULTURAL DAM IMPLEMENTATION	ISLAND CONDITION
Q ≤ 1563	Q ≤ 1550	Q = 13	Water level maintained at 140 m.NN	No submersion
1563 < Q < 2800	Q = 1550	13 < Q < 1237	Water level maintained at 140 m.NN minimum	Local submersion
Q ≥ 2800	Q = 1550	Q ≥ 1237	Progressive flood retention	Partial submersion
Q ≥ 3800	Q = 1550	Q ≥ 2237	Flood retention at 146 m.NN	Total submersion

2.3 L'anastomose du Bauerngrundwasser

Dans la sectorisation longitudinale de Carbiener (1983 ; Fig. 1.13), l'île du Rohrschollen se situe à l'interface du *secteur à tresses et anastomoses* et du *secteur à anastomoses et méandres naissants.* Les mécanismes à l'origine des chenaux anastomosés répondent à trois types de formations fondamentalement différents (Huang et Nanson, 2007 ; Makaske *et al.*, 2002 ; Nanson et Knighton, 1996) :

- par avulsion : le chenal secondaire occupe le paléochenal abandonné par le chenal principal ;
- par accrétion : le chenal principal se subdivise par la formation d'îlots, comme cela s'observe le plus fréquemment dans les zones deltaïques ;
- par creusement : dans le lit majeur, d'anciens chenaux de crue sont creusés.

Les anabranches ou chenaux anastomosés qui résultent de ces processus se caractérisent par des berges relativement stables souvent végétalisées, des rapports largeur/profondeurs souvent relativement faibles et des taux de sédimentation importants liés à la faiblesse de l'énergie pendant les submersions. Bien que le Bauerngrundwasser résulte de l'anthropisation du milieu (chronologie des aménagements détaillée dans le chapitre 2), il est possible de considérer que cette anastomose a été formée par avulsion, comme cela se produisait naturellement dans les environs du Rohrschollen avant les aménagements (Schmitt *et al.*, 2016).

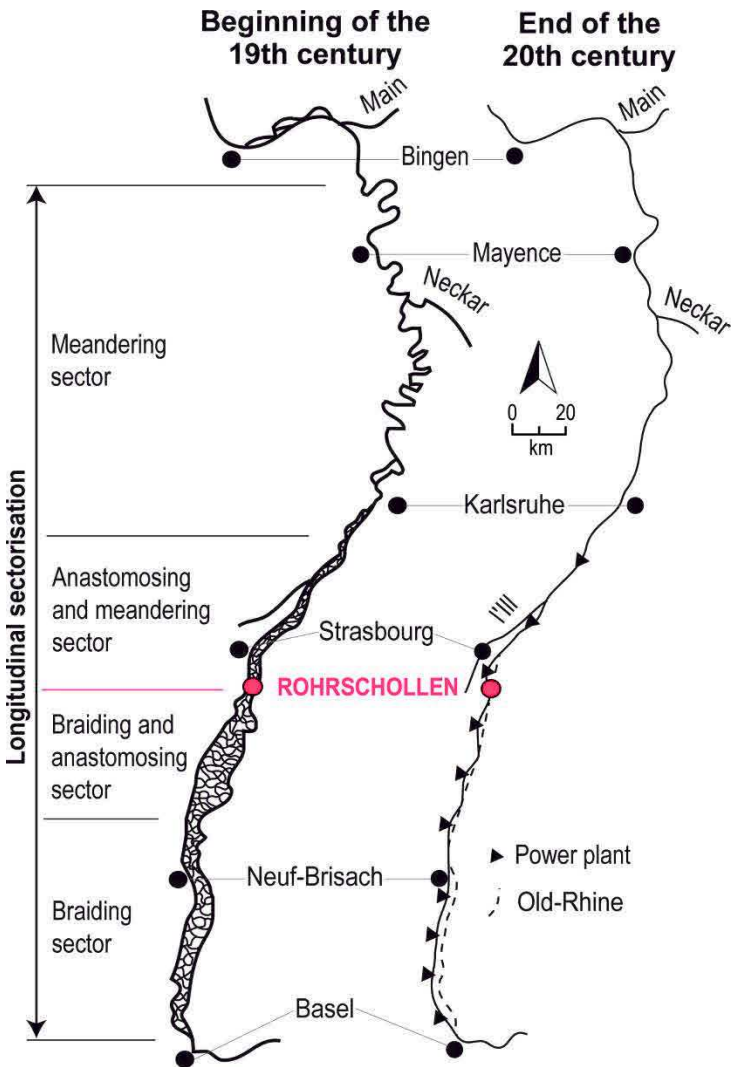


Figure 1. 13 - Sectorisation longitudinale du Rhin (d'après Carbiener, 1983, reprise par Schmitt et al., 2009, modifié). Tracés schématiques du Rhin au début du XIXième siècle (gauche) et à la fin du XXè siècle (droite).

Déconnecté à l'amont par le canal de dérivation, le Bauerngrundwasser traverse l'île du Rohrschollen en formant deux courbures avant de confluer avec le Vieux-Rhin dans la partie médiane de l'île. Le cours d'eau se compose d'une partie principale caractérisée par une largeur de 20-25 m, une longueur d'environ 2 km et une profondeur moyenne de 2 m. Un chenal secondaire, connecté au Bauerngrundwasser dans sa partie aval, rejoint la pointe nord de l'île en traversant de larges zones humides peu profondes. Il rejoint le bief de fuite à l'aval de la centrale hydro-électrique par un petit chenal aménagé qui contourne l'ouvrage. L'ensemble du réseau hydrographique est caractérisé par un colmatage important et présente peu d'échanges nappe-rivière.

Le remous hydraulique généré par le barrage agricole de Kehl contrôle les niveaux d'eau sur l'ensemble du Bauerngrundwasser. Les submersions sont rares et statiques. Elles dépendent essentiellement des modulations hydrologiques générées dans le Vieux-Rhin. Lors d'une opération de rétention, le Vieux-Rhin est préalablement « vidangé ». Avant le projet de restauration, un siphon situé à l'amont du Bauerngrundwasser permettait d'injecter ~ 1.5 $m^3.s^{-1}$ au cours des périodes de vidanges pour éviter l'assèchement de l'annexe. Aujourd'hui, cet ouvrage n'est plus utilisé.

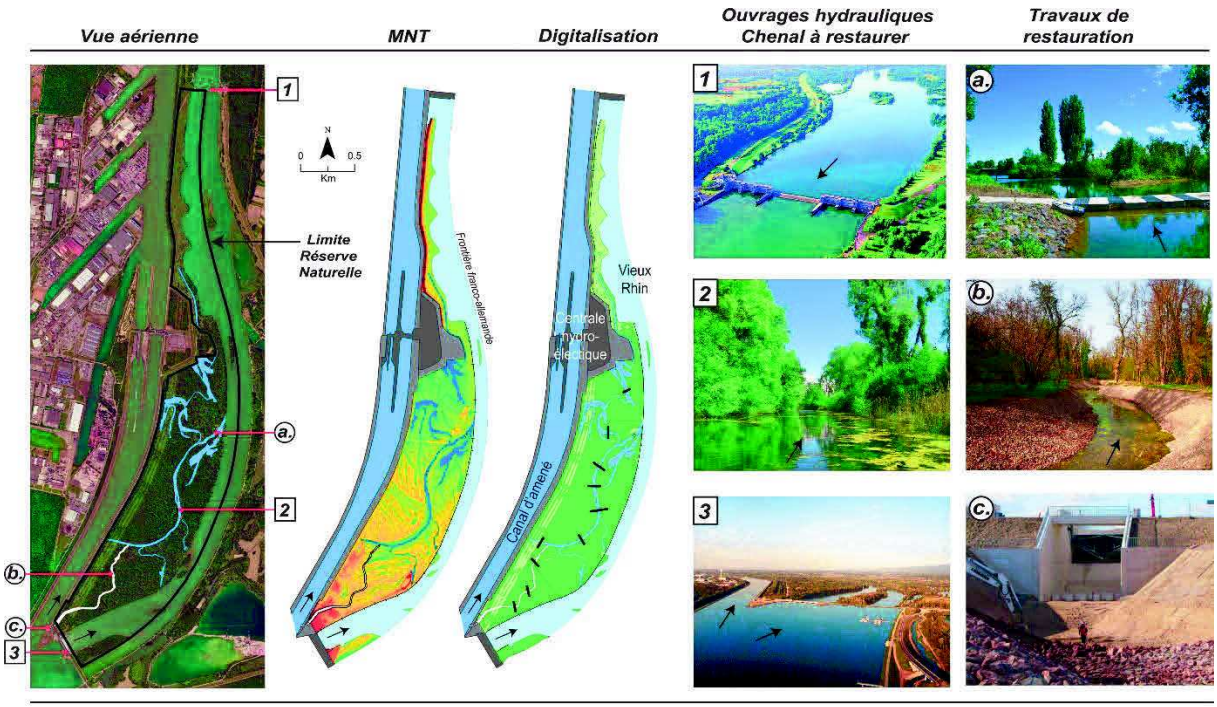


Figure 1. 14 - Présentation de la zone d'étude et des données de base. De gauche à droite : image aérienne (EMS 2013) ; Modèle Numérique de Terrain issu de levé LiDAR (EMS 2015) ; Digitalisation par unités éco-morphologiques sur la base de l'orthophoto 2010 (LIVE) ; 1. Barrage agricole de Kehl (Regierungspräsidium de Freiburg) ; 2. Bauerngrundwasser (LIVE, 2013) ; 3. Barrage de dérivation (edf.fr). Les ouvrages créés dans le cadre du projet de restauration, avec : a. Ouvrage de restitution aval (route submersible) ; b. Chenal artificiel avant les premières mises en eau ; c. Ouvrage de prise d'eau (arrière-plan), fosse de dissipation et enrochements du chenal artificiel protégé (premier plan).

3 CADRE OPÉRATIONNEL

3.1 Le projet européen LIFE+ et le partenariat gestion-recherche

En 2007, la Ville de Strasbourg a initié un important projet européen LIFE+ (Instrument Financier pour l'Environnement de l'Union Européenne) de restauration de l'île du Rohrschollen : LIFE08 NAT/F/000471 "*Restaurer la dynamique des habitats alluviaux rhénans sur l'île du Rohrschollen*". Il a été cofinancé par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, la Région Alsace, le Département du Bas-Rhin, la DREAL Alsace, la Ville de Strasbourg et Électricité De France. Le projet vise à recréer le fonctionnement hydro-morphologique et écologique du milieu : transport sédimentaire grossier, mobilité latérale, submersions dynamiques, échanges nappe-rivière, rajeunissement des successions végétales, extension des communautés végétales hygrophiles, extension des habitats aquatiques lotiques…

Une convention de partenariat intitulée "*Suivi scientifique de la restauration fonctionnelle de la Réserve Naturelle de l'île du Rohrschollen*" a associé la Ville de Strasbourg, le CNRS (LIVE UMR 7362) et l'Université de Strasbourg sur une période initialement fixée à 36 mois (2012-2015). La convention a été prolongée une fois pour étendre le suivi jusqu'en septembre 2016. Le financement obtenu pour le suivi scientifique a été complété par la Région Alsace (demi-contrat doctoral régional), l'AERM, EDF et la ZAEU (Zone Atelier Environnementale Urbaine). Ce dernier organisme a pour objectif de développer, dans une démarche pluridisciplinaire, des connaissances pour la gestion de l'environnement sur un territoire urbanisé (www.zaeu-strasbourg.eu). D'autre part, la thèse a indirectement bénéficié du projet IDEX ModelROH qui

a permis d'amplifier les recherches sur le site du Rohrschollen tout en fédérant plusieurs laboratoires de l'Université : LIVE, LHYGES, ICUBE.

3.2 Les travaux de restauration

Le scénario retenu pour atteindre les objectifs du projet est le suivant (Schmitt *et al.*, 2012) :

a. recréer des submersions dynamiques simulant le régime de crue naturel du Rhin (inondations écologiques) ;
b. reconnecter le Bauerngrundwasser au Rhin par un nouveau chenal de connexion amont ;
c. améliorer la connexion sédimentaire et piscicole avec le Vieux-Rhin tout en maintenant une dynamique de submersions dans la partie aval de l'île.

Pour atteindre les objectifs **a.** et **b.**, un ouvrage hydraulique a été construit (Fig. 1.14-c) et un nouveau chenal de connexion a été creusé (Fig. 1.14-b). L'objectif **c.** a notamment requit la construction d'un ouvrage de restitution aval (Fig. 1.14-a).

3.2.1 Ouvrage hydraulique

Situé au niveau de la pointe sud de l'île, l'ouvrage hydraulique de prise a été construit en rive droite du bief d'amenée. Une vanne permet de moduler le débit injecté de 2 à 80 $m^3.s^{-1}$ pour simuler des variations hydrologiques en fonction de l'hydrodynamique du Rhin et recréer des inondations écologiques (Tab. 1.2). Sur cette base, il est prévu une durée annuelle moyenne de submersion d'environ 50 jours. Un *by-pass* contourne la vanne afin d'injecter un débit minimum de 2 $m^3.s^{-1}$ en dehors des périodes d'inondations écologiques.

Tableau 1. 2 - Loi d'injection déterminée en fonction du débit du Rhin et nombre de jours de submersions théorique.

Q RHINE ($M^3.S^{-1}$)	**Q NEW CHANNEL ($M^3.S^{-1}$)**	***NBR DAYS / YEAR***
Q < 1550 ET Q > 2800	Q = 2	314
1565 < Q < 1650 OR 2760 < Q < 2800	2 < Q < 20	11
1650 < Q < 1725 OR 2725 < Q < 2760	20 < Q < 40	7
1725 < Q < 1755 OR 2675 < Q < 2725	40 < Q < 60	4
1755 < Q < 1800 OR 2650 < Q < 2675	60 < Q < 80	4
1800 < Q < 2650	Q = 80	25

À l'aval de la vanne, des plots de dissipation permettent de limiter la turbulence liée à la chute de 5 m (Fig. 1.15). À l'aval de l'ouvrage, une fosse de dissipation à été mise en place afin d'atténuer l'énergie du courant.

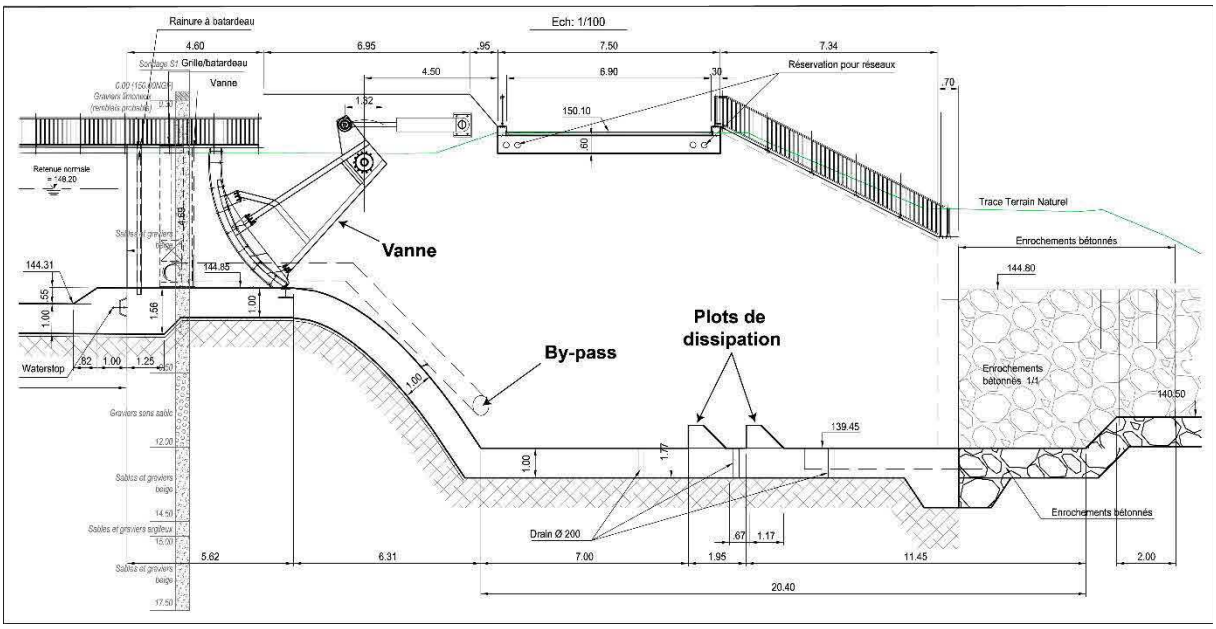


Figure 1. 15 - Plan en coupe de l'ouvrage hydraulique (ouvrage de régulation) à l'échelle 1/100. INGÉROP Cahiers technique (2012).

3.2.2 Chenal de connexion amont

Le chenal est composé de deux tronçons. Sur les premiers cent mètres, le tronçon amont est composé d'enrochements permettant d'éviter toutes évolutions morphologiques (chenal protégé). La proximité des ouvrages EDF (pilonnes électriques) et de la digue du bief d'amenée n'autorisent aucune activité morphologique. Par ailleurs, l'ensemble du débit est contenu dans le chenal. Le second tronçon débute à l'entrée de la forêt. Il a simplement été creusé dans le substrat naturel de l'île (Fig. 1.14-b). Volontairement sous-dimensionné pour favoriser les évolutions morphologiques et les débordements (submersion de la forêt alluviale), son débit de pleins bords est de l'ordre de 20 m^3. Lors du creusement du chenal, plusieurs seuils artificiels ont été mis en place artificiellement pour diversifier les habitats. Le linéaire se compose de trois courbures.

3.2.3 Ouvrage de restitution

Jusqu'aux travaux, la connexion avec le Vieux-Rhin se faisait par 2 buses situées sous un chemin. Le projet a prévu d'améliorer la connexion aval du Bauerngrundwasser et de favoriser les écoulements dans le bras secondaire situé une centaine de mètres à l'amont de la confluence. Pour cela, une route submersible a été construite dans la partie aval du Bauerngrundwasser. Franchissable par les véhicules des gardiens de la Réserve, il comporte 7 ouvertures sommitales à demi-submergées, d'une buse immergée favorable au franchissement piscicole et d'une ouverture rectangulaire de 1,8 x 1,00 m permettant le transit sédimentaire (partiel) lors des crues (Fig. 1.16).

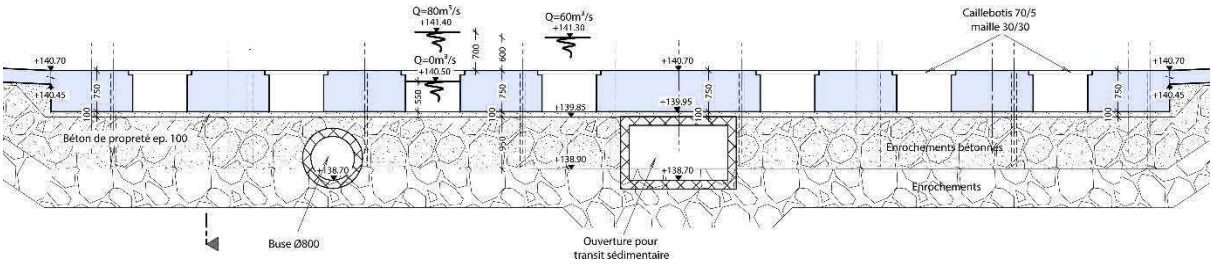


Figure 1. 16 - Coupe longitudinale de l'ouvrage de restitution aval ; INGEROP Cahiers technique (2012).

3.3 Le suivi scientifique

Basé sur un protocole élaboré en collaboration entre l'équipe scientifique et le gestionnaire de la Réserve et l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, le suivi scientifique doit permettre d'évaluer l'efficacité de la restauration grâce à des indicateurs de suivi, pour certains nouveaux, ce qui doit permettre de faire progresser la réflexion scientifique sur les outils de suivis dans les milieux fluviaux restaurés. Le suivi scientifique a reposé sur la comparaison de plusieurs états (ou, plus précisément , « fonctionnements » ou « dynamiques »). Un **état pré-restauration**, mené 2 ans avant le début des travaux, a permis de définir l'état fonctionnel de l'île du Rohrschollen (état initial 0). Les états **post-restauration**, suivis après chaque inondation écologique et/ou une fois par an. L'ensemble du suivi devait permettre (i) d'identifier les principaux changements liés à la restauration, (ii) de formuler des recommandations opérationnelles et (iii) de proposer un nouveau protocole de suivi simplifié pour un suivi à moyen et long termes.

Le suivi scientifique est mené conjointement par les équipes scientifiques pour tenir compte de l'ensemble des compartiments de l'hydrosystème : hydraulique-hydrologie, transport solide, morphodynamique, sédimentologie des berges et du lit majeur, hydrogéologie, phyto-écologie aquatique et riveraine, hydro-écologie de la faune, physico-chimie de l'eau, des sédiments et des plantes, géochronologie, géochimie, modélisations. Ces trois dernières approches ont été développées dans le cadre du projet IDEX MODELROH.

Une comparaison de l'état pré-restauration et des états post-restauration permet de déterminer si les objectifs de la restauration sont atteints ou non. La démarche globale est synthétisée dans le schéma de la figure 1.17.

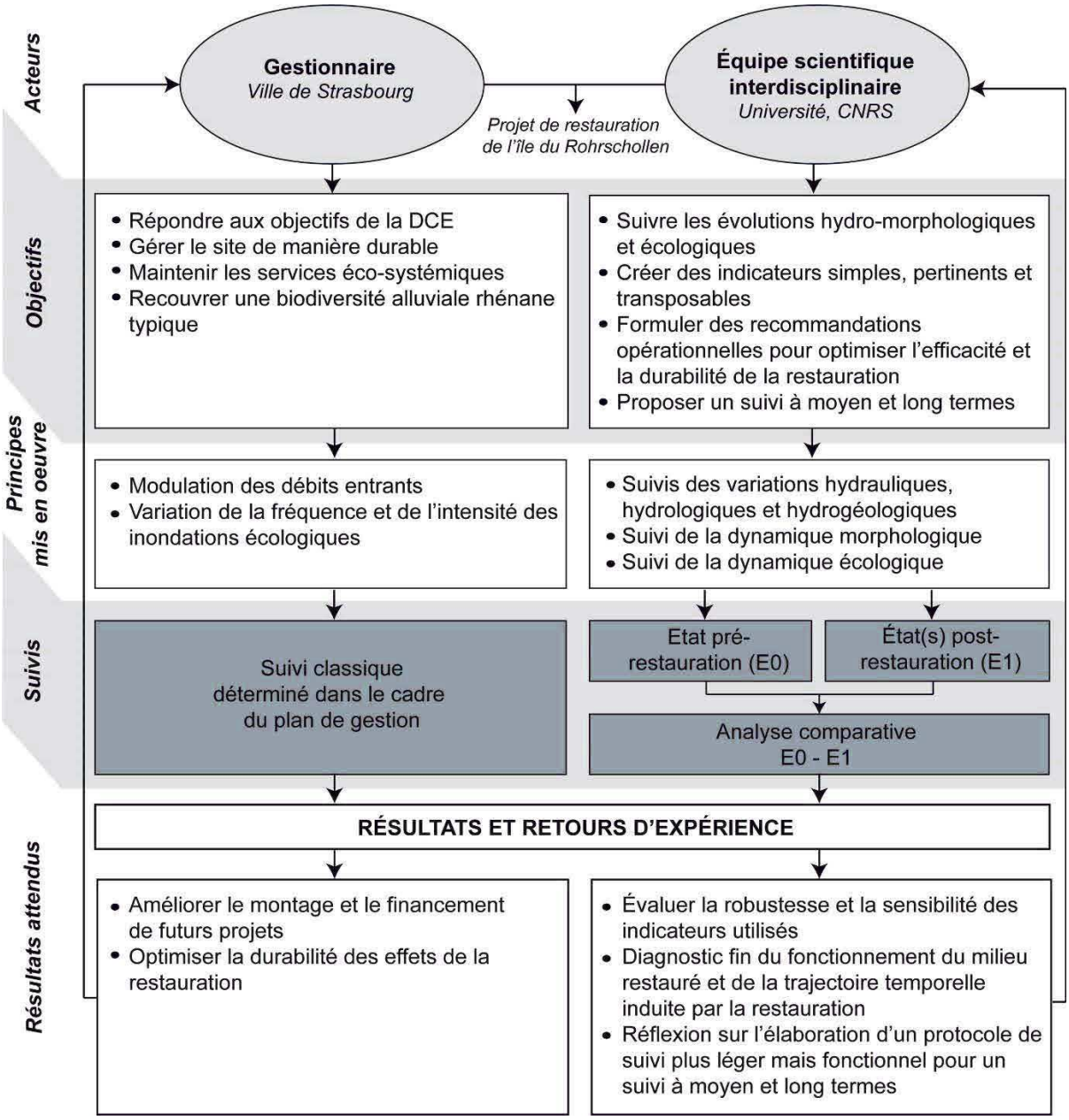


Figure 1. 17 - Schéma résumant la démarche du suivi scientifique menée dans le cadre de la convention de partenariat qui lie le gestionnaire et l'équipe scientifique.

3.1 Enjeux scientifiques

3.2 Problématique

L'objectif principal de ce travail est de **contribuer à la réflexion scientifique sur les suivis fonctionnels des habitats de milieux fluviaux restaurés.** Cette recherche s'articule avec une approche interdisciplinaire plus large qui comprend notamment l'hydro-écologie, mais aussi la modélisation hydraulique, la géochronologie et la géochimie.

Face à l'accroissement des actions de restauration au cours des dernières décennies, et au **manque de recul général** par rapport aux actions menées, de nombreux travaux ont tenté d'élaborer des principes de restauration et ont souligné la nécessité d'accompagner les restaurations par des suivis pour (i) identifier les effets/impacts de la restauration, (ii) évaluer l'efficacité de l'action entreprise et (iii) tenter d'en déduire des tendances évolutives futures

permettant d'estimer, avec plus ou moins de précision, la durabilité des effets de la restauration (Berger, 1997; Brierley and Fryirs, 2008; Dufour and Piégay, 2009; Morandi, 2014 ; Palmer *et al.*, 2005).

Pour atteindre cet objectif général, quatre axes de recherche ont été développés dans le présent travail. Les hypothèses ainsi que les objectifs spécifiques sont présentés pour chacun d'eux.

3.3 Axes de recherche, hypothèses, objectifs

3.3.1 Histoire de l'île du Rohrschollen et imbrication de la restauration dans la trajectoire temporelle longue de l'hydrosystème (Axe 1)

- **Hypothèses :** l'analyse de la trajectoire temporelle longue de l'hydrosystème permet (i) de déterminer les facteurs de contrôle et les temps de réponse des ajustements passés, (ii) d'améliorer la compréhension du fonctionnement actuel et (iii) d'identifier les limites et les risques associés au projet de restauration.

- **Objectifs :**
  - définir le fonctionnement de l'hydrosystème avant les premières perturbations anthropiques ;
  - caractériser la nature et l'importance des ajustements hydromorphologiques sur les deux derniers siècles en lien avec les phases d'anthropisation successives, la chronologie et les processus de dépôts ;
  - caractériser les propriétés physico-chimiques des sédiments pour retracer l'origine des polluants et identifier si la restauration présente un risque en termes de remobilisation de sédiments pollués ;
  - déterminer le potentiel d'évolution post-restauration ;
  - produire des connaissances quant à l'efficacité et la durabilité des effets de la restauration ;
  - développer une approche interdisciplinaire intégrant notamment les évolutions dans leurs dimensions horizontale et verticale.

- **Chapitre correspondant :** 2

3.3.2 Améliorations méthodologiques pour le monitoring géomorphologique des chenaux anastomosés actifs (Axe 2)

- **Hypothèses :** la combinaison de méthodes géodésiques et géomorphologiques classiques permet de suivre avec précision les évolutions morphologiques rapides et intenses des chenaux anastomosés dynamiques. Des indicateurs fonctionnels peuvent être utilisés pour suivre les ajustements géomorphologiques à court, moyen et long termes.

- **Objectifs :**
  - réaliser une comparaison diachronique des nuages de points issus de différentes campagnes pour visualiser et quantifier les évolutions morphologiques ;
  - générer des budgets sédimentaires à partir d'une combinaison de méthodes géodésiques (photogrammétrie terrestre, lasergrammétrie, tachéométrie) ;
  - interpréter et discuter les évolutions en lien avec les résultats issus du suivi géomorphologique classique (dynamique de la charge de fond, évolution des faciès d'écoulement…), en veillant à identifier tous les facteurs d'évolutions (y compris les héritages géomorphologiques) ;

- utiliser des indicateurs existants et développer de nouveaux indicateurs, tester leur robustesse et leur sensibilité dans le cadre d'un suivi fonctionnel à moyen et long termes.

- **Chapitre correspondant** : 3

3.3.3 Influence de l'activité morpho-sédimentaire présente et passée sur la répartition des exfiltrations phréatiques d'un hydrosystème anastomosé restauré (Axe 3)

- **Hypothèses :** la thermographie infra-rouge aéroportée est une méthode adaptée pour localiser les échanges nappe-rivière de milieux anastomosés et identifier les facteurs de contrôle des exfiltrations phréatiques.

- **Objectifs :**
  - localiser les anomalies thermiques sur l'ensemble du réseau hydrographique de l'île du Rohrschollen ;
  - identifier les facteurs de contrôle de la répartition des anomalies thermiques ;
  - réaliser une comparaison de la répartition des anomalies thermiques entre (1) le nouveau chenal, caractérisé par une activité morphodynamique élevée, du transport grossier et une forte diversité géomorphologique (nombreux bancs et seuils naturels), et (2) l'anastomose du Bauerngrundwasser, caractérisée par une faible activité morphodynamique, un colmatage plus ou moins important et une faible diversité géomorphologique.

- **Chapitre correspondant** : 4

3.3.4 Intérêts scientifiques et opérationnels d'une approche interdisciplinaire pour le suivi et l'évaluation de la restauration fonctionnelle d'anastomose (Axe 4)

- **Hypothèses :** une approche interdisciplinaire permet une réelle évaluation fonctionnelle de la restauration. Le suivi mené dans le cadre du projet de restauration de l'île du Rohrschollen a permis de formuler des recommandations opérationnelles, permettant de maximiser les gains environnementaux (efficacité de la restauration) et leur durabilité.

- **Objectifs :**
  - réaliser des comparaisons diachroniques (pré- et post-restauration) sur la base des résultats interdisciplinaires ;
  - identifier les compartiments les plus sensibles aux changements et souligner les liens fonctionnels entre les différents compartiments ;
  - proposer des modes de gestion pour optimiser le fonctionnement du projet sur le long terme.

- **Chapitre correspondant** : 5

CONCLUSION

La nécessité de restaurer le fonctionnement de l'hydrosystème apparaît clairement au vu de l'importance des impacts (directs ou indirects) subis par le Rhin Supérieur au cours des deux derniers siècles. S'il paraît évident que le retour à l'état d'origine est impossible, il semble indispensable de mettre en œuvre des actions de restauration qui visent des processus. Le projet mené sur l'île du Rohrschollen en est un bon exemple. Il vise à recréer une fonctionnalité alluviale en agissant sur l'hydrologie. L'hydrologie contrôle en grande partie l'ensemble des flux de l'hydrosystème fluvial, et donc son fonctionnement. La création de submersions dynamiques permet (i) de réactiver le transport sédimentaire, (ii) de dynamiser les évolutions morphologiques (latérales et verticales), (iii) de stimuler les échanges nappe-rivière et *in fine* (iv) de réunir l'ensemble des conditions essentielles au retour et au maintien d'une biodiversité alluviale spécifique.

L'approche développée dans ce travail s'intéresse essentiellement à la dynamique hydromorphologique, mais des liens interdisciplinaires, nécessaires à la compréhension globale de la complexité des milieux alluviaux, sont explorés et présentés dans le dernier chapitre. Les trois chapitres qui suivent sont présentés sous forme d'articles scientifiques (soumis ou publiés). Pour faciliter leur lecture, nous rappelons l'axe de recherche, les hypothèses et les objectifs au début de chacun d'eux. Nous présentons également un « tableau des contributions » à la fin de ces derniers (Annexe 1). Son objectif est double : (i) justifier avec le maximum d'objectivité la participation des co-auteurs des articles et (ii) permettre au lecteur d'identifier clairement notre contribution. Cette démarche paraît indispensable au vu de la forte dimension interdisciplinaire de notre étude.

CHAPITRE 2

ÉVOLUTION HYDROMORPHOLOGIQUE DE L'ÎLE DU ROHRSCHOLLEN DEPUIS LE DÉBUT DU XVIIIÈME SIÈCLE

Ce **deuxième chapitre** s'appuie sur un article soumis dans la revue *Hydrology and Earth System Sciences*. L'analyse de documents historiques (cartes, témoignages, chroniques hydrologiques) couplée à l'analyse des archives sédimentaires (granulométrie, géochimie, datation) a permis de reconstruire l'histoire de l'hydrosystème sur près de 3 siècles et d'améliorer la compréhension de son fonctionnement actuel. Cette approche est indispensable au regard de la complexité des milieux alluviaux anastomosés. L'étude a permis d'identifier les principaux facteurs de contrôle ainsi que le temps de réponse en lien avec les perturbations fonctionnelles majeures (aménagements). L'implication pour la définition d'un projet de restauration est double : d'une part, l'étude de la trajectoire temporelle longue de l'hydrosystème permet de mieux définir l'état fonctionnel de pré-perturbation. D'autre part, cette démarche permet d'identifier d'éventuels risques liés aux actions de restauration entreprises, par exemple celui de remobilisation de sédiments fins pouvant être pollués. Ce chapitre s'appuie sur l'axe 1 : **histoire de l'île du Rohrschollen et imbrication de la restauration dans la trajectoire temporelle longue de l'hydrosystème.**

Ce chapitre correspond à l'article : Eschbach, D., Schmitt, L., Imfeld, G., May, J.-H., Payraudeau, S., Preusser, F., Trauerstein, M., Skupinski, G., (Submitted). Long-term river trajectories to enhance restoration efficiency and sustainability on the Upper Rhine: an interdisciplinary study (Rohrschollen Island, France). In *Hydrology and Earth System Sciences*.

Le chapitre s'appuie également sur un article complémentaire présenté en annexe 3 : Preusser, F., May, J.-H., **Eschbach, D.**, Trauerstein, M., Schmitt, L., 2016. Infrared stimulated luminescence dating of 19th century fluvial deposits from the upper Rhine River. In *Geochronometria* 43, 131–142. doi: 10.1515/geochr-2015-0045

Long-term river trajectories to enhance restoration efficiency and sustainability on the Upper Rhine: an interdisciplinary study (Rohrschollen Island, France)

D. Eschbach [1], L. Schmitt [1], G. Imfeld [2], J.-H. May [3,4], S. Payraudeau [2], F. Preusser [3], M. Trauerstein [5], G. Skupinski [1]

[1] Laboratoire Image, Ville, Environnement (LIVE UMR 7362), Université de Strasbourg, CNRS, ENGEES, ZAEU LTER, Strasbourg, France
[2] Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg (LHyGeS UMR 7517), Université de Strasbourg, CNRS, ENGEES, Strasbourg, France
[3] Institute of Earth and Environmental Sciences, University of Freiburg, Freiburg, Germany
[4] Present address: School of Geography, University of Melbourne, Australia
[5] Institute of Geography, University of Bern, Bern, Switzerland

Correspondence to: David Eschbach (david.eschbach@live-cnrs.unistra.fr)

ABSTRACT

While the history of a fluvial hydrosystem can provide essential knowledge on present functioning, historical context remains rarely considered in river restoration. Here we show the relevance of an interdisciplinary study for improving restoration within the framework of a European LIFE+ project on the French side of the Upper-Rhine (Rohrschollen Island). Planimetric evolution combined with historical high flow data enabled to reconstruct pre-disturbance hydromorphological functioning and major changes that occurred on the reach. A deposition frequency assessment combining vertical evolution of the Rhine thalweg, chronology of deposits in the floodplain and a hydrological model revealed that the period of vertical incision in the main channel corresponded to high rates of narrowing and lateral channel filling. The analysis of filling processes by Passega diagram and IRLS dating highlight that periods of engineering works were closely related to fine sediment deposition, which present also concomitant heavy metal accumulation. In fact, current fluvial forms, processes and sediment chemistry around the Rohrschollen Island directly reflect the disturbances that occurred during past correction works, and up to today. Our results underscore the advantage of combining functional restoration with detailed knowledge of past-trajectory to: (i) understand the functioning of the hydrosystem prior anthropogenic disturbances, (ii) characterize the human-driven morphodynamic adjustments during the two last centuries, (iii) characterize physio-chemical sediment properties to trace anthropogenic activities and evaluate the potential impact of the restoration on pollutant remobilization, (iv) deduce post-restoration evolution and (v) evaluate efficiency and sustainability of the restoration effects. We anticipate our approach to expand the toolbox of decision-makers and help orientating functional restoration actions in the future.

1 INTRODUCTION

During the two last centuries, numerous engineering works (e.g. channelization or damming), aimed at flood control, navigation improvement, expansion of agriculture or hydropower production, have altered the functioning of European large rivers (Brookes, 1988; Kondolf and Larson, 1995; Petts *et al.*, 1989), including aquatic and riparian habitats and biodiversity (Amoros and Petts, 1993; Bravard *et al.*, 1986; Dynesius and Nilsson, 1994). In order to balance these impacts by recovering fluvial processes (Bravard *et al.*, 1986; Hering *et al.*, 2015; Naiman *et al.*, 1993, 1988) and ecosystem services (Acuña *et al.*, 2013; Large and Gilvear, 2015; Loomis *et al.*, 2000), an increasing number of restoration projects have been carried out over the last

decades (Kondolf and Micheli, 1995; Wohl *et al.*, 2005). In Europe, this trend has been supported by the Water Framework Directive (IKSR-CIPR-ICBR, 2005; WFD, 2000). Restoration activities progressively target hydromorphological processes and functioning rather than 'static' fluvial forms (Arnaud *et al.*, 2015; Beechie *et al.*, 2010; Jenkinson *et al.*, 2006). Numerous studies have shown that current river functioning results from complex long-term trajectories driven by natural and anthropogenic factors at different spatio-temporal scales (e.g. Bravard and Magny, 2002; Brown, 1997; Gregory and Benito, 2003; Starkel *et al.*, 2006; Ziliani and Surian, 2012). These trajectories provide a relevant basis to infer future trends and management principles (Sear and Arnell, 2006; Bravard, 2003; Fryirs *et al.*, 2012). In order to understand the complete range of functional changes, a comprehensive understanding of human-driven channel adjustments over the last centuries therefore appears crucial in river restoration. Despite significant research efforts over the last two decades, however, integrating pluri-secular temporal trajectories into restoration projects remain an exception (Fryirs *et al.*, 2012; Sear and Arnell, 2006).

In large modified hydrosystems such as the Upper Rhine River, current lateral extent of the floodplain result from past disturbances that occurred during engineering works (Herget *et al.*, 2005, 2007). Hydromorphological dynamics, chemical pollutions and depositional processes were strongly impacted by diking along the main channel and disconnecting of lateral channels since the beginning of the 19th century (Tümmers, 1999). Several studies have focused on the storage and remobilization of heavy metals (Ciszewski and Gryar, 2016; Falkowska *et al.*, 2016; Grygar and Popelka, 2016; Schulz-Zunkel and Krueger, 2009) and/or organic pollutants in major floodplains worldwide (Berger and Schwarzbauer, 2016; Zimmer *et al.*, 2010; Lair *et al.*, 2009). Most studies concerned with the Rhine focused on the industrializes Lower Rhine region including the Rhine-Meuse Delta (de Boer *et al.*, 2010; Evers *et al.*, 1988; Goth *et al.*, 2001; Middelkoop, 2000). In comparison, the Upper Rhine region is two times less contaminated than lower part of the Rhine with respects to total concentrations of both polychlorinated dibenzo(p)dioxins (PCDDs) and polychlorinated dibenzofurans (PCDFs) in sediments and tracers of industrial activities (Evers *et al.*, 1988). However, contamination histories are still not well known and reference studies considering functioning or disturbance histories are missing.

Studying past functioning and disturbance histories as keys to understanding current forms and processes of floodplains can provide insights into current functioning and hydromorphological sensitivity to changes (Kondolf and Larson, 1995; Mika *et al.*, 2010). Historical hydromorphological adjustments should be evaluated on an accurate spatial scale and a high temporal resolution to identify past evolutionary processes and causal relationships (Bogen *et al.*, 1992; Horowitz *et al.*, 1999). Interdisciplinary and retrospective studies, however, rarely combine different data sources to obtain a comprehensive view of functional changes (Bravard and Bethemont, 1989; Gurnell *et al.*, 2003; James *et al.*, 2009; Lawler, 1993; Lespez *et al.*, 2015; Rinaldi *et al.*, 2013; Trimble and Cooke, 1991). Furthermore, historical studies rarely consider sediment dating and pollution (Bogen *et al.*, 1992; Garban *et al.*, 1996; Horowitz *et al.*, 1999; Woitke *et al.*, 2003).

Within the framework of a functional restoration project on the Rohrschollen Island, we embarked for an interdisciplinary and retrospective pluri-secular study to provide a holistic understanding of the functional temporal trajectory of the fluvial hydrosystem, rather than to determine reference states. We hypothesized that long-term temporal trajectories allow to identify driving-factors, amplitude and response time of disturbances, and to assess potential benefits and limits of the restoration. This approach bears potential to accompany actions of functional restoration in order to maximize efficiency and sustainability, and infer future evolutionary trends. To test these hypotheses, this study combines horizontal (planimetric)

and vertical (thalweg evolution, filling chronology) dynamics to: (i) understand the functioning of the hydrosystem prior anthropogenic disturbances, (ii) characterize the human-driven morphodynamic adjustments during the two last centuries including sediment transport and deposition processes as well as geochronology, (iii) characterize physio-chemical sediment properties (e.g. heavy metals and organic contaminant concentrations) to trace anthropogenic activities and evaluate the potential impact of the restoration on pollutant remobilization (Fedorenkova *et al.*, 2013; IKSR-CIPR-ICBR, 2014; Middelkoop, 2000), (iv) deduce post-restoration evolution and (v) evaluate efficiency and sustainability of the restoration effects (Grabowski and Gurnell, 2016; Sear *et al.*, 1994).

2 STUDY AREA

With a total length of 1,250 km and a drainage basin of about 185,000 km², the Rhine is the third largest river of Europe. Located between Basel and Bingen (Fig. 2.1-a), the Upper Rhine Graben is 35-50 km wide and 310 km long. Hydrology in the southern part of this sector is characterized by a nivo-glacial regime and a mean discharge of 1,059 $m^3.s^{-1}$ (1891-2011; Basel gauging station; Uehlinger *et al.*, 2009). Slope decrease and inherited geomorphological factors explain the longitudinal evolution of the channel pattern (Carbiener R., 1983; Schmitt *et al.*, 2016; Fig. 2.1-b). Since the middle of the 19th century, three successive engineering works modified drastically the hydrosystem: (i) the correction stabilized the main channel between two artificial banks and the floodplain between two high flow dikes, (ii) the regularization consisted to build alternative in-channel groyne fields to improve navigation and (iii) the canalization by-passed the corrected main channel southern Strasbourg. Nowadays, the river consists of a single channel which is locally by-passed by artificial canalised sections. Northern Strasbourg, the canalization concreted the Rhine bed itself.

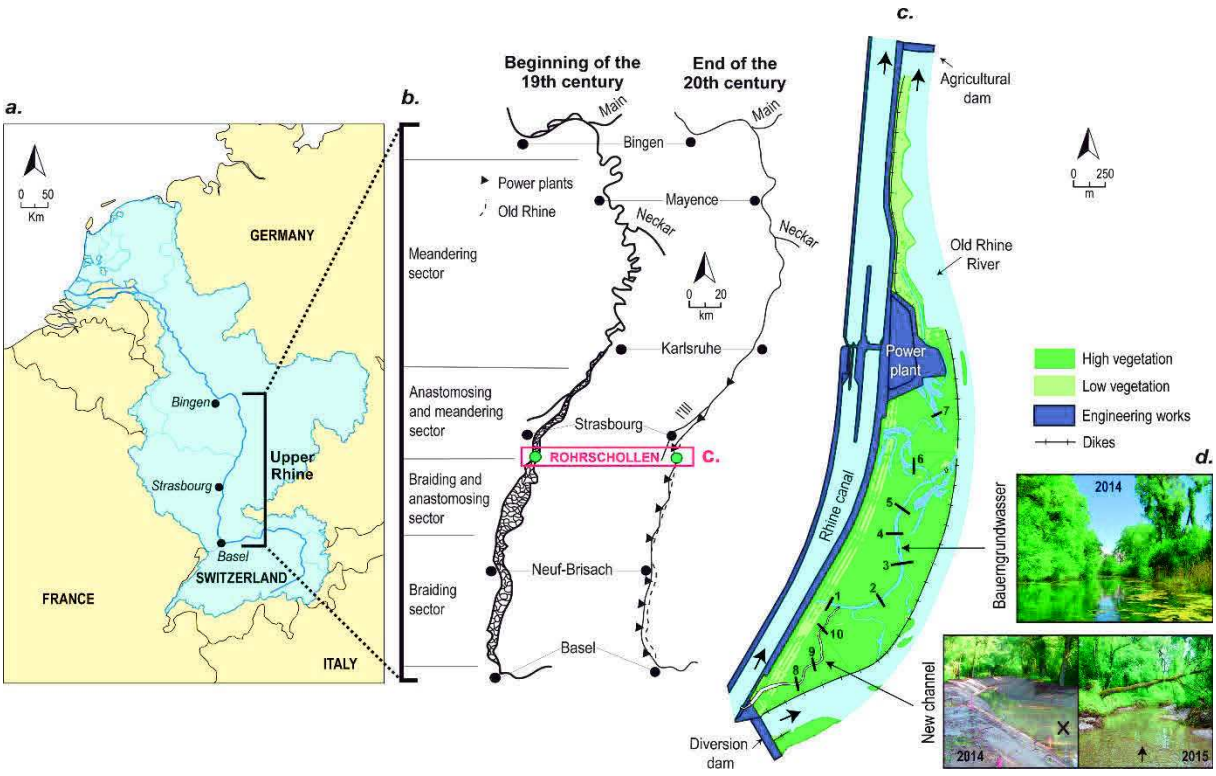


Figure 2. 1 - (a) Location of the Upper Rhine Graben, (b) channel pattern sectorization and evolution from the 18th century to present (Schmitt et al., 2009), (c) location of the study site and map of Rohrschollen Island, (d) pictures of the Bauerngrundwasser and evolution of the new channel.

The Rohrschollen artificial Island is located 8 km South-East of the city of Strasbourg and owes its existence to the construction of a power plant in 1970. The Island is enclosed by the Rhine canal to the west and the Old Rhine River to the east, which corresponds to a by-pass of the corrected Rhine (Fig. 2.1-c). On the southern part, a diversion dam diverts up to 1,550 $m^3.s^{-1}$ for usage by the power plant. When the discharge is less than 1,563 $m^3.s^{-1}$, an instream discharge of 13 $m^3.s^{-1}$ flows to the Old Rhine. On the northern part of the island, an agricultural dam built in 1984 maintains a constant water level in the Old Rhine at 140 m NN (NormalNull) in order to increase groundwater level for agricultural purpose. When floods exceed 2,800 $m^3.s^{-1}$ (2-year instantaneous flood), the agricultural dam is raised for flood retention (IKSR-CIPR-ICBR, 2012), but flooding remains static. The island is crossed by an anastomosing channel (Bauerngrundwasser), which is disconnected from the Rhine canal at its upstream extremity and connects to the Old Rhine further downstream (Fig. 2.1-c & d). Further north an additional minor channel flows towards the Rhine Canal. The water level of the entire length of the Bauerngrundwasser is artificially maintained by the hydraulic backwater of the agricultural dam (Fig. 2.3-c). Classified as a natural reserve since 1997, the island has recently been restored (European LIFE+ project) in order to recover typical alluvial processes and biodiversity, including dynamic floods, bedload transport, active morphodynamics, or hygrophilous tree species. In the southern part of the island a large floodgate was built in 2013 and a new upstream channel of 900 m length was excavated (Fig. 2.1-c & d). The downstream end of this channel is connected to the Bauerngrundwasser channel. Water input from the flood gate ranges between 2 $m^3.s^{-1}$ (when Q Rhine < 1550 $m^3.s^{-1}$) and 80 $m^3.s^{-1}$ (when Q Rhine > 1550 $m^3.s^{-1}$). Our study addresses embedded spatial scales: (i) the entire study site, which corresponds to the fluvial hydrosystem area around the natural reserve (about 1-3 km beyond the perimeter of the later), (ii) the Rohrschollen Island which corresponds to the natural reserve area, (iii) seven transects on the Bauerngrundwasser used to characterize sediment transport and depositional processes, and (iv) two sediment pits excavated near the new and the old channels (Fig. 2.4-a, 2010) in order to date sediment deposition and assess sediment pollution.

3 MATERIAL AND METHODS

In this study, we have adopted an interdisciplinary approach that combines hydrological retrospective modelling with limnimetric, topographic (levelling and DEM) and hydrogeologic data as well as data on sediment filling processes, depositional chronology and geochemical characteristics (Fig. 2.2).

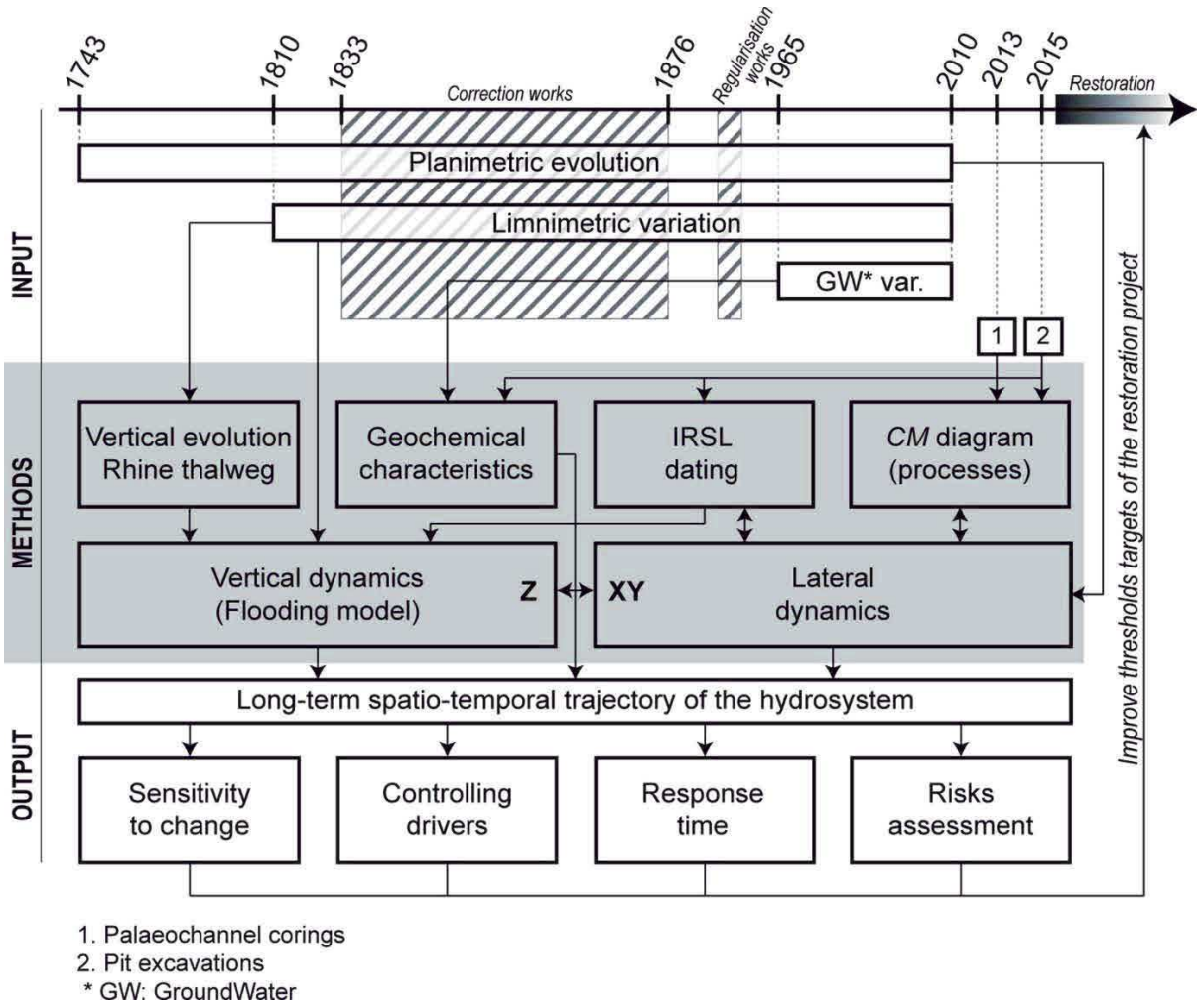


Figure 2. 2 - Methodological approach to analyse long-term spatio-temporal trajectory of the hydrosystem by combining historical multi-source data with in situ morpho-sedimentary prospections and geochemical investigations.

3.1 Planimetric analysis

The historical planimetric analysis covers a period of about 260 years (from 1743 to 2010) and was carried out in ArcMap (ESRI v.10.3) using six historical maps and two sets of aerial photographs. The map from 1828 compiled during the demarcation of the Franco-German border was georeferenced on the IGN BD ortho 2007 base map and used as a base layer for georeferencing of the 1743, 1778, 1838, 1872 and 1926 maps. Aerial photographs were georeferenced using the 2007 orthophotograph as a base layer. Fixed position objects such as churches, road crossings or bank protection structures were used as control points. Between nine and twelve control points were selected for each historical map, and between five and seven for the aerial photographs. Total root mean square error (RMSE) ranged from 0.94 to 25 m and increased with the distortion and the imprecision of the oldest maps, especially the 1743 and 1778 maps (Fig. 2.4-c). However, the RMSE distortion is satisfactory considering the inherent relative imprecision of these maps and the difficulty to determine anchor points

between old maps and 2007 orthophotography. Aerial photographs were selected at low flow water level to enable comparison between morpho-ecological surfaces and active channel and gravel bar surfaces which are particularly sensitive to discharge variations (Rollet *et al.*, 2014). Morpho-ecological units were then manually digitized at the detailed scale of 1:1000 to 1:2000 based on 8 maps. According to the typology developed by Dufour (2005), four classes and fourteen subclasses were determined. Surface areas of each class and time slice were calculated to quantify the planimetric evolution. The results of the surface analyses were converted to a percentage ratio to facilitate regional interpretation of the morpho-ecological evolution. Two scales were considered: the study area of the Rohrschollen Island with a total surface of 2,181 ha and the area of the natural reserve with a total surface area of 314 ha.

3.2 Analysis of vertical data

3.2.1 Limnimetric and piezometric analysis

The vertical evolution of the Rhine thalweg was studied based on historical limnimetric data and bibliographic references (Bensing, 1966; Bull, 1885; CECR, 1978). Limnimetric data were compiled for low water discharge (~ 540 $m^3.s^{-1}$) at the Marlen gauging station (Kilometre Point 295; Felkel, 1969; Jeanpierre, 1968). The piezometric analysis was achieved using a German database (LUBW: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg) and the French regional groundwater database (APRONA, Association pour la PROtection de la Nappe phréatique de la plaine d'Alsace), by selecting datasets close to the Rohrschollen reach.

3.2.2 Palaeochannel corings

Seven coring transects were distributed along the Bauerngrundwasser to cover the different morphological characteristics of the study area (e.g. Fig. 2.3). Six sediment cores per transect were hand-augered on both channel banks to measure the thickness of the post-correction deposits. From the 42 cores, a total of 81 sediment samples were taken at different depth of the filling layer. Two additional samples were extracted from the channel bottom at transects two and four with a piston sampler.

3.2.3 Pit excavations

In addition to the transect-based prospection, two pits were excavated up to the gravel bottom, on the right bank of the two channels. Locations of the pits were determined by (i) identifying main filling sectors revealed by old maps and corings survey, and (ii) the proximity to the potential future erodible banks (concave banks; Fig. 2.3-a). Stratigraphical Units (SU) were defined in the field on the basis of colour and textural differences. Two large topographical cross-sections (600 m for the pit 1 and 800 m for the pit 2) intersecting both pits were extracted from the DEM to interpret the dynamics of fine sediment deposition in relation to the initial elevation of each pit, the thickness of the stratigraphical units and the flooding regime (Fig. 2.3-b).

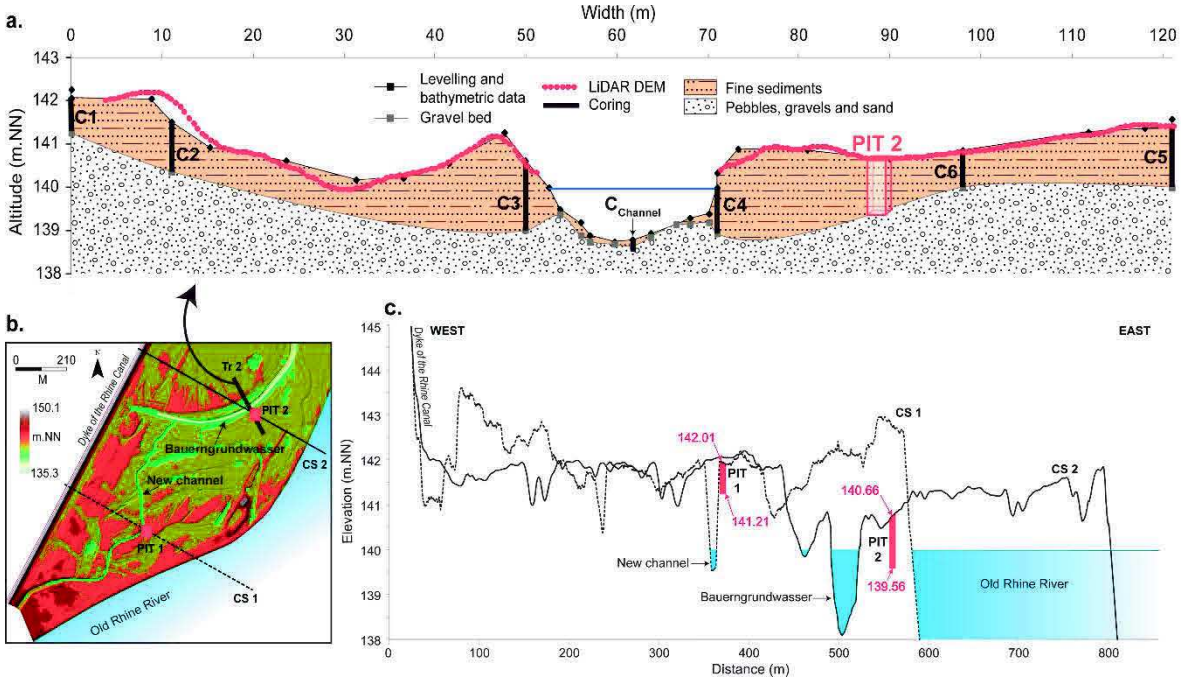


Figure 2. 3 - (a) Example of a transect (Tr 2) based on levelling and bathymetric data. Levelling data are compared to LIDAR DEM data. Location of corings and Pit 2 is also given, (b) location of Tr 2, the two excavation pits (red squares) and topographical profiles crossing the two pits, (c) overlaying of the two topographical profiles.

3.3 Characteristics of the sediments

3.3.1 Grain size analysis

Depending on width and thickness of the filling, 31 samples from three coring transects distributed along the entire length of the Bauerngrundwasser (2, 4 & 5 in figure 2.1) and two samples from the channel bottom (2 & 4 in figure 2.1) were selected for grain size analysis. In addition, one sample per SU were taken from each excavated pit (Fig. 2.7). Munsell colour and qualitative SU description were completed in the field. Cumulative grain size distribution and a sorting index were obtained from measurements with a Beckman Coulter laser diffraction particle size analyser. Then, the soil organic carbon ratio was determined by the loss on ignition method (375°C during 16 hours). To further characterize transport and depositional processes, we used the CM diagram method (Bravard and Peiry, 1999; Passega, 1964, 1977).

3.3.2 Geochemical and organic pollutants analyses

The 10 samples from the two pits (Fig. 2.7) were air-dried at 20 °C and sieved (<2 mm). Dried sediments were pulverized (<63 µm) using an agate disk mill prior to alkaline fusion and total dissolution by acids. Measurement of elemental concentrations was done as described previously (Duplay *et al.*, 2014) by inductively coupled plasma atomic emission spectrometer and mass spectrometer analysis (ICP-AES and ICP-MS) using the geological standards BCR-2 (US Geological Survey, Reston, VA, USA) and SCL-7003 (Analytika, Prague, Czech Republic) for quality control. An enrichment factor (EF) was used to compare changes of Zn, Cr, Ni, Cu, Pb and Cd concentrations in the pit 1 and pit 2 profiles with the reference soil collected in the deepest SU of the considered pit:

$$EF_{HM} = \frac{\left(\frac{HM_{sample}}{Ti_{sample}}\right)}{\left(\frac{HM_{reference}}{Ti_{reference}}\right)} \quad (1)$$

where HM and Ti are, respectively, the concentrations of the considered heavy metal and Ti (mg kg-1 d.w.) in the SU sample of the pit and the reference soil. Concentrations of heavy metals were normalized relative to titan (Ti) as a conservative element to limit EF variations due to local heterogeneities as it displays a low relative standard deviation (<0.03) over both pits (Reimann and de Caritat, 2005).

Based on previous studies dedicated to the contamination of the Rhine sediments (Fedorenkova *et al.*, 2013; van Helvoort *et al.*, 2007), 38 legacy and modern organic pollutants (including 30 pesticides, the hexachlorobenzene and 7 polychlorinated biphenyls) were analysed by liquid chromatography and gas chromatography mass spectrometry (LC-MS and GC-MS) with quantification limits ranging from 0.015 and 0.05 µg.g-1 (see Annexe 2, Tab. S1).

3.3.3 Depositional chronology

Dating of sediments sampled from both pits was carried out using Infrared Stimulated Luminescence (IRSL). The detailed procedures and methodological aspects are discussed in Preusser *et al.* (2016; Annexe 3). In summary, IRSL (stimulated at 50°C) of sand-sized feldspar grains was measured applying both small aliquot (ca. 100 grains) and single-grain techniques. When applying the Minimum Age Model (MAM) on single-grain data sets, the estimated ages coincides with the expected age of the sediment. At the same time, MAM ages calculated for the small aliquot data sets overestimate the known age by up to 200 years (>100 %). This is explained by partial resetting of the IRSL signal prior to deposition and masking effects when measuring several grains at the same time. Presented here are the results previously published by Preusser *et al.* (2016; Annexe 3) from pit 1 together with additional samples taken from pit 2 (Annexe 2, Tab. S1). For the new data, we again observed significant older ages when measuring several grains at the same time for most of the samples. Only for sample IDEX2-107, multiple and single-grain approaches gave the same result. However, for this sample too small grains (100-150 µm) were measured using Risø single-grain discs. This results in accumulating a few (ca. 5) grains being measured at the same time and likely similar averaging effects as observed for larger aliquots. Hence, we consider these ages as maximum estimates.

3.3.4 Flooding frequency assessment

To determine the depositional chronology of the two pits and reconstruct flooding frequency over time, we developed a simple flooding model based on (i) the results of the vertical evolution of the corrected Rhine thalweg close to the Rohrschollen Island, (ii) the thickness of fine sediments at both pits, and (iii) IRSL dating. Elevation of the pits at each time slice was determined by the gradual sediment accumulation and the corresponding elevation increase between the two adjacent IRSL dates. Active channel width in vicinity to the pits was measured from the 1828, 1838 and 1872 maps. Flooding water depth was determined by subtracting the elevation of the pits from the thalweg elevation for each time slice (Fig. 2.5-c). For the three dates corresponding to the 1828, 1838 and 1872 maps, we determined the maximum discharge using the hydrogram (Q.max) at Basel and the limnimetric data at the Kehl bridge which is located about 7 km downstream the study area. We calculated for these dates and the corresponding bankfull discharges the sections (S), the mean water slopes (I), the hydraulic radius (Rh) and the roughness (k) close to the pits. This allowed to estimate flood discharges (Q.flooding) for both pits during the entire period from 1828 to 1970 (end of the canalization) using the Manning-Strickler equation (Eq. 2):

$$Q.flooding\ pitx\ at\ daten = S.daten \times I1/2.daten \times Rh2/3.daten \times k \quad (2)$$

Finally, we compared these results with the limnimetric variations (historical hydrogram) to determine the frequency and the intensity of historical floods in each pit (Fig. S2 - Annexe 2; Fig. 2.5-c).

4 RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Hydromorphological dynamics before the beginning of the correction works (up to ca. 1833)

Analysis of the three earliest historical maps (Fig. 2.4-a, 1743, 1778 and 1828) at the scale of the entire study site documents the natural morphodynamics along the Upper Rhine before the beginning of the correction works. At that time, the Rhine was a wide and braiding channel system (width ranging from 500 m to 1,500 m) characterized by numerous in-channel gravel bars, which is consistent with the descriptions from Herget *et al.* (2005) and Schäfer (1973). Multiple anastomosing channels also existed along the floodplain (Carbiener, 1983), at a maximum distance of about 5 km from the thalweg. The period 1743-1828 is characterized by marked changes and strong channel shifting of about 1 to 2 km. Across the entire study area, gravel bar surface areas increased (+100 ha; +128%) while vegetated areas changed only slightly (low vegetation: -45 ha; -18.4%; high vegetation: +124 ha; +11%; Fig. 2.4-b). In 1828, more than 70 % of the present natural reserve area was occupied by the active channel (running water and gravel bars). The high morphodynamic activity may be caused by the high frequency of flood events (four 10-years floods from 1810 to 1828) characterizing the beginning of the 19th century (Fig. 2.5-c). These dynamics could be an effect of the Little Ice Age (Martin *et al.*, 2015; Schmitt *et al.*, 2016), which may have had a considerable impact on discharge, bedload transport and flood regime intensifying lateral dynamics (Rumsby and Macklin, 1996; Schirmer, 1988). A similar phenomenon has been observed previously, for example, by Bonnefont and Carcaud (1997) on the River Moselle, or by Bravard (2003) for the Rhône Basin. However, this hypothesis has not been validated for the Rhine yet and awaits further testing (Schmitt *et al.*, 2016; Wetter *et al.*, 2011).

In the scale of the natural reserve, the reach was located on the left bank of the Rhine in 1743. It was almost completely occupied by the thalweg from 1778 to 1828 as it shifted towards the western direction. According to the location of pit 1 (Fig. 2.4-a, median bar on 1828 map) and the depositional history deduced from historical maps, the resetting of the IRSL signal in basal sediments of pit 1 resulted from this major lateral migration (Preusser *et al.*, 2016; Annexe 3). In accordance with the IRSL dates, deposition of fine grained sediments in the lower part of pit 1 took place between 1778 and 1806 (Fig. 2.5-a) after the Rhine thalweg had moved over the area. The maximum age of the investigated sediments in pit 1 is therefore 238-210 years (i.e. 1777-1805; Preusser *et al.*, 2016; Annexe 3). The 1828 map in figure 2.4-a shows that pit 2 is located in the 1828 main channel and accumulation of fine sediments must have commenced after this time. Despite local diking on the floodplain and across some lateral channels as revealed by the planimetric analyses, it seems that fluvial morphodynamics and lateral channel shifts before 1828 were not influenced by anthropogenic disturbances.

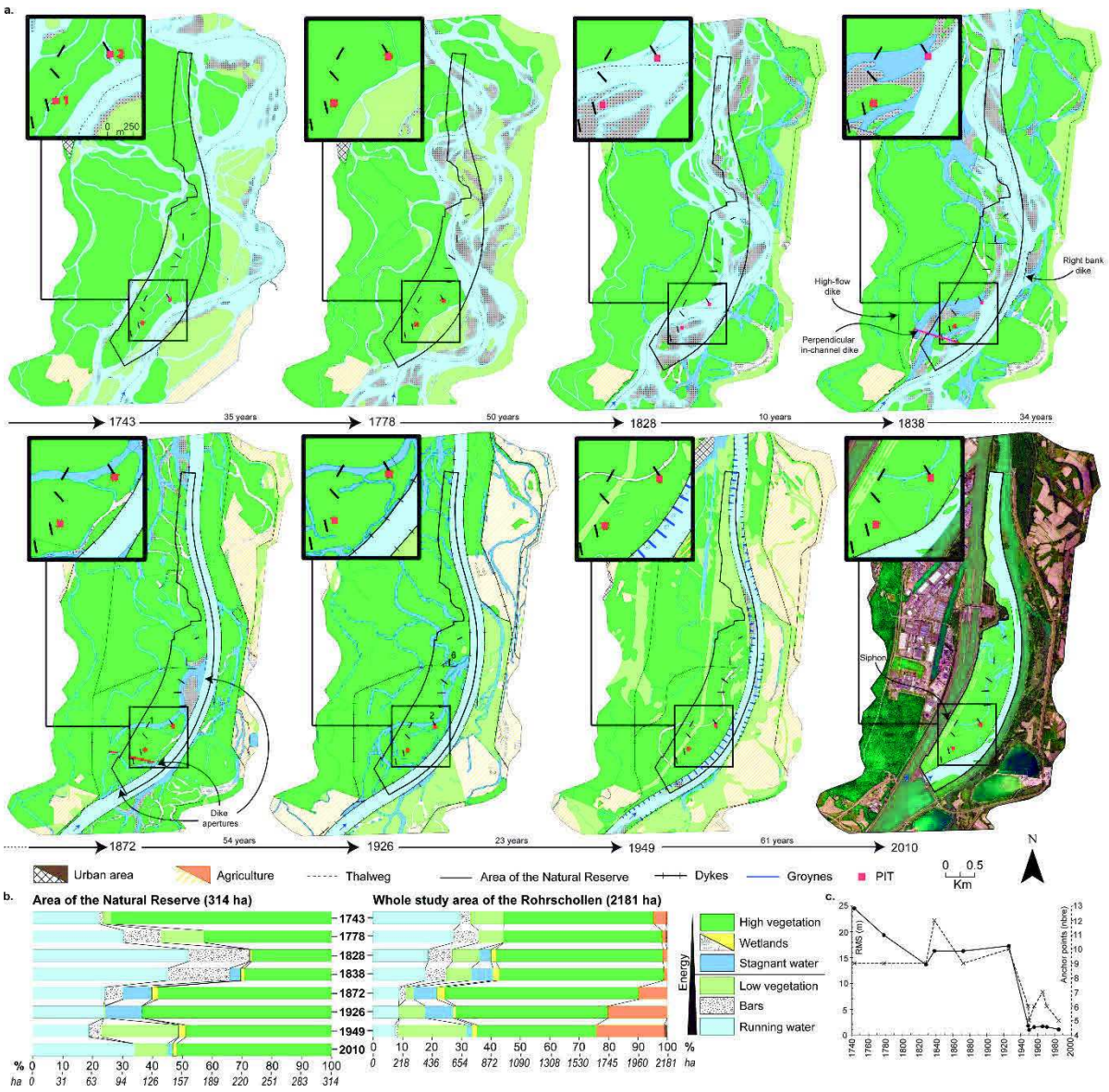


Figure 2. 4 - (a) diachronic evolution of the whole study area. The black-boxes are zooms of (scale 1:2) in the surroundings of the two pits. (b) Surface evolutions of the morpho-ecological units in the natural reserve (1743-2010) and in the whole study area (1743-1949). (c) Number of anchor points used to georeferenced old maps (1743/1778/1828/1838/1872/1926) and aerial photographs (1949/1956/1966/1971/1985) and values of RMSE errors.

4.2 Hydromorphological disturbances during the correction works (1833-1876)

4.2.1 Main channel adjustments

The correction works commenced between 1828 and 1838 (around 1833) and induced major changes of the hydrosystem (Herget *et al.*, 2005). A detailed map based comparison of the 1828 and 1838 maps shows that the left bank was eroded in the southern part of the study area (maximum of about 50 m) after 1828 and before (possibly during?) the building of the perpendicular in-channel dike (Fig. 2.4-a, 1838). This is in agreement with the current position of the upstream part of the Bauerngrundwasser (Fig. 2.9, period A). Subsequently, the Rhine thalweg was artificially shifted in a western direction by the right bank dike, and then to the east by the perpendicular in-channel dike and the high-flow dike. A large flood ($Q \sim 3800\ m^3.s^{-1}$; 10-years floods; Fig. 2.5-c) occurred in 1831, which was thoroughly documented due to the important damages it caused (Champion, 1863 - Testimony of M. Coumes). We hypothesize that this event intensified the morphological adjustments during this period. In 10 years (1828-1838) the surface of running water decreased of 20 ha (-5%) in the entire study area while the surface area of stagnant water increased correspondingly (+75 ha or +85 %).

During the 1838-1872, about 40 years after the beginning of the correction works, the new corrected Rhine channel began to incise (1 cm / year on average; Fig. 2.5-a) in response to channel narrowing (250 m wide), slope increase and bank stabilization (Fig. 2.4-c, 1872). In addition, areas of gravel bars, flowing water and low vegetation surfaces decreased (-110 ha or -70 %; -194 ha or -50 %; -121 ha or -67 %, respectively), while areas of high vegetation and agricultural surfaces increased (+218 ha or +18 %; +183 ha or +700 %, respectively; Fig. 2.4-b). This is interpreted as the consequence of sediment deposition in the disconnected parts of the main channel, inducing channel narrowing, and forest and agriculture expansion, as intended by the correction works (Bernhardt, 2000). These types of morphodynamic disturbances driven by channel correction were also observed by David *et al.* (2016) on the Garonne River, Magdaleno *et al.* (2012) on the Ebro River and Habersack *et al.* (2013) on the Danube River.

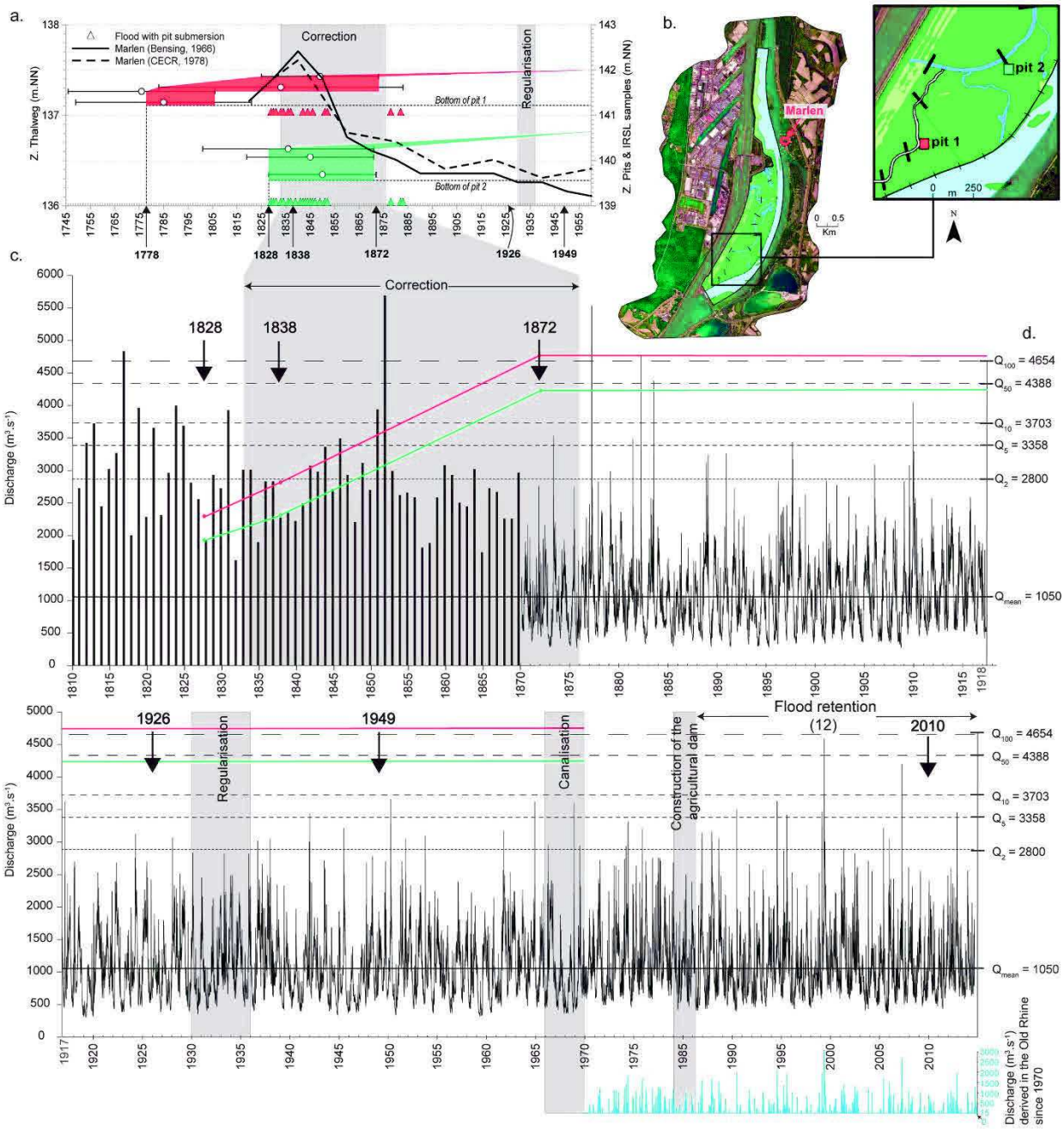


Figure 2. 5 - (a) Vertical evolution of the Rhine thalweg from 1815 to 1960 based on low water levels (Q ~ 540 m³.s⁻¹) recorded at the Marlen gauging station (Bull, 1885; Bensing, 1966; CECR, 1978). Vertical evolution of the pits linked to the age-depth model and number of floods which attained each pits (triangle), (b) location of the two pits and of the ancient gauging station of Marlen, (c) discharge of the Rhine at the gauging station of Basel. The period 1810-1870 corresponds to maximum instantaneous annual flows. The period 1870-2015 corresponds to the highest mean daily flow (OFEV: Office Fédéral de l'EnVironnement). The dates with arrows corresponds to old maps or aerial photographs (see figure 2.4). The red and green lines correspond to the submersion discharges for the pits 1 and 2 respectively, (d) flood return periods at Basel between 1870-2015 (m³.s⁻¹; Adjustment of Pearson III, OFEV).

4.2.2 Lateral channel adjustments and filling processes

At the scale of the natural reserve, from 1828 to 1838, surface areas of running water decreased (-21 ha; -13 %), while stagnant water and high vegetation areas increased. In particular, vegetation populated median bars (Fig. 2.4-a). This general trend became even more marked during the 1838-1872 period (Fig. 2.4-b), running water and gravel bar areas declined (-65 ha or -47%; -45 ha or -71 %, respectively), and high vegetation and stagnant water areas increased (+90 ha or +101 %; +19 ha or +166 %, respectively). This supports the idea that the sequential impacts induced by the correction works along the floodplain (i.e. channel narrowing, expansion of vegetation) were especially dynamic in the upstream part of the Bauerngrundwasser. The channel filling dynamics are detailed in a CM diagram (Fig. 2.6-a) which shows that graded suspension deposition (QR segment) of sandy loam occurred at the transect 2. In addition, figure 2.6-a shows a general and concomitant decrease in grain size and sediment sorting from the bottom to the surface, which reveals a decline in flood energy likely induced by channel diversion following the correction. Furthermore, residual T2 samples are located on RS segment (uniform suspension). They correspond to fine sediments (silt) with sorting and depth are not correlated. These have been deposited on the left bank of the Bauerngrundwasser in low turbulence conditions likely due to site-specific factors such as topography or vegetation, whose general importance has been underlined by Toonen *et al.* (2015), Bravard *et al.* (2014) and Riquier *et al.* (2015). Such kind of depositional filling processes in newly bypassed channels have also been documented by Bravard and Peiry (1999) and Passega (1964, 1977).

The analysis of the evolution of the middle part of the natural reserve from 1838 to 1872, revealed that a large gravel bar was deposited behind the left dike of the corrected Rhine channel (Fig. 2.4-a). This clearly resulted from an extreme hydrological event, which occurred during the Rhine diking and probably corresponds to the 1852 flood (above 300-years flood; Fig 2.5-c and Fig. 2.9, period B). This flood event, referred as the "flood of the century" (6.63 m at the Basel gauging station, i.e., 5.78 m higher than the mean low flow water level), has been documented in detail, especially by Pardé (1928), Champion (1863), Eisenmenger (1907), Wittmann (1859). After this flood event, embankment of the Rhine continued but local dike apertures remained open in order to feed some old channels and to enhance filling dynamics (Fig. 2.4-a, 1872). In addition, the downstream part of the Bauerngrundwasser (middle part of the natural reserve) presented an important connection to the Rhine, until its probable disconnection in 1876 (Casper, 1959; Fischbach, 1878). This specific hydrological condition impacted the depositional filling processes, as shown by the processes observed at the downstream part of the Bauerngrundwasser which are mainly characterized by graded suspension (Fig. 2.6-a; T4 and T5 transects). Indeed, CM diagram shows that energy is higher at T5 than at T4 although T4 is located upstream. Furthermore, the complexity is reinforced by the absence of upward fining in grain size at the surface as shown in the upstream part of the Bauerngrundwasser (Fig. 2.6-b). Similar to the T2 samples, the position of the other T4 samples in the CM pattern corresponds to the mean level of turbulence in the uniform suspension (RS segment) and are located on the left bank (Fig. 2.6-a). These T4 samples depend on the great distance from the main channel, as previously observed (Bravard and Peiry, 1999). Generally, the disconnection of the Bauerngrundwasser with the Rhine was reinforced by the total closure of the dike apertures after 1876 (Fig. 2.4a; 1872, 1926).

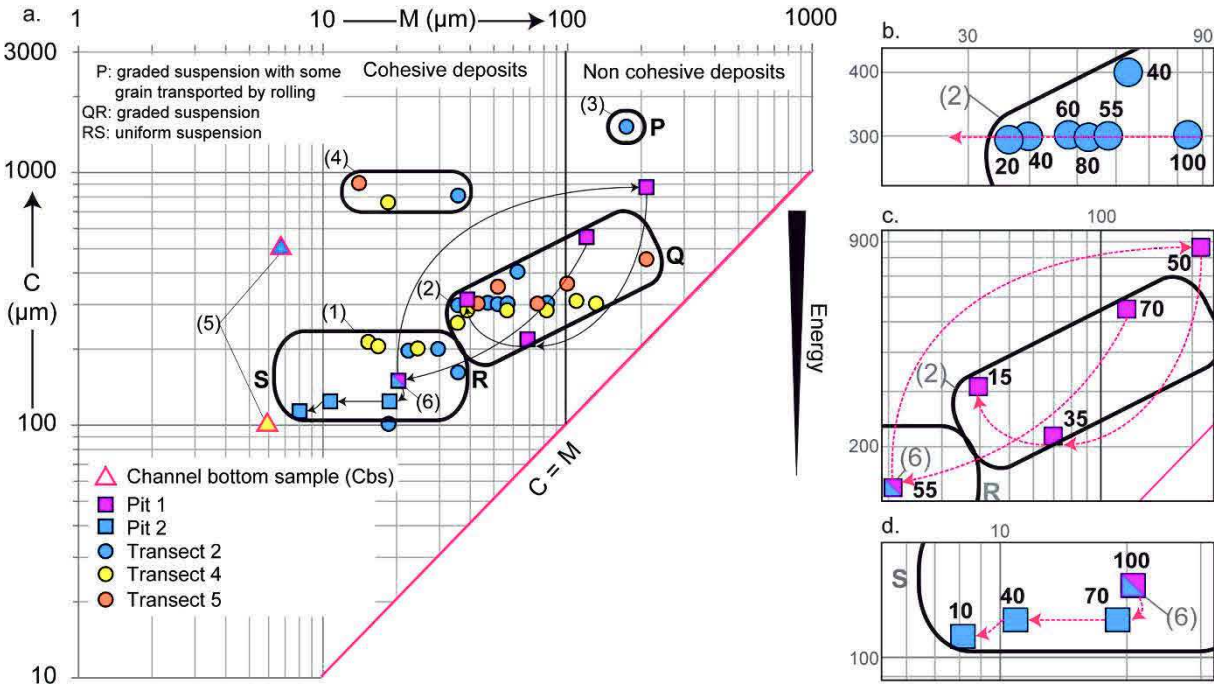


Figure 2. 6 - a. Floodplain CM diagram and patterns according to Passega (1964, 1977). Numbers between brackets help for the presentation of the results and the discussion; b. isolated samples with the indication of the samples depth for transect 2, pit 1 (c.) and pit 2 (d.). Red arrows show the deposition chronology.

On figure 2.6-a, square tag 6 corresponds of two overlapped samples from the pit 1 – SU 3 and pit 2 – SU 2 (Fig. 2.7). These samples are composed by the same grain-size characteristics. Square tag 6 is reported on Fig. 2.6-c & d. Planimetric results combined with CM diagram and IRSL ages show that cohesive sediments which compose the two overlapped samples were deposited during the same flood, probably the 1831 flood. Pit 1 is located on a former large gravel bar in 1828 (Fig. 2.4-b, 1828). According to our chronology, pit 1 - SU 2 was already deposited at this time (Preusser *et al.*, 2016; Annexe 3). This SU is composed of silt deposited during low energy conditions (tag 6; Fig. 2.6-c). It means that pit 1 likely consists of two depositional filling periods: the first started before 1828 (probably in 1778 for SU 2, 3 & 4; Fig. 2.7) while the second started with the beginning of the correction works (for SU 5 & 6, Fig. 2.7; Preusser *et al.*, 2016; Annexe 3). Conversely, pit 2 is located on the 1828 main channel (Fig. 2.4-b, 1828), which became an overbank area or low energy depositional environments in close vicinity of the main channel in 1838 (Fig. 2.4-a, 1838). Thus, if any deposits of fine sediments existed in 1828, the filling period in pit 2 have begun after 1828, as also shown by the IRSL ages (min. : 1828; Fig. 5-a), and was relatively regular. The end of the depositional filling periods at both pits occurred around 1872 as shown by the IRSL ages and is reflected in a grain size refinement and sorting decrease (Fig. 2.5-a). It coincides with a clear increase in vegetation areas shown by the 1872 map (Fig. 2.4-a, 1872). Depositional filling differences (periods and processes) between the two pits are mainly controlled by the elevation and the location of the pits in the floodplain (Fig. 2.3-c), which in turn determine the frequency of flooding (Fig. 2.5-a & c) and mean sedimentation rates (from 0.9 cm / year in pit 1 and 6 cm / year in pit 2; Fig. 2.5-a and Fig. 2.7). This may also explain the heterogeneity of depositional filling processes at pit 1 (Fig. 2.6-c) in contrast to pit 2 where grain size generally decreases with increasing elevation; Fig. 2.6-d). This phenomenon has been observed for disconnected lateral channels by several studies (e.g. Bravard *et al.*,1986; Hooke, 1995; Riquier *et al.*, 2015).

4.2.3 Geochemistry of the sediment filling

Geochronological data combined with geochemical data confirmed changes in the hydrosystem and sediment deposition dynamics of the Rohrschollen from the beginning of the correction works. Quartz (SiO2) was the dominant mineral (range 54 % to 63 %; Fig. 2.7), and does not show any particular trend down the profile in pit 1 and pit 2. MnO, TiO2 and P2O5 were least abundant in both pits. This shows that the patterns of mineral composition are not directly related to grain size and likely reflect a common sediment source to both pits (Grygar *et al.*, 2016). However, lower ratios of Al/Si, especially in the lower sediment layers of SU 2 and 3 in both pits 1 and 2, reflect a general low clay content with dominant sandy (pit 1) or silty (pit 2) sediment textures. This suggests relatively weak soil development and chemical weathering. The uppermost sediment layers of pit 1 and pit 2 differed in organic carbon (C) (16.4 and 27.0 g.kg-1, respectively) while organic matter content and organic carbon gradually decrease with depth in both pits. This suggests different temporal trajectories of deposition of organic-rich sediments on the two sites, i.e. the gravel bar (pit 1) and the Bauerngrundwasser until 1838 (pit 2).

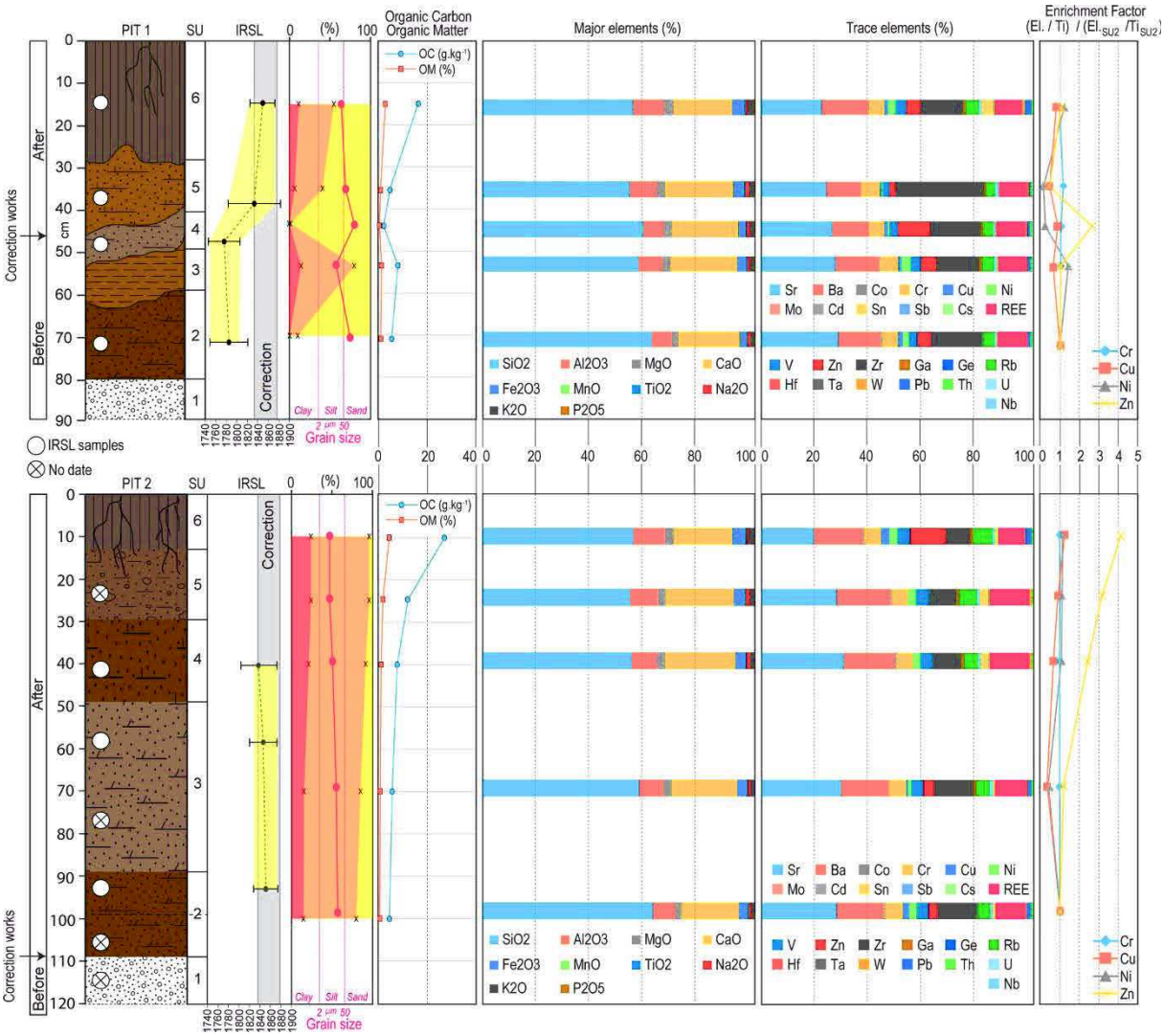


Figure 2. 7 - Stratigraphical log of the two pits including datings, organic contents, sedimentological and geochemical results.

Regarding pollution histories, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), polychlorinated biphenyls (PCB), hexachlorocyclohexanes (HCH) and pesticides (Annex 2, Tab. S1) could not be detected in both pits. This is in agreement with the proposed chronology of pits filling because the first massive use of modern organic pollutants in the whole Rhine catchment gradually increased in the Rhine after 1940, followed by a strong reduction of these pollutants due to the Rhine Action Plan since 1970 (Evers *et al.*, 1988; Goth *et al.*, 2001; Middlekoop, 2000). Similarly, the normalized REE patterns did not show any significant changes with depth in both pits (Fig. S3 - Annexe 2). Massive use of REE started after 2000 (Klaver *et al.*, 2014), when sedimentation rates were low on the Rohrschollen compared to the period during and immediately after the correction works (Fig. 2.5).

To evaluate the potential metal pollution resulting from anthropogenic activities, the relative enrichment in minor element concentrations in the sediments was evaluated in the pits accounting for the geochemical background. Depth-distribution of minor elements in both pits followed a Sr>Ba>Zr>Cr>REE>Zn pattern. Heavy metal concentrations in pit 1 and pit 2 ranged from 31 to 196 mg.kg-1 for Zn, 64 to 91 mg.kg-1 for Cr, 10 to 46 mg.kg-1 for Cu, 6 to 42 mg.kg-1 for Ni, 12 to 35 mg.kg-1 for Pb, and 0.23 to 1.24 mg.kg-1for Cd. Cu, Ni, and Cr enrichment factors in pit 1 and pit 2 remained within the natural background (i.e., normalized concentration profiles showed no enrichment in both profiles). This suggests low industrial use of these heavy metals upstream the study site in the 19th century, which is in agreement with previous results (Goth *et al.*, 2001; Middlekoop, 2000).

In contrast, Zn enrichment factors decrease with depth in pit 2 (from about 4 to 1), which probably reflects anthropogenic inputs of Zn in the SU 4 to 6 (up to 196 mg.kg-1 in SU 6). This is in agreement with previous observations (Ciszewski and Gryar, 2016) insofar metal pollution is expected to be greater at a shorter distance from the main channel thalweg (as for pit 2 until 1838) or from a secondary channel that are hydrologically connected (as for the Bauerngrundwasser after 1838 for pit 2), compared to a site that is further and less frequently flooded (as for pit 1 after 1828). From about 1860 to the early 1930s, heavy metal concentrations in the Rhine gradually increased in relation to the progressive industrialization (Middlekoop, 2000). Heavy metal enrichment, which is particularly marked for Zn, is therefore likely caused by changes in both heavy metal pollution of the Rhine over the past centuries and sedimentation rates. Although the main depositional filling at pit 2 ended around 1872, it was still flooded at least four times after this date (1876, 1881, 1882 and probably 1910), whereas pit 1 was more rarely and intensively flooded (1876 and probably 1881; Fig 2.5-c). Moreover, flow patterns during flooding from 1872 onwards likely controlled sedimentation rates of heavy metal-bound to suspended solids. Overall, results suggest that Zn may be a proxy of anthropogenic deposition histories in the Rhine floodplain, as previously shown in large fluvial systems (Grygar and Popelka, 2016, Lintern *et al.*, 2016).

In addition, water table fluctuation and regular water saturation by flooding may have changed Zn speciation and mobilization in the SU 1-3 of pit 2, whereas pit 1 remained non-saturated (Fig. 2.8). In the period between floods, under non-saturated conditions and in the presence of oxygen, oxidation of metal-sulfur, organic carbon and Fe–Mn oxyhydroxide in the upper SU may release heavy metals. High flood frequency possibly increased vertical transport of suspended solids and chemical re-distribution in pit 2, which smoothed changes of Zn concentrations with depth (Middelkoop, 1997). During flood events, heavy metals can thus not only move between the SU but also be partly transported into the river water in association with suspended solids, by local surface erosion (Tao *et al.*, 2005). This emphasizes that, in a restoration context, Zn may be mobilized and transported into the Rhine by groundwater table elevation (Ciszewski and Gryar, 2016) linked to flooding frequency increase as well as by bank erosion.

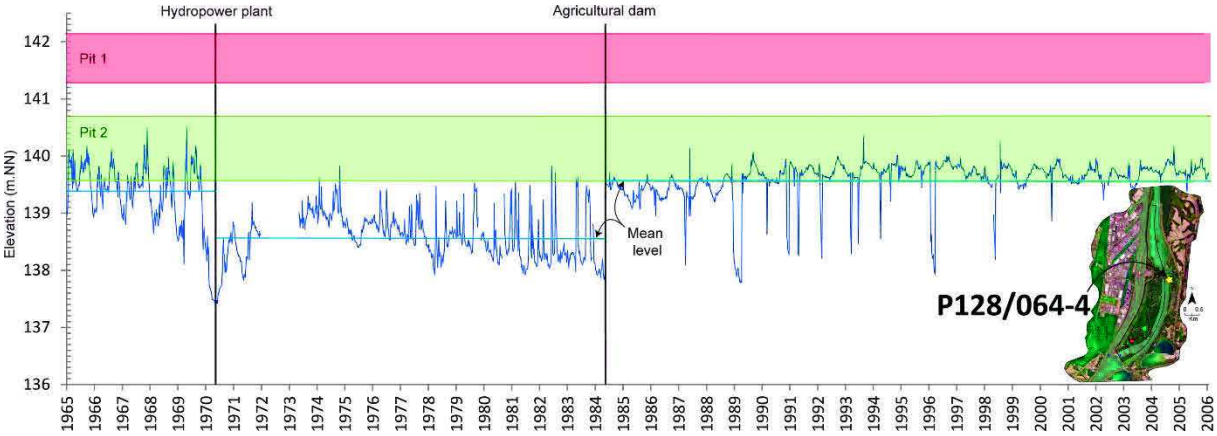


Figure 2. 8 - Hydrogeological variation between 1965 and 2006. After 1984, the lowest peaks correspond to periods during which the Old Rhine is empty.

4.3 Adjustments since the end of the correction works (after 1876)

Results of the CM pattern (Fig. 2.6-a) shows one sample in group 3 and three samples in group 4 that correspond to the left bank of the Bauerngrundwasser (surface layer). This last depositional filling period is linked to several large floods (1876, 1882; > 300 and 100 years return periods, respectively; Fig. 2.5-c) of high transport energy leading to suspension (Fig. 2.6-a, group 4) and rolling processes (Fig. 2.6-a, group 3-P). The 1876 flood, which was the major hydrological event during this period, fed the Bauerngrundwasser from upstream. The flood induced relative high flow conditions with increased sediment transport capacities, which caused grain size decrease along the channel. This process was particularly pronounced in the coarser P sample, which was deposited on the left-bank of the channel close to T2 (Fig. 2.4-a, 1926). As identified on the 1926 map, the flood probably opened a dike near the upstream part of the Bauerngrundwasser (Fig. 2.4-a), which increased flow through the channel. During the same period (1872-1926), last major planimetric and geomorphic changes occurred downstream the Bauerngrundwasser close to the transect 6 (Fischbach, 1878 - Testimony of M. Schanté). In this area, the 1876 flood breached the downstream part of the high-flow dike (Fig. 2.4-a, 1872, 1926), and widened and accentuated channel bends (Fig. 2.9, period C). The present morphology of the Bauerngrundwasser results from this event. After this flood, all dike apertures were closed, thereby reinforcing the disconnection between the floodplain and the main channel. This situation was exacerbated by the progressive incision of the corrected Rhine channel (Casper, 1959). Gravel bar surfaces were progressively covered by high vegetation (more than 60 % of the natural reserve area in 1926; Fig. 2.4-b).

The regularization works (1930-1936) induced a last/second phase of incision (Casper, 1959; Marchal and Delmas, 1959), accentuating the gradual conversion of the Bauerngrundwasser into a wetland (+ 7 ha). At the same time gravel bars appeared on the groyne fields which extended into the corrected Rhine channel (+ 13 ha between 1926 and 1949; Fig. 2.4-b). In 1970, this Rhine channel was by-passed by the Rhine canal on which a power plant was constructed. A continuous discharge up to 1,550 $m^3.s^{-1}$ is diverted towards the Rhine canal, altering the hydrology of the Old Rhine River drastically (Fig. 2.5-c, blue hydrogram). Therefore, groundwater level was lowered by about 0.8 m (Fig. 2.8). In 1984, the construction of the agricultural dam raised and stabilized the water level of the Old Rhine River at 140.00 m.NN, and the groundwater level around 139.60-140.00 m.NN, while the amplitude of groundwater fluctuation decreased suddenly from 1.5 to 0.4 m; Fig. S3 - Annexe 2). The entire Bauerngrundwasser was impacted by this backwater effect, which increased the stagnant water surface (+7 ha in 2010; Fig. 2.4-b). To avoid drying of the Bauerngrundwasser during

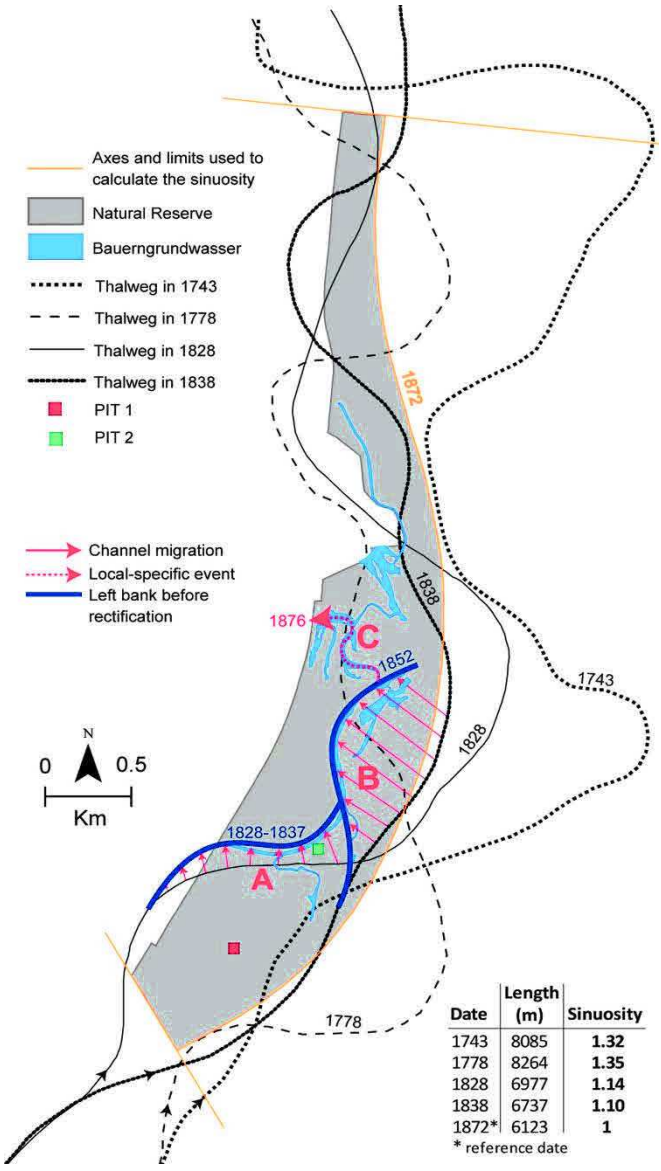


Figure 2. 9 - Rhine thalweg evolution from 1743 to the end of the correction works in 1876. (A) Area of lateral channel mobility during the 1828-1837 period. (B) Area of lateral channel mobility during the 1851-52 flood. (C) Area impacted by the 1876 flood.

low flow and drought periods along the Old Rhine River, an input of 1.5 $m^3.s^{-1}$ from the Rhine canal feeds the channel by a siphon (Fig. 2.4-b, 2010, siphon). This explains the specific modern dynamics of sediment suspension at the bottom of the Bauerngrundwasser (group 5; Fig. 2.6-a). Energy decreases along the channel as shown by the differences between T2-Cbs (C = 500; M = 7) and T4-Cbs (C = 100; M = 6). Similar dynamics were also observed by Peiry (1988) and underscore that in-channel deposition and filling was a current process until the start of the restoration.

4.4 Using Rhine long-term trajectory to enhance efficiency and sustainability: learning from the past to infer restoration guidelines

Combining spatial and temporal scales by overlapping multiple data sources in an interdisciplinary approach appears of crucial importance to (i) determine pre-disturbance dynamics of the hydrosystem, (ii) improve the understanding of the history of the hydrosystem in fine spatio-temporal scales (Belletti *et al.*, 2014; Bouleau and Pont, 2014; Brierley and Fryirs, 2008), and (iii) provide key information to manage restoration projects in efficient and sustainable ways. Indeed, these results allow validating our three working hypotheses:

1. Long-term temporal trajectories allow to identify driving factors, amplitude and response-time of disturbances

The pre-disturbance functioning of the Rhine hydrosystem in our study area, as identified by historical map analysis, sedimentological and geochronological data, was characterized by a high energy depositional environment with active braiding, lateral channel mobility and important surface areas of gravel bars and pioneer vegetation. In part, this functioning has been targeted by recent restoration efforts. Our results also highlight that the system has been drastically disturbed from the beginning of the correction works. In addition, the flood regime is an additional and crucial driving factor, inducing important and rapid changes in morphodynamics and sediment deposition, especially in low elevation areas where floods are relatively frequent, long and intense (palaeochannels; e.g. pit 2). The hydrosystem remained morphologically sensitive to floods throughout the duration of the correction works. From the

end of the correction, changes were less marked and also related to a decrease in flood energy and frequency. The volume of fine sediment deposition is higher in the upstream part of the Bauerngrundwasser, with a maximum thickness of 1.8 m and a volume of about 400,000 m3 (estimated by combining diachronic planimetric analysis with thickness of sediment layer close the Bauerngrundwasser). A volume of about 800,000 m3 of fine sediments with a mean thickness of about 0.4 m was deposited in the entire Rohrschollen Island up to today. This highlight the fact that impacts of correction work and further engineering works are irreversible. Hence, the main challenge of the restoration was to recover processes as flood dynamics and a morphodynamic gravel bed channel in a restricted environment.

2. Assessing potential benefits and limits of the restoration

Fine sediments are mainly located along the Bauerngrundwasser and represent a limitation for restoration purposes, because of the risk of their remobilization from both banks and channel bottom. As shown by Boulton *et al.* (1998) and Richards and Bacon (1994), fine sediments (e.g. sand) are a limiting factor for many aquatic biological species. This point is important because fine sediments were relatively scarce in the braiding-anastomosing Rhine hydrosystem previous to the initiation of correction works (Ochsenbein, 1966). Furthermore, another risk concerns potential remobilization of pollutants bound to fine sediments. This risk has also been identified and characterized on the Rhône River by Bravard and Gaydou (2015), Desmet *et al.* (2012) and Provansal *et al.* (2012). However, partial backwater effects induced by the agricultural dam control the water level on the Bauerngrundwasser, even during ecological floods (partly), and thus may limit bank erosion (Eschbach *et al.* submitted). Thus, in the specific case of the Rohrschollen Island, both risks are lowered by this local hydraulic constraint.

Conversely, the new channel dug on a large former gravel bar (Fig. 2.1-d) exposes a thinner layer of fine sediments along its banks, which are mainly composed of coarse sediments (gravels, pebbles) inherited from the pre-correction Rhine and represent a historical in-channel gravel bar. The backwater effect of the agricultural dam does not affect this channel (except the 100 downstream meters; Eschbach *et al.*, 2017). Consequently, the restoration of this channel induces a recovery of bedload dynamics, lateral channel mobility, morphodynamic and habitat diversification, which stimulate notably key-processes as downwelling/upwelling hydrological exchanges (Eschbach *et al.*, 2017).

3. Provide key-information to manage functional restoration actions in order to maximize efficiency and sustainability, and infer future evolutionary trends

Efficiency and sustainability are key issues in restoration projects (Bouleau and Pont, 2014; Loomis *et al.*, 2000). For management strategies, knowledge of temporal trajectories is relevant for targeting pre-disturbance processes (Cairns, 1991) and performing hydromorphological process-based restorations (Mika *et al.*, 2010; Rinaldi *et al.*, 2015). It also allows to identify floodplain areas with high hydromorphological functional potentials, i.e. sectors with thin layers of fine sediments located outside palaeochannels, notably on former gravel bars. In such geomorphological areas, where the efficiency of restored lateral channels may be the highest, managers are encouraged to excavate new channels and enhance morphodynamics by floods, which even may erode self-formed lateral channels in some cases, rather than reconnecting filled palaeochannels directly. However, the latter restoration measure has dominantly been carried out on large rivers including the Rhine, which raises the question regarding its wider relevance (Schmitt *et al.*, 2009; Schmitt *et al.*, 2012).

Concerning the floodplain compartment, the sedimentation rate is relatively low on the Rohrschollen Island (about 0.1 cm/y), but it is higher (of about one order of magnitude) on areas where flood intensities and frequencies have been less impacted than the Rohrschollen Island, along the non-canalized section of the Upper Rhine (Frings *et al.*, 2014; Dister *et al.*, 1990) and in the Rhine delta (Hudson, 2008). This floodplain geomorphological evolution reduces flood retention capacities. It probably will require in the future innovative flood management strategies (Hudson, 2008) that may notably be based on floodplain artificial excavations of fine sediments. This also should allow recovery of coarse sediments in the floodplains, a texture which is currently lacking. The long term (> 100 years) sustainability of the hydro-geomorphological management of the Upper Rhine appears as a key-question, which is coming more and more important, and is complexified by possible fine sediment pollutions.

Morphodynamic (and ecological) fluvial functionality requires relatively high, intense and long flood events superimposed on the natural hydrological regime (Bayley, 1991; Dister, 1992). This is the case on Rohrschollen Island, but following the first flooding events after restoration, a further question arises, among other: how to manage such a highly dynamic environment on median/long terms? For example, it will probably be necessary to equilibrate the Lane balance of the new channel by upstream artificial gravel augmentations, in the next years/decades. The sustainability of functional restoration efforts and their management remains an open question: on which time scale, for which compartment and over which spatial scales should they be considered? In this context, it appears crucial to continue the post-restoration monitoring over medium (3-5 years) and long (> 5-10 years) time scales to evaluate restoration success (Jähnig *et al.*, 2011; Kondolf and Micheli, 1995; Palmer *et al.*, 2005). This opens up avenues for developing integrative methodological approaches to improve pre-restoration knowledge and to implement post-restoration monitoring.

5 ACKNOWLEDGMENTS

This study has been funded by the European Community (LIFE08 NAT/F/00471), the City of Strasbourg, the University of Strasbourg (IDEX-CNRS 2014 MODELROH project), the French National Center for Scientific Research (CNRS), the ZAEU (Zone Atelier Environnementale Urbaine - LTER), the Water Rhine-Meuse Agency, the DREAL Grand Est, the "Région Alsace", the "Département du Bas-Rhin" and the company "Électricité de France". We acknowledge Arthur Zimmermann for the GIS implementation, Jérôme Houssier and Erni Dillmann for handing over the historical maps, Martine Trautmann for the grain size analyses (EOST-UMS 830), Pascal Finaud-Guyot for reviewing the flooding frequency assessment, Claire Rambeau for field assistance, and Ferréol Salomon and Christian Damm for fruitful scientific discussions.

6 REFERENCES

Acuña, V., Díez, J.R., Flores, L., Meleason, M., Elosegi, A., 2013. Does it make economic sense to restore rivers for their ecosystem services? In Journal of Applied Ecology 50, 988–997. doi:10.1111/1365-2664.12107

Amoros, C., Petts, G.E. (Eds), 1993. Hydrosystèmes fluviaux, Masson. Paris, 301 p.

Arnaud, F., Piégay, H., Schmitt, L., Rollet, A.J., Ferrier, V., Béal, D., 2015. Historical geomorphic analysis (1932–2011) of a by-passed river reach in process-based restoration perspectives: The Old Rhine downstream of the Kembs diversion dam (France, Germany). In Geomorphology 236, 163–177. doi:10.1016/j.geomorph.2015.02.009

Babcsanyi, I., Chabaux, F., Granet, M., Meite, F., Payraudeau, S., Duplay, J., Imfeld, G., 2016. Copper in soil fractions and runoff in a vineyard catchment: Insights from copper stable isotopes. In Science of the Total Environment 557–558, 154–162. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.03.037

Bayley, P.B., 1991. The flood pulse advantage and the restoration of river-floodplain systems. In Regulated Rivers: Research & Management 6, 75–86. doi:10.1002/rrr.3450060203

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. In BioScience 60, 209–222.

Belletti, B., Rinaldi, M., Buijse, A.D., Gurnell, A.M., Mosselman, E., 2014. A review of assessment methods for river hydromorphology. In Environmental Earth Sciences 73, 2079–2100. doi:10.1007/s12665-014-3558-1

Bensing, W., 1966. Gewässerkundliche Probleme beim Ausbau des Oberrheins (Problèmes hydrologiques lies à l'aménagement du cours supérieur du Rhin). Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 85–102.

Berger, M., Schwarzbauer, J., 2016. Historical Deposition of Riverine Contamination on Terrestrial Floodplains as Revealed by Organic Indicators from an Industrial Point Source. In Water, Air, & Soil Pollution 227. doi:10.1007/s11270-015-2708-8

Bogen, J., Bolviken, B., Ottesen, R.T., 1992. Environmental studies in Western Europe using overbank sediment. In Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins (Proceedings of the Oslo Symposium, August 1992). , 317–325.

Bonnefont, J.-C., Carcaud, N., 1997. Le comportement morphodynamique de la Moselle avant ses aménagements/The morphodynamic behaviour of Moselle river before its harnessings. In Géomorphologie : relief, processus, environnement 3, 339–353. doi:10.3406/morfo.1997.932

Bouleau, G., Pont, D., 2014. Les conditions de référence de la directive cadre européenne sur l'eau face à la dynamique des hydrosystèmes et des usages. In Natures Sciences Sociétés 22, 3–14. doi:10.1051/nss/2014016

Boulton, A.J., Findlay, S., Marmonier, P., Stanley, E.H., Valett, H.M., 1998. The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. In Annual Review of Ecology and Systematics, 59–81.

Bravard, J.-P., 2003. Dynamiques à long terme des systèmes écologiques ou de l'Eden impossible à la gestion de la variabilité. In. Lévêque C., Van Der Leeuw S. (eds), Quelles Natures Voulons-Nous?, 133-139.

Bravard, J.-P., Amoros, C., Pautou, G., 1986. Impact of Civil Engineering Works on the Successions of Communities in a Fluvial System: A Methodological and Predictive Approach Applied to a Section of the Upper Rhône River, France. In Oikos 47, 92. doi:10.2307/3565924

Bravard, J.-P., Bethemont, J., 1989. Cartography of rivers in France, in: Petts G. E. (ed), Historical Change of Large Alluvial Rivers : Western Europe.

Bravard, J.-P., Gaydou, P., 2015. Historical Development and Integrated Management of the Rhône River Floodplain, from the Alps to the Camargue Delta, France, in: Hudson, P.F., Middelkoop, H. (Eds.), Geomorphic Approaches to Integrated Floodplain Management of Lowland Fluvial Systems in North America and Europe. Springer New York, New York, NY, pp. 289–320, 289–320p.

Bravard, J.-P., Goichot, M., Tronchère, H., 2014. An assessment of sediment-transport processes in the Lower Mekong River based on deposit grain sizes, the CM technique and flow-energy data. In Geomorphology 207, 174–189. doi:10.1016/j.geomorph.2013.11.004

Bravard, J.-P., Magny, M., 2002. Les fleuves ont une histoire. Paléo-environnement des rivières et des lacs français depuis 15 000 ans. Errance édition.

Bravard, J.-P., Peiry, J.-L., 1999. The CM pattern as a tool for the classification of alluvial suites and floodplains along the river continuum. In Geological Society, London, Special Publications 163, 259–268.

Brierley, G.J., Fryirs, K.A., 2008. River Futures: An Integrative Scientific Approach to River Repair. Island Press, 325 p.

Brookes, A.B., 1988. Channelized rivers: Perspectives for environmental management. Chichester, UK.

Brown, A.G., 1997. Alluvial Geoarchaeology: Floodplain Archaeology and Environmental Change. Cambridge University Press, 404 p.

Bull, F., 1885. Technisch-statistische Mittheilungen über die Stromverhältnisse des Rheins längs des elsass-lothringischen Gebietes (Atlas). In In: C.F. Schmidt (ed). Ministerium fur elsass-lothringen, Strassburg, 193 p.

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 Sommerlet (commune d'Erstein). In Revue de géographie de l'Est 4, 207–312.

Carbiener R., 1983. Le grand ried central d'Alsace: écologie et évolution d'une zone humide d'origine fluviale rhénane. In Bulletin Ecologie, 249–277.

Cairns, J., 1991. The status of the theoretical and applied science of restoration ecology. In Environmental professional 13, 186–194.

Casper, M., 1959. L'aménagement du parcours allemand du Rhin : mesures exécutées, en cours et en projet. In La Houille Blanche, 229–248. doi:10.1051/lhb/1959037

CECR, Ministère de l'Agriculture, Service Régional d'Aménagement des Eaux d'Alsace, 1978. Rapport finale de la Commission d'Etude des Crues du Rhin. Colmar, 87 p.

Champion, M., 1863. Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours. Dunod, Paris, 501 p.

Ciszewski, D., Grygar, T.M., 2016. A Review of Flood-Related Storage and Remobilization of Heavy Metal Pollutants in River Systems. In Water, Air, & Soil Pollution 227. doi:10.1007/s11270-016-2934-8

Corenblit, D., Tabacchi, E., Steiger, J., Gurnell, A.M., 2007. Reciprocal interactions and adjustments between fluvial landforms and vegetation dynamics in river corridors: A review of complementary approaches. In Earth-Science Reviews 84, 56–86. doi:10.1016/j.earscirev.2007.05.004

David, M., Labenne, A., Carozza, J.-M., Valette, P., 2016. Evolutionary trajectory of channel planforms in the middle Garonne River (Toulouse, SW France) over a 130-year period: Contribution of mixed multiple factor analysis (MFAmix). In Geomorphology 258, 21–39. doi:10.1016/j.geomorph.2016.01.012

De Boer, J., Dao, Q.T., van Leeuwen, S.P.J., Kotterman, M.J.J., Schobben, J.H.M., 2010. Thirty year monitoring of PCBs, organochlorine pesticides and tetrabromodiphenylether in eel from The Netherlands. In Environmental Pollution 158, 1228–1236. doi:10.1016/j.envpol.2010.01.026

Desmet, M., Mourier, B., Mahler, B.J., Van Metre, P.C., Roux, G., Persat, H., Lefèvre, I., Peretti, A., Chapron, E., Simonneau, A., Miège, C., Babut, M., 2012. Spatial and temporal trends in PCBs in sediment along the lower Rhône River, France. In Science of The Total Environment 433, 189–197. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.06.044

Dister, E., Gomer, D., Obrdlik, P., Petermann, P., Schneider, E., 1990. Water mangement and ecological perspectives of the upper rhine's floodplains. In River Research and Applications 5, 1–15.

Dister, E., 1992. La maîtrise des crues par la renaturaliasation des plaines alluviales du Rhin supérieur. In Espaces naturels rhénans - Bulletin de la société industrielle de Mulhouse 1, 10.

Dufour, S., 2006. Contrôles naturels et anthropiques de la structure et de la dynamique des forêts riveraines des cours d'eau du bassin rhodanien (Ain, Arve, Drôme et Rhône). 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. In River Research and Applications 25, 568–581. doi:10.1002/rra.1239

Duplay, J., Semhi, K., Errais, E., Imfeld, G., Babcsanyi, I., Perrone, T., 2014. Copper, zinc, lead and cadmium bioavailability and retention in vineyard soils (Rouffach, France): The impact of cultural practices. In Geoderma 230–231, 318–328. doi:10.1016/j.geoderma.2014.04.022

Dynesius, M., Nilsson, C., 1994. Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern third the world. In Science 266, 753–762.

Eisenmenger, G., 1907. Études sur l'évolution du Rhin et du système hydrographique Rhénan et propositions données par la faculté. Université de Paris, 512 p.

Eschbach, D., Piasny, G., Schmitt, L., Pfister, L., Grussenmeyer, P., Koehl, M., Skupinski, G., Serradj, A., 2017. Thermal-infrared remote sensing of surface water-groundwater exchanges in a restored anastomosing channel (Upper Rhine River, France). In Hydrological Processes 31, 1113–1124. doi:10.1002/hyp.11100

Evers, E.H.G., Ree, K.C.M., Olie, K., 1988. Spatial variations and correlations in the distribution of

PCDDs, PCDFs and related compounds in sediments from the river Rhine — Western Europe. In Chemosphere 17, 2271–2288. doi:10.1016/0045-6535(88)90140-3

Falkowska, L., Reindl, A.R., Grajewska, A., Lewandowska, A.U., 2016. Organochlorine contaminants in the muscle, liver and brain of seabirds (Larus) from the coastal area of the Southern Baltic. In Ecotoxicology and Environmental Safety 133, 63–72. doi:10.1016/j.ecoenv.2016.06.042

Fedorenkova, A., Vonk, J.A., Breure, A., Hendriks, A.J., Leuven, R., 2013. Tolerance of native and non-native fish species to chemical stress: a case study for the River Rhine. In Aquatic Invasions 8, 231–241. doi:10.3391/ai.2013.8.2.10

Felkel, K., 1969. Die erosion des oberrhein zwischen Basel und Karlsruhe. In GWF (Wasser - Abwasser) 30, 801–810.

Fischbach, G., 1878. Compte rendu des séances de la société - Séance ordinaire du 3 juillet 1878 présidée par M. de Turckheim. In Société des sciences, agriculture et arts de la basse-Alsace - Bulletin Trimestriel- Tome XII - 3ième fascicule. Travaux sur les eaux entre Erstein et Strasbourg présentés par M. Schanté, 118 p.

Fryirs, K., Brierley, G.J., Erskine, W.D., 2012. Use of ergodic reasoning to reconstruct the historical range of variability and evolutionary trajectory of rivers. In Earth Surface Processes and Landforms 37, 763–773. doi:10.1002/esp.3210

Garban, B., Ollivon, D., Carru, A.M., Chesterikoff, A., 1996. Origin, retention and release of trace metals from sediments of the river seine. In Water, Air, and Soil Pollution 87, 363–381. doi:10.1007/BF00696848

Gocht, T., Moldenhauer, K.-M., Püttmann, W., 2001. Historical record of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and heavy metals in floodplain sediments from the Rhine River (Hessisches Ried, Germany). In Applied Geochemistry 16, 1707–1721. doi:10.1016/S0883-2927(01)00063-4

Grabowski, R.C., Gurnell, A.M., 2016. Using historical data in fluvial geomorphology, in: Kondolf, G. M., Piégay, H. (Eds.), Tools in Fluvial Geomorphology. John Wiley & Sons, Ltd. 21p.

Gregory, K.J., Benito, G., 2003. Paleohydrology: Understanding Global Change. University of Southampton, 396 p.

Grygar, T., Popelka, J., 2016. Revisiting geochemical methods of distinguishing natural concentrations and pollution by risk elements in fluvial sediments. In Journal of Geochemical Exploration 170, 39–57. doi:10.1016/j.gexplo.2016.08.003

Gurnell, A.M., Bertoldi, W., Corenblit, D., 2012. Changing river channels: The roles of hydrological processes, plants and pioneer fluvial landforms in humid temperate, mixed load, gravel bed rivers. In Earth-Science Reviews 111, 129–141. doi:10.1016/j.earscirev.2011.11.005

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, Ltd, pp. 77–101

Habersack, H., Jäger, E., Hauer, C., 2013. The status of the Danube River sediment regime and morphology as a basis for future basin management. In International Journal of River Basin Management 11, 153–166. doi:10.1080/15715124.2013.815191

Harman, W., Starr, R., Carter, M., Tweedy, K., Clemmons, M., Suggs, K., Miller, C., 2012. Function-based framework for assessment and restoration projects. (Oral presentation).

Herget, J., Bremer, E., Coch, T., Dix, A., Eggenstein, G., Ewald, K., 2005. Engineering Impact on River Channels in the River Rhine Catchment (Menschliche Eingriffe in Flussläufe im Einzugsgebiet des Rheins). In Erdkunde 59, 294–319.

Herget, J., Dikau, R., Gregory, K.J., Vandenberghe, J., 2007. The fluvial system — Research perspectives of its past and present dynamics and controls. In Geomorphology 92, 101–105. doi:10.1016/j.geomorph.2006.07.034

Hering, D., Aroviita, J., Baattrup-Pedersen, A., Brabec, K., Buijse, T., Ecke, F., Friberg, N., Gielczewski, M., Januschke, K., Köhler, J., Kupilas, B., Lorenz, A.W., Muhar, S., Paillex, A., Poppe, M., Schmidt, T., Schmutz, S., Vermaat, J., Verdonschot, P.F.M., Verdonschot, R.C.M., Wolter, C., Kail, J., 2015. Contrasting the roles of section length and instream habitat enhancement for river restoration success: a field study of 20 European restoration projects. In Journal of Applied Ecology 52, 1518–1527. doi:10.1111/1365-2664.12531

Hooke, J.M., 1995. River channel adjustment to meander cutoffs on the River Bollin and River Dane, northwest England. In Geomorphology 14, 235–253.

Horowitz, A., Meybeck, M., Idlafkih, Z., Biger, E., 1999. Variations in trace element geochemistry in the Seine River Basin based on Foodplain deposits and bed sediments. In Hydrological Processes 13, 1329–1340.

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. In Geomorphology 101, 209–236. doi:10.1016/j.geomorph.2008.07.001

IKSR-CIPR-ICBR, 2005. État des lieux DCE, partie A.

IKSR-CIPR-ICBR, 2012. Plan d'action contre les inondations 1995 - 2010 : objectifs opérationnels, mise en œuvre et résultats - Bilan synthétique. Coblence.

IKSR-CIPR-ICBR, 2014. Mise en œuvre du Plan de gestion des sédiments Rhin. Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR). ISBN 978-3-941994-54-6.

Jähnig, S.C., Lorenz, A.W., Hering, D., Antons, C., Sundermann, A., Jedicke, E., Haase, P., 2011. River restoration success: a question of perception. In Ecological society of America, 21, 2007–2015.

James, L.A., Singer, M.B., Ghoshal, S., Megison, M., 2009. Historical channel changes in the lower Yuba and Feather Rivers, California: Long-term effects of contrasting river-management strategies, in: Geological Society of America Special Papers. James, L.A., Rathburn, S.L., and Whittecar, G.R., (eds) Geological Society of America, pp. 57–81 doi:10.1130/2009.2451(04)

Jeanpierre, D., 1968. L'érosion des fonds : conséquence secondaire de la protection de la plaine d'Alsace par l'endiguement longitudinal du Rhin, in: Société Hydrotechnique de France. Presented at the Xième journées de l'hydraulique, Paris, 8 p.

Jenkinson, R.G., Barnas, K.A., Braatne, J.H., Bernhardt, E.S., Palmer, M.A., Allan, J.D., 2006. Stream restoration databases and case studies: a guide to information resources and their utility in advancing the science and practice of restoration. In Restoration Ecology 14, 177–186.

Jones, C.J., Johnson, P.A., 2015. Describing Damage to Stream Modification Projects in Constrained Settings. In Journal of the American Water Resources Association 51, 251–262. doi:10.1111/jawr.12248

Knighton, A.D., 1984. Fluvial forms and processes, Edward Arnold Editions (ed). London, 218 p.

Kondolf, G.M., Larson, M., 1995. Historical channel analysis and its application to riparian and aquatic habitat restoration. In Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 5, 109–126. doi:10.1002/aqc.3270050204

Kondolf, G.M., Micheli, E.R., 1995. Evaluating stream restoration projects. In Environmental Management 19, 1–15. doi:10.1007/BF02471999

Lair, G.J., Zehetner, F., Khan, Z.H., Gerzabek, M.H., 2009. Phosphorus sorption-desorption in alluvial soils of a young weathering sequence at the Danube River. In Geoderma 149, 39–44. doi:10.1016/j.geoderma.2008.11.011

Large, A.R.G., Gilvear, D.J., 2015. Using Google Earth, a virtual-globe imaging platform, for ecosystem services-based river assessment. In River Research and Applications 31, 406–421. doi:10.1002/rra.2798

Larras, J., 1977. Fleuves et rivières non aménagés. In Revue de géographie alpine 65, 228–229.

Lawler, D.M., 1993. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: A review. In Earth Surface Processes and Landforms 18, 777–821. doi:10.1002/esp.3290180905

Leopold, L.B., Wolman, M.G., Wolman, M.G., Wolman, M.G., 1957. River channel patterns: braided, meandering, and straight. US Government Printing Office Washington (DC). 50 p.

Lespez, L., Viel, V., Rollet, A.J., Delahaye, D., 2015. The anthropogenic nature of present-day low energy rivers in western France and implications for current restoration projects. In Geomorphology 251, 64–76. doi:10.1016/j.geomorph.2015.05.015

Lintern, A., Leahy, P.J., Heijnis, H., Zawadzki, A., Gadd, P., Jacobsen, G., Deletic, A., Mccarthy, D.T., 2016. Identifying heavy metal levels in historical flood water deposits using sediment cores. In Water Research 105, 34–46. doi:10.1016/j.watres.2016.08.041

Loomis, J., Kent, P., Strange, L., Fausch, K., Covich, A., 2000. Measuring the total economic value of restoring ecosystem services in an impaired river basin: results from a contingent valuation survey. In Ecological economics 33, 103–117.

Magdaleno, F., Anastasio Fernández, J., Merino, S., 2012. The Ebro River in the 20th century or the ecomorphological transformation of a large and dynamic Mediterranean channel. In Earth Surface Processes and Landforms 37, 486–498. doi:10.1002/esp.2258

Marchal, M., Delmas, G., 1959. L'aménagement du Rhin à courant libre du Bâle à Lauterbourg. In La Houille Blanche, 177–202. doi:10.1051/lhb/1959032

Martin, B., Drescher, A., Fournier, M., Guerrouah, O., Giacona, F., Glaser, R., Himmelsbach, I., Holleville, N., Riemann, D., Schonbein, J., Vitoux, M.-C., With, L., 2015. Les évènements extrêmes dans le fossé rhénan entre 1480 et 2012. Quels apports pour la prévention des inondations ? In La Houille Blanche, 82–93. doi:10.1051/lhb/20150023

Middelkoop, H., 2000. Heavy-metal pollution of the river Rhine and Meuse floodplains in the Netherlands. In Netherlands journal of geosciences 79, 411–427.

Mika, S., Hoyle, J., Kyle, G., Howell, T., Wolfenden, B., Ryder, D., Keating, D., Boulton, A., Brierley, G., Brooks, A.P., others, 2010. Inside the "black box" of river restoration: using catchment history to identify disturbance and response mechanisms to set targets for process-based restoration. In Ecology and Society 15, 8 p.

Miller, S.O., Ritter, D.F., Kochel, R.C., Miller, J.R., 1993. Fluvial responses to land-use changes and climatic variations within the Drury Creek watershed, southern Illinois. In Geomorphology 6, 309–329. doi:10.1016/0169-555X(93)90053-5

Naiman, R.J., Décamps, H., Pastor, J., Johnston, C.A., 1988. The Potential Importance of Boundaries of Fluvial Ecosystems. In Journal of the North American Benthological Society 7, 289–306. doi:10.2307/1467295

Naiman, R.J., Decamps, H., Pollock, M., 1993. The Role of Riparian Corridors in Maintaining Regional Biodiversity. In Ecological Applications 3, 209–212. doi:10.2307/1941822

Ochsenbein, G., 1966. La végétation sur les bords du Rhin. In Saisons d'Alsace, 383–398.

Palmer, M.A., Bernhardt, E.S., Allan, J.D., Lake, P.S., Alexander, G., Brooks, S., Carr, J., Clayton, S., Dahm, C.N., Follstad Shah, J., Galat, D.L., Loss, S.G., Goodwin, P., Hart, D.D., Hassett, B., Jenkinson, R., Kondolf, G.M., Lave, R., Meyer, J.L., O'Donnell, T.K., Pagano, L., Sudduth, E., 2005. Standards for ecologically successful river restoration: Ecological success in river restoration. In Journal of Applied Ecology 42, 208–217. doi:10.1111/j.1365-2664.2005.01004.x

Pardé, M., 1928. Périodicité des grandes inondations et crues exceptionnelles. In Revue de géographie alpine 16, 499–519. doi:10.3406/rga.1928.4457

Passega, R., 1964. Grain Size Representation by Cm Patterns as a Geological Tool. In Journal of Sedimentary Research 34.

Passega, R., 1977. Significance of CM diagrams of sediments deposited by suspensions. In Sedimentology 24, 723–733. doi:10.1111/j.1365-3091.1977.tb00267.x

Peiry, J.-L., 1988. Approche géographique de la dynamique spatio-temporelle des sédiments d'un cours d'eau intra-montagnard : l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve (Haute-Savoie). Lyon 3.

Petts, G.E., Moeller, H., Roux, A.L. (eds), 1989. Historical change of large alluvial rivers: Western Europe.

Preusser, F., May, J.-H., Eschbach, D., Trauerstein, M., Schmitt, L., 2016. Infrared stimulated luminescence dating of 19th century fluvial deposits from the upper Rhine River. In Geochronometria 43, 131-142. doi:10.1515/geochr-2015-0045

Provansal, M., Raccasi, G., Monaco, Mm., Robresco, S., Dufour, S., 2012. La réhabilitation des marges fluviales, quel intérêt, quelles contraintes ? Le cas des annexes fluviales du Rhône aval. In Méditerranée n° 118, 85–94.

Reimann, C., de Caritat, P., 2005. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors. In Science of The Total Environment 337, 91–107. doi:10.1016/j.scitotenv.2004.06.011

Richards, C., Bacon, K.L., 1994. Influence of fine sediment on macroinvertebrate colonization of surface and hyporheic stream substrates. In The Great Basin Naturalist 54, 106–113.

Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F., Bussettini, M., 2015. A methodological framework for hydromorphological assessment, analysis and monitoring (IDRAIM) aimed at promoting integrated river management. In Geomorphology 251, 122–136. doi:10.1016/j.geomorph.2015.05.010

Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F., Bussettini, M., 2013. A method for the assessment and analysis of the hydromorphological condition of Italian streams: The Morphological Quality Index (MQI). In Geomorphology 180–181, 96–108. doi:10.1016/j.geomorph.2012.09.009

Riquier, J., Piégay, H., Šulc Michalková, M., 2015. Hydromorphological conditions in eighteen restored floodplain channels of a large river: linking patterns to processes. In Freshwater Biology, 19 p. doi:10.1111/fwb.12411

Rollet, A.J., Piégay, H., Dufour, S., Bornette, G., Persat, H., 2014. Assessment of consequences of sediment deficit on a gravel river bed downstream of dams in restoration perspectives: application of a multicriteria, hierarchical and spatially explicit diagnosis. In River Research and Applications 30, 939–953. doi:10.1002/rra.2689

Rumsby, B.T., Macklin, M.G., 1996. River response to the last neoglacial (the "Little Ice Age") in northern, western and central Europe. In Geological Society, London, Special Publications 115, 217–233. doi:10.1144/GSL.SP.1996.115.01.17

Schäfer, W., 1973. Der Oberrhein, sterbende Landschaft. In Natur und Museum , 1–29.

Schirmer, W., 1988. Holocene valley development on the upper Rhine and Main, in: Lang, R. & Schlijchter, C. (Eds) Lake, Mire and River Environments. Balkema, Rotterdam, pp. 153–160

Schmitt, L., Trémolières, M., Blum, C., Dister, E., Pfarr, U., others, 2012. 30 years of restoration works on the two sides of the Upper Rhine River: feedback and future challenges, in: Int. Conf. Integrative Sciences and Sustainable Development of Rivers. Lyon, France. pp. 101–103

Schmitt, L., Houssier, J., Martin, B., Beiner, M., Skupinski, G., Boës, E., Schwartz, D., Ertlen, D., Argant, J., Gebhardt, A., Schneider, N., Lasserre, M., Trintafillidis, G., Ollive, V., 2016. Paléo-dynamique fluviale holocène dans le compartiment sud-occidental du fossé rhénan (France). In Revue Archéologique de l'Est 42è supplément, 15–33.

Schmitt, L., Lebeau, M., Trémolières, M., Defraeye, S., Coli, C., Denny, E., Dillinger, M., Beck, T., Dor, J.-C., Gombert, P., Gueidan, A., Manné, S., Party, J.-P., Perrotey, P., Piquette, M., Roeck, U., Schnitzler, A., Sonnet, O., Vacher, J.-P., Vauclin, V., Weiss, M., Zacher, J.-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). In Ingénieries n° spécial, 67-84.

Schulz-Zunkel, C., Krueger, F., 2009. Trace Metal Dynamics in Floodplain Soils of the River Elbe: A Review. In Journal of Environment Quality 38, 1349. doi:10.2134/jeq2008.0299

Sear, D.A., Arnell, N.W., 2006. The application of palaeohydrology in river management. In Catena 66, 169–183. doi:10.1016/j.catena.2005.11.009

Sear, D.A., Darby, S.E., Thorne, C.R., Brookes, A.B., 1994. Geomorphological approach to stream stabilization and restoration: Case study of the Mimmshall brook, hertfordshire, UK. In Regulated Rivers: Research & Management 9, 205–223. doi:10.1002/rrr.3450090403

Starkel, L., Soja, R., Michczyńska, D.J., 2006. Past hydrological events reflected in Holocene history of Polish rivers. In CATENA, Past Hydrological Events Related to Understanding Global Change 66, 24–33. doi:10.1016/j.catena.2005.07.008

Steiger, J., Tabacchi, E., Dufour, S., Corenblit, D., Peiry, J.-L., 2005. Hydrogeomorphic processes affecting riparian habitat within alluvial channel-floodplain river systems: a review for the temperate zone. In River Research and Applications 21, 719–737. doi:10.1002/rra.879

Tao, F., Jiantong, L., Bangding, X., Xiaoguo, C., Xiaoqing, X., 2005. Mobilization potential of heavy metals: A comparison between river and lake sediments. In Water, Air, & Soil Pollution 161, 209–225.

Toonen, W.H.J., Winkels, T.G., Cohen, K.M., Prins, M.A., Middelkoop, H., 2015. Lower Rhine historical flood magnitudes of the last 450 years reproduced from grain-size measurements of flood deposits using End Member Modelling. In CATENA 130, 69–81. doi:10.1016/j.catena.2014.12.004

Trimble, S.W., Cooke, R.U., 1991. Historical Sources for Geomorphological Research in the United States. In The Professional Geographer 43, 212–228. doi:10.1111/j.0033-0124.1991.00212.x

Tulla, J.G., 1825. Ueber die Rectification des Rheins, von seinem Austritt aus der Schweiz bis zu seinem Eintritt in Hessen. Karlsruhe.

Tümmers, H.J., 1999. Der Rhein: ein europäischer Fluß und seine Geschichte, 2. Überarbeitete und aktualisierte Auflage. Beck (ed), München, 481 p.

Uehlinger, U., Wantzen, K.M., Leuven, R.S.E.W., Arndt, H., 2009. Tockner K. (eds), The Rhine river basin, in: Rivers of Europe. Academic Press, Amsterdam; London, pp. 199–245

van Helvoort, P.-J., Griffioen, J., Hartog, N., 2007. Characterization of the reactivity of riverine heterogeneous sediments using a facies-based approach; the Rhine–Meuse delta (The Netherlands). In Applied Geochemistry 22, 2735–2757. doi:10.1016/j.apgeochem.2007.06.016

Wetter, O., Pfister, C., Weingartner, R., Luterbacher, J., Reist, T., Trösch, J., 2011. The largest floods in the High Rhine basin since 1268 assessed from documentary and instrumental evidence. In Hydrological Sciences Journal 56, 733–758. doi:10.1080/02626667.2011.583613

WFD, 2000/60/EC, 2000. Directive 2000/60/EC of the European parliament and of the council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy.

Wittmann, J., 1859. Chronik der niedrigsten Wasserstände des Rheins vom Jahre 70 ??. Chr. Geb. bis 1858 und Nachrichten über die im Jahre 1857 - 58 im Rheinbette von der Schweiz bis nach Holland zu Tage gekommenen Alterthümer und Merkwürdigkeiten, insbesondere die damals sichtbaren Steinpfeilerreste der ehemaligen festen Brücke bei Mainz und die unfern dieser Stadt im Rheinstrome gemachten Entdeckungen. Seifert, Mainz, 142 p.

Wohl, E., Angermeier, P.L., Bledsoe, B., Kondolf, G.M., MacDonnell, L., Merritt, D.M., Palmer, M.A., Poff, N.L., Tarboton, D., 2005. River restoration. In Water Resources Research 41, W10301-1-W10301-12. doi:10.1029/2005WR003985

Woitke, P., Wellmitz, J., Helm, D., Kube, P., Lepom, P., Litheraty, P., 2003. Analysis and assessment of heavy metal pollution in suspended solids and

sediments of the river Danube. In Chemosphere 51, 633–642. doi:10.1016/S0045-6535(03)00217-0

Ziliani, L., Surian, N., 2012. Evolutionary trajectory of channel morphology and controlling factors in a large gravel-bed river. In Geomorphology, 104–117.

Zimmer, D., Kiersch, K., Jandl, G., Meissner, R., Kolomiytsev, N., Leinweber, P., 2010. Status Quo of Soil Contamination with Inorganic and Organic Pollutants of the River Oka Floodplains (Russia). In Water, Air, & Soil Pollution 211, 299–312. doi:10.1007/s11270-009-0301-8

7 TABLEAU DES CONTRIBUTIONS

General contributions	D. Eschbach	L. Schmitt	G. Imfeld	J.-H. May	S. Payraudeau	F. Preusser	M. Trauerstein	G. Skupinski
Conceptualization	●	●	●					
Data acquisition	●	●		●	●		●	●
Formal analysis	●	●		●	●			
Funding acquisition		●						
Investigation	●		●	●	●	●		
Methodology	●	●				●		
Project administration	●	●						
Resources	●			●	●			
Supervision	●	●						
Validation	●	●	●			●		
Visualization	●							
Writing - original draft	●	●	●					
Writing - review & editing	●	●	●	●				
	12	*10*	*5*	*5*	*4*	*3*	*1*	*1*

Detailled author contributions	D. Eschbach	L. Schmitt	G. Imfeld	J.-H. May	S. Payraudeau	F. Preusser	M. Trauerstein	G. Skupinski
1 Introduction	0.6	0.3	0.1					
2 Study area	1							
3 Material and methods								
3.1 Planimetric analysis	0.8							0.2
3.2 Analysis of vertical data								
3.2.1 Limnimtric and piezometric analysis	1							
3.2.2 Palaeochannel corings	1							
3.2.3 Pits excavations	1							
3.3 Characteristics of the sediments								
3.3.1 Grain size analysis	1							
3.3.2 Geochemical analysis and organic pollutants			0.6		0.4			
3.3.3 Depositional chronology				0.2		0.6	0.2	
3.3.4 Flooding frequency assessment	1							
4 Results and discussion								
4.1 Hydromorphological dynamics before the beginning of the correction works (up to ~1833)	0.8	0.2						
4.2 Hydromorphological disturbances during the correction works (1833-1876)								
4.2.1 Main channel adjustments	0.8	0.2						
4.2.2 Lateral channels adjustments and filling processes	0.8	0.2						
4.2.3 Geochemistry of the sediment filling			0.8		0.2			
4.3 Adjustments since the end of the correction works (after 1876)	0.8	0.2						
4.4 Using Rhine long-term trajectory to enhance restoration efficiency and sustainability: learning from the past to infer restoration guidelines	0.6	0.4						
	23	*12*	*6.5*	*5.2*	*4.6*	*3.6*	*1.2*	*1.2*

%
1
0.8
0.6
0.4
0.2

CHAPITRE 3

COMBINAISON DE MÉTHODES GÉODÉSIQUES ET GÉOMORPHOLOGIQUES POUR LE DÉVELOPPEMENT D'INDICATEURS FONCTIONNELS

Dans ce **troisième chapitre**, qui fait l'objet d'un article en cours de soumission dans la revue *Geomorphology*, les méthodes de suivi géodésiques par modélisations 3-D (lasergrammétrie, photogrammétrie, tachéométrie) ont été couplées avec des méthodes traditionnelles en géomorphologie fluviale (suivi de la charge de fond et des faciès d'écoulement, granulométrie, localisation des paléochenaux et des anciens bancs de gravier) afin de suivre les ajustements morphodynamiques du nouveau chenal. Des indicateurs fonctionnels ont été développés et testés pour évaluer la dynamique d'évolution à différentes échelles spatio-temporelles. Sur le plan méthodologique, la photogrammétrie a permis de produire rapidement et à moindre coût des modèles 3-D à haute résolution. Une hybridation méthodologique avec des données bathymétriques recueillies par tachéométrie a toutefois été nécessaire pour compléter le jeu de données. Cette méthode est plus contraignante, notamment en termes de temps d'acquisition et de résolution, mais présente l'avantage de produire des données à une échelle spatiale plus large. Sur le plan thématique, outre l'intérêt de combiner différentes disciplines pour suivre les tendances d'évolutions, nos résultats montrent également l'importance de produire des indicateurs fonctionnels, facilement comparables et transposables, pour identifier les principaux facteurs limitants (présence d'anciens bancs, ensablement…) et optimiser la qualité des suivis futurs à moyen terme. Ce chapitre s'appuie sur l'axe 2 : **améliorations méthodologiques pour le monitoring géomorphologique des chenaux anastomosés actifs.**

Ce chapitre correspond à l'article : Eschbach, D., Grussenmeyer, P., Schmitt, L., Koehl, M., Guillemin, S., (Submitted). Combining geodetic and geomorphological methods to accurately monitor a restored dynamic anastomosing channel. In *Geomorphology*.

Le chapitre s'appuie également sur un article complémentaire présenté en annexe 4 : Koehl, M., **Eschbach, D.**, Grussenmeyer, P., Schmitt, L., Guillemin, S., Supper, E., Roy, J., (2017, sous presse). Suivi morphodynamique d'une annexe hydraulique rhénane restaurée par combinaison de méthodes d'imagerie terrestre. In *Actes de la journée technique ONEMA : Avancées, apports et perspectives de la télédétection pour la caractérisation physique des corridors fluviaux*, Paris, 10 juin 2016, 8p. DOI: 10.13140/RG.2.1.1189.5283

COMBINING GEODETIC AND GEOMORPHOLOGICAL METHODS TO ACCURATELY MONITOR A RESTORED DYNAMIC ANASTOMOSING CHANNEL

David Eschbach[a,*], Pierre Grussenmeyer[b], Laurent Schmitt[a], Mathieu Koehl[b], Samuel Guillemin[b]

[a] University of Strasbourg, CNRS, LIVE UMR 7362, LTSER - "Zone Atelier Environnementale Urbaine", 3 rue de l'Argonne, F-67083 Strasbourg, France
[b] ICube Laboratory, UMR 7357, Photogrammetry and Geomatics Group, INSA de Strasbourg, 24 boulevard de la Victoire, F-67084 Strasbourg, France

* Corresponding author: David Eschbach, University of Strasbourg, CNRS, LIVE UMR 7362, LTER - "Zone Atelier Environnementale Urbaine", 3 rue de l'Argonne, F-67083 Strasbourg, France Tel.: +33.368.85.09.81; E-mail address: david.eschbach@live-cnrs.unistra.fr

ABSTRACT

A geodetic survey using 3-D modeling (lasergrammetry, photogrammetry, tacheometry) was combined with a geomorphological survey (RFID tracking, grain size analysis, survey of geomorphic units) in order to monitor morphodynamic adjustments in a restored anastomosing channel. Functioning indicators were developed and tested, to survey morphological changes at different spatio-temporal scales. From a methodological point of view, SfM-photogrammetry represents a fast and low-cost method able to produce high-resolution point-clouds. This method is particularly well-suited for monitoring complex fluvial environments that are subjected to rapid and intense changes. A hybrid method was developed in order to complement bank point-clouds with bathymetric data obtained by Total Station leveling. By using DoD, carried out by the M3C2 method, volumes of erosion-deposition were determined for all surveys. From a thematic point of view, combining geodetic and geomorphological approaches resulted in a detailed assessment of channel adjustments. This was achieved by creating a set of functional indicators that allowed identifying morphodynamic limitation factors, and which may be used in the future in a wide range of restoration surveys.

KEY WORDS

Morphological 3-D modelling; SfM-photogrammetry; M3C2; DoD; RFID tracking; Functional indicators; Sediment budget; Rohrschollen island.

1 INTRODUCTION

The geomorphological monitoring of restored hydrosystems is a key issue in surveying channel adjustments (Gurnell *et al.*, 2006; Hickin, 1983) and habitat dynamics (Belletti *et al.*, 2014; Palmer *et al.*, 2010; Raven *et al.*, 2002), and thereby assessing the efficiency of physical restorations (Bernhardt *et al.*, 2005; Buchanan *et al.*, 2012; Fausch *et al.*, 2002). Conventional morphological surveying techniques, which are usually based on cross-sections, are time-consuming and require a trade-off between temporal and spatial resolution, accuracy, and survey frequency (Bangen *et al.*, 2014a; Barker *et al.*, 1997; Brasington *et al.*, 2000; Lane *et al.*, 1994). The first applications of remote sensing in fluvial environments date back to the 1960s (Collins and Moon, 1979; Painter *et al.*, 1974). However, no significant technological innovations in topographic technics that would have improved and simplified field surveys appeared before the beginning of the 21st century (Dietrich, 2016; Nadal-Romero *et al.*, 2015; Westoby *et al.*, 2012).

Numerous studies have analyzed the accuracy and resolution (Grussenmeyer *et al.*, 2016; Murtiyoso and Grussenmeyer, 2017) of Terrestrial Laser Scanning (TLS)- and Structure from Motion (SfM)-derived topographic datasets, for a wide range of geomorphological environments (Fig. 3.1). Compared to the first TLS instrument that was developed two decades ago, recent technologies (e.g. FARO Focus 3D, Z+F IMAGER 5016) use smaller, more lightweight devices, and provide high quality colorimetric clouds (Remondino and El-Hakim, 2006). The TLS method is still expensive and requires special care in remote areas (targets, spheres…). These constrains explain why only a few surveys aiming at monitoring geomorphological changes in active channels have been based on TLS (Fig. 3.1). Besides, SfM photogrammetry is a low-cost method that generates high spatial resolution and three-dimensional data. This technique requires only a few targets for georeferencing. It, also, allows for accurate surveys of frequent river changes, potentially for the median/long term (Fonstad *et al.*, 2013). However, despite the well-known high accuracy of 3-D topographic monitoring obtained by TLS and SfM-photogrammetry, these methods have been rarely used in river restorations, especially in the context of monitoring morphodynamics changes in median-sized active channels (Fig. 3.1). Recent geomorphological studies also use newly developed remote sensing applications such as Unmanned Aerial Vehicles (UAVs; Belletti *et al.*, 2017; Casado *et al.*, 2015; Lejot *et al.*, 2007), tethered kites, and blimps (Boike and Yoshikawa, 2003; Smith *et al.*, 2009; Vericat *et al.*, 2009).

These methods provide centimetric-scale DEM (Digital Elevation Model) combined with bathymetric modelling. They are however limited by riparian canopy effects and by logjams, which are frequent along dynamic channels. Within this context, the combination of survey technologies is useful to generate complete and accurate datasets (Bangen *et al.*, 2014b; Wheaton *et al.*, 2009). This provides a way to visualize and precisely quantify channel adjustments (e.g. the sediment budgets) by applying DEM of Difference (DoD) (Brasington *et al.*, 2000a; Lane *et al.*, 2000; Martin and Church, 1995; Milan, 2012; Wheaton *et al.*, 2009).

With the increased number of restoration projects during the last three decades, (Morandi et al., 2014), many studies tried to develop indicators that would allow assessing the efficiency and sustainability of such management actions (Berger, 1997; Brierley and Fryirs, 2008; Dufour and Piégay, 2009; Palmer *et al.*, 2005). An indicator, in fluvial geomorphology, is a simplified description of fluvial forms and dynamics (Corbonnois et al., 2011). Despite these promising new developments, only a few studies combining remote sensing with geomorphological surveys were carried out in restored river monitoring (Chandler *et al.*, 2002; McLean and Church, 1999; Chapuis *et al.*, 2015; MacVicar *et al.*, 2015). For median-sized channels, such as anastomosing channels, a combination of geodetic surveys (TLS – SfM photogrammetry) and

conventional geomorphological methods (e.g. RFID tracking, grain size analysis) is even less often used. It is hypothesized in this study that the combination of remote sensing methods and classical geomorphological survey technics, applied to median-sized active restored channels, provides data of a high precision. This data can be used to produce morphodynamic functional indicators to assess the efficiency and sustainability of management actions. To validate this hypothesis, we used detailed sediment budgets, generated through hybrid remote sensing approaches (TLS, SfM, Total Station) and DoD. This validation technique allows quantifying morphodynamic adjustments at different spatio-temporal scales. The database obtained is used to elaborate functional indicators, targeted to assess both the efficiency and the sustainability of anastomosing channel restoration.

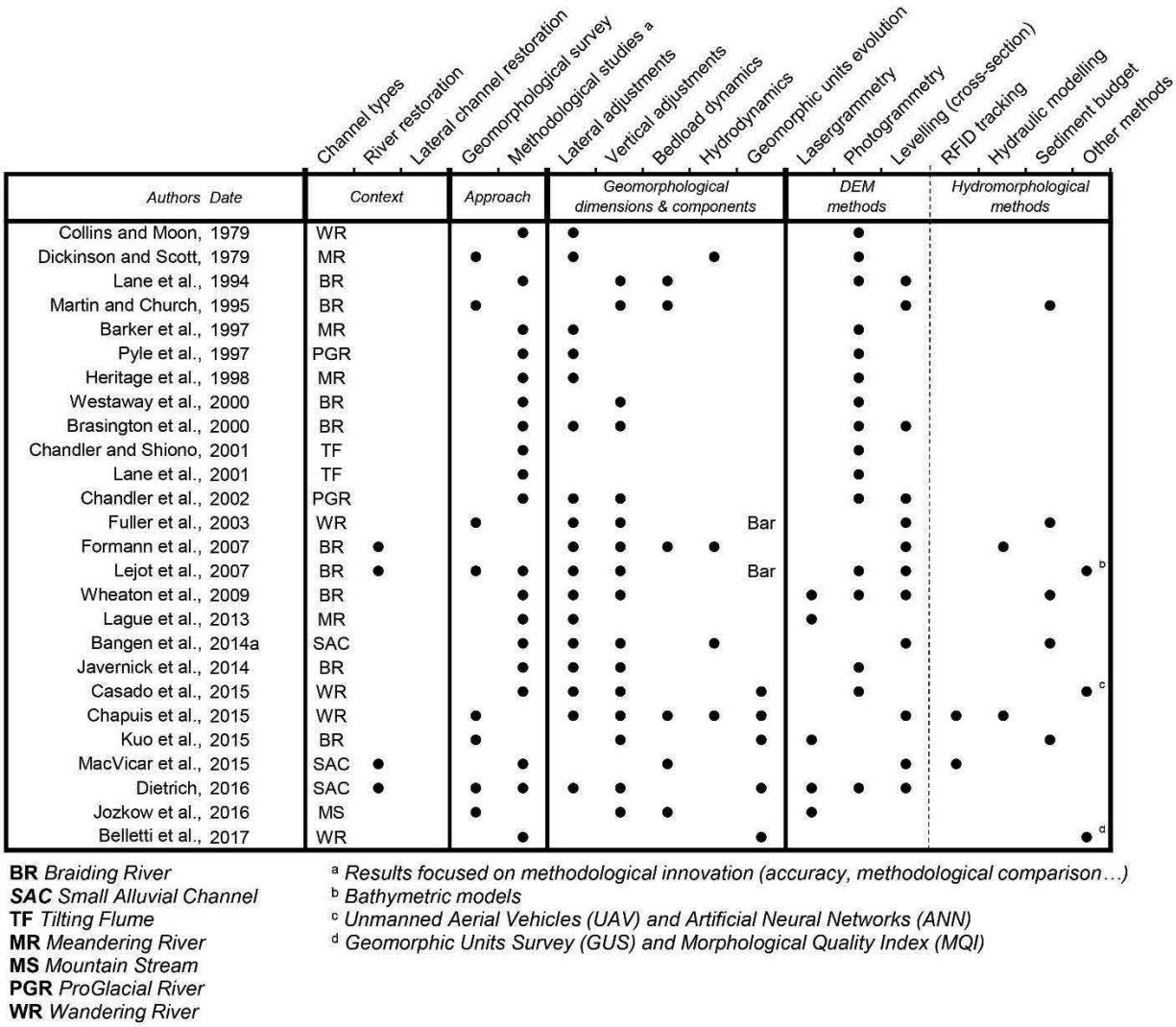


Figure 3. 1 - Studies developed to monitor geomorphological channel changes by using DEM approaches.

2 STUDY SITE

The Rohrschollen artificial island is located about 8 km South East of the City of Strasbourg. It results from the construction of a power plant on the Rhine canal in 1970 (Fig. 3.2-b). It has been highly impacted by engineering works since the beginning of the 19th century (Eschbach *et al.*, submitted). A large diversion dam located at the southern side of the island (Fig. 3.2-b) divert up to 1,550 $m^3.s^{-1}$ towards a power plant by means of an artificial canal (named "Rhine canal"). When discharge is below this threshold, only 13 $m^3.s^{-1}$ feed the Old Rhine. When floods exceed 1,550 $m^3.s^1$, overflows are discharged into the Old Rhine. The agricultural dam located in the northern side of the island allows progressive floods when discharges exceed 2,800 $m^3.s^{-1}$ (CIPR-ICPR, 2012). Consequently, during floods, the island is submerged by static flow. Significant flood retention rarely occurs, about once per decade in average (Q_{10}). Besides, there is no ongoing active morphodynamic processes in the floodplain and the anastomosing channel of on the island. In this study, this channel is called "old channel" (Fig. 3.2-b).

In the framework of the European LIFE+ project, launched in 2012, a floodgate was constructed, as well as a stabilized rockfill canal and a new upstream non-stabilized channel (called "new channel"), which were excavated in the southern part of the island to reconnect the old channel to the Rhine's hydrological regime. Depending on the discharge of the Rhine, water inflow ranges from 2 to 80 $m^3.s^{-1}$ during about 51 days a year in average, when the Rhine discharge ranges between 1,563 and 2,800 $m^3.s^{-1}$. This new mode of functioning should allow re-establishing intense and frequent morphodynamic processes (bank erosion, bedload transport…), especially in the new channel, which was intentionally undersized to induce self-forming adjustments. Our investigations focused on two spatial scales: 1. the whole new channel, and 2. three curvature sectors of this channel corresponding to reaches where lateral erosion was expected to be the highest (noted A, B and C in figure 3.2-c). The morphological evolution of the old channel will not be discussed in this paper. Short and low intensity trial-injections were conducted during summer 2014 (less than 20 $m^3.s^{-1}$ during about 1-2 hrs). The first ecological floods occurred during the Rhine's floods of May and June 2015 (Fig. 3.2-e). Flood 1 was based on an incremental progress with three sporadic peaks (40-70 $m^3.s^{-1}$) and flood 2 was characterized by a high discharge of 60 $m^3.s^{-1}$ during 48 hrs. Diachronic pictures on figure 3.2-d illustrate the effects of floods (enlargement, lateral erosion, bar formation…) in the vicinity of the three studied curvature sectors during the total survey period. The total period covers three states from February 2014 to March 2016 (Fig. 3.3).

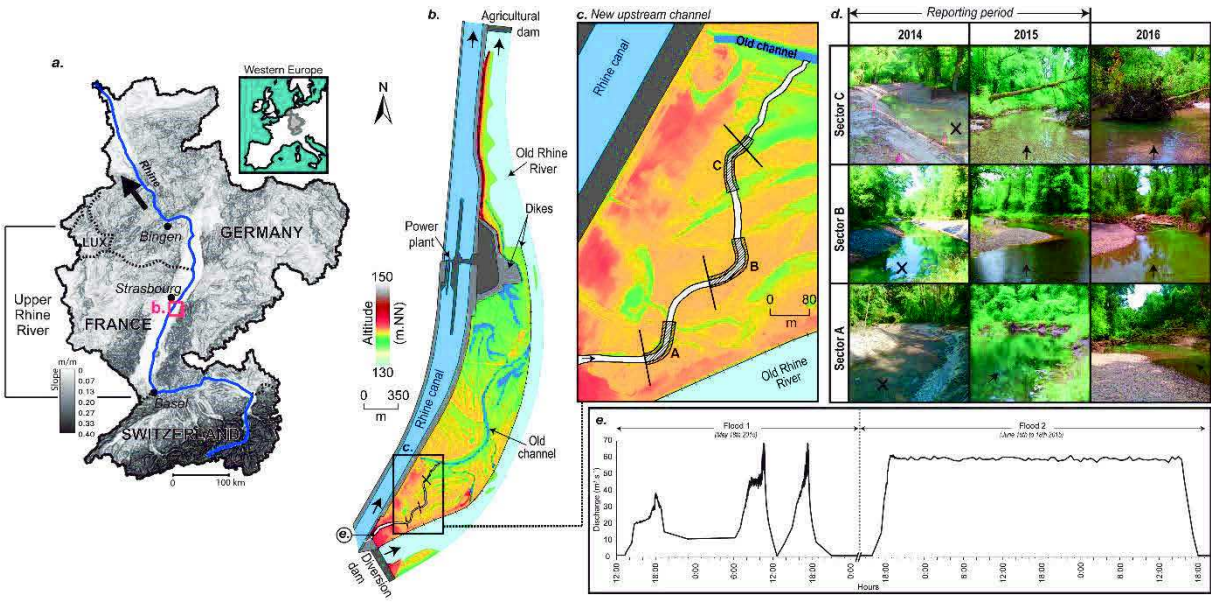


Figure 3. 2 - (a) Location of the Rohrschollen island in the Upper Rhine basin, (b) DEM of the whole study site and location of the main engineering works, (c) three survey sectors located on curvatures of the new channel, (d) pictures of the diachronic evolution close to the three curvature sectors, (e) hydrogram of the reporting period.

3 MATERIAL AND METHODS

3.1 Geodetic survey

3.1.1 TLS and SfM comparison

Focusing on the three main curvature sectors of the new channel (Fig. 3.2-c), the initial state (State 0) was recorded before the first floods by a combination of TLS and SfM methods. TLS was set up with a FARO Focus 3-D with complete vertical and horizontal 360° view. Photogrammetric images were recorded using a calibrated Canon EOS 5D Mark II camera with a focal length of 28 mm. Circular coded-control targets permanently fixed on trees on both river banks were used to process the images and georeference each curvature sector. Point-clouds were generated using the *Photoscan* SfM software. The SfM method accuracy was assessed by cloud to cloud registration between TLS and SfM. Accuracy varied between 2 and 5 cm depending on the sectors and the number of available coded-control targets. The SfM method was therefore considered satisfactory and well-suited to monitor important morphological adjustments and rapid changes in the three curvature sectors (Nadal-Romero *et al.*, 2015; Westoby *et al.*, 2012).

3.1.2 Topographical data

A total station recording was used to detect morphological changes beneath the water surface, as proposed by Lane *et al.* (1994). Regularly spaced cross-sections (20 m) were leveled along the whole channel, as well as one supplementary thalweg point between each cross-section. In fact, such method is time-consuming and can only generate a relatively small set of bathymetric points (Chandler *et al.*, 2002), but provides a reliable terrain-modeling method to quantify changes at the scale of the whole channel. Differential GNSS positioning was used to set up reference points upstream and downstream of the channel. They were connected with the polygonal network in order to provide a comparable diachronic database. Planimetric and

altimetric accuracy were about 3 cm. Thalweg trajectories were extracted using the *ArcGis* plugin "River bathymetric Toolkit" with a 0.5 m raster resolution.

3.1.3 Point-clouds comparison

For each sector, accurate TIN models based on the dense point-clouds were merged with DEM bathymetric data to generate "combined models". The *CloudCompare M3C2* method was used to record differences between point-clouds from two consecutive surveys (Lague *et al.*, 2013; Fig. 3.3). To provide a reliable comparison of high morphological volume changes (especially with regards to lateral erosion), a gridding interpolation was defined before merging two point-clouds. Finally, a script implementation based on a *MatLab* program was used to calculate automatically volume differences between two clouds at two spatial scales: the whole channel and the three sectors.

3.2 Geomorphological survey

3.2.1 Grain size survey

To characterize the grain size at the channel bottom, the Wolman (1954) method was used on bars, riffles and an outcrop of inherited gravel bar exhibiting particularly coarse grain size. Homogeneous grain size patches were delimited and b-axis samples of 100 particles measured on each patch, as recommended by Kondolf et al. (2016). This was used to generate grain size cumulative curves and extract statistical parameters such as the median diameter and standard derivation.

3.2.2 RFID tracking

RFID (passive Radio Frequency IDentification)-tagged particles were used to track bedload movement. We employed low-frequency tags consisting of glass cylinders of 3.8 mm diameter and 23 mm lengh operating at 134.2 kHz and distributed by Texas Instruments (TI-RFID, 2006). 413 particles with a 22.6 to 64 mm b-axis were instrumented. RFID were introduced on the particle by creating a lateral notch for the finer, and by drilling the coarser. Implementation was realized before State 1. Tracers were distributed homogeneously between the three transects at three injection-points located on both sides and in the middle of the channel bottom. The experiment took place during two periods: the first one occurred between the two ecological floods of surveying period 2 and the second one was performed during State 2 (Fig. 3.3).

During field surveys, bars and shallow-water areas were monitored on foot using a 0.46 m diameter loop antenna and tracer positions were recorded using a GPS Trimble 6000 GNSS RTK. An accuracy of 0.05 to 0.10 m for such GPS points was reached after post-processing. In addition, horizontal errors include the detection limit of the antenna, which is around 0.34 m. Maximum cumulative horizontal errors were estimated to be ± 1 m, depending on the relative position of the antenna during the survey, RFID orientation and GPS survey (Arnaud *et al.*, 2015; Chapuis *et al.*, 2014; Lamarre *et al.*, 2005; Schneider *et al.*, 2010). According to operating controls carried out by Arnaud *et al.* (2015), the vertical detection error for the 0.46 m detection system is about 0.69 m. Mean tracer recovery rate attained 41% after the first flood and decreased up to 31% for State 2. Transport distances were calculated automatically by applying the vectorization function in *ArcGis 10.3* and trajectory accuracy was improved manually by using the thalweg position.

3.2.3 Geomorphic unit survey

Following Malavoi and Souchon (2002) and Schmitt *et al.* (2011), the channel was divided into different in-channel Geomorphic Units (GU). These consist in three categories: Riffle, Pool,

Run. Bar was added as a category because it represents an important ecological habitat for pioneer alluvial vegetation. Surveys were conducted during low flow. Points were recorded by GPS RTK to localize the main limits between each GU. Aerial images, acquired during State 1 for another study (Eschbach *et al.*, 2017), were used to improve the delineation. For State 2, we used a ground-control photographic interpretation as well as longitudinal and transverse profiles to improve the delineation between units. For each State, GU surfaces were measured using the "compute geometry" function in *ArcGis 10.3.* In addition, logjams were located for each State.

3.2.4 Survey of lateral and vertical adjustments

Lateral channel mobility for each sector was determined using a sinuosity index that was calculated by using state 0 as the reference situation. An indicator of bankfull geometry evolution was calculated using the width/depth ratio (Schmitt et al., 2007) and the lateral erosion rate (I_{ler}) mentioned by Malavoi and Bravard (2010). The latter corresponds to the eroded width between two floods (w_e) divided by the average width calculated on the whole surveying period (w_{av}), as shown in the following formula:

$$I_{ler} = \left[\frac{w_e}{w_{av}}\right] * 100 \quad (1)$$

An indicator of thalweg vertical variation (I_{vv}) was developed by calculating positive residuals (R^+) and negative residuals (R^-) between the second longitudinal profile (State 2) and the straight trend line of the first longitudinal profile (State 1). Thalweg aggradation of the longitudinal profile is marked by $\Sigma R^+ > \Sigma R^-$. Conversely, $\Sigma R^+ < \Sigma R^-$ indicates thalweg incision. The thalweg longitudinal variability was calculated using the standard deviation of the residuals of both surveys (I_{var}). It was determined on homogeneous reaches defined by previous results.

For the three studied cross-sections, bankfull levels at State 0 appeared systematically lower than at States 1 and 2 (Fig. 3.5-b). This may be the consequence of soil compaction triggered by the use of earth-moving machines during restoration works. To counteract induced errors, we extrapolated bank elevations according to the elevations recorded during surveys 1 and 2 (see dotted lines in Fig. 3.5-b).

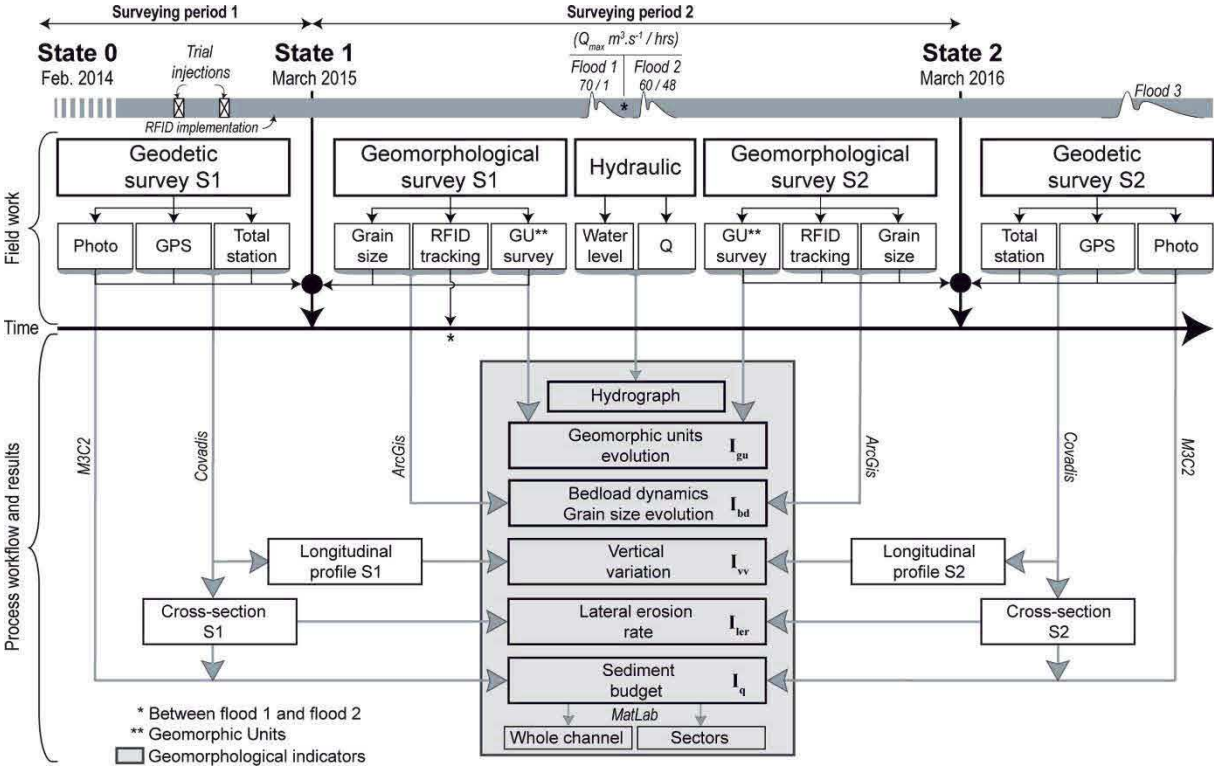


Figure 3. 3 - Top: details of the hydrological events during the reporting period chronology and features of fieldwork acquisition for the two states. Bottom: process workflow (grey arrows) and results produced to achieve a global hydromorphological understanding of the channel functioning.

4 RESULTS

4.1 Multiscale sediment budgets (I_q)

4.1.1 Sediment budget close to the three curvature sectors

Comparisons between the 3-D combined models are locally affected by data gaps (white holes in figure 3.4-a), which results from removing of riverine vegetation and logjams during data processing. However, the colorimetric visualization of diachronic evolutions based on cloud to cloud comparisons allows to locate and quantify accurately erosion versus deposition processes at the channel boundaries.

After the first short and low-intensity hydrological trial-injections (Surveying period 1, Fig. 3.4-a), the bottom of the channel (i.e. vertical dynamics) in the three curvature sectors showed little morphological changes. Lateral dynamics were more pronounced, especially on concave banks (locally bank erosion reached up to 2 meters; sectors A and B) and on convex banks where deposition (formation of convex bars) attained up to 1.5 m (sectors A and B). Volumes of deposition (D) reached 131.3 and 268.7 m^3 on sectors A and B, respectively, while volumes of erosion (E) attained 246.1 and 225.6 m^3, respectively. Sector C recorded the most important adjustments, with maximum erosion-deposition attaining 2.5 m. Similarly, volumes of erosion (E) in this sector were more than 2 times higher than for sectors A and B (Fig. 3.4-a). I_q abstracted from sediment budgets indicates that the deposition volume (D) at sector C is 171 m^3 higher than at sector 1 and 33 m^3 higher than at sector B. Additionally, sediment output (O) reached 235.8 m^3 in sector C while being twice as low in sector A (114.8 m^3) and zero in sector B (because deposition is 43.1 m^3 higher than erosion).

Comparison between State 2 and State 1 (surveying period 2) shows an intensification of erosion in sectors A and B (from 131.3 to 166.5 m^3 and from 225.6 to 310.0 m^3, respectively). Compared to state 1, the lengths of lateral erosion were shorter, while channel scouring at the feet of concave banks was longitudinally more extended, as were deposition areas in convex banks. Although eroded volumes have increased in the two upstream sectors (A = +26 m^3 and B = +84.4 m^3), deposited volumes are higher in sector A (35.2 m^3) and stay stable in sector B (+0.7 m^3). In sector C, erosion prevails upon deposition, which is locally present in the downstream part of the sector. Sediment budget in this sector shows the same tendency, with a huge differential between erosion (245.6 m^3) and deposition (66.5 m^3), but this trend significantly decreased in comparison with survey 1.

4.1.2 Sediment budget along the whole channel

At larger temporal (Surveying periods 1 and 2) and spatial scales (Fig. 3.4-b), cumulative erosion and deposition curves for the whole channel show no differentiation until x = 190 m. This distance is the transition point between the rockfill canal and the new channel (Fig. 3.6-e). From this point on, the differential between erosion and deposition attains rapidly 500 m^3, before reaching 750 m^3 in sector A. The erosion curve is characterized by three main growth-phases corresponding to the three curvature sectors (concave bank erosion). The main one is located in the upstream part of sector C. Cumulative volume of eroded sediment reached up to 3,500 m^3 downstream of the whole new channel (x = 1050 m; Fig. 3.4-b). The deposition curve is logically below the erosion one, but follows the same general tendency. However, the three major deposition growth-peaks are spatially shifted almost 50 m downstream of the erosion growth-peaks, excepted for sector B where the deposition curve is almost parallel to the erosion curve. The final difference in values between the two cumulative curves is up to 1,000 m^3, which represents the volume of fine sediments (part of sand, silt, clay) exported towards the old channel, the floodplain and the Rhine.

Based on surveying period 2, at the scale of the whole channel, we determined specific sediment budgets for each type of component of the channel boundaries: morphological bank types (straight, concave, convex) and channel bottom (Fig. 3.6-b.). The straight bank type includes sediment budgets from both the left and right banks. Consequently, the results for this type of banks appear twice as high as the results for the two other types of banks (i.e. concave and convex). These results are based on elementary stretches comparisons and allowed linking vertical and lateral volumetric evolutions. It appears that erosion is higher for banks than for the channel bottom, with a maximum volume of lateral erosion that could attain 124 m^3 (x = 400 m), while vertical evolution does not exceed 25 m^3 (x = 390 m). This tendency not only affects the concave banks, but also the straight banks, locally impacting the entire cross-sections (especially in sector C). Conversely, depositions logically occur mostly at the channel bottom, and locally on banks (convex but also locally concave ones). In addition, it is worth noting that lateral and vertical erosion-deposition volumes are relatively low between 500 and 650 m.

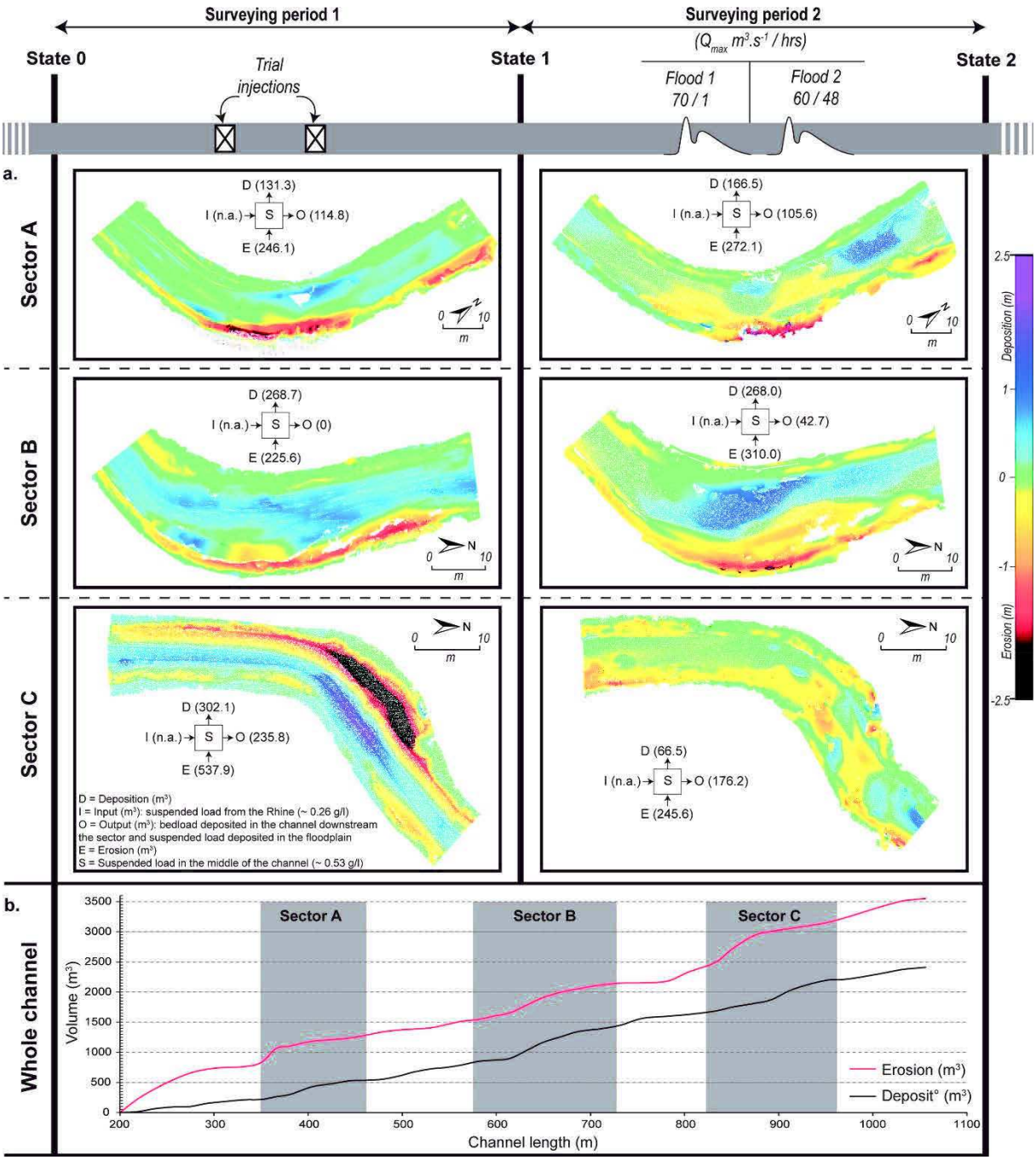
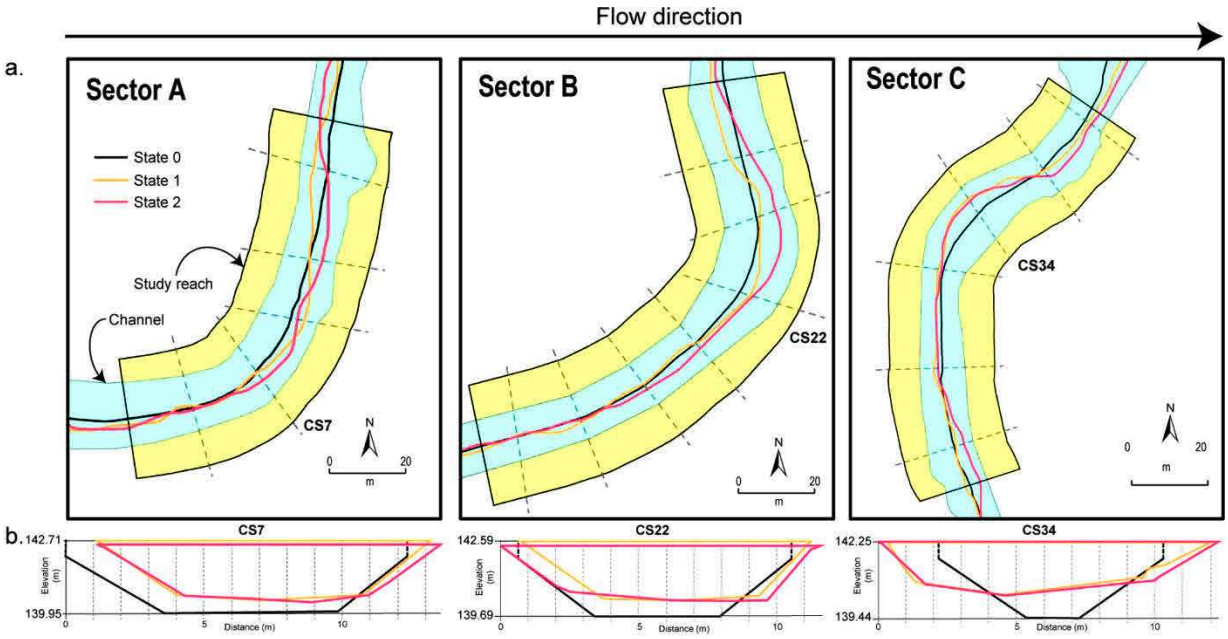


Figure 3. 4 - (a) Comparison of 3-D combined models using M3C2 during both surveying periods on the three curvature sectors, including sediment budgets. (b) Global cumulative sediment budget for the whole channel during both surveying periods.

4.2 Lateral channel evolution (I_{ler})

In the three curvature sectors, the position of the thalweg shifted locally up to 7 m towards concave banks, while mean sinuosity increased from 1.0 to 1.05. This indicates curvature accentuation and the lateral migration of the thalweg during floods (Fig. 3.5-a). Bankfull surfaces tended to converge towards a same range between 18 and 20 m² (Fig. 3.5-c). Widths increased in all cross-sections, especially in CS22 (+1.67 m; +16%) and CS34 (+4.39 m; + 52%). The W/D ratio increased from 5.56 to 7.61 in CS7, from 6.38 to 7.68 in CS22, and from 4.07 to 8.96 in CS34. Lateral erosion (I_{ler}) rate was very low for CS7 with a value of 0.3 % during the surveying period 1 and 2.5 % during the surveying period 2. For CS22, the rate increased from

5.7 % to 9.2 % between the two surveying periods. CS34 recorded the highest rate related to the first surveying period (33.5 %) followed by a lowest rate (5.5 %) for the second surveying period.



c.

	State 0	State 1	State 2	State 0	State 1	State 2	State 0	State 1	State 2
Surface (m²)	26.64	19.90	20.89	17.16	17.31	19.17	17.82	16.19	18.60
Width (m)	12.26	12.30	12.61	10.46	11.10	12.13	8.52	12.29	12.91
Average depth (m)	2.19	1.64	1.66	1.64	1.56	1.58	2.09	1.32	1.44
w/d	5.56	7.39	7.61	6.38	7.12	7.68	4.07	9.33	8.96
Lateral erosion rate (%)		*0.3*	*2.5*		*5.7*	*9.2*		*33.5*	*5.5*

Figure 3. 5 - Examples of lateral channel evolutions in the three curvature sectors, with (a) thalweg evolution, (b) examples of diachronic cross-sections and (c) resulting indicators of lateral channel evolution (I_{ler}).

4.3 Vertical variation (I_{vv})

The comparison of longitudinal profiles during surveying period 2 (Fig. 3.6-e) allow identifying thalweg vertical variations, characterized by aggradation sectors which corresponds notably to riffles (e.g. x = 240; 290; 500; 980 m) and scour sectors that corresponds to pools (e.g. x = 225; 260; 425; 725; 875 m). A stable sector, covering sector B, was identified. It extends from 530 m to 700 m. No logjams are located between 425 and 830 m. In fact, these are especially located in the curvature sectors A and C (Fig. 3.6-e). These sectors are also characterized by high vertical evolutions.

To improve the interpretation of global longitudinal evolution, an indicator of vertical variation (I_{vv}) was developed by using the cumulative residuals along the channel. Results reveal a longitudinal reversal characterized by three main tendencies (Fig. 3.6-a). The first sector is characterized by a thalweg incision tendency that extends from 225 m to 510 m ($\Sigma R^+ < \Sigma R^-$). Low cumulative residual variations between 510 m and 645 m indicate vertical stability. Conversely, the thalweg is characterized by an aggradation tendency between 645 m and 1,150 m. The thalweg longitudinal variability shows an important augmentation in the standard deviation, from original values around 0.1 for the whole channel at State 0. For State 1 and 2, the standard deviation increased to 0.15 - 0.41 and 0.15 - 0.28, for the upstream and downstream sectors, respectively. By contrast, these values stayed around 0.1 in the identified stable sector.

4.4 Evolution of geomorphic units (I_{gu})

The evolution of geomorphic units was surveyed to assess gain or loss of ecological habitats. The total area covered by the geomorphic units increased from 100 to 125.2 ares between the two surveys (Fig. 3.6-g). This tendency reveals a general channel enlargement (from 2 to 4 m in average). Between the four geomorphic units: Riffle, Pool, Run and Bar, major growth concerned Runs with +11 ares. Pools increased by 5.5 ares, closely followed by Riffles and Bars (+ 4.5 ares and + 4.2 ares, respectively).

4.5 Grain size variation and bedload dynamics (I_{bd})

With regards to the combined grain size results from both monitoring periods (Fig. 3.6-c), we observed an average D_{50} of 15.3 ± 5 mm, except for samples located at x = 576 and 602 m where D_{50} is higher than 50 ± 15 mm (standard deviation). Indeed, this sector exhibits a significant coarser grain size, resulting from a large median in-channel gravel bar inherited from past Rhine dynamics, as revealed by an historical study (Fig. 3.6-f; Eschbach *et al., Submitted*). The gravel bar extends from 530 to 815 m under the new channel, and outcrops in the riverbed between x = 530 and 675 m.

Results of RFID tracking are given on figure 3.7 and used as an indicator for bedload dynamics (I_{bd}). According to Lamarre and Roy (2008) and Milan and Large (2014), tracers travel distances recorded in survey 1 (S1) are not representative because of an overexposure phenomenon, due to the particles setup. The results of the two survey periods don't show any link between transport distances and particle grain size. The farthest travelling tracer was found 196 m downstream of its deployment site in transect 8. The distribution of tracers-clouds was relatively homogeneous through time at transect 8 as well as for survey 1 in transect 9. A significant decrease in travel distances for the tracers was observed for survey 2 in transect 9. At this location, mean transport distances drop down from 24.2 to 12.4 m while they increased in transect 8 (from 24.7 to 31.5 m). By contrast to the recovery rate recorded for transects 8 and 9 (47 % and 46 %, respectively), the rate for transect 10 (6.5 %) is very low, which dampen the robustness of results. Nevertheless, it can be noted that mean transport distances for this transect tended to decrease, from 26.8 to 17.6 m. Results were summarized on figure 3.6-d and, to improve readability, consider cumulative travel distance according to the grain size of tracers. Despite a slight increase in cumulative travel distances for transect 8, these have decreased in the other two transects and especially in transect 9.

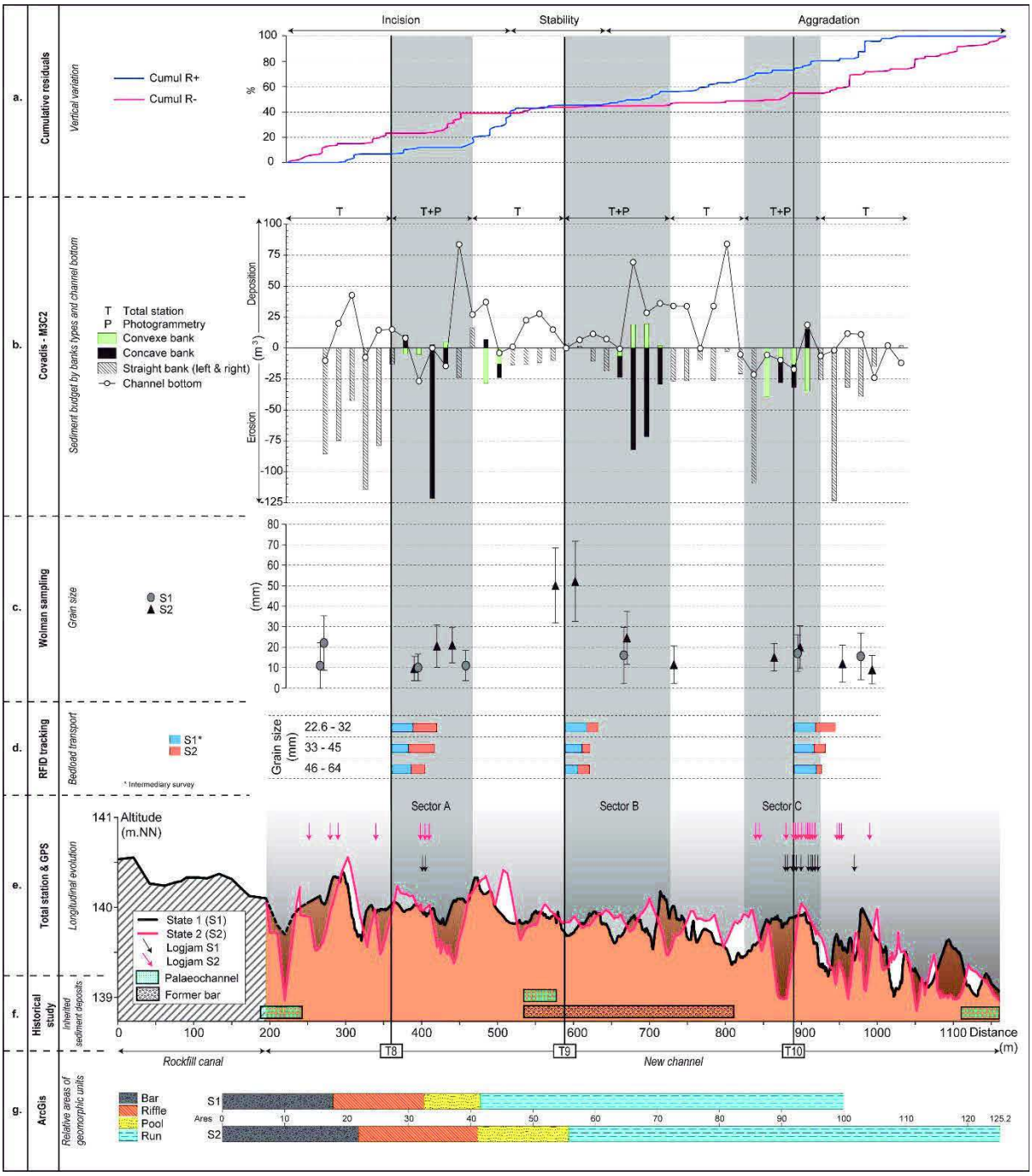


Figure 3. 6 - Longitudinal evolutions between (a) vertical variation of cumulative residuals, (b) sediment budget and geomorphological results: (c) grain size, (d) bedload mobility, (e) longitudinal profile evolution, (f) inherited sediment deposits, (g) geomorphic units evolution.

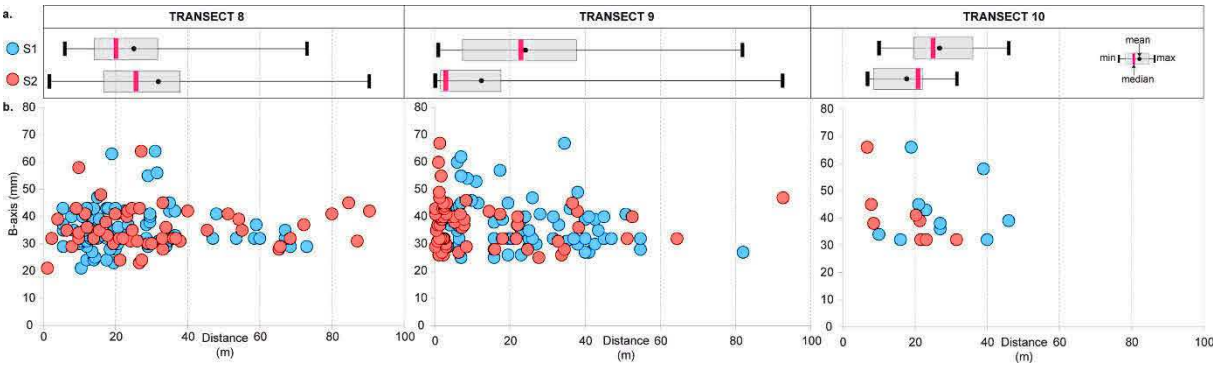


Figure 3. 7 - (a) Box-plots of tracer travel distances for the two surveying periods. (b) Travel distances of tracers detected during both surveying periods and according to the grain size of RFID particles. Some tracers are coarser than the largest grain size class of figure 3.6-d.

5 DISCUSSION

5.1 Methodological contribution: relevance of geodetic methods for an accurate morphodynamic river survey

Our findings demonstrate that TLS and SfM-photogrammetry are suitable to monitor rapid changes in small active channels. While these methods are able to generate high spatial resolution 3-D data to survey bank erosion, the obtained point-clouds must be combined with a bathymetric survey in order to produce comparable models. Cross-section surveys issued from Total Station and GPS measurements are time-consuming and offer lower resolutions (Bangen *et al.*, 2014b; Barker *et al.*, 1997; Brasington *et al.*, 2000a; Lane *et al.*, 1994). Covering a 1 km length of the whole channel reach, with cross-sections spaced every 20 m and composed each of 5 to 7 leveling points, takes a group of 6 people 1 to 2 days, depending on field constraints (weather, riparian vegetation, logjams…). However, this method allows to determine geomorphological changes with an acceptable resolution along reaches for which geomorphological changes are not rapid and intense. In addition, diachronic topographic points are convenient for producing usual geomorphic features such as longitudinal profiles and cross-sections and to delineate geomorphic units. During surveys, the position of topographic points was accurately determined in order to take into account local slope discontinuity, for both the vertical and lateral dimensions, as previously recommended by Ferguson *et al.* (1992) and Lane *et al.* (1994).

3-D modeling of small active channels is limited by the presence of riparian vegetation and logjams, which may partially cover banks and generate gaps in point-clouds during data processing. To avoid this constraint, we recommend to survey in winter, when vegetation is the least developed. To avoid loss of data due to logjams and to improve stereoscopic pair acquisitions, we recommend to combine terrestrial and local aerial photogrammetry obtained by drone or L-shaped bracket (Grussenmeyer *et al.*, 1996). Despite the important implementation constraints (time and cost), it would be interesting to explore the potential of topographic/bathymetric LIght Detection And Ranging (LIDAR) to survey morphological changes on larger scales. In geographical settings where the water depth is less to 2 m, this method is promising, especially to improve the resolution of bathymetric point-clouds (Lague *et al.*, 2013). It will be tested in the near future on the Rohrschollen Island and the results compared to those presented in this article.

5.2 Thematic contribution: combining geodetic survey to geomorphological methods in restored small active lateral channels

Our results show that comparing 3-D models across the whole surveying period allowed identifying and assessing accurately morphological changes induced by water inputs (Fig. 3.4). Despite the sporadic character of short-floods that occurred during trial injections (surveying period 1), important morphological changes were observed because the channel was newly dug and featured no sorting and no coarse sediments pavement. The downstream part of the channel initially showed a narrow section (Fig. 3.2-d, sector C in 2014). This explains why morphological changes, especially enlargement, were the highest in sector C (Fig. 3.4-a-sector C, surveying period 1). For surveying period 2, erosion and deposition volumes were slightly more important in sector A and B, but decreased significantly in sector C by comparison to surveying period 1. Despite a negative sediment budget for the downstream part of the channel (Fig. 3.4-a-sector C, surveying period 2; Fig. 3.6-b), I_{vv} reveals a general aggradation tendency for the thalweg. This shows that this indicator provides a global characterization of the vertical thalweg evolution, but fails to differentiate between evolutions that affect the banks and those that affect the thalweg. Finally, the longitudinal evolution, analyzed by comparing diachronic thalweg longitudinal profiles, is more sensitive to the deepest-point variations and to an increase of lateral morphological variability. It may be partially non-correlated to the channel bottom sediment budget, which itself indicates a general evolution of the channel bottom in its lateral dimension.

At the whole channel scale, combining geodetic data with geomorphological results provides a better understanding of morphological functioning. The source of sediment input into the channel is bank erosion, especially in straight and concave banks (Fig. 3.6-b). While fine sediments are exported towards the old channel, the adjacent floodplain and/or the Rhine (Fig. 3.4-b), transport distances for coarser particles are relatively low (20 m in average), as well as dispersion (65 m in average). This means that coarser sediments input by lateral erosion contributes significantly to the diversification of the geomorphic units, as also shown by MacWilliams *et al.* (2006) and Sear (1996) (Fig. 3.6-g). The absence of correlation between grain size and particle travel distances indicates non-selective bedload dynamics. On the other hand, linking morphodynamic evolutions with geomorphological features inherited from the past emphasized two particularities of the study site. Firstly, the comparison of diachronic longitudinal profiles shows an important scour point located downstream of the rockfill canal (Fig. 3.6-e). In this sector, the new channel was dug through a large palaeochannel, which was filled by fine sandy-loam sediments after the correction works (Eschbach *et al.*, Submitted). Therefore, current scouring is exacerbated during floods. This is also enhanced by a coarse sediment deficit in this upstream extremity of the new channel, which is caused by the absence of bedload input by the floodgate. Secondly, the evolution of longitudinal profiles between x = 530 and 675 m is relatively weak, because of the presence of an old gravel bar outcropping at the bottom of the new channel (Fig. 3.6-c & f). This inherited gravel bar, composed of pebbles with b-axis > 45 mm (Fig. 3.6-c), controls both vertical (see stability sector in figure 3.6-a) and lateral evolutions (Fig. 3.6-b), while considerably decreasing bedload transport for all grain size classes (Fig. 3.6-d).

5.3 Recommendations and perspectives

As shown by numerous authors such as Bangen et al. (2014a), Legleiter (2012), Rayburg et al. (2009) and Westaway et al. (2003), hybrid methods based on SfM-photogrammetry and Total Station surveys represent relevant compromises between a spatial resolution (that can be considered as satisfactory for managers and geomorphologists) and field constraints. DEM of difference achieved using the M3C2 method is a powerful tool to (i) visualize morphological

changes, and (ii) produce detailed sediment budgets at different spatial and temporal scales (Wheaton et al., 2009). However, in the curvature sectors, we recommend to try to anticipate, as much as possible, future lateral evolutions in order to adapt the delineation of the point-clouds scene and facilitate the workflow process. Topographical datasets can also be used to supply in turn hydraulic models, which could perform calculations of local bed-material and transport rates, as recommended by Chandler et al. (2002) and achieved for example in Chapuis et al. (2015) or Formann et al. (2007). This is also currently being achieved on the Rohrschollen Island (Piasny, 2016).

Our results also demonstrate the usefulness of developing simple indicators by combining multi-dimensional approaches (i.e., curvatures and whole channel surveys), especially in the case of restored active small channels. These indicators provide systematic and comparable data sets to be used for post-project assessment, as shown for example in Downs and Kondolf (2002) or Morandi et al. (2014). Based on topographical surveys, three indicators were developed in this study in order to survey lateral (Iler) and vertical (Ivv and Ivar) dynamics. For example, Iler demonstrates that the understanding of channel adjustments can be improved by using simple indictors. Results of Iler indicate that the whole channel surfaces have reached approximately the same value (~ 20 m² in average; Fig. 5-c). Furthermore, Iler shows the importance of lateral mobility processes on the studied restored channel, e.g. the lateral evolution of sector C was higher than 33% of the width of CS34 during the first floods. It will be particularly relevant to follow this indicator in the future because floods are expected to produce active bank erosion, a targeted process that will in turn induce habitat diversification. Complemented by detailed 3-D models in curvature sectors, the quantification of morphological changes could be assessed in terms of volumes by using sediment budgets (Iq). Despite any information supplies about spatial in-stream erosion-deposition dynamics, the Iq developed in this study enables to quantify morphological changes at different spatio-temporal scales and to determine volumes of sediment exported from the reach. Sediments budget appears to be a particularly powerful tool when applied to the different components of the channel boundaries (morphological bank types: straight, concave, convex, and channel bottom).

This study reveals the importance to encourage the self-adjustment of channels through bank erosion, especially in the case of new channels mimicking natural forms and dynamics. Bank erosion favor sediment supply to the channel, frequent local deposition (riffle-pool sequences), longitudinal and lateral diversification. Consequently, this enhance ecological potential because bed grain size, bedload dynamics (Ibd) and geomorphic unit evolution (Igu) represent key parameters for aquatic habitats and the ecological potential of restored channels (Beisel et al., 1998; Morandi et al., 2014).. All these processes are intensified by logjams, which are also produced by bank erosion (Beechie et al., 2010; Choné and Biron, 2016). Additionally our study identifies two main controlling factors of morphological evolution: (i) in the upstream part of the new channel, the presence of a palaeochannel composed of fine non-cohesive sediments exacerbates lateral and vertical erosion, and (ii) in the median sector, an inherited bar composed by coarse grain size limits thalweg vertical adjustments, as well as lowers the slope and the bedload transport.

These different tendencies will also be assessed with a numerical 2D hydro-sedimentary model, which is currently under development. This will notably allow explaining morphodynamic adjustments according to hydraulic variables, and producing future operational scenarios for managers. For future restoration projects, we also recommend to realize an historical study and, on this basis, perform sediment grain size analysis (since palaeochannels may be filled by fine sediments, while inherited bars may be composed of particularly coarse sediments; Eschbach et al., Submitted) in order to determine, with the best

possible accuracy, potential morphodynamic post-restoration adjustments, especially when the restoration is carried out in a complex fluvial environment (Berger, 1997).

6 ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by the European Community (LIFE08 NAT/F/00471), the City of Strasbourg, the French National Center for Scientific Research (CNRS), the ZAEU (Zone Atelier Environnementale Urbaine - LTER), the Water Rhin-Meuse Agency, the DREAL Alsace, the "Région Alsace", the "Département du Bas-Rhin" and the company "Électricité de France". The authors would like to thank Stoil Chapkanski, Alexandre Hubeny, Léa Keiser and Jordane Serouilou for field assistance as well as Etienne Supper and Julie Roy for fieldwork and data processing.

7 REFERENCES

Arnaud, F., Piégay, H., Vaudor, L., Bultingaire, L., Fantino, G., 2015. Technical specifications of low-frequency radio identification bedload tracking from field experiments: Differences in antennas, tags and operators. In *Geomorphology* 238, 37–46. doi:10.1016/j.geomorph.2015.02.029

Bangen, S., Wheaton, J., Bouwes, N., Jordan, C., Volk, C., Ward, M.B., 2014a. Crew variability in topographic surveys for monitoring wadeable streams: a case study from the Columbia River Basin. In *Earth Surface Processes and Landforms* 39, 2070–2086. doi:10.1002/esp.3600

Bangen, S.G., Wheaton, J.M., Bouwes, N., Bouwes, B., Jordan, C., 2014b. A methodological intercomparison of topographic survey techniques for characterizing wadeable streams and rivers. In *Geomorphology* 206, 343–361. doi:10.1016/j.geomorph.2013.10.010

Barker, R., Dixon, L., Hooke, J., 1997. Use of terrestrial photogrammery for monitoring and measuring bank erosion. In *Earth Surface Processes and Landforms* 22, 1217–1227.

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. In *BioScience* 60, 209–222.

Beisel, J.-N., Usseglio-Polatera, P., Thomas, S., Moreteau, J.-C., 1998. Stream community structure in relation to spatial variation: the influence of mesohabitat characteristics. In *Hydrobiologia* 389, 73–88.

Belletti, B., Rinaldi, M., Buijse, A.D., Gurnell, A.M., Mosselman, E., 2014. A review of assessment methods for river hydromorphology. In *Environmental Earth Sciences* 73, 2079–2100. doi:10.1007/s12665-014-3558-1

Belletti, B., Rinaldi, M., Bussettini, M., Comiti, F., Gurnell, A.M., Mao, L., Nardi, L., Vezza, P., 2017. Characterising physical habitats and fluvial hydromorphology: A new system for the survey and classification of river geomorphic units. In *Geomorphology* 283, 143–157. doi:10.1016/j.geomorph.2017.01.032

Berger, A.R., 1997. Assessing rapid environmental change using geoindicators. In *Environmental Geology* 32, 36–44.

Bernhardt, E.S., Palmer, M.A., Allan, J.D., Alexander, G., Barnas, K., Brooks, S., Carr, J., Clayton, S., Dahm, C., Follstad-Shah, J., others, 2005. Synthesizing US river restoration efforts. In *Science* 308, 636–637.

Boike, J., Yoshikawa, K., 2003. Mapping of periglacial geomorphology using kite/balloon aerial photography. In *Permafrost and Periglacial Processes* 14, 81–85. doi:10.1002/ppp.437

Brasington, J., Rumsby, B.T., McVey, R.A., 2000a. Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey. In *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 973–990. doi:10.1002/1096-9837(200008)25:9<973::AID-ESP111>3.0.CO;2-Y

Brasington, J., Rumsby, B.T., McVey, R.A., 2000b. Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey. In *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 973–990.

Brierley, G.J., Fryirs, K.A., 2008. River Futures: An Integrative Scientific Approach to River Repair. Island Press, 325 p.

Buchanan, B.P., Walter, M.T., Nagle, G.N., Schneider, R.L., 2012. Monitoring and assessment of a river restoration project in central New York. In *River Research and Applications* 28, 216–233. doi:10.1002/rra.1453

Casado, M., Gonzalez, R., Kriechbaumer, T., Veal, A., 2015. Automated Identification of River Hydromorphological Features Using UAV High Resolution Aerial Imagery. In *Sensors* 15, 27969–27989. doi:10.3390/s151127969

Chandler, J., Ashmore, P., Paola, C., Gooch, M., Varkaris, F., 2002. Monitoring River-Channel Change Using Terrestrial Oblique Digital Imagery and Automated Digital Photogrammetry. In *Annals of the Association of American Geographers* 92, 631–644. doi:10.1111/1467-8306.00308

Chandler, J.H., Shiono, K., 2001. Measuring flume surfaces for hydraulics research using a Kodak DCS460. In *Photogrammetric record* 17, 39–61.

Chapuis, M., Bright, C.J., Hufnagel, J., MacVicar, B., 2014. Detection ranges and uncertainty of passive Radio Frequency Identification (RFID) transponders for sediment tracking in gravel rivers and coastal environments. In *Earth Surface Processes and Landforms* 39, 2109–2120. doi:10.1002/esp.3620

Chapuis, M., Dufour, S., Provansal, M., Couvert, B., de Linares, M., 2015. Coupling channel evolution monitoring and RFID tracking in a large, wandering, gravel-bed river: Insights into sediment routing on geomorphic continuity through a riffle–pool sequence. In *Geomorphology* 231, 258–269. doi:10.1016/j.geomorph.2014.12.013

Choné, G., Biron, P.M., 2016. Assessing the Relationship Between River Mobility and Habitat. In *River Research and Applications* 32, 528–539. doi:10.1002/rra.2896

CIPR-ICPR, 2012. Plan d'action contre les inondations 1995 - 2010 : objectifs opérationnels, mise en oeuvre et résultats - Bilan synthétique. Coblence.

Collins, S., Moon, G., 1979. Stereometric Measurement of Streambank Erosion. In *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 45, 183–190.

Corbonnois, J., Jacquemot, T., Giovannacci, L., Beck, T., Ghachi, M.E., 2011. Les indicateurs de l'évolution actuelle des lits fluviaux. Etude de cours d'eau du Nord-Est de la France. In Revue Géographique de l'Est 51, 17 p.

Dickinson, W., Scott, A., 1979. Analysis of Streambank Erosion Variables. In *Canadian Agricultural Engineering* 21, 19–25.

Dietrich, J.T., 2016. Riverscape mapping with helicopter-based Structure-from-Motion photogrammetry. In *Geomorphology* 252, 144–157. doi:10.1016/j.geomorph.2015.05.008

Downs, P.W., Kondolf, G.M., 2002. Post-Project Appraisals in Adaptive Management of River Channel Restoration. In *Environmental Management* 29, 477–496. doi:10.1007/s00267-001-0035-X

Dufour, S., Piégay, H., 2009. From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits. In *River Research and Applications* 25, 568–581. doi:10.1002/rra.1239

Eschbach, D., Piasny, G., Schmitt, L., Pfister, L., Grussenmeyer, P., Koehl, M., Skupinski, G., Serradj, A., 2017. Thermal-infrared remote sensing of surface water-groundwater exchanges in a restored anastomosing channel (Upper Rhine River, France). In *Hydrological Processes* 31, 1113–1124. doi:10.1002/hyp.11100

Eschbach, D., Schmitt, L., Imfeld, G., May, J.-H., Payraudeau, S., Preusser, F., Trauerstein, M., Skupinski, G., Submitted. Long-term river trajectories to enhance restoration efficiency and sustainability on the Upper Rhine: an interdisciplinary study (Rohrschollen Island, France). In *Hydrology and Earth System Sciences*.

Fausch, K.D., Torgersen, C.E., Baxter, C.V., Li, H.W., 2002. Landscapes to Riverscapes: Bridging the Gap between Research and Conservation of Stream Fishes. In *BioScience* 52, 483. doi:10.1641/0006-3568(2002)052[0483:LTRBTG]2.0.CO;2

Ferguson, R.I., Ashmore, P.E., Ashworth, P.J., Paola, C., Prestegaard, L., 1992. Measurements in a braided river Chute and Lobe: 1. Flow pattern, sediment transport and channel change. In *Water Resources Research* 28, 1877–1886.

Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L., Carbonneau, P.E., 2013. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. In *Earth Surface Processes and Landforms* 38, 421–430. doi:10.1002/esp.3366

Formann, E., Habersack, H.M., Schober, S., 2007. Morphodynamic river processes and techniques for assessment of channel evolution in Alpine gravel bed rivers. In *Geomorphology* 90, 340–355. doi:10.1016/j.geomorph.2006.10.029

Fuller, I.C., Large, A.R.G., Milan, D.J., 2003. Quantifying channel development and sediment transfer following chute cutoff in a wandering gravel-bed river. In *Geomorphology* 54, 307–323. doi:10.1016/S0169-555X(02)00374-4

Grussenmeyer, P., Landes, T., Doneus, M., Lerma, J.-L., 2016. Basics of range-based modelling techniques in Cultural Heritage (Chapter pp. 305-368). In : *3D*

Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage, Publisher: Whittles Publishing, Editors: Efstratios Stylianidis, Fabio Remondino, 388 pages, ISBN 978-184995-168-5

Grussenmeyer, P., Perdrizet, F., 1996. Archeological Photogrammetry with small format cameras: the survey of the forum vetus in Sarmizegetusa (Romania). *International archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vienna, 9-19 July 1996. ISSN 0256-1840,Vol. XXXI Part B5, p200-204.

Gurnell, A.M., Morrissey, I.P., Boitsidis, A.J., Bark, T., Clifford, N.J., Petts, G.E., Thompson, K., 2006. Initial Adjustments Within a New River Channel: Interactions Between Fluvial Processes, Colonizing Vegetation, and Bank Profile Development. In *Environmental Management* 38, 580–596. doi:10.1007/s00267-005-0190-6

Heritage, G., Fuller, I., Charlton, M., Brewer, P., Passmore, D., 1998. CDW photogrammetry of low relief fluvial features: accuracy and implications for reach-scale sediment budgeting. In *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 1219–1233.

Hickin, E.J., 1983. River Channel Changes: Retrospect and Prospect, in: Collinson, J.D., Lewin, J. (Eds.), Modern and Ancient Fluvial Systems. Blackwell Publishing Ltd., pp. 59–83, 59–83p.

Javernick, L., Brasington, J., Caruso, B., 2014. Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. In *Geomorphology* 213, 166–182. doi:10.1016/j.geomorph.2014.01.006

Jozkow, G., Borkowski, A., Kasprzak, M., 2016. Monitoring of fluvial transport in the mountain river bed using terrestrail laser scanning. In *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLI-B7, 523–528. doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B7-523-2016

Kondolf, G.M., 2016. Tools in Fluvial Geomorphology. John Wiley & Sons, 569 p.

Kuo, C.-W., Brierley, G., Chang, Y.-H., 2015. Monitoring channel responses to flood events of low to moderate magnitudes in a bedrock-dominated river using morphological budgeting by terrestrial laser scanning. In *Geomorphology* 235, 1–14. doi:10.1016/j.geomorph.2015.01.019

Lague, D., Brodu, N., Leroux, J., 2013. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82, 10–26. doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009

Lamarre, H., Mac Vicar, B., Roy, A.G., 2005. Using Passive Integrated Transponder (PIT) Tags to Investigate Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers. In *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. In *Geomorphology* 99, 270–279. doi:10.1016/j.geomorph.2007.11.005

Lane, S.N., Chandler, J.H., Porfiri, K., 2001. Monitoring river channel and flume surfaces with digital photogrammetry. In *Journal of Hydraulic Engineering* 127, 871–877.

Lane, S.N., James, T.D., Crowell, M.D., 2000. Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research. In *Photogrammetric record* 16, 793–821.

Lane, S.N., Richards, K.S., Chandler, J.H., 1994. Developments in monitoring and modelling small-scale river bed topography. In *Earth Surface Processes and Landforms* 19, 349–368.

Legleiter, C.J., 2012. Remote measurement of river morphology via fusion of LiDAR topography and spectrally based bathymetry. In *Earth Surface Processes and Landforms* 37, 499–518. doi:10.1002/esp.2262

Lejot, J., Delacourt, C., Piégay, H., Fournier, T., Trémélo, M.-L., Allemand, P., 2007. Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. In *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 1705–1725. doi:10.1002/esp.1595

MacVicar, B., Chapuis, M., Buckrell, E., Roy, A., 2015. Assessing the Performance of In-Stream Restoration Projects Using Radio Frequency Identification (RFID) Transponders. In *Water* 7, 5566–5591. doi:10.3390/w7105566

MacWilliams, M.L., Wheaton, J.M., Pasternack, G.B., Street, R.L., Kitanidis, P.K., 2006. Flow convergence routing hypothesis for pool-riffle maintenance in alluvial rivers. In *Water Resources Research* 42. doi:10.1029/2005WR004391

Malavoi, J.R., Souchon, Y., 2002. Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière: clé de détermination qualitative et mesures physiques. In *Bulletin Fr. Pêche Pisciculture* 365/366, 367–372.

Malavoi, J.R., Bravard, J.P., 2010. Eléments d'hydrogéomorphologie fluviale. Rapport ONEMA. 228 p.

Martin, Y., Church, M., 1995. Bed-material transport estimated from channel surveys: Vedder River, British Columbia. In *Earth Surface Processes and Landforms* 20, 347–361.

McLean, D.G., Church, M., 1999. Sediment transport along lower Fraser River: 2. Estimates based on the long-term gravel budget. In *Water Resources Research* 35, 2549–2559. doi:10.1029/1999WR900102

Milan, D.J., 2012. Geomorphic impact and system recovery following an extreme flood in an upland stream: Thinhope Burn, northern England, UK. In *Geomorphology* 138, 319–328. doi:10.1016/j.geomorph.2011.09.017

Milan, D.J., Large, A.R.G., 2014. Magnetic tracing of fine-sediment over pool-riffle morphology. In *CATENA* 115, 134–149. doi:10.1016/j.catena.2013.11.003

Morandi, B., Piégay, H., Lamouroux, N., Vaudor, L., 2014. How is success or failure in river restoration projects evaluated? Feedback from French restoration projects. In *Journal of Environmental Management* 137, 178–188. doi:10.1016/j.jenvman.2014.02.010

Murtiyoso, A. and Grussenmeyer, P., 2017. Documentation pf heritage buildings using close-range UAV images: Dense Matching Issues, Comparison, and Case Studies. In *The Photogrammetric Record an International Journal of Photogrammetry* 32(159), DOI: 10.1111/phor.12197 (under publication).

Nadal-Romero, E., Revuelto, J., Errea, P., López-Moreno, J.I., 2015. The application of terrestrial laser scanner and SfM photogrammetry in measuring erosion and deposition processes in two opposite slopes in a humid badlands area (central Spanish Pyrenees). In *SOIL* 1, 561–573. doi:10.5194/soil-1-561-2015

Painter, R.B., Blyth, K., Mosedale, J.C., Kelly, iM, 1974. The effect of afforestation on erosion processes and sediment yield. In *Effects of Man on the Interface of the Hydrological Cycle with the Physical Environment* , 62–67.

Palmer, M.A., Bernhardt, E.S., Allan, J.D., Lake, P.S., Alexander, G., Brooks, S., Carr, J., Clayton, S., Dahm, C.N., Follstad Shah, J., Galat, D.L., Loss, S.G., Goodwin, P., Hart, D.D., Hassett, B., Jenkinson, R., Kondolf, G.M., Lave, R., Meyer, J.L., O'Donnell, T.K., Pagano, L., Sudduth, E., 2005. Standards for ecologically successful river restoration: Ecological success in river restoration. In *Journal of Applied Ecology* 42, 208–217. doi:10.1111/j.1365-2664.2005.01004.x

Palmer, M.A., Menninger, H.L., Bernhardt, E., 2010. River restoration, habitat heterogeneity and biodiversity: a failure of theory or practice? In *Freshwater Biology* 55, 205–222. doi:10.1111/j.1365-2427.2009.02372.x

Piasny, G., Finaud-Guyot, P., Schmitt, L., Eschbach, D., 2016. Modélisation hydrosédimentaire de l'hydrosystème fluvial du Rohrschollen (Strasbourg).

Pyle, C.J., Richards, K.S., Chandler, J.H., 1997. Digital Photogrammetric Monitoring of River Bank Erosion. In *The Photogrammetric Record* 15, 753–764. doi:10.1111/0031-868X.00083

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. In *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 12, 405–424. doi:10.1002/aqc.536

Rayburg, S., Thoms, M., Neave, M., 2009. A comparison of digital elevation models generated from different data sources. In *Geomorphology* 106, 261–270. doi:10.1016/j.geomorph.2008.11.007

Remondino, F., El-Hakim, S., 2006. Image based 3D modelling: a review. In *The Photogrammetric Record* 21, 269–291.

Schmitt, L., Maire, G., Nobelis, P., Humbert, J., 2007. Quantitative morphodynamic typology of rivers: a methodological study based on the French Upper Rhine basin. In Earth Surface Processes and Landforms 32, 1726–1746. doi:10.1002/esp.1596

Schmitt, L., Lafont, M., Trèmolières, M., Jezequel, C., Vivier, A., Breil, P., Namour, P., Valin, K., Valette, L., 2011. Using hydro-geomorphological typologies in functional ecology: Preliminary results in contrasted hydrosystems. In *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 36, 539–548. doi:10.1016/j.pce.2009.11.011

Schneider, J., Hegglin, R., Meier, S., Turowski, J.M., Nitsche, M., Rickenmann, D., 2010. Studying sediment transport in mountain rivers by mobile and stationary RFID antennas, in: Dittrich, Koll, Aberle & Geisenhainer (Eds). River Flow 2010: Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics. Dittrich, Koll, Aberle & Geisenhainer (Eds), p. 8, 8p.

Sear, D.A., 1996. Sediment transport processes in pool–riffle sequences. In *Earth Surface Processes and Landforms* 21, 241–262.

Smith, M.J., Chandler, J., Rose, J., 2009. High spatial resolution data acquisition for the geosciences: kite

aerial photography. In *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 155–161. doi:10.1002/esp.1702

TI-RFID, 2006. Eco-line 23 mm glass transponder, RI-TRP-REHP (read only), RI-TRPWEHP (read/write), reference guide, Texas Instruments. http://www.ti.com/lit/ug/ scbu034/scbu034.pdf (16.01.2014), n.d.

Vericat, D., Brasington, J., Wheaton, J., Cowie, M., 2009. Accuracy assessment of aerial photographs acquired using lighter-than-air blimps: low-cost tools for mapping river corridors. In *River Research and Applications* 25, 985–1000. doi:10.1002/rra.1198

Westaway, R.M., Lane, S.N., Hicks, D.M., 2003. Remote survey of large-scale braided, gravel-bed rivers using digital photogrammetry and image analysis. In *International Journal of Remote Sensing* 24, 795–815. doi:10.1080/01431160110113070

Westaway, R.M., Lane, S.N., Hicks, D.M., 2000. The development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow, gravel-bed rivers. In *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 209–226.

Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M., 2012. "Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. In *Geomorphology* 179, 300–314. doi:10.1016/j.geomorph.2012.08.021

Wheaton, J.M., Brasington, J., Darby, S.E., Sear, D.A., 2009. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. In *Earth Surface Processes and Landforms* , n/a-n/a. doi:10.1002/esp.1886

Wolman, M.G., 1954. A method of sampling coarse river-bed material. In *transactions, American Geophysical union* 35, 951–956.

8 TABLEAU DES CONTRIBUTIONS

General contributions	D. Eschbach	P. Grussenmeyer	L. Schmitt	M. Koehl	S. Guillemin
Conceptualization	●		●		
Data acquisition	●	●		●	●
Formal analysis	●			●	●
Funding acquisition			●		
Investigation	●	●	●	●	
Methodology	●	●	●		
Project administration	●		●		
Resources		●		●	●
Supervision	●	●	●		
Validation	●	●	●		
Visualization	●	●		●	
Writing - original draft	●	●			
Writing - review & editing	●	●	●		
	11	*9*	*8*	*5*	*3*

Detailled author contributions

	%					
		1				
		0.8				
		0.6				
		0.4				
		0.2				
1 Introduction			0.8		0.2		
2 Study site			1				
3 Material and methods							
3.1 Geodetic survey							
3.1.1 TLS and SfM comparison			0.6	0.4			
3.1.2 Topographical data			0.6	0.4			
3.1.3 Point-clouds comparison			0.6	0.4			
3.2 Geomorphological survey							
3.2.1 Grain size survey			0.8		0.2		
3.2.2 RFID tracking			0.8		0.2		
3.2.3 Geomorphic unit survey			0.8		0.2		
3.3.3 Survey of lateral and vertical adjustments			0.6		0.4		
4 Results							
4.1 Multiscale sediment budget (lq)							
4.1.1 Sediment budget close the three sectors			0.8		0.2		
4.1.2 Sediment budget along the whole channel			0.8		0.2		
4.2 Lateral channel evolution (ller)			0.6		0.2	0.2	
4.3 Vertical variation (lvv)			0.8		0.2		
4.4 Evolution of geomorphic units (lgu)			0.8		0.2		
4.5 Grain size evolution and bedload dynamics (lbd)			0.8		0.2		
5 Discussion							
5.1 Methodological contribution: relevance of geodetic methods for accurate morphodynamic river survey			0.6	0.4			
5.2 Thematic contribution: combining geodetic survey to geomorphological methods in restored small active lateral channels			0.6		0.4		
5.3 Methodological recommendations, relevance of the used indicators and perspectives			0.6	0.2	0.2		
			24	*11*	*11*	*5.2*	*3*

CHAPITRE 4

SUIVI DES ÉCHANGES NAPPE-RIVIÈRE PAR THERMOGRAPHIE INFRA-ROUGE AÉROPORTÉE

Ce **quatrième chapitre** s'appuie sur un article publié dans la revue *Hydrological Processes*. La thermie de l'eau est un indicateur-clef pour évaluer le fonctionnement hyporhéique d'un cours d'eau. L'infra-rouge thermique (IRT) aéroporté est une méthode non invasive récemment développée pour localiser les anomalies thermiques à la surface des cours d'eau. Rarement utilisée sur les cours d'eau anastomosés des lits majeurs, cette méthode a été adaptée sur l'île du Rohrschollen pour cartographier les échanges nappe-rivière du réseau hydrographique du site et identifier les principaux facteurs physiques à l'origine des exfiltrations phréatiques. Les résultats, croisés avec les paramètres morpho-sédimentaires du nouveau chenal, révèlent que les exfiltrations phréatiques sont contrôlées par les alternances seuils-mouilles qui caractérisent ce milieu. À l'inverse, sur l'anastomose du Bauerngrundwasser, qui présente une dynamique morphologique nettement plus faible, les anomalies thermiques sont contrôlées par deux facteurs : (i) la présence d'anciens bancs de graviers affleurant dans les berges et (ii) l'absence locale de colmatage du fond du chenal. En dépit de nombreuses précautions à adopter lors de la mise en œuvre de cette méthode en milieu alluvial complexe (densité de la canopée, végétation aquatique, embâcles, étroitesse du chenal…), l'IRT aéroportée présente un potentiel élevé pour l'évaluation de la dynamique hyporhéique des espaces riverains des grands fleuves. Ce chapitre s'appuie sur l'axe 3 : **influence de l'activité morpho-sédimentaire présente et passée sur la répartition des exfiltrations phréatiques d'un hydrosystème anastomosé restauré.**

Ce chapitre correspond à l'article : Eschbach, D., Piasny, G., Schmitt, L., Pfister, L., Grussenmeyer, P., Koehl, M., Skupinski, G., Serradj, A., 2017. Thermal-infrared remote sensing of surface water-groundwater exchanges in a restored anastomosing channel (Upper Rhine River, France). In *Hydrological Processes* 31, 1113–1124. doi:10.1002/hyp.11100

Received: 5 August 2016 | Accepted: 29 November 2016

DOI 10.1002/hyp.11100

WILEY

RESEARCH ARTICLE

Thermal-infrared remote sensing of surface water–groundwater exchanges in a restored anastomosing channel (Upper Rhine River, France)

David Eschbach [1] | Guillaume Piasny [1] | Laurent Schmitt [1] | Laurent Pfister [2] | Pierre Grussenmeyer [3] | Mathieu Koehl [3] | Grzegorz Skupinski [1] | Abdelaziz Serradj [1]

[1] CNRS, LIVE UMR 7362, LTER - "Zone Atelier Environnementale Urbaine ", 3, rue de l'Argonne, F-67083 Strasbourg, France

[2] Environmental Research and Innovation Department, Catchment and Eco-hydrology research group, Luxembourg Institute of Science and Technology, 41 rue du Brill, L-4422 Belvaux, Luxembourg

[3] ICube Laboratory, UMR 7357, Photogrammetry and Geomatics Group, INSA de Strasbourg, 24, boulevard de la Victoire, F-67084 Strasbourg, France

Correspondence
David Eschbach, University of Strasbourg, CNRS, LIVE UMR 7362, LTER - "Zone Atelier Environnementale Urbaine ", 3 rue de l'Argonne, F-67083 Strasbourg, France.
Email: david.eschbach@live-cnrs.unistra.fr

Funding information
European Community, Grant/Award Number: LIFE08 NAT/F/00471; City of Strasbourg; University of Strasbourg and French National Center for Scientific Research (IDEX-CNRS 2014 MODELROH project, specific CNRS applications); ZAEU (Zone Atelier Environnementale Urbaine – LTER).

Abstract

Ecohydrological processes are a key element to consider in functional river restorations. In the framework of a LIFE+ European restoration program, we have investigated the potential for airborne thermal-infrared remote sensing to map surface water–groundwater exchanges and to identify their driving factors. We focused our attention on anastomosing channels on an artificial island of the Upper Rhine River (Rohrschollen), where a new channel was excavated from the floodplain to reconnect an older channel in its upstream part. These hydraulic engineering works led to an increased inflow from the Rhine Canal. Here, we propose an original data treatment chain to (a) georeference the thermal-infrared images in geographic information system based on visible images, (b) detect and correct data errors, and (c) identify and locate thermal anomalies attributed to groundwater inputs and hyporheic upwellings. Our results, which have been compared to morpho-sedimentary data, show that groundwater upwelling in the new channel is controlled by riffle–pool sequences and bars. This channel is characterized by large bedload transport and morphodynamic activity, forming riffles and bars. In the old channel, where riffle–pool sequences no longer exist, due to impacts of engineering works and insufficient morphodynamic effects of the restoration, thermal anomalies appeared to be less pronounced. Groundwater inputs seem to be controlled by former gravel bars outcropping on the banks, as well as by local thinning of the low-permeability clogging layer on the channel bed.

KEYWORDS

airborne thermal-infrared (TIR) remote sensing, functional restoration, hydromorphology, hyporheic processes, Upper Rhine anastomosing channel

1 | INTRODUCTION

Stream temperature is a key parameter in many river studies for characterizing the ecological functioning offluvial systems (Angilletta, 2009; Magnuson, Crowder, & Medvick, 1979; Ward, 1992; Webb, Hannah, Moore, Brown, & Nobilis, 2008). The thermal regime offluvial systems is driven by heat flow between solar radiation, channel water, sediments, groundwater, and riparian vegetation modified by air temperature, humidity, and wind speed (Caissie, 2006; Poole & Berman, 2001; Poole, Stanford, Frissell, & Running, 2002). Longitudinal stream temperature patterns are generally linked to climate gradients, channel size, and riparian vegetation-induced shadow patches (Acuña & Tockner, 2009; Bornette, Amoros, & Lamouroux, 1998; Handcock et al., 2006; Malard, Mangin, Uehlinger, & Ward, 2001; Poole & Berman, 2001; Torgersen, Price, Li, & McIntosh, 1999; Verneaux, 1977). This explains why, in most cases, tributaries feed relatively cold water into larger channels (Dugdale, Bergeron, & St-Hilaire, 2013; Wawrzyniak et al., 2016).

At a finer spatial scale, geomorphically controlled features of surface water–groundwater exchanges and riparian shade (Broadmeadow, Jones, Langford, Shaw, & Nisbet, 2011; Namour et al., 2015) induce thermal heterogeneities of surface water that control the spatial distribution of thermal habitats and the diversity of ecological functioning (Bernot & Dodds, 2005; Breil, Lafont, Vivier, Namour, & Schmitt, 2007; Hannah, Malcolm, & Bradley, 2009; Lafont, 2001; Schmitt et al., 2011; Stanford, Hauer, & Ward, 1988).

 Copyright © 2016 John Wiley & Sons, Ltd.

ABSTRACT
Ecohydrological processes are a key element to consider in functional river restorations. In the framework of a LIFE+ European restoration program, we have investigated the potential for airborne thermal-infrared remote sensing to map surface-water/groundwater exchanges and to identify their driving factors. We focused our attention on anastomosing channels on an artificial island of the Upper Rhine River (Rohrschollen), where a new channel was excavated from the floodplain to reconnect an older channel in its upstream part. These hydraulic engineering works led to an increased inflow from the Rhine Canal. Here we propose an original data treatment chain to (i) georeference the thermal-infrared images in GIS based on visible images, (ii) detect and correct data errors and (iii) identify and locate thermal anomalies attributed to groundwater inputs and hyporheic upwellings. Our results, which have been compared to morpho-sedimentary data, show that groundwater upwelling in the new channel is controlled by riffle-pool sequences and bars. This channel is characterized by large bedload transport and morphodynamic activity, forming riffles and bars. In the old channel, where riffle-pool sequences no longer exist, due to impacts of engineering works and insufficient morphodynamic effects of the restoration, thermal anomalies appeared to be less pronounced. Groundwater inputs seem to be controlled by former gravel bars outcropping on the banks, as well as by local thinning of the low-permeability clogging layer on the channel bed.

KEYWORDS
Airborne thermal-infrared (TIR) remote sensing, functional restoration, hydromorphology, Upper Rhine anastomosing channel, hyporheic processes.

1 INTRODUCTION
Stream temperature is a key parameter in many river studies for characterizing the ecological functioning of fluvial systems (Angilletta, 2009; Magnuson *et al.*, 1979; Ward, 1992; Webb *et al.*, 2008). The thermal regime of fluvial systems is driven by heat flow between solar radiation, channel water, sediments, groundwater and riparian vegetation modified by air temperature, humidity and wind speed (Caissie, 2006; Poole and Berman, 2001; Poole *et al.*, 2002). Longitudinal stream temperature patterns are generally linked to climate gradients, channel size and riparian vegetation-induced shadow patches (Acuña and Tockner, 2009; Bornette *et al.*, 1998; Handcock *et al.*, 2006; Malard *et al.*, 2001; Poole and Berman, 2001; Torgersen *et al.*, 1999; Verneaux, 1977). This explains why, in most cases, tributaries feed relatively cold water into larger channels (Dugdale *et al.*, 2013; Wawrzyniak *et al.*, 2016).

At a finer spatial scale, geomorphically-controlled features of surface-water/groundwater exchanges and riparian shade (Broadmeadow *et al.*, 2011; Namour *et al.*, 2015) induce thermal heterogeneities of surface water that control the spatial distribution of thermal habitats and the diversity of ecological functioning (Bernot and Dodds, 2005; Breil *et al.*, 2007; Hannah *et al.*, 2009; Lafont, 2001; Schmitt *et al.*, 2011; Stanford *et al.*, 1988). Groundwater inputs are generally confined to sections of gravel bars and downstream sections of riffles or steps, in riffle-pool or step-pool sequences, respectively (commonly referred to "hyporheic upwelling" when used at this scale; Boulton *et al.*, 1998). Groundwater inputs can also be enhanced in channel banks and/or bottoms by the presence of coarse sediments, where hydraulic conductivity is relatively high (Brunke and Gonser, 1997; Cardenas *et al.*, 2004; Packman and MacKay, 2003; Poole *et al.*, 2006). Temporal dynamics of groundwater inputs are linked to the hydrological cycle, including the relative variations between groundwater and surface water levels (Burkholder *et al.*, 2008; Constantz *et al.*, 1994; Westhoff *et al.*, 2007). For most aquifers in temperate zones, groundwater is warmer than surface water in winter and vice-versa in summer (Caissie *et al.*, 2007; Lyons *et al.*, 1996; Malard *et al.*, 2001; Poirel *et al.*, 2008; Torgersen

et al., 2001). During summer, groundwater inputs may provide thermal refuges for many stenothermal coldwater species like salmonid fish. This cooling effect is particularly important for these species during heatwaves (Burkholder *et al.*, 2008; Dugdale *et al.*, 2015; Tockner *et al.*, 2006; Tonolla *et al.*, 2010; Torgersen *et al.*, 1999). Cool thermal refuges are therefore increasingly important in the context of future climate change (Arnell and Reynard, 1996; van Vliet *et al.*, 2011).

Conventional stream temperature surveys are based on in situ thermal sensors. While they are well suited to monitor surface water temperature over time (Broadmeadow *et al.*, 2011; Pfister *et al.*, 2010; Torgersen *et al.*, 1999), they reflect rather poorly spatial heterogeneities in surface water temperature (Cardenas *et al.*, 2008; Tonolla *et al.*, 2010). To overcome this spatial limitation, airborne TIR remote sensing has been used for nearly two decades on river stretches extending up to 60 km (Torgersen *et al.*, 2001). This approach is increasingly used in ecology and hydrology, notably to infer groundwater inputs (Loheide and Gorelick, 2006) from thermal anomalies. The latter can be natural, like thermal refuges driven by groundwater inputs (Dugdale *et al.*, 2013, 2015; Torgersen *et al.*, 1999; Wawrzyniak *et al.*, 2013, 2016), or induced by human activities like inputs of warm water by nuclear power plants (Chen *et al.*, 2003; Fricke and Baschek, 2015). In order to exploit the full potential of TIR imagery, specific data processing techniques were developed for extracting, spatialising and assessing the uncertainty of the generated datasets (Handcock *et al.*, 2006).

Most airborne TIR-based studies have focused on main river channels that were typically between 20 and 500 m wide (Dugdale *et al.*, 2013; Handcock *et al.*, 2006; Wawrzyniak *et al.*, 2016). While tributaries of large rivers are commonly assumed to be thermal refuges in summer, their detailed longitudinal stream temperature patterns remain poorly documented. For small-sized aquatic environments (20-30 m), such as anastomosing channels corresponding to an old disconnected channel with a high clogging rate and low morphodynamic activity (Makaske, 2001; Makaske *et al.*, 2009; Schmitt *et al.*, in press.), it is necessary to develop specific methods for dealing with shadow induced by riparian vegetation, as well as disturbance caused by logjams.

Ecohydrological processes are a key element in functional river restoration projects (Descloux *et al.*, 2010; Johnson, 2005). However, studies on surface-water/groundwater exchanges in post-restoration monitoring programs are rather scarce (e.g. Poole and Berman, 2001). Here we present results from a European LIFE+ restoration program (EU's financial instrument supporting environmental, nature conservation and climate action projects) of an anastomosing channel network of the Upper Rhine River. The floodplain was excavated to create a 'new channel' upstream of an 'old channel', leading to an increased inflow from the Rhine Canal.

We target a better mechanistic understanding of the spatial distribution of groundwater inputs (which refers to both groundwater and hyporheic upwellings). More specifically, we hypothesise that: 1. in the new channel, groundwater inputs are induced by riffles and bars; 2. in the old channel, they are controlled by former gravel bars outcropping on the banks as well as local thinning of the clogging layer at the channel bottom. To test these hypotheses, we searched for thermal anomalies along the studied channels and investigated how their spatial distribution maps the hypothesised controlling factors. We compared and discussed the spatial distribution of groundwater inputs between: 1. the new channel, characterized by active morphodynamics, bedload transport/deposition and a high geomorphological diversity (bars and riffles), and 2. the old channel which is marked by relatively inactive morphodynamics, a sediment clogged channel bed and a poor geomorphological diversity due to impacts of engineering works.

2 STUDY AREA

The Rohrschollen is an artificial island and wildlife park that is located 8 km South-East of the city of Strasbourg (Fig. 4.1a). It has been built and reshaped through three successive engineering projects (consisting of correction, regularization and canalization) that first started at the beginning of the 19th century (Zimmermann A., 2012; Fig. 4.1b and 4.1c). The third and last project as of today was carried out in the vicinity of our study area in 1970. It consisted of the construction of a diversion dam and an artificial channel (Rhine Canal) with a hydro-power plant and a lock (Fig. 4.1c). Most of the discharge is diverted into the Rhine Canal, except when floods exceed 1,550 $m^3.s^{-1}$. In that case, the discharge surplus is directed to the normally by-passed old Rhine River (250 m width). As a consequence of the canalization, the main anastomosing channel of the island whose width is about 30 m, is disconnected upstream. An agricultural dam was built in 1984 on the old Rhine River in order to raise the groundwater level for agricultural irrigation (top of Fig. 4.1c). Moreover, the dam is also used for flood retention purposes when the discharge exceeds 2,800 $m^3.s^{-1}$ (i.e. 2-year peak discharge). The backwater of this dam fills both the old Rhine River and the old channel. The water level is consequently very stable in this channel. Groundwater inputs estimated by flow accretion gauging reach 0.1 $m^3.s^{-1}$. In this context, aquatic and riparian habitats were heavily impacted and alluvial communities (floodplain vegetation, aquatic macrophytes and macroinvertebrates) were on the decline on the island, as well as in numerous other side-channels of the Rhine (Meyer *et al.*, 2013).

In 2012, the city of Strasbourg started a European LIFE+ project to restore specific fluvial biocenosis, hydromorphological and ecological processes, such as bedload transport, channel dynamics, surface-water/groundwater exchanges and renewal of pioneer alluvial ecosystems. To achieve these objectives, the old channel was reconnected to the Rhine Canal by a large floodgate (8 m wide) and a new upstream channel (900 m long) was excavated on the Southern part of the island (Fig. 4.1c). Water inflow to the new channel ranges between 2 and 80 $m^3.s^{-1}$, depending on the discharge of the Rhine River. A scientific monitoring program focusing on hydraulics, hydrology, fluvial morphology, hydrogeology and ecology has been designed in order to assess the effectiveness and the sustainability of the restoration measures. While the results of TIR remote sensing are presented and discussed below, other pre- and post-restoration monitoring is not shown.

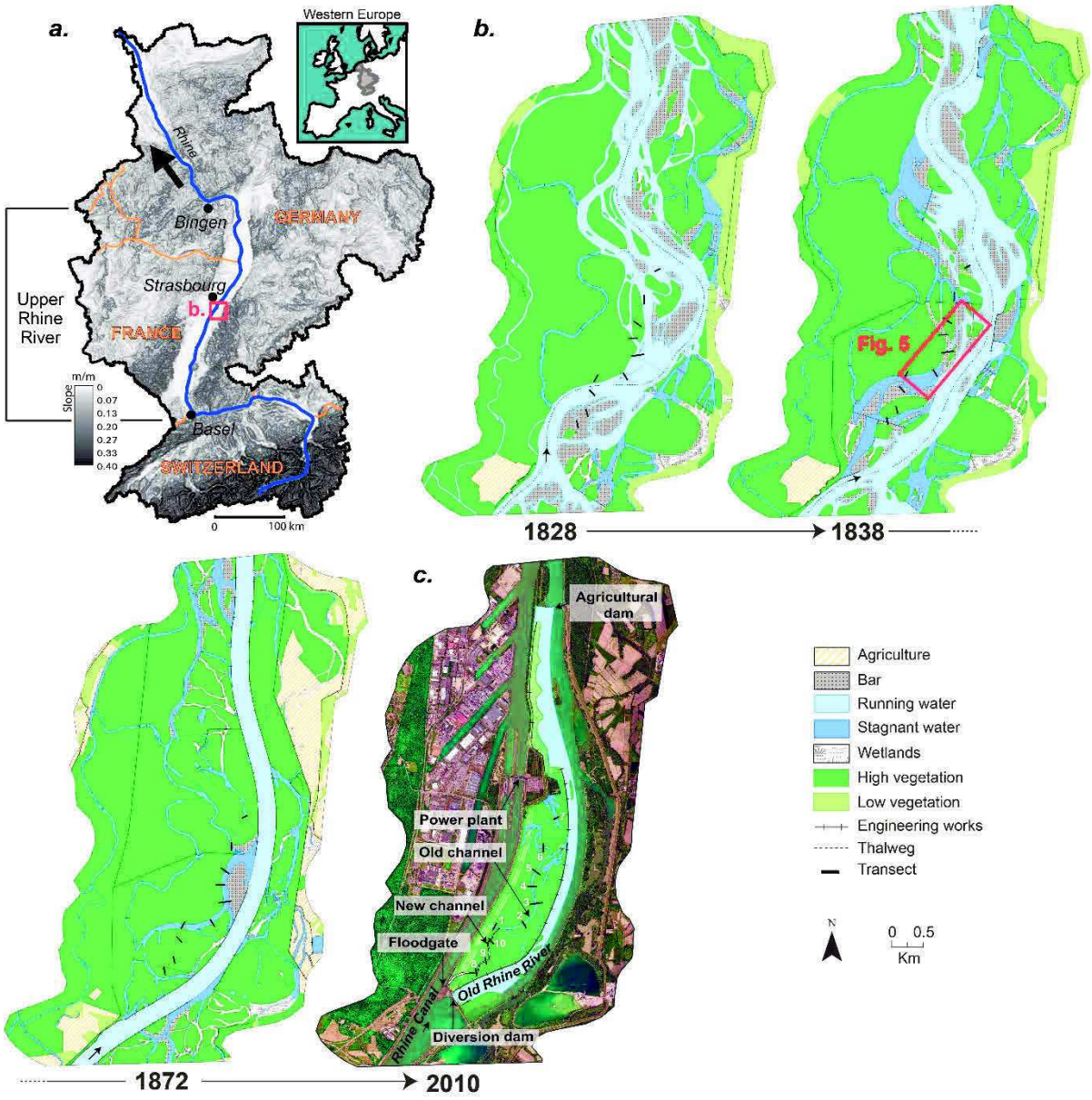


Figure 4. 1 - (a) Rhine basin and general location of the study site on slope basemap. (b) Historical evolution of the Rohrschollen site and former gravel bars deposition between 1838 (beginning of the correction works) and 1872 (end of the correction works). The former gravel bar outcropping on the current channel banks correspond to 1838 deposition. (c) Current situation and location of the natural reserve (artificial colors).

3 MATERIAL AND METHODS

3.1 Historical analysis

We used historical maps to reconstruct the temporal evolution of our study site. We coupled this information with a sedimentological survey to improve the understanding of current morpho-sedimentary characteristics and assess the potential benefits of the restoration in the future. We used the 1838 map to locate former gravel bars that partially compose the current banks of the old channel (Fig. 4.1b). Some bars of coarse sediment have probably been deposited on the downstream section of the old channel during an 1852 flood (Champion, 1863; Conrad, 2011; 300-year peak discharge).

3.2 Image acquisition

Airborne thermal-infrared (TIR) images were acquired over the new and old channels using a FLIR b425 infrared camera. This device is composed of two lenses operating respectively in the 7.5–13 µm wavebands and in the standard RGB bands. The camera was fixed under a powered paraglider to acquire images close to the nadir and reduce reflected radiation from the surrounding terrestrial environment. Visible images (2048 x 1536 pixels) covered a ground area two times larger than TIR images (360 x 240 pixels) with a 25° x 19° field-of-view. The thermal sensor was calibrated using the water emissivity, the atmospheric conditions and the height above the river channel. The FLIR thermal system accuracy is ± 2% of temperature measurement with a sensitivity less than 0.05°C at 30°C. Thermal and visible images were recorded at a rate of 20 s/frame.

The aerial survey took place the 22nd January 2015, when the tree canopy extension was minimal and a high thermal contrast prevailed between surface water (~4°C) and groundwater (~10°C). The flight was scheduled between 12:40 (start) and 13:30 (end), when air temperature was highest (2.8°C). Due to atmospheric turbulence near the canopy, the powered paraglider had an altitudinal operating range of 250 m above the river and an average speed of 30 km/h. According to the flight parameters and trigger frequency of the thermal camera (3 pictures/min), the expected image overlap of 30% could not be achieved. To avoid any loss of data, two flyovers targeted each of the 3.8 km stretches of the two channels. The sensor provided ground pixel resolutions of 5.4 cm for the visual images and 34.6 cm for the thermal imagery.

3.3 Image processing

Our image processing chain (Fig. 4.2) consisted of: (i) converting and validating TIR data, (ii) thermal mapping of the water surface, (iii) removing contaminated thermal pixels and (iv) identifying and locating thermal anomalies.

We converted radiance values of each TIR pixel to temperature using Planck's law within FLIR ThermaCAM Researcher software (FLIR, 2010). We extracted radiant temperatures from the TIR image frames and exported them as an array of thermal values. Next, we used a MATLAB script (MathWorks, R2011b) to transform the exported files (.mat) in raster format (.tiff), suitable for georeferencing in a geographic information system (GIS; ESRI ArcMap v.10.3). In order to validate the remotely sensed water surface temperatures, the TIR image-derived radiant water temperatures were compared to in situ measurements of water temperature obtained from instruments deployed for hydraulic and hydrogeologic monitoring purposes.

Seven OTT Orpheus Mini water level loggers measuring water temperature at 5 min intervals with ± 0.05% accuracy were installed at fixed intervals along each transect of the old channel. The loggers were put on the left bank at a depth of 0.7 m ± 0.1 m, depending on local and technical constraints. Temperature data recorded during the airborne survey were downloaded and compared to the river surface temperature extracted from the corresponding images. Due to the low flow conditions (~2 $m^3.s^{-1}$) and the absence of turbulences required to mix water in the old channel, a vertical thermal stratification of the water column prevailed during our survey. TIR data was 2.3°C ± 0.3°C cooler than water temperatures measured by in-stream loggers. Even if absolute temperatures are significantly different, we used a linear regression to assess the relationship between TIR and in situ data. A good correlation was observed with a R^2 value of 0.86 (n = 9).

We georeferenced the images taken in the visible range by using the ground control targets (Fig. 4.2a) and additional control points identified on aerial photos from the BD ORTHO® base

layer (BD ORTHO® 2013 from the National Geographical Institute). Coordinates of the center of these targets were measured using a real-time global navigation satellite system (RTK-GNSS) with an accuracy of 2-3 cm. During post-flight image processing, thermal and visible image pairs were automatically overlain in GIS. Applying an affine transformation, geographical coordinates of the TIR images were calculated in a MATLAB script using coordinates for the corresponding visible images. The computer program was calibrated by superimposing a thermal image over a visible image above the hydro-power plant of Strasbourg which has characteristic heat sources. The water temperature increased during the aerial survey and we observed thermal contrasts between overlapped images triggered at different times. In order to extract a longitudinal temperature profile independent of temporal thermal variations, TIR data were separated into four groups corresponding to each overflight.

3.4 Image analysis

We used visible images to digitize terrestrial objects (bank vegetation, logjams and bars) and to isolate water pixels on TIR images. The proportion of mixed pixels contaminated by terrestrial objects depends on TIR pixel sizes and stream widths (Handcock *et al.*, 2006). The surface water temperature accuracy is degraded when the number of pixels across the river width is less than 10 (Torgersen *et al.*, 2001; Fig. 4.2a). In order to discriminate 'pure' water pixels, a buffer zone of 1m (~3 pixels) around terrestrial objects was created (Fig. 4.2b). By this procedure, we discarded mixed pixels and eliminated narrow river sections (i.e. ≤ 7 pixels).

Longitudinal temperature profiles were extracted from TIR images (Fig. 4.2c) by selecting the pixels with highest temperatures along the channels (Fig. 4.3a and 4.5a). This helped minimizing the influence of lateral temperature evolution which depends of the number of 'pure' water pixel. To take into account the temporal stream temperature increase during the survey (0.60°C in the new channel and 0.76°C in the old one), we extracted a longitudinal temperature profile for each overflight image sequences. In order to compensate for missing data, we manually matched the four temperature curves with a MATLAB graphic user interface. The first flyover served as a thermal profile reference, from which temperature differences with the three other flyovers were subtracted. This script was developed to compare stream temperature variations with hydrological, morphological and sedimentological data. To improve this comparison, a thermal baseline was drawn by connecting mean temperature on the upstream part of the new channel with the mean temperature on the downstream part (Fig. 4.3b). On the old channel, the mean temperature recorded over the lentic sector upstream of the confluence with the new channel was considered without temperature disturbance (e.g. inputs from the new channel), and the thermal baseline was extrapolated all along this channel (Fig. 4.5b). Links with the new channel morphodynamics are also enhanced by taking into account the thalweg longitudinal evolution from 2014 to 2015 (Fig. 4.3b), and bedload transport which was tracked with Passive Integrated Transponders (Lamarre *et al.*, 2005; Fig. 4.3c). Statistical distribution of thermal pixels was analysed using the histograms of pixel frequency to discriminate positive thermal anomalies (Wawrzyniak *et al.*, 2013). Thermal images have been color-coded to visually enhance spatial patterns of water temperature and the identified thermal anomalies were digitalized in a GIS.

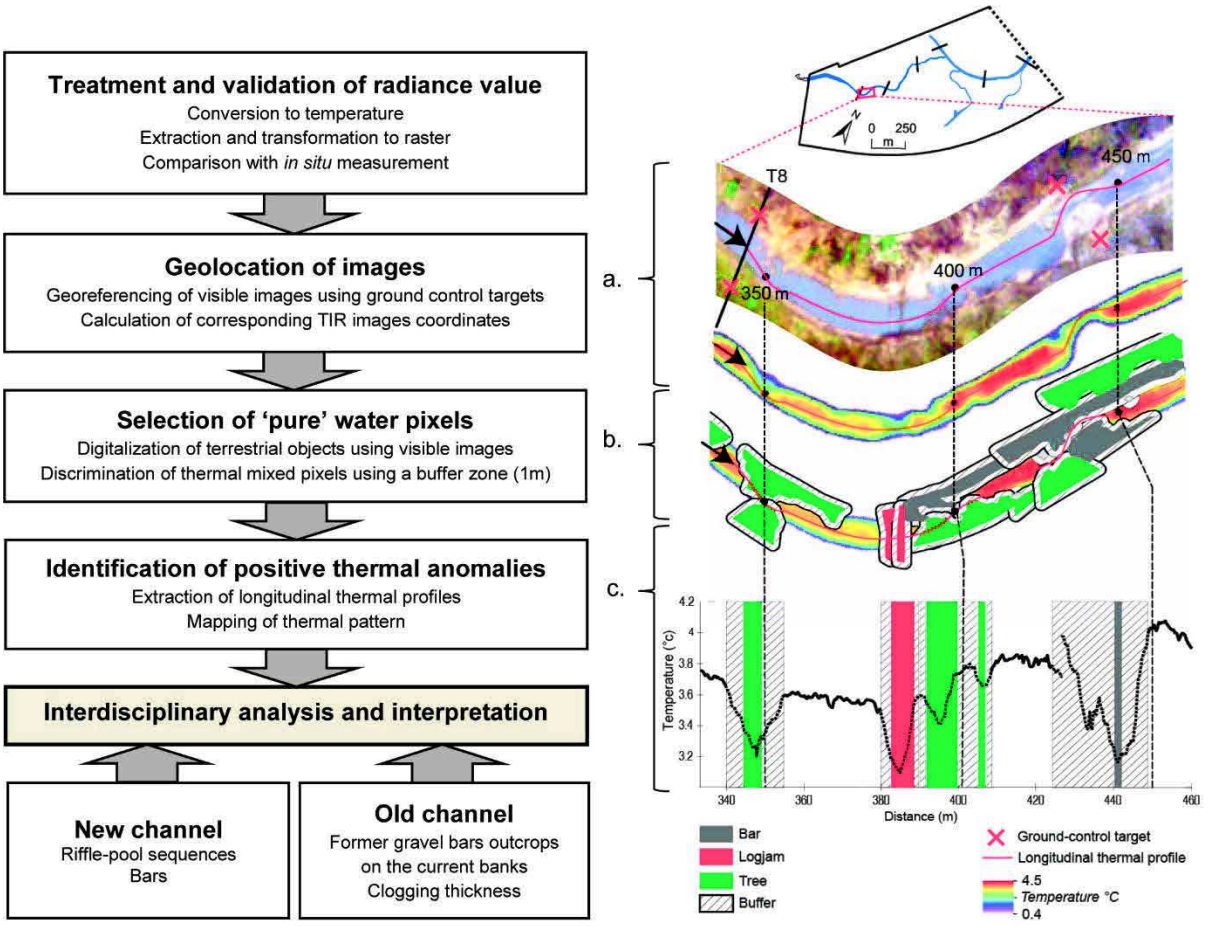


Figure 4. 2 - TIR processing chain (left) linked with visual and graphical display (right). (a) Visible picture (above) and corresponding TIR image (below). (b) Terrestrial objects digitalization (bank vegetation, logjams and bars) and buffer zone used to remove contaminated pixels. (c) Longitudinal temperature profile with 'pure' water pixels (continuous line) and mixed pixels removed (dotted line).

3.5 Statistical analysis

To highlight the relationship between the rise in surface water temperature near bars and riffles, we calculated the residuals between the mean temperature curve of the four flyovers and the straight trend line (Fig. 4.4). As bars and riffles are located on the same reaches, we grouped them in a single geomorphic unit called 'bar/riffle' (Fig. 4.4). The assumption of the non-random distribution between the residuals and the presence/absence of bar/riffle has been analyzed by the nonparametric Wald-Wolfowitz Runs test (Wald and Wolfowitz, 1940). The binary logistic regression was used to test the quality of the adjustment and the prediction performance. Statistical computations were performed with the software TANAGRA 1.4.50 (Rakotomalala, 2005).

4 RESULTS

4.1 Thermal variations in the new channel

We observed a longitudinal temperature decrease from 3.8°C to 2.5°C (Fig. 4.3b). This overall cooling trend exhibits four relatively important and regular thermal variations (of about 0.6°C and 0.8°C), which appear strongly linked to riffle geomorphic units and bars. At a more detailed spatial scale, these large thermal anomalies contain several thermal peaks, which appear to be located next to riffles and bars that are particularly large.

A thermal anomaly (with a positive thermal contrast of about 0.3°C to 0.4°C) occurs over a channel section that spans from 240 m to 270 m downstream. This hot spot is located in the vicinity of a large active bar that crosses almost the entire channel width. In addition, a riffle is attached to this bar (Fig. 4.3a and 4.3b). The main thermal peak (observed at 255 m), with a relative temperature increase of about 0.25°C, is located at the lower end of the riffle (Fig. 4.3b).

Another thermal anomaly extended over a 75 m channel stretch (between downstream locations 400 m and 475 m) and presents a positive thermal contrast of about 0.7°C. In the middle of this reach data was missing (between locations 430 m and 445 m), due to pixel contaminations by bars that were reducing the channel width. We observed a first thermal peak (~ 0.2-0.3°C) between locations 410 m and 420 m, at the downstream part of the riffle (Fig. 4.3b) and left of a lateral bar attached to the right bank (Fig. 4.3a$_1$). A second anomaly peak (0.4°C) was located at location 455 m, just downstream of the second riffle, between bars located on each bank.

A third large thermal anomaly was observed between downstream locations 650 m and 740 m, with a thermal contrast of approximately 0.5°C. It presented several peaks located at 670 m (0.35°C), 690 m (0.35°C), 710 m (0.1°C) and 725 m (0.1°C). The first peak begins downstream of a convex bar. The second peak is located downstream of the main riffle and between two lateral bars. The two next peaks were located next to a lateral bar attached to the right bank (Fig. 4.3a$_2$).

The last large anomaly was located between 830 m and 980 m downstream (Fig. 4.3b) and presented a thermal variation of 0.8°C. A lot of data was missing for this channel stretch due to pixel contaminations by logjams and bars that were reducing the channel width. This anomaly was located in the downstream parts of riffles and near bars. Moreover, we also observed some decreases in water surface temperature (0.1-0.15°C) upstream of riffles at channel locations 245 m, 625 m, and 470 m (Fig. 4.3b).

Bedload dynamics (Fig. 4.3c) indicate that the formation of riffles and bars, which are strongly linked, is clearly induced by bedload transport and deposition. Since bedload transport took place over distances of 30 m on average, deposits (i.e. bars and riffles) were found on, and just downstream of the bending reaches of the channel. At the scale of the entire new anastomosing channel, bank erosion, bedload transport and deposition generated a general aggradation of the channel bottom (Fig. 4.3b) and, above all, a drastic diversification of the channel morphology.

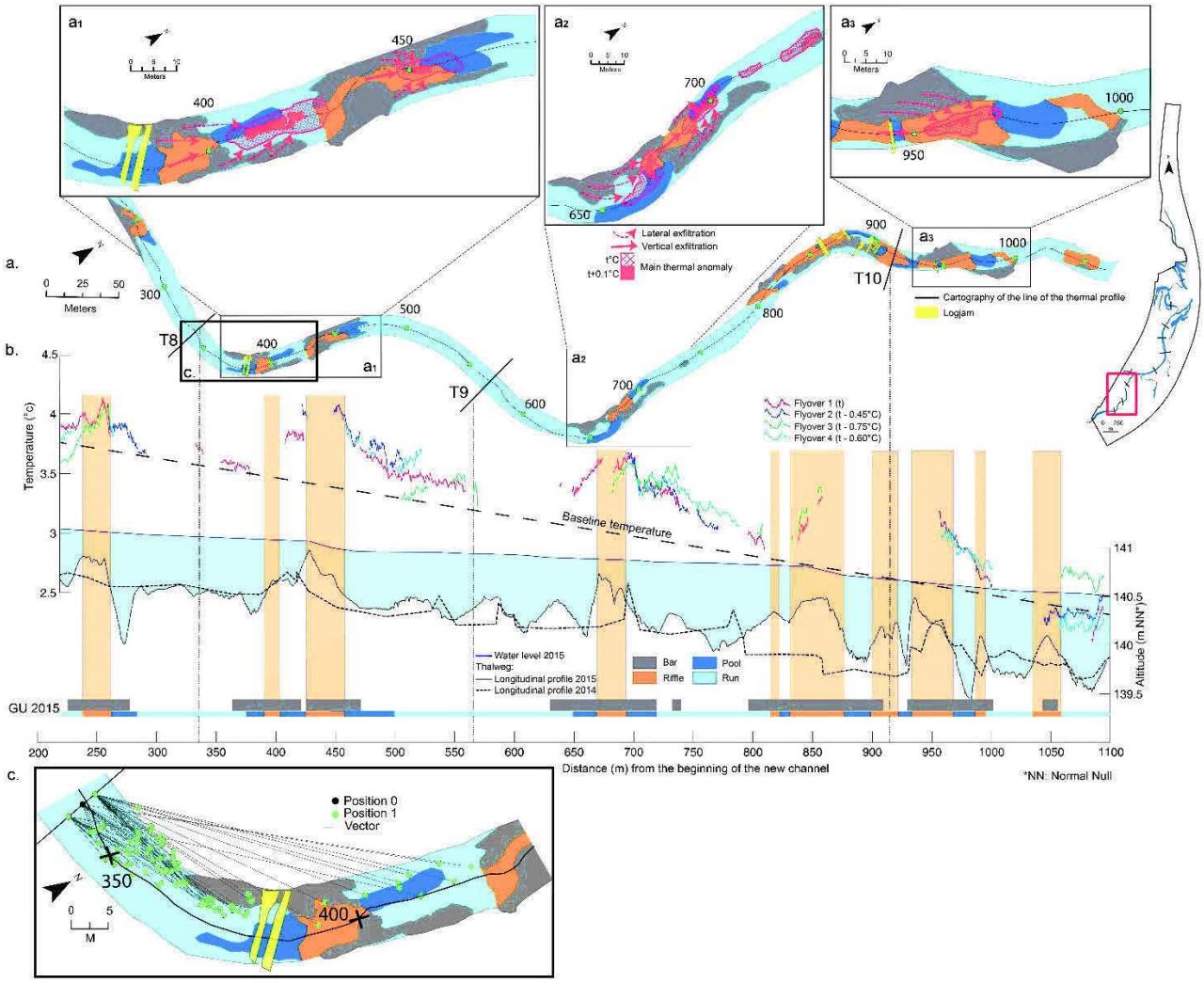


Figure 4. 3 - Longitudinal temperature variations on the new channel. (a) Nadir view of the channel includes bars, logjams and in-channel geomorphic units. More details on main thermal anomalies and their spatial extension are given for three reaches in sub-figures a_1, a_2 and a_3. (b) Superposition between the longitudinal temperature profile and the evolution of the thalweg longitudinal profile from 2014 to 2015. At the bottom, the 2015 extent of the bars and the different kinds of in-channel geomorphic units (riffles, pools and runs; GU 2015) are also provided to facilitate their comparison with the longitudinal temperature profile. Vertical bands show the longitudinal extent of the riffles. (c) Example of bedload dynamics from 2014 to 2015 measured with the Passive Integrate Transponders (PIT-tags) after the first flood. Transects allow the longitudinal correspondence between the sub-figures a. and b.

To test the hypothesis that the surface water temperature increases near bars and riffles were due to groundwater inputs, the residuals (i.e. temperature differences) were compared with the longitudinal temperature distribution of bar/riffle reaches. Figure 4.4a shows that the maximum temperature is reached in the middle or in the downstream part of the bar/riffle reaches. In contrast, temperature is lower in the sector without bars and riffles. The Wald-Wolfowitz Runs test (n = 1736) highlights the non-random distribution of the temperature in the channel, at a high significance threshold of 5% (p-value = 0.0075). Results of the binary logistic regression test indicates the quality of the adjustment between the presence/absence of bars and the temperature, with a good ranking rate of 59.33%. This result shows a significant relation between the temperature and the presence/absence of bar/riffle, as shown by the box-plot (Fig. 4.4b; see discussion).

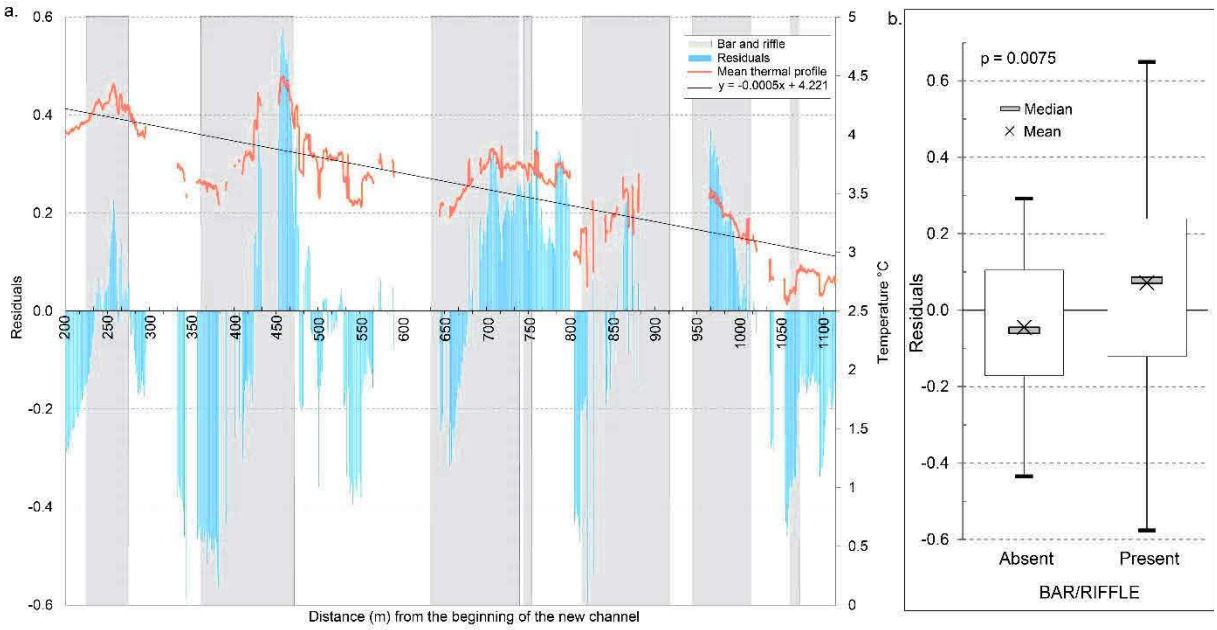


Figure 4. 4 - (a) Mean temperature curve of the four overflight associated with the residual data distribution. The main positive residuals are especially located nearby bars and riffles sectors. (b) Box-plot and statistical tests showing the distribution of thermal residuals depending of absence or presence of bar/riffle. Boxes limits are represented by the 25th and 75th percentiles and lines give the minimum and the maximum values. The p-value from Wald-Wolfowitz Runs test is given in the upper left of plot.

4.2 Thermal variations in the old channel

The 1828 map reveals that the upstream reach of the current 'old channel' corresponded to the thalweg of the Rhine River at that time (Fig. 4.1b and 4.1c). The correction works that took place from 1838 to 1872 caused a substantial disconnection between the Rhine River and the old channel. Surface-water/groundwater exchanges likely declined gradually as a result of sandy-silty sediment deposition and subsequent channel bed clogging and narrowing.

The longitudinal temperature profile of the old channel was less impacted by missing data than that of the new channel (Fig. 4.5b). Unlike the new channel, the longitudinal temperature trend of the old channel presented no repeated variations correlated with the channel morphology (bars and riffles), and the thermal baseline remained relatively constant at 1°C (except after 1050 m). Nevertheless, the longitudinal temperature profile exhibited large contrasts that served for the definition of a thermal-based sectorisation was defined.

The first sector extended from 0 m to 150 m on the upstream part of the channel and up to the confluence with the new channel (Fig. 4.5b-I). Temperatures varied from about 1°C to 2°C. The temperature increased rapidly from 100 m to 150 m due to the influence of the new channel confluence. Two thermal peaks were also identified, at the distances of 10 m and 50 m, with thermal contrasts of about 0.2°C to 0.4°C.

The second sector extended from locations 150 m to 500 m downstream (Fig. 4.5b-II). It was characterized by relatively high temperatures (max. of 2.2°C) downstream of the water inflow from the new channel. Downstream of a 2.1°C thermal plateau extending from 150 m to 250 m, temperatures dropped by 1.3°C. A positive anomaly peak was located at 400-420 m downstream with a thermal contrast of 0.3°C.

We identified a third sector located between 500 m to 1050 m downstream (Fig. 4.5b-III). Despite a general drop in water surface temperatures from 1.3°C to 1.0°C due to the general

tendency to a thermal decrease downstream, this reach presented a very high thermal variability, as shown both by the longitudinal temperature profile and the presence of thirteen positive thermal peaks (Fig. 4.5a) with a range of about 0.4°C to 0.6°C. A positive thermal anomaly (+0.4 to +0.5°C) extended over a long stretch located between 520 m to 840 m downstream. Thermal peaks located between 630 m and 840 m were particularly well identifiable during the first flyover, with a thermal contrast of about 0.2°C and a strong drop of about 0.3°C (840m).

The last sector is located between 1050 m and the confluence with the old Rhine River (Fig. 4.5b-IV). This sector shows a gradual increase in temperature that corresponds to a thermal mixing zone with high temperature (up to 3°C) contributions from the old Rhine River. Two main positive anomalies are identified at 1100 m and 1570 m with a thermal contrast of about 0.5°C. These correspond to a former gravel bar outcropping in the bank and, for the last anomaly, an area without clogging (Bottom of Fig. 4.5b).

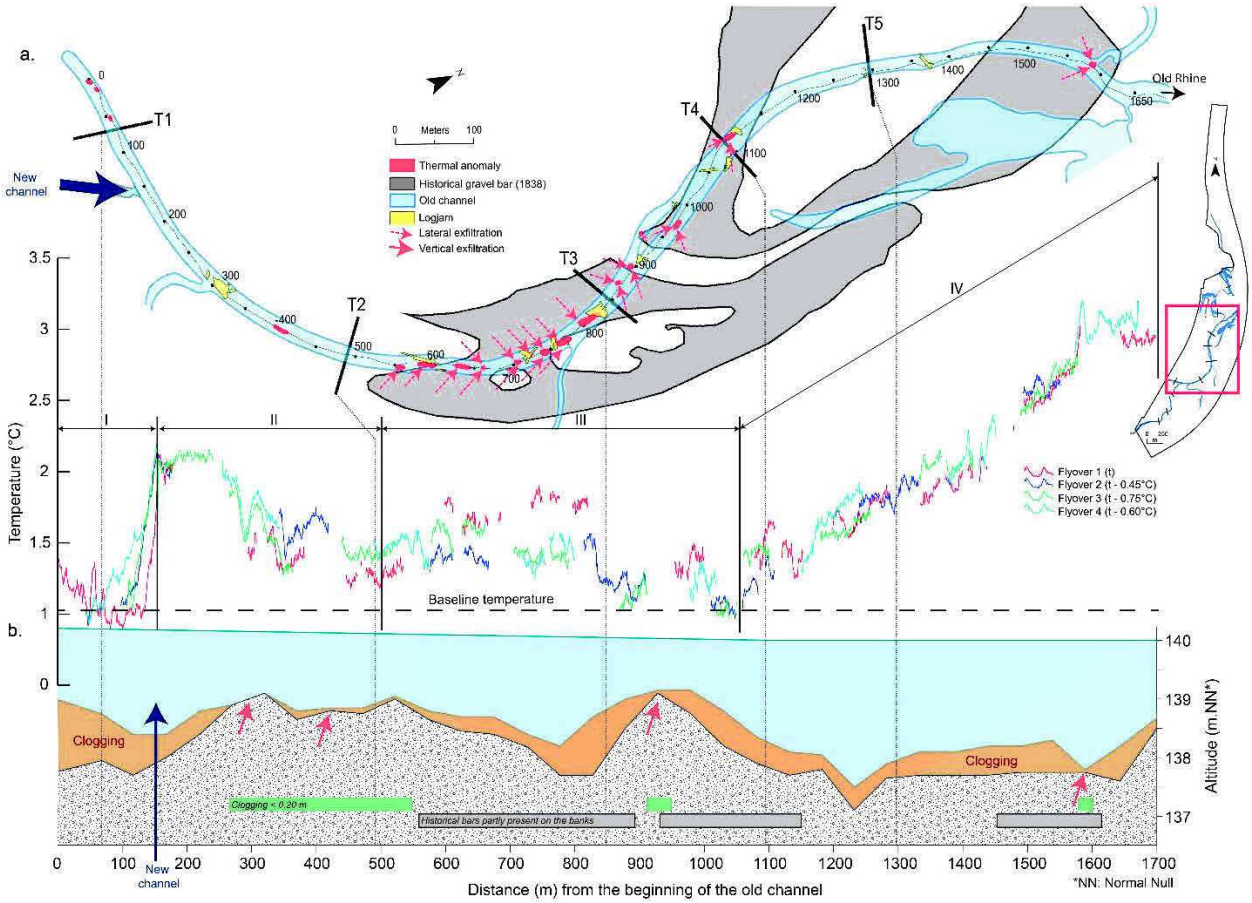


Figure 4. 5 - Longitudinal temperature variations on the old channel. (a) Nadir view of the channel, spatial distribution of the thermal anomalies and location of former gravel bars outcropping in the channel banks (see 1838 map; Fig. 4.1b). Red dotted arrows indicate lateral groundwater inputs which are revealed by positive thermal anomalies. (b) Superposition between the longitudinal profiles of temperature, low flow water and thalweg. At the bottom, the extend of the clogging thickness thinner than twenty centimeters (horizontal green bands) and the spatial distribution of former gravel bars (horizontal grey bands) are also provided to facilitate their comparison with the longitudinal temperature profile. Red solid arrows indicate vertical groundwater inputs. Transects allow the longitudinal correspondence between the two sub-figures.

5 DISCUSSION

5.1 Factors controlling the spatial distribution of thermal signatures along a morphodynamic anastomosing (new channel)

The gradual decrease in surface water temperatures from 3.8°C to 2.5°C along the new channel, as shown by the thermal baseline decline (Fig. 4.3b), is driven by heat exchanges between the water surface and the colder atmosphere. This effect had previously been reported (see e.g. Hannah *et al.*, 2004), but in our case this heat dissipation is enhanced by the small size (width and depth) of the channel. At a smaller spatial scale, the heat dissipation effect was 0.03°C to 0.1°C larger upstream of certain riffles (at downstream channel locations 240 m and 675 m). Around these locations, water was shallow and turbulence was high. This shallow effect has also been documented by Evans and Petts (1997).

Extensive positive thermal anomalies (from 0.3°C to 0.8°C) occurred preferentially on, or slightly downstream of, coarse sediment deposits, corresponding to riffles and lateral bars. Our statistical analysis of the residual data has shown that temperature rises near bars and riffles (Fig. 4.4a). However, the box-plots showed a high variability in min/max data and at $25^{th}/75^{th}$ percentiles, especially for the bar/riffle "present" box-plot (Fig. 4.4b). This variability was probably due (i) to the response time needed for thermal anomalies to mix and cause a warming effect at the surface of the water and (ii) to the smoothing of thermal data based on temperature averages from the four flyovers.

Sediment deposition from 2014 to 2015 was fed by lateral erosion of coarse-sediment dominated banks. The diversification of the channel morphology affects the vertical dimension (higher variability of the channel bed longitudinal profile, increase of elevation amplitude between riffles and pools), as well as the nadir view dimension (formation of numerous bars, active bedload transport; Fig. 4.3c). It appears clearly that this morphological channel diversity controls active surface-water/groundwater exchanges, which is observable by the spatial distribution of thermal anomalies (Fig. 4.3a_1, a_2, a_3), as it has also been noted by Acuña and Tockner (2009) and Burkholder *et al.* (2008).

Moreover, bars and riffles of the channel are largely composed of pebbles and gravels. These coarse sediments exhibit a rather high hydraulic conductivity, compared to finer sediments (Burkholder *et al.*, 2008; Evans and Petts, 1997; Namour *et al.*, 2015; Sear *et al.*, 1999, 2003). This explains why the hyporheic fluxes are particularly large in this kind of geomorphological unit (Bencala, 2005; Cardenas *et al.*, 2004; Evans *et al.*, 1995; Hannah *et al.*, 2009; Mouw *et al.*, 2014; Nielsen *et al.*, 1994; Wawrzyniak *et al.*, 2016).

5.2 Factors controlling the spatial distribution of thermal signatures along a large stable anastomosing channel (old channel)

The old channel had less missing data than the new channel. Given that the channel is larger, only a few pixels were contaminated by bank vegetation and logjams. Unlike the new channel, the thermal baseline of the old channel remained at a constant level of approximately 1°C. The heat exchange with the atmosphere was notably low because the channel has a mean width of 31 m and a mean water depth of 2 m (while these parameters were 7.5 m and 0.29 m in the new channel, respectively). Water velocity was lower (0.04 m/s and 0.18 m/s in the old and new channels, respectively) and little water turbulence was observed, given the absence of riffles. All of these features explain why the intensity of the thermal anomalies were less pronounced (average of 0.3°C versus 0.5°C) in the old channel compared to the new channel.

Contrary to the new channel, the old one had not undergone any morphological adjustments following the restoration (such as bank erosion inducing repetitive sediment deposition of riffles and lateral bars). This is due to its considerable size, its very low slope (less than 0.1‰) and the fact that during floods a large part of the discharge is derived in the floodplain (Piasny *et al.*, 2016). Furthermore, the restoration did not remove the clogging (consisting of silt, clay and sand) at the bottom of this channel.

Considering these morphodynamic characteristics, and given also the historical evolution of the channel (Fig. 4.1b), the spatial distribution of positive thermal anomalies, representing groundwater inputs, appears to be controlled by two main morpho-sedimentary features: (i) outcropping on the channel banks of former bars composed of coarse sediments and (ii) local thinning of the fine-grained sediment clogging at the channel bottom. Below, we present some additional secondary controlling factors.

As shown in Figures 4.1b and 4.5, large bars, which are composed of coarse sediments like pebbles and gravels, were deposited at the beginning of the correction works (1838) on each side of the former Rhine thalweg (corresponding to the current 'old channel'). At some locations of the old channel banks we observed outcrops of gravel/pebble bars. They correspond to areas characterized by higher hydraulic conductivity that enhance groundwater inputs (thermal peaks located between 630-840 m and 990 m). Otherwise, thermal peaks in the first thermal-based sector (0-10 m and 50 m) seem to relate to groundwater inputs from the upstream stretch of the old channel. As a consequence of the construction of the Rhine canal, the old channel is no longer visible in this area. However, a palaeo-channel with its bottom composed of coarse sediments (with high hydraulic conductivity) still exists under the Rhine Canal. Groundwater inputs increased in the upstream part of the old channel due to infiltration of water from the Rhine Canal. These different results show that groundwater fluxes are not uniform in a floodplain but are driven, among other things, by stratigraphic units of coarse sediments where hydraulic conductivity is higher than in finer sediments. These units correspond to bars and bottoms of palaeo-channels. Identifiable by historical and sedimentological studies, they correspond to groundwater inputs when they are in contact with the current channel. These areas may also play an important role in river hydro-ecology (Bencala *et al.*, 2011; Bolève *et al.*, 2007; Mouw *et al.*, 2014; Revil *et al.*, 2005; Ruehl *et al.*, 2006; Schmitt *et al.*, 2007, 2011; Ward, 1989).

A second factor controlling positive thermal anomalies representing groundwater inputs in the old channel is the thickness of fine sediment clogging layer (silt, clay, sand) at the channel bottom. Fine sediment deposition resulted from the lateral contraction of the channel after the correction works (1838 and 1872) on the Rhine River (except near the outcrops of coarse sediments mentioned above), but also from the backwater effect upstream of the agricultural dam. Indeed, during floods it induces a deposition of the suspension load into the old channel. Channel bottom clogging at is thinnest when the gravel layer is shallow - corresponding probably to former riffles of the Rhine River that had formed prior to the correction works. These sectors present positive thermal anomalies revealing groundwater inputs, as at 400-420 m, 1570 m and probably 920 m. This type of link between surface-water/groundwater exchanges and channel bottom clogging has also been documented by Brunke and Gonser (1997), Packman and MacKay (2003), Poole and Berman (2001).

Many authors and especially Dugdale *et al.* (2013) and Wawrzyniak *et al.* (2016) observed the confluence effect on the thermal patterns, as shown by the effect of channel water mixing with cold water from a small lateral tributary located at 300 m in the old channel (Fig. 4.5a). The very low flow in this lateral channel, as well as its small size, explain the low temperatures resulting from increased contact time with cold air and lower thermal inertia in this small

volume of water. At the opposite, the regular thermal rise downstream of 1050 m is induced by mixing of water from the old Rhine River with contributions from the old channel, as well as the backwater effect upstream of the agricultural dam.

Finally, a local effect controlling thermal decrease is observed on logjams (e.g. at 840 m). This can be explained by the fact that logjams locally reduce the flow velocity, which eventually favors energy exchanges with the atmosphere (Nielsen *et al.*, 1994).

5.3 Outlook on future research avenues and methodological recommendations

Thermal heterogeneity is being increasingly surveyed by TIR remote sensing (Dugdale *et al.*, 2013, 2015; Handcock *et al.*, 2006; Torgersen *et al.*, 2001; Wawrzyniak *et al.*, 2013, 2016; Webb *et al.*, 2008), but studies focusing on upwelling processes controlled by riffle-pool sequences (Boulton *et al.*, 1998), particularly in small morphodynamic anastomosing channels, are scarce. Furthermore, IR thermography is rarely carried out on restored rivers for assessing whether geomorphological restoration has stimulated active surface-water/groundwater exchanges, although these are of great importance in the ecological functioning of aquatic and riverine ecosystems (Descloux *et al.*, 2010; Johnson, 2005).

Mainly due to the influence of bars and riparian vegetation, understanding the fragmentation in water temperature patterns measured with airborne TIR over small rivers remains a technical challenge (Handcock *et al.*, 2006; Torgersen *et al.*, 2001). Although our aerial surveys took place in winter, when vegetation development and foliar cover were at their minimum, thermal measurements were influenced by riparian branches. Overhanging vegetation and bars reduced the number of 'pure' water pixels scanned over the entire width of the channel. In the vicinity of the channel banks the proportion of pixels influenced by tree branches increased significantly. Based on flight parameters and camera resolution, pixels located on narrow river sections (< 7-pixels), where the accuracy of TIR images is reduced, were removed using a buffer zone of 1m, which corresponds to 3.5 pixels (Handcock *et al.*, 2006; Torgersen *et al.*, 2001). In order to minimize data losses, future surveys should be carried out by drones under the riparian canopy, as recently documented by Wawrzyniak *et al.* (2016). This type of device, applied at finer spatial scales, provides continuous thermal data series. However, some sources of uncertainty, such as riparian-induced shadows, roughened water surfaces (Masuda *et al.*, 1988) and logjams cannot be completely avoided. To identify controlling factors of thermal anomalies distribution in fluvial systems, complementary data like lateral morphodynamics - including if possible bedload dynamics -, riffle-pool sequences and the location of old gravel bars outcropping in banks, have to be taken into account (Arrigoni *et al.*, 2008; Dugdale *et al.*, 2013).

6 CONCLUSION

Morpho-sedimentary diversity, gravel bars deposition and riffle-pool sequences control the longitudinal stream temperature patterns on the new morphodynamic channel. These characteristics stem from the first floods that occurred after the restoration project. Morphological changes are particularly pronounced in the bending sectors where gravels and pebbles are remobilized by lateral erosion and are deposited as bars and riffles. Results reveal that upwelling zones are located preferentially nearby these accumulation areas of coarse sediments. In contrast, the old channel is characterized by a relatively thick clogging layer and no bars nor riffle-pool sequences. Groundwater inputs are mainly controlled by bank outcrops of former gravel bars and channel bottom clogging thinning. These results allowed to validate our two working hypotheses: 1. in the new channel, groundwater inputs are induced by riffles

and bars; 2. in the old channel, they are controlled by former gravel bars outcropping on the banks, as well as local thinning of the clogging layer at the channel bottom. Overall, IR thermography is a non-invasive surveying tool which can be used by managers to evaluate the hyporheic processes of lateral channels and locate the spatial distribution of thermal refuges. Further research is required to gain a better understanding of groundwater input sources in small morphodynamic channels. A high resolution survey at the scale of riffle-pool sequences and bars, as well as a temporal surveys of thermal anomalies, stand as promising avenues in this respect (especially when responding to the requirements as defined by Dugdale *et al.,* 2013).

7 ACKNOWLEDGEMENTS

This study has been funded by the European Community (LIFE08 NAT/F/00471), the City of Strasbourg, the University of Strasbourg (IDEX-CNRS 2014 MODELROH project), the French National Center for Scientific Research (CNRS), the ZAEU (Zone Atelier Environnementale Urbaine - LTER), the Water Rhin-Meuse Agency, the DREAL Alsace, the "Région Alsace", the "Département du Bas-Rhin" and the company "Électricité de France". We acknowledge Rodolphe Montagnon who carried out the flight by powered paraglider for the TIR survey. We also thank the two anonymous reviewers who provided very constructive comments that greatly contributed to improve the manuscript.

8 REFERENCES

Acuña, V., Tockner, K., 2009. Surface-subsurface water exchange rates along alluvial river reaches control the thermal patterns in an Alpine river network. Freshwater Biology, 54: 306–320. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2008.02109.x

Angilletta, M.J.J., 2009. Thermal Adaptation: A Theoretical and Empirical Synthesis. Oxford University Press: Oxford, 290 p.

Arnell, N.W., Reynard, N.S., 1996. The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain. Journal of Hydrology 183: 397–424.

Arrigoni, A.S., Poole, G.C., Mertes, L.A.K., O'Daniel, S.J., Woessner, W.W., Thomas, S.A., 2008. Buffered, lagged, or cooled? Disentangling hyporheic influences on temperature cycles in stream channels: hyporheic influences on stream temperature. Water Resources Research, 44: 13 p. DOI: 10.1029/2007WR006480

Bencala, K.E., 2005. Hyporheic exchange flows. Encyclopedia of hydrological sciences, 7 p.

Bencala, K.E., Gooseff, M.N., Kimball, B.A., 2011. Rethinking hyporheic flow and transient storage to advance understanding of stream-catchment connections: opinion. Water Resources Research, 47: 9 p. DOI: 10.1029/2010WR010066

Bernot, M.J., Dodds, W.K., 2005. Nitrogen Retention, Removal, and Saturation in Lotic Ecosystems. Ecosystems, 8: 442–453. DOI: 10.1007/s10021-003-0143-y

Bolève, A., Revil, A., Janod, F., Mattiuzzo, J.L., Jardani, A., 2007. Forward modeling and validation of a new formulation to compute self-potential signals associated with ground water flow. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 11: 1661–1671.

Bornette, G., Amoros, C., Lamouroux, N., 1998. Aquatic plant diversity in riverine wetlands: the role of connectivity. Freshwater Biology, 39: 267–283.

Boulton, A.J., Findlay, S., Marmonier, P., Stanley, E.H., Valett, H.M., 1998. The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. Annual Review of Ecology and Systematics, 29: 59–81.

Breil, P., Lafont, M., Vivier, A., Namour, P., Schmitt, L., 2007. Effects of combined sewer overflows on a periurban stream ecosystem: Methodological approach. International Symposium 'New directions in Urban Water Management'. UNESCO, 8 p.

Broadmeadow, S.B., Jones, J.G., Langford, T.E.L., Shaw, P.J., Nisbet, T.R., 2011. The influence of riparian shade on lowland stream water temperatures in southern England and their viability for brown trout. River Research and Applications, 27: 226–237. DOI: 10.1002/rra.1354

Brunke, M., Gonser, T., 1997. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. Freshwater Biology, 37: 33 p.

Burkholder, B.K., Grant, G.E., Haggerty, R., Khangaonkar, T., Wampler, P.J., 2008. Influence of hyporheic flow and geomorphology on temperature

of a large, gravel-bed river, Clackamas River, Oregon, USA. Hydrological Processes, 22: 941–953. DOI: 10.1002/hyp.6984

Caissie, D., 2006. The Thermal Regime of Rivers: A Review. Freshwater Biology, 51: 1389–1406.

Caissie, D., El-Jabi, N., Hebert, C., 2007. Comparison of hydrologically based instream flow methods using a resampling technique. Canadian journal of civil engineering, 34: 66–74.

Cardenas, M.B., Wilson, J.L., Zlotnik, V.A., 2004. Impact of heterogeneity, bed forms, and stream curvature on subchannel hyporheic exchange. Water Resources Research, 40: 14 p. DOI: 10.1029/2004WR003008

Cardenas, M.B., Harvey, J.H., Packman, A.I., Durelle T. S., 2008. Ground-based thermography of fluvial systems at low and high discharge reveals potential complex thermal heterogeneity driven by flow variation and bioroughness. Hydrological Processes, 22: 980–986.

Champion, M., 1863. Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours. Dunod. Paris, 501 p.

Chen, C., Shi, P., Mao, Q., 2003. Application of remote sensing techniques for monitoring the thermal pollution of cooling-water discharge from nuclear power plant. Journal of Environmental Science and Health, 38: 1659–1668. DOI: 10.1081/ESE-120021487

Conrad, O., 2011. Les crues du Rhin. Une lutte incessante et longtemps vaine au XIXième s. (1801-1852). Annuaire de la Société d'Histoire de la Hardt & du Ried, 23: 57–76.

Constantz, J., Thomas, C.L., Zellweger, G., 1994. Influence of diurnal variations in stream temperature on streamflow loss and groundwater recharge. Water Resources Research, 30: 3253–3264.

Descloux, S., Datry, T., Philippe, M., Marmonier, P., 2010. Comparison of different techniques to assess surface and subsurface streambed colmation with fine sediments. International Review of Hydrobiology, 95: 520–540. DOI: 10.1002/iroh.201011250

Dugdale, S.J., Bergeron, N.E., St-Hilaire, A., 2013. Temporal variability of thermal refuges and water temperature patterns in an Atlantic salmon river. Remote Sensing of Environment, 136: 358–373. DOI: 10.1016/j.rse.2013.05.018

Dugdale, S.J., Bergeron, N.E., St-Hilaire, A., 2015. Spatial distribution of thermal refuges analysed in relation to riverscape hydromorphology using airborne thermal infrared imagery. Remote Sensing of Environment, 160: 43-55

Evans, E.C., Greenwood, M.T., Petts, G.E., 1995. Thermal profiles within river beds. Hydrological Processes, 9: 19–25.

Evans, E.C., Petts, G.E., 1997. Hyporheic temperature patterns within riffles. Hydrological Sciences Journal, 42: 199–213. DOI: 10.1080/02626669709492020

FLIR, 2010. ThermaCAM Researcher 2.10 Pro. Danderyd, Sweden.

Fricke, K., Baschek, B., 2015. Temperature monitoring along the Rhine River based on airborne thermal infrared remote sensing: estimation of in situ water temperatures and inflow detection compared to artificial satellite data. Journal of Applied Remote sensing, 9: 17 p.

Handcock, R.N., Gillespie, A.R., Cherkauer, K.A., Kay, J.E., Burges, S.J., Kampf, S.K., 2006. Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales. Remote Sensing of Environment, 100: 427–440. DOI: 10.1016/j.rse.2005.07.007

Hannah, D.M., Malcolm, I.A., Soulsby, C., Youngson, A.F., 2004. Heat exchanges and temperatures within a salmon spawning stream in the Cairngorms, Scotland: seasonal and sub-seasonal dynamics. River Research and Applications, 20: 635–652.

Hannah, D.M., Malcolm, I.A., Bradley, C., 2009. Seasonal hyporheic temperature dynamics over riffle bedforms. Hydrological Processes, 23: 2178–2194. DOI: 10.1002/hyp.7256

Johnson, P.A., 2005. Preliminary Assessment and Rating of Stream Channel Stability near Bridges. Journal of Hydraulic Engineering, 10: 845–852.

Lafont, M., 2001. A conceptual approach to the biomonitoring of freshwater: the Ecological Ambience System. Journal of Limnology, 1: 17–24.

Lamarre, H., Mac Vicar, B., Roy, A.G., 2005. Using Passive Integrated Transponder (PIT) Tags to Investigate Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers. Journal of Sedimentary Research, 75: 736–741.

Loheide, S.P., Gorelick, S.M., 2006. Quantifying stream−aquifer interactions through the analysis of remotely sensed thermographic profiles and in situ temperature histories. Environmental Science & Technology, 40: 3336–3341. DOI: 10.1021/es0522074

Lyons, J., Wang, L., Simonson, T.D., 1996. Development and validation of an index of biotic integrity for coldwater streams in Wisconsin. North

American Journal of Fisheries Management, 16: 241–256. DOI: 10.1577/1548-8675(1996)016<0241:DAVOAI>2.3.CO;2

Magnuson, J.J., Crowder, L.B., Medvick, P.A., 1979. Temperature as an ecological resource. American Zoologist, 19: 331–343.

Makaske B., 2001. Anastomosing rivers: a review of their classification, rigin and sedimentary products. Earth-Sciences Reviews, 53: 149–196.

Makaske, B., Smith, D.G., Berendsen, Henk J.A., De Boer Arjan, G., Van Nielen-Kiezebrink, Marinka F., Locking, T., 2009. Hydraulic and sedimentary processes causing anastomosing morphology of the upper Columbia River, British Columbia, Canada. Geomorphology, 111: 194–205.

Malard, F., Mangin, A., Uehlinger, U., Ward, J.V., 2001. Thermal heterogeneity in the hyporheic zone of a glacial floodplain. Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques, 7: 1319–1335.

Masuda, K., Takashima, T., Takayama, Y., 1988. Emissivity of pure and sea waters for the model sea surface in the infrared window regions. Remote Sensing of Environment, 24: 313–329.

Meyer, A., Combroux, I., Schmitt, L., Trémolières, M., 2013. Vegetation dynamics in side-channels reconnected to the Rhine River: what are the main factors controlling communities trajectories after restoration? In Hydrobiologia 714, 35–47. doi:10.1007/s10750-013-1512-y

Mouw, J.E.B., Tappenbeck, T.H., Stanford, J.A., 2014. Spawning tactics of summer chum salmon Oncorhynchus keta in relation to channel complexity and hyporheic exchange. Environmental Biology of Fishes, 97: 1095–1107. DOI: 10.1007/s10641-013-0200-0

Namour, P., Schmitt, L., Eschbach, D., Moulin, B., Fantino, G., Breil, P., 2015. Stream pollution concentration in riffle geomorphic units (Yzeron basin, France). Science of The Total Environment, 532: 80-90.

Nielsen, J.L., Lisle, T.E., Ozaki, V., 1994. Thermally stratified pools and their use by steelhead in northern California streams. Transactions of the American Fisheries Society, 123: 613–626. DOI: 10.1577/1548-8659(1994)123<0613:TSPATU>2.3.CO;2

Packman, A.I., MacKay, J.S., 2003. Interplay of stream-subsurface exchange, clay particle deposition, and streambed evolution: interplay of exchange and clay deposition. Water Resources Research, 39: 7p. DOI: 10.1029/2002WR001432

Pfister, L., McDonnell, J.J., Hissler, C., Hoffmann, L., 2010. Ground-based thermal imagery as a simple, practical tool for mapping saturated area connectivity and dynamics. Hydrological Processes, 224: 3123–3132.

Piasny, G., 2016. Modélisation hydrosédimentaire de l'hydrosystème fluvial du Rohrschollen (Strasbourg). Mémoire de recherche, Université de Strasbourg.

Poirel, A., Lauters, F., Desaint, B., 2008. 1977-2006 : Trente années de mesures des températures de l'eau dans le Bassin du Rhône. Hydroécologie Appliquée, 16 : 191–213. DOI: 10.1051/hydro/2009002

Poole, G.C., Berman, C.H., 2001. An ecological perspective on in-stream temperature: natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation. Environmental Management, 27: 787–802. DOI: 10.1007/s002670010188

Poole, G.C., Stanford, J.A., Frissell, C.A., Running, S.W., 2002. Three-dimensional mapping of geomorphic controls on flood-plain hydrology and connectivity from aerial photos. Geomorphology, 48: 329–347.

Poole, G.C., Stanford, J.A., Running, S.W., Frissell, C.A., 2006. Multiscale geomorphic drivers of groundwater flow paths: subsurface hydrologic dynamics and hyporheic habitat diversity. Journal of the North American Benthological Society, 25: 288–303.

Rakotomalala, R., 2005. TANAGRA : un logiciel gratuit pour l'enseignement et la recherche. Actes de EGC'2005, RNTI-E-3, 2: 697–702.

Revil, A., Cary, L., Fan, Q., Finizola, A., Trolard, F., 2005. Self-potential signals associated with preferential ground water flow pathways in a buried paleo-channel. Geophysical Research Letters, 32: 4 p. DOI: 10.1029/2004GL022124

Ruehl, C., Fisher, A.T., Hatch, C., Huertos, M.L., Stemler, G., Shennan, C., 2006. Differential gauging and tracer tests resolve seepage fluxes in a strongly-losing stream. Journal of Hydrology, 330 : 235–248. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.03.025

Schmitt, L., Maire, G., Nobelis, P., Humbert, J., 2007. Quantitative morphodynamic typology of rivers: a methodological study based on the French Upper Rhine basin. Earth Surface Processes and Landforms, 32: 1726–1746. DOI: 10.1002/esp.1596

Schmitt, L., Lafont, M., Trèmolières, M., Jezequel, C., Vivier, A., Breil, P., Namour, P., Valin, K., Valette, L., 2011. Using hydro-geomorphological typologies in functional ecology: Preliminary results in contrasted hydrosystems. Physics and Chemistry of the Earth, 36: 539–548. DOI: 10.1016/j.pce.2009.11.011

Schmitt, L., Houssier, J., Martin, B., Beiner, M., Skupinski, G., Boës, E., Schwartz, D., Ertlen, D., Argant, J., Gebhardt, A., Schneider, N., Lasserre, M., Trintafillidis, G., Ollive, V., in press. Paléo-dynamique fluviale holocène dans le compartiment Sud-occidental du fossé rhénan (France), Revue d'archéologie de l'Est, 21 p.

Sear, D.A., Armitage, P.D., Dawson, F.H., 1999. Groundwater dominated rivers. Hydrological Processes, 13: 255–276.

Sear, D.A., Newson, M.D., Thorne, C.R., 2003. Guidebook of applied fluvial geomorphology. DEFRA (Flood management division), London, p. 253.

Stanford, J.A., Hauer, F.R., Ward, J.V., 1988. Serial discontinuity in a large river system. Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie, 23: 1114–1118.

Stanford, J.A., Ward, J.V., 2001. Revisiting the serial discontinuity concept. Regulated Rivers: Research & Management, 17: 303–310. DOI: 10.1002/rrr.659

The MathWorks, R2011b. MATLAB. Massachusetts, United States.

Tockner, K., Paetzold, A., Karaus, U.T.E., Claret, C., Zettel, J., 2006. Ecology of braided rivers. Spacial publication-international association of sedimentologists, 36: 51p.

Tonolla, D., Acuña, V., Uehlinger, U., Frank, T., Tockner, K., 2010. Thermal Heterogeneity in River Floodplains. Ecosystems, 13: 727–740. DOI: 10.1007/s10021-010-9350-5

Torgersen, C.E., Price, D.M., Li, H.W., McIntosh, B.A., 1999. Multiscale thermal refugia and stream habitat associations of Chinook salmon in northeastern Oregon. Ecological Applications, 9: 301-319. DOI: 10.2307/2641187

Torgersen, C.E., Faux, R.N., McIntosh, B.A., Poage, N.J., Norton, D.J., 2001. Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. Remote Sensing of Environment, 76: 386–398.

van Vliet, M.T.H., Ludwig, F., Zwolsman, J.J.G., Weedon, G.P., Kabat, P., 2011. Global river temperatures and sensitivity to atmospheric warming and changes in river flow. Water Resources Research, 47: 19p. DOI: 10.1029/2010WR009198

Verneaux, J., 1977. Biotypologie de l'écosystème «eau courante». Détermination approchée de l'appartenance typologique. CR Acad. Sci., D: 77–79.

Wald, A., Wolfowitz, J., 1940. On a test whether two samples are from the same population. The Annals of Mathematical Statistics, 11: 147–162.

Ward, J.V., 1989. The four-dimensional nature of lotic ecosystems. Journal of the North American Benthological Society, 8: 2–8. DOI: 10.2307/1467397

Ward, J.V., (ed.) 1992. Temperature, In: Aquatic Insect Ecology. New York. John Wiley & Sons, Inc., 438 p.

Wawrzyniak, V., Piégay, H., Allemand, P., Vaudor, L., Grandjean, P., 2013. Prediction of water temperature heterogeneity of braided rivers using very high resolution thermal infrared (TIR) images. International Journal of Remote Sensing, 34: 4812–4831. DOI: 10.1080/01431161.2013.782113

Wawrzyniak, V., Piégay, H., Allemand, P., Vaudor, L., Goma, R., Grandjean, P., 2016. Effects of geomorphology and groundwater level on the spatio-temporal variability of riverine cold water patches assessed using thermal infrared (TIR) remote sensing. Remote Sensing of Environment, 175: 337–348. DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.050

Webb, B.W., Hannah, D.M., Moore, R.D., Brown, L.E., Nobilis, F., 2008. Recent advances in stream and river temperature research. Hydrological Processes, 22: 902–918. DOI: 10.1002/hyp.6994

Westhoff, M.C., Savenije, H.H.G., Luxemburg, W.M., Stelling, G.S., Van de Giesen, N.C., Selker, J.S., Pfister, L., Uhlenbrook, S., 2007. A distributed stream temperature model using high resolution temperature observations. Hydrology and Earth System Sciences, 11: 1469-1480.

Zimmermann A., 2012. Évolution hydro-morphologique de la Réserve Naturelle du Rohrschollen (1828-2010). Implications pour une restauration fonctionnelle. Mémoire de recherche, Université de Strasbourg, 127 p.

9 TABLEAU DES CONTRIBUTIONS

General contributions	D. Eschbach	G. Piasny	L. Schmitt	L. Pfister	P. Grussenmeyer	M. Koehl	G. Skupinski	A. Serradj
Conceptualization	●	●	●					
Data acquisition	●	●						
Formal analysis	●	●					●	
Funding acquisition			●					
Investigation	●		●					
Methodology	●	●			●	●		●
Project administration	●		●					
Resources				●	●	●		
Supervision			●					
Validation	●	●	●	●				
Visualization	●	●						
Writing - original draft	●	●	●					
Writing - review & editing	●	●	●	●				
	10	*8*	*8*	*3*	*2*	*2*	*1*	*1*

Detailled author contributions	D. Eschbach	G. Piasny	L. Schmitt	L. Pfister	P. Grussenmeyer	M. Koehl	G. Skupinski	A. Serradj
1 Introduction	0.6		0.4					
2 Study area	0.8		0.2					
3 Material and methods								
3.1 Historical analysis	0.8						0.2	
3.2 Image acquisition	0.2	0.8						
3.3 Image processing	0.2	0.8						
3.4 Image analysis	0.2	0.8						
3.5 Statistical analysis	0.8							0.2
4 Results								
4.1 Thermal variations in the new channel	0.6	0.2	0.2					
4.2 Thermal variations in the old channel	0.6	0.2	0.2					
5 Discussion								
5.1 Factors controlling the spatial distribution of thermal signatures along a morphodynamic anastomosing (new channel)	0.6		0.2	0.2				
5.2 Factors controlling the spatial distribution of thermal signatures along a large stable anastomosing channel (old channel)	0.6		0.2	0.2				
5.3 Outlook on future research avenues and methodological recommandations	0.6	0.2	0.2					
6 Conclusions	0.8			0.2				
	17	*11*	*9.6*	*3.6*	*2*	*2*	*1.2*	*1.2*

%
1
0.8
0.6
0.4
0.2

CHAPITRE 5

MONITORING INTERDISCIPLINAIRE, ÉVALUATION DE LA RESTAURATION ET TENDANCES ÉVOLUTIVES FUTURES

Dans la perspective de transposabilité du suivi de la restauration mené sur l'île du Rohrschollen vers d'autres sites à restaurer ou en cours de restauration, ce **dernier chapitre** présente des méthodes et des résultats complémentaires, issus du suivi des différents compartiments de l'hydrosystème. Puisqu'une réflexion d'ensemble est incontournable pour déterminer les principaux facteurs de contrôle de la réponse (complexe) du milieu, le suivi scientifique développé dans le cadre de la restauration du Rohrschollen s'intègre dans une démarche profondément interdisciplinaire. Cette approche vise à (i) déterminer si les objectifs de la restauration sont atteints, (ii) évaluer *a posteriori* la pertinence du protocole de suivi mis en œuvre et (iii) améliorer, si nécessaire, les modalités de gestion afin d'optimiser les gains environnementaux en termes d'efficacité et de durabilité des actions de restauration. Sur la base des résultats obtenus, nous proposons un tableau de synthèse des indicateurs utilisés pour évaluer les actions entreprises et déduire les tendances évolutives futures. Ce chapitre s'appuie sur l'axe 4 : **intérêts scientifiques et opérationnels d'une approche interdisciplinaire pour le suivi et l'évaluation de la restauration fonctionnelle d'anastomose.**

1 MONITORING INTERDISCIPLINAIRE

1.1 Cadre méthodologique

Un suivi scientifique est fondé sur la comparaison d'un état initial pré-restauration avec un état post-restauration. L'état initial est composé de 2 sous-états : l'**état 0**, réalisé avant les travaux, qui concerne le Bauerngrundwasser et l'**état 0bis**, réalisé immédiatement après les travaux, mais avant les premières mises en eau, qui concerne le nouveau chenal. La démarche globale s'appuie sur le schéma conceptuel développé par Lejot (2008 ; Fig. 5.1).

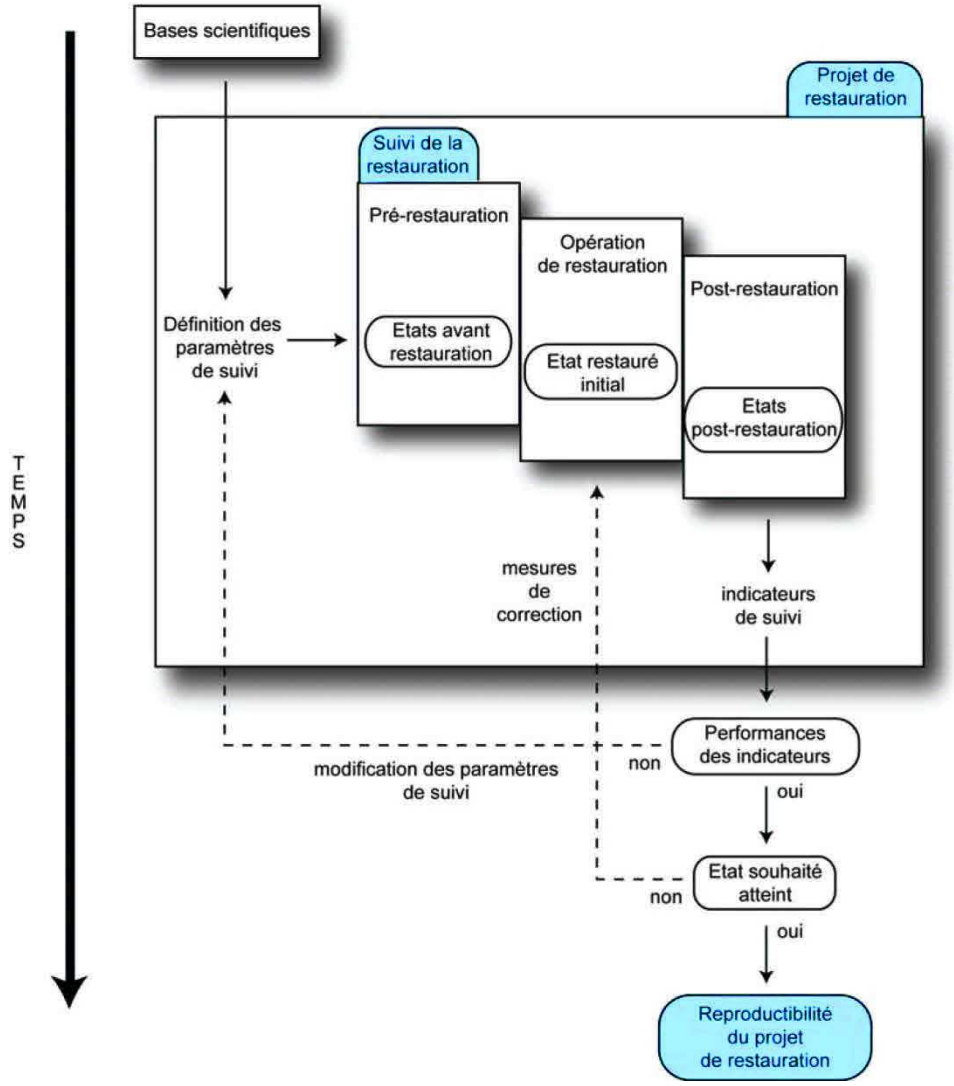


Figure 5. 1 - Schéma conceptuel du déroulement d'un projet de restauration (d'après Lejot, 2008).

1.2 Détermination des tâches pour le suivi de la restauration de l'île du Rohrschollen

Sur l'île du Rohrschollen, les premières études liées à la définition de l'état pré-restauration ont débuté en 2012. Sur la base d'un protocole de suivi déterminé en adéquation avec les objectifs du projet LIFE+, les premières campagnes de terrain ont démarré entre 2013 et 2014, presque un an avant les premières injections. Sept transects d'étude ont été mis en place sur le Bauerngrundwasser. Ils ont été complétés par 3 transects supplémentaires après la création du nouveau chenal. Définis sur la base de critères géomorphologiques (largeur, profondeur,

forme du linéaire…), ces transects ont également pu être utilisés pour les suivis d'autres compartiments, par exemple pour le suivi phyto-écologique.

Différents compartiments de l'hydrosystème ont été étudiés : géomorphologie, hydraulique-hydrologie (limnimétrie et jaugeages), hydrogéologie (piézométrie), écologie des milieux aquatiques (macrophytes, macroinvertébrés, ichtyofaune) et riverains (végétation rivulaire).

La démarche scientifique mise en œuvre s'est appuyée sur plusieurs tâches :

- tâche 0 : étude historique du Bauerngrundwasser ;
- tâche 1 : élaboration du protocole de suivi scientifique ;
- tâche 2 : réalisation de l'état initial E0 (Bauerngrundwasser) et E0bis (nouveau chenal de connexion amont) ;
- tâche 3 : suivi scientifique post-restauration ;
- tâche 4 : évaluation du protocole et proposition d'un protocole plus léger, mais adapté au suivi à moyen terme du fonctionnement du milieu.

Le schéma ci-dessous présente, de façon simplifiée, la démarche menée sur l'île du Rohrschollen :

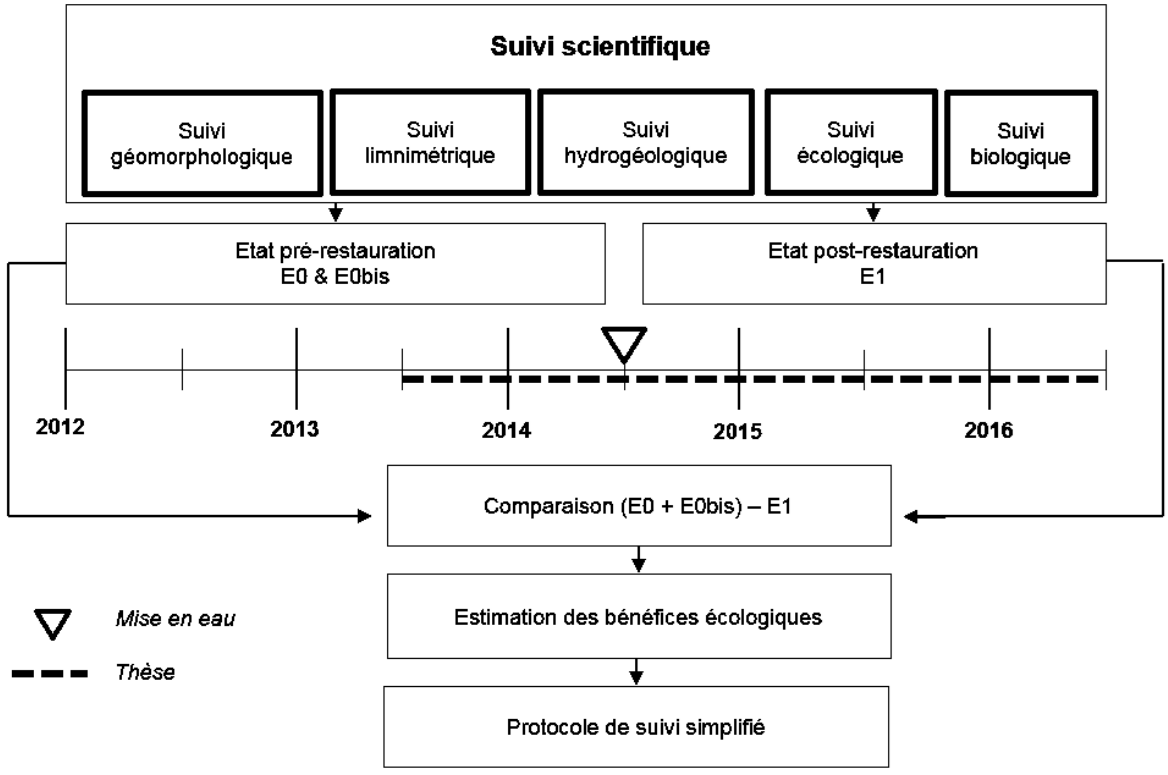


Figure 5. 2 - Schéma simplifié du suivi scientifique mené sur l'île du Rohrschollen.

L'état initial pré-restauration regroupe les tâches 0, 1 & 2. Pour la tâche 2 « *Réalisations de l'état initial E0 (Bauerngrundwasser) et E0bis (nouveau chenal de connexion amont)* », les objectifs spécifiques et les questions scientifiques qui en découlent sont présentés dans le tableau 5.1. Les questions sont hiérarchisées en fonction des échelles spatiales déterminées pour l'étude et présentées par grands compartiments.

Tableau 5. 1 - Objectifs spécifiques du projet déclinés en questions scientifiques par compartiments suivis.

Échelle	Objectifs du suivi	Questionnement scientifique		
		Géomorphologie	**Hydrologie-Hydrogéologie**	**Biologie –Physico-chimie**
Île du Rohrschollen	Évaluer le fonctionnement des habitats sur la base d'une comparaison pré- et post-restauration Optimiser les modalités de gestion Élaborer un protocole de suivi simplifié pour un suivi à moyen terme	Questions générales interdisciplinaires : Comment évaluer l'efficacité des travaux de restauration ? Quelle(s) indicateur(s) de suivi faut-il utiliser ? Quelle est la durabilité du projet ? Quelles améliorations peut-on proposer au gestionnaire pour optimiser les modalités de gestion ? Une transposition du suivi scientifique à des sites comparables à celui du Rohrschollen et susceptibles d'être restaurés est-elle possible ?		
Bauerngrundwasser (BGW)	Réaliser l'étude sédimentologique et cartographique de l'état pré-restauration	Quelle est la dynamique de comblement du BGW ? Quels types de sédiments composent les berges et le fond du BGW? Quand le processus de comblement a-t-il débuté et pour quelle(s) raison(s) ? Quels sont la superficie et le volume du comblement ? Quel(le-s) contrainte(s)/risque(s) cela peut-il représenter dans le cadre du projet de restauration ? La nature du fond du chenal a-t-elle évolué ? Où se localisent les secteurs décolmatés ?	Les échanges nappe-rivière ont-ils été améliorés ? Existe-t-il une localisation préférentielle des échanges nappe-rivière ? Le niveau global de la nappe, et l'amplitude des battements de nappe, ont-ils augmenté ? Les gradients hydrauliques ont-ils évolué ?	A-t-on observé l'apparition de nouvelles espèces ? La localisation des espèces a-t-elle évolué ? Le caractère hygrophile de la végétation terrestre a-t-il été renforcé ? La qualité de l'eau et des sédiments s'est-elle améliorée ? Quels types et quelles quantités de contaminants sont présents dans les sédiments mobilisables ? Présentent-ils un risque majeur pour le milieu ? Observe-t-on une augmentation significative de l'abondance et de la diversité des espèces piscicoles ?
Nouveau chenal	Réaliser un état initial, avant les premières mises en eau	Quelle est la composition granulométrique du lit du nouveau chenal ? Quelle est l'intensité des évolutions morphologiques post-crues ? Quels outils permettent de suivre efficacement ces évolutions ? Quel est le débit critique de mise en mouvement des particules ? Quelles sont la distance, la vitesse et la trajectoire de déplacement des particules grossières de la charge de fond ? Quelle est la dynamique d'évolution des faciès d'écoulement ? Quel type de sédiment est introduit dans le chenal par sapement latéral ? Quand le chenal atteindra-t-il un fonctionnement morpho-dynamique « d'équilibre » ?	Le fonctionnement hydraulique est-il optimal (débit injecté / fréquence des submersions…) ? Quel est le débit à pleins bords ? Comment la nappe phréatique répond-elle aux submersions ? Commet se répartissent les échanges nappe-rivière ? (localisation des zones d'exfiltrations)	Quelle est la dynamique de colonisation (faune et flore) du chenal et de ses berges ?

Les tâches 3 et 4 ont été mises en œuvre dans le cadre du suivi post-restauration, après les premières injections écologiques (juillet - août 2014). Après chaque ouverture de vanne, les campagnes de terrain ont permis de collecter les données nécessaires à l'évaluation des effets des injections sur l'hydrosystème. L'ensemble des tâches et la chronologie du suivi pour la période 2014 - 2016 sont synthétisées dans la figure 5.3.

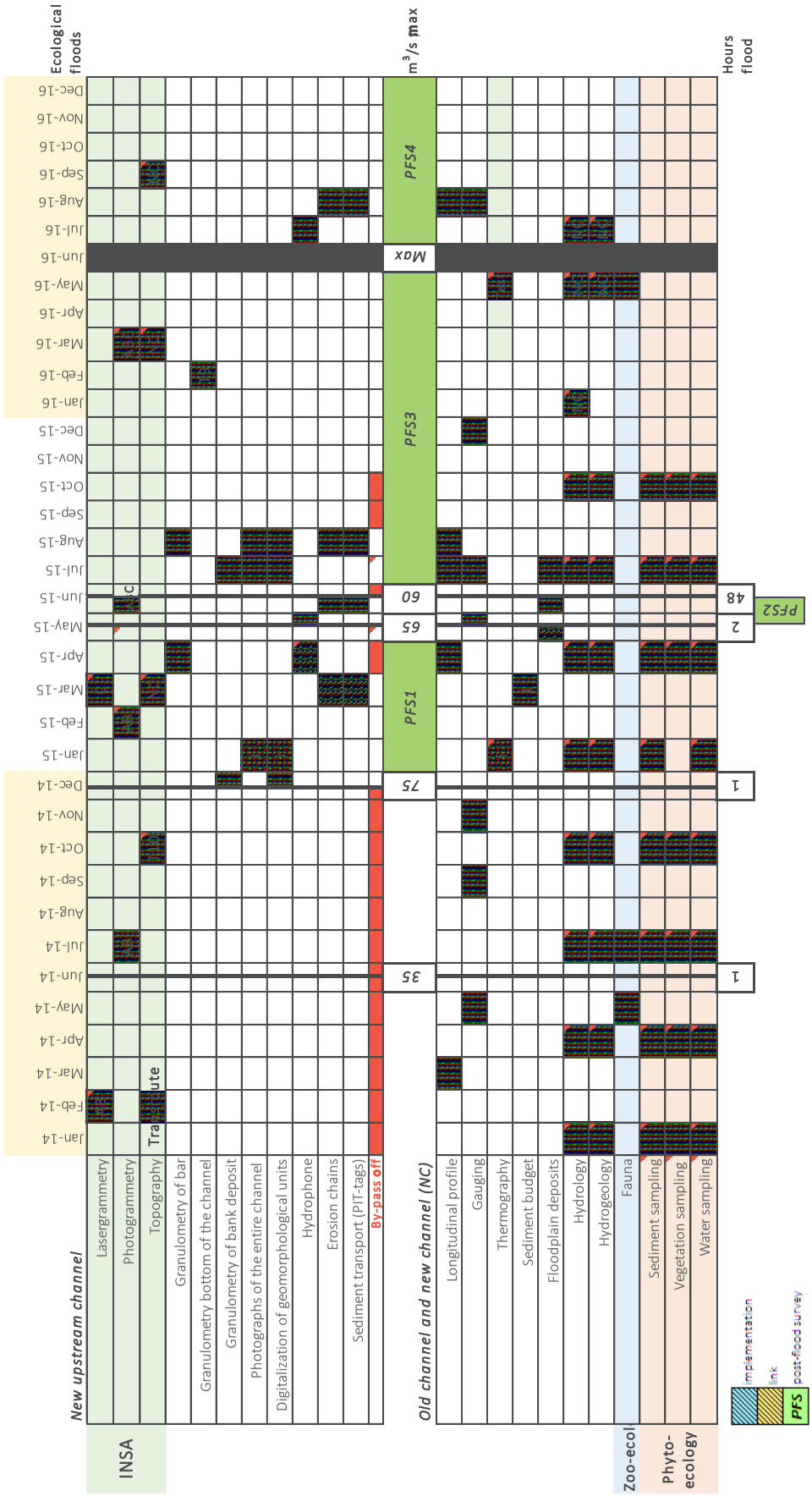


Figure 5. 3 - Chronologie et méthodes utilisées pour le suivi de l'ensemble des compartiments sur le nouveau chenal et le Bauerngrundwasser.

2 SUIVI GÉOMORPHOLOGIQUE

Dans cette section nous présentons les méthodes et les résultats complémentaires, d'ordre géomorphologique, mis en œuvre dans le suivi. Les méthodes développées dans les chapitres précédents ne font pas l'objet d'une description supplémentaire dans cette section, mais sont rappelées dans le tableau 2.

Tableau 5. 2 - Types de dynamiques suivies et méthodes correspondantes ayant fait l'objet d'une description dans un chapitre antérieur.

Méthodes	Chapitre
Prélèvement et analyse granulométrique des sédiments fins du paléochenal	3
Granulométrie des sédiments grossiers (méthode Wolman)	3
Suivi des évolutions latérales (profils en travers, modélisation 3D)	3
Suivi des évolutions verticales (profil en long)	4
Suivi des volumes érodés-déposés (budgets sédimentaires)	3
Suivi des faciès d'écoulement (cartographie, suivi topo)	4
Suivi de la charge de fond (traçage RFID)	4

2.3 Chaînes d'érosion

2.3.1 Objectifs

Cette méthode permet de suivre l'épaisseur de sédiments en transit durant les phases de creusement et remblaiement qui ont lieu pendant les crues (Fig. 5.4-a). Plus précisément, cette méthode permet de déterminer l'épaisseur de la **couche active** pendant les crues, une information utile pour caractériser le fonctionnement morphodynamique du cours d'eau. La détermination de l'épaisseur de la couche active est donc complémentaire aux résultats topographiques qui ne fournissent qu'une donnée correspondant à la morphologie finale du fond, correspondant à un dépôt ou à une érosion des sédiments au fond du lit.

2.3.2 Méthodes

Le nouveau chenal a été équipé avec 35 chaînes d'érosion réparties sur 7 transects (Fig. 5.4-b). Les chaînes ont été localisées à l'aide de repères fixes (tiges filetées) positionnés sur chaque berge. Une simple mesure par rapport à ces repères a permis de localiser facilement la position des chaînes sur le fond du chenal. À l'aide d'une barre d'enfoncement et d'un maillet, les chaînes ont été ancrées dans le fond du chenal à une profondeur variant entre 0.5 et 0.8 m.

2.3.3 Résultats - Limites

Dès la première campagne de suivi, 40% des chaînes ont été retrouvées. Ce chiffre s'est trouvé divisé par 2 lors de la campagne suivante. Dans les secteurs de dépôt (p. ex., bancs latéraux), les chaînes ont pu être recouvertes par plus d'un mètre de gravier. Cette situation a fortement contraint la prospection, car il a été difficile de creuser à plus de 0.5 m de profondeur. D'autres secteurs (p. ex., mouilles) ont été soumis à une érosion importante, parfois supérieure à la profondeur d'ancrage des chaînes. Dans ce cas, l'inaccessibilité du site a rendu la prospection impossible. De ce jeu de données très lacunaires, nous avons pu estimer une couche active de l'ordre de **~0.12 m** pour la campagne du 09/06/2015 et **~0.21 m** pour la campagne du 12/08/2015.

La méthode semble mal adaptée au suivi des milieux très dynamique (p. ex., Thorne, 1978, 1981 ; Lawler, 1993), mais comme le montre Hooke (1979), à défaut d'autres méthodes, cette technique est encore souvent utilisée.

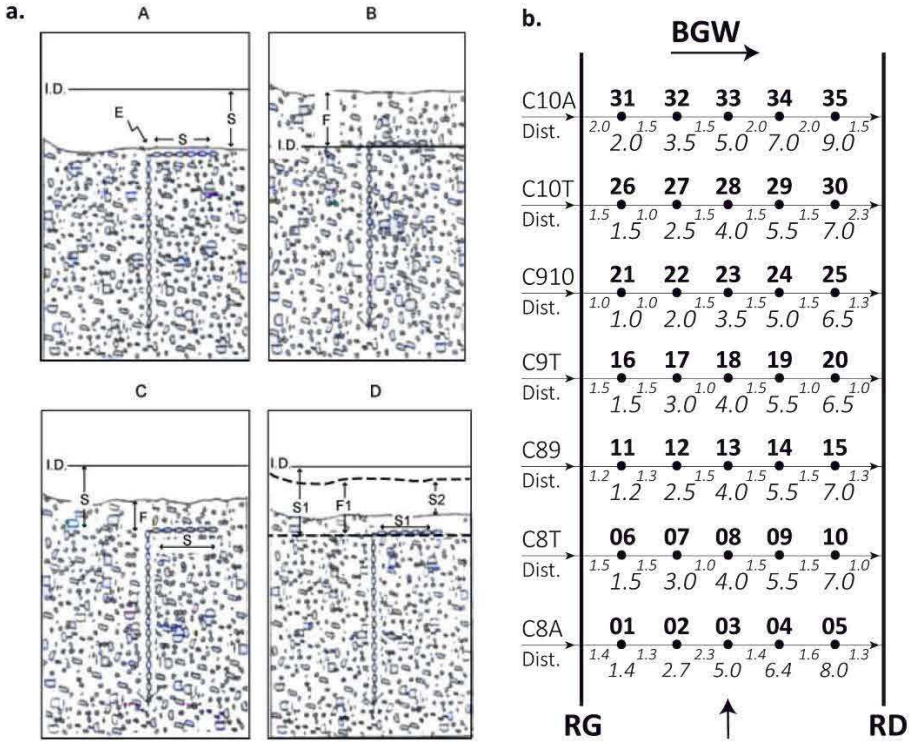


Figure 5. 4 - a. Principe de mesure des chaînes d'érosion d'après Laronne et al. (1994) et repris de Rollet (2007). (A) : érosion du lit sur une épaisseur de S à partir du niveau initial ID ; S est égal à la longueur de la chaîne horizontale, couchée sur le fond du lit ; (B) : remblaiement du lit sur une épaisseur F à partir d'un niveau de base issu d'un épisode de creusement antérieur ; (C) : érosion du lit sur une épaisseur S suivie d'un remblaiement sur une épaisseur F ; l'évolution du niveau topographique après passage de la crue est donc égale à S-F ; (D) : érosion initiale sur une épaisseur S1 suivie d'un remblaiement sur une épaisseur F1, érosion finale sur une épaisseur S2 ; la chaîne ne permet pas de suivre fidèlement la succession des épisodes de creusement et de remblaiement (Liebault, 2003). b. Répartition schématique des chaînes d'érosion sur le nouveau chenal : numérotation des transects, identifiants des chaînes et distances intermédiaires (chiffres situés entre les points) et cumulées (chiffres situés sous les points), distance en m.

2.4 Débit critique de mise en mouvement

2.4.1 Objectifs

La détermination du débit critique de mise en mouvement est un paramètre important pour caractériser le transport solide et le fonctionnement morphodynamique d'une rivière (Geay, 2013). Cette méthode présente également un intérêt élevé pour effectuer des modélisations hydro-sédimentaire, comme cela est en cours dans le cadre de l'IDEX MODELROH.

2.4.2 Méthodes

Un dispositif de surveillance en temps réel a été mis en place en rive gauche de la partie médiane du nouveau chenal (Fig. 5.5). Son objectif était double : (i) surveiller par vidéo l'évolution des submersions quand le terrain était impraticable, (ii) déterminer, à l'aide d'un hydrophone, le débit critique de mise en mouvement des particules grossières. Si le dispositif de surveillance par caméra a été totalement autonome (contrôlé via le réseau GSM), des interventions étaient nécessaires pour l'acquisition des données acoustiques de l'hydrophone.

À l'aide d'un ordinateur de terrain, il a été possible de programmer plusieurs paramètres : date et heure, plage d'enregistrement, fréquences sonores, formats de fichiers. Basée sur les travaux de Geay (2013), une gamme de fréquences comprises entre 0.1 – 100 kHz (± 3 dB) a été sélectionné. Quatre cartes SD de 16 Go ont permis de stocker jusqu'à 4 jours de données acoustiques brutes. Relié au dispositif de stockage, le micro a été solidement fixé à un tube métallique et placé dans le cours d'eau. Le tube a été maintenu par 4 tiges métalliques enfoncées de plus d'un mètre dans la berge afin de garantir la stabilité de l'équipement pendant les submersions. Le traitement du signal a été réalisé sur le logiciel libre *Audacity*.

Figure 5. 5 - Dispositif de surveillance vidéo et d'acquisition de données acoustiques. (1) Panneau photovoltaïque et caméra de surveillance téléconnectée ; (2) Dispositif de stockage de l'énergie solaire (batterie au bas de l'image) et boîtier d'acquisition de l'hydrophone (en haut de l'image) ; (3) Micro immergé.

2.4.3 Résultats - Interprétation

De nombreuses contraintes techniques ont empêché le suivi de l'ensemble des submersions : problème d'enregistrement, signal saturé… Au final, seules les injections des 18 et 19 mai 2015 ont pu être exploitées pour l'estimation du débit critique de mise en mouvement.

L'écoute des enregistrements a permis de déterminer l'heure du début de mise en mouvement des particules grossières. Le temps de transit entre le débitmètre (situé à l'aval immédiat de la vanne) et l'hydrophone (situé 880 m plus en aval) a été déterminé sur la base des vitesses moyennes mesurées par ADCP au début de la submersion, lorsque le débit injecté est de l'ordre de 30 $m^3.s^{-1}$. Un intervalle de 5.7 min a été déterminé entre le débitmètre et l'hydrophone. Ainsi, le débit critique de mise en mouvement a pu être estimé entre **17.79** et **20.84 $m^3.s^{-1}$**.

Cette gamme est proche du débit à pleins bords estimé dans le cadre de la modélisation hydro-sédimentaire développée par ICUBE et estimé à ~20 $m^3.s^{-1}$. Ce résultat, qui est encore à consolider, tend à montrer que la charge de fond n'est mise en mouvement que pour des durées relativement courtes, ce qui explique pourquoi les distances de transport des traceurs sédimentaire sont relativement courtes (de l'ordre de 20 m par submersion). Ceci est renforcé par le fait que les vitesses dans le lit mineur diminuent lorsqu'il y a débordement.

2.4.4 Limites et perspectives

Si le résultat permet de donner un ordre de grandeur, sa robustesse n'a pas pu être testée et de nombreuses incertitudes ont été identifiées :

- la localisation du dispositif en bordure du chenal : le secteur d'implantation a été fortement érodé (4 m au droit du mât). L'intensité de l'érosion latérale dans ce secteur n'avait pas été envisagée. Toutefois, lors des submersions, un contre-courant important affecte la berge où l'équipement est installé, favorisant l'instabilité de ce secteur. Cette contrainte majeure perturbe l'enregistrement et favorise la déstabilisation du capteur, ce qui a pu perturber le signal sonore ;
- la localisation du micro dans le cours d'eau : la proximité du micro avec la berge peut être à l'origine d'une perturbation du signal, notamment si le secteur est instable. Dans ce cas il est impossible d'identifier si la différence acoustique correspond à la mobilité de la charge de fond ou à l'érosion de la berge à proximité du capteur ;
- l'orientation du micro : le micro a été positionné perpendiculairement au courant. Des tests méthodologiques semblent nécessaires pour déterminer l'orientation optimale du capteur dans ce type de cours d'eau (largeur et profondeur faible, dynamique hydro-morphologique élevée).

Pour poursuivre les investigations, le déploiement de ce dispositif doit être mieux adapté avec, par exemple, la mise en place d'une armature enjambant le chenal et dont les extrémités seraient solidement arrimées sur les berges, à plusieurs mètres du chenal.

2.5 Évolution morphologique du Bauerngrundwasser

2.5.1 Objectifs

Le suivi morphologique mené sur le Bauerngrundwasser doit permettre de suivre l'évolution verticale du chenal (incision, aggradation, stabilité) et la variation de l'épaisseur du colmatage, dans un contexte où un décolmatage plus ou moins important selon les secteurs est visé par la restauration.

2.5.2 Méthodes

Compte tenu de la longueur du linéaire du Bauerngrundwasser, des méthodes traditionnelles ont été utilisées pour suivre l'évolution longitudinale du Bauerngrundwasser. Un topofil a été utilisé pour déterminer la distance entre un point de référence situé à l'amont du tronçon et le point de mesure. Tous les 50 m, une mesure de l'épaisseur de la lame d'eau et de l'épaisseur du colmatage a été réalisée à l'aide d'une tige graduée de 2 m.

Résultats - Interprétation**.**

Bien que la topographie du fond du Bauerngrundwasser reste relativement stable sur la période de suivi, les comparaisons des profils longitudinaux du Bauerngrundwasser montrent des variations locales de l'épaisseur du colmatage (Fig. 5.6). Au niveau de la confluence avec le nouveau chenal (1150 m), on observe une augmentation considérable de l'épaisseur du

colmatage (~1 m). Les paramètres morphométriques du Bauerngrundwasser (largeur et profondeur importantes par rapport au nouveau chenal) et la faiblesse de la pente de la ligne d'eau du Bauerngrundwasser ont favorisé le dépôt des sédiments les plus grossiers (sables). Les fines (sables fins, limons, argiles) sont exportées par suspension et déposées sur les berges, dans la forêt adjacente et dans le Vieux-Rhin. Une langue sableuse composée de sédiments provenant du nouveau chenal prograde vers T2. Un suivi bathymétrique de ce secteur mené en juillet 2015 a permis d'estimer le volume de la langue sableuse à **1056 m³**.

Sur l'ensemble du linéaire du Bauerngrundwasser, le colmatage moyen est estimé à **1.69 m** en 2014 et **0.47 m** en 2015. La figure 5.6 montre également cette tendance à la diminution de l'épaisseur du colmatage, notamment à l'aval des points hauts qui correspondent à d'anciens bancs de graviers (galets ?) hérités de la dynamique rhénane passée (p. ex., 1950 /2150 / 3550 m). En 2015, seul le secteur au droit du transect 6 est totalement exempt de colmatage (2800 m).

Si le fond graveleux du Bauerngrundwasser n'a montré aucune évolution, l'épaisseur du colmatage a globalement diminué lors des premières submersions. Le substrat grossier, localisé sous le colmatage, affleure localement dans les secteurs décolmatés, ce qui présente un intérêt élevé en matière de diversification des habitats aquatiques et d'amélioration des échanges nappe-rivière.

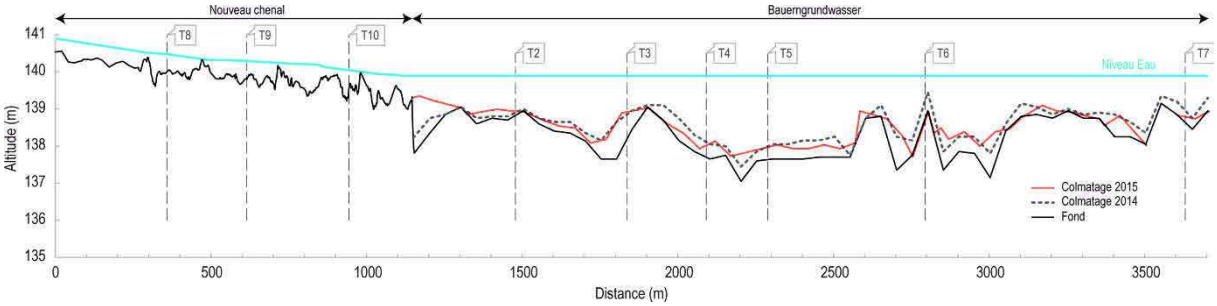


Figure 5. 6 - Comparaison de l'état du colmatage dans le Bauerngrundwasser avant (trait pointillé gris) et après (trait orange) les premières submersions.

2.5.3 Limites et perspectives

Les données relatives au suivi de l'évolution du colmatage restent ponctuelles dans l'espace (un levé tous les 50 m) et ne tiennent pas compte de la variabilité latérale des dépôts.

Aucun suivi n'a été prévu dans le secteur de l'ouvrage de restitution. Or, les observations de terrain montrent l'inefficacité de l'ouvrage en termes de transit sédimentaire. L'ouverture prévue à cet effet est située à plus d'1 m du fond du chenal, ce qui limite considérablement la migration des sables et favorise donc l'ensablement du secteur aval du Bauerngrundwasser (partie amont de l'ouvrage de restitution). En outre, pendant les submersions, l'ouvrage présente une réelle contrainte aux écoulements et est facilement obstrué par les embâcles. Une chute se crée à l'aval, favorisant le creusement d'une fosse dont la profondeur atteint plus de **4 m** (dernier levé lors de la campagne de septembre 2016). Cette érosion peut, à terme, présenter un risque pour la stabilité de l'ouvrage. Dans l'avenir, il paraît important de prévoir des suivis topographiques fins en amont et en aval de l'ouvrage et d'envisager éventuellement le remplacement de l'ouvrage par une passerelle. Des enrochements devraient permettre de stabiliser le fond du Bauerngrundwasser dans ce secteur.

Des analyses géochimiques (polluants) des sédiments fins qui composent le colmatage du fond du Bauerngrundwasser permettraient de déterminer si les teneurs en polluants sont similaires à celles enregistrées dans les berges du chenal.

3 SUIVI DES ÉVOLUTIONS HYDROLOGIQUES, HYDROGÉOLOGIQUES ET DES ÉCHANGES NAPPE-RIVIÈRE

3.1 Objectifs

L'objectif du suivi des variations limnimétriques et piézométriques a été d'identifier l'évolution des dynamiques hydrologiques et hydrogéologiques sur l'ensemble du réseau hydrographique (10 transects) à des pas de temps fins (5 à 10 min). La comparaison entre les profils piézométriques et la ligne d'eau dans le chenal doit permettre de suivre les échanges nappe-rivière, un processus important pour l'écologie des cours d'eau. De plus, des jaugeages différentiels doivent permettre de localiser les zones d'infiltrations et d'exfiltrations phréatiques et d'estimer l'intensité de ce processus.

Les données limnimétriques et piézométriques sont également destinées à l'élaboration de modélisations hydro-morphologique et hydro-géologique, actuellement en cours de développement.

3.2 Suivi limnimétrique

3.2.1 Méthodes

Dix sondes limnimétriques de type *Orphéus mini* ont été mises en place au droit des transects d'étude. Cadencées à intervalle de 5 min, elles ont permis de mesurer la variation des profondeurs sur l'ensemble du réseau hydrographique de l'île avec une précision de l'ordre de ± 0.05%. La position des sondes a été levée à l'aide d'un GPS *Trimble* 6000 GNSS RTK. La précision XY était de l'ordre de 10 cm après post-traitement. Les sondes ont été positionnées à environ 2-3 m de la berge, à une profondeur de 0.7 m ± 0.1 m. Le traitement des données brutes a été automatisé par un code VBA.

3.2.2 Résultats - Interprétation

Les résultats limnimétriques obtenus sur l'année de suivi pré-restauration (2013-14), corrélés aux données hydrologiques du Rhin, montrent une forte stabilité limnimétrique de l'ensemble du réseau hydrographique de l'île. Le niveau d'eau du Bauerngrundwasser est contrôlé par les ouvrages hydrauliques, particulièrement le barrage agricole de Kehl : le remous hydraulique maintient le niveau d'eau à la côte 140 m.NN jusqu'à l'extrémité amont du Bauerngrundwasser. Les inondations partielles qui se produisent par le remous hydraulique du barrage agricole lorsque les débits du Rhin sont compris entre 2800 et 3500 $m^3.s^{-1}$, ainsi que les phases de rétention de crue ($Q > 3500$ $m^3.s^{-1}$) produisent des élévations limnimétriques par submersions statiques (ou quasi-statiques) de toute ou partie de l'île (élévation de plus de 2 m lors de la crue de juin 2013 ; Fig. 5.7). Il n'y a aucun débordement dynamique le long du Bauerngrundwasser, d'où l'importance du colmatage (p. ex., l'épaisseur des dépôts lors de la submersion de juin 2013 varie de ~0,05 à ~0.4 m).

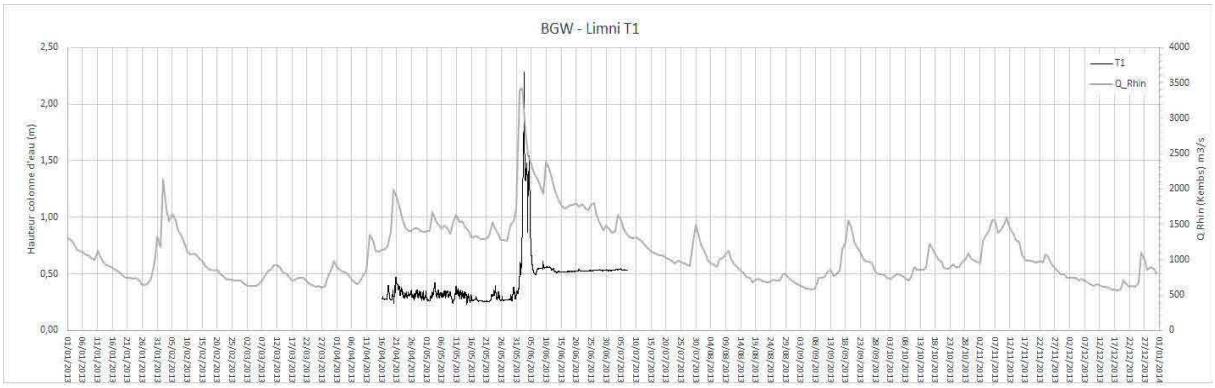


Figure 5. 7 - Variations limnimétriques mesurées sur le transect 1 du Bauerngrundwasser (trait noir : période d'avril à juin 2013). Hydrogramme du Rhin à Kembs (trait gris) pour l'année 2013; données fournies par la Ville de Strasbourg, mesures réalisées par EDF. Après l'évènement, le limnimètre a présenté un dysfonctionnement ce qui explique pourquoi le niveau d'eau est supérieur et ne présente que de faibles variations limnimétriques après la rétention de crue.

Concernant l'état post-restauration, on observe des variations hydrologiques sur l'ensemble du réseau hydrographique dès les premières submersions (Fig. 5.8). Ces variations présentent des différences en fonction de la localisation des transects le long du Bauerngrundwasser. En effet, le niveau d'eau atteint au transect 1 (amont du cours d'eau) est quatre fois plus élevé que celui enregistré au droit du transect 7 (aval du cours d'eau). Lors des injections, les débordements se produisent dès 20 $m^3.s^{-1}$ sur le nouveau chenal. Le long du Bauerngrundwasser, les points bas situés sur les berges (souvent d'anciens chenaux colmatés) provoquent des « pertes » en crue et expliquent l'enregistrement d'une lame d'eau inférieure à l'aval du chenal. En outre, la distance de parcours favorise l'étalement du pic de crue et explique pourquoi les niveaux d'eau sont inférieurs vers l'aval, comme cela a été observé au niveau des sondes de 6 et de 7. Ces dernières se localisent sur le bras secondaire du Bauerngrundwasser, ce qui explique également que les niveaux enregistrés sont plus faibles. Cette observation tend à montrer que pendant les submersions, l'essentiel du débit transite probablement vers le Vieux-Rhin, ne permettant pas une augmentation significative du niveau d'eau dans le chenal secondaire du Bauerngrundwasser (< 0.1 m ; Fig. 5.8). Cette situation questionne la fonction de l'ouvrage de restitution aval, dont l'objectif initial était de limiter l'écoulement dans le Vieux-Rhin pour favoriser les submersions de la pointe nord de l'île par l'augmentation des niveaux d'eau dans le chenal secondaire. Dans l'avenir, il apparaît donc important d'effectuer des jaugeages sur ce chenal lors des crues.

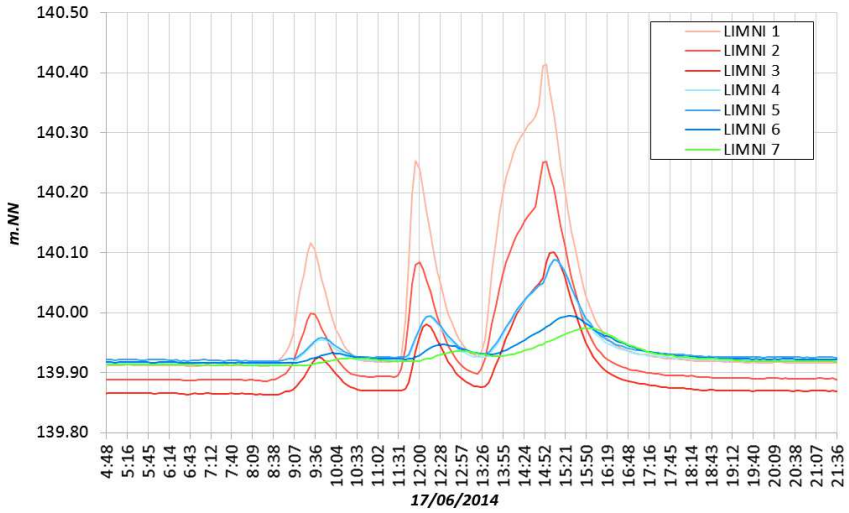


Figure 5. 8 - Réponse hydrologique au droit des 7 transects du Bauerngrundwasser lors d'un test d'injection réalisé le 17 juin 2014.

3.3 Suivi piézométrique

3.3.1 Méthodes

Vingt sondes piézométriques de types *Orphymèdes* et *Levellogger* ont été mises en place sur les deux rives des 10 transects. Cadencées à intervalle régulier de 10 ou 15 min en fonction des contraintes de chaque interface, ces sondes piézométriques permettent de mesurer la variation de la lame d'eau au-dessus de la sonde. Les sommets des puits piézométriques ont été nivelés à l'aide d'un DGPS *Leica* afin d'obtenir une précision de l'ordre de ± 3 cm en XYZ. Les variations de profondeur en m.NN sont déterminées après soustraction de la distance du câble qui joint le sommet du puits et le point d'enregistrement de la sonde. Le traitement des données brutes a été automatisé par un code VBA. Un baromètre localisé en rive droite du transect 1 permet de recaler les données de l'ensemble des piézomètres par rapport à la pression atmosphérique.

3.3.2 Résultats - Interprétation

La mise en place de l'équipement piézométrique s'est révélée plus complexe que prévu. Deux contraintes majeures ont retardé l'instrumentation du site de près d'un an : des contraintes techniques liées au battage des puits et des contraintes de délais de livraison de certaines sondes. De ce fait, l'état initial repose sur des données très incomplètes obtenues par des mesures manuelles, à la sonde lumineuse, lors des différentes campagnes de terrain.

Les résultats montrent que la nappe phréatique adjacente au Bauerngrundwasser réagit rapidement aux submersions (Fig. 5.9). En outre, lors des phases d'étiage (Q théorique injecté par le bypass = 2 $m^3.s^{-1}$), les niveaux piézométriques sont relativement bas par rapport au niveau limnimétrique. Les différences peuvent localement atteindre 1 m, alors que les piézomètres sont situés à moins de 4 m du Bauerngrundwasser (p. ex., en rive droite de T5 ; Fig. 5.11). Ces gradients hydrauliques élevés révèlent une certaine déconnexion entre le niveau d'eau du Bauerngrundwasser et la nappe phréatique. Ces deux compartiments semblent en effet suivre des dynamiques différentes, contrôlées par des facteurs contrastés. Cette situation peut s'expliquer notamment par l'épaisseur du colmatage qui semble agir comme une couche imperméable sur le fond du chenal, au moins localement. À l'inverse, les transects 3 (rive droite), 5 (rive gauche) et 7 (deux rives) présentent des niveaux piézométriques supérieurs aux niveaux limnimétriques, de l'ordre de 0.5 m (Fig. 5.11). Ces résultats montrent qu'il existe des

secteurs propices aux exfiltrations phréatiques, comme cela a également été mis en évidence par le suivi infra-rouge thermique (voir chapitre 4). La forte hétérogénéité de la conductivité hydraulique de l'aquifère semble être liée à la présence d'anciens bancs de graviers qui affleurent localement sur le fond et dans les berges du Bauerngundwasser.

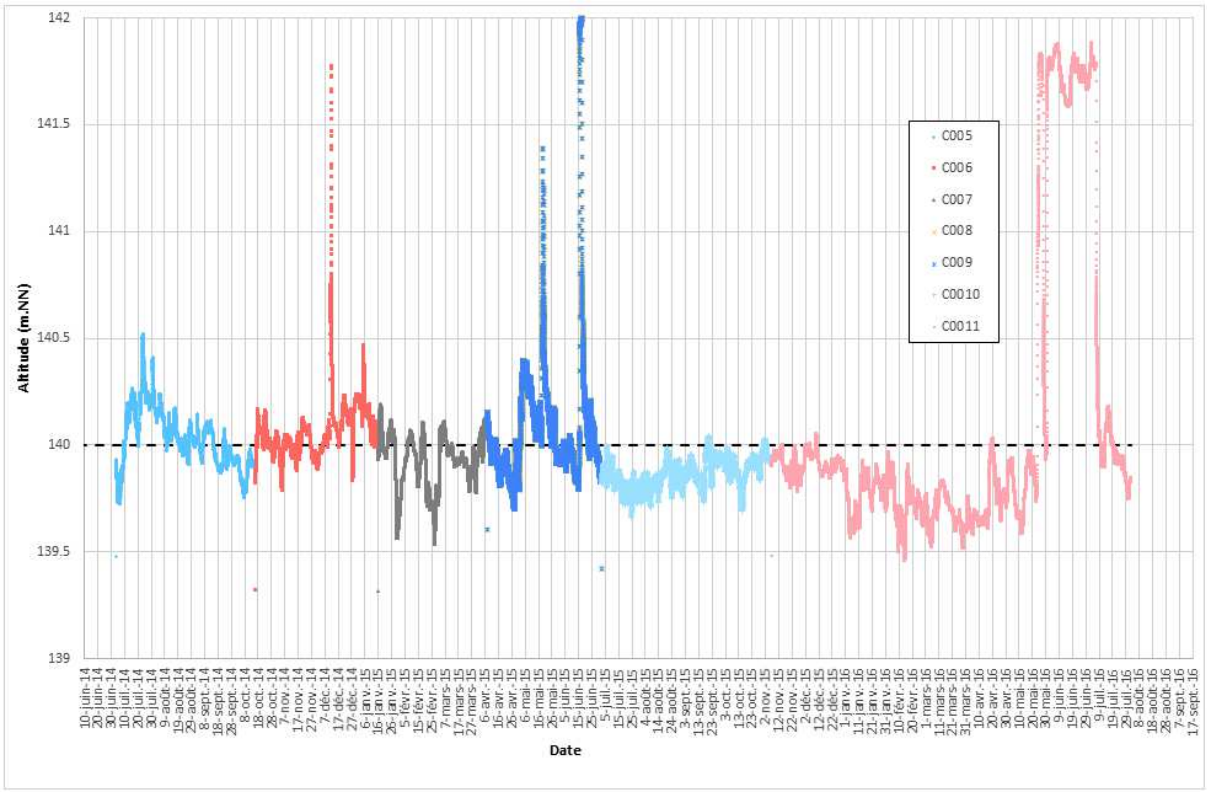


Figure 5. 9 - Variations du niveau piézométrique en rive droite du transect 1. Chaque couleur correspond à une campagne de terrain. Les pics correspondent aux submersions écologiques.

3.4 Suivi des échanges nappe-rivière

3.4.1 Méthodes

Les jaugeages ont été réalisés au droit des 10 transects d'étude. Quatre sections de jaugeage supplémentaires ont été positionnées dans les secteurs sensibles aux variations hydrologiques (confluence, diffluence ; Fig. 5.11 – carte de localisation). Dix verticales ont été réalisées par section de jaugeage. Ce nombre a pu varier (+/- 3 verticales) en fonction de la largeur et de la morphologie de la section. Trois points de jaugeage par verticale ont été réalisés, correspondant à des profondeurs égales à 0.2, 0.4 et 0.8 fois l'épaisseur de la lame d'eau à partir du fond. Le matériel utilisé est un courantomètre électromagnétique, un outil bien adapté au milieu à faibles vitesses.

3.4.2 Résultats - Interprétation

En 2013, des jaugeages réalisés à l'aide de la méthode ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler* - DREAL Alsace) n'ont fourni aucun résultat pertinent. Les vitesses et débits, situés sous le seuil de détection, n'ont pas pu être mesurés. Sur cette base, des mesures complémentaires ont été réalisées à l'aide de jaugeages différentiels au courantomètre électromagnétique. Cette méthode, mieux adaptée, mais plus longue, a permis de mettre en évidence des infiltrations (0.1 $m^3.s^{-1}$ entre T1 et T3, et 0.3 $m^3.s^{-1}$ à l'aval de T6) et un léger drainage de nappe entre T3 et T4 de 0.3 $m^3.s^{-1}$ en moyenne ainsi qu'à l'amont de T6 (0.02 $m^3.s^{-1}$ - Fig. 5.10 & 5.11 – Situation du 23 mai 2014). Au niveau de la connexion entre le Bauerngrundwasser et le Vieux-Rhin, les

résultats montrent l'influence du remous hydraulique dans ce secteur avec un débit de **0.438 $m^3.s^{-1}$** qui s'écoule du Vieux-Rhin vers le Bauerngrundwasser. Ce résultat prouve que le Bauerngrundwasser est alimenté par l'aval, au moins jusqu'à la diffluence située à l'aval de T5 où l'essentiel du débit rejoint le chenal secondaire (T6-T7 ; Fig. 5.11).

Les jaugeages différentiels réalisés après la création de l'ouvrage de restitution montrent une légère augmentation des échanges nappe-rivière. Les secteurs exfiltrants se localisent notamment dans le secteur amont du Bauerngrundwasser (Fig. 5.10). Au niveau du transect 6, le débit enregistré est de l'ordre **d'un $m^3.s^{-1}$**, soit **+0.578 $m^3.s^{-1}$** par rapport au jaugeage réalisé au niveau de la diffluence (Fig. 5.11). Au niveau de la confluence entre le Bauerngrundwasser et le Vieux-Rhin, le débit entrant par le Vieux-Rhin est plus faible que celui enregistré lors de la campagne de mai : **0.089 $m^3.s^{-1}$** contre **0.438 $m^3.s^{-1}$** en septembre. De plus, le débit enregistré à T6 est supérieur : **0.931 $m^3.s^{-1}$** en mai contre **0.565 $m^3.s^{-1}$** en septembre. Cette évolution est probablement liée à l'injection du débit permanent (~1 $m^3.s^{-1}$) qui favorise une légère augmentation de la pente de la ligne d'eau, ce qui a pu limiter l'alimentation par le Vieux-Rhin et favoriser les écoulements vers la pointe nord de l'île (chenal secondaire).

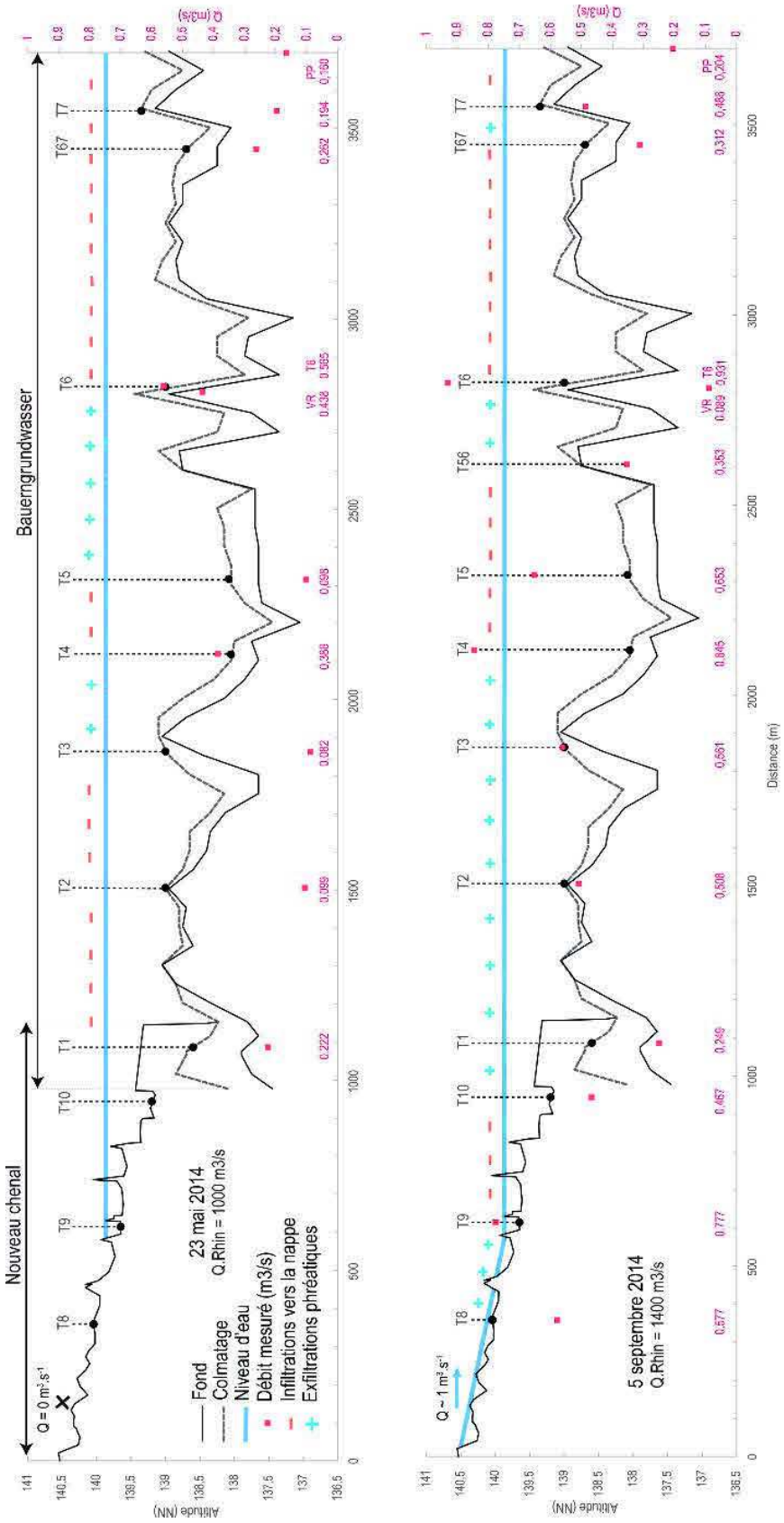


Figure 5. 10 – Exemple de résultats issus de deux campagnes de jaugeages différentiels au courantomètre électromagnétique. État pré-restauration (figure du haut) et état post-restauration (figure du bas). VR : Jaugeage au niveau de la confluence entre le Bauerngrundwasser et le Vieux-Rhin. PP : jaugeage au niveau de l'ancienne passe à poisson correspondant à l'extrémité aval de bras secondaire du Bauerngrundwasser.

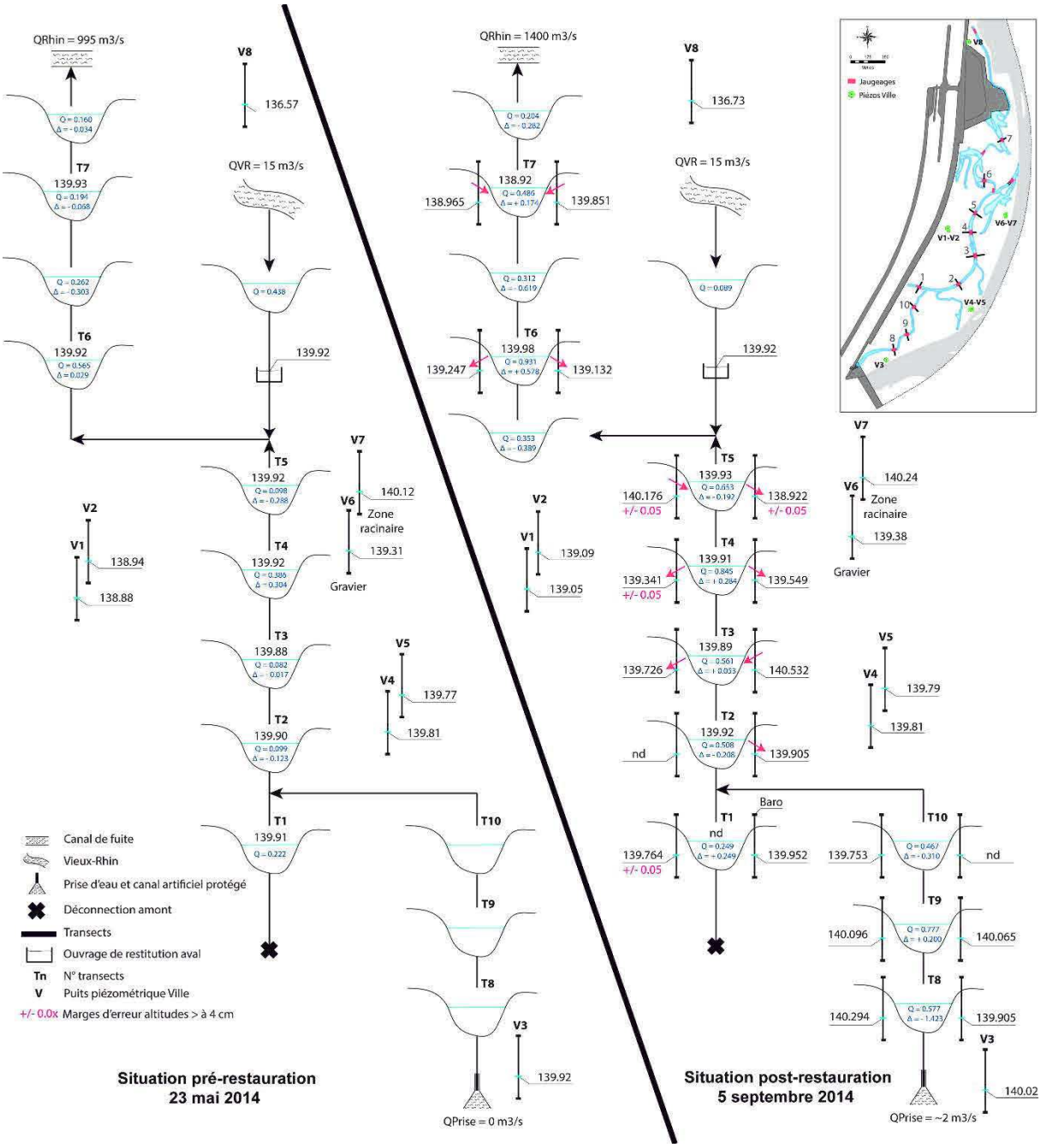


Figure 5. 11 - Cartes schématiques des situations hydrologiques et hydrogéologiques de l'ensemble de l'île avant et après la restauration.

4 REPRÉSENTATION INTERDISCIPLINAIRE DES RÉSULTATS ÉCOLOGIQUES

4.1 Objectifs

Afin d'améliorer (et de favoriser) les croisements interdisciplinaires, une base de donnée SIG a été élaborée. Les objectifs sont de :

- proposer une structure permettant la bancarisation des données existantes et à venir ;
- faciliter les comparaisons diachroniques ;
- favoriser, en plus des réflexions menées par compartiment, des croisements inter-compartiments menés dans une approche globale holistique ; ceci a été renforcé par le projet IDEX MODELROH.

Ces objectifs dépassent le cadre de la thèse et s'inscrivent dans une volonté de suivre les évolutions du milieu dans la durée (5 ans, voire davantage).

4.2 Méthodes

Les transects et les tronçons ont été utilisés comme données spatiales de référence. Sur la base d'un modèle entité-association développé sur *ArcGis* par Geng (2016, mémoire de Master 1), l'ensemble des données issues des suivis écologiques a pu être spatialisé. Cela concerne les données suivantes :

- physico-chimie de l'eau, des plantes et des sédiments ;
- végétation rivulaire ;
- végétation aquatique ;
- macro-invertébrés.

Des tables attributaires qui regroupent toute l'information « brute » ont été créées. Afin de faciliter les jointures entre les tables d'informations et les données spatiales, des regroupements et des simplifications ont été réalisés. Ainsi, l'intégralité de l'information est conservée et seule la synthèse est utilisée pour la représentation spatiale. Par exemple, pour la table végétation qui regroupe les noms de toutes les espèces, seuls le nombre d'espèces et l'état écologique qui en découle sont représentés. La consultation de la table attributaire jointe à la table simplifiée permet de retrouver la donnée d'origine.

4.3 Exemple de résultats

Sur la base de campagnes réalisées en 2012 et d'une comparaison avec les données floristiques de 2003 réalisé par M. Trémolières, il a été montré que l'état écologique de l'île s'est légèrement amélioré au cours de la décennie qui a précédé la restauration. La richesse spécifique a augmenté pour atteindre la situation présentée dans la figure 5.12. Entre 2012 et 2015, l'aval du Bauerngrundwasser (T5-T6) se caractérise par un potentiel écologique particulièrement élevé. On note l'apparition de *Potamogeton Pectinatus* et la disparition de nombreuses espèces sur le tronçon 4 (Fig. 5.13), notamment *Ceratophyllum Demersum* et *Myriophyllum Spicatum*. La végétation rivulaire se compose essentiellement d'espèces herbacées avec un déséquilibre rive gauche (21% d'hygrophytes) / rive droite (28% d'hygrophytes) qui s'explique notamment par la morphologie des berges (rive gauche abrupte, rive droite à pente faible). Les espèces arborescentes présentes sur le site sont caractéristiques des peuplements alluviaux matures (frêne, orme, aulne et peuplier blanc...) et n'ont pas évolué au cours de la période de suivi.

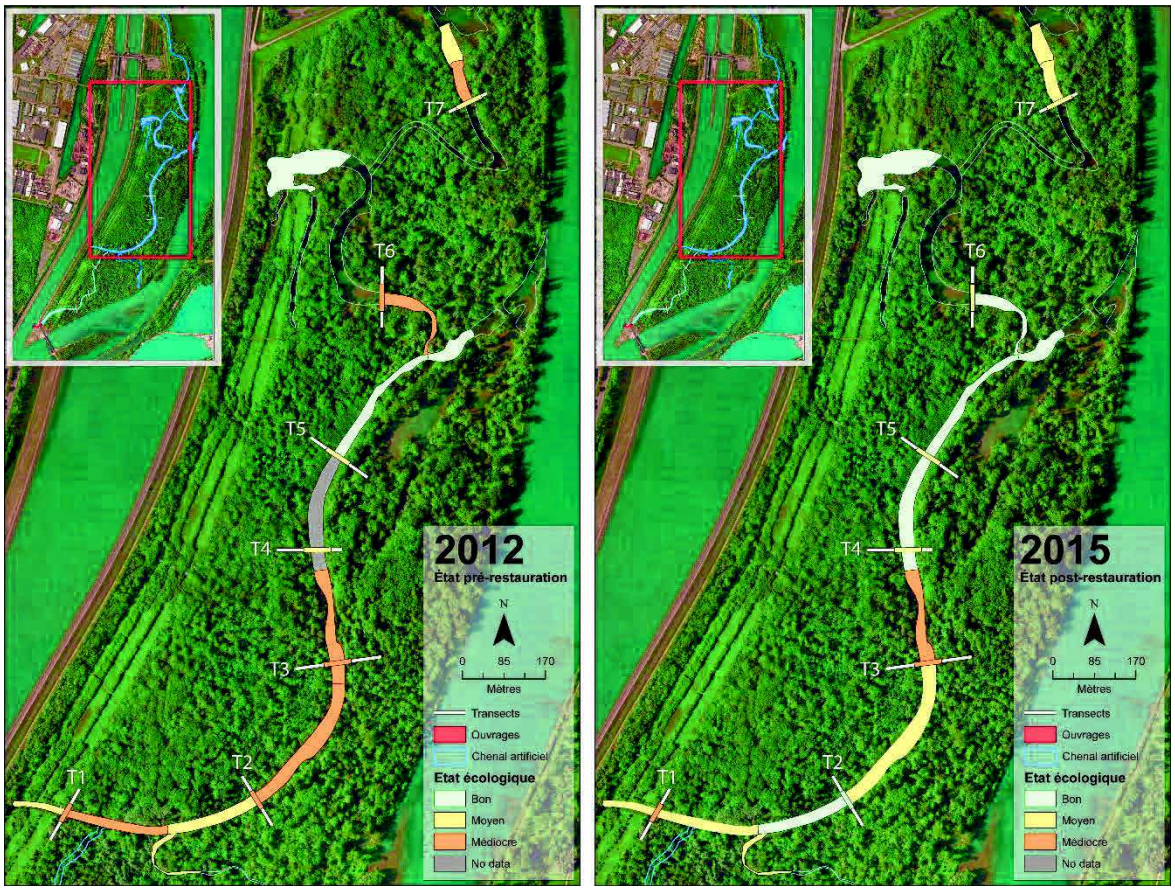


Figure 5. 12 - Comparaison diachronique de l'état écologique déterminé par le suivi de la diversité des macrophytes aquatiques entre l'état pré- et l'état post-restauration. Visualisation des résultats par tronçons et par transects.

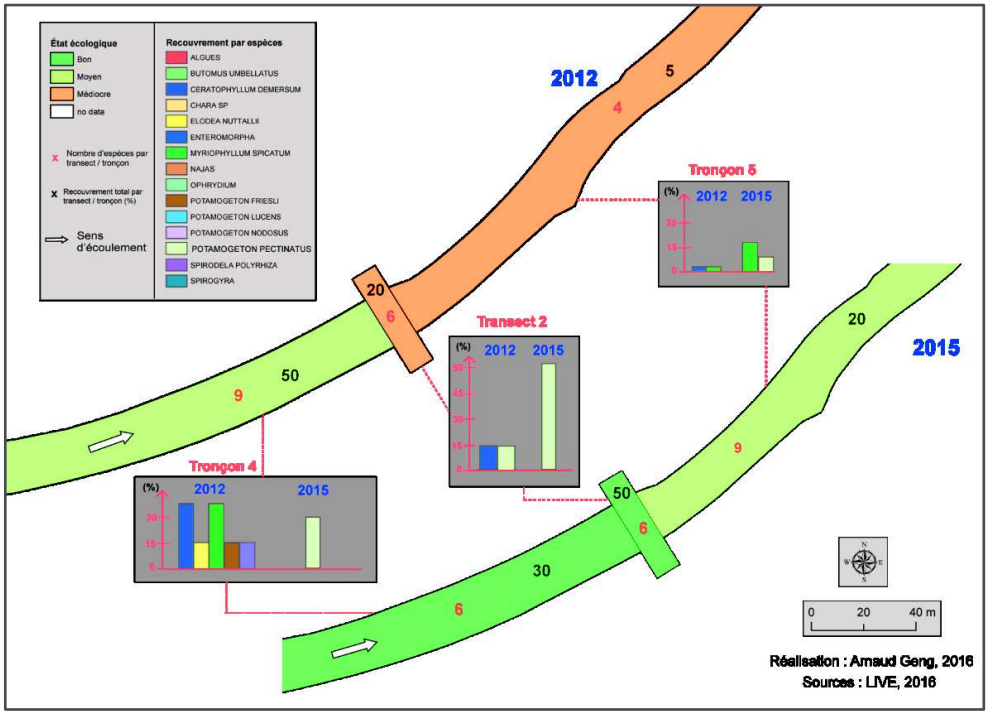


Figure 5. 13 - Évolution de la végétation aquatique entre 2012 et 2015 sur les tronçons 4, 5 et le transect 2. Exemple d'une cartographie thématique (état écologique par tronçons et transects) croisée avec une analyse diachronique (évolution du nombre et du pourcentage de recouvrement des espèces aquatiques par tronçons et transects entre 2012 et 2015).

La qualité biologique du Bauerngrundwasser varie entre bonne et excellente, exception faite de l'amont (T1) où la qualité est passable (Fig. 5.14). La diversité des communautés de macroinvertébrés, quant à elle, augmente d'amont en aval pour l'état pré-restauration. Elle est relativement faible à l'amont (dominée par des *Chironomidae* et des *Oligochaeta*) et augmente à l'aval, sur T6 et T7, avec une forte richesse taxonomique (Fig. 5.14).

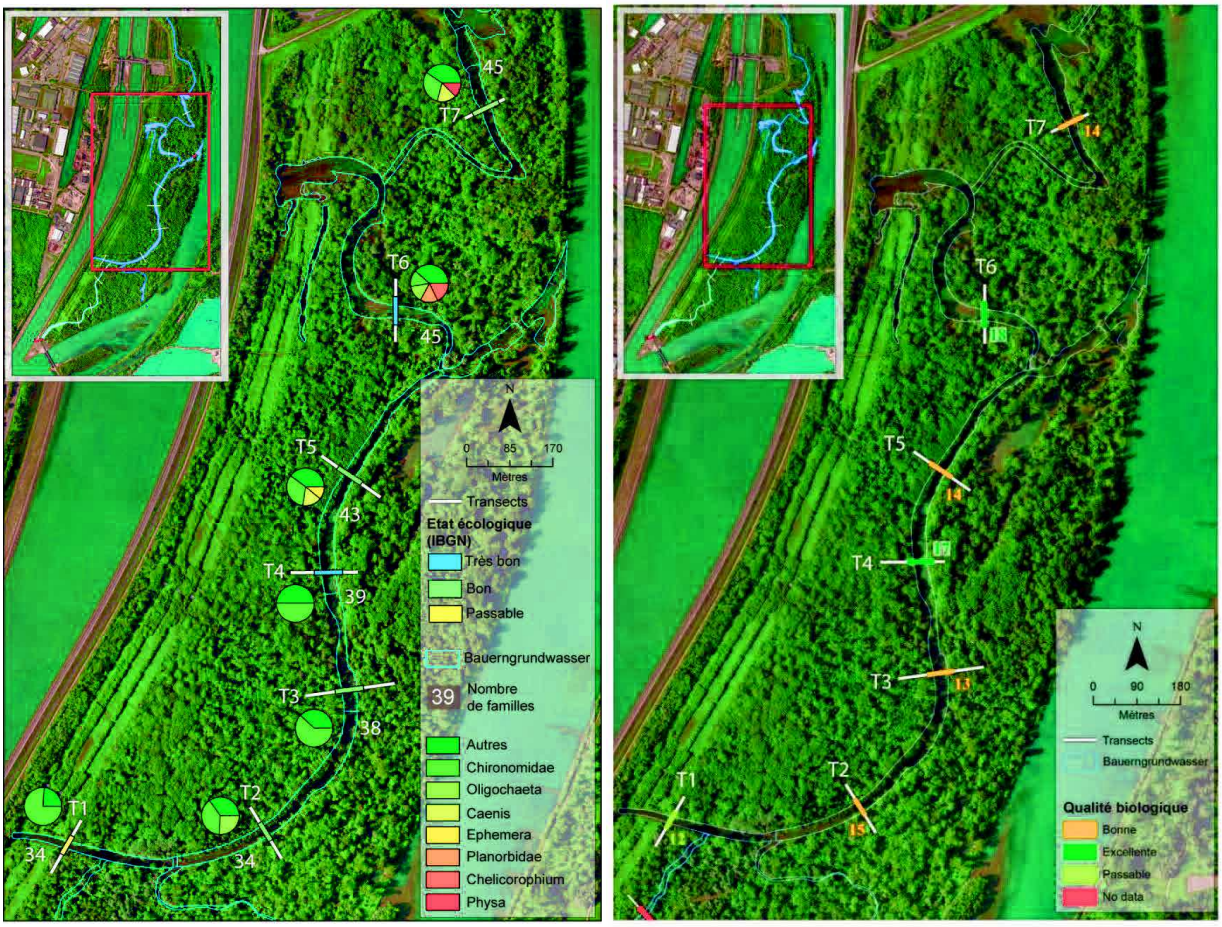


Figure 5. 14 - Représentation cartographique des résultats en écologie du macro-benthos pour l'état pré-restauration. Carte de gauche : diversité des taxons récoltés et IBGN. Carte de droite : qualité biologique du Bauerngrundwasser à partir des macro-invertébrés et des notes IBGN (note / 20) mesurées au droit des 7 transects du Bauerngrundwasser (Coacolo, 2014, adapté de Conreux et Grac, 2013).

5 SYNTHÈSE GÉNÉRALE

5.1 Évaluation de la restauration

Le tableau ci-dessous regroupe l'ensemble des indicateurs utilisés dans ce travail. Il s'appuie sur l'état de l'hydrosystème pré-restauration déterminé sur la base des travaux du chapitre 2 et des objectifs visés par le projet de restauration. Pour chaque indicateur, l'état pré-restauration ainsi que les tendances d'évolution observées après les premières submersions permettent d'évaluer de façon synthétique l'action de restauration entreprise sur l'île du Rohrschollen.

Tableau 5. 3- Synthèse des indicateurs utilisés pour l'évaluation du projet de restauration. Les différents compartiments considérés (COMP.) sont précisés devant chaque indicateur (GEO = géomorphologie; ECO = écologie; HYDRO = Hydrologie-hydrogéologie).

Échelle	COMP.	INDICATEURS (Dynamiques suivies)	VARIABLES	MÉTHODES	Fonctionnement				
					Pré-C°	Pré-R°	Ciblé	Post-R°	Visé TL
RN	GEO	Évolution des types d'unités éco-morphologiques	Surface des faciès lentiques	Cartographie diachronique	-	+	-	↘	→
			Surface eaux lotiques	Cartographie diachronique	+	-	+	↗	↗++
			Surface végétation basse (pionniers)	Cartographie diachronique	+	-	+	→	↗
			Surface végétation haute	Cartographie diachronique	-	+	-	→	→
	GEO	Évolution latérale du lit mineur	Localisation paléochenaux - Anciens bancs	Cartographie diachronique	+	o	o	o	o
	ECO	Diversité / espèce de végétation riveraine	Présence / absence de communautés typiques	Suivi des espèces / taux de recouvrement / Indice de Shannon	+	-	+	→	↗
NC	GEO	Dynamique latérale (I_{ler}* + I_q*)	Rapport largeur / profondeur	Suivi topo (PT)	+	o	+	↗	↗
			Taux d'érosion latérale	Suivi topo (PT)	+	o	+	↗	±
			Volumes de sédiments érodés / déposés	Budget sédimentaire	+	o	+	↗	+
	GEO	Dynamique de la charge de fond (I_{bd}*)	Débit critique de mise en mouvement	Hydrophone	+	o	+	↗	→
			Distance de transport de la charge de fond	Traçage RFID	+	o	+	↗	→
	GEO / ECO	Répartition des habitats (I_{gu}*)	Surfaces et périmètres des habitats (unités géomorphologiques)	Cartographie seuils, mouilles, plats, bancs (ArcGis)	+	-	+	↗	→
				Cartographie des embâcles (GPS; ArcGis)	+	+	+	↗	→
RH	ECO	Diversité / espèces de macrophytes	Présence / absence de communautés typiques	Suivi des espèces / taux de recouvrement / Indice de Shannon	+	-	+	→	+
	ECO	Diversité / espèces de macro-invertébrés	Présence / absence de communautés typiques	Suivi des espèces / taux de recouvrement / IBGN	+	-	+	nd	↗
	HYDRO	Dynamique des submersions	Variation des niveaux limnimétriques	Enregistrement continu des niveaux d'eau	+	-	+	↗++	↗++
	HYDRO	Échanges nappe-rivière	Intensité des exfiltrations / infiltrations	Jaugeages différentiels	+	-	+	↗++	↗++
				Infra-rouge thermique aéroporté					
				Enregistrements limnimétriques et piézométriques					
	GEO	Ajustements verticaux (I_{vv}*)	Variation verticale générale	Profil en long diachronique	+	-	+	↗	→
				Résidus cumulés sur régression linéaire					
BGW	GEO	Évolution du colmatage	Variation longitudinale de l'épaisseur du colmatage	Suivi bathymétrique (PL)	+	-	+	↘	±
RH	GEO	Intensité du comblement du paléochenal	Épaisseur des sédiments / profondeur du gravier	Carotages / granulométrie	-	+	o	→	↗
RN	GEO	Intensité des dépôts dans la forêt alluviale	Épaisseur / volume des dépôts	Placettes d'1m²	±	±	o	↗	±
F	--	Dynamique temporelle des ajustements	Chronologie	IRSL / OSL / Géochimie	+	-	+	↗	±
	--	Pollution des sédiments	Teneur en polluants	Analyse du tableau périodique, éléments cibles (Zinc)	-	+	-	→	?

RN Réserve Naturelle
NC Nouveau Chenal
BGW BauernGrundWasser
RH ensemble du Réseau Hydrographique
F Fosse
* Indicateur utilisé dans le chapitre 3

\+ *Important*
\- *Faible*
nc *Essentiellemment sur le nouveau chenal*
0 *Paramètre non pris en compte*
± *Variations temporelles aléatoires*
↘ *Diminution*
↗ *Augmentation*
↗++ *Augmentation importante*
→ *Stable / Équilibré*

C° *Correction*
R° *Restauration*
LT *Temps Long (> 10 ans)*

5.2 Tendances évolutives futures

D'un point de vue général, les 3 années de suivi montrent que les objectifs visés par la restauration de l'île du Rohrschollen ne sont pas encore atteints, mais sont en train de l'être, en particulier sur le nouveau chenal (Tab. 5.3). Plus précisément, deux facteurs limitants ont pu être mis en évidence sur le nouveau chenal : la forte incision à l'aval immédiat du chenal protégé liée à la présence d'un paléo-chenal comblé de sédiments fins peu cohésifs, ainsi que le banc de galets hérité affleurant dans la partie médiane du nouveau chenal. Dans le premier cas, il paraît nécessaire de pallier le déficit sédimentaire observé par des recharges sédimentaires qui seront à prévoir dans les années à venir. La poursuite du suivi permettra de définir la fréquence et l'importance de ces futures recharges. Dans le second cas, le banc hérité limite le transport sédimentaire et les évolutions latérales et verticales du secteur médian du nouveau chenal (voir chapitre 2, section 4.4 et chapitre 3, section 5.2). À terme, ce secteur peut devenir un point de contrôle des évolutions morphologiques du nouveau chenal. Ce facteur devra être pris en compte pour les suivis futurs.

Les caractéristiques morphodynamiques du nouveau chenal sont favorables à la diversification des habitats alluviaux ainsi qu'aux échanges nappe-rivière (granulométrie diversifiée, alternances seuils-mouilles, présence de bancs). En revanche, la partie aval du nouveau chenal, inscrite dans les sédiments fins du comblement du paléo-chenal du Rhin, devrait être moins diversifiée et moins active en termes d'échanges nappe-rivière. Néanmoins, cette tendance devrait s'atténuer progressivement avec l'arrivée dans ce secteur d'importants volumes de sédiments grossiers.

Sur le Bauerngrundwasser, il semble peu probable que les injections futures permettent de réactiver la dynamique latérale. À l'amont, une encoche d'érosion peut éventuellement apparaître sur la berge opposée à la confluence avec le nouveau chenal (rive gauche du Bauerngrundwasser). À cet endroit, la rive concave de l'ancien talweg rhénan se situe à proximité de la berge actuelle du Bauerngrundwasser (largeur de comblement relativement faible comprise entre 3 et 4 m). Si des sédiments grossiers présents dans la berge devaient être remobilisés, cela permettra de favoriser la formation de nouveaux habitats dans ce secteur. Pour l'instant, seuls les sédiments fins (sables, limons) sont exportés depuis le nouveau chenal jusqu'au Bauerngrundwasser. Ils comblent progressivement l'amont du Bauerngrundwasser, de la confluence avec le nouveau chenal jusqu'au niveau de T3. Cette tendance est un facteur limitant pour le développement des biocénoses, mais il n'est pas exclu que des sédiments grossiers parviennent jusqu'au Bauerngrundwasser à moyen ou long termes, car la disponibilité en sédiments grossiers le long du nouveau chenal est importante et les évolutions intenses. Les distances de transport mesurées sur le nouveau chenal étant de l'ordre de 20 m par évènement hydrologique, il ne faudra pas moins d'une dizaine de submersions pour que les particules grossières, issues de la partie aval du linéaire du nouveau chenal dont les berges sont constituées de sédiments grossiers, atteignent le Bauerngrundwasser. Les échanges nappe-rivière devraient s'accentuer avec le décolmatage du fond du chenal, notamment au droit des anciens bancs qui affleurent sur le fond et dans les berges du Bauerngrundwasser.

Le suivi phyto-écologique ne montre aucune modification du stade forestier à bois dur. Aucune évolution notable n'est attendue pour les 5 prochaines années (Trémolières, communication orale). La diversité de la végétation aquatique présente une diminution liée à l'arrachage de certains macrophytes pendant les submersions, mais le bon état écologique observé en 2015 est atteint grâce à la présence d'espèces rares (p. ex., *Potamogeton friesii, Potamogeton trochoïdes, Hydrocharis* ; Oberlé et Trémolières, 2015). Des submersions régulières devraient permettre d'atténuer la vitalité du solidage tout en favorisant le maintien des espèces rares et l'augmentation du nombre d'espèces hygrophiles dans les prochaines années.

La qualité de l'eau et des sédiments devrait se maintenir à un bon niveau sur l'ensemble du réseau hydrographique. Le risque de remobilisation de sédiments pollués par érosion latérale doit être pris en compte, notamment dans la partie aval du nouveau chenal qui s'inscrit dans les sédiments fins du comblement post-correction, et qui présente des teneurs en Zinc relativement élevées (Chapitre 2). En outre, sur le Bauerngrundwasser, où les évolutions latérales sont inexistantes, le risque de remobilisation de sédiments pollués est faible. En revanche, une analyse géochimique des sédiments du fond du chenal devrait être réalisée pour étayer cette hypothèse.

À l'aval, l'ouvrage de restitution dans le Vieux-Rhin est un facteur limitant vis-à-vis de la continuité sédimentaire longitudinale, mais le manque de données dans ce secteur ne nous permet pas de formuler des tendances évolutives futures. Il semble nécessaire de réaliser des suivis topographiques et bathymétriques dans ce secteur afin de préciser (i) comment l'ouvrage influence les écoulements en crue ? (ii) quelle est l'importance de l'ensablement à l'amont de l'ouvrage ? (iii) quelle est l'importance de l'incision à l'aval de l'ouvrage ? et (iv) s'il y a un risque éventuel de déstabilisation de l'ouvrage lors des submersions futures.

CONCLUSION

Paradoxalement au statut de *Réserve Naturelle Nationale* qui lui a été attribué, l'île du Rohrschollen est un vaste anthroposystème fluvial dont les fonctions d'origine ont été bouleversées par les aménagements successifs du Rhin. Avec une capacité de rétention de près de 37 millions de m^3, l'île joue aujourd'hui un rôle important dans la gestion des crues à l'échelle du Rhin, mais cela bénéficie peu aux biocénoses. Dans ce contexte, **recouvrer les fonctionnalités abiotiques et biotiques de ce milieu alluvial est un défi** qui nécessite (i) de tenir compte de la trajectoire temporelle du milieu (chapitre 2), (ii) de croiser des méthodes de suivis dans une démarche interdisciplinaire afin de faciliter la compréhension de la dynamique d'évolution actuelle (chapitre 3), et (iii) de développer des méthodes spécifiques permettant d'identifier les facteurs de contrôle des échanges nappe-rivière, des processus-clés du fonctionnement des écosystèmes aquatiques et riverains (chapitre 4).

Pour répondre à l'objectif général de la présente recherche qui est de **contribuer à la réflexion scientifique sur les suivis fonctionnels des habitats de milieux fluviaux restaurés**, nous avons développé quatre axes de recherche. Décliné en questions scientifiques, chacun d'eux fait l'objet d'un chapitre.

Le *premier axe,* intitulé **histoire de l'hydrosystème et imbrication dans la trajectoire temporelle longue de l'hydrosystème**, a fait l'objet du chapitre 2. Présentés sous la forme d'un article soumis dans la revue *Hydrology and Earth System Sciences*, trois enseignements-clés ont été tirés de ce travail. Nous avons montré que la reconstitution interdisciplinaire de l'histoire de l'hydrosystème permet de :

1. déterminer l'état fonctionnel de l'hydrosystème avant les perturbations liées aux aménagements. L'analyse des cartes anciennes, notamment celles de 1743 et 1778, donne de précieuses informations concernant le fonctionnement hydromorphologique du fleuve avant les premières perturbations. La dynamique du fleuve se caractérisait par une bande active en tresses large et mobile, d'importantes évolutions latérales, de nombreux bancs vifs et la présence d'une végétation pionnière. Ce type de dynamique, caractérisée par des ajustements hydro-morphologiques intenses et fréquents, est fidèle aux descriptions de Herget *et al.* (2005) et Schäfer (1973).

2. identifier les principales phases d'ajustement, les facteurs de contrôle et les temps de réponse des perturbations. Les résultats montrent un synchronisme des ajustements morpho-sédimentaires (évolution des formes et processus de comblement des annexes) avec les aménagements. Si l'ensemble des aménagements induit des perturbations fonctionnelles, les ajustements hydro-morpho-sédimentaires enregistrés sur l'île du Rohrschollen sont essentiellement liés aux travaux de Correction ;

3. replacer la dynamique de la restauration dans la trajectoire temporelle de l'hydrosystème pour tenter d'en déduire le potentiel et les limites du projet. L'étude de la dynamique passée a permis d'identifier un secteur à haut potentiel hydrodynamique dans la partie sud de l'île, où le nouveau chenal a justement été creusé. L'étude montre l'importance de recréer un nouveau chenal plutôt que de reconnecter directement les annexes hydrauliques fortement colmatées, comme cela a été le plus souvent réalisé le long de la bande rhénane (Schmitt *et al.*, 2009 ; 2012). Ce

principe permet de recréer une dynamique hydromorphologique tout en limitant la remobilisation des sédiments fins qui bénéficient peu aux biocénoses aquatiques et qui peuvent potentiellement présenter des teneurs en polluants élevées (Zinc essentiellement). Au-delà de cette limite identifiée dans le cas de la restauration du Rohrschollen se pose la question de l'efficacité et de la durabilité des actions de restauration d'annexes hydrauliques de grands fleuves fortement anthropisés.

Dans le *deuxième axe* de notre recherche, nous avons montré qu'une **amélioration méthodologique est nécessaire à la réalisation d'un monitoring géomorphologique fin dans des chenaux anastomosés actifs.** Cette approche est présentée dans le chapitre 3 et a fait l'objet d'une publication soumise dans la revue *Geomorphology*. Le couplage de méthodes géodésiques avec des méthodes géomorphologiques classiques a permis de suivre de manière fine les évolutions morphologiques dans les chenaux anastomosés. Deux contributions majeures peuvent être mises en avant :

1. contribution d'ordre méthodologique : la photogrammétrie présente un atout considérable en termes de facilité d'accès au site (petit matériel facilement transportable), de coût et de résolution des nuages de points générés, mais ne permet pas le suivi des évolutions morphologiques à une échelle spatiale large. Pour les suivis de ce type, l'hybridation méthodologique (topographie - bathymétrie) par tachéométrie apparaît comme l'approche la plus pertinente. La topographie conventionnelle, par tachéométrie, fournit des canevas de points de densité moindre en comparaison des nuages de points fournis par photogrammétrie ou lasergrammétrie, mais l'approche à l'avantage de produire des modèles morphologiques facilement comparables sur des linéaires étendus (~1 km et plus) ;

2. contribution d'ordre thématique : de ces métriques morphologiques suivies à différentes échelles et avec différentes méthodes peuvent être extraits des indicateurs qui permettent d'évaluer le degré de fonctionnalité du milieu. Dans notre cas, les indicateurs révèlent la présence d'un banc de galets hérité de la dynamique passée du Rhin. Il contrôle une partie de la dynamique morphologique : pente, évolution du profil en long, transport sédimentaire grossier, dynamique latérale. Ces indicateurs présentent un intérêt élevé pour le gestionnaire, car ils font appel à des métriques simples, facilement mesurables sur le terrain tout en présentant un intérêt élevé pour le suivi à moyen, voire à long terme.

Le *troisième axe* intitulé **influence de l'activité morpho-sédimentaire présente et passée sur la répartition des exfiltrations phréatiques d'un hydrosystème anastomosé restauré** porte sur l'adaptation méthodologique de l'imagerie infrarouge thermique aéroportée à ce type d'environnement. Cet axe a été détaillé dans le chapitre 4 et a fait l'objet d'un article publié dans la revue *Hydrological Processes*. Les résultats de cette partie, qui a nécessité une adaptation méthodologique aux contraintes du terrain, ont permis de montrer que les facteurs de contrôle de la répartition des anomalies thermiques (qui présente un intérêt élevé pour les biocénoses) sont liés aux formes et dynamiques contemporaines, mais aussi à des héritages géomorphologiques :

1. milieu à fort potentiel morphodynamique (nouveau chenal) : la répartition des exfiltrations phréatiques dépend de la morpho-dynamique. Nos résultats montrent que la diversité morpho-sédimentaire, la présence de bancs latéraux et la variabilité du profil en long (faciès d'écoulement, en particulier les seuils naturels) sont à l'origine de l'hétérogénéité des patchs thermiques (anomalies thermiques) à la surface de l'eau. En effet, les exfiltrations phréatiques (upwelling) sont essentiellement présentes dans la

partie aval des seuils et des bancs. Ces caractéristiques sont notamment présentes à l'aval des courbures où les dépôts sont les plus importants ;

2. milieu à faible potentiel morphodynamique (Bauerngrundwasser) : nos résultats montrent que la présence d'anciens bancs à granulométrie grossière (graviers) affleurants dans les berges du Bauerngrundwasser, favorise les exfiltrations phréatiques latérales. D'autre part, la faible épaisseur du colmatage au fond du cours d'eau est aussi à l'origine d'exfiltrations phréatiques verticales.

Un *dernier axe* s'intéresse plus spécifiquement aux aspects interdisciplinaires menés dans le cadre du projet de restauration. Il vise à identifier les **apports scientifiques et opérationnels d'une approche interdisciplinaire pour le suivi et l'évaluation de la restauration fonctionnelle d'une anastomose.** Dans cette partie nous avons également présenté des résultats supplémentaires, recueillis dans le cadre du suivi, mais qui n'ont pas fait l'objet d'une valorisation scientifique. À la lumière des travaux menés dans ce travail de recherche, deux aspects paraissent indispensables pour suivre le fonctionnement complexe des hydrosystèmes alluviaux et améliorer l'efficacité des futures restaurations :

1. mettre en évidence les fonctionnements pré- et post-restauration : la définition de l'état de référence peut (doit) être déterminée sur la base d'un état pré-restauration qui permet de « diagnostiquer » l'état fonctionnel du milieu avant les premières mesures de restauration. La connaissance de cette dynamique, assortie de l'analyse de la trajectoire temporelle longue de l'hydrosystème, est une base essentielle pour (i) améliorer la définition du fonctionnement visé par la restauration, (ii) comparer le fonctionnement du milieu avant et après la restauration et (iii) analyser et interpréter les évolutions observées. Enfin, le suivi post-restauration à moyen et long termes est indispensable. Si les moyens mis en œuvre dans les premières années de suivi post-restauration peuvent être importants, ils peuvent être allégés pour le suivi à moyen (5-10 ans) et long termes (10-20 ans). L'élaboration d'indicateurs de suivi, adaptés au fonctionnement du milieu, sont des paramètres-clés qui permettent de déterminer si les objectifs de la restauration sont atteints (ou non) et de garantir, le plus possible, l'efficacité et la durabilité des effets de la restauration.

2. renforcer les interactions interdisciplinaires : cette démarche est la clé de compréhension de la complexité du fonctionnement des milieux alluviaux, mais sa mise en œuvre est complexe (Morin, 1994) : définition des concepts, vocabulaire différent, objectifs scientifiques divergents… Fort de ce constat, la création d'une base de données commune est apparue comme une évidence. Avec l'ambition de développer des liens entre les disciplines à l'aide d'outils partagés, le projet d'une base de données mutualisée n'a fait que débuter, mais l'intérêt collectif est incontestable. Il convient de poursuivre cette démarche, notamment pour favoriser les liens entre la géomorphologie et l'écologie, deux disciplines qu'il est difficile de séparer tant les interactions entre les habitats et les communautés qui les peuplent sont indissociables.

En termes de perspectives de recherche, des méthodes complémentaires à celles utilisées dans le cadre du suivi scientifique peuvent être expérimentées :

- une analyse dendrochronologique permettrait de montrer comment les ligneux ont enregistré les variations des conditions environnementales : incision du lit mineur, sédimentation du lit majeur en lien avec les aménagements… Ces données de datations pourraient être confrontées aux résultats IRSL présentés dans le chapitre 2 ;

- l'imagerie infra-rouge thermique pourrait être testée sur d'autres sites comme un outil de diagnostic non-invasif pour l'évaluation du fonctionnement du milieu sur la base des échanges nappe-rivière ;
- pour chaque indicateur, les marges d'erreurs doivent être estimées, notamment sous la forme de test de sensibilité. D'autre part, la pertinence des indicateurs ne pourra être renforcée qu'après une utilisation sur une temporalité plus longue qu'un ou deux ans ;
- des analyses de la pollution des sédiments qui colmatent le fond du Bauerngrundwasser pourraient être réalisées pour affiner l'étude géochimique menée dans le cadre du chapitre 2. Une étude écotoxicologique pourrait aussi être envisagée ;
- la base de données doit être complétée et l'interface d'utilisation peut être améliorée. Une cartographie interactive est actuellement en cours de réflexion ;
- les modélisations hydro-sédimentaire et hydrogéologique, initiées par le projet IDEX MODELROH sont en cours de développement. À terme, elles devraient permettre :
    - d'améliorer les modalités de gestion sur la base des résultats de scénarios de gestion prédictifs (fréquences et intensité des submersions, débit permanent…) ;
    - de prévoir les volumes de recharges sédimentaires à l'extrémité amont du nouveau chenal non protégé.

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1. 1 - L'hydrosystème fluvial abordé à différentes échelles spatiales : a. Flux bidirectionnels (latéraux et verticaux) d'un hydrosystème ; b. Délimitation des secteurs fonctionnels au sein d'un même bassin versant ; c. Identification des ensembles et des unités fonctionnels au sein d'un secteur fonctionnel (correspond au secteur S2 dans b.) ; d. Microhabitats présents dans plusieurs unités fonctionnelles (profil AA' dans c.). Synthèse schématique reprise d'Amoros et Petts (1993) et adaptée par Schmitt (2010). 24

Figure 1. 2 - Les quatre dimensions prises en compte dans la conceptualisation des interactions des hydrosystèmes fluviaux (Ward, 1989). 27

Figure 1. 3 - Graphique chronologique issu des travaux de Morandi (2014). Nombre de publications scientifiques internationales dans le domaine de la restauration de rivières sur la période 1982-2011 (Web of Science et Scopus). Le nom des pays correspond à la date de première publication. 27

Figure 1. 4 - Schéma conceptuel développé par Dufour et Piégay (2009) synthétisant l'évolution d'un hydrosystème soumis à différentes perturbations (encadré noir). A: Concept d'équilibre dynamique métastable (Knighton, 1984 ; Schumm, 1977). B: Concept de trajectoire temporelle d'évolution. 29

Figure 1. 5 - Nombre d'articles scientifiques publiés dans le monde (graphique de gauche) et en Europe (graphique de droite) qui traitent de « river restoration » (trait noir) et qui intègrent également les aspects historiques (trait gris). 29

Figure 1. 6 - Bassin versant et sous-bassins versants du Rhin (ICPR, 2015)..... 32

Figure 1. 7 - Exemple de simplification du tracé du Rhin par les travaux de correction de Tulla et Honsell (Honsell, 1885; Repris dans Herget et al., 2005) 34

Figure 1. 8 - Profil en travers entre Gross-Kembs et Klein-Kembs présentant les digues submersibles au niveau des berges du lit mineur et les digues des hautes eaux (vert). Carte de 1889 fournie par Dillmann. 35

Figure 1. 9 - Profil en long diachronique et sectorisation longitudinale des deux tiers méridionaux du Rhin Supérieur d'après Schmitt (2001), adapté de Carbiener et Dillmann (1992). 35

Figure 1. 10 - Plan du lit corrigé du Rhin montrant le projet de régularisation (Marchal et Delmas, 1959). 36

Figure 1. 11 - Localisation et types d'aménagements sur le Rhin Supérieur, entre Kembs et Iffezheim (adapté de edf-alsace)..... 37

Figure 1. 12 - Recharge sédimentaire à l'aval de la centrale hydro-électrique d'Iffezheim (Kondolf, 1997)..... 38

Figure 1. 13 - Sectorisation longitudinale du Rhin (d'après Carbiener, 1983, reprise par Schmitt et al., 2009, modifié). Tracés schématiques du Rhin au début du 19ième siècle (gauche) et à la fin du XXè siècle (droite). 40

Figure 1. 14 - Présentation de la zone d'étude et des données de base. De gauche à droite : image aérienne (EMS 2013) ; Modèle Numérique de Terrain issu de levé LiDAR (EMS 2015) ; Digitalisation par unités éco-morphologiques sur la base de l'orthophoto 2010 (LIVE) ; 1. Barrage agricole de Kehl (Regierungspräsidium de Freiburg) ; 2. Bauerngrundwasser (LIVE, 2013) ; 3. Barrage de dérivation (edf.fr). Les ouvrages créés dans le cadre du projet de restauration, avec : a. Ouvrage de restitution aval (route submersible) ; b. Chenal artificiel avant les premières mises en eau ; c. Ouvrage de prise d'eau (arrière-plan), fosse de dissipation et enrochements du chenal artificiel protégé (premier-plan). 41

Figure 1. 15 - Plan en coupe de l'ouvrage hydraulique (ouvrage de régulation) à l'échelle 1/100. INGÉROP Cahiers techniques (2012). 43

Figure 1. 16 - Coupe longitudinale de l'ouvrage de restitution aval ; INGEROP Cahiers techniques (2012). 43

Figure 1. 17 - Schéma résumant la démarche du suivi scientifique menée dans le cadre de la convention de partenariat qui lie le gestionnaires et l'équipe scientifique. 45

Chapitre 2

Figure 2. 1 - (a) Location of the Upper Rhine Graben, (b) channel pattern sectorization and evolution from the 18th century to present (Schmitt et al., 2009), (c) location of the study site and map of Rohrschollen Island, (d) pictures of the Bauerngrundwasser and evolution of the new channel..... 53

Figure 2. 3 - Methodological approach to analyse long-term spatio-temporal trajectory of the hydrosystem by combining historical multi-source data with in situ morpho-sedimentary prospections and geochemical investigations. 55

Figure 2. 4 - (a) Example of a transect (Tr 2) based on levelling and bathymetric data. Levelling data are compared to LIDAR DEM data. Location of corings and Pit 2 is also given, (b) location of Tr 2, the two excavation pits (red squares) and topographical profiles crossing the two pits, (c) overlaying of the two topographical profiles..... 57

Figure 2. 5 - (a) diachronic evolution of the whole study area. The black-boxes are zooms of (scale 1:2) in the surroundings of the two pits. (b) Surface evolutions of the morpho-ecological units in the natural reserve (1743-2010) and in the whole study area (1743-1949). (c) Number of anchor points used to georeferenced old maps (1743/1778/1828/1838/1872/1926) and aerial photographs (1949/1956/1966/1971/1985) and values of RMSE errors. 60

Figure 2. 6 - (a) Vertical evolution of the Rhine thalweg from 1815 to 1960 based on low water levels (Q ~ 540 m3.s-1) recorded at the Marlen gauging station (Bull, 1885; Bensing, 1966; CECR, 1978). Vertical evolution of the pits linked to the age-depth model and number of floods which attained each pits (triangle), (b) location of the two pits and of the ancient gauging station of Marlen, (c) discharge of the Rhine at the gauging station of Basel. The period 1810-1870 corresponds to maximum instantaneous annual flows. The period 1870-2015 corresponds to the highest mean daily flow (OFEV: Office Fédéral de l'EnVironnement). The dates with arrows corresponds to old maps or aerial photographs (see figure 2.4). The red and green lines

correspond to the submersion discharges for the pits 1 and 2 respectively, (d) flood return periods at Basel between 1870-2015 (m3.s-1; Adjustment of Pearson III, OFEV)..... 62

Figure 2. 7 - a. Floodplain CM diagram and patterns according to Passega (1964, 1977). Numbers between brackets help for the presentation of the results and the discussion; b. isolated samples with the indication of the samples depth for transect 2, pit 1 (c.) and pit 2 (d.). Red arrows show the deposition chronology..... 64

Figure 2. 8 - Stratigraphical log of the two pits including datings, organic contents, sedimentological and geochemical results. 65

Figure 2. 9 - Hydrogeological variation between 1965 and 2006. After 1984, the lowest peaks correspond to periods during which the Old Rhine is empty. 67

Figure 2. 10 - Rhine thalweg evolution from 1743 to the end of the correction works in 1876. (A) Area of lateral channel mobility during the 1828-1837 period. (B) Area of lateral channel mobility during the 1851-52 flood. (C) Area impacted by the 1876 flood. 68

Chapitre 3

Figure 3. 1 - Studies developed to monitor geomorphological channel changes by using DEM approaches..... 83

Figure 3. 2 - (a) Location of the Rohrschollen island in the Upper Rhine basin, (b) DEM of the whole study site and location of the main engineering works, (c) three survey sectors located on curvatures of the new channel, (d) pictures of the diachronic evolution close to the three curvature sectors, (e) hydrogram of the reporting period..... 85

Figure 3. 3 - Top: details of the hydrological events during the reporting period chronology and features of fieldwork acquisition for the two states. Bottom: process workflow (grey arrows) and results produced to achieve a global hydromorphological understanding of the channel functioning..... 88

Figure 3. 4 - (a) Comparison of 3-D combined models using M3C2 during both surveying periods on the three curvature sectors, including sediment budgets. (b) Global cumulative sediment budget for the whole channel during both surveying periods..... 90

Figure 3. 5 - Examples of lateral channel evolutions in the three curvature sectors, with (a) thalweg evolution, (b) examples of diachronic cross-sections and (c) resulting indicators of lateral channel evolution (I_{ler}). 91

Figure 3. 6 - Longitudinal evolutions between (a) vertical variation of cumulative residuals, (b) sediment budget and geomorphological results: (c) grain size, (d) bedload mobility, (e) longitudinal profile evolution, (f) inherited sediment deposits, (g) geomorphic units evolution. 93

Figure 3. 7 - (a) Box-plots of tracer travel distances for the two surveying periods. (b) Travel distances of tracers detected during both surveying periods and according to the grain size of RFID particles. Some tracers are coarser than the largest grain size class of figure 3.6-d..... 94

Chapitre 4

Figure 4. 1 - (a) Rhine basin and general location of the study site on slope basemap. (b) Historical evolution of the Rohrschollen site and former gravel bars deposition between 1838 (beginning of the correction works) and 1872 (end of the correction works). The former gravel bar outcropping on the current channel banks correspond to 1838 deposition. (c) Current situation and location of the natural reserve (artificial colors). 109

Figure 4. 2 - TIR processing chain (left) linked with visual and graphical display (right). (a) Visible picture (above) and corresponding TIR image (below). (b) Terrestrial objects digitalization (bank vegetation, logjams and bars) and buffer zone used to remove contaminated pixels. (c) Longitudinal temperature profile with 'pure' water pixels (continuous line) and mixed pixels removed (dotted line). 112

Figure 4. 3 - Longitudinal temperature variations on the new channel. (a) Nadir view of the channel includes bars, logjams and in-channel geomorphic units. More details on main thermal anomalies and their spatial extension are given for three reaches in sub-figures a_1, a_2 and a_3. (b) Superposition between the longitudinal temperature profile and the evolution of the thalweg longitudinal profile from 2014 to 2015. At the bottom, the 2015 extent of the bars and the different kinds of in-channel geomorphic units (riffles, pools and runs; GU 2015) are also provided to facilitate their comparison with the longitudinal temperature profile. Vertical bands show the longitudinal extent of the riffles. (c) Example of bedload dynamics from 2014 to 2015 measured with the Passive Integrate Transponders (PIT-tags) after the first flood. Transects allow the longitudinal correspondence between the sub-figures a. and b. 114

Figure 4. 4 - (a) Mean temperature curve of the four overflight associated with the residual data distribution. The main positive residuals are especially located nearby bars and riffles sectors. (b) Box-plot and statistical tests showing the distribution of thermal residuals depending of absence or presence of bar/riffle. Boxes limits are represented by the 25^{th} and 75^{th} percentiles and lines give the minimum and the maximum values. The p-value from Wald-Wolfowitz Runs test is given in the upper left of plot. 115

Figure 4. 5 - Longitudinal temperature variations on the old channel. (a) Nadir view of the channel, spatial distribution of the thermal anomalies and location of former gravel bars outcropping in the channel banks (see 1838 map; Fig. 4.1b). Red dotted arrows indicate lateral groundwater inputs which are revealed by positive thermal anomalies. (b) Superposition between the longitudinal profiles of temperature, low flow water and thalweg. At the bottom, the extend of the clogging thickness thinner than twenty centimeters (horizontal green bands) and the spatial distribution of former gravel bars (horizontal grey bands) are also provided to facilitate their comparison with the longitudinal temperature profile. Red solid arrows indicate vertical groundwater inputs. Transects allow the longitudinal correspondence between the two sub-figures. 116

Chapitre 5

Figure 5. 1 - Schéma conceptuel du déroulement d'un projet de restauration (d'après Lejot, 2008)..... 127

Figure 5. 2 - Schéma simplifié du suivi scientifique mené sur l'île du Rohrschollen..... 128

Figure 5. 3 - Chronologie et méthodes utilisées pour le suivi de l'ensemble des compartiments sur le nouveau chenal et le Bauerngrundwasser. 131

Figure 5. 4 - a. Principe de mesure des chaînes d'érosion d'après Laronne et al. (1994) et repris de Rollet (2007). (A) : érosion du lit sur une épaisseur de S à partir du niveau initial ID ; S est égal à la longueur de la chaîne horizontale, couchée sur le fond du lit ; (B) : remblaiement du lit sur une épaisseur F à partir d'un niveau de base issu d'un épisode de creusement antérieur ; (C) : érosion du lit sur une épaisseur S suivie d'un remblaiement sur une épaisseur F ; l'évolution du niveau topographique après passage de la crue est donc égale à S-F ; (D) : érosion initiale sur une épaisseur S1 suivie d'un remblaiement sur une épaisseur F1, érosion finale sur une épaisseur S2 ; la chaîne ne permet pas de suivre fidèlement la succession des épisodes de creusement et de remblaiement (Liebault, 2003). b. Répartition schématique des chaînes d'érosion sur le nouveau chenal : numérotation des transects, identifiants des chaînes et distances intermédiaires (chiffres situés entre les points) et cumulées (chiffres situés sous les points), distance en m. 133

Figure 5. 5 - Dispositif de surveillance vidéo et d'acquisition de données acoustiques. (1) Panneau photovoltaïque et caméra de surveillance télé-connectée ; (2) Dispositif de stockage de l'énergie solaire (batterie au bas de l'image) et boitier d'acquisition de l'hydrophone (en haut de l'image) ; (3) Micro immergé. 134

Figure 5. 6 - Comparaison de l'état du colmatage dans le Bauerngrundwasser avant (trait pointillé gris) et après (trait orange) les premières submersions..... 136

Figure 5. 7 - Variations limnimétriques mesurées sur le transect 1 du Bauerngrundwasser (trait noir : période d'avril à juin 2013). Hydrogramme du Rhin à Kembs (trait gris) pour l'année 2013; données fournies par la Ville de Strasbourg, mesures réalisées par EDF. Après l'évènement, le limnimètre a présenté un dysfonctionnement ce qui explique pourquoi le niveau d'eau est supérieur et ne présente que de faibles variations limnimétriques après la rétention de crue. 138

Figure 5. 8 - Réponse hydrologique au droit des 7 transects du Bauerngrundwasser lors d'un test d'injection réalisé le 17 juin 2014. 139

Figure 5. 9 - Variations du niveau piézométrique en rive droit du transect 1. Chaque couleur correspond à une campagne de terrain. Les pics correspondent aux submersions écologiques. 140

Figure 5. 10 - Résultats issus de deux campagnes de jaugeages différentiels au courantomètre électromagnétique. État pré-restauration (figure du haut) et état post-restauration (figure du bas). VR : Jaugeage au niveau de la confluence entre le Bauerngrundwasser et le Vieux-Rhin. PP : jaugeage au niveau de l'ancienne passe à poisson correspondante à l'extrémité aval de bras secondaire du Bauerngrundwasser. 142

Figure 5. 11 - Cartes schématiques des situations hydrologiques et hydrogéologiques de l'ensemble de l'île avant et après la restauration..... 143

Figure 5. 12 - Comparaison diachronique de l'état écologique déterminé par le suivi de la diversité des macrophytes aquatiques entre l'état pré- et l'état post-restauration. Visualisation des résultats par tronçons et par transects. 145

Figure 5. 13 - Évolution de la végétation aquatique entre 2012 et 2015 sur les tronçons 4, 5 et le transect 2. Exemple d'une cartographie thématique (état écologique par tronçons et transects) croisée avec une analyse diachronique (évolution du nombre et du pourcentage de recouvrement des espèces aquatiques par tronçons et transects entre 2012 et 2015). 145

Figure 5. 14 - Représentation cartographique des résultats en écologie du macro-benthos pour l'état pré-restauration. Carte de gauche : diversité des taxons récoltés et IBGN. Carte de droite : qualité biologique de l'eau à partir des macro-invertébrés et des notes IBGN (note / 20) mesurées au droit des 7 transects du Bauerngrundwasser (Coacolo, 2014, adapté de Conreux et Grac, 2013). 146

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1

Tableau 1. 1 - Gestion des crues sur le site du Rohrschollen depuis 1985..... 39

Tableau 1. 2 - Loi d'injection déterminée en fonction du débit du Rhin et nombre de jours de submersions théorique..... 42

Chapitre 5

Tableau 5. 1 - Objectifs spécifiques du projet déclinés en questions scientifiques par compartiments suivis..... 129

Tableau 5. 2 - Types de dynamiques suivis et méthodes correspondantes ayant fait l'objet d'une description dans un chapitre antérieur. 132

Tableau 5. 3- Synthèse des indicateurs utilisés pour l'évaluation du projet de restauration. Les différents compartiments considérés (COMP.) sont précisés devant chaque indicateurs (GEO = géomorphologie; ECO = écologie; HYDRO = Hydrologie-hydrogéologie). 147

BIBLIOGRAPHIE

Acuña, V., Díez, J.R., Flores, L., Meleason, M., Elosegi, A., 2013. Does it make economic sense to restore rivers for their ecosystem services? In *Journal of Applied Ecology* 50, 988–997. doi:10.1111/1365-2664.12107

Acuña, V., Tockner, K., 2009. Surface–subsurface water exchange rates along alluvial river reaches control the thermal patterns in an Alpine river network. In *Freshwater Biology* 54, 306–320.

Amoros, C., Petts, G.E., 1993. Hydrosystèmes fluviaux, Masson. ed. Paris, 301 p.

Amoros, C., Rostan, J.-C., Pautou, G., Bravard, J.-P., 1987. The reversible process concept applied to the environmental management of large river systems. In *Environmental Management* 11, 607–617.

Angilletta, M.J., 2009. Thermal Adaptation: A Theoretical and Empirical Synthesis. OUP Oxford, 305 p.

Arnaud, F., Piégay, H., Béal, D., Collery, P., Vaudor, L., Rollet, A.J., 2017. Monitoring gravel augmentation in a large regulated river and implications for process-based restoration: Monitoring gravel augmentation in a large regulated river. In *Earth Surface Processes and Landforms*. doi:10.1002/esp.4161

Arnaud, F., Piégay, H., Schmitt, L., Rollet, A.J., Ferrier, V., Béal, D., 2015a. Historical geomorphic analysis (1932–2011) of a by-passed river reach in process-based restoration perspectives: The Old Rhine downstream of the Kembs diversion dam (France, Germany). In *Geomorphology* 236, 163–177. doi:10.1016/j.geomorph.2015.02.009

Arnaud, F., Piégay, H., Vaudor, L., Bultingaire, L., Fantino, G., 2015b. Technical specifications of low-frequency radio identification bedload tracking from field experiments: Differences in antennas, tags and operators. In *Geomorphology* 238, 37–46. doi:10.1016/j.geomorph.2015.02.029

Arnell, N.W., Reynard, N.S., 1996. The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain. In *Journal of Hydrology* , 397–424.

Arrigoni, A.S., Poole, G.C., Mertes, L.A.K., O'Daniel, S.J., Woessner, W.W., Thomas, S.A., 2008. Buffered, lagged, or cooled? Disentangling hyporheic influences on temperature cycles in stream channels. In *Water Resources Research* 44, 13. doi:10.1029/2007WR006480

Babcsanyi, I., Chabaux, F., Granet, M., Meite, F., Payraudeau, S., Duplay, J., Imfeld, G., 2016. Copper in soil fractions and runoff in a vineyard catchment: Insights from copper stable isotopes. In *Science of the Total Environment* 557–558, 154–162. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.03.037

Bangen, S., Wheaton, J., Bouwes, N., Jordan, C., Volk, C., Ward, M.B., 2014a. Crew variability in topographic surveys for monitoring wadeable streams: a case study from the Columbia River Basin. In *Earth Surface Processes and Landforms* 39, 2070–2086. doi:10.1002/esp.3600

Bangen, S.G., Wheaton, J.M., Bouwes, N., Bouwes, B., Jordan, C., 2014b. A methodological intercomparison of topographic survey techniques for characterizing wadeable streams and rivers. In *Geomorphology* 206, 343–361. doi:10.1016/j.geomorph.2013.10.010

Barker, R., Dixon, L., Hooke, J., 1997. Use of terrestrial photogrammery for monitoring and measuring bank erosion. In *Earth Surface Processes and Landforms* 22, 1217–1227.

Bayley, P.B., 1991a. The flood pulse advantage and the restoration of river-floodplain systems. In *Regulated Rivers: Research & Management* 6, 75–86. doi:10.1002/rrr.3450060203

Bayley, P.B., 1991b. The flood pulse advantage and the restoration of river-floodplain systems. In *River Research and Applications* 6, 75–86.

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. In *BioScience* 60, 209–222.

Beisel, J.-N., Usseglio-Polatera, P., Thomas, S., Moreteau, J.-C., 1998. Stream community structure in relation to spatial variation: the influence of mesohabitat characteristics. In *Hydrobiologia* 389, 73–88.

Belletti, B., Rinaldi, M., Buijse, A.D., Gurnell, A.M., Mosselman, E., 2014. A review of assessment methods for river hydromorphology. In *Environmental Earth Sciences* 73, 2079–2100. doi:10.1007/s12665-014-3558-1

Belletti, B., Rinaldi, M., Bussettini, M., Comiti, F., Gurnell, A.M., Mao, L., Nardi, L., Vezza, P., 2017. Characterising physical habitats and fluvial hydromorphology: A new system for the survey and classification of river geomorphic units. In *Geomorphology* 283, 143–157. doi:10.1016/j.geomorph.2017.01.032

Bencala, K.E., 2005. Hyporheic exchange flows, in: Encyclopedia of Hydrological Sciences. Anderson M. G. (Ed), p. 7, 7p.

Bencala, K.E., Gooseff, M.N., Kimball, B.A., 2011. Rethinking hyporheic flow and transient storage to advance understanding of stream-catchment connections: Opinion. In *Water Resources Research* 47, 9. doi:10.1029/2010WR010066

Bensing, W., 1966. Gewässerkundliche Probleme beim Ausbau des Oberrheins (Problèmes hydrologiques lies à l'aménagement du cours supérieur du Rhin) Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 85–102.

Berger, A.R., 1997. Assessing rapid environmental change using geoindicators. In *Environmental Geology* 32, 36–44.

Berger, M., Schwarzbauer, J., 2016. Historical Deposition of Riverine Contamination on Terrestrial Floodplains as Revealed by Organic Indicators from an Industrial Point Source. In *Water, Air, & Soil Pollution* 227. doi:10.1007/s11270-015-2708-8

Bernhardt, C., 2000. Die Rheinkorrektion. In *Der Bürger im Staat* 50, 76–81.

Bernhardt, E.S., Palmer, M.A., Allan, J.D., Alexander, G., Barnas, K., Brooks, S., Carr, J., Clayton, S., Dahm, C., Follstad-Shah, J., others, 2005. Synthesizing US river restoration efforts. In *Science* 308, 636–637.

Bernot, M.J., Dodds, W.K., 2005. Nitrogen Retention, Removal, and Saturation in Lotic Ecosystems. In *Ecosystems* 8, 442–453. doi:10.1007/s10021-003-0143-y

Bogen, J., Bolviken, B., Ottesen, R.T., 1992. Environmental studies in Western Europe using overbank sediment. In *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins (Proceedings of the Oslo Symposium, August 1992).* , 317–325.

Boike, J., Yoshikawa, K., 2003. Mapping of periglacial geomorphology using kite/balloon aerial photography. In *Permafrost and Periglacial Processes* 14, 81–85. doi:10.1002/ppp.437

Bolève, A., Revil, A., Janod, F., Mattiuzzo, J.L., Jardani, A., 2007. Forward modeling and validation of a new formulation to compute self-potential signals associated with ground water flow. In *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 11, 1661–1671.

Bonnefont, J.-C., Carcaud, N., 1997. Le comportement morphodynamique de la Moselle avant ses aménagements/The morphodynamic behaviour of Moselle river before its harnessings. In *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 3, 339–353. doi:10.3406/morfo.1997.932

Bornette, G., Amoros, C., Lamouroux, N., 1998. Aquatic plant diversity in riverine wetlands: the role of connectivity. In *Freshwater Biology* 39, 267–283.

Bouleau, G., Pont, D., 2014. Les conditions de référence de la directive cadre européenne sur l'eau face à la dynamique des hydrosystèmes et des usages. In *Natures Sciences Sociétés* 22, 3–14. doi:10.1051/nss/2014016

Boulton, A.J., Findlay, S., Marmonier, P., Stanley, E.H., Valett, H.M., 1998. The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. In *Annual Review of Ecology and Systematics* , 59–81.

Brasington, J., Rumsby, B.T., McVey, R.A., 2000. Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey. In *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 973–990. doi:10.1002/1096-9837(200008)25:9<973::AID-ESP111>3.0.CO;2-Y

Bravard, J.-P., 2003. Dynamiques à long terme des systèmes écologiques ou de l'Eden impossible à la gestion de la variabilité. In. Lévêque C., Van Der Leeuw S. (eds), in: Quelles Natures Voulons-Nous? pp. 133–139

Bravard, J.-P., 1994. L'incision des lits fluviaux : du phénomène morphodynamique naturel et réversible aux impacts irréversibles / The incision of river beds : from a natural and reversible morphodynamic phenomenon to irreversible impacts. In *Revue de géographie de Lyon* 69, 5–10. doi:10.3406/geoca.1994.4231

Bravard, J.-P., Amoros, C., Pautou, G., 1986. Impact of Civil Engineering Works on the Successions of Communities in a Fluvial System: A Methodological and Predictive Approach Applied to a Section of the Upper Rhône River, France. In *Oikos* 47, 92. doi:10.2307/3565924

Bravard, J.-P., Bethemont, J., 1989. Cartography of rivers in France, in: Historical Change of Large Alluvial Rivers : Western Europe. G. E. Petts.

Bravard, J.-P., Gaydou, P., 2015. Historical Development and Integrated Management of the Rhône River Floodplain, from the Alps to the Camargue Delta, France, in: Hudson, P.F., Middelkoop, H. (Eds.), Geomorphic Approaches to Integrated Floodplain Management of Lowland Fluvial Systems in North America and Europe. Springer New York, New York, NY, pp. 289–320

Bravard, J.-P., Goichot, M., Tronchère, H., 2014. An assessment of sediment-transport processes in the Lower Mekong River based on deposit grain sizes, the CM technique and flow-energy data. In *Geomorphology* 207, 174–189. doi:10.1016/j.geomorph.2013.11.004

Bravard, J.-P., Magny, M., 2002. Les fleuves ont une histoire. Paléo-environnement des rivières et des lacs français depuis 15 000 ans, Errance. ed.

Bravard, J.-P., Peiry, J.-L., 1999. The CM pattern as a tool for the classification of alluvial suites and floodplains along the river continuum. In *Geological Society, London, Special Publications* 163, 259–268.

Breil, P., Lafont, M., Vivier, A., Namour, P., Schmitt, L., 2007. Effects of combined sewer overflows on a periurban stream ecosystem: Methodological approach. In *International Symposium" New directions in Urban Water Management". UNESCO* , 8 p.

Brierley, G.J., Fryirs, K.A., 2008. River Futures: An Integrative Scientific Approach to River Repair. Island Press, 325 p.

Broadmeadow, S.B., Jones, J.G., Langford, T.E.L., Shaw, P.J., Nisbet, T.R., 2011. The influence of riparian shade on lowland stream water temperatures in southern England and their viability for brown trout. In *River Research and Applications* 27, 226–237. doi:10.1002/rra.1354

Brookes, A.B., 1988. Channelized rivers: Perspectives for environmental management,. Chichester, UK.

Brown, A.G., 2002. Learning from the past: palaeohydrology and palaeoecology. In *Freshwater Biology* 47, 817–829.

Brunke, M., Gonser, T., 1997. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. In *Freshwater Biology* 37, 33.

Buchanan, B.P., Walter, M.T., Nagle, G.N., Schneider, R.L., 2012. Monitoring and assessment of a river restoration project in central New York. In *River Research and Applications* 28, 216–233. doi:10.1002/rra.1453

Bull, F., 1885. Technisch-statistische Mittheilungen über die Stromverhältnisse des Rheins längs des elsass-lothringischen Gebietes (Atlas). In *In: C.F. Schmidt (ed). Ministerium fur elsass-lothringen, Strassburg* , 193.

Burkholder, B.K., Grant, G.E., Haggerty, R., Khangaonkar, T., Wampler, P.J., 2008. Influence of hyporheic flow and geomorphology on temperature of a large, gravel-bed river, Clackamas River, Oregon, USA. In *Hydrological Processes* 22, 941–953. doi:10.1002/hyp.6984

Cairns, J., 1991. The status of the theoretical and applied science of restoration ecology. In *Environmental professional* 13, 186–194.

Cairns, J., Heckman, J., 1996. Restoration ecology: The State of an Emerging Field. In *Annual Review of Energy and the Environment* 21, 167–189. doi:10.1146/annurev.energy.21.1.167

Caissie, D., 2006. The Thermal Regime of Rivers: A Review. In *Freshwater Biology* 51, 1389–1406.

Caissie, D., El-Jabi, N., Hebert, C., 2007. Comparison of hydrologically based instream flow methods using a resampling technique. In *Canadian journal of civil engineering* 34, 66–74.

Calvet, M., Giusti, C., Gunnell, Y., 2007. Regards croisés sur l'histoire et l'épistémologie de la géomorphologie. In *Géomorphologie: relief, processus, environnement* , 107–112.

Carbiener D., D., 2003. Chapitre 18 - Restaurer la forêt alluviale: expérience rhénane, enjeux et principes d'une restauration durable, in: Piégay, H., Pautou, G., Ruffinoni, C. (Eds), Les Forêts Riveraines Des Cours D'eau : Écologie, Fonctions et Gestion, Institut Pour Le Développement Forestier. pp. 368–378

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 Sommerlet (commune d'Erstein). In *Revue de géographie de l'Est* 4, 207–312.

Carbiener, R., 2007. Les zones alluviales du Rhin supérieur, in: Forêts Alluviales d'Europe : Écologie, Biogéographie, Valeur Intrinsèque. Schnitzler A., Carbiener R., 11p.

Carbiener, R., 1991. La protection des forêts alluviales: un défi majeur confronté à de multiples blocages. In *Revue Forestière Française, 1991, S, fascicule thématique" Patrimoines naturels forestiers."*

Carbiener R., 1983. Le grand ried central d'Alsace: écologie et évolution d'une zone humide d'origine fluviale rhénane. In *Bulletin Ecologie* , 249–277.

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 Oberd. 53) Intérêt écologique et biogéographique. Comparaison d'autres forêts thermophiles. In *Plant Ecology* 20, 97–148. doi:10.1007/BF01965530

Carbiener, R., Dillmann, E., 1992. Cas Type de Rhinau-Daubensand: l'évolution du paysage rhénan dans la région de Rhinau, au cœur 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 Basel, pp. 113–136, 113–136p. doi:10.1007/978-3-0348-6237-0_13

Carbiener, R., Trémolières, M., 2003. Chapitre 12 - La ripisylve du Rhin et ses connexions : Histoire, Évolution naturelle et anthropique, in: Piégay, H., Pautou, G., Ruffinoni, C. (Eds), Les Forêts Riveraines Des Cours D'eau : Écologie, Fonctions et Gestion, Institut Pour Le Développement Forestier. pp. 240–271

Cardenas, M.B., Harvey, J.H., Packman, A.I., Durelle T. S., 2008. Ground-based thermography of fluvial systems at low and high discharge reveals potential complex thermal heterogeneity driven by flow variation and bioroughness. In *Hydrological Processes* 22, 980–986.

Cardenas, M.B., Wilson, J.L., Zlotnik, V.A., 2004. Impact of heterogeneity, bed forms, and stream curvature on subchannel hyporheic exchange. In *Water Resources Research* 40, 14. doi:10.1029/2004WR003008

Casado, M., Gonzalez, R., Kriechbaumer, T., Veal, A., 2015. Automated Identification of River Hydromorphological Features Using UAV High Resolution Aerial Imagery. In *Sensors* 15, 27969–27989. doi:10.3390/s151127969

Casper, M., 1959. L'aménagement du parcours allemand du Rhin : mesures exécutées, en cours et en projet. In *La Houille Blanche* , 229–248. doi:10.1051/lhb/1959037

CECR, Ministère de l'Agriculture, Service Régional d'Aménagement des Eaux d'Alsace, 1978. Rapport finale de la Commission d'Etude des Crues du Rhin. Colmar.

Champion, M., 1863. Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours, Dunod. ed, Dunod. Paris, 501 p.

Chandler, J., Ashmore, P., Paola, C., Gooch, M., Varkaris, F., 2002. Monitoring River-Channel Change Using Terrestrial Oblique Digital Imagery and Automated Digital Photogrammetry. In *Annals of the Association of American Geographers* 92, 631–644. doi:10.1111/1467-8306.00308

Chandler, J.H., Shiono, K., 2001. Measuring flume surfaces for hydraulics research using a Kodak DCS460. In *Photogrammetric record* 17, 39–61.

Chapuis, M., Bright, C.J., Hufnagel, J., MacVicar, B., 2014. Detection ranges and uncertainty of passive Radio Frequency Identification (RFID) transponders for sediment tracking in gravel rivers and coastal environments. In *Earth Surface Processes and Landforms* 39, 2109–2120. doi:10.1002/esp.3620

Chapuis, M., Dufour, S., Provansal, M., Couvert, B., de Linares, M., 2015. Coupling channel evolution monitoring and RFID tracking in a large, wandering, gravel-bed river: Insights into sediment routing on geomorphic continuity through a riffle–pool sequence. In *Geomorphology* 231, 258–269. doi:10.1016/j.geomorph.2014.12.013

Charles, L., Kalaora, B., 2003. Sociologie et environnement en france: L'environnement introuvable ? In *Ecologie & politique* 27, 31. doi:10.3917/ecopo.027.0031

Chen, C., Shi, P., Mao, Q., 2003. Application of remote sensing techniques for monitoring the thermal pollution of cooling-water discharge from nuclear power plant. In *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 38, 1659–1668. doi:10.1081/ESE-120021487

Chin, A., 2006. Urban transformation of river landscapes in a global context. In *Geomorphology* 79, 460–487. doi:10.1016/j.geomorph.2006.06.033

Choné, G., Biron, P.M., 2016. Assessing the Relationship Between River Mobility and Habitat. In *River Research and Applications* 32, 528–539. doi:10.1002/rra.2896

Cioc, M., 2009. The Rhine: an eco-biography, 1815-2000. University of Washington, 280 p.

Ciszewski, D., Grygar, T.M., 2016. A Review of Flood-Related Storage and Remobilization of Heavy Metal Pollutants in River Systems. In *Water, Air, & Soil Pollution* 227. doi:10.1007/s11270-016-2934-8

Collins, S., Moon, G., 1979. Stereometric Measurement of Streambank Erosion. In *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 45, 183–190.

Conrad, O., 2011. Les crues du Rhin. Une lutte incessante et longtemps vaine au XIXième s. (1801-1852). In *Annuaire de la Société d'Histoire de la Hardt & du Ried* 23, 57–76.

Constantz, J., Thomas, C.L., Zellweger, G., 1994. Influence of diurnal variations in stream temperature on streamflow loss and groundwater recharge. In *Water Resources Research* 30, 3253–3264.

Corbonnois, J., Jacquemot, T., Giovannacci, L., Beck, T., Ghachi, M.E., 2011. Les indicateurs de l'évolution actuelle des lits fluviaux. Etude de cours d'eau du Nord-Est de la France. In *Revue Géographique de l'Est* 51.

Corenblit, D., Tabacchi, E., Steiger, J., Gurnell, A.M., 2007. Reciprocal interactions and adjustments between fluvial landforms and vegetation dynamics in river corridors: A review of complementary approaches. In *Earth-Science Reviews* 84, 56–86. doi:10.1016/j.earscirev.2007.05.004

David, M., 2016. Dynamique fluviale de la Garonne à l'anthropocène: trajectoire d'évolution du tronçon fluvial compris entre les confluences de l'Ariège et du Tarn (Garonne toulousaine, 90 km). Université Toulouse le Mirail-Toulouse II.

DCE, 2000. Directive 2000/60/CE du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. adoptée le 23 octobre 2000, JO du 22 décembre 2000.

de Boer, J., Dao, Q.T., van Leeuwen, S.P.J., Kotterman, M.J.J., Schobben, J.H.M., 2010. Thirty year monitoring of PCBs, organochlorine pesticides and tetrabromodiphenylether in eel from The Netherlands. In *Environmental Pollution* 158, 1228–1236. doi:10.1016/j.envpol.2010.01.026

Descloux, S., Datry, T., Philippe, M., Marmonier, P., 2010. Comparison of different techniques to assess surface and subsurface streambed colmation with fine sediments. In *International Review of Hydrobiology* 95, 520–540. doi:10.1002/iroh.201011250

Desmet, M., Mourier, B., Mahler, B.J., Van Metre, P.C., Roux, G., Persat, H., Lefèvre, I., Peretti, A., Chapron, E., Simonneau, A., Miège, C., Babut, M., 2012. Spatial and temporal trends in PCBs in sediment along the lower Rhône River, France. In *Science of The Total Environment* 433, 189–197. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.06.044

Diaz-Redondo, M., Egger, G., Marchamalo, M., Hohensinner, S., Dister, E., 2017. Benchmarking Fluvial Dynamics for Process-Based River Restoration: the Upper Rhine River (1816-2014): Historical Fluvial Dynamics in the Upper Rhine. In *River Research and Applications* 33, 403–414. doi:10.1002/rra.3077

Dickinson, W., Scott, A., 1979. Analysis of Streambank Erosion Variables. In *Canadian Agricultural Engineering* 21, 19–25.

Dietrich, J.T., 2016. Riverscape mapping with helicopter-based Structure-from-Motion photogrammetry. In *Geomorphology* 252, 144–157. doi:10.1016/j.geomorph.2015.05.008

Dister, E., 1992. La maîtrise des crues par la renaturaliasation des plaines alluviales du Rhin supérieur. In *Espaces naturels rhénans - Bulletin de la société industrielle de Mulhouse* 1, 10.

Dister, E., Gomer, D., Obrdlik, P., Petermann, P., Schneider, E., 1990. Water mangement and ecological perspectives of the upper rhine's floodplains. In *River Research and Applications* 5, 1–15.

Downs, P.W., Kondolf, G.M., 2002. Post-Project Appraisals in Adaptive Management of River Channel Restoration. In *Environmental Management* 29, 477–496. doi:10.1007/s00267-001-0035-X

Dufour, S., 2007. Contrôles hydro-morphologiques et activités anthropiques dans les forêts alluviales du bassin rhodanien. In *Annales de géographie* 654, 126. doi:10.3917/ag.654.0126

Dufour, S., 2006. Contrôles naturels et anthropiques de la structure et de la dynamique des forêts riveraines des cours d'eau du bassin rhodanien (Ain, Arve, Drôme et Rhône). Université Jean Moulin Lyon 3, 244 p.

Dufour, S., Barsoum, N., Muller, E., Piégay, H., 2007. Effects of channel confinement on pioneer woody vegetation structure, composition and diversity along the River Drôme (SE France). In *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 1244–1256. doi:10.1002/esp.1556

Dufour, S., Piégay, H., 2009. From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits. In *River Research and Applications* 25, 568–581. doi:10.1002/rra.1239

Dugdale, S.J., Bergeron, N.E., St-Hilaire, A., 2015. Spatial distribution of thermal refuges analysed in relation to riverscape hydromorphology using airborne thermal infrared imagery. In *Remote Sensing of Environment* 160.

Dugdale, S.J., Bergeron, N.E., St-Hilaire, A., 2013. Temporal variability of thermal refuges and water temperature patterns in an Atlantic salmon river. In *Remote Sensing of Environment* 136, 358–373. doi:10.1016/j.rse.2013.05.018

Duplay, Joëlle, Semhi, K., Errais, E., Imfeld, G., Babcsanyi, I., Perrone, T., 2014. Copper, zinc, lead and cadmium bioavailability and retention in vineyard soils (Rouffach, France): The impact of cultural practices. In *Geoderma* 230–231, 318–328. doi:10.1016/j.geoderma.2014.04.022

Duplay, Jo?lle, Semhi, K., Errais, E., Imfeld, G., Babcsanyi, I., Perrone, T., 2014. Copper, zinc, lead and cadmium bioavailability and retention in vineyard soils (Rouffach, France): The impact of cultural practices. In *Geoderma* 230–231, 318–328. doi:10.1016/j.geoderma.2014.04.022

Dynesius, M., Nilsson, C., 1994. Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern third the world. In *Science* 266, 753–762.

Eisenmenger, G., 1907. Études sur l'évolution du Rhin et du système hydrographique Rhénan et propositions données par la faculté. Université de Paris, 512 p.

England, J., Skinner, K.S., Carter, M.G., 2008. Monitoring, river restoration and the Water Framework Directive. In *Water and Environment Journal* 22, 227–234. doi:10.1111/j.1747-6593.2007.00090.x

Eschbach, D., Piasny, G., Schmitt, L., Pfister, L., Grussenmeyer, P., Koehl, M., Skupinski, G., Serradj, A., 2017. Thermal-infrared remote sensing of surface water-groundwater exchanges in a restored anastomosing channel (Upper Rhine River, France). In *Hydrological Processes* 31, 1113–1124. doi:10.1002/hyp.11100

Eschbach, D., Schmitt, L., Imfeld, G., Preusser, F., Payraudeau, S., May, J.-H., Trauerstein, M., Skupinski, G., submitted. Long-term trajectories of rivers to perform functional restorations: an interdisciplinary case study (Rohrschollen island, France). In *Hydrology and Earth System Sciences*.

Evans, E.C., Greenwood, M.T., Petts, G.E., 1995. Thermal profiles within river beds. In *Hydrological Processes* 9, 19–25.

Evans, E.C., Petts, G.E., 1997. Hyporheic temperature patterns within riffles. In *Hydrological Sciences Journal* 42, 199–213. doi:10.1080/02626669709492020

Evers, E.H.G., Ree, K.C.M., Olie, K., 1988. Spatial variations and correlations in the distribution of PCDDs, PCDFs and related compounds in sediments from the river Rhine — Western Europe. In *Chemosphere* 17, 2271–2288. doi:10.1016/0045-6535(88)90140-3

Falkowska, L., Reindl, A.R., Grajewska, A., Lewandowska, A.U., 2016. Organochlorine contaminants in the muscle, liver and brain of seabirds (Larus) from the coastal area of the Southern Baltic. In *Ecotoxicology and Environmental Safety* 133, 63–72. doi:10.1016/j.ecoenv.2016.06.042

Fausch, K.D., Torgersen, C.E., Baxter, C.V., Li, H.W., 2002. Landscapes to Riverscapes: Bridging the Gap between Research and Conservation of Stream Fishes. In *BioScience* 52, 483. doi:10.1641/0006-3568(2002)052[0483:LTRBTG]2.0.CO;2

Fedorenkova, A., Vonk, J.A., Breure, A., Hendriks, A.J., Leuven, R., 2013. Tolerance of native and non-native fish species to chemical stress: a case study for the River Rhine. In *Aquatic Invasions* 8, 231–241. doi:10.3391/ai.2013.8.2.10

Felkel, K., 1969. Die erosion des oberrhein zwischen Basel und Karlsruhe. In *GWF (Wasser - Abwasser)* 30, 801–810.

Ferguson, R.I., Ashmore, P.E., Ashworth, P.J., Paola, C., Prestegaard, L., 1992. Measurements in a braided river Chute and Lobe: 1. Flow pattern, sediment transport and channel change. In *Water Resources Research* 28, 1877–1886.

Fischbach, G., 1878. Compte rendu des séances de la société - Séance ordinaire du 3 juillet 1878 présidée par M. de Turckheim. In *Société des sciences, agriculture et arts de la basse-Alsace - Bulletin Trimestriel- Tome XII - 3ième fascicule. Travaux sur les eaux entre Erstein et Strasbourg présentés par M. Schanté.* , 118.

FLIR, 2010. ThermaCAM Researcher 2.10 Pro. Danderyd, Sweden.

Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L., Carbonneau, P.E., 2013. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. In *Earth Surface Processes and Landforms* 38, 421–430. doi:10.1002/esp.3366

Formann, E., Habersack, H.M., Schober, S., 2007. Morphodynamic river processes and techniques for assessment of channel evolution in Alpine gravel bed rivers. In *Geomorphology* 90, 340–355. doi:10.1016/j.geomorph.2006.10.029

Fricke, K., Baschek, B., 2015. Temperature monitoring along the Rhine River based on airborne thermal infrared remote sensing: estimation of in situ water temperatures and inflow detection compared to artificial satellite data. In *Journal of Applied Remote sensing* 9, 17.

Frings, R.M., Gehres, N., Promny, M., Middelkoop, H., Schttrumpf, H., Vollmer, S., 2014. Today's sediment budget of the Rhine River channel, focusing on the Upper Rhine Graben and Rhenish Massif. In *Geomorphology* 204, 573–587. doi:10.1016/j.geomorph.2013.08.035

Fruget, J.-F., Dessaix, J., 2003. Changements environnementaux, dérives biologiques et perspectives de restauration du Rhône français après 200 ans d'influences anthropiques. In *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*. doi:10.4000/vertigo.3832

Fryirs, K., Brierley, G.J., Erskine, W.D., 2012. Use of ergodic reasoning to reconstruct the historical range of variability and evolutionary trajectory of rivers. In *Earth Surface Processes and Landforms* 37, 763–773. doi:10.1002/esp.3210

Fuller, I.C., Large, A.R.G., Milan, D.J., 2003. Quantifying channel development and sediment transfer following chute cutoff in a wandering gravel-bed river. In *Geomorphology* 54, 307–323. doi:10.1016/S0169-555X(02)00374-4

Garban, B., Ollivon, D., Carru, A.M., Chesterikoff, A., 1996. Origin, retention and release of trace metals from sediments of the river seine. In *Water, Air, and Soil Pollution* 87, 363–381. doi:10.1007/BF00696848

Geay, T., 2013. Mesure acoustique passive du transport par charriage dans les rivières. Université Grenoble Alpes, Grenoble, 163 p.

Geng, A., 2016. Structuration d'une base de données et exploration des modes de représentation cartographique pour une analyse diachronique de données issues d'un suivi scientifique. Le cas du Bauerngrundwasser dans l'île du Rohrschollen. (Rpport de TER). Strasbourg.

Gocht, T., Moldenhauer, K.-M., Püttmann, W., 2001. Historical record of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and heavy metals in floodplain sediments from the Rhine River (Hessisches Ried, Germany). In *Applied Geochemistry* 16, 1707–1721. doi:10.1016/S0883-2927(01)00063-4

Grabowski, R.C., Gurnell, A.M., 2016. Using historical data in fluvial geomorphology, in: Tools in Fluvial Geomorphology. 21p.

Gregory, K.J., 1974. Streamflow and building activity, in: Gregory Kenneth J., Walling D-E. (Eds.), Fluvial Processes in Instrumented Watersheds,. Inst. Br. Geog. Publ., pp. 123–139

Gregory, K.J., Benito, G., 2003. Paleohydrology: Understanding Global Change. University of Southampton, 396 p.

Gregory, K.J., Davis, R.J., Downs, P.W., 1992. Identification of river channel change to due to urbanization. In *Applied Geography* 12, 299–318.

Grussenmeyer, P., Landes, T., Doneus, M., Lerma, J.-L., 2016. Basics of range-based modelling techniques in Cultural Heritage (Chapter pp. 305-368), in: 3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage. Efstratios Stylianidis, Fabio Remondino, p. 388, 388p.

Grussenmeyer, P., Perdrizet, F., 1996. Archeological Photogrammetry with small format cameras : the survey of the forum vetus in Sarmizegetusa (Romania). In *International archives of Photogrammetry and Remote Sensing* , 200–204.

Grygar, T., Popelka, J., 2016. Revisiting geochemical methods of distinguishing natural concentrations and pollution by risk elements in fluvial sediments. In *Journal of Geochemical Exploration* 170, 39–57. doi:10.1016/j.gexplo.2016.08.003

Gurnell, A.M., Bertoldi, W., Corenblit, D., 2012. Changing river channels: The roles of hydrological processes, plants and pioneer fluvial landforms in humid temperate, mixed load, gravel bed rivers. In *Earth-Science Reviews* 111, 129–141. doi:10.1016/j.earscirev.2011.11.005

Gurnell, A.M., Morrissey, I.P., Boitsidis, A.J., Bark, T., Clifford, N.J., Petts, G.E., Thompson, K., 2006. Initial Adjustments Within a New River Channel: Interactions Between Fluvial Processes, Colonizing Vegetation, and Bank Profile Development. In *Environmental Management* 38, 580–596. doi:10.1007/s00267-005-0190-6

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, Ltd, pp. 77–101

Habersack, H., Jäger, E., Hauer, C., 2013. The status of the Danube River sediment regime and morphology as a basis for future basin management. In *International Journal of River Basin Management* 11, 153–166. doi:10.1080/15715124.2013.815191

Handcock, R.N., Gillespie, A.R., Cherkauer, K.A., Kay, J.E., Burges, S.J., Kampf, S.K., 2006. Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales. In *Remote Sensing of Environment* 100, 427–440. doi:10.1016/j.rse.2005.07.007

Hannah, D.M., Malcolm, I.A., Bradley, C., 2009. Seasonal hyporheic temperature dynamics over riffle bedforms. In *Hydrological Processes* 23, 2178–2194. doi:10.1002/hyp.7256

Hannah, D.M., Malcolm, I.A., Soulsby, C., Youngson, A.F., 2004. Heat exchanges and temperatures within a salmon spawning stream in the Cairngorms, Scotland: seasonal and sub-seasonal dynamics. In *River Research and Applications* 20, 635–652.

Harman, W., Starr, R., Carter, M., Tweedy, K., Clemmons, M., Suggs, K., Miller, C., 2012. Function-based framework for assessment and restoration projects.

Hein, T., Schwarz, U., Habersack, H., Nichersu, I., Preiner, S., Willby, N., Weigelhofer, G., 2016. Current status and restoration options for floodplains along the Danube River. In *Science of The Total Environment* 543, 778–790. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.09.073

Herget, J., Bremer, E., Coch, T., Dix, A., Eggenstein, G., Ewald, K., 2005. Engineering Impact on River Channels in the River Rhine Catchment (Menschliche Eingriffe in Flussläufe im Einzugsgebiet des Rheins). In *Erdkunde* 59, 294–319.

Herget, J., Dikau, R., Gregory, K.J., Vandenberghe, J., 2007. The fluvial system — Research perspectives of its past and present dynamics and controls. In *Geomorphology* 92, 101–105. doi:10.1016/j.geomorph.2006.07.034

Hering, D., Aroviita, J., Baattrup-Pedersen, A., Brabec, K., Buijse, T., Ecke, F., Friberg, N., Gielczewski, M., Januschke, K., Köhler, J., Kupilas, B., Lorenz, A.W., Muhar, S., Paillex, A., Poppe, M., Schmidt, T., Schmutz, S., Vermaat, J., Verdonschot, P.F.M., Verdonschot, R.C.M., Wolter, C., Kail, J., 2015. Contrasting the roles of section length and instream habitat enhancement for river restoration success: a field study of 20 European restoration projects. In *Journal of Applied Ecology* 52, 1518–1527. doi:10.1111/1365-2664.12531

Heritage, G., Fuller, I., Charlton, M., Brewer, P., Passmore, D., 1998. CDW photogrammetry of low relief fluvial features: accuracy and implications for

reach-scale sediment budgeting. In *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 1219–1233.

Hickin, E.J., 1983. River Channel Changes: Retrospect and Prospect, in: Collinson, J.D., Lewin, J. (Eds.), Modern and Ancient Fluvial Systems. Blackwell Publishing Ltd., pp. 59–83

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). In *River Research and Applications* 20, 25–41. doi:10.1002/rra.719

Hohensinner, S., Jungwirth, M., Muhar, S., Schmutz, S., 2011. Spatio-temporal habitat dynamics in a changing Danube River landscape 1812-2006. In *River Research and Applications* 27, 939–955. doi:10.1002/rra.1407

Holmes, N.T.H., 1998. A Review of River Rehabilitation in the UK, 1990-1996. In *Technical report W175* , 971–986.

Honsell, M., 1885. Die Korrektion des Oberrheines von der Schweizer bis zur Gr. Hessischen Grenze. Beiträge zur Hydrographie des Großherzogtums Baden 3. Karlsruhe.

Hooke, J.M., 1995. River channel adjustment to meander cutoffs on the River Bollin and River Dane, northwest England. In *Geomorphology* 14, 235–253.

Hooke, J.M., 1979. An analysis of the processes of river bank erosion. In *Journal of Hydrology* 42, 39–62. doi:10.1016/0022-1694(79)90005-2

Horowitz, A., Meybeck, M., Idlafkih, Z., Biger, E., 1999. Variations in trace element geochemistry in the Seine River Basin based on Foodplain deposits and bed sediments. In *Hydrological Processes* 13, 1329–1340.

Huang, H.Q., Nanson, G.C., 2007. Why some alluvial rivers develop an anabranching pattern. In *Water Resources Research* 43. doi:10.1029/2006WR005223

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. In *Geomorphology* 101, 209–236. doi:10.1016/j.geomorph.2008.07.001

Hughes, F., Colston, A., Mountford, J., 2005. Restoring riparian ecosystems: the challenge of accommodating variability and designing restoration trajectories. In *Ecology and Society* 10.

IKSR-CIPR-ICBR, 2014. Mise en oeuvre du Plan de gestion des sédiments Rhin. Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR). ISBN 978-3-941994-54-6.

IKSR-CIPR-ICBR, 2012. Plan d'action contre les inondations 1995 - 2010 : objectifs opérationnels, mise en oeuvre et résultats - Bilan synthétique. Coblence.

IKSR-CIPR-ICBR, 2005. État des lieux DCE, partie A.

Jähnig, S.C., Lorenz, A.W., Hering, D., Antons, C., Sundermann, A., Jedicke, E., Haase, P., 2011. River restoration success: a question of perception. In *Ecological society of america* 21, 2007–2015.

James, L.A., Singer, M.B., Ghoshal, S., Megison, M., 2009. Historical channel changes in the lower Yuba and Feather Rivers, California: Long-term effects of contrasting river-management strategies, in: Geological Society of America Special Papers. James, L.A., Rathburn, S.L., and Whittecar, G.R., (eds) Geological Society of America, pp. 57–81 doi:10.1130/2009.2451(04)

Jansen, J.D., Nanson, G.C., 2004. Anabranching and maximum flow efficiency in Magela Creek, northern Australia: ANABRANCHING AND MAXIMUM FLOW EFFICIENCY. In *Water Resources Research* 40. doi:10.1029/2003WR002408

Javernick, L., Brasington, J., Caruso, B., 2014. Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. In *Geomorphology* 213, 166–182. doi:10.1016/j.geomorph.2014.01.006

Jeanpierre, D., 1968. L'érosion des fonds : conséquence secondaire de la protection de la plaine d'Alsace par l'endiguement longitudinal du Rhin, in: Société Hydrotechnique de France. Presented at the Xième journées de l'hydraulique, Paris, 8p.

Jenkinson, R.G., Barnas, K.A., Braatne, J.H., Bernhardt, E.S., Palmer, M.A., Allan, J.D., 2006. Stream restoration databases and case studies: a guide to information resources and their utility in advancing the science and practice of restoration. In *Restoration Ecology* 14, 177–186.

Johnson, P.A., 2005. Preliminary Assessment and Rating of Stream Channel Stability near Bridges. In *Journal of Hydraulic Engineering* 10, 845–852.

Jones, C.J., Johnson, P.A., 2015. Describing Damage to Stream Modification Projects in Constrained Settings. In *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 51, 251–262. doi:10.1111/jawr.12248

Junk, W., Bayley, P.B., Sparks, R.E., 1989. The flood pulse concept in river-floodplain systems. In *Proceedings of the International Large River Symposium. Dodge, DP (Ed). Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci* 106, 110–127.

Knighton, A.D., 1984. Fluvial forms and processes, Edward Arnold Editions. ed. London, 218 p.

Kondolf, G.M., 2016. Tools in Fluvial Geomorphology. John Wiley & Sons, 569 p.

Kondolf, G.M., 2006. River restoration and meanders. In *Ecology and Society* 11, 42.

Kondolf, G.M., 1997. Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. In *Environmental Management* 21, 533–551. doi:10.1007/s002679900048

Kondolf, G.M., Larson, M., 1995. Historical channel analysis and its application to riparian and aquatic habitat restoration. In *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 5, 109–126. doi:10.1002/aqc.3270050204

Kondolf, G.M., Micheli, E.R., 1995. Evaluating stream restoration projects. In *Environmental Management* 19, 1–15. doi:10.1007/BF02471999

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. In *Environmental Management* 28, 761–776. doi:10.1007/s002670010260

Kuhl, D., 1992. 14 years of artificial grain feeding in the Rhine downstream the barrage Iffezheim, in: Proceedings of the 5th International Symposium on River Sedimentation: Sediment Management. University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, pp. 1121–1129

Kuo, C.-W., Brierley, G., Chang, Y.-H., 2015. Monitoring channel responses to flood events of low to moderate magnitudes in a bedrock-dominated river using morphological budgeting by terrestrial laser scanning. In *Geomorphology* 235, 1–14. doi:10.1016/j.geomorph.2015.01.019

Lafont, M., 2001. A conceptual approach to the biomonitoring of freshwater: the Ecological Ambience System. In *Journal of Limnology* 1, 17–24.

Lague, D., Brodu, N., Leroux, J., 2013. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82, 10–26. doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009

Lair, G.J., Zehetner, F., Khan, Z.H., Gerzabek, M.H., 2009. Phosphorus sorption-desorption in alluvial soils of a young weathering sequence at the Danube River. In *Geoderma* 149, 39–44. doi:10.1016/j.geoderma.2008.11.011

Lamarre, H., Mac Vicar, B., Roy, A.G., 2005. Using Passive Integrated Transponder (PIT) Tags to Investigate Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers. In *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. In *Geomorphology* 99, 270–279. doi:10.1016/j.geomorph.2007.11.005

Lammersen, R., Engel, H., Van de Langemheen, W., Buiteveld, H., 2002. Impact of river training and retention measures on flood peaks along the Rhine. In *Journal of Hydrology* 267, 115–124.

Landelle, P., 2016. La protection des espaces naturels. In *Chasse & Droit* , 9.

Lane, S.N., Chandler, J.H., Porfiri, K., 2001. Monitoring river channel and flume surfaces with digital photogrammetry. In *Journal of Hydraulic Engineering* 127, 871–877.

Lane, S.N., James, T.D., Crowell, M.D., 2000. Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research. In *Photogrammetric record* 16, 793–821.

Lane, S.N., Richards, K.S., Chandler, J.H., 1994. Developments in monitoring and modelling small-scale river bed topography. In *Earth Surface Processes and Landforms* 19, 349–368.

Large, A.R.G., Gilvear, D.J., 2015. Using Google Earth, a virtual-globe imaging platform, for ecosystem services-based river assessment. In *River Research and Applications* 31, 406–421. doi:10.1002/rra.2798

Laronne, J.B., Outhet, D.N., Carling, P.A., Mc Cabe, T.J., 1994. Scour chain employment in gravel bed rivers. In *Catena* 22, 299–306.

Larras, J., 1977. Fleuves et rivières non aménagés. In *Revue de géographie alpine* 65, 228–229.

Lawler, D.M., 1993. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: A review. In *Earth Surface Processes and Landforms* 18, 777–821. doi:10.1002/esp.3290180905

Lefoulon, R., 1959. L'aménagement du Rhin sur le tronçon de Bâle et Strasbourg. In *La Houille Blanche* , 203–206. doi:10.1051/lhb/1959033

Legleiter, C.J., 2012. Remote measurement of river morphology via fusion of LiDAR topography and spectrally based bathymetry. In *Earth Surface Processes and Landforms* 37, 499–518. doi:10.1002/esp.2262

Lejot, J., 2008. Suivi des formes fluviales par télédétection à très haute résolution. Application aux programmes de restauration de la basse vallée de

l'Ain et du Haut-Rhône (Chautagne). Université Lyon 2, 257 p.

Lejot, J., Delacourt, C., Piégay, H., Fournier, T., Trémélo, M.-L., Allemand, P., 2007. Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. In *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 1705–1725. doi:10.1002/esp.1595

Leopold, L.B., Wolman, M.G., Wolman, M.G., Wolman, M.G., 1957. River channel patterns: braided, meandering, and straight. US Government Printing Office Washington (DC), 50 p.

Lespez, L., Viel, V., Rollet, A.J., Delahaye, D., 2015. The anthropogenic nature of present-day low energy rivers in western France and implications for current restoration projects. In *Geomorphology* 251, 64–76. doi:10.1016/j.geomorph.2015.05.015

Lewis, R.R., 1990. Wetland restoration/creation/enhancement terminology: suggestions for standardization, in: Wetland Creation and Restoration: The Status Of The Science. Kusler J.A. & Kentuma M.E. (eds), pp. 417–422

Liebault, F., 2003. Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologiques actuels (massifs du Diois et des Baronnies). Université Lyon 2, 357 p.

Lintern, A., Leahy, P.J., Heijnis, H., Zawadzki, A., Gadd, P., Jacobsen, G., Deletic, A., Mccarthy, D.T., 2016. Identifying heavy metal levels in historical flood water deposits using sediment cores. In *Water Research* 105, 34–46. doi:10.1016/j.watres.2016.08.041

Loheide, S.P., Gorelick, S.M., 2006. Quantifying stream−aquifer interactions through the analysis of remotely sensed thermographic profiles and In situ temperature histories. In *Environmental Science & Technology* 40, 3336–3341. doi:10.1021/es0522074

Loomis, J., Kent, P., Strange, L., Fausch, K., Covich, A., 2000. Measuring the total economic value of restoring ecosystem services in an impaired river basin: results from a contingent valuation survey. In *Ecological economics* 33, 103–117.

Lyons, J., Wang, L., Simonson, T.D., 1996. Development and validation of an index of biotic integrity for coldwater streams in Wisconsin. In *North American Journal of Fisheries Management* 16, 241–256. doi:10.1577/1548-8675(1996)016<0241:DAVOAI>2.3.CO;2

Macaire, J.J., 1990. L'enregistrement du temps dans les dépôts fluviatiles superficiels. De la géodynamique à la chronostratigraphie. In *Quaternaire* 1, 41–49. doi:10.3406/quate.1990.1920

MacVicar, B., Chapuis, M., Buckrell, E., Roy, A., 2015. Assessing the Performance of In-Stream Restoration Projects Using Radio Frequency Identification (RFID) Transponders. In *Water* 7, 5566–5591. doi:10.3390/w7105566

MacWilliams, M.L., Wheaton, J.M., Pasternack, G.B., Street, R.L., Kitanidis, P.K., 2006. Flow convergence routing hypothesis for pool-riffle maintenance in alluvial rivers. In *Water Resources Research* 42. doi:10.1029/2005WR004391

Magdaleno, F., Anastasio Fernández, J., Merino, S., 2012. The Ebro River in the 20th century or the ecomorphological transformation of a large and dynamic Mediterranean channel. In *Earth Surface Processes and Landforms* 37, 486–498. doi:10.1002/esp.2258

Magnuson, J.J., Crowder, L.B., Medvick, P.A., 1979. Temperature as an ecological resource. In *American Zoologist* 19, 331–343.

Maire, G., 1996. Evolution des objectifs d'aménagement du Rhin et de ses espaces riverains en Alsace, aux XIXé et XXe. In *Racine P* Fleuves, rivières et canaux dans l'Europe occidentale et médiane (Actes du colloque des 1-2 décembre 1995. Association Interuniversitaire de l'Est et C.R.D.P. de Nancy), 445–454.

Makaske B., 2001. Anastomosing rivers: a review of their classification, rigin and sedimentary products. In *Earth-Sciences Reviews* 53, 149–196.

Makaske, B., Smith, D.G., Berendsen, H.J., 2002. Avulsions, channel evolution and floodplain sedimentation rates of the anastomosing upper Columbia River, British Columbia, Canada. In *Sedimentology* 49, 1049–1071.

Makaske, B., Smith, D.G., Berendsen, H.J.A., de Boer, A.G., van Nielen-Kiezebrink, M.F., Locking, T., 2009. Hydraulic and sedimentary processes causing anastomosing morphology of the upper Columbia River, British Columbia, Canada. In *Geomorphology* 111, 194–205. doi:10.1016/j.geomorph.2009.04.019

Malard, F., Mangin, A., Uehlinger, U., Ward, J.V., 2001. Thermal heterogeneity in the hyporheic zone of a glacial floodplain. In *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques* 7, 1319–1335.

Malavoi, J.-R., Adam, P., Bourdin, L., 2006. Quelques enseignements de l'étude bilan des opérations de restauration physique des cours d'eau sur le Bassin Rhône méditérranée. In *3ième journée thématique de la ZABR* , 13.

Malavoi, J.R., Bravard, J.P., 2010. Eléments d'hydrogéomorphologie fluviale.

Malavoi, J.R., Souchon, Y., 2002. Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière: clé de détermination qualitative et mesures physiques. In *Bulletin Fr. Pêche Pisciculture* 365/366, 367–372.

Marchal, M., Delmas, G., 1959. L'aménagement du Rhin à courant libre du Bâle à Lauterbourg. In *La Houille Blanche* , 177–202. doi:10.1051/lhb/1959032

Martin, B., Drescher, A., Fournier, M., Guerrouah, O., Giacona, F., Glaser, R., Himmelsbach, I., Holleville, N., Riemann, D., Schonbein, J., Vitoux, M.-C., With, L., 2015. Les évènements extrêmes dans le fossé rhénan entre 1480 et 2012. Quels apports pour la prévention des inondations ? In *La Houille Blanche* , 82–93. doi:10.1051/lhb/20150023

Martin, Y., Church, M., 1995. Bed-material transport estimated from channel surveys: Vedder River, British Columbia. In *Earth Surface Processes and Landforms* 20, 347–361.

Masuda, K., Takashima, T., Takayama, Y., 1988. Emissivity of pure and sea waters for the model sea surface in the infrared window regions. In *Remote Sensing of Environment* 24, 313–329.

McLean, D.G., Church, M., 1999. Sediment transport along lower Fraser River: 2. Estimates based on the long-term gravel budget. In *Water Resources Research* 35, 2549–2559. doi:10.1029/1999WR900102

Meyer, A., Combroux, I., Schmitt, L., Trémolières, M., 2013. Vegetation dynamics in side-channels reconnected to the Rhine River: what are the main factors controlling communities trajectories after restoration? In *Hydrobiologia* 714, 35–47. doi:10.1007/s10750-013-1512-y

Middelkoop, H., 2000. Heavy-metal pollution of the river Rhine and Meuse floodplains in the Netherlands. In *Netherlands journal of geosciences* 79, 411–427.

Mika, S., Hoyle, J., Kyle, G., Howell, T., Wolfenden, B., Ryder, D., Keating, D., Boulton, A., Brierley, G., Brooks, A.P., others, 2010. Inside the "black box" of river restoration: using catchment history to identify disturbance and response mechanisms to set targets for process-based restoration. In *Ecology and Society* 15, 8.

Milan, D.J., 2012. Geomorphic impact and system recovery following an extreme flood in an upland stream: Thinhope Burn, northern England, UK. In *Geomorphology* 138, 319–328. doi:10.1016/j.geomorph.2011.09.017

Milan, D.J., Large, A.R.G., 2014. Magnetic tracing of fine-sediment over pool-riffle morphology. In *CATENA* 115, 134–149. doi:10.1016/j.catena.2013.11.003

Miller, S.O., Ritter, D.F., Kochel, R.C., Miller, J.R., 1993. Fluvial responses to land-use changes and climatic variations within the Drury Creek watershed, southern Illinois. In *Geomorphology* 6, 309–329. doi:10.1016/0169-555X(93)90053-5

Morandi, B., 2014. La restauration des cours d'eau en France et à l'étranger : de la définition du concept à l'évaluation de l'action - Éléments de recherche applicables. ENS Lyon, Lyon, 430 p.

Morandi, B., Piégay, H., Lamouroux, N., Vaudor, L., 2014. How is success or failure in river restoration projects evaluated? Feedback from French restoration projects. In *Journal of Environmental Management* 137, 178–188. doi:10.1016/j.jenvman.2014.02.010

Morin, E., 1994. Sur l'interdisciplinarité. In *Bulletin Interactif du Centre International de Recherches et Études transdisciplinaires* 2, 6 p.

Mouw, J.E.B., Tappenbeck, T.H., Stanford, J.A., 2014. Spawning tactics of summer chum salmon Oncorhynchus keta in relation to channel complexity and hyporheic exchange. In *Environmental Biology of Fishes* 97, 1095–1107. doi:10.1007/s10641-013-0200-0

Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P., 2017. Documentation pf heritage buildings using close-range UAV images: Dense Matching Issues, Comparison, and Case Studies. In *The Photogrammetric Record an International Journal of Photogrammetry* 32, nd.

Nadal-Romero, E., Revuelto, J., Errea, P., López-Moreno, J.I., 2015. The application of terrestrial laser scanner and SfM photogrammetry in measuring erosion and deposition processes in two opposite slopes in a humid badlands area (central Spanish Pyrenees). In *SOIL* 1, 561–573. doi:10.5194/soil-1-561-2015

Naiman, R.J., Décamps, H., Pastor, J., Johnston, C.A., 1988. The Potential Importance of Boundaries of Fluvial Ecosystems. In *Journal of the North American Benthological Society* 7, 289–306. doi:10.2307/1467295

Naiman, R.J., Decamps, H., Pollock, M., 1993. The Role of Riparian Corridors in Maintaining Regional Biodiversity. In *Ecological Applications* 3, 209–212. doi:10.2307/1941822

Namour, P., Schmitt, L., Eschbach, D., Moulin, B., Fantino, G., Breil, P., 2015. Stream pollution concentration in riffle geomorphic units (Yzeron basin, France). In *Science of The Total Environment* 532, 80–90.

Nanson, G.C., Knighton, A.D., 1996. Anabranching Rivers: Their Cause, Character and Classification. In *Earth Surface Processes and Landforms* 21, 217–239.

doi:10.1002/(SICI)1096-9837(199603)21:3<217::AID-ESP611>3.0.CO;2-U

Newby, P.R.T., 2011. Accuracy, precision, extraction, citation and valediction: Editorial: Accuracy, precision, extraction, citation and valediction. In *The Photogrammetric Record* 26, 149–153. doi:10.1111/j.1477-9730.2011.00642.x

Nielsen, J.L., Lisle, T.E., Ozaki, V., 1994. Thermally stratified pools and their use by steelhead in northern California streams. In *Transactions of the American Fisheries Society* 123, 613–626. doi:10.1577/1548-8659(1994)123<0613:TSPATU>2.3.CO;2

Nilsson, C., Reidy, C.A., Dynesius, M., Revenga, C., 2005. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. In *Science* 308, 405–408.

Oberlé, C., Trémolières, M., 2015. Évolution de la végétation aquatique et rivulaire, ainsi que du niveau trophique d'un ancien bras du Rhin après reconnexion. Strasbourg.

Ochsenbein, G., 1966. La végétation sur les bords du Rhin. In *Saisons d'Alsace* , 383–398.

Olsen, M.J., Wartman, J., McAlister, M., Mahmoudabadi, H., O'Banion, M.S., Dunham, L., Cunningham, K., 2015. To Fill or Not to Fill: Sensitivity Analysis of the Influence of Resolution and Hole Filling on Point Cloud Surface Modeling and Individual Rockfall Event Detection. In *Remote Sensing* 7, 12103–12134. doi:10.3390/rs70912103

Packman, A.I., MacKay, J.S., 2003. Interplay of stream-subsurface exchange, clay particle deposition, and streambed evolution: interplay of exchange and clay deposition. In *Water Resources Research* 39, 7. doi:10.1029/2002WR001432

Painter, R.B., Blyth, K., Mosedale, J.C., Kelly, iM, 1974. The effect of afforestation on erosion processes and sediment yield. In *Effects of Man on the Interface of the Hydrological Cycle with the Physical Environment*, 62–67.

Palmer, M.A., Bernhardt, E.S., 2006. Hydroecology and river restoration: Ripe for research and synthesis. In *Water Resources Research* 42, W03S07. doi:10.1029/2005WR004354

Palmer, M.A., Bernhardt, E.S., Allan, J.D., Lake, P.S., Alexander, G., Brooks, S., Carr, J., Clayton, S., Dahm, C.N., Follstad Shah, J., Galat, D.L., Loss, S.G., Goodwin, P., Hart, D.D., Hassett, B., Jenkinson, R., Kondolf, G.M., Lave, R., Meyer, J.L., O'Donnell, T.K., Pagano, L., Sudduth, E., 2005. Standards for ecologically successful river restoration: Ecological success in river restoration. In *Journal of Applied Ecology* 42, 208–217. doi:10.1111/j.1365-2664.2005.01004.x

Palmer, M.A., Menninger, H.L., Bernhardt, E., 2010. River restoration, habitat heterogeneity and biodiversity: a failure of theory or practice? In *Freshwater Biology* 55, 205–222. doi:10.1111/j.1365-2427.2009.02372.x

Pardé, M., 1928. Périodicité des grandes inondations et crues exceptionnelles. In *Revue de géographie alpine* 16, 499–519. doi:10.3406/rga.1928.4457

Passega, R., 1977. Significance of CM diagrams of sediments deposited by suspensions. In *Sedimentology* 24, 723–733. doi:10.1111/j.1365-3091.1977.tb00267.x

Passega, R., 1964. Grain Size Representation by Cm Patterns as a Geological Tool. In *Journal of Sedimentary Research* 34.

Pautou, G., Piégay, H., Ruffinoni, C., 2003. Forêts riveraines, ripisylves ou forêts alluviales : un compartiment complexe de l'hydrosystème, in: Les Forêts Riveraines Des Cours D'eau: Écologie, Fonctions et Gestion. Piégay H.; Pautou G.; Ruffinoni C., 468p.

Peiry, J.-L., 1988. Approche géographique de la dynamique spatio-temporelle des sédiments d'un cours d'eau intra-montagnard : l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve (Haute-Savoie). Lyon 3.

Petts, G.E., Moeller, H., Roux, A.L. (eds), 1989. Historical change of large alluvial rivers: Western Europe.

Pfister, L., McDonnell, J.J., Hissler, C., Hoffmann, L., 2010. Ground-based thermal imagery as a simple, practical tool for mapping saturated area connectivity and dynamics. In *Hydrological Processes* 224, 3123–3132.

Piasny, G., Finaud-Guyot, P., Schmitt, L., Eschbach, D., 2016. Modélisation hydrosédimentaire de l'hydrosystème fluvial du Rohrschollen (Strasbourg).

Piégay, H., Pautou, G., Ruffinoni, C., 2003. Les forêts riveraines des cours d'eau: écologie, fonctions et gestion. Forêt privée française, 468 p.

Poirel, A., Lauters, F., Desaint, B., 2008. 1977-2006 : Trente années de mesures des températures de l'eau dans le Bassin du Rhône. In *Hydroécologie Appliquée* 16, 191–213. doi:10.1051/hydro/2009002

Pont, D., Piégay, H., Farinetti, A., Allain, S., Landon, N., Liébault, F., Dumont, B., Richard-Mazet, A., 2009. Conceptual framework and interdisciplinary approach for the sustainable management of gravel-bed rivers: The case of the Drôme River basin (S.E. France). In *Aquatic Sciences* 71, 356–370. doi:10.1007/s00027-009-9201-7

Poole, G.C., Berman, C.H., 2001. An ecological perspective on in-stream temperature: natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation. In *Environmental Management* 27, 787–802. doi:10.1007/s002670010188

Poole, G.C., Stanford, J.A., Frissell, C.A., Running, S.W., 2002. Three-dimensional mapping of geomorphic controls on flood-plain hydrology and connectivity from aerial photos. In *Geomorphology* 48, 329–347.

Poole, G.C., Stanford, J.A., Running, S.W., Frissell, C.A., 2006. Multiscale geomorphic drivers of groundwater flow paths: subsurface hydrologic dynamics and hyporheic habitat diversity. In *Journal of the North American Benthological Society* 25, 288–303.

Preusser, F., Schmitt, L., Delile, H., Grosprêtre, L., 2011. Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating of the sedimentation history of the Yzeron basin (Chaudanne sub-catchment), Rhône valley, france. In *Quaternaire* 22, 77–87.

Provansal, M., Raccasi, G., Monaco, Mm., Robresco, S., Dufour, S., 2012. La réhabilitation des marges fluviales, quel intérêt, quelles contraintes ?Le cas des annexes fluviales du Rhône aval. In *Méditerranée* n° 118, 85–94.

Pyle, C.J., Richards, K.S., Chandler, J.H., 1997. Digital Photogrammetric Monitoring of River Bank Erosion. In *The Photogrammetric Record* 15, 753–764. doi:10.1111/0031-868X.00083

Rakotomalala, R., 2005. TANAGRA : un logiciel gratuit pour l'enseignement et la recherche. In *Actes de EGC'2005, RNTI-E-3* 2, 697–702.

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. In *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 12, 405–424. doi:10.1002/aqc.536

Rayburg, S., Thoms, M., Neave, M., 2009. A comparison of digital elevation models generated from different data sources. In *Geomorphology* 106, 261–270. doi:10.1016/j.geomorph.2008.11.007

Reimann, C., de Caritat, P., 2005. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors. In *Science of The Total Environment* 337, 91–107. doi:10.1016/j.scitotenv.2004.06.011

Remondino, F., El-Hakim, S., 2006. Image based 3D modelling: a review. In *The Photogrammetric Record* 21, 269–291.

Revil, A., Cary, L., Fan, Q., Finizola, A., Trolard, F., 2005. Self-potential signals associated with preferential ground water flow pathways in a buried paleo-channel. In *Geophysical Research Letters* 32, 4. doi:10.1029/2004GL022124

Richards, C., Bacon, K.L., 1994. Influence of fine sediment on macroinvertebrate colonization of surface and hyporheic stream substrates. In *The Great Basin Naturalist* 54, 106–113.

Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F., Bussettini, M., 2015. A methodological framework for hydromorphological assessment, analysis and monitoring (IDRAIM) aimed at promoting integrated river management. In *Geomorphology* 251, 122–136. doi:10.1016/j.geomorph.2015.05.010

Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F., Bussettini, M., 2013. A method for the assessment and analysis of the hydromorphological condition of Italian streams: The Morphological Quality Index (MQI). In *Geomorphology* 180–181, 96–108. doi:10.1016/j.geomorph.2012.09.009

Riquier, J., Piégay, H., Šulc Michalková, M., 2015. Hydromorphological conditions in eighteen restored floodplain channels of a large river: linking patterns to processes. In *Freshwater Biology* , n/a-n/a. doi:10.1111/fwb.12411

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. Université Jean Moulin Lyon 3, 305 p.

Rollet, A.J., Piégay, H., Dufour, S., Bornette, G., Persat, H., 2014. Assessment of consequences of sediment deficit on a gravel river bed downstream of dams in restoration perspectives: application of a multicriteria, hierarchical and spatially explicit diagnosis. In *River Research and Applications* 30, 939–953. doi:10.1002/rra.2689

Ruehl, C., Fisher, A.T., Hatch, C., Huertos, M.L., Stemler, G., Shennan, C., 2006. Differential gauging and tracer tests resolve seepage fluxes in a strongly-losing stream. In *Journal of Hydrology* 330, 235–248. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.03.025

Rumsby, B.T., Macklin, M.G., 1996. River response to the last neoglacial (the "Little Ice Age") in northern, western and central Europe. In *Geological Society, London, Special Publications* 115, 217–233. doi:10.1144/GSL.SP.1996.115.01.17

Schäfer, W., 1973. Der Oberrhein, sterbende Landschaft. In *Natur und Museum* , 1–29.

Schiemer, F., Baumgartner, C., Tockner, K., 1999. Restoration of floodplain rivers: The Danube restoration project. In *Regulated Rivers: Research & Management* 15, 231–244.

Schirmer, W., 1988. Holocene valley development on the upper Rhine and Main., in: Lang, R. & Schlijchter, C. (Eds) Lake, Mire and River Environments. Balkema, Rotterdam, pp. 153–160

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). Pôle de recherche et d'Enseignement Supérieur de Lyon; UMR 5600 du CNRS "Environnement, Ville, Société," Lyon, 296 p.

Schmitt, L., 2001. Etude de la typologie des cours d'eau Alsacien : expertise scientifique et consolidation des acquis. (Rapport final pour d'agence de l'eau).

Schmitt, L., Houssier, J., Martin, B., Beiner, M., Skupinski, G., Boës, E., Schwartz, D., Ertlen, D., Argant, J., Gebhardt, A., Schneider, N., Lasserre, M., Trintafillidis, G., Ollive, V., 2016. Paléo-dynamique fluviale holocène dans le compartiment sud-occidental du fossé rhénan (France). In *Revue Archéologique de l'Est* 42è supplément, 15–33.

Schmitt, L., Lafont, M., Trèmolières, M., Jezequel, C., Vivier, A., Breil, P., Namour, P., Valin, K., Valette, L., 2011. Using hydro-geomorphological typologies in functional ecology: Preliminary results in contrasted hydrosystems. In *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 36, 539–548. doi:10.1016/j.pce.2009.11.011

Schmitt, L., Lebeau, M., Trémolières, M., Defraeye, S., Coli, C., Denny, E., Dillinger, M., Beck, T., Dor, J.-C., Gombert, P., Gueidan, A., Manné, S., Party, J.-P., Perrotey, P., Piquette, M., Roeck, U., Schnitzler, A., Sonnet, O., Vacher, J.-P., Vauclin, V., Weiss, M., Zacher, J.-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). In *Ingénieries n° spécial* , 67–84.

Schmitt, L., Maire, G., Nobelis, P., Humbert, J., 2007. Quantitative morphodynamic typology of rivers: a methodological study based on the French Upper Rhine basin. In *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 1726–1746. doi:10.1002/esp.1596

Schmitt, L., Trémolières, M., Blum, C., Dister, E., Pfarr, U., others, 2012. 30 years of restoration works on the two sides of the Upper Rhine River: feedback and future challenges, in: Int. Conf. Integrative Sciences and Sustainable Development of Rivers. Lyon, France. pp. 101–103

Schmitt, Laurent, Trémolières, M., Grac, C., 2012. Élaboration du protocole de suivi scientifique. Rapport intermédiaire du suivi scientifique dans le cadre du projet LIFE08 NAT/F/000471 - Restauration de la dynamique des habitats alluviaux rhénans sur l'ile du Rohrschollen, Université de Strasbourg, LIVE - ERL 7230 CNRS. Projet cofinancé par la Ville de Strasbourg, l'agence de l'eau Rhin-Meuse, le département du Bas-Rhin, DREAL Alsace, la région Alsace et Électricité de France. 26 p.

Schneider, G., 1966. Zusammenfassende darstellung der Rheinregulierung Strassburg/Kehl-Istein. Gutenbergdruckerei R. Oberkirch, 477 p.

Schneider, J., Hegglin, R., Meier, S., Turowski, J.M., Nitsche, M., Rickenmann, D., 2010. Studying sediment transport in mountain rivers by mobile and stationary RFID antennas, in: Dittrich, Koll, Aberle & Geisenhainer (Eds). River Flow 2010: Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics. Dittrich, Koll, Aberle & Geisenhainer (Eds), p. 8

Schnitzler, A., 1994. Conservation of biodiversity in alluvial hardwood forests of the temperate zone. The example of the Rhine valley 68, 385–398.

Schnitzler-Lenoble, A., Carbiener, R., 2007. Forêts alluviales d'Europe : Écologie, biogéographie, valeur intrinsèque. Lavoisier, 435 p.

Schulz-Zunkel, C., Krueger, F., 2009. Trace Metal Dynamics in Floodplain Soils of the River Elbe: A Review. In *Journal of Environment Quality* 38, 1349. doi:10.2134/jeq2008.0299

Schumm, S.A., 1977. The fluvial system, John Wiley & Sons. ed. New York, 338 p.

Sear, D.A., 1996. Sediment transport processes in pool–riffle sequences. In *Earth Surface Processes and Landforms* 21, 241–262.

Sear, D.A., Armitage, P.D., Dawson, F.H., 1999. Groundwater dominated rivers. In *Hydrological Processes* 13, 255–276.

Sear, D.A., Arnell, N.W., 2006. The application of palaeohydrology in river management. In *Catena* 66, 169–183. doi:10.1016/j.catena.2005.11.009

Sear, D.A., Darby, S.E., Thorne, C.R., Brookes, A.B., 1994. Geomorphological approach to stream stabilization and restoration: Case study of the Mimmshall brook, hertfordshire, UK. In *Regulated Rivers: Research & Management* 9, 205–223. doi:10.1002/rrr.3450090403

Sear, D.A., Millington, C.E., Kitts, D.R., Jeffries, R., 2010. Logjam controls on channel:floodplain interactions in wooded catchments and their role in the formation of multi-channel patterns. In *Geomorphology* 116, 305–319. doi:10.1016/j.geomorph.2009.11.022

Sear, D.A., Newson, M.D., Thorne, C.R., 2003. Guidebook of applied fluvial geomorphology.

DEFRA (Flood management division), London, 253 p.

Smith, M.J., Chandler, J., Rose, J., 2009. High spatial resolution data acquisition for the geosciences: kite aerial photography. In *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 155–161. doi:10.1002/esp.1702

Stanford, J.A., Hauer, F.R., Ward, J.V., 1988. Serial discontinuity in a large river system. In *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* 23, 1114–1118.

Stanford, J.A., Ward, J.V., 2001. Revisiting the serial discontinuity concept. In *Regulated Rivers: Research & Management* 17, 303–310. doi:10.1002/rrr.659

Starkel, L., Soja, R., Michczyńska, D.J., 2006. Past hydrological events reflected in Holocene history of Polish rivers. In *CATENA*, Past Hydrological Events Related to Understanding Global Change 66, 24–33. doi:10.1016/j.catena.2005.07.008

Steiger, J., Tabacchi, E., Dufour, S., Corenblit, D., Peiry, J.-L., 2005. Hydrogeomorphic processes affecting riparian habitat within alluvial channel-floodplain river systems: a review for the temperate zone. In *River Research and Applications* 21, 719–737. doi:10.1002/rra.879

Strahler, A., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. In *Geophysical Union* 38, 913–920.

Tao, F., Jiantong, L., Bangding, X., Xiaoguo, C., Xiaoqing, X., 2005. Mobilization potential of heavy metals: A comparison between river and lake sediments. In *Water, Air, & Soil Pollution* 161, 209–225.

The MathWorks, I., R2011b. MATLAB. Massachusetts, United States.

Thomas, W., 1956. Man's role in changing the face of earth. In *Chicago, London* , 10–13.

Thorne, C.R., 1981. Field measurements of rates of bank erosion and bank material strength. In *Erosion and Sediment Transport Measurement* , 503–512.

Thorne, C.R., 1978. Processes of bank erosion in river channels.

TI-RFID, 2006. Eco-line 23 mm glass transponder, RI-TRP-REHP (read only), RI-TRPWEHP (read/write), reference guide, Texas Instruments. http://www.ti.com/lit/ug/ scbu034/scbu034.pdf (16.01.2014).

Tockner, K., Paetzold, A., Karaus, U.T.E., Claret, C., Zettel, J., 2006. Ecology of braided rivers. In *Spacial publication-international association of sedimentologists* 36, 339.

Tockner, K., Uehlinger, U., Robinson, C.T. (Eds.), 2009. Rivers of Europe, 1. ed. ed. Academic Press, Amsterdam, 700 p.

Tonolla, D., Acuña, V., Uehlinger, U., Frank, T., Tockner, K., 2010. Thermal Heterogeneity in River Floodplains. In *Ecosystems* 13, 727–740. doi:10.1007/s10021-010-9350-5

Toonen, W.H.J., Winkels, T.G., Cohen, K.M., Prins, M.A., Middelkoop, H., 2015. Lower Rhine historical flood magnitudes of the last 450years reproduced from grain-size measurements of flood deposits using End Member Modelling. In *CATENA* 130, 69–81. doi:10.1016/j.catena.2014.12.004

Tooth, S., Jansen, J.D., Nanson, G.C., Coulthard, T.J., Pietsch, T., 2008. Riparian vegetation and the late Holocene development of an anabranching river: Magela Creek, northern Australia. In *Geological Society of America Bulletin* 120, 1021–1035.

Torgersen, C.E., Faux, R.N., McIntosh, B.A., Poage, N.J., Norton, D.J., 2001. Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. In *Remote Sensing of Environment* 76, 386–398.

Torgersen, C.E., Price, D.M., Li, H.W., McIntosh, B.A., 1999. Multiscale thermal refugia and stream habitat associations of chinook salmon in northeastern Oregon. In *Ecological Applications* 9, 301–319. doi:10.2307/2641187

Trémolières, M., Carbiener, R., Ortscheit, A., Klein, J.-P., 1994. Changes in aquatic vegetation in Rhine floodplain streams in Alsace in relation to disturbance. In *Journal of Vegetation Science* 5, 169–178.

Trémolières, M., Schnitzler, A., Carbiener, D., 2002. Quel système de référence pour la restauration des systèmes alluviaux rhénans? In *Revue Écologie (Terre Vie)* 9, 131–145.

Tricart, J., 1952. La partie orientale du Bassin de Paris: étude morphologique. Société d'édition d'enseignement supérieur, 474 p.

Tricart, J., Bravard, J.-P., 1991. L'aménagement des trois plus grands fleuves européens : Rhin, Rhône et Danube. Problèmes et méfaits. In *Annales de Géographie* 100, 668–713. doi:10.3406/geo.1991.21654

Trimble, S.W., Cooke, R.U., 1991. Historical Sources for Geomorphological Research in the United States. In *The Professional Geographer* 43, 212–228. doi:10.1111/j.0033-0124.1991.00212.x

Tulla, J.G., 1825. Ueber die Rectification des Rheins, von seinem Austritt aus der Schweiz bis zu seinem Eintritt in Hessen. Karlsruhe.

Tümmers, H.J., 1999. Der Rhein: ein europäischer Fluß und seine Geschichte, 2. Überarbeitete und aktualisierte Auflage. ed. Beck, München, 481 p.

Uehlinger, U., Wantzen, K.M., Leuven, R.S.E.W., Arndt, H., 2009. The Rhine river basin, in: Tockner K. (Ed), Rivers of Europe. Academic Press, Amsterdam; London, pp. 199–245

van Helvoort, P.-J., Griffioen, J., Hartog, N., 2007. Characterization of the reactivity of riverine heterogeneous sediments using a facies-based approach; the Rhine–Meuse delta (The Netherlands). In *Applied Geochemistry* 22, 2735–2757. doi:10.1016/j.apgeochem.2007.06.016

van Vliet, M.T.H., Ludwig, F., Zwolsman, J.J.G., Weedon, G.P., Kabat, P., 2011. Global river temperatures and sensitivity to atmospheric warming and changes in river flow. In *Water Resources Research* 47, 19. doi:10.1029/2010WR009198

Vericat, D., Brasington, J., Wheaton, J., Cowie, M., 2009. Accuracy assessment of aerial photographs acquired using lighter-than-air blimps: low-cost tools for mapping river corridors. In *River Research and Applications* 25, 985–1000. doi:10.1002/rra.1198

Verneaux, J., 1977. Biotypologie de l'écosystème «eau courante». Détermination approchée de l'appartenance typologique. In *CR Acad. Sci.* D, 77–79.

Wald, A., Wolfowitz, J., 1940. On a test whether two samples are from the same population. In *The Annals of Mathematical Statistics* 11, 147–162.

Ward, J.V., 1992. Temperature, in: Aquatic Insect Ecology. New York.

Ward, J.V., 1989. The four-dimensional nature of lotic ecosystems. In *Journal of the North American Benthological Society* 8, 2–8. doi:10.2307/1467397

Ward, J.V., Stanford, J.A., 1995. Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation. In *Regulated Rivers: Research & Management* 11, 105–119. doi:10.1002/rrr.3450110109

Wawrzyniak, V., Piégay, H., Allemand, P., Vaudor, L., Goma, R., Grandjean, P., 2016. Effects of geomorphology and groundwater level on the spatio-temporal variability of riverine cold water patches assessed using thermal infrared (TIR) remote sensing. In *Remote Sensing of Environment* 175, 337–348. doi:10.1016/j.rse.2015.12.050

Wawrzyniak, V., Piégay, H., Allemand, P., Vaudor, L., Grandjean, P., 2013. Prediction of water temperature heterogeneity of braided rivers using very high resolution thermal infrared (TIR) images. In *International Journal of Remote Sensing* 34, 4812–4831. doi:10.1080/01431161.2013.782113

Webb, B.W., Hannah, D.M., Moore, R.D., Brown, L.E., Nobilis, F., 2008. Recent advances in stream and river temperature research. In *Hydrological Processes* 22, 902–918. doi:10.1002/hyp.6994

Westaway, R.M., Lane, S.N., Hicks, D.M., 2003. Remote survey of large-scale braided, gravel-bed rivers using digital photogrammetry and image analysis. In *International Journal of Remote Sensing* 24, 795–815. doi:10.1080/01431160110113070

Westaway, R.M., Lane, S.N., Hicks, D.M., 2000. The development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow, gravel-bed rivers. In *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 209–226.

Westhoff, M.C., Savenije, H.H.G., Luxemburg, W.M., Stelling, G.S., Van de Giesen, N.C., Selker, J.S., Pfister, L., Uhlenbrook, S., 2007. A distributed stream temperature model using high resolution temperature observations. In *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 1469–1480.

Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M., 2012. "Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. In *Geomorphology* 179, 300–314. doi:10.1016/j.geomorph.2012.08.021

Wetter, O., Pfister, C., Weingartner, R., Luterbacher, J., Reist, T., Trösch, J., 2011. The largest floods in the High Rhine basin since 1268 assessed from documentary and instrumental evidence. In *Hydrological Sciences Journal* 56, 733–758. doi:10.1080/02626667.2011.583613

WFD, 2000/60/EC, 2000. Directive 2000/60/ec of the european parliament and of the council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy.

Wheaton, J.M., Brasington, J., Darby, S.E., Sear, D.A., 2009. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. In *Earth Surface Processes and Landforms* , 136–156. doi:10.1002/esp.1886

Wittmann, J., 1859. Chronik der niedrigsten Wasserstände des Rheins vom Jahre 70 ??. Chr. Geb. bis 1858 und Nachrichten über die im Jahre 1857 - 58 im Rheinbette von der Schweiz bis nach Holland zu Tage gekommenen Alterthümer und Merkwürdigkeiten, insbesondere die damals sichtbaren Steinpfeilerreste der ehemaligen festen Brücke bei Mainz und die unfern dieser Stadt im Rheinstrome gemachten Entdeckungen. Seifert, Mainz, 142 p.

Wohl, E., Angermeier, P.L., Bledsoe, B., Kondolf, G.M., MacDonnell, L., Merritt, D.M., Palmer, M.A., Poff, N.L., Tarboton, D., 2005. River restoration. In *Water Resources Research* 41, W10301-1-W10301-12. doi:10.1029/2005WR003985

Woitke, P., Wellmitz, J., Helm, D., Kube, P., Lepom, P., Litheraty, P., 2003. Analysis and assessment of heavy metal pollution in suspended solids and sediments of the river Danube. In *Chemosphere* 51, 633–642. doi:10.1016/S0045-6535(03)00217-0

Wolman, M.G., 1954. A method of sampling coarse river-bed material. In *transactions, American Geophysical union* 35, 951–956.

Ziliani, L., Surian, N., 2012. Evolutionary trajectory of channel morphology and controlling factors in a large gravel-bed river. In *Geomorphology* , 104–117.

Zimmer, D., Kiersch, K., Jandl, G., Meissner, R., Kolomiytsev, N., Leinweber, P., 2010. Status Quo of Soil Contamination with Inorganic and Organic Pollutants of the River Oka Floodplains (Russia). In *Water, Air, & Soil Pollution* 211, 299–312. doi:10.1007/s11270-009-0301-8

Zimmermann A., 2012. Evolution hydro-morphologique de la Réserve Naturelle du Rohrschollen (1828-2010). Implications pour une restauration fonctionnelle, 127 p.

ANNEXES

ANNEXE 1 : TABLEAU DES CONTRIBUTIONS 185

ANNEXE 2 : SUPPLEMENTARY INFORMATION – CHAPITRE 2 187

ANNEXE 3 : PREUSSER ET AL. (2016), GEOCHRONOMETRIA 193

1 Introduction 193
2 Regional context 195
3 Methods 196
4 Results and discussion 198
5 Conclusions 202

ANNEXE 4 : KOEHL ET AL. (SOUS PRESSE), ACTES DE LA JOURNÉE TECHNIQUE ONEMA 205

1 Introduction 206
2 Enjeux et objectifs 206
3 Méthodes, données et matériels 207
3.1 Levé topographique [tachéométrie] 207
3.2 Lasergrammétrie 208
3.3 Photogrammétrie 209
4 Résultats 211
4.1 Suivi morphodynamique 211
4.2 Analyse diachronique 211
4.3 Apports méthodologiques 212
5 Conclusions et perspectives 213
6 Références bibliographiques 213

ANNEXE 5 : CONFERENCE PAPER I.S.RIVERS, LYON 215

1 Introduction 216
2 Methods 218
3 Results - Conclusion 218
4 Bibliography 218

ANNEXE 6 : CONFERENCE PAPER ECOHYDROLOGY'2015, LYON 219

1 Introduction 219
2 Material and methods 221
2.4 Pre- and post-restoration monitoring 221
2.5 Infrared thermographic remote sensing survey 222
3 Results 222

ANNEXE 7 : ABSTRACT IAG 8TH CONFERENCE, PARIS 225

ANNEXE 8 : ABSTRACT WALPHY CONFERENCE, NAMUR (BELGIQUE) 227

ANNEXE 9 : RÉSUMÉ COLLOQUE REVER 5, ROUEN 229

ANNEXE 10 : RÉSUMÉ CONFÉRENCE EFESE, PARIS 231

ANNEXE 11 : ABSTRACT EGU, VIENNE (AUTRICHE) 233

ANNEXE 1 : TABLEAU DES CONTRIBUTIONS

Description des contributions utilisées pour l'élaboration du tableau des contributions présenté à la fin de chaque chapitre-article. Ce tableau est repris de la revue PLOS One. (http://journals.plos.org/plosone/s/authorship).

Contributor Role	Role Definition
Conceptualization	Ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims.
Data Curation	Management activities to annotate (produce metadata), scrub data and maintain research data (including software code, where it is necessary for interpreting the data itself) for initial use and later reuse.
Formal Analysis	Application of statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyze or synthesize study data.
Funding Acquisition	Acquisition of the financial support for the project leading to this publication.
Investigation	Conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data/evidence collection.
Methodology	Development or design of methodology; creation of models
Project Administration	Management and coordination responsibility for the research activity planning and execution.
Resources	Provision of study materials, reagents, materials, patients, laboratory samples, animals, instrumentation, computing resources, or other analysis tools.
Software	Programming, software development; designing computer programs; implementation of the computer code and supporting algorithms; testing of existing code components.
Supervision	Oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team.
Validation	Verification, whether as a part of the activity or separate, of the overall replication/reproducibility of results/experiments and other research outputs.
Visualization	Preparation, creation and/or presentation of the published work, specifically visualization/data presentation.
Writing – Original Draft Preparation	Creation and/or presentation of the published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation).
Writing – Review & Editing	Preparation, creation and/or presentation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision – including pre- or post-publication stages

ANNEXE 2 : SUPPLEMENTARY INFORMATION – CHAPITRE 2

Supplementary information

Long-term river trajectories to enhance restoration efficiency and sustainability on the Upper Rhine: an interdisciplinary study (Rohrschollen Island, France)

D. Eschbach [1], L. Schmitt [1], G. Imfeld [2], J.-H. May [3,4], S. Payraudeau [2], F. Preusser [3], M. Trauerstein [5], G. Skupinski [1]

[1] Laboratoire Image, Ville, Environnement (LIVE UMR 7362), Université de Strasbourg, CNRS, ENGEES, ZAEU LTER, Strasbourg, France
[2] Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg (LHyGeS UMR 7517), Université de Strasbourg, CNRS, ENGEES, Strasbourg, France
[3] Institute of Earth and Environmental Sciences, University of Freiburg, Freiburg, Germany
[4] School of Geography, University of Melbourne, Australia
[5] Institute of Geography, University of Bern, Bern, Switzerland

Correspondence to: David Eschbach (david.eschbach@live-cnrs.unistra.fr)

Table S1. Physico-chemical characteristics of 38 legacy and modern organic chemical pollutants (including 30 pesticides, the hexachlorobenzene and 7 polychlorinated biphenyls)

Name	Famille	Type	[a]Solubility ($mg.L^{-1}$) In water at 20°C ($mg.L^{-1}$)	[a]K_{OC} [$L.kg^{-1}$ of carbon]	[a]DT50 [Days]
(2-Hydroxy)-terbutilazine	Triazine	Herbicide, microbiocide, Algicide	6.6	230.7944162	75.1
(Beta-)endosulfan	organochlorine	Insecticide	0.32	11500	50
2, 4 DDT	Organochlorine	Insecticide	0.006	151000	6200
4, 4 DDT	Organochlorine	Insecticide	0.006	151000	6200
Atrazine	Triazine	Herbicide	35	100	75
Atrazine-Desethyl	Transformation product	Transformation product	-	24b	238b
Azinphos-ethyl	Organophosphate	Insecticide/acaricide	4.5	1500	50
Carbendazime	Benzimidazole	Fungicide	8	264	40
Carbofuran	Carbamate	Insecticide, Nematicide, Acaricide	322	276	29
Chloropyrifos-methyle	Organophosphate	Insecticide/acaricide	2.74	4645	3
Chlorothalonil	chloronitrile	fongicide	0.81	850	22
Chlorpyrifos-ethyl	Organophosphate	Insecticide	1.05	8151	50
Cyproconazole	Triazole	Fungicide	93	363	142
Deltamethrine	Pyrethroid	Insecticide	0.0002	10240000	13
Diazinon	organophosphate	Insecticide, Acaricide, Repellent	60	27.1	9.1
Diuron	Phenylurée	Herbicide	35.6	813	75.5
Endosulfan (alpha)	organochlorine	Insecticide	0.32	11500	50
Endosulfan (sulfate)	organochlorine	Insecticide	0.32	11500	50
Ethyl parathion	Organophosphate	Insecticide/acaricide	12.4	7660	49
Fenitrothion	Organophosphate	Insecticide	19	2000	2.7
HCH, Alpha	Organochlorine	Insecticide	8.52	1270	980
HCH, Béta	Organochlorine	Insecticide	8.52	1270	980
HCH, Delta	Organochlorine	Insecticide	8.52	1270	980
HCH, gamma	Organochlorine	Insecticide	8.52	1270	980

Name	Famille	Type	[a]Solubility ($mg.L^{-1}$) In water at 20°C ($mg.L^{-1}$)	[a]K_{OC} [$L.kg^{-1}$ of carbon]	[a]DT50 [Days]
Isoxaflutole	Oxyacetamide	Herbicide	6.2	145	2
Metazachlore	Chloroacetamide	Herbicide	450	54	8.6
Methyl Parathion	Organophosphate	Insecticide	55	240	12
Ofurace	Phenylamide	Fungicide	146	38	26
Simazine	Triazine	herbicide	5	130	60
Tetraconazole	Triazole	Fungicide	156.6	969	61
HCB	Hexachlorobenzene	Fungicide	0.004c	4168693[c]	985[c]
PCB 101				389045[d]	3650 [d]
PCB 118				288403[d]	2500 [d]
PCB 138				323593[d]	6875 [d]
PCB 153	Polychlorinated biphenyls	Dielectric and coolant fluids	-	354813[d]	6875 [d]
PCB 180				263026[d]	13750 [d]
PCB 28				177827[d]	1083 [d]
PCB 52				208929[d]	3650 [d]

aLEWIS et al., 2016.
bToxnet, https://www.nlm.nih.gov/pubs/factsheets/toxnetfs.html
cEU, http://ec.europa.eu/environment/archives/docum/pdf/bkh_annex_14.pdf
dSinkkonen and Paasivirta, 2000.

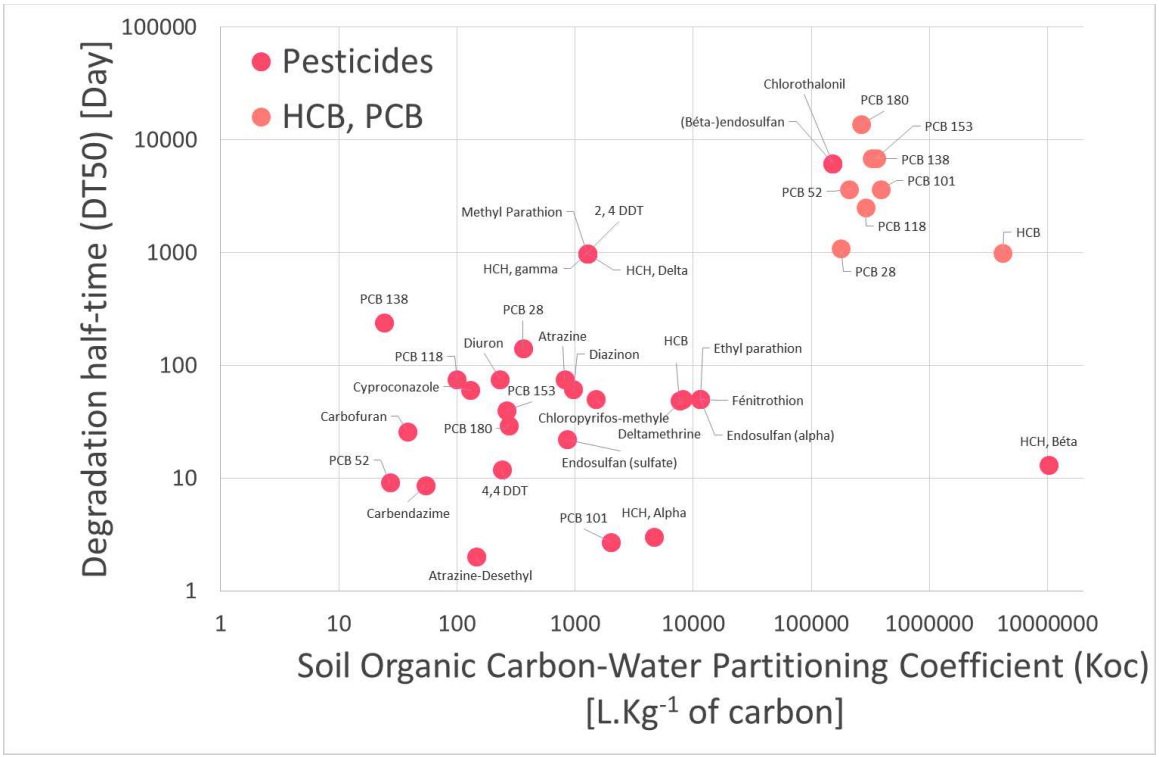


Figure S1: Half-life time (DT50) of 38 legacy and modern organic chemical pollutants (including 30 pesticides, the hexachlorobenzene and 7 polychlorinated biphenyls) as a function of soil organic carbon-water partitioning coefficient (Koc)

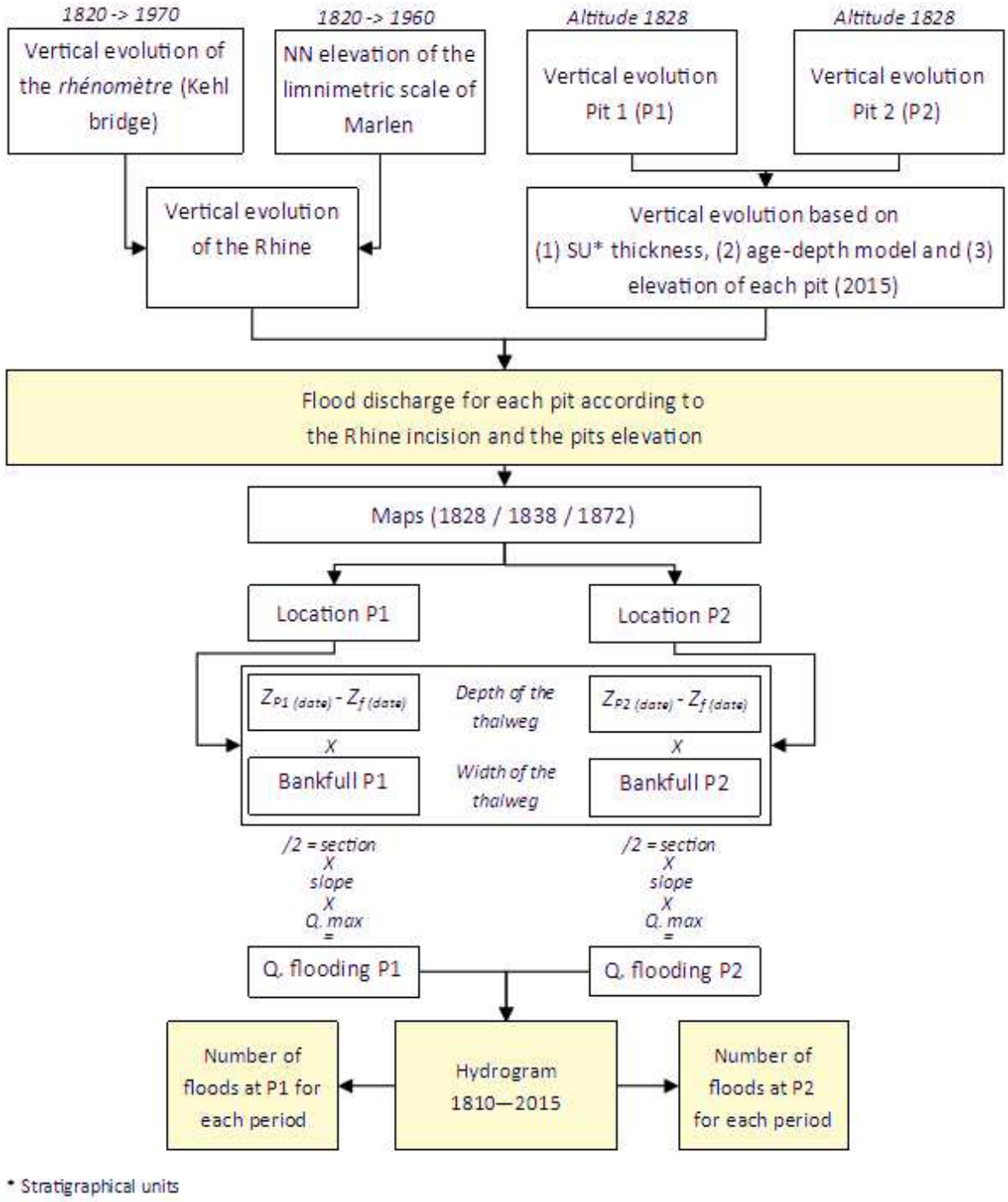


Figure S2: Treatment chain for the discharge estimation of the floods having affected the two pits.

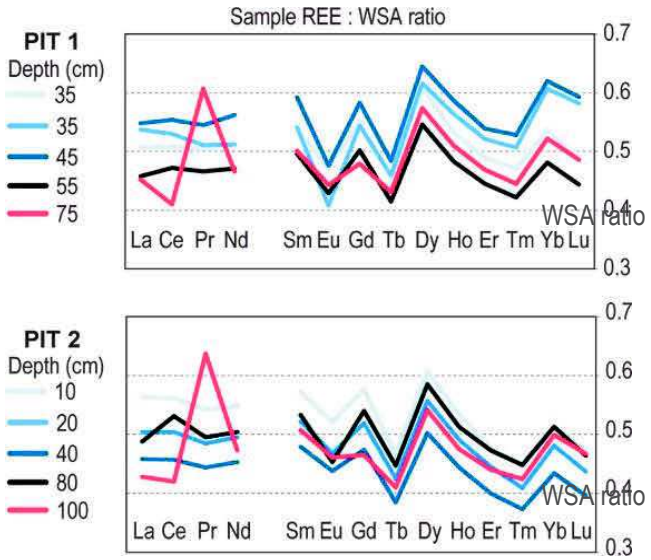


Figure S3: Change of rare-earth elemental composition with depth (based on the World Shale Average (WSA) standard) for pit 1 and pit 2.

Reference

Lewis, K.A., Tzilivakis, J., Warner, D. and Green, A. (2016). An international database for pesticide risk assessments and management. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 22(4): 1050-1064. DOI: 10.1080/10807039.2015.1133242

Sinkkonen S., Paasivirta J., 2000. Degradation half-life times of PCDDs, PCDFs and PCBs for environmental fate modeling. Chemosphere, 40(9–11), 943–949.

ANNEXE 3 : PREUSSER ET AL. (2016), GEOCHRONOMETRIA

DE G OPEN

GEOCHRONOMETRIA 43 (2016): 131–142
DOI 10.1515/geochr-2015-0045

Available online at
http://www.degruyter.com/view/j/geochr

INFRARED STIMULATED LUMINESCENCE DATING OF 19TH CENTURY FLUVIAL DEPOSITS FROM THE UPPER RHINE RIVER

FRANK PREUSSER[1], JAN-HENDRIK MAY[1], DAVID ESCHBACH[2], MAREIKE TRAUERSTEIN[3] and LAURENT SCHMITT[2]

[1]*Institute of Earth and Environmental Sciences, University of Freiburg, Albertstraße 23b, 79104 Freiburg, Germany*
[2]*University of Strasbourg, UMR LIVE 7362 - CNRS-UNISTRA-ENGEES, 67083 Strasbourg, France*
[3]*Institute of Geography, University of Bern, Hallerstrasse 12, 3012 Bern, Switzerland*

Received 19 May 2016 Accepted 15 November 2016

Abstract: Knowledge of the age of fluvial deposits is an important aspect in the understanding of river dynamics, which is pre-requisite for sustainable river management and restoration back to more natural conditions and processes. Presented here is a case study on using feldspar Infrared Stimulated Luminescence (IRSL) to date low-energy fluvial sediments that formed after correction of the Upper Rhine River in the first half of the 19th century. A rigorous testing programme is carried out to characterise the IRSL properties of the samples, including thermal transfer, dose recovery and fading. All samples reveal complex distributions of equivalent dose, implying the presence of differential bleaching in the samples. It is shown that multi-grain aliquots overestimate the known-age by up-to 200 years, i.e. apparent IRSL ages are twice as old as the true age of the sediment. The use of single grains results in ages that are in excellent agreement with the expected age, therefore the age overestimation in multi-grain aliquot measurements is likely explained by signal averaging effects. While the application of single grains appears mandatory for dating young low-energy fluvial deposits, the small absolute offset associated with the multi-grain approach might be acceptable when dating sediments of such type that are older than a few 1000 years.

Keywords: luminescence (IRSL) dating, fluvial sediments, historic, feldspar, Rhine.

1. INTRODUCTION

Understanding centennial to millennial scale morphodynamics of fluvial systems is considered important for sustainable management and restoration of rivers (Brierley and Fryirs, 2005; David *et al.*, 2016; Delile *et al.*, 2016). To place local observations within the broader context of the environmental and human history, it is necessary to determine the timing of fluvial dynamics. This is commonly done by analysing aerial photographs, documents, and old maps (Bristow, 1987; Hohensinner *et al.*, 2004; Arnaud *et al.*, 2015; David *et al.*, 2016), but these are not pervasively available on all temporal and spatial scales. Hence, it is often necessary to date fluvial deposits and use this information for the reconstruction of past river dynamics.

The most common method in this context is radiocarbon dating, but it suffers from two major problems. First, most organic material in fluvial environments is reworked and radiocarbon dates may hence overestimate the true age of fluvial deposition (e.g., Howard *et al.*, 2009; Delile *et al.*, 2016). While this problem can be reduced by sampling aquatic plant remains, identification of such material is not always straightforward. Second, there are several plateaus in the radiocarbon calibration curve of the last

Corresponding author: F. Preusser
e-mail: frank.preusser@geologie.uni-freiburg.de

ISSN 1897-1695 (online), 1733-8387 (print)
© 2016 F. Preusser *et al.* This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 3.0 License.

few centuries that will produce very large uncertainties. For example, a radiocarbon age of 120 ± 2 ^{14}C yr corresponds to a calendric age of 149 ± 79 cal. BP (AD 1722–1880, Reimer *et al.*, 2009), which may be too imprecise to sufficiently address certain scientific questions. Alternatively, ^{210}Pb and ^{137}Cs geochronology can be used but only in low-energy depositional environments and for very young deposits (e.g., Jweda and Baskaran, 2011; Mabit *et al.*, 2014).

Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating utilises a light-sensitive latent signal in quartz and feldspar grains induced by ionising radiation, mainly originating from radioactive decay of K, Th and U and their daughter isotopes (cf. Preusser *et al.*, 2008). During sediment transport the signal is depleted (bleached) by daylight and starts to accumulate after burial, when the grains are sealed from light exposure. Madsen and Murray (2009) and Pietsch (2009) summarise the specific methodological aspects related to the dating of young deposits (de- fined here as ages < 1000 years), and show that OSL can produce reliable ages as young as a few years. For exam- ple, Madsen *et al.* (2005) dated sand-sized quartz extract- ed from estuarine sediments of the Danish Wadden Sea and found excellent agreement between OSL and ^{210}Pb dating in the younger part of their core (< 60 years). However, there are several problems associated with OSL dating of young sediments, in particular with the determi- nation of Equivalent Dose (D_e). The latter represents the radiation dose absorbed by the grains since the event to be dated, as reflected by the strength of the natural OSL signal. In the laboratory, D_e is determined by comparing natural OSL with OSL signals induced through laborato- ry radiation. OSL ages are calculated as ratio of D_e and dose rate, i.e. the amount energy emitted by radioactive elements through ionising radiation per year, and reflect the time of sediment deposition, if the OSL signal was completely bleached prior to deposition.

For young sediments, little signal will have accumulated as grains have been exposed to ionising radiation for only a short periods of time, which can be problematic with regard to the signal-to-noise ratio. In particular, this applies to quartz and appears to be related to a lack of dosing and exposure cycles that would cause a sensitisation of the electron traps in quartz (Pietsch *et al.*, 2008; Sawakuchi *et al.*, 2011). Thus, while quartz is clearly the preferred mineral for the dating of young sediments, there are several settings where its application is not feasible because in some regions quartz does not exhibit any detectable OSL signal at all, corresponding to immature dosimetric properties of the quartz (e.g. Preusser *et al.*, 2006; Jeong and Choi, 2012). In such cases, Infrared Stimulated Luminescence (IRSL) from feldspar might be the only option, but this signal can be unstable with time. This anomalous fading of the feldspar signal will cause underestimation of D_e, hence of the sedimentation age (Wintle, 1973; Spooner 1994). However, it appears that the degree of fading depends on mineral genesis, with plutonic feldspars fading less than those of volcanic origin (Visocekas and Guerin, 2006). It has been presumed that anomalous fading results from tunnelling of charge that follows strict physical laws, i.e. the signal decays logarithmically (Visocekas, 1985). Following these assumptions, Huntely and Lamothe (2001) developed a procedure to correct for fading. First, storage experiments are carried out to monitor the loss of signal with time. The results of such experiments are expressed by *g*-values, where *g* is the signal loss in percent per decade, a decade being a factor of 10 in time since irradi- ation (Huntely and Lamothe, 2001). The *g*-value is then used to correct for the signal loss since burial. However, several studies report that the signal loss observed in experiments does not represent the fading of the signal over geological periods (e.g. Wallinga *et al.*, 2007; Lowick *et al.*, 2012; Preusser *et al.*, 2014). Guérin and Visocekas (2015) discuss that anomalous fading likely results from at least two different mechanisms, one of which is temperature dependent, and the tunneling - a pure quantum mechanical athermal process. The implica- tion is that the fading correction proposed by Huntely and Lamothe (2001) might not be accurate as temperature under laboratory conditions might differ from that in nature. Hence, fading correction may tend to either over- or underestimate the true age of a sample, depending on the nature and climate history of a sampling context.

Thermal transfer and recuperation, both representing a transfer of electrons from thermally shallow, light-insensitive traps to deeper, light-sensitive traps, occur when grains are preheated during the measurement pro- cedure to remove unstable components of the OSL signal that are induced by laboratory irradiation (Aitken and Smith, 1988; Rhodes and Bailey, 1997). Following Win- tle and Murray (2006), 'thermal transfer' is used here only for the transfer of charge during the first preheating of the sample, i.e. it effects only the natural signal. As thermally transferred OSL is not present in the build-up of the signal in nature, i.e. it is a laboratory artefact, this phenomenon will lead to overestimation of the real OSL deposition age. The effect of thermal transfer can be monitored by removing the light sensitive signal by light exposure and measuring the signal induced by preheat (thermal transfer test). The term 'recuperation' describes charge transfer during preheat following laboratory irra- diation. It is monitored by including a zero dose step in the measurement procedure (Murray and Wintle, 2000).

Overestimation of ages will also occur when the OSL signal was incompletely reset at the time of deposition, as the signal acquired since the event to be dated will add on top of the residual signal. However, as each grain has its own daylight exposure history, the residual level in grains will differ in the presence of incomplete resetting; grains will be differentially bleached (Duller, 1991). Hence, measuring several dozen to a few hundred individual grains and investigating the spread will provide infor- mation on the degree of bleaching at the time of deposi-

tion (Li, 1994; Murray *et al.*, 1995; Olley *et al.*, 1998). Differential bleaching will be indicated by a positive skew and a broad spread of the data. The spread of data is expressed by the overdispersion value that describes the variability of the data beyond the one expected from measurement uncertainties (cf. Galbraith and Roberst, 2012). In this context it has to be noted that usually the spread of single grain values is not just the result of incomplete bleaching, but in particular dosimetric effects (Lepper *et al.*, 2000; Vandenberghe *et al.*, 2003). As a consequence, special statistic approaches such as the Minimum Age Model (MAM) of Galbraith *et al.* (1999) have been developed that consider additional sources of variability when extracting a mean D_e value that represents the well bleached population of grains. Application of the MAM requires one input value (σ_b) that represents the expected overdispersion from all other effects except partial bleaching. As this value is not known, it can only be estimated by comparison with similar sediments that are not affected by incomplete bleaching.

Ideally, luminescence dating would be carried out using single grain measurements as this will provide the full information about individual grain history. However, as this approach is quite laborious, D_e measurements are often made on aliquots consisting of several dozen grains. Here, it has to be considered that usually only few percent of the grains (in particular for quartz) exhibit OSL signals (e.g. Duller, 2004). Hence, using aliquots with not more than 100 grains will almost mimic single grain measure- ments. However, in particular for feldspar separates a much larger number of grains may exhibit luminescence signals. In such cases multi-grain approaches can cause averaging of the signal originating from individual grains and mask incomplete bleaching at least to some extent (Wallinga, 2002).

Several previous studies have shown that young aeolian and coastal sediments are suitable for the dating of young deposits using quartz, as partial bleaching has little effect. There are quite a few studies that have used quartz to date young fluvial deposits (e.g. Murray *et al.*, 1995; Olley *et al.*, 2004), and it has been shown that incomplete bleaching needs to be considered in this context (Pietsch, 2009). For example, sediments filling up a harbour basin along the River Danube east of Vienna, which wooden structure has been dendrochronologically dated to the middle of the 16th century, revealed three consistent OSL ages using MAM of around 500 years (Fiebig *et al.*, 2009). However, it is also important to note that, with a few exceptions (e.g. Porat *et al.*, 2009), almost all previ- ous studies on young fluvial sediments used quartz as it is considered of being less affected by incomplete bleaching than feldspar.

Presented here is a case study testing the potential of feldspar IRSL to date very young fluvial deposits from a moderate/low-energy braiding/anastomosing river system from a temperate environmental setting. We took five samples from a sediment sequence that deposited in a former main channel of the River Rhine near Strasbourg, and which has been disconnected upstream by engineering works in the early part of the 19th century, as documented by a large set of historical maps. A series of performance tests to characterise the signal, and a compari- son of multi-grain (small aliquot) and single grain IRSL dating was carried out. Besides the importance for future projects on river systems in Western Europe, the results presented are considered relevant for similar studies in others parts of the planet, where quartz shows non- suitable OSL signals.

2. REGIONAL CONTEXT

The Upper Rhine is one of the most altered fluvial systems in Europe (**Fig. 1a**), with important engineering works along about 200 km and 90% of its floodplain converted into arable and industrial areas (Cioc, 2009; Herget *et al.*, 2005). While the Upper Rhine river management had originally focused mainly on navigation, hydropower generation and flood control, several restoration projects over the past three decades have aimed at improving biodiversity and ecological functioning, groundwater protection, and development of recreational areas (Schmitt *et al.*, 2009). The study area, the 'Rohrschollen' artificial island, is located 8 km SE of the city of Strasbourg and bounded by the Rhine canal (West) and the old Rhine (East) (**Fig. 1b**). It results from correction and canalization works that have been implemented in this area from the beginning of the 19th century until AD 1970 (**Fig. 1b**). A restoration project aims at reconnecting the 'Bauerngrundwasser' to the River Rhine through a floodgate and a new channel (**Fig. 1c**). The studied excavation site is located on the right bank of this channel. Sedimentological investigations and historical research are currently carried out to improve the understanding of the temporal trajectory of the area, better explain its modern morpho-sedimentary characteristics, and assess the potential benefits of the restoration in the future.

The study of old maps reveals that the upstream reach of the main watercourse of the island (the 'Bauerngrundwasser') was the thalweg of the River Rhine in AD 1828 (**Fig. 1c**). The excavation pit sampled for this study was located on a median bar of the Rhine braiding system at this date. During the correction works between AD 1828 and 1872, the River Rhine was forced artificially into an easterly direction. This caused a drastic decrease of flood energy and induced an important channel narrowing and disappearance of bars by vegetation overgrowth, as is shown on the maps of AD 1838, 1872 and 1949 (**Fig. 1c**). Prior to the correction works, between AD 1778 and 1828, the Rhine thalweg naturally and progressively moved from east to west, and this movement would have eroded any older fine sediments at the excavation site. Assuming that the main channel of the River Rhine passed this position sometime between AD 1790 and

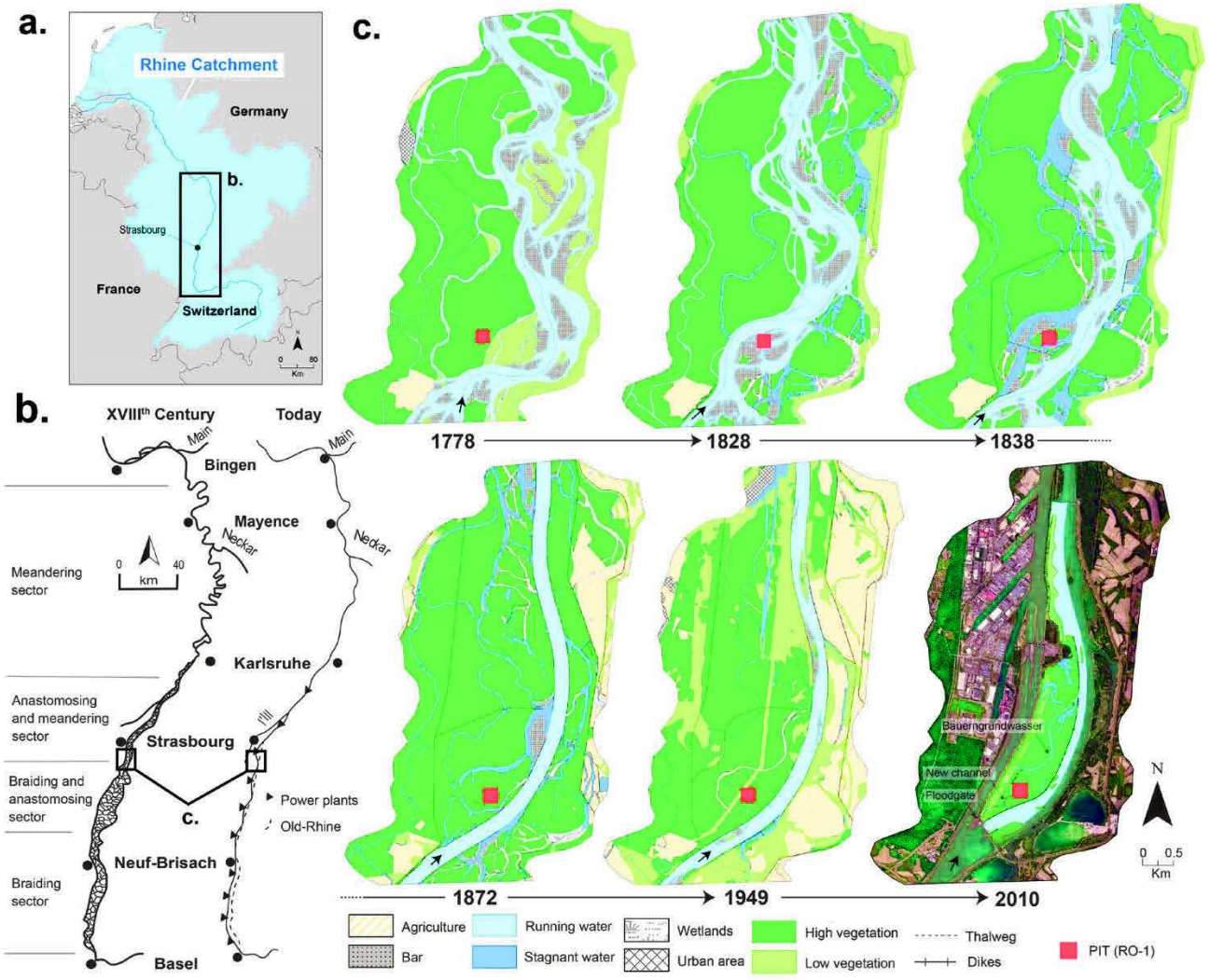


Fig. 1. *a.) Overview of the River Rhine catchment with the location of Strasbourg. b.) Comparison of the Upper Rhine system before and after river engineering works in the 19th and 20th century. c.) Historic development of the study area from AD 1778 until 2010.*

1810 gives the maximum age of the sediments investigated here (225–205 years).

3. METHODS

Samples have been taken by hammering opaque tubes into the freshly cleaned surface of the exposure in a small trench (**Fig. 2**). Sediment from the inner part of the tubes was retrieved in the laboratory under subdued red-light conditions. The fraction 150–200 µm was extracted by wet sieving, and for one of the originally five samples (RO1-3) too little material was gained to allow for further preparation. The sample material was subsequently treated by 15% HCl, 30% H_2O_2 and Na-oxalate (in combination with ultrasonic treatment) to remove carbonates and organic matter as well as to disperse clay particles. Initial tests revealed the absence of OSL signals in quartz and we hence focused on K-feldspar that was separated using heavy liquid (sodium polytungstate, δ = 2.58 g cm^{-3}). Dried grains were either fixed on stainless steel discs by a 2 mm spot of silicon oil (multi-grain measurements) or transferred to special Risø single grain discs.

Multi-grain measurements were performed on a *Lexsyg smart* device (Richter *et al.*, 2015), whereas single grains were analysed on a Risø DA-20 reader with a dual laser single grain attachment (Bøtter-Jensen *et al.*, 2003). For both devices similar detection filter sets have been used (*Lexsyg smart*: Schott BG39, AHF BrightLine HC 414/46; Risø DA-20: Schott BG39, L.O.T.-Oriel D410/30 nm) and stimulation was done at 50°C. Performance tests (thermal transfer, dose recovery, and fading) were carried out for multi-grains and single grains (except thermal transfer for the latter). To minimise the effect of thermal transfer of charge, preheat temperatures of 150°C, 170°C

and 190°C were tested, with a duration of 10 s each. Prior to the tests, multi-grain aliquots were exposed for 300 s to the light of the in-build blue LEDs (458 nm peak emission, 100 mW cm^{-2}) followed by IR stimulation (850 nm peak emission, 180 mW cm^{-2}) to confirm the absence of IRSL signals. For single grains, the signal was removed during a 24 h exposure to a UV lamp.

Storage tests to monitor IRSL signal decay due to fading have been carried out at room temperature (*c.* 20°C) on multi-grain aliquots and single grains that were previously used in the dose recovery test and applying a dose of 39 Gy. This much larger dose than in the natural was chosen to improve reproducibility, as the single grains signal are not very bright. Immediate measurements of L_x/T_x (*ca.* 250 s between half-time irradiation and beginning of stimulation) and two delayed measurements (1150 s, 10,150 s) were carried out and repeated three times. Preheat was applied immediately after the irradiation, i.e. before the storage. From this data, *g*-values have been calculated following Huntley and Lamothe (2001).

Measurement of D_e was done using the Single Aliquot Regenerative Dose (SAR) protocol (Murray and Wintle, 2000) modified for feldspar following Preusser (2003) and Blair *et al.* (2005). For multi-grains this included preheating for 10 s prior to all IRSL measurements (see below for comment on temperature), followed by 100 s IR LED stimulation (850 nm peak emission, 180 mW cm^{-2}). The IRSL signal 0–10 s was used for integration by subtracting the signal 10–30 s as background. IRSL of single grains was stimulated for 5 s using a 140 mW 830 nm laser (90% laser power) with a RG-780 filter to attenuate the second harmonic frequency (415 nm). Single grain signals were integrated over the initial 0.2 s, and the background signal was averaged over the last 0.5 s. About 50 multi-grain discs have been measured for samples RO1-2, RO1-5 and RO1-6, but for RO1-4 the amount of material available allowed only for 24 repli- cate measurements. For single grains, seven discs each containing 100 grains per sample have been prepared. We abstain from applying post-IR IRSL methodology as residual doses of up to several Gy have been observed in bleaching experiments and in modern analogues (Trauerstein *et al.*, 2014; Smedley *et al.*, 2015). According to Reimann *et al.* (2012), residual dose gives rise to an offset of 0.6 Gy in their coastal samples, which is a about twice the value expected for the samples under consideration here. Furthermore, partial bleaching will be likely more problematic in fluvial environments.

Measurement results have been analysed using Analyst 4.31.9 (Duller, 2016) and were further handled in home-made Excel sheets. All multi-grain discs passed the usual rejection criteria (recycling ratios within 10% of unity, 10% test dose error, test dose signal min. three times above background; cf. Wintle and Murray, 2006). Grains with a signal >3 sigma above background, a test dose error <15% and a recycling ratio between 0.90 and 1.10 (considering uncertainties) were selected for D_e determination. Further grains were rejected, if the recuperation expressed in percentage of the regenerative sig- nal was >10%, or if the natural signal was above dose response saturation level. Of all measured single grains between 7.3 and 11.2% passed all applied rejection crite- ria and were used for D_e calculation. For all samples, mean D_e was calculated using the Central Age Model (CAM) and the MAM-3 (Galbraith *et al.*, 1999), as the observed overdispersion and shape of the distributions strongly imply the presence of partial bleaching (see below). MAM-3 calculations were carried out using the R-Luminescence package (Kreutzer *et al.*, 2012; Fuchs *et al.*, 2015), and the effect of varying the σ_b value is dis- cussed below.

The concentration of dose rate relevant elements (K, Th, U) was measured using high-resolution gamma spectrometry, similar to the procedures described by Preusser and Kasper (2001). Using the approach of Preusser and Degering (2007), we observed no evidence for radioac- tive disequilibrium in the Uranium decay chain. Age calculations were carried out using ADELE 2015 soft- ware using present day geographic position and burial depth, assuming an a-value of 0.07 ± 0.02, and estimating sediment moisture based on sediment composition and hydrological context (allowing for large uncertainties). An internal K-content of 12.5 ± 1.0% was used based on values reported by Gaar *et al.* (2014) for northern Swit- zerland. Dose rate calculation was done using a three- layer model to account for inhomogeneity between the different sedimentary units (**Table 1**). The differences to using a classical one-layer model are, however, minimal (max. 2% for sample RO1-6).

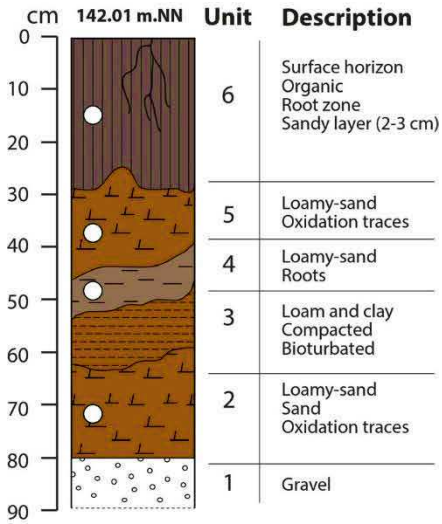


Fig. 2. *Schematic sketch of the sampled exposure.*

Table 1. *Summary data of luminescence dating for both multiple grain (MG) and single grain (SG) approaches with sampling depth below surface, the concentration of dose rate relevant elements (K, Th, U), assumed average water content (W) during burial, dose rate (D), mean D_e values calculated for the Central Age Model (CAM) and Minimum Age Model (MAM), using σ_b values of 0.10 (MG) and 0.20 (SG), the fading corrected MAM D_e, the resulting IRSL ages for MAM (before AD 2015), and the age transferred into AD time scale.*

Sample	Depth (cm)	K (%)	Th (ppm)	U (ppm)	W (%)	D (Gy ka^{-1})	n	od.	D_e CAM (Gy)	D_e MAM (Gy)	Age MAM (a)	Age MAM corr. (a)	Age MAM (AD)	Age MAM corr. (AD)
RO1-6 MG	15	1.51 ± 0.02	5.65 ± 0.23	1.19 ± 0.02	10 ± 5	2.62 ± 0.10	48	0.79	0.99 ± 0.11	0.54 ± 0.04	206 ± 17	244 ± 21	1792-1826	1750-1792
RO1-6 SC	15	1.51 ± 0.02	5.65 ± 0.23	1.19 ± 0.02	10 ± 5	2.62 ± 0.10	48	0.62	0.85 ± 0.08	0.37 ± 0.05	141 ± 20	166 ± 24	1854-1894	1825-1873
RO1-5 MC	39	1.07 ± 0.02	4.34 ± 0.19	1.24 ± 0.02	20 ± 5	2.07 ± 0.09	47	0.62	0.91 ± 0.08	0.62 ± 0.03	300 ± 20	356 ± 33	1695-1735	1626-1692
RO1-5 SC	39	1.07 ± 0.02	4.34 ± 0.19	1.24 ± 0.02	20 ± 5	2.07 ± 0.09	29	0.78	0.83 ± 0.12	0.32 ± 0.09	154 ± 44	182 ± 50	1817-1900	1783-1883
RO1-4 MC	48	1.10 ± 0.02	3.90 ± 0.10	1.02 ± 0.03	20 ± 5	2.02 ± 0.09	24	0.31	0.87 ± 0.06	0.67 ± 0.05	332 ± 29	395 ± 35	1654-1712	1585-1655
RO1-4 SC	48	1.10 ± 0.02	3.90 ± 0.10	1.02 ± 0.03	20 ± 5	2.02 ± 0.09	52	0.55	0.83 ± 0.07	0.41 ± 0.05	203 ± 27	239 ± 30	1785-1839	1746-1806
RO1-3	55	1.04 ± 0.02	5.80 ± 0.24	1.66 ± 0.05	20 ± 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RO1-2 MC	72	1.08 ± 0.01	3.96 ± 0.13	1.19 ± 0.03	20 ± 5	2.06 ± 0.09	50	0.20	0.78 ± 0.02	0.69 ± 0.04	334 ± 31	399 ± 30	1650-1712	1586-1646
RO1-2 SG	72	1.08 ± 0.01	3.96 ± 0.13	1.19 ± 0.03	20 ± 5	2.06 ± 0.09	67	0.70	0.98 ± 0.09	0.40 ± 0.06	194 ± 30	230 ± 36	1791-1851	1749-1821

4. RESULTS AND DISCUSSION

IRSL properties

The feldspar shows a moderate response to IR stimulation in the multi-grain approach with close to linear growth of dose response curves (**Fig. 3**), whereas the single grain IRSL response is quite low and a little noisy (**Fig. 4**). Thermal transfer when applying the two lower preheat temperatures is close to zero but increases signif- icantly when using a preheat of 190°C. Recuperation is 7.40 ± 0.18% (of the applied 'recovery' dose signal) when preheating at 150°C but > 9% for the two higher preheat temperatures (**Fig. 5**). Hence, we used preheating at 150°C for 10 s in all following experiments and for D_e measurements, for both multi- and single grains. For the latter, recuperation is significantly higher but this is explained by the much lower signal-to-noise ratio.

The multi-grain dose recovery experiment reveals an excellent reproducibility of the applied dose with a re-

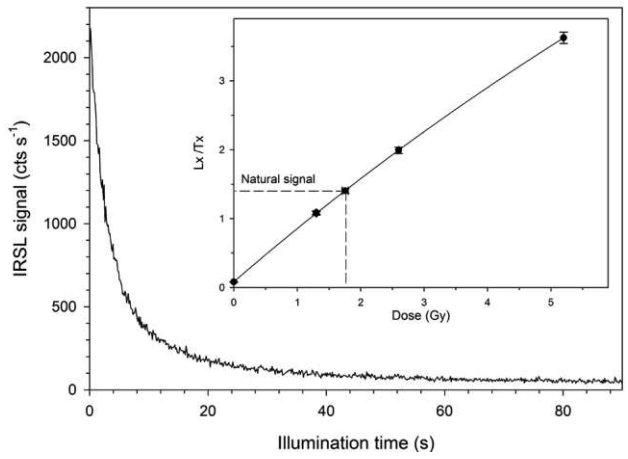


Fig. 3. *Example of IRSL decay for a multi-grain disc and a dose response curve of sample RO1-4 (inset).*

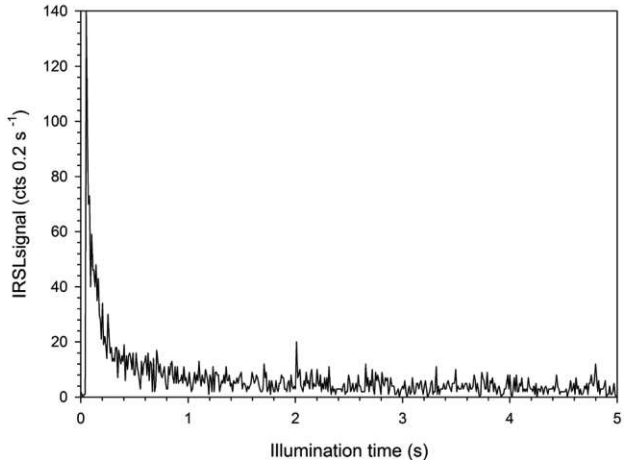


Fig. 4. *Representative single grain IRSL decay of sample RO1-4.*

covery ratio of 1.03 and a relative standard deviation of 2.3%, which corresponds to the average uncertainties of individual measurements (**Fig. 6**). The overdispersion in the dose recovery experiment was 2.1 ± 0.1% and is reduced to zero when assuming an instrumental uncertainty of 1.4%. This instrumental uncertainty was used when analysing multi-grain D_e measurements. The single grain dose recovery experiment reveals a dose recovery ratio of 1.07 ± 0.01 with an overdispersion of 7%, if no instrument error is assumed (**Fig. 6**). Overdisperison drops to 4.9% if an instrumental error of 2.5% is used (Trauerstein *et al.* 2012).

The light-sum plots (**Fig. 7**) show that in three of the samples (RO1-2, 4, 6) about 10% of all grains are responsible for 80% of the light emitted. The remaining 20% of the signal origin from *ca.* 50% of the grains, whereas *ca.* 40% emit very little to no IRSL. For sample RO1-5, 10% of the grains emit close to 95% of the signal, with 80% of the grains being dim. However, in contrast to Reinmann *et al.* (2012) we find no relationship between brightness and D_e.

The storage tests carried out on multi-grain samples to estimate the fading rate (**Fig. 8**) gave *g*-values between 1.6 ± 0.4 and 2.4 ± 0.3%/decade, overlapping within uncertainties. This represents an average *g*-value of 2.2 ± 0.2%/decade (standard deviation). For single-grains, fading rates range from –5.82 ± 3.40 und 18.43 ± 5.12%/decade (**Fig. 9**). These individual fading

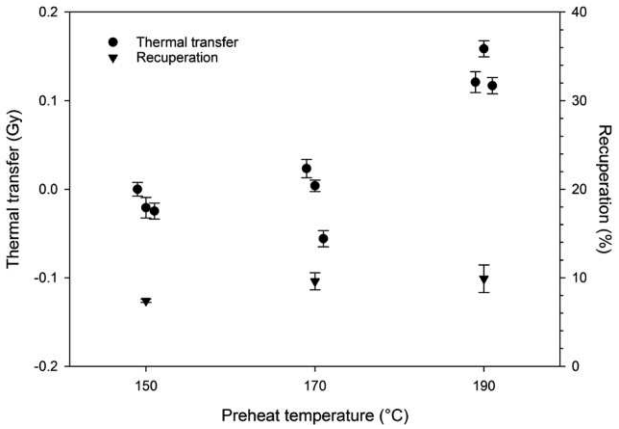


Fig. 5. *Results of thermal transfer tests experiments reveal a slight increase of D_e with increasing preheat temperature. Same applies for recuperation as monitored in the dose recovery experiments.*

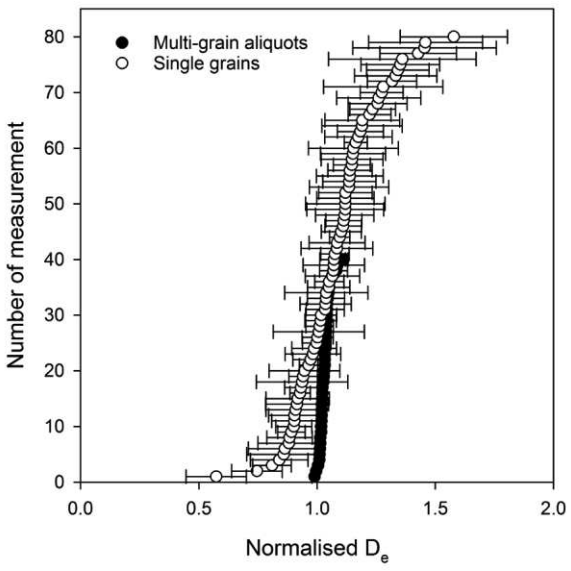


Fig. 6. *Results of the dose recovery tests for both multi-grain aliquots and single grains.*

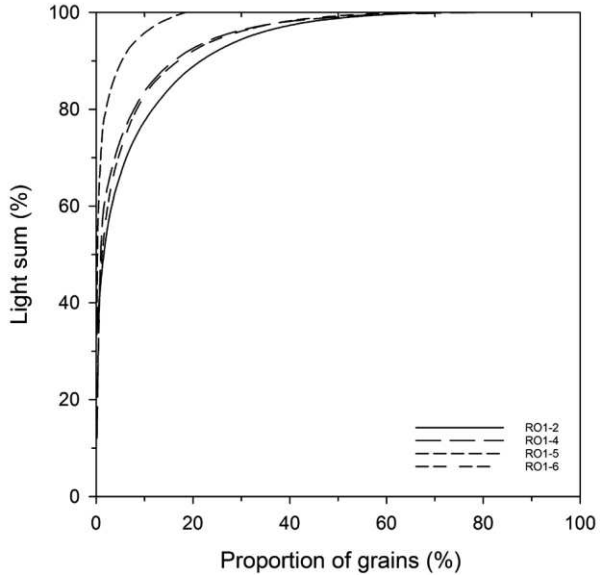


Fig. 7. *Light sum curve of single grain data of four samples.*

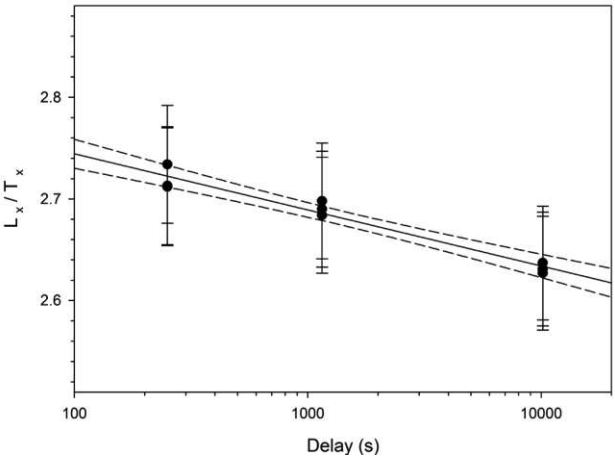


Fig. 8. *This example of a fading test displays a g-value of 1.6 ± 0.4 %/decade.*

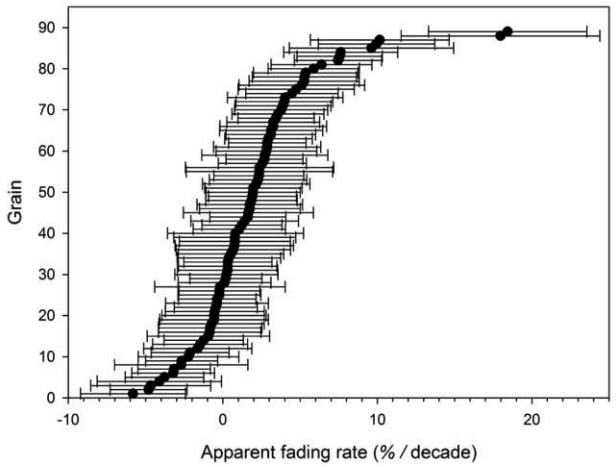


Fig. 9. *Result of the single grain fading test.*

rates represent a mean of 1.9%/decade, with a large standard deviation of 4.0 and a standard error of 0.4, overlapping within uncertainties with the values determined for multi-grains. However, negative fading rates are not reasonable considering these describe loss of signal and as there are no obvious mechanisms that could explain the apparent significant signal gain. Of the 89 fading rates determined for single grains, 27 show a negative value (30%). This raises the question if it is necessary to apply individual fading rates for single grains. Trauerstein *et al*. (2012) suggest to determine individual fading rates, as their average single grain g-values deviate systematically from single aliquot ones. This observation cannot be confirmed in this study where the average single grain and multi-grain aliquot g-values agree well within errors. Furthermore, Rhodes (2015) highlights that measurements of each grain after a delay to assess fading are at the limit of being able to assess whether laboratory fading is shared between grains, or whether it is different for each grain. Applying a Chi and Arnold (2006) and Arnold *et al*. (2007), this is inter- preted as evidence for differential bleaching of IRSL prior to deposition. The spread of multi-grain D_e values is generally smaller than for the single grain approach, and for all samples the lowest values are found for the single grain measurements. The population of lowest D_e values of single grains is up to 50% compared to that of the multi-grains in all samples. In this context it has to be considered that the multi-grain aliquots contain *ca.* 100 grains of which *ca.* 10% are rather bright (**Fig. 7**). Hence, it has to be expected that most of the signal from the multi-grain aliquots origins from a minimum of *ca.* 10 grains, some of which may have inherited a residual sig- nal. Wallinga (2002) has shown through computer simu- lations that this will result in averaging effects in the multi-grain analyses that to some extent mask the differ- ential bleaching.

The above mentioned observations call for the application of the MAM to extract mean D_e estimate from the grains/aliquots presenting the well-bleached fraction. As there is little experience with samples from the region, a sensitivity test was carried out to investigate the effect of the input value σ_b (**Fig. 11**). The MAM was computed using σ_b values from 0.02 to 0.30, at 0.02 increments. As a matter of fact, the lowest overdispersion reported in the literature for single feldspar grains in natural samples is around 0.15 (Neudorf *et al.*, 2015; Rhodes, 2015) and lower σ_b values are considered to be likely inappropriate input values for the MAM (presented here only for com- pleteness). On the other hand, Neudorf *et al.* (2015) in- terpret overdispersion >0.25 to result from partial bleach- ing, consistent with the value of 0.27 reported by Gaar *et al.* (2014) for a well-bleached sample. Hence, we use a value of 0.20 as representative of what is reported in the literature as input for the following MAM calculations. Using the extrema of what appears realistic according to literature (0.15, 0.25) would lead to *ca.* 8% higher or lower values (*ca.* ten years difference in age for the sam- ples under consideration). For analyses of the multi-grain squared (χ^2) test to the present data set gives a χ^2 value of data set, we used a σ_b of 0.10 following the experiments 121 (for n= 89); this would rather imply the presence of a non-Gaussian distribution. However, removing the two highest values (*g ca.* 18%/decade) results in χ^2 = 100, hence a value quite close to χ^2 = n-1, which would indi- cate a Gaussian distribution. As a consequence, we can- not exclude that the observed spread of individual single grain fading rates is presenting a common mean value that is representative for all grains. Hence, we decided to apply the fading rate determined for multi-grains also to the single grains.

D_e distributions

For all four samples we found complex D_e distribu- tions for both single grain and multi-grain aliquots that show a positive skew together with large overdispersion reaching up to 0.79 (**Fig. 10**, **Table 1**). Following Bailey and modelling of Cunningham *et al.* (2011).

IRSL ages

IRSL ages have been calculated both without and in-cluding fading correction; the difference is about 18% (**Table 1**, **Fig. 12**). More obvious is the difference be- tween single grain and multi-grain IRSL ages, the latter being up to twice as old as the first. The multi-grain IRSL ages are between 100–200 years older than the expected age, and this is interpreted to result from averaging ef- fects and masking of partial bleaching as explained above. The single grain IRSL ages, both uncorrected and corrected for fading, fit with the deposition history de- duced from historic maps (**Fig. 12**). According to this, deposition in the lower part of the profile took place around AD 1800, probably just after the thalweg of River

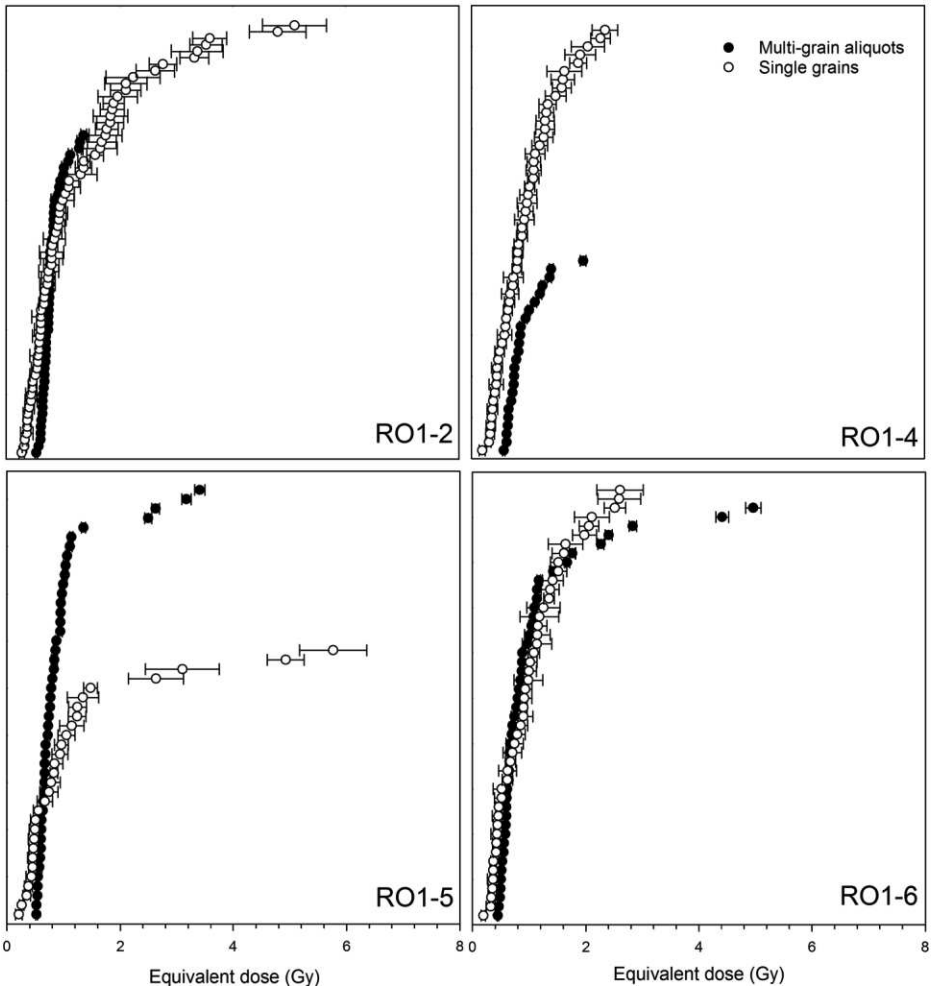


Fig. 10. *Dose distributions plots of multi-grain aliquot and single measurements of all samples investigated. Three D_e values of 19.1 ± 1.6 Gy (RO1-5 MG), 11.9 ± 0.4 Gy and 17.2 ± 0.8 Gy (RO1-6 MG) are not shown in the plot to improve presentation.*

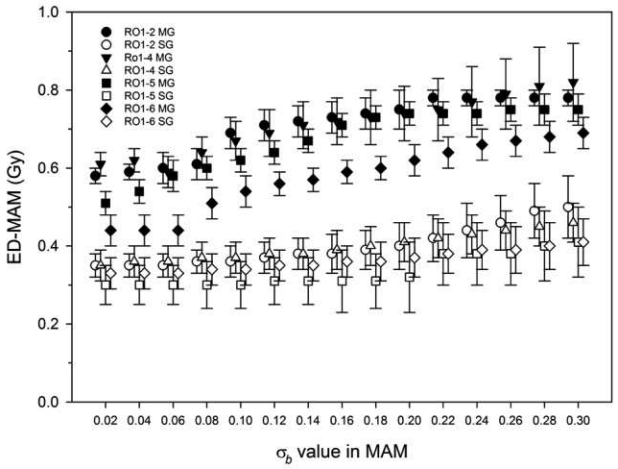


Fig. 11. *Change of D_e when assuming different overdispersion values in the Minimum Age Model of Galbraith et al. (1999).*

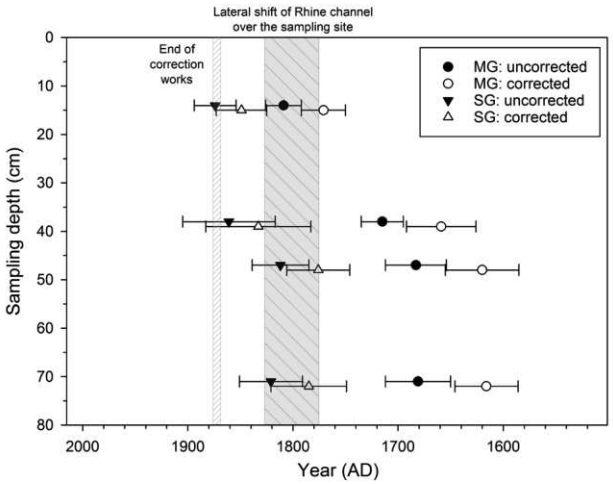


Fig. 12. *Plot of IRSL ages for different approaches versus the timeline reconstructed from historic records.*

Rhine had moved over the area. The upper two samples are by trend slightly younger, with sedimentation ending around AD 1870. This is consistent with dense floodplain vegetation indicated on the historic map of AD 1872 (**Fig. 1**).

5. CONCLUSIONS

This study highlights that feldspar IRSL can be used successfully to date very young fluvial sediments, despite the several challenges related to this issue. As averaging effects in multi-grain aliquots mask part of the differential bleaching in the samples, this required application of the single grain approach. The resultant ages are in excellent agreement with the expected deposition history as inferred from the study of old maps. As the offset of the multi-grain aliquot IRSL ages is only 100–200 years, this method may well be suitable for samples being older than a few millennia. Hence, the approach is considered as an alternative in settings where quartz exhibits poor OSL properties. Nevertheless, it is necessary to investigate the effect of thermal transfer, partial bleaching and fading in the samples in more detail, as these have the potential to substantially interfere with accurate calculation of sediment deposition ages.

ACKNOWLEDGEMENTS

Claire Rambeau and Sylvain Payraudeau are thanked for field assistance. We thank David Muessle and Jen- nifer Wolff for careful preparation of the luminescence samples and Martine Trautmann (EOST - UMS 830) for the sedimentological analysis. Gamma spectrometric measurements were carried out by Sönke Szidat, University of Bern. We kindly acknowledge support from Sally Lowick and are indebted for allowing us to use the single grain reader at University of Bern. This study was funded by the University of Strasbourg and the French National Centre for Scientific Research - CNRS (IDEX-CNRS 2014 MODELROH project, specific CNRS applications), the European Community (LIFE08 NAT/F/00471), the City of Strasbourg, the ZAEU (Zone Atelier Environnementale Urbaine - LTER), the Water Rhin-Meuse Agency, the DREAL Alsace, the “Région Alsace”, the “Département du Bas-Rhin” and the company “Électricité de France”.

REFERENCES

Aitken MJ and Smith BW, 1988. Optical dating: recuperation after bleaching. *Quaternary Science Reviews* 7(3–4): 387–393, DOI 10.1016/0277-3791(88)90034-0.

Arnaud F, Piégay H, Schmitt L, Rollet AJ, Ferrier V, Béal D, 2015. Historical geomorphic analysis (1932–2011) of a by-passed river reach in process-based restoration perspectives: The Old Rhine downstream of the Kembs diversion dam (France, Germany). *Geomorphology* 236: 163–177, DOI 10.1016/j.geomorph.2015.02.009.

Arnold LJ, Bailey RM and Tucker GE, 2007. Statistical treatment of fluvial dose distributions from southern Colorado arroyo deposits. *Quaternary Geochronology* 2(1–4): 162–167, DOI 10.1016/j.quageo.2006.05.003.

Bailey RM and Arnold LJ, 2006. Statistical modelling of single grain quartz D_e distributions and an assessment of procedures for estimating burial dose. *Quaternary Science Reviews* 25(19–20): 2475–2502, DOI 10.1016/j.quascirev.2005.09.012.

Blair MW, Yukihra EG and McKeever SWS, 2005. Experiences with single-aliquot OSL procedures using coarse-grain feldspars. *Radiation Measurements* 39(4): 361–374, DOI 10.1016/j.radmeas.2004.05.008.

Bøtter-Jensen L, Andersen CE, Duller GAT and Murray AS, 2003. Developments in radiation, stimulation and observation facilities in luminescence measurements. *Radiation Measurements* 37 (4–5): 535–541, DOI 10.1016/S1350-4487(03)00020-9.

Brierley GJ and Fryirs K, 2005. *Geomorphology and River Management. Applications of the river styles framework*. Blackwell Publishing, 398 p.

Bristow CS, 1987. Brahmaputra River: channel migration and deposition. In: Ethridge FG, Flor RM and Harvey MD, eds., *Recent developments in fluvial sedimentology*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists 39: 63–74.

Cioc M, 2009. *The Rhine: an eco-biography, 1815–2000*. University of Washington Press, 280 p.

Cunningham A, Wallinga J and Minderhoud P, 2011. Expectations of scatter in equivalent-dose distributions when using multi-grain aliquots for OSL dating. *Geochronometria* 38: 424–431, DOI 10.2478/s13386-011-0048-z.

David M, Labenne A, Carozza JM and Valette P, 2016. Evolutionary trajectory of channel planforms in the middle Garonne River (Toulouse, SW France) over a 130-year period: contribution of mixed multi-factor analysis (mfamix). *Geomorphology* 258: 21–39, DOI 10.1016/j.geomorph.2016.01.012.

Delile H, Schmitt L, Jacob-Rousseau N, Grospretre L, Privolt G and Preusser F, 2016. Headwater valley response to climate and land use changes during the Little Ice Age in the Massif Central (Yzeron basin, France). *Geomorphology* 257: 179–197, DOI 10.1016/j.geomorph.2016.01.010.

Duller GAT, 1991. Equivalent dose determination of single aliquots. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements* 18(4): 371–378, DOI 10.1016/1359-0189(91)90002-Y.

Duller GAT, 2004. Luminescence dating of Quaternary sediments: recent developments. *Journal of Quaternary Science* 19(2): 183–192, DOI 10.1002/jqs.809.

Duller GAT, 2016. *Analyst v4.31.9 User Manual*, February 2016. 83 p., http://www.nutech.dtu.dk.

Fiebig M, Preusser F, Steffen D, Thamó-Bozsó E, Grabner M, Lair GJ and Gerzabek MH, 2009. Luminescence dating of historical fluvial deposits from the Danube and Ebro. *Geoarchaeology* 24(2): 224–241, DOI 10.1002/gea.20264.

Fuchs MC, Kreutzer S, Burow C, Dietze M, Fischer M, Schmidt C and Fuchs M, 2015. Data processing in luminescence dating analysis: An exemplary workflow using the R package 'Luminescence'. *Quaternary International* 362: 8–13, DOI 10.1016/j.quaint.2014.06.034.

Gaar D, Lowick SE and Preusser F, 2014. Performance of different luminescence approaches for the dating of known-age glaciofluvial deposits from northern Switzerland. *Geochronometria* 41(1): 65–80, DOI 10.2478/s13386-013-0139-0.

Galbraith RR and Roberts RG, 2012. Statistical aspects of equivalent dose and error calculation and display in OSL dating: An overview and some recommendations. *Quaternary Geochronology* 11: 1-27: DOI 10.1016/j.quageo.2012.04.020.

Galbraith RF, Roberts RG, Laslett GM, Yoshida H and Olley JM, 1999. Optical dating of single and multi-grains of quartz from Jinmium rock shelter, Northern Australia: part 1, experimental design and statistical models. *Archaeometry* 41(2): 339–364, DOI 10.1111/j.1475-4754.1999.tb00987.x.

Guérin G and Visocekas R, 2015. Volcanic feldspars anomalous fading: Evidence for two different mechanisms. *Radiation Measurements* 81: 218–223, DOI 10.1016/j.radmeas.2015.08.009.

Herget J, Bremer E, Coch T, Dix A, Eggenstein G and Ewald K, 2005. Engineering impact on river channels in the river Rhine catchment. *Erdkunde* 59(3/4): 294–319, DOI 10.3112/erdkunde.2005.03.07.

Hohensinner S, Habersack H, Jungwirth M and 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(1): 25–41, DOI 10.1002/rra.719.

Howard AJ, Gearey BR, Hill T, Fletcher W and Marshall P, 2009. Fluvial sediments, correlations and palaeoenvironmental reconstruction: The development of robust radiocarbon chronologies. *Journal of Archaeological Science* 36(12): 2680–2688, DOI 10.1016/j.jas.2009.08.006.

Huntley DJ and Lamothe M, 2001. Ubiquity of anomalous fading in K-feldspars and the measurement and correction for it in optical dating. *Canadian Journal of Earth Sciences* 38(7): 1093–1106, DOI 10.1139/cjes-38-7-1093.

Jeong GY and Choi JH, 2012. Variations in quartz OSL components with lithology, weathering and transportation. *Quaternary Geochronology* 10: 320–326, DOI 10.1016/j.quageo.2012.02.023.

Jweda J and Baskaran M, 2011. Interconnected riverine–lacustrine systems as sedimentary repositories: Case study in southeast Michigan using ^{210}Pb and ^{137}Cs-based sediment accumulation and mixing models. *Journal of Great Lakes Research* 37(3): 432–446, DOI 0.1016/j.jglr.2011.04.010.

Kreutzer S, Schmidt C, Fuchs MC, Dietze M, Fischer M and Fuchs M, 2012. Introducing an R package for luminescence dating analysis. *Ancient TL* 30 (1): 1–8.

Lepper K, Agersnap Larsen N and McKeever SWS, 2000. Equivalent dose distribution analyses of Holocene aeolian and pluvial quartz sands from Central Oklahoma. *Radiation Measurements* 32(5–6): 603–608, DOI 10.1016/S1350-4487(00)00093-7.

Li S-H, 1994. Optical dating: insufficiently bleached sediments. *Radiation Measurements* 23(2–3): 563–568, DOI 10.1016/1350-4487(94)90100-7.

Lowick SE, Trauerstein M and Preusser F, 2012. Testing the application of post IR-IRSL dating to fine grain waterlain sediments. *Quaternary Geochronology* 8: 33–40, DOI 10.1016/j.quageo.2011.12.003.

Mabit L, Benmansour M, Abril JM, Walling DE, Meusburger K, Iurian AR, Bernard C, Tarján S, Owens PN, Blake WH and Alewell C., 2014. Fallout ^{210}Pb as a soil and sediment tracer in catchment sediment budget investigations: a review. *Earth-Science Reviews* 138: 335–351, DOI 10.1016/j.earscirev.2014.06.007.

Madsen AT, Murray AS, Andersen TJ, Pejrup M and Breuning-Madsen H, 2005. Optically stimulated luminescence dating of young estuarine sediments: a comparison with ^{210}Pb and ^{137}Cs dating. *Marine Geology* 214(1–3): 251–268, DOI 10.1016/j.margeo.2004.10.034.

Madsen AT and Murray AS, 2009. Optically stimulated luminescence dating of young sediments: A review. *Geomorphology* 109(1–2): 3–16, DOI 10.1016/j.geomorph.2008.08.020.

Murray AS, Olley JM and Caitcheon GG, 1995. Measurement of equivalent doses in quartz from contemporary water-lain sediments using optically stimulated luminescence. *Quaternary Science Reviews* 14(4): 365–371, DOI 10.1016/0277-3791(95)00030-5.

Murray AS and Wintle AG, 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements* 32(1): 57–73, DOI 10.1016/S1350-4487(99)00253-X.

Neudorf CM, Lian OB, Walker IJ, Shugar DH, Eamer JBR and Griffin LCM, 2015. Toward a luminescence chronology for coastal dune and beach deposits on Calvert Island, British Columbia central coast, Canada. *Quaternary Geochronology* 30B: 275–281, DOI 10.1016/j.quageo.2014.12.004.

Olley J, Caitcheon G and Murray A, 1998. The distribution of apparent dose as determined by optically stimulated luminescence in small aliquots of fluvial quartz: implications for dating young sediments. *Quaternary Science Reviews* 17(11): 1033–1040, DOI 10.1016/S0277-3791(97)00090-5.

Olley JM, Pietsch T and Roberts RG, 2004. Optical dating of Holocene sediments from a variety of geomorphic settings using single grains of quartz. *Geomorphology* 60(3–4): 337–358, DOI 10.1016/j.geomorph.2003.09.020.

Pietsch TJ, 2009. Optically stimulated luminescence dating of young (<500 years old) sediments: Testing estimates of burial dose. *Quaternary Geochronology* 4(5): 406–422, DOI 10.1016/j.quageo.2009.05.013.

Pietsch TJ, Olley JM and Nanson GC, 2008. Fluvial transport as a natural luminescence sensitiser of quartz. *Quaternary Geochro- nology* 3(4): 365–376, DOI 10.1016/j.quageo.2007.12.005.

Porat N, Duller GAT, Amit R, Zilberman E and Enzel Y, 2009. Recent faulting in the southern Arava, Dead Sea Transform: Evidence from single grain luminescence dating. *Quaternary International* 199(1–2): 34–44, DOI 10.1016/j.quaint.2007.08.039.

Preusser F, 2003. IRSL dating of K-rich feldspars using the SAR protocol: Comparison with independent age control. *Ancient TL* 21(1): 17–23.

Preusser F and Kasper HU, 2001. Comparison of dose rate determination using high-resolution gamma spectrometry and inductively coupled plasma - mass spectrometry. *Ancient TL* 19(1): 19–23. Preusser F, Ramseyer K and Schlüchter C, 2006. Characterisation of low luminescence intensity quartz from Westland, New Zealand. *Radiation Measurements* 41(7–8): 871–877, DOI 0.1016/j.radmeas.2006.04.019.

Preusser F and Degering D, 2007. Luminescence dating of the Niederweningen mammoth site, Switzerland. *Quaternary International* 164–165: 106–112, DOI 10.1016/j.quaint.2006.12.002.

Preusser F, Degering D, Fuchs M, Hilgers A, Kadereit A, Klasen N, Krbetschek M, Richter D and Spencer J, 2008. Luminescence dating: Basics, methods and applications. *E&G Quaternary Science Journal* 57(1–2): 95–149, DOI 10.3285/eg.57.1-2.5.

Preusser F, Muru M and Rosentau A, 2014. Comparing different post-IR IRSL approaches for the dating of Holocene coastal foredunes from Ruhnu Island, Estonia. *Geochronometria* 41(4): 342–351, DOI 10.2478/s13386-013-0169-7.

Reimann T, Thomsen KJ, Jain M, Murray AS and Frechen M, 2012. Single grain dating of young sediment using the pIRIR signal from feldspar. *Quaternary Geochronology* 11: 28–41, DOI 10.1016/j.quageo.2012.04.016.

Reimer PJ, Baillie MGL, Bard E, Bayliss A, Beck JW, Blackwell PG, Bronk Ramsey C, Buck CE, Burr GS, Edwards RL, Friedrich M, Grootes PM, Guilderson TP, Hajdas I, Heaton TJ, Hogg AG, Hughen KA, Kaiser KF, Kromer B, McCormac G, Manning SW, Reimer RW, Richards DA, Southon JR, Talamo S, Turney CSM, van der Plicht J and Weyhenmeyer CE, 2009. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon* 51(4): 1111–1150.

Rhodes EJ, 2015. Dating sediments using potassium feldspar single grain IRSL: Initial methodological considerations. *Quaternary International* 362: 14–22, DOI 10.1016/j.quaint.2014.12.012.

Rhodes EJ and Bailey RM, 1997. The effect of thermal transfer on the zeroing of the luminescence of quartz from recent glaciofluvial sediments. *Quaternary Science Reviews* 16(3–5): 291–298, DOI 10.1016/S0277-3791(96)00100-X.

Richter D, Richter A and Dornich K, 2015. Lexsyg smart — a luminescence detection system for dosimetry, material research and dating application. *Geochronometria* 42(1): 202–209, DOI 10.1515/geochr-2015-0022.

Sawakuchi AO, Blair MW, DeWitt R, Faleiros FM, Hyppolito T and Guedes CCF, 2011. Thermal history versus sedimentary history: OSL sensitivity of quartz grains extracted from rocks and sediments. *Quaternary Geochronology* 6(2): 261–272, DOI 10.1016/j.quageo.2010.11.002.

Schmitt L, Lebeau M, Tremoliers M, Defraeye S, Coli C, Denny E, Beck T, Dillinger M, Dor JC, Gombert P, Gueidan A, Manne S, Party JP, Perrotey P, Piquette M, Roeck U, Schnitzler A, Sonnet O, Vacher JP, Vauclin V, Weiss M, Zacher N and 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.

Smedley RK, Duller GAT and Roberts HM, 2015. Bleaching of the post-IR IRSL signal from individual grains of K-feldspar: Implica-

tions for single grain dating. *Radiation Measurements* 79: 33–42, DOI 10.1016/j.radmeas.2015.06.003.

Spooner, N.A., 1994. The anomalous fading of infrared-stimulated luminescence from feldspars. *Radiation Measurements* 23(2–3): 625–632, DOI 10.1016/1350-4487(94)90111-2.

Trauerstein M, Lowick SE, Preusser F, Rufer D and Schlunegger F, 2012. Exploring fading in single grain feldspar IRSL measurements. *Quaternary Geochronology* 10: 327–333, DOI 10.1016/j.quageo.2012.02.004.

Trauerstein M, Lowick SE, Preusser F and Schlunegger F, 2014. Small aliquot and single grain IRSL and post-IR IRSL dating of fluvial and alluvial sediments from the Pativilca valley, Peru. *Quaternary Geochronology* 22: 163–174, DOI 10.1016/j.quageo.2013.12.004.

Vandenberghe D, Hossain SM and De Corte F, 2003. Investigations on the origin of the equivalent dose distribution in a Dutch coversand. *Radiation Measurements* 37(4–5): 433–439, DOI 10.1016/S1350-4487(03)00051-9.

Visocekas R, 1985. Tunnelling radiative recombination in labradorite: its association with anomalous fading of thermoluminescence. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements* 10(4–6): 521–529, DOI 10.1016/0735-245X(85)90053-5.

Visocekas R and Guérin G, 2006. TL dating of feldspars using their far-red emission to deal with anomalous fading. *Radiation Measurements* 41(7–8): 942–947, DOI 10.1016/j.radmeas.2006.04.023.

Wallinga J, 2002. On the detection of OSL age overestimation using single-aliquot techniques. *Geochronometria* 21, 17–26.

Wallinga J, Bos AJJ, Dorenbos P, Murray AS and Schokker J, 2007. A test case for anomalous fading correction in IRSL dating. *Quaternary Geochronology* 2(1–4): 216–221, DOI 10.1016/j.quageo.2006.05.014.

Wintle AG, 1973. Anomalous fading of thermo-luminescence in mineral samples. *Nature*: 245(5421), 143–144, DOI 10.1038/245143a0.

Wintle AG and Murray AS, 2006. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Radiation Measurements* 41(4): 369–391, DOI 10.1016/j.radmeas.2005.11.001.

ANNEXE 4 : KOEHL ET AL. (SOUS PRESSE), ACTES DE LA JOURNÉE TECHNIQUE ONEMA

SUIVI MORPHODYNAMIQUE D'UNE ANNEXE HYDRAULIQUE RHÉNANE RESTAURÉE PAR COMBINAISON DE MÉTHODES D'IMAGERIE TERRESTRE

Mathieu Koehl[a], David Eschbach[b], Pierre Grussenmeyer[a], Laurent Schmitt[b], Samuel Guillemin[a], Etienne Supper[a], Julie Roy[a]

(A) INSA de Strasbourg – ICube UMR 7357 Equipe TRIO (Télédétection, Radiométrie et Imagerie Optique)
(B) Université de Strasbourg – LIVE (Laboratoire Image, Ville, Environnement) UMR 7362 CNRS-Unistra-ENGEES – LTER – « Zone Atelier Environnementale Urbaine »

Résumé : Le projet LIFE+ "Restauration de la dynamique des habitats alluviaux rhénans sur l'île du Rohrschollen" a pour objectif de restaurer le fonctionnement hydro-morphologique et écologique de l'hydrosystème : inondations dynamiques, transport sédimentaire grossier, mobilité latérale, échanges nappe-rivière, rajeunissement des successions végétales, renforcement du caractère hygrophile de la végétation, etc. À cet effet, une prise d'eau amont et un chenal de connexion nouvellement créés permettent de reconnecter le Rhin au Bauerngrundwasser, principal chenal de l'île. Les débits injectés varient de 2 à 80 m3/s en fonction de l'hydrologie du Rhin. Dans le cadre du suivi géomorphologique mené sur le nouveau chenal, plusieurs méthodes d'imagerie 3D ont été déployées pour modéliser les évolutions des formes fluviales. La lasergrammétrie a été utilisée pour modéliser l'état initial, avant les premières injections. Des acquisitions photogrammétriques et topo-bathymétriques ont été réalisées après chaque crue. Une chaîne de traitement a été développée pour quantifier les volumes d'érosion et de dépôt (budget sédimentaire). Les premiers résultats ont permis d'évaluer l'intensité de la morphodynamique fluviale et laissent apparaître des tendances évolutives futures à moyen terme.

Mots-clefs : Suivi géomorphologique, analyse diachronique, topographie, photogrammétrie, lasergrammétrie.

Abstract: The LIFE+ project "Restoring dynamics of Rhine alluvial habitats on the Rohrschollen Island", aims to restore the hydromorphological and ecological functioning of the hydrosystem: bedload dynamics, channel mobility, surface water-groundwater exchanges, renewal of pioneer ecosystems. Thus, the Bauerngrundwasser (anastomosing channel of Rohrschollen Island) was reconnected to the Rhine by a floodgate and a new upstream connection channel. The water input can reach 80 m3/s, leading to dynamic overflows. In the frame of a geomorphic monitoring carried out on the new channel, 3D imaging methods were used to model the morphodynamical evolutions. A terrestrial laser scanner was used to model the pre-restoration state, before the first floods. The photogrammetry and topo-bathymetrical surveys were implemented after each floods. A data treatment chain was built to quantify volumetric changes (volumes of erosion and deposit) by using a sediment budget. First results show that these methods are relevant to assess the intensity of hydro-morphological processes, as well as to give the future tendency of geomorphological adjustments.

Key-words : Geomorphological survey, diachronic evolution, topography, photogrammetry, lasergrammetry

1 INTRODUCTION

Le Rhin est l'un des fleuves les plus artificialisés d'Europe, notamment entre Bâle et Bingen où l'essentiel des surfaces initiales de l'hydrosystème a disparu au profit de surfaces agricoles, industrielles, portuaires et urbaines (Carbiener, 1983 ; Herget *et al.*, 2005 ; Tricart et Bravard, 1991). Il subsiste aujourd'hui quelques lambeaux de milieux alluviaux, notamment sur les îles artificielles des aménagements en festons (Middelkoop *et al.*, 2005 ; Uehlinger *et al.*, 2009). Les aménagements successifs ont engendré de nombreuses perturbations fonctionnelles, y compris dans les zones alluviales résiduelles : inondations rares et statiques, interruption de quasiment toute l'activité géomorphologique (érosion latérale, transport sédimentaire grossier, dépôt de bancs vifs graveleux, etc.), colmatage des annexes hydrauliques, banalisation des biocénoses, de leur caractère hygrophile, interruption des processus de rajeunissement des successions végétales, etc.

Stimulés par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE, 2000), les projets de restauration du Rhin supérieur se sont multipliés depuis environ trois décennies (Schmitt *et al.*, 2012). Les plus ambitieux d'entre eux visent à redynamiser les fonctionnalités hydromorphologiques et hydroécologiques. C'est le cas de l'île du Rohrschollen, située à 8 km au sud-est de Strasbourg et classée en Réserve Naturelle Nationale en 1997. Sur ce site, le projet LIFE+ « LIFE08 NAT/F/000471 Restauration de la dynamique des habitats alluviaux rhénans sur l'île du Rohrschollen », piloté par la Ville de Strasbourg entre 2010 et 2015, vise à restaurer les habitats alluviaux typiques de l'île en agissant sur les processus hydro-morphologiques : inondations dynamiques, crues morphogènes, transport sédimentaire, échanges nappe – rivière, etc. D'un point de vue technique, le projet a consisté à creuser un nouveau chenal ex-nihilo pour reconnecter le Bauerngrundwasser (ancienne annexe hydraulique déconnectée dans sa partie amont) au Rhin. À l'amont de ce chenal, un important ouvrage hydraulique de prise permet de recréer des submersions dynamiques et fréquentes par l'injection d'un débit variable, pouvant atteindre 80 m3/s, sur des périodes potentiellement longues, en fonction de l'hydrologie du fleuve. Comme le débit à pleins bords du nouveau chenal a été volontairement sous-dimensionné à 20 m3/s, les submersions sont relativement fréquentes et longues et le chenal tend à s'ajuster spontanément aux nouvelles conditions hydrologiques.

Le fonctionnement post-restauration de l'hydrosystème est évalué grâce à un monitoring interdisciplinaire ambitieux (2012-2016, qui doit être prolongé jusqu'en 2021), à la fois abiotique et biotique : hydraulique-hydrologie, hydrogéologie et échanges nappe-rivière, transport solide, morphodynamique, hydrogéologie, écologie de la faune et de la flore, physico-chimie de l'eau et des sédiments, etc. En 2014, une convention de partenariat a été mise en place entre le laboratoire LIVE, chargé du suivi scientifique, et l'INSA de Strasbourg. Entre chaque submersion écologique, le suivi des évolutions morphologiques sur le nouveau chenal est réalisé par photogrammétrie et tachéométrie. L'état initial a été réalisé par lasergrammétrie. Une comparaison diachronique, basée sur des modèles 3D, permet d'observer les évolutions morphologiques et d'estimer les volumes de sédiments érodés et déposés.

2 ENJEUX ET OBJECTIFS

Le suivi scientifique vise à évaluer les effets de la restauration en développant des approches et méthodes les plus innovantes possibles (Eschbach *et al.*, 2016). Rarement utilisée en géomorphologie fluviale, l'imagerie 3D se révèle être un outil de prospection et d'évaluation de grand intérêt pour (i) suivre la dynamique morphologique d'un chenal, (ii) réaliser des budgets sédimentaires érosion-dépôt et (iii) prédire les tendances d'évolutions

morphologiques futures. Cet outil constitue pour les gestionnaires un moyen innovant de suivi à court et moyen termes.

L'étude présentée ici s'organise autour de trois objectifs principaux :

- tester et adapter les méthodes d'acquisition et de modélisation 3D au suivi géomorphologique en milieu alluvial ;
- estimer les évolutions morphologiques du nouveau chenal à l'aide de comparaisons diachroniques ;
- quantifier les volumes de sédiments déplacés dans le nouveau chenal, exportés vers l'ancien chenal et déposés dans la plaine alluviale.

3 MÉTHODES, DONNÉES ET MATÉRIELS

Sur le chenal, long d'environ 900 mètres, trois tronçons (A, B et C) ont été sélectionnés pour la modélisation en 3D. Ces derniers sont localisés dans les courbures du chenal où les évolutions morphologiques sont les plus intenses (Fig. 1).

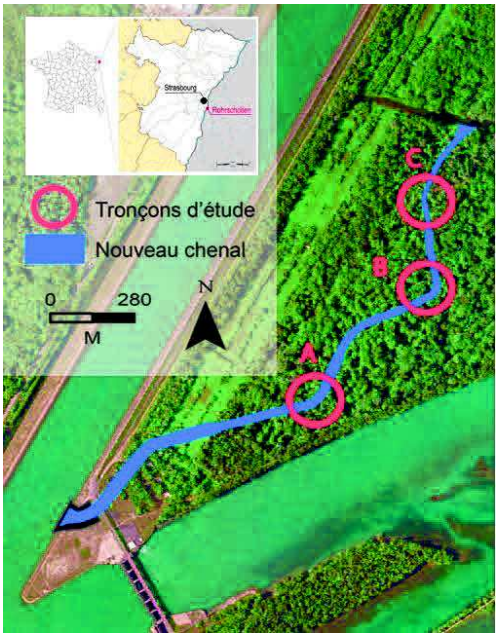


Figure 1 - Localisation du nouveau chenal et des 3 tronçons suivis par imagerie 3D.

3.1 Levé topographique [tachéométrie]

Des méthodes de levé topographique conventionnelles accompagnent chaque campagne de mesures et permet notamment de fournir des points précis de calage et de référence sur tout le linéaire du chenal. Plusieurs levés conventionnels ont été réalisés : le premier par la société Transroute qui a eu en charge les travaux de terrassement, les suivants par les topographes de l'INSA.

Le but de ces premiers relevés a été de mettre en place un canevas de points d'appuis permettant de géoréférencer les différents autres levés. Des stations totales ont été utilisées pour la mesure de l'ossature du canevas, lui-même positionné à partir du système de navigation par satellites RTK-GNSS (Global navigation satellite system). À partir de ce canevas de référence, un ensemble de points a été déterminé pour permettre le géoréférencement des mesures d'un scanner 3D terrestre, ainsi que de bandes d'images dans des projets photogrammétriques (voir 2.3 Photogrammétrie).

D'autres relevés topographiques complets ont été effectués pour définir la topographie du chenal sous forme de points singuliers et de profils en travers comportant tous les points caractéristiques. Les profils sont espacés en moyenne d'une vingtaine de mètres, certains points caractéristiques intermédiaires ont été rajoutés en fonction de la configuration du chenal, notamment dans les courbures, sur les seuils et dans les mouilles.

La combinaison des points caractéristiques et des profils en travers permet la constitution d'un modèle numérique de terrain (MNT) par triangulation. Bien que la résolution reste relativement faible, cette méthode permet d'obtenir un modèle complet du chenal.

Le temps d'acquisition de terrain est de l'ordre d'une journée. Ces levés permettent, après chaque événement hydrologique important, de disposer d'une information bathymétrique, d'un profil en long complet et de nombreux profils en travers pour suivre les évolutions morphologiques sur l'ensemble du chenal.

Les méthodes et instruments mis en œuvre permettent d'obtenir des points avec une précision de l'ordre de quelques centimètres (Erreur moyenne quadratique (Emq) des positions planimétriques : 2,1 cm et des déterminations altimétriques : 0,9 cm).

Figure 2 : Acquisition lasergrammétrique (Faro Focus 3D) sur le tronçon C.

3.2 Lasergrammétrie

La lasergrammétrie est la première méthode développée sur le chenal pour le suivi géomorphologique en complément des levés conventionnels. Elle a permis de réaliser un modèle numérique de référence sur les trois tronçons du chenal sous la forme d'un nuage de points qui a ensuite été maillé et texturé.

Un scanner 3D est un instrument de mesure par balayage laser reposant sur un principe de mesure de distances. Dans notre cas, nous avons utilisé un scanner 3D terrestre de type FARO Focus 3D permettant la mesure d'une scène complète en 360° en horizontale et verticale (Fig. 2). Des millions de points formant des nuages de points sont acquis en quelques minutes. Ces points correspondent à des données brutes qu'il s'agit ensuite de consolider et de géoréférencer par l'intermédiaire de cibles et de sphères réparties tout au long du chenal, et connues en coordonnées (relevés par tachéométrie).

La densité des nuages de points acquis dépend de la résolution du relevé scanner 3D qui peut être configurée par l'opérateur. On peut ainsi choisir d'acquérir des points distants entre eux de quelques mm à quelques cm. La précision relative du scanner est très bonne jusqu'à une distance de quelques dizaines de mètres. La densité des points mesurés est directement fonction de leur éloignement par rapport au scanner 3D.

Une chaîne de traitements a ensuite été mise en place pour passer des différents nuages de points bruts obtenus à partir de chaque station du scanner 3D à un nuage de points unique, fusionné, géoréférencé et colorisé. En effet, en plus des points acquis en 3D, le scanner peut enregistrer des images (mosaïque d'images panoramique sphérique de 70 MPx) qui permettent d'associer une combinaison de couleurs (colorisation) à chaque point du nuage (Fig. 3).

Figure 3 - Colorisation du nuage de point obtenu par lasergrammétrie.

Pour pouvoir ensuite manipuler le nuage de points, ce dernier a été dégradé par un ré-échantillonnage en fonction des besoins. Il a également été débruité (bruits de mesure) et nettoyé ou segmenté, pour y supprimer la végétation et les branchages.

L'excellente précision des nuages de points ainsi obtenus (de l'ordre du cm) permet de sélectionner cette modélisation comme un modèle de référence qui sera utilisé pour les analyses diachroniques et la comparaison méthodologique avec la photogrammétrie.

Concernant la méthode et le matériel utilisés dans cette approche, les avantages et les inconvénients de la lasergrammétrie sont les suivants :

- matériel se démocratisant, mais relativement onéreux ;
- durée de mise en place assez longue, suivie d'acquisitions de quelques minutes ;
- matériel encombrant et délicat à transporter (en zone difficilement accessible) ;
- + chaîne de traitements élaborée, traitements relativement rapides ;
- + obtention de nuages de points denses ;
- + résultats homogènes ;
- + précision centimétrique.

3.3 Photogrammétrie

La méthode photogrammétrique a été utilisée pour modéliser l'évolution sur le long terme des trois tronçons d'étude. Une bande d'images terrestres (avec un fort taux de recouvrement) de chaque berge est ainsi acquise à partir de la berge opposée (Fig. 4). Le taux de recouvrement des images est de l'ordre de 75% à 85%.

Figure 4 - Acquisition photogrammétrique (Canon EOS 5D Mark II) sur le tronçon A

Des logiciels de traitement de type SFM (Structure From Motion, Agisoft Photoscan) permettent de générer des modélisations en 3D à partir de ces images en commençant par générer des nuages de points géoréférencés, sur la base de points homologues détectés dans les parties en recouvrement. Ces nuages peuvent ensuite être maillés, texturés, puis comparés aux nuages de points obtenus par lasergrammétrie.

Cette méthode d'acquisition, qui consiste en des prises de vues terrestres perpendiculaires et obliques à la berge photographiée, a l'avantage d'être à la fois rapide et peu onéreuse. Du choix du matériel photographique dépendra la qualité des restitutions obtenues. Dans cette étude, nous avons mis en œuvre des appareils numériques reflex (Canon EOS 5D Mark II) sur lesquels ont été montés des objectifs calibrés de 28 mm de focale.

La consolidation des bandes d'images et le géoréférencement sont facilités par la mise en place de cibles codées détectables automatiquement dans le logiciel de traitement et dont la position en XYZ a été mesurée par tachéométrie (Fig. 5).

Figure 5 - Cible codée permettant de faciliter le géoréférencement des images sous Photoscan.

La photogrammétrie, tout comme la lasergrammétrie, ne permet pas de relever la bathymétrie. D'un point de vue méthodologique, les meilleurs résultats sont obtenus avec des photographies perpendiculaires aux berges. Toutefois, des prises de vues obliques peuvent s'avérer intéressantes pour améliorer la géométrie du levé et recréer des liens entre images,

notamment dans le cas où un obstacle (ici souvent des embâcles) crée une rupture dans la continuité de la berge.

Les traitements comprennent trois étapes : (i) l'orientation des images et la calibration de l'appareil photographique, (ii) la génération du nuage de points (logiciel Photoscan) et (iii) la préparation et le nettoyage des nuages de points (logiciels 3DReshaper et CloudCompare). La précision des nuages de points issus de la photogrammétrie peut s'estimer en comparant le modèle photo avec un modèle plus précis, ou en utilisant les points d'appui et leurs positions dans le nuage de points. Les Emq des observations obtenues sont dans ce cas de l'ordre de 5 cm, en fonction des tronçons et du nombre de cibles utilisées.

Concernant la méthode et le matériel utilisés dans cette approche, les avantages et les inconvénients de la photogrammétrie sont les suivants :

- + matériel compact, coût abordable ;
- + acquisition très rapide (prise de photographies) ;
- chaîne de traitements longue et chronophage (plusieurs heures) ;
- méthode peu adaptée à des levés de grande étendue ;
- nécessité d'élaborer un canevas de référence ;
- précision demi-décimétrique.

Les nuages de points issus de la lasergrammétrie permettent d'atteindre des Emq sur la position d'une cible proche du cm. Dans le cas de la photogrammétrie, cette Emq est de l'ordre de 5 cm en fonction des tronçons et du nombre de cibles utilisées.

4 RÉSULTATS

Le suivi fin par imagerie 3D à haute résolution (lasergrammétrie et photogrammétrie) est abondé d'une acquisition topo-bathymétrique au tachéomètre. Le couplage des méthodes permet d'obtenir des modèles combinés qui associent les points topo-bathymétriques de tout le chenal aux nuages de points lasergrammétriques et photogrammétriques des courbures, où les évolutions géomorphologiques sont les plus élevées.

4.1 Suivi morphodynamique

Des levés topographiques par lasergrammétrie ont débuté en 2014, avant les premières mises en eau du chenal de connexion. Du fait de la précision et de la densité de points acquis par le scanner Faro Focus 3D, cette première étape a permis la définition d'un modèle numérique 3D de référence. La topographie initiale (berges et fond du chenal) de trois zones d'études a pu être enregistrée.

Pour le suivi à moyen/long terme des trois tronçons, la photogrammétrie a été retenue. Cette méthode présente l'avantage d'être à la fois peu onéreuse par rapport à l'utilisation d'un scanner 3D et très rapide à l'acquisition. Au total, cinq périodes ont été suivies entre 2014 et 2016 (février et juillet 2014 / février et juin 2015 / mars 2016)

4.2 Analyse diachronique

Les évolutions morphodynamiques ont pu être comparées entre deux périodes de suivis. Une comparaison nuage-nuage apporte des informations visuelles sur la localisation des écarts entre deux nuages de points selon une échelle prédéfinie (Fig. 6b). Ces données sont obtenues à l'aide du logiciel libre CloudCompare (EDF R&D). Il permet de calculer la distance en utilisant la méthode M3C2 entre deux trames de points, ici les berges du chenal. Parmi les différents algorithmes de calcul de la distance nuage-nuage, M3C2 cherche la direction la plus

pertinente pour évaluer la distance, cette direction étant définie pour chaque point suivant la normale à la surface formée par les points voisins dans un rayon de recherche paramétrable (Supper, 2015). Le modèle d'érosion-dépôt ainsi créé permet de réaliser des bilans sédimentaires par tronçons ou pour l'ensemble du chenal, comme présenté dans la figure 6a.

On observe une nette tendance à l'érosion sur l'ensemble du chenal (2 100 m3 de sédiments érodés contre 1 750 m3 de dépôts), notamment du fait d'une tendance générale à l'élargissement, avec une diminution de l'intensité entre 520 m et 590 m, suivie d'une forte augmentation dans le tronçon C. La variation de l'intensité de l'érosion s'explique essentiellement par la morphologie du chenal : l'érosion est minimale sur les linéaires rectilignes et maximales au droit des berges concaves des courbures, comme l'illustre la figure 6b. Notons que le fait que l'érosion soit supérieure aux dépôts (déficit sédimentaire) s'explique également par l'absence d'apports de charge de fond par l'ouvrage de prise. En effet, ce dernier n'atteint pas le fond du bief canalisé du Rhin, lequel est par ailleurs dépourvu de charge grossière.

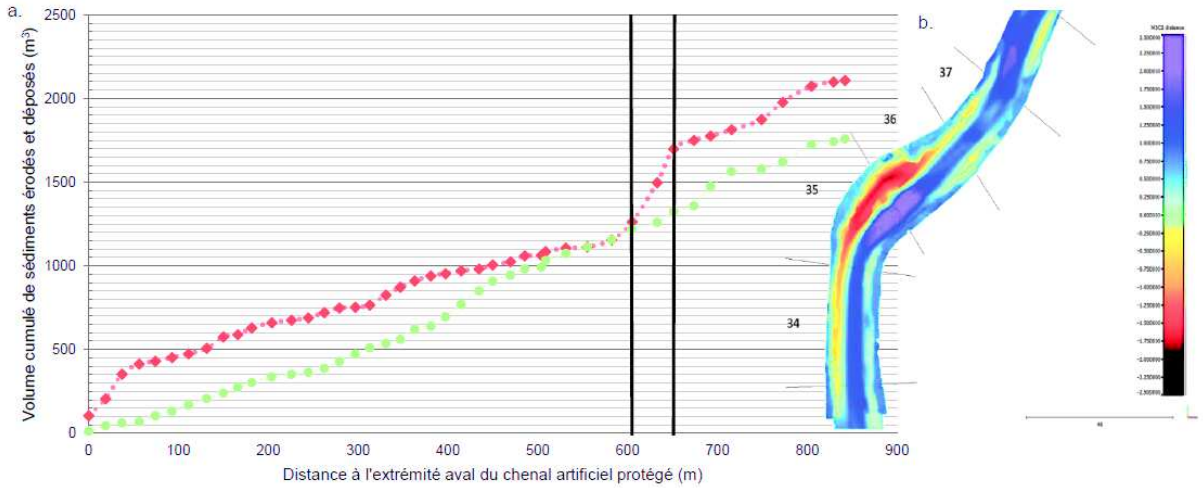


Figure 6 - (a) Bilan sédimentaire cumulé global sur l'ensemble du chenal. (b) Comparaison diachronique des modèles combinés topo-bathymétriques de la campagne 1 (lasergrammétrie + bathymétrie par tachéométrie) et de la campagne 2 (photogrammétrie + bathymétrie par tachéométrie) sur le tronçon C. Couleur chaude = érosion / couleur froide = dépôts.

4.3 Apports méthodologiques

Le suivi photogrammétrique est bien maitrisé en milieu urbain ou sur des zones d'études stables. Dans le cas du suivi de berges à forte évolution, la méthode photogrammétrique a dû être adaptée. Ainsi, des tests nous ont montré que les meilleurs résultats en termes de reconnaissance d'objets et de précision du modèle final sont obtenus avec des recouvrements transversaux allant jusqu'à 85%. Ceci implique bien évidemment un protocole de prise de vue plus strict. Les images obliques, compléments indispensables pour des restitutions en 3D avec des parties se recouvrant, n'apportent ici pas d'information intéressante du fait de la topologie simple des berges mais contribuent à améliorer la géométrie lors des calculs photogrammétriques de chaque bande.

Les études de précision ont montré que la lasergrammétrie a permis d'obtenir des résultats bien supérieurs à la photogrammétrie. Il en ressort un intérêt particulier de cette première méthode qui permet d'obtenir des modèles fins et précis pouvant servir de modèles de référence.

Néanmoins, la mise en œuvre de la lasergrammétrie est beaucoup plus complexe (transport et manipulation du matériel, nécessité de mesurer des points de référence communs à plusieurs nuages de points, etc.) alors que les résultats obtenus par photogrammétrie permettent, sans problème majeur si une précision décimétrique s'avère suffisante, d'obtenir des résultats de qualité sur l'évolution de la morphologie d'un chenal. Cette méthode est aussi plus facilement transférable à un gestionnaire pour un suivi à long terme. Mais dans cette perspective, il faudra encore veiller à densifier et à pérenniser le réseau de cibles de références mis en place sur les tronçons d'étude. Le protocole de prise de vue (Supper, 2015) préconise ainsi des paramètres de recouvrement, l'orientation des photographies (perpendiculairement à la berge, sans oublier l'ajout de vues obliques) et l'intégration de cibles de références dans les images.

5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les premiers résultats montrent l'intérêt de la modélisation 3D pour évaluer l'intensité des évolutions morphodynamiques sur le nouveau chenal. Les méthodes utilisées permettent une analyse diachronique et multi-scalaire. Cette approche est particulièrement intéressante en géomorphologie fluviale car elle permet (i) de visualiser/localiser les évolutions géomorphologiques (érosion/dépôt) et (ii) de quantifier ces évolutions à différentes échelles, de tronçons relativement courts à des linéaires fluviaux plus étendus : profil en travers, profil en long, budget sédimentaire, etc.

Le suivi topo-bathymétrique est une base essentielle pour spatialiser l'ensemble des données collectées sur le terrain et pour modéliser les évolutions morphologiques globales du chenal. Il permet également de compléter les nuages de points lasergrammétriques et photogrammétriques qui ont pour inconvénients d'exclure l'information bathymétrique. En outre, les levés topo-bathymétriques présentent une résolution moins élevée (5 points bathymétrique / 10 m), ce qui contraste avec celle des méthodes d'imagerie 3D (plusieurs points au m2) et intègre des biais dans l'estimation des volumes dont les marges d'erreur peuvent être importantes.

Pour limiter ces marges d'erreurs et affiner l'estimation des volumes déplacés à l'échelle globale, un survol Lidar topo-bathymétrique de l'ensemble de l'île est envisagé en 2017. D'autre part, pour améliorer la répétabilité des mesures topographiques et bathymétriques, des repérages pérennes seront mis en place au niveau de profils transversaux de référence (espacés d'environ 50 m) afin de faciliter les comparaisons diachroniques de l'intégralité des profils en travers.

Du fait des nombreux avantages déjà évoqués (coût, rapidité d'acquisition), le protocole d'acquisition photogrammétrique est le plus facilement transférable au gestionnaire de la réserve pour un suivi à long terme. Les traitements des données restent néanmoins lourds et complexes. Ils devront être automatisés et optimisés, un travail actuellement en cours.

6 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Carbiener, R., 1983. Le grand Ried Central d'Alsace : écologie et évolution d'une zone humide d'origine fluviale rhénane. In: Bulletin d'Ecologie. 14, 4, pp. 249-277.

DCE, 2000. Directive 2000/60/CE du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Adoptée le 23 octobre 2000, JO du 22 décembre 2000.

Eschbach, D., Piasny, G., Schmitt, L., Pfister, L., Grussenmeyer, P., Koehl, M., Skupinski, G., Serradj, A., accepted, in revision. Thermal infrared remote sensing of surface water/groundwater exchanges in a restored anastomosing channel (Upper Rhine River, France). In: Hydrological Processes.

Herget, J., Bremer, E., Coch, T., Dix, A., Eggenstein, G., Ewald, K., 2005. Engineering impact on river channels in the river Rhine catchment. In: Erdkunde 59, pp. 294–319.

Middelkoop, H., Schoor, M.M., Wolfert, H.P., Maas, G.J., Stouthamer, E., 2005. Targets for ecological rehabilitation of the lower rhine and Meuse based on a historic-geomorphologic reference. In: Archiv für Hydrobiologie. Supplementband. Large rivers, pp. 63–88.

Schmitt, L., Roy, D., Trémolières, M., Blum, C., Dister, E., Pfarr, U., Späth, V., 2012. 30 years of restoration works on the two sides of the Upper Rhine River: feedback and future challenges. In: Final Proc. Int. Conf. Integrative Sciences and Sustainable Development of Rivers. Lyon, France, 2012, pp. 101–103.

Schneider, P., Vogt, T., Schirmer, M., Doetsch, J., Linde, N., Pasquale, N., Perona, P., Cirpka, O.A., 2011. Towards improved instrumentation for assessing river-groundwater interactions in a restored river corridor. In: Hydrology and Earth System Sciences 15, pp. 2531–2549. doi:10.5194/hess-15-2531-2011

Supper, E., Schmitt, L., Grussenmeyer, P., Eschbach, D., 2015. Suivi géomorphologique du chenal de reconnexion du Bauerngrundwasser par combinaison de méthodes d'imagerie terrestres et aériennes. Projet de Fin d'Étude. INSA de Strasbourg. 85 p.

Tricart, J., Bravard, J.-P., 1991. L'aménagement des trois plus grands fleuves européens : Rhin, Rhône et Danube. Problèmes et méfaits. In: Annales de Géographie 100, pp. 668–713. doi:10.3406/geo.1991.21654

Uehlinger, U., Wantzen, K.M., Leuven, R.S.E.W., Arndt, H., 2009. The Rhine river basin. In. Tockner K., Uehlinger U., Robinson C.T. (eds), Rivers of Europe. Academic Press, Amsterdam; London, pp. 199–245.

ANNEXE 5 : CONFERENCE PAPER I.S.RIVERS, LYON

FUNCTIONAL RESTORATION OF A RHINE ANASTOMOSING CHANNEL: TEMPORAL TRAJECTORY, INITIAL STATE, POST-RESTORATION MONITORING, MODELLING (UPPER RHINE, FRANCE, ROHRSCHOLLEN ISLAND)

Restauration fonctionnelle d'une anastomose rhénane : trajectoire temporelle, état initial, suivi post-restauration, modélisation (Rhin Supérieur, France, île du Rohrschollen)

David Eschbach[1], Laurent Schmitt[1], Michèle Trémolières[2], Jean-Nicolas Beisel[3], Corinne Grac[3], Pascal Finaud-Guyot[4], Sylvain Weill[5], Sylvain Payraudeau[5], Gwenaël Imfeld[5], Pierre Grussenmeyer[6]

[1]LIVE, UMR 7362 - Unistra - CNRS - ENGEES, Faculté de Géographie et d'Aménagement, 3 rue de l'Argonne, 67083 Strasbourg
[2]LIVE, UMR 7362 - Institut de Botanique, 28 rue Goethe, 67083 Strasbourg
[3]LIVE, UMR 7362 - ENGEES, 1 Quai Koch, 67067 Strasbourg
[4]ICube, UMR 7357 - Équipe Mécanique des Fluides, Département Mécanique, 2 rue Boussingault, 67000 Strasbourg
[5]LHyGES, UMR 7517 - Unistra - CNRS - EOST, 5 rue René Descartes, 67084 Strasbourg
[6]ICube, UMR 7357 - Équipe TRIO, Photogrammétrie et géomatique, INSA de Strasbourg, 67084 Strasbourg

DOI: 10.13140/RG.2.1.1516.7205

Résumé : Le projet LIFE+ "Restauration de la dynamique des habitats alluviaux rhénans sur l'île du Rohrschollen", a pour objectif de restaurer le fonctionnement hydro-morphologique et écologique de l'hydrosystème : transport sédimentaire grossier, mobilité latérale, échanges nappe-rivière, rajeunissement des successions végétales, renforcement du caractère hygrophile de la végétation. À cet effet, un chenal de connexion amont nouvellement créé et un ouvrage de prise permettent de reconnecter le Rhin au Bauerngrundwasser, principal chenal de l'île. Les débits injectés varient de 2 à 80 $m^3.s^{-1}$ en fonction du débit du Rhin, permettant à l'hydrosystème de recouvrer des inondations dynamiques. Un suivi interdisciplinaire (hydro-géomorphologie, écologie) fondé sur la comparaison des dynamiques pré- et post-restauration permet d'évaluer l'efficacité du projet en tenant compte de la trajectoire temporelle longue de l'hydrosystème. Le suivi des compartiments abiotiques intègre la topographie (lasergrammétrie, photogrammétrie…), la cartographie, le transport sédimentaire (pit-tags, chaînes d'érosion, hydrophone), l'hydrologie, l'hydrogéologie. Des modélisations hydraulique, hydrogéologique, géochimique et morpho-sédimentaire sont également développées. Le suivi écologique porte sur les macrophytes, la végétation rivulaire et le macrobenthos. L'évaluation et l'optimisation du protocole de suivi permettront de formuler des recommandations opérationnelles en termes de gains environnementaux, de durabilité et de transposabilité.

Abstract: The LIFE+ project "Restoring dynamics of Rhine alluvial habitats on the Rohrschollen Island", aims to restore the hydromorphological and ecological functioning of the hydrosystem: bedload dynamics, channel mobility, surface water-groundwater exchanges, renewal of pioneer ecosystems. Thus, the Bauerngrundwasser (anastomosing channel of Rohrschollen Island) was reconnected to the Rhine by a floodgate and a new upstream connection channel. The water input can reach 80 $m^3.s^{-1}$, leading to dynamic overflows. In order to assess the efficiency of the restoration project, an interdisciplinary monitoring is carried out and is based on the comparison of pre- and post-restoration dynamics. The geomorphic monitoring focuses on topographic (lasergrammetry, photogrammetry…), cartographic, sediment transport (pit-tags, erosion chains, hydrophone), hydrological and hydrogeological data. It takes also into account the temporal trajectory of the hydrosystem. Hydraulic, sedimentary, hydrogeologic, geochemical and morphodynamic 3D modelling are also developed. The ecological monitoring focuses on macrophytes, riparian vegetation and macrobenthos. The evaluation and optimization of the monitoring protocol aims to formulate operational recommendations in terms of environmental gains, sustainability and transferability. **Keywords:** Functional restoration, anastomosing channel, hydromorphology, interdisciplinary study, modelling

1 INTRODUCTION

The Upper Rhine is one of the most altered hydrosystem in Europe. Ninety percent of its floodplain has been converted to arable and industrial areas (Schneider, 2011). Restoration projects conducted for three decades aims to achieve different objectives: (1) ecological enhancement, (2) flood control, (3) groundwater protection and (4) recreational area. The Rohrschollen artificial island, which is a Natural Reserve, is located 8 km south-eastern the city of Strasbourg and results of several engineering works that have been implemented since the mid-19th century (fig.1-a) such as correction and canalization. Consequently, the main watercourse of the island, the Bauerngrundwasser, an anastomosing channel, is upstream disconnected (fig.1-b).

On the old-Rhine, an agricultural dam was built to raise groundwater level and allow flood mitigation during high flows. Therefore, water level is relatively stable on the Bauerngrundwasser and discharge is very low (less than 0.1 $m^3.s^{-1}$), inducing deposition of fine sediment. In this context, aquatic and riparian habitats were drastically impacted and alluvial species of the island are declining.

The LIFE+ project "Restauration de la dynamique des habitats alluviaux rhénans sur l'île du Rohrschollen", which is managed by the city of Strasbourg, aims to restore hydromorphological and ecological processes like bedload transport, channel mobility, surface water-groundwater exchanges and renewal of pioneer ecosystems. In order to reach these objectives, the anastomosing channel has been reconnected to the Rhine by a floodgate and a new upstream channel. Water inputs, depending on the discharge of the Rhine (tab.2), varied from 2 to 80 $m^3.s^{-1}$. A scientific monitoring based on hydraulic, hydrologic, morphologic, hydrogeology and hydroecology has been implemented to assess the effectiveness and the sustainability of the restoration project.

This study aims to present: (i) the long term temporal trajectory of the hydrosystem, which is useful for an *a priori* evaluation of the post-restoration evolution; (ii) the initial state based on a two-years pre-restoration monitoring; (iii) the first post-restoration interdisciplinary results; (iiii) the first results and scientific perspectives concerning the modelling of several compartments of the hydrosystem (hydraulic, hydrogeologic, sediment transport and morphodynamics).

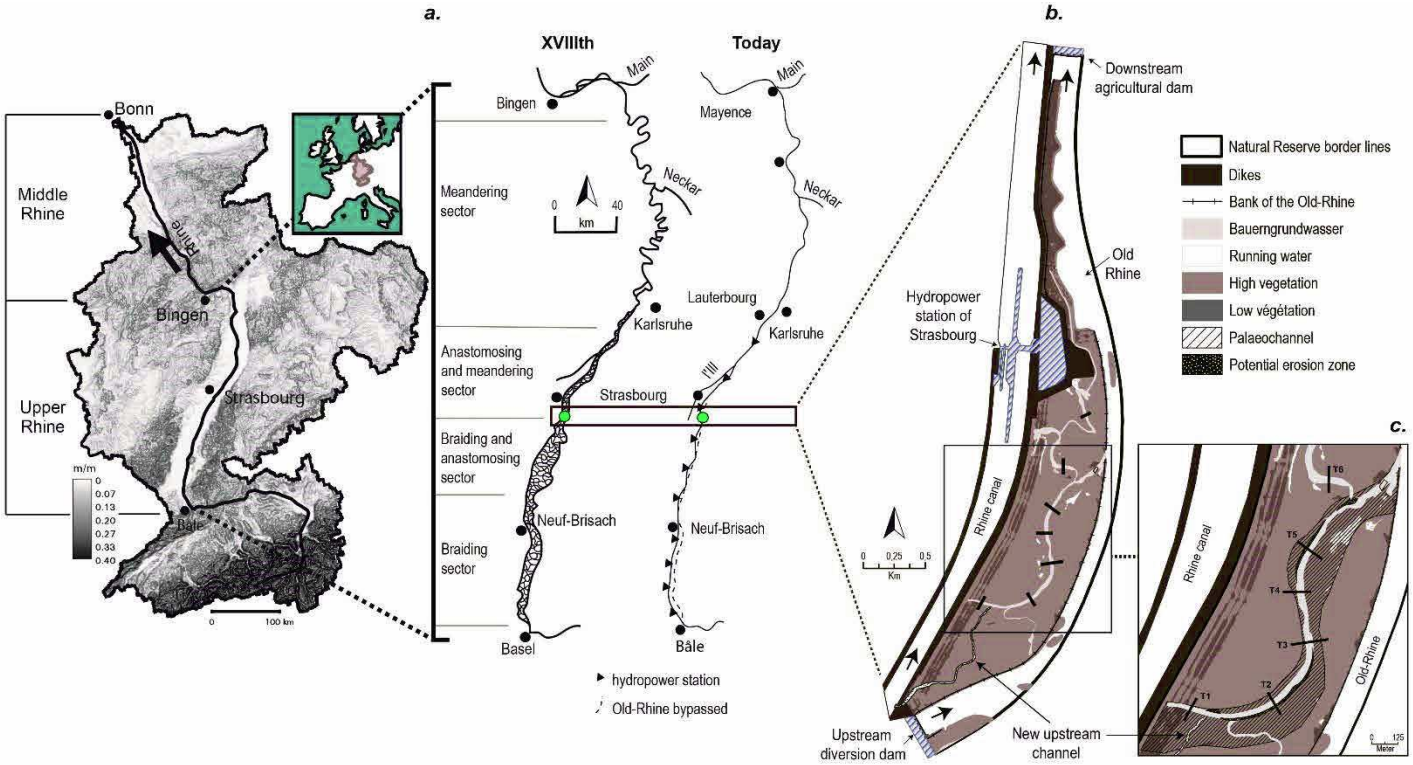


Fig.1 a- Localization of the Upper Rhine basin, sectorization based on its channel pattern (Carbiener and Trémolières, 2003; Schmitt et al. 2009), river course evolution from the 18th century to nowadays and localization of the study site. b- Rohrschollen Island. c- Lateral extension of the Rhine's palaeochannel and spatial extend of the potential lateral erosion areas (cf. results).

Tab.2. Protocol of water inputs in the new channel in terms of discharge and mean duration, depending on the Rhine hydrological regime.

Q Rhine ($m^3.s^{-1}$)	Q new channel ($m^3.s^{-1}$)	Days / year
Q<1550 or Q>2800	Q = 2	314
1565<Q<1650 or 2760<Q<2800	2<Q<20	11
1650<Q<1725 or 2725<Q<2760	20<Q<40	7
1725<Q<1755 or 2675<Q<2725	40<Q<60	4
1755<Q<1800 or 2650<Q<2675	60<Q<80	4
1800<Q<2650	Q=80	25

2 METHODS

Historical analysis was based on old maps, aerial photos and sedimentological investigations (granulometry, thickness and deposition process). Monitoring of pre- and post-restoration took into account geomorphic evolutions including both bedload transport (pit-tags, erosion chains, hydrophone) and morphological evolutions (lasergrammetry, photogrammetry, topographical and bathymetrical surveys); hydrological variations (limnimetry, piezometry, gauging, infrared thermography) and ecological changes (macrobenthos, riparian and aquatic vegetation, water, plant and sediment chemistry).

3 RESULTS - CONCLUSION

The cartographic overlaying (1828 – 2010) showed that the upstream of Bauerngrundwasser corresponded to the main talweg of the Rhine. The palaeochannel was partly filled by sand and silt deposition. Therefore, the current watercourse was integrated into recent fine sediments which can be partly remobilized by dynamics floods (fig.1-c).

The hydraulic monitoring showed that the low level of energy, during both low and high water flows, was due to the agricultural dam backwater effect. The surface water-groundwater exchanges were also limited channel clogging. Therefore, pre-restoration ecological surveys highlighted that the hydrosystem hosted typical lentic water communities.

Post-restoration monitoring aimed to show the effect of dynamic floods. Diachronic 3D modelling and topographical surveys indicated that the morphodynamic was active in the new upstream channel, in contrast to the former channel. Hydraulic, sedimentary, hydrogeologic and geochemical models may allow long term estimation of flood effects on unclogging, improvement of surface water-groundwater exchanges, bedload transport and risk of remobilization of historical pollutants in the hydrosystem. Corse grain size and active morphodynamics should allow the re-establishment of running water biological assemblages.

In association with pre-restoration state and temporal trajectory, the post-restoration monitoring was optimized to guide future management decisions taking into account efficiency and sustainability.

4 BIBLIOGRAPHY

Carbiener R. and Trémolières M. (2003). La ripisylve du Rhin et ses connexions, histoire, évolution naturelle et anthropique, 240-271 In: Piégay, H., Pautou, G., Ruffinoni, C. (eds), Les forêts riveraines des cours d'eau : écologie, fonctions et gestion, Institut pour le développement forestier, Paris, 461p.

Schmitt, L., Lebeau, M., Trémolières, M., Defraeye, S., Coli, C., Denny, E., Dillinger, M., Beck, T., Dor, J.-C., Gombert, P., Gueidan, A., Manné, S., Party, J.-P., Perrotey, P., Piquette, M., Roeck, U., Schnitzler, A., Sonnet, O., Vacher, J.-P., Vauclin, V., Weiss, M., Zacher, J.-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 n°spécial, 66-84.

Schneider, P., Vogt, T., Schirmer, M., Doetsch, J., Linde, N., Pasquale, N., Perona, P., Cirpka, O.A. (2011). Towards improved instrumentation for assessing river-groundwater interactions in a restored river corridor. Hydrology and Earth System Sciences 15, 2531–2549.

ANNEXE 6 : CONFERENCE PAPER ECOHYDROLOGY'2015, LYON

FUNCTIONAL RESTORATION OF A RHINE ANASTOMOSING CHANNEL: HISTORICAL EVOLUTION, FIRST RESULTS CONCERNING HYDROMORPHOLOGICAL MONITORING AND THERMAL INFRARED (TIR) REMOTE SENSING SURVEY

DOI: 10.13140/RG.2.1.2631.3200

David Eschbach[1], Laurent Schmitt[1], Guillaume Piasny[1], Laurent Pfister[2], Michèle Trémolières[3], Jean-Nicolas Beisel[4], Pascal Finaud-Guyot[5], Sylvain Weill[6], Sylvain Payraudeau[6], Gwenaël Imfeld[6], Pierre Grussenmeyer[7], Etienne Supper[7]

[1]LIVE, UMR 7362 - Unistra - CNRS - ENGEES, Faculté de Géographie et d'Aménagement, 3 rue de l'Argonne, 67083 Strasbourg
[2]Luxembourg Institute of Science and Technology, 41, rue du Brill, L-4422 Belvaux
[3]LIVE, UMR 7362 - Institut de Botanique, 28 rue Goethe, 67083 Strasbourg
[4]LIVE, UMR 7362 - ENGEES, 1 Quai Koch, 67067 Strasbourg
[5]ICube, UMR 7357 - Équipe Mécanique des Fluides, Département Mécanique, 2 rue Boussingault, 67000 Strasbourg
[6]LHyGES, UMR 7517 - Unistra - CNRS - EOST, 5 rue René Descartes, 67084 Strasbourg
[7]ICube, UMR 7357 - Équipe TRIO, Photogrammétrie et géomatique, INSA de Strasbourg, 67084 Strasbourg

Key words: Functional restoration, Rhine anastomosing channel, hydromorphological monitoring, airborne infrared remote sensing

1 INTRODUCTION

The Upper Rhine is one of the most altered hydrosystem in Europe. Ninety percent of its floodplain has been converted to arable and industrial areas (Schneider, 2011). Restoration projects conducted for three decades aims to achieve different objectives: (1) ecological enhancement, (2) flood control, (3) groundwater protection and (4) development of recreational areas.

The Rohrschollen artificial island, which is a Natural Reserve, is located 8 km south-eastern the city of Strasbourg and results of several engineering works that have been implemented since the mid-19th century (fig.1-a) such as correction and canalization. As a consequence, the main watercourse of the island, an anastomosing channel called "Bauerngrundwasser", is upstream disconnected (fig.1-b).

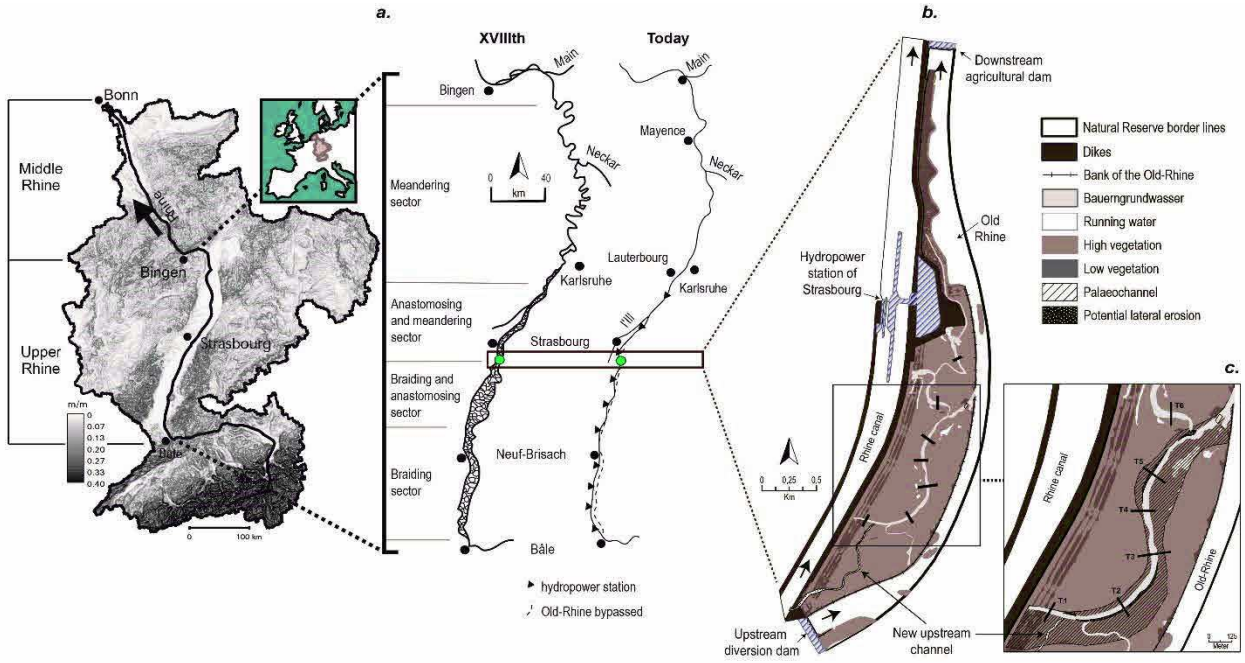
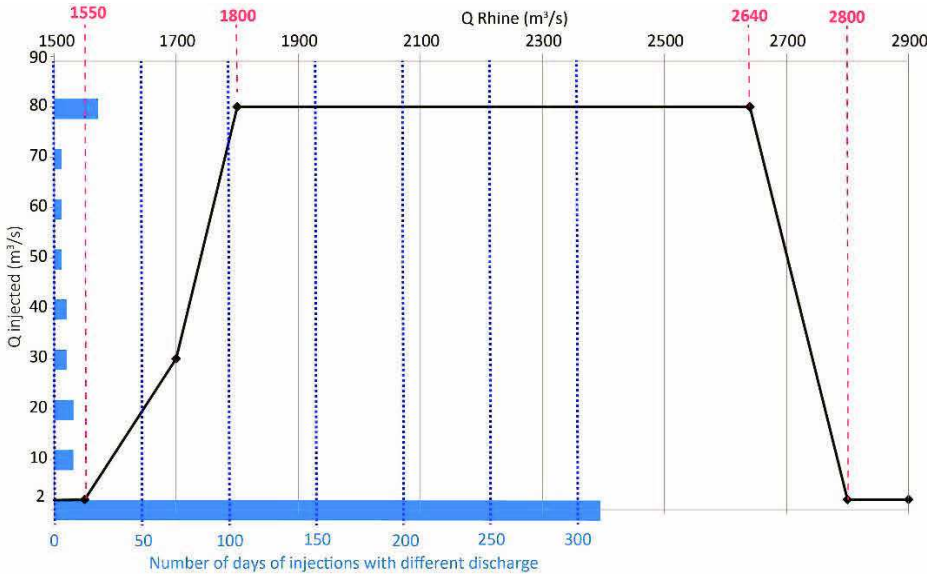


Fig.1 – a- Location of the Upper Rhine basin with a sectorization based on its channel pattern (Schmitt et al. 2009), river course evolution from the 18th century to nowadays and location of the study site. b- Map of the Rohrschollen Island. c- Lateral extension of the Rhine's palaeochannel and spatial extend of the potential lateral erosion areas (cf. results).

On the old-Rhine, an agricultural dam was built in the 1984 to raise groundwater level and allow flood retention during high flows. Hence, water level was extremely stable on the Bauerngrundwasser, discharge was very weak (less than 0.1 $m^3.s^{-1}$) and lack of floods induced clogging in the channel. In this context, aquatic and riparian habitats were drastically impacted and alluvial species of the island were declining.

The LIFE+ project "Restauration de la dynamique des habitats alluviaux rhénans sur l'île du Rohrschollen", managed by the city of Strasbourg, aims to restore hydromorphological and ecological processes such as bedload transport, channel dynamics, surface water-groundwater exchanges and renewal of pioneer ecosystems. In order to reach these objectives, the anastomosing channel has been reconnected to the Rhine by a floodgate and a new 800 meters long upstream channel. Water inputs, depending on the discharge of the Rhine (fig.2), range between 2 and 80 $m^3.s^{-1}$. A scientific monitoring based on hydraulics, hydrology, fluvial morphology, hydrogeology and ecology has been implemented to assess the effectiveness and the sustainability of the restoration measures.



Q Rhine	Q new channel	Days / year
Q<1550 or Q>2800	Q = 2	314
1565<Q<1650 or 2760<Q<2800	2<Q<20	11
1650<Q<1725 or 2725<Q<2760	20<Q<40	7
1725<Q<1755 or 2675<Q<2725	40<Q<60	4
1755<Q<1800 or 2650<Q<2675	60<Q<80	4
1800<Q<2650	Q=80	25

Fig.2 – Protocol of water inputs in the new channel in terms of discharge and mean duration, depending on the Rhine hydrological regime.

This study aims to present: (i) the long term trajectory of the hydrosystem, which is useful for the evaluation of the post-restoration evolution; (ii) the initial state based on a two-years pre-restoration monitoring; (iii) the first post-restoration hydromorphological results; (iiii) the first results of thermal infrared (TIR) remote sensing and scientific perspectives concerning the modelling of several compartments of the hydrosystem.

2 MATERIAL AND METHODS

2.4 Pre- and post-restoration monitoring

Historical analysis was based on old maps, aerial photos and sedimentological investigations (grain size, thickness and deposition process). Interdisciplinary monitoring of pre- and post-restoration took into account (i) geomorphic evolutions including bedload transport (pit-tags, erosion chains, hydrophone) and morphological evolutions (lasergrammetry, photogrammetry, topographical and bathymetrical surveys), (ii) hydrological and hydrogeological variations (limnimetry, piezometry, gauging, TIR) and (iii) ecological changes (macrobenthos, riparian and aquatic vegetation, water-plant-sediment chemistry).

2.5 Infrared thermographic remote sensing survey

In January 2015, a thermographic survey was led to collect infrared and visible images along the water system by using two infrared cameras (B425 and E40). A processing chain was built (fig. 3) to characterize and compare thermal patterns between the old channel and the new upstream connecting channel (Wawrzyniak and al., 2013).

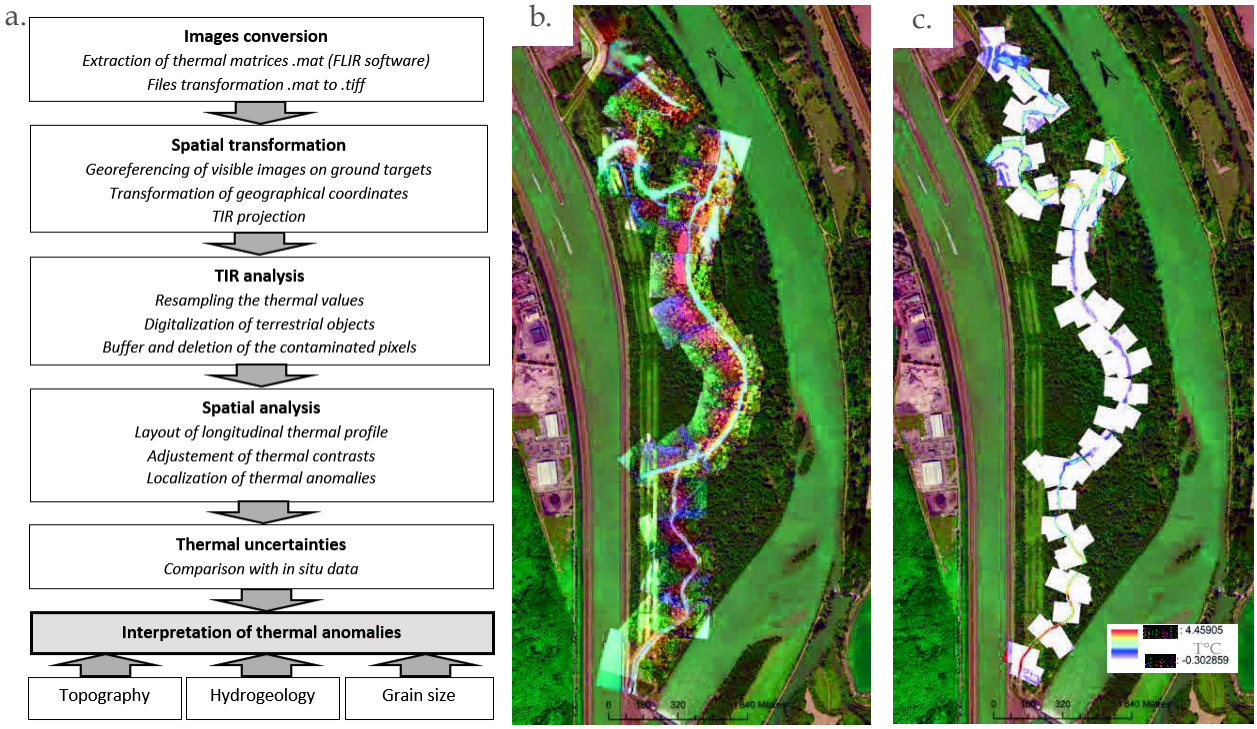


Fig. 3 – a- TIR processing chain. b- Georeferencing visible images on the Orthophoto 2013. c- Transformation and georeferencing TIR images on the visible images.

3 RESULTS

The cartographic overlaying (1828 – 2010) showed that the upstream of the Bauerngrundwasser corresponded to the main talweg of the Rhine. The palaeochannel is partly filled by sand and silt deposition. Therefore, the current watercourse was integrated into recent fine sediments which can be partly remobilized by dynamic floods (fig.1-c).

The hydraulic monitoring showed that the low level of energy, during both low and high water flows, was due to the agricultural dam backwater effect. The surface water-groundwater exchanges were also limited by channel clogging. Therefore, pre-restoration ecological surveys highlighted that the hydrosystem hosted typical lenitic water communities.

Diachronic 3D modelling, topographical and PIT-tags surveys (fig.4) indicated that morphodynamics was active in the new upstream channel in contrast with the former channel. On the new channel, TIR remote sensing allowed to identified areas of positive thermal anomalies (upwelling) on the downstream parts of the riffles, as it has been showed in others streams (Namour et al., 2015). Hydraulic, sedimentary, hydrogeological and geochemical models may allow median/long term estimation of flood effects on unclogging, bedload transport, surface water-groundwater exchanges and risk of remobilization of historical pollutants in the hydrosystem. Coarse grain size, active morphodynamics and diversity of thermal patterns should support the re-establishment of specific fluvial communities.

In association with pre-restoration state and temporal trajectory, the post-restoration monitoring should guide future management decisions taking into account efficiency and sustainability.

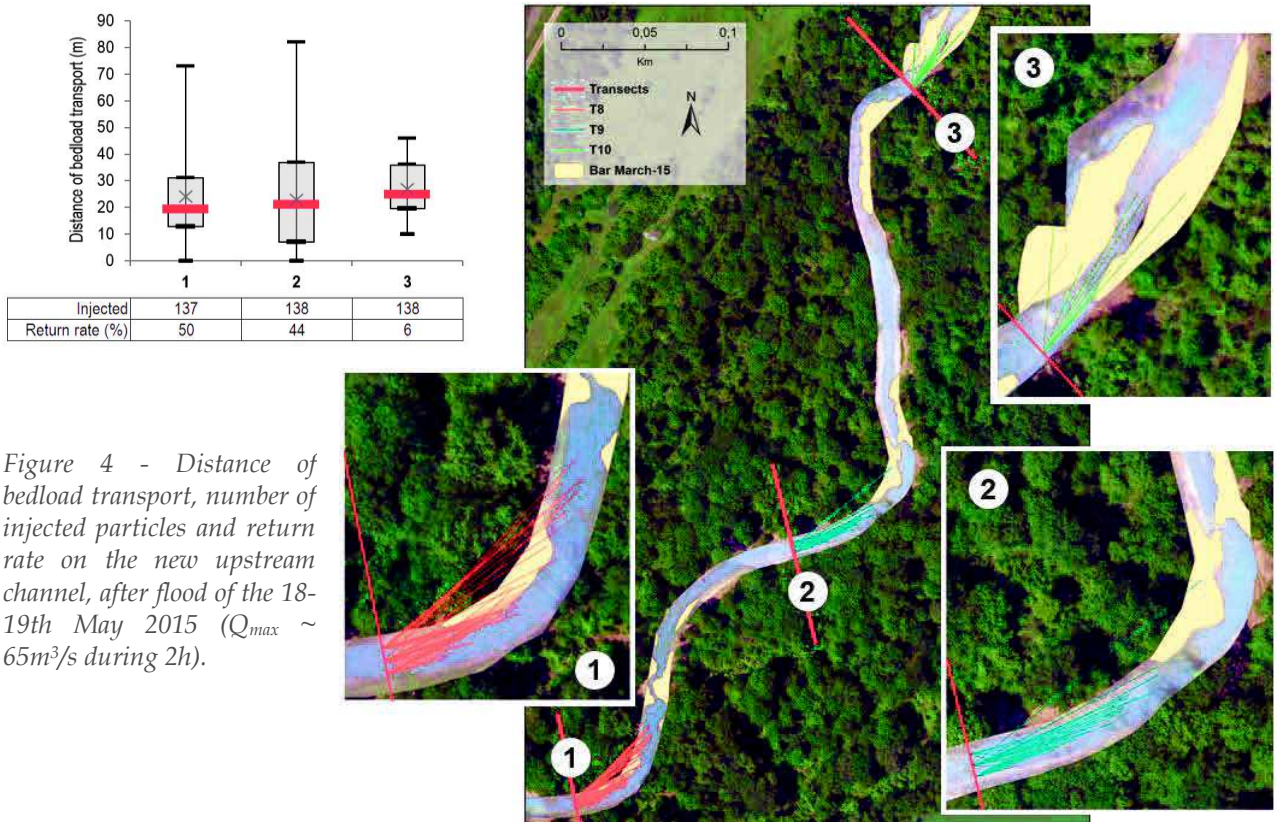


Figure 4 - Distance of bedload transport, number of injected particles and return rate on the new upstream channel, after flood of the 18-19th May 2015 (Q_{max} ~ 65m³/s during 2h).

Acknowledgements

This study is funded by: Communauté Européenne (LIFE08 NAT/F/00471), CNRS, ZAEU (Zone Atelier Environnement Urbain), Agence de l'eau Rhin-Meuse, DREAL Alsace, Région Alsace, Département du Bas-Rhin, Électricité De France, ville de Strasbourg. We acknowledge Rodolphe Montagnon which realized the flight by powered paraglider for the TIR acquisition.

References

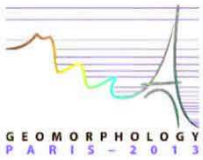
Namour, P., Schmitt, L., Eschbach, D., Moulin, B., Fantino, G., Bordes, C., Breil, P., (2015). *Stream pollution concentration in riffles geomorphic units (Yzeron basin, France)*, Science of the Total Environment. pp. 80-90.

Schmitt, L., Lebeau, M., Trémolières, M., Defraeye, S., Coli, C., Denny, E., Dillinger, M., Beck, T., Dor, J.-C., Gombert, P., Gueidan, A., Manné, S., Party, J.-P., Perrotey, P., Piquette, M., Roeck, U., Schnitzler, A., Sonnet, O., Vacher, J.-P., Vauclin, V., Weiss, M., Zacher, J.-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 n°spécial, pp. 66-84.

Schneider, P., Vogt, T., Schirmer, M., Doetsch, J., Linde, N., Pasquale, N., Perona, P., Cirpka, O.A. (2011). *Towards improved instrumentation for assessing river-groundwater interactions in a restored river corridor*. Hydrology and Earth System Sciences 15, pp. 2531–2549.

Wawrzyniak, V., Piégay, H., Allemand, P., Vaudor, L., Grandjean, P. (2013). *Prediction of Water Temperature Heterogeneity of Braided Rivers Using Very High Resolution Thermal Infrared (TIR) Images*. International Journal of Remote Sensing 34, no. 13, pp. 4812–31.

ANNEXE 7 : ABSTRACT IAG 8TH CONFERENCE, PARIS



EVALUATING A FUNCTIONAL HYDROMORPHOLOGICAL RESTORATION OF A LATERAL CHANNEL OF THE UPPER RHINE (FRANCE): FIRST RESULTS AND IMPLICATIONS OF THE TEMPORAL TRAJECTORY TO RESTORATION SUSTAINABILITY

DOI: 10.13140/2.1.3952.7047

David Eschbach[(a)], Laurent Schmitt[(a)], Arthur Zimmermann[(a)], Quentin Lejeune[(a)], Pascal Finaud-Guyot[(b)]

[(a)] Université de Strasbourg – LIVE (Laboratoire Image, Ville, Environnement) UMR 7362 CNRS-Unistra-ENGEES – LTER – « Zone Atelier Environnementale Urbaine »
[(b)] ICube, UMR 7357, Equipe Mécanique des Fluides, Département Mécanique, 2 rue Boussingault, 67000 Strasbourg

The Upper Rhine hydrosystem exhibits a high biodiversity. Since mid-19th century, several engineering projects developed for flood control, agriculture, navigation and hydropower, have drastically impacted aquatic and riparian habitats. In this context, the specific alluvial species of the Rohrschollen natural reserve is declining. Its main watercourse, the Bauerngrundwasser, an anastomosing channel of the Rhine, has now a constant and low discharge (under 0.1m³/s), inducing a high rate of fine sediment deposition. During periods of high flow, the site is flooded but water has no energy due to a dam's backwater effect.

The LIFE+ project "Restauration de la dynamique des habitats alluviaux rhénans sur l'île du Rohrschollen", managed by the City of Strasbourg, plans to restore the hydromorphological and ecological functionality of the hydrosystem: bedload dynamics, channel mobility, surface water-groundwater exchanges, renewal of pioneer ecosystems… Thus, the Bauerngrundwasser will be reconnected to the Rhine by building a new upstream connection channel. Water input will attain 80m³/s, leading to dynamic floods and making of this project one of the most ambitious for the French side.

To assess the efficiency of this restoration project, a hydromorphological monitoring (included in an inter-disciplinary project) is carried out and is based on the comparison of pre- and post-restoration dynamics. It includes in particular a topographic (LiDAR, theodolite…), a cartographic (aerial photos), a sediment transport (sampling, PIT tags, erosion chains…), a hydrological (water level sensors, gauging) and a hydrogeological (piezometers) studies. This paper will give the first results, as well as the implications of the temporal trajectory of the system (historical study based on old maps, aerial photos and sedimentological investigations), which have notably been got in order to give some prospective guidelines concerning the efficiency and sustainability of the restoration.

ANNEXE 8 : ABSTRACT WALPHY CONFERENCE, NAMUR (BELGIQUE)

INTERDISCIPLINARY MONITORING OF AN HYDROMORPHOLOGICAL RESTORATION OF A RHINE ANASTOMOSING CHANNEL. FIRST RESULTS

DOI : 10.13140/2.1.4345.9200

David Eschbach[a], Laurent Schmitt[a], Michèle Trémolières[b], Corinne Grac[b], Pascal Finaud-Guyot[c], Arthur Zimmermann[a], Quentin Lejeune[a]

[a] Université de Strasbourg – LIVE (Laboratoire Image, Ville, Environnement) UMR 7362 CNRS-Unistra-ENGEES – LTER – « Zone Atelier Environnementale Urbaine »
[b] Université de Strasbourg. Institut de Botanique, 28 rue Goethe, 67083 Strasbourg cedex, Laboratoire Image, Ville, Environnement – LIVE UMR 7362 UDS-CNRS-ENGEES.
[c] ICube, UMR 7357, Equipe Mécanique des Fluides, Département Mécanique, 2 rue Boussingault, 67000 Strasbourg

The Upper Rhine hydrosystem exhibits a high biodiversity. Since mid-19th century, several engineering projects developed for flood control, agriculture, navigation and hydropower, have drastically impacted aquatic and riparian habitats. In this context, the specific alluvial species of the Rohrschollen natural reserve is declining. Its main watercourse, the Bauerngrundwasser, an anastomosing channel of the Rhine, has now a constant and low discharge (under 0.1 $m^3.s^{-1}$), inducing a high rate of fine sediment deposition. During periods of high flow, the site is flooded but water has no energy due to a dam's backwater effect.

The LIFE+ project "Restauration de la dynamique des habitats alluviaux rhénans sur l'île du Rohrschollen", managed by the City of Strasbourg, plans to restore the hydromorphological and ecological functionality of the hydrosystem: bedload dynamics, channel mobility, surface water-groundwater exchanges, renewal of pioneer ecosystems…Thus, the Bauerngrundwasser will be reconnected to the Rhine by building a new upstream connection channel. Water input will attain 80m3/s, leading to dynamic floods and making of this project one of the most ambitious for the French side.

To assess the efficiency of this restoration project, an inter-disciplinary monitoring is carried out and is based on the comparison of pre- and post-restoration dynamics. It includes geomorphic and ecological studies. Especially, the geomorphic focuses on topographic, cartographic, sediment transport, hydrological and hydrogeological data, as well as the implications of the temporal trajectory of the system (historical study based on old maps, aerial photos and sedimentological investigations). The ecological focuses on macrophytes, riparian vegetation and macrobenthos.

ANNEXE 9 : RÉSUMÉ COLLOQUE REVER 5, ROUEN

RESTAURATION FONCTIONNELLE D'UNE ANNEXE HYDRAULIQUE RHÉNANE : LE BAUERNGRUNDWASSER SUR L'ÎLE DU ROHRSCHOLLEN (FRANCE). PARTENARIAT GESTION - RECHERCHE POUR L'ESTIMATION DES BÉNÉFICES HYDRO-MORPHOLOGIQUES ET ÉCOLOGIQUES

DOI: 10.13140/2.1.1510.7201

David Eschbach[1], Frédéric Lonchampt[2], Laurent Schmitt[1], Michèle Tremolieres[3], Corinne Grac[4], Pascal Finaud-Guyot[4-5], Jean-Nicolas Beisel[4]

[1] Université de Strasbourg, LIVE UMR 7362 CNRS, Faculté de Géographie et d'Aménagement, 3 rue de l'Argonne 67083 Strasbourg cedex
[2] Ville de Strasbourg, Service des Espaces Verts et de la nature, Cité Administrative, 1 parc de l'Etoile, 67720 Strasbourg cedex
[3] Université de Strasbourg, LIVE UMR 7362 CNRS, Institut de Botanique, 28 rue Goethe 67083 Strasbourg cedex
[4] Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, LIVE UMR 7362 CNRS, 1 quai Koch BP 61039, 67070 Strasbourg Cedex
[5] ICube, Département Mécanique des Fluides et des Solides, UMR 7357 CNRS, 2 rue Boussingault 67000 Strasbourg

Le paysage actuel du Rhin supérieur est le résultat de plus d'un siècle et demi d'anthropisation, qui se traduit aujourd'hui par une forte dégradation des habitats et biocénoses alluviaux. L'île artificielle du Rohrschollen, classée en Réserve Naturelle depuis 1997, est un exemple de cette artificialisation. Limitée à l'ouest par un canal de dérivation et à l'est par le Vieux-Rhin, cette île est inondée selon une fréquence faible pour l'écrêtement de crues, mais les submersions restent dans ce cas statiques, ce qui renforce le colmatage du Bauerngrundwasser. Hors période de crue, le débit qui alimente cette anastomose est extrêmement faible (~ 0,1 $m^3.s^{-1}$). Le fonctionnement actuel conduit à une perte progressive du caractère alluvial du milieu.

En 2010, la Ville de Strasbourg a engagé un ambitieux projet LIFE+ « Restauration de la dynamique des habitats alluviaux rhénans de l'île du Rohrschollen » visant à restaurer les fonctionnalités hydro-morphologique et écologique de l'hydrosystème, tout en tenant compte des contraintes anthropiques actuelles.

La création d'une prise d'eau en amont de l'île doit permettre d'injecter des débits variant de 2 à 80 $m^3.s^{-1}$ (en fonction du débit du Rhin) et de réalimenter le Bauerngrundwasser par l'intermédiaire d'un chenal artificiel non protégé volontairement sous-dimensionné. Ces aménagements permettront de recréer des inondations dynamiques (morphodynamique active du chenal, transport solide, échanges nappe-rivière, habitabilité…), un processus-clé dans le fonctionnement d'un hydrosystème fluvial.

Depuis 2012, une convention de partenariat réunit la Ville de Strasbourg et le CNRS pour engager un suivi scientifique interdisciplinaire (hydromorphologie, écologie…). Une comparaison pré- et post-restauration doit permettre de quantifier les bénéfices du projet à court terme (2 x 18 mois). De plus, les résultats obtenus permettront de proposer au gestionnaire un protocole de suivi simplifié, mais fonctionnel, pour un suivi ultérieur à moyen et long termes et à moindre coût. Une modélisation hydraulique (avec transport solide et évolution des formes fluviales) permettra de simuler des scénarios de gestion future pour guider les choix opérationnels.

ANNEXE 10 : RÉSUMÉ CONFÉRENCE EFESE, PARIS

ÉVALUATION DE LA RESTAURATION HYDROMORPHOLOGIQUE FONCTIONNELLE D'UNE ANASTOMOSE RHÉNANE : TRAJECTOIRE TEMPORELLE, MONITORING PRÉ-RESTAURATION, MODÉLISATION (RHIN SUPÉRIEUR, BAS-RHIN, RÉSERVE NATURELLE DE L'ÎLE DU ROHRSCHOLLEN)

DOI: 10.13140/RG.2.1.4478.1283

David Eschbach[(1)], Laurent Schmitt[(1)], Michèle Tremolieres[(2)], Jean-Nicolas Beisel[(3)], Corinne Grac[(3)], Pascal Finaud-Guyot[(3-4)], Sylvain Payraudeau[(5)], Sylvain Weill[(5)], Gwenaël Imfeld[(5)], Pierre Grussenmeyer[(6)]

[(1)]LIVE, UMR 7362 – Unistra – CNRS - ENGEES, Faculté de Géographie et d'Aménagement, 3 rue de l'Argonne, 67083 Strasbourg
[(2)]LIVE - Institut de Botanique, UMR 7362, 28 rue Goethe, 67083 Strasbourg
[(3)]LIVE - ENGEES, UMR 7362, 1 Quai Koch, 67067 Strasbourg
[(4)]ICube, UMR 7357, Équipe Mécanique des Fluides, Département Mécanique, 2 rue Boussingault, 67000 Strasbourg
[(5)]LHyGES UMR 7517 Unistra - CNRS – EOST, 5 rue René Descartes, 67084 Strasbourg
[(6)]ICube UMR 7357, Équipe TRIO – Photogrammétrie et géomatique, INSA de Strasbourg, 67084 Strasbourg

L'île artificielle du Rohrschollen résulte d'aménagements successifs du Rhin Supérieur (correction, régularisation, canalisation) débutés au milieu du XIX^{ème} siècle. Ces travaux perturbent profondément les milieux aquatiques et riverains de l'hydrosystème. Dans ce contexte, les espèces alluviales spécifiques de l'île du Rohrschollen sont en déclin. Son cours d'eau principal, l'anastomose du Bauerngrundwasser, présente un débit extrêmement faible (de l'ordre de 0,1 $m^3.s^{-1}$) quasi-constant, et a connu une forte contraction par des dépôts latéraux d'alluvions fines. Lors de crues intenses de faible occurrence, les inondations sont contrôlées par un barrage agricole situé à l'aval de la réserve, réduisant très fortement les capacités de transport.

Le projet LIFE+ "Restauration de la dynamique des habitats alluviaux rhénans sur l'île du Rohrschollen", coordonné par la ville de Strasbourg, a pour objectif de restaurer le fonctionnement hydro-morphologique et écologique de l'hydrosystème : transport sédimentaire grossier, mobilité latérale, échanges nappe-rivière, rajeunissement des successions végétales, renforcement du caractère hygrophile de la végétation… À cet effet, un chenal de connexion amont nouvellement creusé permet de reconnecter le Rhin au Bauerngrundwasser. Un ouvrage hydraulique permet d'injecter un débit permanent de 2 $m^3.s^{-1}$ depuis le 13 juin 2014. Les débits injectés pourront être nettement plus élevés lors des crues du Rhin, avec un maximum de 80 $m^3.s^{-1}$ (injection-test prévue le 01/12/2014), permettant à l'hydrosystème de recouvrer des inondations dynamiques et faisant de ce projet l'un des plus ambitieux sur la rive française.

Un suivi interdisciplinaire (hydro-géomorphologie, écologie…) fondé sur la comparaison des dynamiques pré- et post-restauration permet d'évaluer l'efficacité du projet en tenant compte de la trajectoire temporelle longue de l'hydrosystème. Le suivi des compartiments abiotiques intègre la topographie (lasergrammétrie, photogrammétrie…), la cartographie, le transport sédimentaire (PIT-tags, chaînes d'érosion, hydrophone), l'hydrologie, l'hydrogéologie... Des modélisations hydraulique, hydrogéologique, géochimique et morpho-sédimentaire sont également développées. L'évaluation et l'optimisation du protocole de suivi permettront de formuler des recommandations opérationnelles en termes de gains environnementaux, de durabilité et de transposabilité.

ANNEXE 11 : ABSTRACT EGU, VIENNE (AUTRICHE)

DIACHRONIC 3D MODELLING TO MONITOR FLUVIAL MORPHODYNAMICS IN A RESTORED HYDROSYSTEM (UPPER RHINE, ROHRSCHOLLEN ISLAND)

https://www.researchgate.net/publication/315383469

Mathieu Koehl (1), David Eschbach (2), Pierre Grussenmeyer (1), Laurent Schmitt (2), and Samuel Guillemin (1)

(1) INSA de Strasbourg, ICUBE – UMR 7357, TRIO, Université de Strasbourg/CNRS/INSA de Strasbourg, France (firstname.lastname@insa-strasbourg.fr), (2) Université de Strasbourg, LIVE - UMR 7362 CNRS/ENGEES, LTER – "Zone Atelier Environnementale Urbaine", Strasbourg, France (firstname.lastname@live-cnrs.unistra.fr)

The Rohrschollen artificial island is a Natural Reserve located 8 km South-East the city of Strasbourg. The island results from several engineering works (correction and canalization) lead on the reach since the beginning of the 19th century to improve flood control, agriculture, navigation and to produce hydropower. Consequently, the main channel of the island (called old channel) was upstream disconnected, hydromorphological functioning was altered (narrowing and clogging, decreasing of morphodynamics and of surface water-groundwater exchanges. . .) and specific alluvial biodiversity declined drastically.

In the framework of a LIFE+ European program, an ambitious restoration project was carried out by the city of Strasbourg with the aims to restore hydromorphological dynamics and improve typical ecological characteristics of the hydrosystem: bedload dynamics, channel mobility, surface water-groundwater exchanges and renewal of pioneer ecosystems… To achieve these objectives, a new upstream channel was dug in the floodplain and a large floodgate was built in order to reconnect the old channel with the Rhine. Water input is about 2 $m^3.s^{-1}$ and could attain a maximum of 80 $m^3.s^{-1}$ during Rhine's floods. This new hydrological dynamics allowed to recover dynamic floods and high morphological activities, especially on the new channel which was intentionally undersized. As part of the partnership between the LIVE laboratory and the INSA of Strasbourg, a monitoring of fluvial morphodynamics was carried out, based on a diachronic 3D modelling survey.

Focused on three bending sectors of the channel, the initial state was realized in 2014, before the first flood, by a geo-referenced 3D model recorded by Terrestrial Laser Scanning (TLS) and panoramic images. This method was used as a 3D digital reference model and setup by differential GNSS techniques. The long-term diachronic monitoring was based on terrestrial photogrammetry surveys followed by dense matching techniques after each flood. This low cost method has the advantage to be very fast in the acquisition. Bathymetrical data were collected by tacheometry and total station on the whole channel. Based on a diachronic comparison of the obtained models, morphological changes were analyzed and volumes of eroded/deposed sediments were quantified in detailed morphological budgets (elementary 20 m long sections). The 3D models will be complementary with other field techniques like the tracking of passive integrated transponders, active layer evolution and floodplain deposition survey.

The results show the interest of the diachronic 3D modelling methods to estimate the intensity of the mor- phodynamic adjustments of the restored hydrosystem. These methods allows to (i) refine the understanding of the river dynamics on fine scale (sections), (ii) quantify sedimentary budgets on large scale (channel) and, (iii) predict evolutionary perspectives on the middle term.

The PICO reports the various stages of the implementation of a topographic survey of the channel as well as an overview of the obtained results, in particular a morphological diachronic comparison of the channel.

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

David ESCHBACH

Trajectoire temporelle et monitoring hydro-morphologique d'une anastomose rhénane restaurée :

le Bauerngrundwasser dans l'île du Rohrschollen (Strasbourg, France)

Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet LIFE+ qui vise à restaurer le fonctionnement hydromorphologique d'un hydrosystème rhénan. Une étude planimétrique couplée à des analyses hydromorphologiques et sédimentologiques ont permis (i) d'améliorer la compréhension des dynamiques d'ajustement passées et (ii) d'identifier les principales limites du projet. Les évolutions morphologiques post-restauration ont été suivies à l'aide d'une combinaison de méthodes géodésiques et géomorphologiques afin de déterminer précisément les volumes déposés / exportés à différentes échelles spatio-temporelles. Enfin, la thermographie infra-rouge aéroportée a permis de mettre en évidence les liens entre la répartition spatiale des anomalies thermiques, les caractéristiques morphodynamiques et les héritages géomorphologiques. L'approche interdisciplinaire développée dans ce travail a permis de guider les choix opérationnels pour optimiser le suivi et l'évaluation des restaurations fonctionnelles futures.

Mots-clés - Rhin Supérieur ; Restauration fonctionnelle ; Hydromorphologie ; Monitoring ; Trajectoire temporelle longue; Modélisation 3D ; Infra-rouge thermique ; Interdisciplinarité ; Indicateur de fonctionnement ; Efficacité ; Durabilité.

Résumé en anglais

This study is part of a LIFE+ project which aims to restore hydromorphological functioning of a Rhine hydrosystem. A planimetric study combined with hydromorphological and sedimentological analysis allowed to (i) improve understanding of past adjustment dynamics and (ii) identify main limitations of the project. Post-restoration morphological changes were monitored by geodesic and geomorphological methods combination in order to determine accurate volumes of sediment deposited / exported at different spatio-temporal scales. Finally, airborne thermal-infrared was used to highlight the relationship between spatial distribution of thermal anomalies, morphodynamic characteristics and inherited geomorphological features. Interdisciplinary approach leaded in this study was able to guide decision-makers choices in order to optimise the monitoring and assess future functional restorations.

Keywords – Upper Rhine; Functional restoration; Hydromorphology; Monitoring; Long-term temporal trajectory; 3-D modelling; Thermal infrared; Interdisciplinarity; Functional indicators; Efficiency; Sustainability.