

Intérêts de la géomorphologie historique et expérimentale pour la restauration de cours d'eau : le cas du vieux Rhin en aval du barrage de Kembs (France, Allemagne)

Fanny ARNAUD¹, Hervé PIEGAY¹, Laurent SCHMITT²,
Anne-Julia ROLLET³, David BEAL¹

¹ CNRS UMR 5600 EVS - Université de Lyon - e-mail: fanny.arnaud@ens-lyon.fr

² CNRS UMR 7362 LIVE - Université de Strasbourg - e-mail: laurent.schmitt@unistra.fr

³ CNRS UMR 6554 GEOPHEN-LETG - Université de Caen Basse-Normandie - e-mail: anne-julia.rollet@unicaen.fr

RÉSUMÉ. – Les projets de restauration se sont multipliés depuis la mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau qui vise le bon état écologique des masses d'eau en 2015. La géomorphologie historique et expérimentale s'avère utile pour guider les actions qui portent sur le compartiment physique des cours d'eau. Une démarche de ce type a été engagée sur le « Vieux Rhin » court-circuité entre les barrages de Kembs et de Breisach. La rectification, la mise en place d'épis et la construction du Grand Canal d'Alsace ont profondément altéré l'hydro-morphologie du tronçon, provoquant une incision, un pavage du lit et une simplification des habitats aquatiques et riverains. Cet article synthétise les principaux résultats d'une étude géomorphologique réalisée dans le cadre d'un programme européen INTERREG et d'actions engagées par Electricité de France (EDF) pour évaluer les possibilités de restaurer la dynamique sédimentaire du Vieux Rhin. Une analyse rétrospective multi-échelle a permis de mieux comprendre la trajectoire temporelle d'ajustement du tronçon et d'estimer sa sensibilité aux changements. Une recharge sédimentaire expérimentale a été suivie *in situ* afin d'analyser les risques environnementaux potentiels, estimer les premiers effets morphologiques et tester des indicateurs physiques d'évaluation. Ces deux approches ont permis de formuler des recommandations concrètes de restauration à large échelle et durables.

Mots-clés : géomorphologie ; analyse diachronique ; recharge sédimentaire ; restauration ; Rhin court-circuité

Using historical and experimental geomorphology for restoring rivers: the case of the Old Rhine downstream of the Kembs dam (France, Germany)

ABSTRACT. – The European Water Framework Directive (2000/60/CE) requires to achieve the good ecological status of bodies of surface water by 2015. Growing efforts have thus been made in last decades for restoring physical processes and associated ecological habitats of altered river reaches. Retrospective and experimental fluvial geomorphology should be used to help to design restoration practices acting on the physical component of rivers. Such approaches have been investigated recently on a reach of the Upper Rhine (French-German border). During the last two centuries, channel rectification, groyne fields, damming and lateral canal construction heavily impacted the hydro-sedimentary functioning of the 50 km-long "Old Rhine" by-passed between Kembs and Breisach, causing channel pattern simplification, bed incision, armouring and riverine and aquatic habitats alteration. This paper reports a geomorphic analysis realized within two complementary and interdisciplinary programs to evaluate the feasibility for restoring sediment transport and alluvial morphodynamics: 1) the European program "INTERREG Redynamization of the Old Rhine" (2009-2012); 2) the program "sediment reintroduction from controlled bank erosion" initiated by Electricity de France (EDF) within the Kembs hydropower plant relicensing process since 2003. On one hand, a space-time analysis compiling archive and field data over the period 1828-2012 was aimed at better understanding the Old Rhine evolutionary trajectory and estimating the sensitivity to channel change. On the other hand, an experimental sediment reintroduction from an artificial input operation into the channel was monitored *in situ* with bathymetric and topographic surveys, bedload tracing, aerial imagery and grain size sampling, in order to assess first morpho-ecological effects, potential risks and test evaluation indicators. Recommendations for defining large-scale and sustainable restoration plans were discussed following diachronic and experimental approaches.

Key-words: geomorphology ; diachronic analysis ; sediment reintroduction ; restoration ; by-passed Rhine river

I. INTRODUCTION

Les aménagements de cours d'eau, tels que la chenalisation et les barrages, sont connus pour modifier les flux

liquides et solides qui façonnent la dynamique fluviale. Ces perturbations ont des répercussions écologiques et socio-économiques (affouillement d'ouvrages dans un chenal incisé, altération des habitats aquatiques et riverains, réduction de la biodiversité...) [Bravard et Petts, 1993 ; Gregory, 2006]. Avec la mise en œuvre de la Directive Cadre

* Fanny Arnaud a obtenu le prix Henri Milon 2014.

Européenne sur l'Eau (2000/60/CE) qui vise l'atteinte du « bon état écologique » des masses d'eau en 2015, les projets de restauration se sont multipliés ces dernières années, notamment sur les grands fleuves [Habersack et Piégay, 2008 ; Jungwirth, 2012]. Les mesures récentes sont focalisées sur les processus plutôt que sur les formes, afin de restaurer durablement les diverses fonctions des hydrosystèmes [Ward *et al.*, 2001 ; Wohl *et al.*, 2005 ; Beechie *et al.*, 2010]. Par exemple, l'introduction artificielle de charge grossière dans le chenal représente un moyen de remédier à un transport solide déficitaire en aval de barrages ou suite à des extractions sévères de granulats, pour minimiser durablement les changements morphologiques associés sur un continuum de plusieurs dizaines de km. Des recharges sédimentaires ont été engagées sur le Rhin en aval du barrage d'Iffezheim [WSA, 2003], le Danube en aval de Vienne [Jungwirth, 2008], l'Ain en amont de Lyon [Rollet *et al.*, 2013], ou encore l'Aar en Suisse [Schälchli *et al.*, 2010].

Une démarche géomorphologique s'avère utile dans ce type d'opérations qui touchent au compartiment physique des cours d'eau : la compréhension de la trajectoire historique d'ajustement est importante pour définir des objectifs de gestion réalistes compte-tenu des changements passés, et aider à anticiper les trajectoires post-restauration [Dufour et Piégay, 2009 ; Mika *et al.*, 2010]. Il s'agit aussi de réaliser des expérimentations *in situ*, souvent en lien avec des simulations numériques, afin de tester des modalités de recharge et des protocoles de suivi, évaluer les risques potentiels et programmer des restaurations de plus grande ampleur, selon une gestion adaptative [Woolsey *et al.*, 2005]. Des démarches de ce type ont été récemment engagées sur le Rhin franco-allemand.

Le présent article synthétise un travail de recherche [Arnaud, 2012] conduit sur le « Vieux Rhin » entre Kembs et Breisach, tronçon de 50 km artificialisé depuis le 19^{ème} siècle. L'étude s'inscrit dans une problématique de restauration du transport solide et de la dynamique alluviale au sein de deux projets : 1) le projet européen « INTERREG - Redynamisation du Vieux Rhin » (2009-2012), porté par la Région Alsace et réunissant 19 équipes de recherche et gestionnaires sous la coordination scientifique du CNRS [Piégay *et al.*, 2010] ; 2) le projet « Suivi de la recharge sédimentaire du Vieux Rhin par érosion maîtrisée », initié en 2003 par Electricité de France (EDF) dans le cadre du renouvellement de concession du barrage de Kembs [Clutier *et al.*, 2012]. La trajectoire historique d'ajustement a d'abord été reconstituée, puis une expérience de recharge sédimentaire a été suivie *in situ*. Ces deux approches ont permis de formuler des propositions pour une restauration durable et applicable sur l'ensemble du tronçon.

II. SITE D'ETUDE

II.1. Contexte géographique

Avec un bassin versant de 185 000 km² et un linéaire de 1320 km, le Rhin est le premier fleuve d'Europe occidentale. Le tronçon du Vieux Rhin discuté dans cet article s'écoule dans le fossé d'effondrement du Rhin Supérieur, qui s'étend sur 35 km de large et 310 km de long entre Bâle (Suisse) et Bingen (Allemagne). Le tronçon d'étude débute 4 km en aval de Bâle, au débouché de la vallée suisse du Haut-Rhin, sur un large cône de déjection composé d'alluvions fluvioglaciales atteignant 250 m d'épaisseur [Schmitt, 2010].

Le régime hydrologique du Rhin à Bâle est de type nivo-glaciaire, les deux mois de plus hautes eaux étant juin

et juillet. Le module est de 1050 m³/s, l'étiage inter-annuel est de 450 m³/s et les crues biennales, décennales et centennales sont de 2800 m³/s, 3700 m³/s et 4650 m³/s, respectivement (période 1891-2011). La crue la plus importante enregistrée à Bâle depuis 1808 a eu lieu le 13 juin 1876 (5700 m³/s).

Le secteur Bâle-Breisach a une pente de 0,98 ‰. Il correspond à la « zone des tresses » définie par Carbiener [1970] d'après l'évolution post-würmienne du profil en long, la morphologie du fond de vallée et le tracé en plan de 1828. Le Rhin « sauvage » d'avant la correction était composé de chenaux multiples, de bancs graveleux, d'îles végétalisées et de hauts-fonds gênant la navigation, au sein d'une plaine inondable large de 3 km.

II.2. Contexte historique des aménagements

La correction du fleuve a été entreprise entre 1842 et 1876 selon les plans de l'ingénieur badois J.G. Tulla [1825] pour la protection contre les inondations, la fixation de la frontière et l'amélioration de la navigation. Le linéaire a été raccourci de 14 % entre Bâle et Lauterbourg, et fixé entre deux digues de basses eaux espacées de 200 à 250 m, afin de provoquer une incision et réduire les débordements. Le processus s'est exprimé bien au-delà des attentes initiales : dans la partie amont, suite à un enfoncement de 4 m, l'affleurement rocheux d'Istein constituait un obstacle infranchissable par les bateaux pendant environ 330 jours par an dans les années 1920. Dans la partie aval, l'augmentation des vitesses d'écoulement et le déplacement aléatoire des bancs compliquaient aussi la navigation [Humbert et Descombes, 1985].

Le projet de régularisation (1931-1939) de M. Honsell, inspiré des travaux de H. Girardon sur le Rhône, a été engagé pour rétablir le trafic fluvial jusqu'à Bâle. Des épis ennoyés ont été implantés tous les 100 m, l'alternance de « champs d'épis » de 1 km de long délimitant un chenal sinusoïdal d'étiage de 75 m de largeur et 2 m de profondeur, navigable au moins 318 jours par an [Schneider, 1966].

Parallèlement à ces travaux, le projet de canalisation a été réalisé en rive française, à la suite du Traité de Versailles de 1919 qui conféra à la France « le droit exclusif à l'énergie produite par l'aménagement du fleuve » (art. 358) : le barrage de Kembs (PK 174,0) construit en 1932 dérive l'essentiel des débits dans le Grand Canal d'Alsace, dont les biefs et usines de Kembs (PK 180,3), Ottmarsheim (PK 194,9), Fessenheim (PK 212,3) et Vogelgrün (PK 224,8) ont été mis en service en 1932, 1952, 1956 et 1959 (figure 1). Lorsque le débit entrant dépasse le débit d'équipement des usines, soit 1400 m³/s, l'excédent est déversé dans le Vieux Rhin. Le reste du temps, soit environ 300 jours par an, un débit réservé (20-30 m³/s jusqu'en 2010, 50-150 m³/s aujourd'hui) est maintenu dans le Vieux Rhin.

II.3. Contexte opérationnel de la restauration

Les réflexions sur la restauration ont émergé dans les années 1970, à la suite des premières études sur la richesse écologique du Rhin Supérieur et sur les impacts des travaux hydrauliques [Carbiener, 1970, 1974 ; Schäfer, 1973], en parallèle de la question des inondations. Le Programme Intégré pour le Rhin (*Integriertes Rheinprogramm - IRP*, Minist. für Umwelt und Verkehr [1997]) est une concrétisation de la convention franco-allemande du 6 décembre 1982 pour restaurer une partie des capacités de rétention des crues de la plaine rhénane tout en réhabilitant les milieux alluviaux. Dans le secteur du Vieux Rhin, le programme

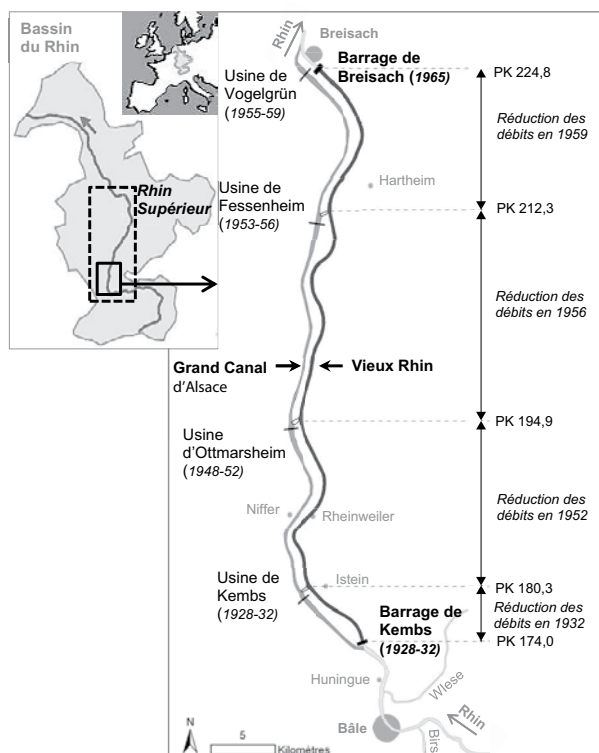


Figure 1 : Plan de situation du Vieux Rhin et du Grand Canal d'Alsace. Les années de construction des usines et de réduction des débits dans le Vieux Rhin sont renseignées.

consiste à décaisser la rive droite sur près de 43 km de long et environ 100 m de large, pour une capacité de stockage de 25 millions de m³. Les travaux ont débuté en 2009 et sont planifiés sur 15 ans.

Le plan « Rhin 2020 » de la Commission Internationale pour la Protection du Rhin [CIPR, 2001] prévoit de rétablir le réseau de biotopes caractéristiques du milieu rhénan ainsi que la continuité écologique du fleuve et de ses affluents. Ces engagements concordent avec les objectifs de la DCE [2005], dont une des « questions importantes » est de « retrouver les équilibres écologiques en restaurant et en préservant les écosystèmes rhénans ». Ainsi, le SDAGE Rhin validé le 27 novembre 2009 vise le bon potentiel écologique et le bon état chimique du fleuve, en tant que masse d'eau fortement modifiée, d'ici 2027.

Le Vieux Rhin est désigné comme « le tronçon le plus remarquable du Rhin Supérieur » pour sa qualité physique [CIPR, 2003] : le secteur a conservé une certaine diversité d'habitats, grâce à un tracé relativement sinueux présentant une variété d'écoulements, de profondeurs et de largeurs. Le Vieux Rhin possède également « le meilleur potentiel de frayères pour le Saumon atlantique du Rhin Supérieur » [ECOTEC, 2006]. Cependant, les surfaces piscicoles fonctionnelles sont actuellement limitées en raison du pavage et du colmatage du lit. Plusieurs problèmes morpho-écologiques ont été identifiés sur le tronçon [Peiry, 2003] : les formes fluviales sont simplifiées et quasi-figées, le transport solide est faible, le fond du lit très grossier est défavorable à la faune piscicole et les peuplements forestiers riverains sont âgés et rarement renouvelés par les processus d'érosion et de dépôt.

Partant de ce diagnostic, l'objectif des projets INTERREG et EDF est de proposer des actions pour

restaurer la dynamique sédimentaire et augmenter la biodiversité du Vieux Rhin, tout en préservant la sécurité des biens et des personnes et la pérennité des usages actuels. Les deux projets sont complémentaires : EDF étudie des modes de recharge par érosion latérale maîtrisée. Sur un premier site-pilote, une expérimentation précédée de simulations physiques au laboratoire d'EDF R&D [Die Moran, 2012] a été engagée au printemps 2013 [Clutier *et al.*, 2012]. Le site-pilote INTERREG, mis en place en 2010, aborde la question du transfert de la charge une fois introduite artificiellement dans le chenal, et des effets morpho-sédimentaires associés via un suivi géomorphologique assuré par le CNRS. Des simulations numériques et physiques ont été réalisées par l'IRSTEA [Béraud, 2012] et le LWI [Koll *et al.*, 2010], accompagnées d'une analyse historique par le CNRS, des suivis écologiques par l'Université de Strasbourg, le Conservatoire des Sites Alsaciens et la Petite Camargue Alsacienne, et une étude sociologique par l'Université de Strasbourg. Le présent article restitue l'analyse historique (§ 3) et le suivi géomorphologique de l'introduction artificielle de sédiments (§ 4).

III. GEOMORPHOLOGIE HISTORIQUE

III.1. Enjeux

Cette analyse historique repose sur le concept de *trajectoire temporelle d'évolution*, employé en restauration de cours d'eau depuis les années 2000 [Brierley et Fryirs, 2005 ; Hughes *et al.*, 2005 ; Brierley *et al.*, 2008]. Par rapport au concept classique d'*équilibre dynamique* [Schumm, 1977], l'idée de trajectoire permet de mieux appréhender la réponse complexe des systèmes fluviaux au cours de laquelle les tendances sur le long terme et les fluctuations sur le court terme se superposent, et où la réversibilité des processus est discutée [Dufour et Piégay, 2009].

Une démarche rétrospective présente plusieurs intérêts pour la restauration du Vieux Rhin : la connaissance de la morphologie du fleuve au début du 19^{ème} siècle, ainsi que des impacts de la correction, est importante pour communiquer sur l'état historique (« ce qu'on a perdu avec les aménagements ») et pour valoriser les futures actions. De plus, la compréhension des ajustements depuis la fin du 19^{ème} siècle est fondamentale pour replacer les évolutions futures dans un contexte pluri-décennal. Nous avons cherché à vérifier l'hypothèse d'un pavage d'incision qui aurait figé les formes fluviales [Dittrich *et al.*, 2010], en tentant de répondre aux questions suivantes : le Vieux Rhin actuel suit-il une trajectoire héritée du 19^{ème} siècle, ou est-il ajusté aux conditions de débits imposées par le barrage de Kembs depuis 50 ans ? Peut-on mettre en évidence une dynamique sédimentaire récente ? Qu'en déduire sur la réactivité du tronçon aux futures actions de restauration ?

III.2. Démarche méthodologique

Une base de données hydro-morphologique a été constituée. Elle regroupe : 1) des documents d'archives, planimétriques (cartes et photographies aériennes), verticaux (profils en long et en travers), hydrologiques (chroniques de débits) acquis auprès d'EDF, de l'Institut Géographique National et des services gestionnaires d'Alsace et du Baden-Württemberg ; 2) des mesures *in situ* collectées pendant l'étude (granulométrie des bancs et épaisseurs de dépôts de sédiments fins) (figure 2).

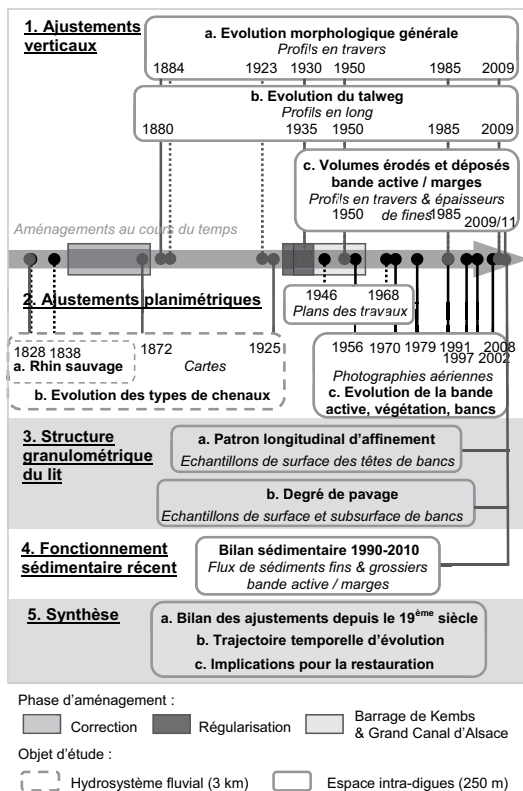


Figure 2 : Démarche de l'analyse historique.

Les analyses ont été conduites sous Système d'Information Géographique (SIG ArcMap) : 1) à l'échelle du linéaire de 50 km entre Kembs et Breisach, pour appréhender les tendances générales d'évolution ; 2) à l'échelle de tronçons fluviaux de 100 m à quelques km, pour étudier finement les dynamiques spatiales et les liens de causalité entre les processus.

Les ajustements verticaux et planimétriques, et la structure granulométrique du lit, ont été analysés. Le fonctionnement sédimentaire récent a également été estimé en compilant les informations acquises au cours des vingt dernières années. L'ensemble des résultats a permis de dresser et de discuter le bilan des ajustements et la trajectoire temporelle d'évolution depuis le 19^{ème} siècle.

III.3. Apports de l'analyse historique

III.3.1. Bilan des ajustements et liens de causalité

Un ensemble complexe d'ajustements a été mis en évidence depuis le 19^{ème} siècle (figure 3). Ces changements résultent des travaux hydrauliques, mais ils ont également touché un système fluvial qui était en évolution sur le long terme, liée aux héritages géomorphologiques post-glaciaires (piégeage des alluvions et pondération du régime hydrologique par les lacs suisses formés par le retrait des glaciers alpins...), et probablement à la sortie de la crise érosive anthropo-climatique du Petit Age Glaciaire (PAG). Sur le secteur d'étude, l'incision du fond du lit de plus de 7 m enregistrée sur quelques décennies après les travaux de correction est spectaculaire à l'échelle de la période holocène, durant laquelle le profil en long a subi un enfoncement de 25 m sur plusieurs millénaires [Schmitt, 2010]. Le processus s'est accompagné d'un assèchement de la plaine alluviale et

d'une simplification du style fluvial mis en évidence entre 1828 et 1925, dont la transition dans certains cas de chenaux en tresses à des chenaux anastomosés. La régularisation et la canalisation des années 1930 sont ensuite intervenues dans des conditions de variables de contrôle vraisemblablement déjà modifiées par les ajustements antérieurs : correction qui a contribué à purger en partie la charge de fond [Peiry, 2003], chenalisation et barrages suisses qui ont altéré la fourniture sédimentaire et modifié le régime des crues [Kolly, 1959].

Dans une temporalité plus courte (post-1930), l'analyse diachronique a mis en évidence une simplification drastique de la section en travers avec la mise en place des épis. Le barrage de Kembs a ensuite largement conditionné les évolutions : 1) en favorisant la végétalisation des champs d'épis exondés par la mise en débit réservé, provoquant une rétraction de 20 % de la largeur de bande active et des dépôts de sédiments fins jusqu'à 3,5 m d'épaisseur ; 2) en créant une rupture dans le processus d'incision, passant de 7 cm/an avant-barrage à 0,4 cm/an après, ce phénomène étant vraisemblablement davantage dû à la réduction de la fréquence de dépassement des débits critiques de mise en mouvement d'un facteur 22 et 58 en amont et en aval du PK 198, qu'à la formation d'un véritable pavage (degré de pavage $D_{50\text{surface}}/D_{50\text{subsurface}}$ [Bunte et Abt, 2001] relativement faible : inférieur à 2,2). L'absence de gradient longitudinal dans la répartition spatiale des changements (incision, rétraction) tend à prouver que le barrage n'aurait pas aggravé le déficit sédimentaire, ou du moins que les effets de la réduction des crues morphogènes auraient prédominé sur les effets de la réduction des débits solides. Une dynamique morphologique résiduelle a enfin été observée, caractérisée par des érosions des berges et du fond et par la formation de nouveaux bancs, en réponse aux trois crues centennales de 1994, 1999 et 2007, durant lesquelles le pavage a été partiellement déstructuré.

III.3.2. Trajectoire temporelle d'évolution

L'expression des variables déterminant la morphologie du Vieux Rhin (débits liquides et solides, largeur du lit actif) n'est pas stationnaire (figure 4, a). Par exemple, les débits de crue ont été réduits brutalement à la suite de la canalisation, dans un contexte de tarissement progressif des apports sédimentaires consécutif aux aménagements réalisés dans le bassin versant suisse et éventuellement à la sortie du PAG.

Les variables de réponse (altitude du fond du lit, largeur du chenal et des bancs, taille du substrat...) ont suivi une trajectoire d'évolution complexe depuis le début du 19^{ème} siècle (figure 4, b) : les réponses ont été soit synchrones (ex. : rétraction de la bande active avec la mise en débit réservé), soit décalées dans le temps (ex. : diminution des superficies de chenaux et de bancs, incision du fond, augmentation de la granulométrie en réaction à la correction). Ces évolutions traduisent le dépassement d'un seuil géomorphologique dans le niveau de résistance aux perturbations. Le Vieux Rhin semble à présent ajusté aux nouvelles conditions des variables déterminantes, mais il reste réactif aux crues extrêmes.

III.3.3. Implications pour la restauration

L'analyse historique a invalidé en partie l'hypothèse initiale d'un pavage statique et d'un fond de lit figé, confirmant le potentiel de redynamisation des processus physiques du Vieux Rhin. Il importera de focaliser les stratégies de restauration sur : 1) une augmentation du transport solide,

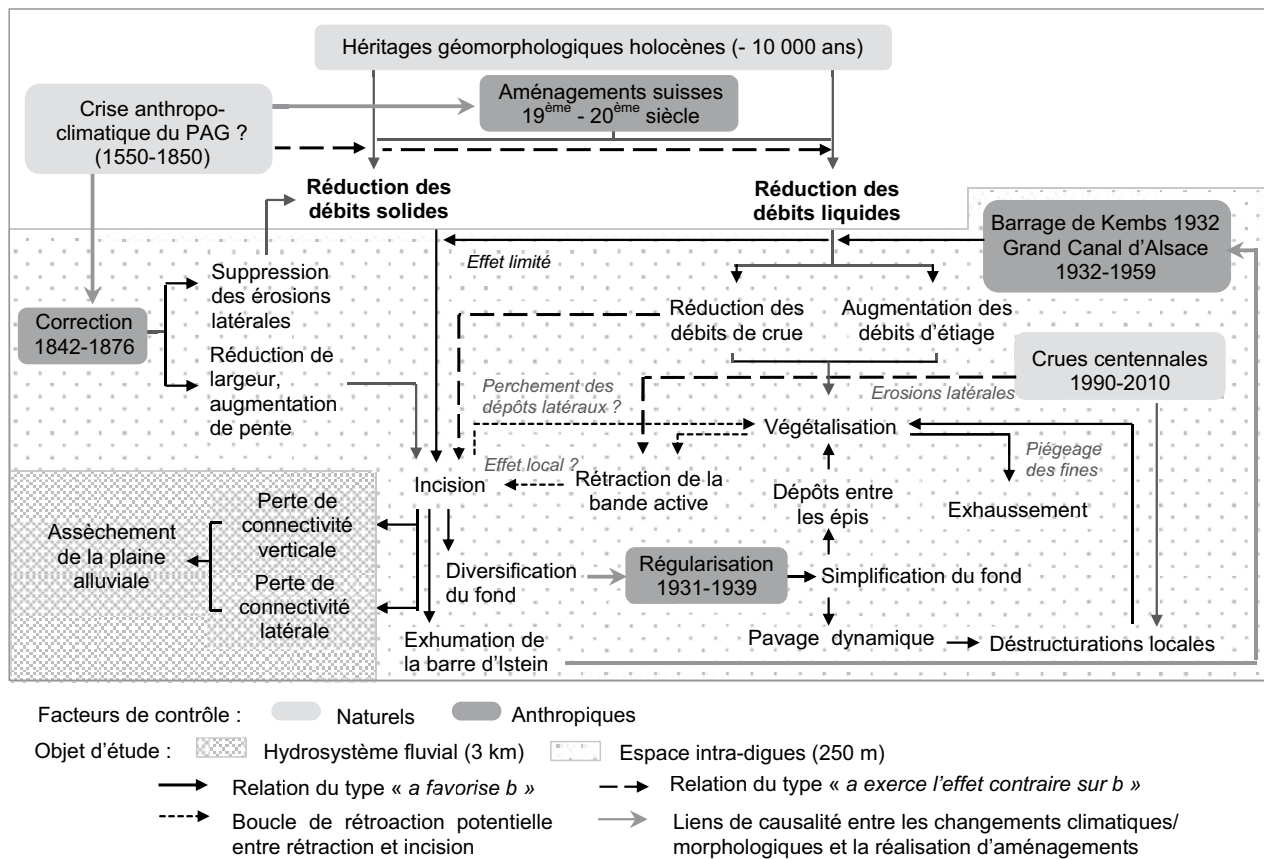


Figure 3 : Bilan des ajustements morphologiques du Vieux Rhin sous contrôles naturels et anthropiques.

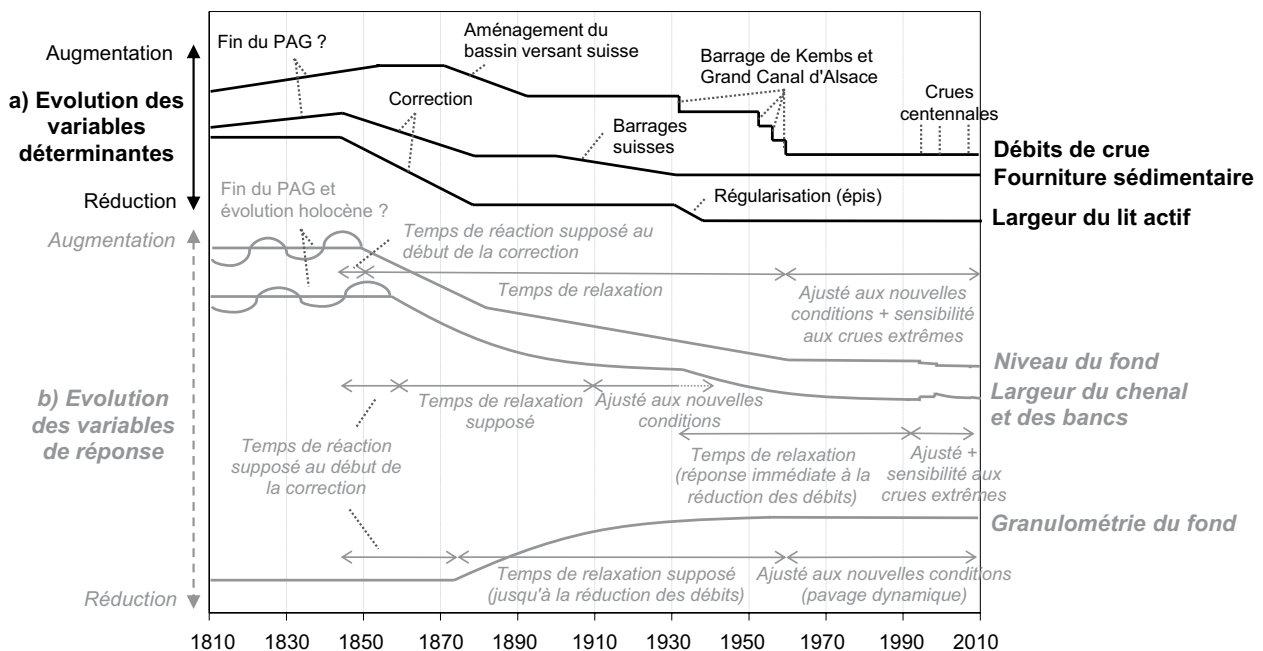


Figure 4 : Représentation schématique de la trajectoire temporelle d'évolution du Vieux Rhin depuis le 19ème siècle (inspiré de Dufour et Piégay [2009]).

actuellement déficitaire (bilan sédimentaire négatif sur les vingt dernières années, estimé à 16 000 m³/an) ; 2) une augmentation de la largeur du corridor fluvial, devenue trop faible (régularisation, puis végétalisation), ce qui limite

les possibilités de diversification des formes et des habitats aquatiques, quand bien même les apports sédimentaires seraient augmentés ; 3) une augmentation de l'intensité des crues (1400 m³/s actuellement dérivés dans le Grand Canal

d'Alsace), les sédiments du fond étant devenus trop grossiers relativement aux forces tractrices pour être mis en mouvement fréquemment. Ainsi, il conviendra de recharger le chenal en sédiments plus fins que le pavage qui est en place aujourd'hui, et de coupler les recharges à des élargissements, par suppression de certains champs d'épis ou par des érosions latérales maîtrisées, ce qui permettrait de complexifier les habitats et les unités paysagères, et d'assurer la durabilité des bénéfices en ralentissant la propagation des sédiments vers l'aval dans les secteurs élargis.

Les ajustements se sont exprimés avec le plus d'intensité en amont du PK 198. La capacité de transport est également plus élevée sur ce tronçon (23 000 m³/an en amont contre 1 500 m³/an en aval [EDF R&D, 2009]). Les interventions seront donc privilégiées sur cette partie du Vieux Rhin, d'autant que la partie aval bénéficiera, à terme, des effets des actions du fait de la propagation longitudinale de la charge.

La trajectoire temporelle d'évolution fournit des éléments utiles pour aider à anticiper les réponses des sites restaurés (ex. : vitesses de rétraction de la bande active, taux de sédimentation des surfaces végétalisées, modes de formation des bancs...). Cependant, des inconnues demeurent : comment prédire le transport solide, et le développement des formes fluviales associées à ce transport, sachant que les futurs apports auront une granulométrie plus fine que le fond de lit actuel ? Quels volumes de recharge préconiser, compte-tenu des risques potentiels et des bénéfices écologiques visés ? Il n'existe pas de référentiel dans l'évolution morphologique passée du Vieux Rhin pour répondre à ces questions. Il est donc nécessaire de tester *in situ* les actions et de réaliser des suivis.

IV. GEOMORPHOLOGIE EXPERIMENTALE

IV.1. Enjeux

La géomorphologie expérimentale renvoie à un mode de gestion *adaptatif*, soit un « apprentissage par l'action » afin de réduire les incertitudes entourant une problématique complexe [Holling, 1978]. Le suivi est à la base de la démarche. Il est fondamental pour contrôler l'efficacité de l'expérience et engager si nécessaire des mesures correctives. Il permet aussi de fournir des données de calibration *in situ* aux modèles numériques utilisés pour dresser des scénarios d'évolution. Or, les synthèses sur la restauration [Adam *et al.*, 2006 ; Morandi et Piégay, 2012 ; Roni et Beechie, 2012] constatent que les suivis sont encore trop rares, faute de temps, de moyens financiers, et d'une formulation claire des objectifs en début de projet. Il existe néanmoins une

véritable attente des décideurs pour disposer d'indicateurs physiques permettant les retours d'expériences.

L'enjeu scientifique de la recharge sédimentaire expérimentale présentée ici est de comprendre les modes (bancs mobiles, engraissement de banc existant, nappage du fond...) et les caractéristiques (taille des sédiments mobilisés, vitesses...) de propagation du sédiment injecté. Les enjeux opérationnels portent sur : 1) l'analyse des risques potentiels : la recharge est-elle compatible avec le fonctionnement des aires de rétention des crues en cours de décaissement (programme *IRP*) ? Quelles sont les distances de déplacement vis-à-vis de la sécurité des ouvrages en aval (ponts, barrage de Breisach) ? Quel est l'impact sur le pavage et sur la stabilité du lit ? 2) l'évaluation des premiers gains morpho-écologiques : observe-t-on un affinement du substrat, une mobilité du lit et une diversification des méso-habitats ? L'enjeu est enfin méthodologique, sur les techniques d'instrumentation et sur la proposition d'indicateurs issus de cette instrumentation.

IV.2. Modalités de recharge

Les opérations d'abaissement de la plaine alluviale réalisées dans le cadre du programme *IRP* ont permis de fournir une quantité importante d'alluvions fluviales naturelles, localisées à proximité immédiate du chenal. Les matériaux à injecter ont été prélevés dans le chantier du casier n° 3, 7 km en aval du barrage de Kembs, sans tri préalable. Des sondages effectués à différents horizons avant les travaux avaient révélé un D_{50} compris entre 12 et 46 mm [Dittrich *et al.*, 2010].

Il a été choisi d'injecter l'équivalent de la capacité de transport annuelle moyenne (23 000 m³ en amont du PK 198 [EDF R&D, 2009]) pour que la charge puisse être remaniée par des crues courantes, mais sans être exportée trop rapidement vers l'aval afin de voir apparaître de nouvelles formes fluviales. Vinci Construction a réalisé les travaux en octobre 2010, après une étude de faisabilité par SOGREAH Consultants en collaboration avec les partenaires du projet INTERREG. L'injection a eu lieu au droit du casier, afin de minimiser les coûts de transport et l'impact environnemental des travaux. Un dépôt trapézoïdal de 620 m de long, 11 à 15 m de large, 2 à 3 m de haut et déconnecté de la rive droite a été mis en place (figure 5).

IV.3. Modalités de suivi

Les modifications de géométrie, le transport de la charge introduite et les changements de taille du substrat ont été



Figure 5 : Vues du chantier d'injection.

caractérisés par imagerie aérienne, mesures topographiques et bathymétriques, traçage sédimentaire et échantillonnages granulométriques, sur un tronçon de 4 km en aval du site de recharge, afin de pouvoir évaluer les effets de l'expérience durant plusieurs années. Une des originalités du suivi est le développement d'une méthode de traçage par transpondeurs passifs. Un tel investissement métrologique (1494 traceurs déployés), mobilisé sur un chenal de 100 m de large (80 % du site ayant un tirant d'eau de plus de 60 cm), et dans le cadre de l'évaluation d'une action de restauration, constitue une première au niveau international.

Trois états morpho-sédimentaires (E) ont été caractérisés durant l'étude (figure 6) : un état initial (E0) avant l'injection, entre avril 2008 et octobre 2010 ; un état « bis » (E0+) après l'injection et avant les crues, en novembre 2010 ; un état « 1 » (E1) après les premiers épisodes de crue du 9 décembre 2010 ($Q_{max} = 2484 \text{ m}^3/\text{s}$ à Bâle $\sim Q_2$) et du 13 janvier 2011 ($Q_{max} = 1976 \text{ m}^3/\text{s}$ à Bâle), en mai 2011 et octobre 2011.

IV.4. Apports du suivi géomorphologique

IV.4.1. Résultats

Les techniques de suivi mises en œuvre (bathymétrie, traçage des particules et imagerie aérienne) ont permis de montrer que des conditions de transport solide généralisées ont été atteintes avec la crue biennale : la quasi-totalité du sédiment injecté dans la moitié amont du tronçon de recharge a été exportée vers l'aval (figure 7). Les sédiments déstockés se sont déposés principalement dans la partie médiane, entre les transects n° 7 et 13, quelle que soit la position initiale des particules équipées. La charge a été dispersée vers le centre du chenal, et a nappé le fond entre 50 cm et 1 m d'épaisseur. Le front de dispersion de la vague sédimentaire a été détecté 80 m en aval de la fin initiale du site d'injection ; les dépôts atteignent 1,5 m dans cette zone.

Les débits compris entre 500 et 600 m^3/s dans le Vieux Rhin (cas de deux crues survenues entre mai et octobre 2011 ; figure 6) semblent avoir entraîné un transport partiel, avec des remaniements locaux qui ont enfoui et délogé une partie des particules équipées. Ce constat valide le débit critique de mise en mouvement estimé à 550 m^3/s sur ce secteur [EDF R&D, 2009].

Le taux de détection des traceurs (42 %) apparaît satisfaisant par rapport à ceux obtenus sur d'autres systèmes

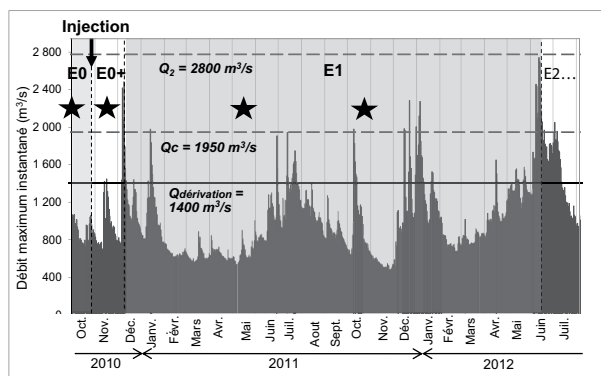


Figure 6 : Temporalité du programme de suivi sur l'hydrogramme des débits maximum instantanés à Bâle (octobre 2010 - juillet 2012).

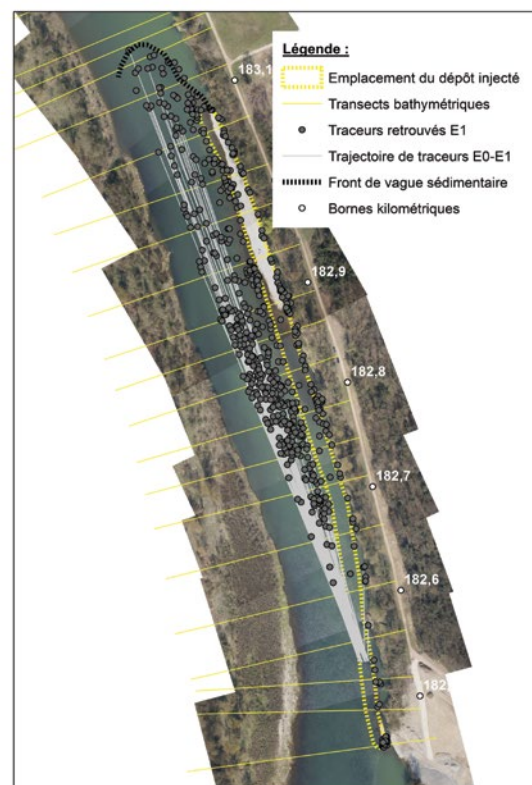


Figure 7 : Evolution du tronçon d'injection entre les états 0 et 1.

fluviaux de dimension voisine tels que l'Ain (25 et 36 % ; Rollet [2007]) et la Durance (41 % ; Chapuis [2012]). Ce résultat confirme le potentiel d'utilisation des transpondeurs dans un chenal large et profond comme le Vieux Rhin.

Le suivi granulométrique a permis d'avancer sur les questions méthodologiques : l'agrégation d'échantillonnages spatialement intégrés [Bunte et Abt, 2001] en tâches de 10 particules aléatoires réparties sur toute la surface des bancs d'une part, et d'échantillonnages de type Wolman [1954] de 100 particules en tête, milieu et queue des bancs d'autre part, a révélé des distributions cohérentes. Les échantillons collectés au droit du site d'injection remanié par la crue ($D_{50} = 27 \text{ mm}$) ont révélé un affinement du fond dépassant parfois plus de 3,5 fois la taille des particules constituant le pavage ($D_{50} = 98 \text{ mm}$).

Quatre indicateurs, et les protocoles de mesure associés, ont été proposés à l'issue du suivi. Ils permettent d'évaluer directement ou indirectement l'atteinte d'un ou plusieurs objectifs morpho-écologiques (mobilité du lit, substrat d'une granulométrie adaptée au frai, diversité des faciès d'écoulement, présence de bancs) et sociétaux (réduction des risques, augmentation de la valeur récréative du tronçon) lors des futures recharges.

IV.4.2. Implications pour la restauration

Les risques hydrauliques immédiats, soit la modification des conditions d'écoulement générant un dysfonctionnement des aires IRP, ont été écartés à l'issue de l'expérience. Les risques à plus long terme (mise en danger des ouvrages en aval, déstabilisation du pavage) semblent modérés au regard du mode de propagation de la charge, par nappage du fond,

avec une vitesse de progression cohérente avec les références régionales (~ 300 m/an) et sans que ce transport ne génère une incision. Ces résultats confirment la pertinence de l'action, tant en termes de localisation que de géométrie de la forme injectée.

Les gains morpho-écologiques sont difficiles à évaluer à la suite de ce premier observé qui restitue la mise en mouvement d'une forme artificielle, et non pas véritablement les conditions de transport au sein de la section fluviale. Le suivi devra donc être prolongé pour livrer davantage d'enseignements. De plus, si les premiers résultats permettent de s'attendre à une mobilité du fond et à un affinement du substrat, les changements mis en évidence s'avèrent limités spatialement : le sédiment remanié est finalement resté sur le tronçon de recharge ; les distances de transport sont globalement inférieures aux superficies des différents méso-habitats ainsi qu'aux distances inter-seuils (~ 1 000 m) ; la charge a tendance à napper le fond, ce processus de dispersion étant prédominant sur celui de translation quand les volumes injectés augmentent [Sklar *et al.*, 2009] ; l'épaisseur du nappage apparaît limitée en comparaison de l'épaisseur injectée et tendra à diminuer au fur et à mesure de la propagation aval. Ces éléments confirment la nécessité d'injecter de plus grands volumes, pour que la recharge bénéficie à des tronçons plus longs et pour restaurer le fond sur une épaisseur suffisante, afin de créer des formes fluviales différenciées garantes d'habitats contrastés.

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les approches géomorphologiques historique et expérimentale abordées dans cette étude ont prouvé leur intérêt pour la restauration physique de cours d'eau aménagés : l'analyse rétrospective a permis de mieux comprendre la trajectoire temporelle d'un système fluvial soumis à une combinaison de pressions anthropiques, et a apporté des éléments utiles pour orienter les actions. Certains résultats apparaissent transposables à d'autres cours d'eau en déficit sédimentaire. De plus, la recharge sédimentaire que nous avons suivie est une expérience scientifique en soit, qui a contribué à enrichir les connaissances en transport solide et à résoudre certaines difficultés méthodologiques sur l'instrumentation des rivières de grande taille.

La mise en commun des résultats du projet INTERREG [Région Alsace, 2012] a abouti à des préconisations de restauration : en se fixant pour objectif un nappage minimum du fond de 50 cm afin de diversifier le substrat, sur une largeur de lit mineur de 100 m et un continuum de 15 à 20 km de long, ce sont entre 750 000 et 1 million de m³ de sédiments qui devraient être apportés au Vieux Rhin. A titre de comparaison, 170 000 m³ sont introduits annuellement en aval du barrage d'Iffezheim, soit 4,5 millions de m³ en 25 ans [WSA, 2003]. Dans le cas du Vieux Rhin, coupler des injections artificielles à des élargissements permettrait de lever conjointement les deux freins morphologiques majeurs que sont l'absence de transport solide et d'espace disponible pour la mobilité latérale, démultipliant ainsi les bénéfices écologiques. Un plan directeur devra être établi pour sélectionner les secteurs et intervenir année après année, en gardant à l'esprit que la capacité de transport annuelle du chenal est d'environ 25 000 m³. La planification devra intégrer le recensement et la quantification de toutes les ressources sédimentaires potentiellement exploitables (sites d'érosion maîtrisée d'EDF, aires de rétention *IRP*...), la mise au point d'une stratégie de suivi et d'évaluation des

bénéfices et des éventuels préjudices écologiques et sociaux, au cas par cas suivant les secteurs, et le coût des opérations, en concertation avec tous les acteurs du Rhin.

VI. REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une thèse de l'Université Lumière Lyon 2, financée par le CNRS à l'Unité Mixte de Recherche 5600 Environnement, Ville, Société (UMR 5600 EVS). Elle a notamment bénéficié des ressources de la plateforme Imagerie et Systèmes d'Information Géographique (ISIG). Les acquisitions de données ont été financées par le Fonds Européen de Développement Régional dans le cadre du projet INTERREG IVA « Redynamisation du Vieux Rhin » et par Electricité de France dans le cadre de la convention de collaboration EDF-CNRS « Suivi de la recharge sédimentaire du Vieux Rhin par érosion maîtrisée ». Les auteurs remercient vivement les personnes qui ont participé aux campagnes de terrain, au traitement des données et à la réflexion scientifique, en particulier : Karen Johnstone, Véronique Ferrier, Kristell Michel, Regina Ostermann, Christiane Alonso, Christian Blum.

VII. REFERENCES

- ADAM P., MALAVOI J.R., DEBIAIS N. (2006) — Retour d'expérience d'opérations de restauration de cours d'eau et de leurs annexes, menées sur le bassin RMC. *Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse*. 129 p
- ARNAUD F. (2012) — Approches géomorphologiques historique et expérimentale pour la restauration de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial aménagé : le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne). *Thèse de Doctorat, Université de Lyon*. 280 p
- BEECHIE T.J., SEAR D.A., OLDEN J.D., PESS G.R., BUFFINGTON J.M. ET AL. (2010) — Process-based principles for restoring river ecosystems. *BioScience*. **60**(3) : 209-222
- BERAUD C. (2012) — Modélisation numérique des impacts de recharges sédimentaires en rivière aménagée. Cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach. *Thèse de Doctorat, Université Lyon 1*. 248 p
- BRAVARD J.P., PETTS G.E. (1993) — Interférences avec les interventions humaines. In *Amoros C. & Petts G.E. ed. Hydrosystèmes fluviaux*, Masson, Paris. 233-253
- BRIERLEY G.J., FRYIRS K.A. (2005) — Geomorphology and river management: applications of the River Styles Framework. *Blackwell, Oxford*. 398 p
- BRIERLEY G.J., FRYIRS K.A., BOULTON A., CULLUM C. (2008) — Working with change: the importance of evolutionary perspectives in framing the trajectory of river adjustment. In *Brierley G.J. & Fryirs K.A. ed. River Futures: an Integrative Scientific Approach to River Repair*, Washington. 65-84
- BUNTE K., ABT S. (2001) — Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics and streambed monitoring. *Technical Report n° RMRS-GTR-74, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado*. 428 p
- 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). *Vegetatio*. 97-148
- CARBIENER R. (1974) — Le Rhin et l'Alsace. Histoire de l'évolution des rapports entre l'homme et un grand fleuve. *Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse*. **4** : 61-69

- CHAPUIS M. (2012) — Mobilité des sédiments fluviaux grossiers dans les systèmes fortement anthropisés : éléments pour la gestion de la basse vallée de la Durance. *Thèse de Doctorat, Université d'Aix*. 244 p
- CIPR (2001) — *Rhin 2020 - Programme pour le développement durable du Rhin*. Coblenz. 27 p
- CIPR (2003) — *Carte du milieu physique du Rhin*. Coblenz. 51 p
- CLUTIER A., AELBRECHT D., EL KADI ABDERREZZAK K. ET AL. (2012) — Restauration du transport sédimentaire dans le Vieux Rhin par érosion maîtrisée des berges. (www.graie.org/ISRivers/actes/pdf2012/2B202-034CLU.pdf) *International Conference on Integrative Sciences and Sustainable Development of Rivers 2012, Lyon, France*. 3
- DCE (2005) — District Hydrographique International RHIN. Rapport de l'état des lieux. *DIREN Alsace, Strasbourg*. 113 p
- DIE MORAN A. (2012) — Physical and numerical modelling investigation of induced bank erosion as a sediment transport restoration strategy for trained rivers. The case of the Old Rhine (France). *Thèse de Doctorat, Université Paris-Est*. 219 p
- DITTRICH A., KOLL K., KUNZ C. (2010) — Historische Entwicklung des südlichen Oberrheins unter morphologischen Gesichtspunkten. LWI, Braunschweig. *Bericht*. **985** : 38 p
- DUFOUR S., PIÉGAY H. (2009) — From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits. *River Research and Applications*. **25** : 568-581
- ECOTEC (2006) — *Etude d'impact pour la demande de concession de Kembs*. Chavanod. 576 p
- EDF R&D (2009) — *Estimation de la capacité de transport solide par charriage dans le Vieux Rhin*. 30 p
- GREGORY K.J. (2006) — The human role in changing river channels. *Geomorphology*. **79** : 172-191
- HABERSACK H., PIÉGAY H. (2008) — River restoration in the Alps and their surroundings: past experience and future challenges. *Rinaldi M., Habersack H., Piegay H. eds Gravel-bed Rivers 6: From Process Understanding to the Restoration of Mountain Rivers, Elsevier, Amsterdam*. 703-737
- HOLLING C.S. (1978) — *Adaptive environmental assessment and management*. John Wiley & Sons. 377 p
- HUGHES F.M., COLSTON R.A., MOUNTFORD J.O. (2005) — Restoring riparian ecosystems: the challenge of accommodating variability and designing restoration trajectories. *Ecology and Society*. **10**(1) : 12
- HUMBERT J., DESCOMBES R. (1985) — Rhin. *Encyclopédie de l'Alsace, Strasbourg* 6391-6400
- JUNGWIRTH M. (2012) — The Danube, a European cross-border alpine river: history, present status and future restoration needs (www.graie.org/ISRivers/actes/pdf2012/1D101-287JUN.pdf). *International Conference on Integrative Sciences and Sustainable Development of Rivers 2012, Lyon, France*, 3. 3p
- KOLL K., KOLL K., DITTRICH A. (2010) — Sediment transport over static armour layers and its impact on bed stability. *Dittrich A., Koll K., Aberle J., Geisenhainer P. eds Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics River Flow 2010, Braunschweig, Germany*, 929-936
- KOLLY L. (1959) — L'aménagement du Rhin de Bâle au lac de Constance. *La Houille Blanche*. **2** : 167-176
- MIKA S., HOYLE J., KYLE G., HOWELL T., WOLFENDEN B., RYDER D. ET AL. (2010) — Inside the "black box" of river restoration: using catchment history to identify disturbance and response mechanisms to set targets for process-based restoration. *Ecology and Society*. **15**(4) : 20
- MINIST. FÜR UMWELT UND VERKEHR (1997) — Programme Intégré Rhin : protection contre les crues et régénération du milieu alluvial du Rhin Supérieur. *Gewässerdirektion Ober/Hochrhein, Lahr*. 20 p
- MORANDI B., PIEGAY H. (2012) — Approche globale et critique de la restauration des cours d'eau en France et à l'étranger : du concept à l'évaluation. *Rapport d'étape, ONEMA - CNRS, Lyon*. **1** 86 p
- PEIRY J.L. (2003) — Expertise géomorphologique dans le cadre du renouvellement de la concession du barrage de Kembs. *Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand*. 6 p
- PIÉGAY H., AELBRECHT D., BEAL D. ET AL. (2010) — Restauration morpho-dynamique et redynamisation d'une section court-circuitée du Rhin à l'aval du barrage de Kembs (projets INTERREG/EDF). *32^{èmes} journées de l'hydraulique de la SHF : Environnement et hydro-électricité 2010, Lyon, France*. 8 p
- REGION ALSACE (2012) — Etude de faisabilité. *Rapport final 2009-2012. Programme Interreg IV Rhin Supérieur - Redynamisation du Vieux Rhin. Strasbourg*. **1** 172 p
- ROLLET A.J. (2007) — Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain. *Thèse de Doctorat, Université Lyon 3*. 305 p
- ROLLET A.J., PIÉGAY H., DUFOUR S., BORNETTE G., PERSAT H. (2013) — Assessment of consequences of sediment deficit on a gravel river bed downstream of dams in restoration perspectives: application of a multicriteria, hierarchical and spatially explicit diagnosis. doi 10.1002/rra.2689. *River Research and Applications*
- RONI P., BEECHIE T. (2012) — Stream and watershed restoration: a guide to restoring riverine processes and habitats. doi 10.1002/9781118406618. *John Wiley & Sons, Chichester*
- SCHÄFER W. (1973) — Der Oberrhein, sterbende Landschaft. *Natur und Museum*. **103** : 1-29
- SCHÄLCHLI U., BREITENSTEIN M., KIRCHHOFER A. (2010) — Kiesschüttungen zur Reaktivierung des Geschiebehaushalts der Aare - die kieslaichenden Fische freut's. *Wasser Energie Luft*. **102** : 209-213
- SCHMITT L. (2010) — Dynamique fluviale et gestion environnementale durable des hydrosystèmes. Application à une grande plaine alluviale et à un hydrosystème périurbain. *HDR, Université Lyon 2*. 296 p
- SCHNEIDER G. (1966) — *Zusammenfassende darstellung der Rheinregulierung Strassburg/Kehl-Istein. Baukommission "Regulierung des Rheins zwischen Kehl und Istein", Freiburg*. 477 p
- SCHUMM S.A. (1977) — *The fluvial system*. John Wiley & Sons, Chichester. 338 p
- SKLAR L.S., FADDE J., VENDITTI J.G., NELSON P., WYDZGA M.A. ET AL. (2009) — Translation and dispersion of sediment pulses in flume experiments simulating gravel augmentation below dams. doi 10.1029/2008WR007346. *Water Resources Research*. **45** : W08439
- TULLA J.G. (1825) — Mémoire sur la rectification du cours du Rhin. *Journal de la Société des Sciences, Agriculture et Arts de Strasbourg*. 5-69
- WARD J., TOCKNER K., UEHLINGER U., MALARD F. (2001) — Understanding natural patterns and processes in river corridors as the basis for river restoration. *Regulated Rivers: Research & Management*. **17** : 311-323
- WOHL E., ANGERMEIER L., BLEDSOE B., KONDOLF G.M., MACDONNELL L. ET AL. (2005) — River restoration, doi 10.1029/2005WR003985. *Water Resources Research*. **41** : W10301
- WOLMAN M.G.) — 1954. A method of sampling coarse river-bed material. *Transactions of the American Geophysical Union*. **35**(6) : 951-956
- WOOLSEY S., WEBER C., GONSER T., HOEHN E., HOSTMANN M. ET AL. (2005) — *Guide du suivi des projets de revitalisation fluviale. Projet Rhône-Thur Eawag, WSL, LCH-EPFL, VAW-ETHZ*. 113 p
- WSA (2003) — 1978-2003 : 25 ans d'apport en débit solide à Iffezheim - Bilan. *Rapport de la 10^{ème} réunion du Comité de la Commission Permanente, Strasbourg*. 13 p