

# ANALYSE DU TEMPS DE RÉSILIENCE D'UN COURS D'EAU À MOYENNE ÉNERGIE (LA MOSELLE AMONT) SUITE AUX IMPORTANTES ALTÉRATIONS ANTHROPIQUES DE LA DEUXIÈME MOITIÉ DU VINGTIÈME SIÈCLE

Thierry BECK, Jeannine CORBONNOIS

## Résumé

L'étude s'inscrit dans le prolongement des travaux réalisés entre 1980 et 2000, qui ont mis en évidence le rôle des activités humaines (extractions de granulats en lit mineur et report massif de ces dernières en lit majeur) dans la déstabilisation morpho-sédimentaire du lit de la Moselle à la sortie du massif vosgien, considérée comme une rivière à « moyenne énergie » (BCEOM, 1981, Maire et Lasserre, 1991, Maire et Corbonnois, 2000). Son ambition est d'examiner la résilience de l'hydrosystème et de déterminer sa trajectoire vers un nouvel équilibre dynamique. Notre étude porte sur un secteur de rivière long d'une dizaine de kilomètres où les interventions anthropiques récentes ont été moins fortes qu'ailleurs (exception faite d'« opérations blanches » permettant de rétablir les sections d'écoulements dans les zones de sur-sédimentation suite aux crues de 1982 et 1983). Deux séries de données sont traitées : 1) les plus anciennes concernent la période 1980-2000. Elles proviennent d'études antérieures que nous réinterprétons, 2) les plus récentes ont été mesurées sur le terrain entre 2003 et 2012. Notre objectif est de déterminer l'ampleur de la déstabilisation du secteur étudié au cours de la période 1980-2000, en réponse à de fortes perturbations intervenues sur les portions de linéaires situées en amont et en aval et de mettre en évidence les évolutions morpho-sédimentaires survenues depuis 2003 par une approche morphologique (Martin et Church, 1995 ; Ashmore et Church, 1998 ; Brasington *et al.*, 2000 ; Eaton et Lapointe, 2001 ; Fuller *et al.*, 2003 ; Ham, 2005) et hydraulique. Modifications du profil longitudinal et recouvrements de méandres entretiennent une importante dynamique du lit de la Moselle. Par ailleurs, nos observations mettent en évidence l'effet de facteurs locaux (présence d'aménagements et de méandres ancrés) sur cette dynamique. Ainsi, depuis le milieu du XX<sup>ème</sup> siècle, le réajustement de la Moselle, qui se réalise selon des modes variés, n'est pas encore achevé. Cette instabilité, qui constitue l'originalité du secteur, est par ailleurs prise en compte par une gestion spécifique de l'hydrosystème (protection de la biodiversité, prise en compte de la capacité auto-épuratoire du cours d'eau, régulation des débits de crues).

## Mots-clés

dynamique fluviale, Moselle, extraction de granulats, Lorraine, résilience

## Abstract

*The study is a continuation of the work performed between 1980 and 2000, which highlighted the role of human activities (riverbed gravel extraction and massive shift in floodplain) in morphosedimentary destabilization of the Mosel bed at the outlet of the Vosges, considered as a "average power" river (BCEOM, 1981, Maire-Lasserre, 1991, Maire-Corbonnois, 2000). Its ambition is to examine the resilience of the river system and to determine its trajectory towards a new dynamic equilibrium. This study focuses on a river area along ten kilometers where recent human interventions have been less strong than elsewhere (except for "white operations" to restore flow sections in areas of over- sedimentation following to the floods of 1982 and 1983). Two sets of data are processed: 1) the oldest concerned the period 1980-2000. They come from previous studies that we reinterpret, 2) the most recent were measured in the field between 2003 and 2012. Our goal is to determine the extent of the destabilization of the study area during the period 1980-2000 in response to major disruptions that occurred on linear portions upstream and downstream and to highlight morphological changes sedimentary occurred since 2003 by a morphological approach (Martin and Church, 1995, Ashmore and Church, 1998, Brasington *et al.*, 2000, Eaton et Lapointe, 2001, Fuller *et al.*, 2003, Ham, 2005) and hydraulic. Modifications of the longitudinal profile and meandering overlap maintain high dynamics of the bed of the Mosel. Furthermore, our findings highlight the impact of local factors (presence of riverbanks protections and entrenched meanders) on this dynamic. Thus, since the mid-twentieth century, Mosel readjustment, which is realized according to various modes, is not yet complete. This instability, which is the originality of the sector is also taken into account by a specific management of the hydrosystem (protection of biodiversity, taking into account of the self-purifying capacity of river, flood control regulation).*

## Keywords

*fluvial dynamics, Moselle, gravel extraction, Lorraine, resilience*

## I. INTRODUCTION

Le temps de réponse des hydrosystèmes aux modifications de leur environnement est un facteur important de la morphogénèse fluviale. Il traduit la réactivité des cours d'eau et leur capacité à s'ajuster aux modifications dues à des conditions naturelles ou déterminées par des interventions anthropiques (Kondolf, 1994 ; Brunnsden, 2001). Il est d'autant plus court que la résistance du chenal est faible et l'énergie hydraulique forte. Les processus morphologiques qui en découlent, renouvellent les formes préexistantes ou en créent de nouvelles. Les modalités de l'ajustement des rivières sont liées aux conditions du milieu ainsi qu'aux dimensions de l'hydrosystème (Martin-Vide *et al.*, 2010 ; Wishart *et al.*, 2008). Elles sont largement tributaires de facteurs locaux qui expliquent d'ailleurs des situations très variées qui se succèdent sur de courtes distances (Dufour *et al.*, 2015). Sur le temps long, la durée nécessaire pour que ces ajustements se réalisent est étudiée entre autres par des approches géoarchéologiques (Arnaud-Fassetta, 2011). Sur le temps plus court, (décennies, siècles), elle est mise en évidence par des approches diachroniques effectuées à partir de documents anciens et de photographies aériennes (David *et al.* 2015). Des mesures de terrain sont faites depuis quelques années notamment à partir de levés topo-bathymétries, de levés Lidar ou plus récemment de l'acquisition de nuages de points par scanner 3D (Nasermoaddeli et Pasche, 2008 ; Lague et Brodu, 2013). Elles autorisent la production de bilans sédimentaires. La méthode par l'approche morphologique, largement utilisée dans le cas des rivières à fond caillouteux pour calculer ces bilans, a connu d'importants développements au cours des dernières années (Martin and Church, 1995 ; Ashmore and Church, 1998 ; Brasington *et al.*, 2000 ; Eaton and Lapointe, 2001 ; Fuller *et al.*, 2003 ; Ham, 2005 ; Rollet, 2007). Les plus récents reposent sur la transformation des surfaces érodées et déposées en volumes à partir de l'exploitation d'informations relatives aux hauteurs de berges. Cette méthode, qui permet d'analyser un linéaire important à partir notamment de procédures d'ortho-rectification de photographies aériennes, a été développée par Ham and Church (2000, 2005) sur un cours d'eau divagant (la rivière Williwick), caractérisé par une relative stabilité verticale du lit et adaptée pour des cours d'eau à méandres mobiles (Rollet, 2007 ; Rollet et Piégay, 2013). Elle permet, en plus de l'identification en plan des surfaces stables, en éro-

sion ou en dépôt, de prendre en compte l'évolution verticale du lit. Cette dimension verticale est quantifiée à partir des variations altitudinales des lignes d'eau entre le début et la fin de la période de suivi.

Ainsi, en prenant en considération les modalités du transport solide en lien avec les événements hydrologiques survenus pendant la période d'étude, ces mesures permettent d'examiner à grande échelle les transformations intervenues, réversibles ou non, selon la résilience des systèmes fluviaux et des effets rémanents liés aux interventions anthropiques (Lespez *et al.*, 2015).

Dans le cadre de notre recherche, il s'agit d'étudier les impacts sur le lit de la Moselle, de l'extraction de granulats au cours d'une bonne partie de la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. L'analyse des données rassemblées a ainsi pour objectif d'examiner la résilience de l'hydrosystème Moselle et de déterminer sa trajectoire vers un nouvel équilibre dynamique. Les indicateurs pris en compte pour la zone d'une longueur de 50 km, allant de Golbey (aval immédiat d'Épinal) à Méréville (Moselle «sauvage» non canalisée), sont la distribution des morphologies du lit et leurs variations depuis 1975, sur la base de photographies aériennes et d'investigations de terrain (Corbonnois et Beck, 2002 ; CEGUM, 2006). Pour le tronçon d'étude qui va de Gripport - Bayon (long de 12 km), les indicateurs sont les volumes de sédiments mobilisés par la Moselle et représentés par des bilans sédimentaires établis depuis le début des années 2000 (entre 2003 et 2012). Il s'agit ainsi de montrer comment et à quelle vitesse la Moselle bouge. Par ailleurs, les spécificités hydrogéomorphologiques du tronçon Gripport-Bayon sont désormais prises en compte par une réserve naturelle régionale créée en 2006 (Jung, 2012).

## II. TERRAIN D'ÉTUDE

La zone d'étude se situe à la sortie du massif vosgien où la Moselle parcourt un plateau incliné vers le NW, zone de transition entre le massif ancien à substratum granito-gneissique et les ensembles sédimentaires de l'est du bassin de Paris formés par les grès vosgiens puis les niveaux calcaro-marneux du Trias moyen et supérieur (Figure 1).

Le module de la Moselle à la sortie des Vosges est de l'ordre de 40m<sup>3</sup>/s. La rivière au tracé sinueux

(indice de sinuosité de 1.4 ; Chardon, 2014) s'écoule à l'aval d'Épinal selon une pente longitudinale de 1,5 ‰ dans un lit majeur large de 500 à 600 m, sillonné dans le détail par d'anciens chenaux encore faiblement marqués dans la topographie actuelle. Ce lit majeur est emprunté également par le canal de l'Est branche Sud. La Moselle est un cours d'eau de moyenne énergie. La puissance spécifique actuelle est de l'ordre de 45W/m<sup>2</sup> sur les portions les moins anthropisées, entre les communes de Grippont et Bayon, avec d'importants contrastes spatiaux (25W/m<sup>2</sup> et 90W/m<sup>2</sup>, respectivement pour les premiers et troisièmes quartiles dans ce même secteur). Elle transporte une charge alluviale grave-lo-caillouteuse (diamètre médian des matériaux de la sub-surface de l'ordre de 35mm) alimentée principalement par les sédiments mis en place dans le lit majeur au cours du Tardiglaciaire (entre -12000 et - 9000 ans : Carcaud, 1992 ; Cordier, 2002), sur une épaisseur variable pouvant atteindre 5 à 7m.

Du fait de leur abondance, les sédiments en transit dans le lit ont été régulièrement prélevés jusque vers la fin du XX<sup>ème</sup> siècle (Bonfont *et al.*, 1997 ; Maire et Lasserre, 1991 ; Edelblutte, 1997). Comme sur de très nombreuses autres rivières (Landon *et al.*, 1998 ; Schmidt *et al.*, 2013), les extractions ont généré un déficit sédimentaire qui continue à influencer le fonctionnement géomorphologique actuel. Les prélèvements les plus abondants ont été effectués après la seconde guerre mondiale et jusqu'aux années 1980 (Figures 2a et 2b). Ultérieurement interdits (arrêté du 22 septembre 1994 relatif aux carrières), ils avaient fini par créer de graves nuisances, en générant des déséquilibres spatiaux significatifs, comme en atteste l'état du lit de la Moselle au tournant des années 1980 (Figure 2) et plus tard, à partir du début des années 2000, de défluviations et de recoupements de sinuosités.

### III. DÉSTABILISATION MORPHO-SÉDIMENTAIRE ET CONSÉQUENCES SUR LE FONCTIONNEMENT ACTUEL

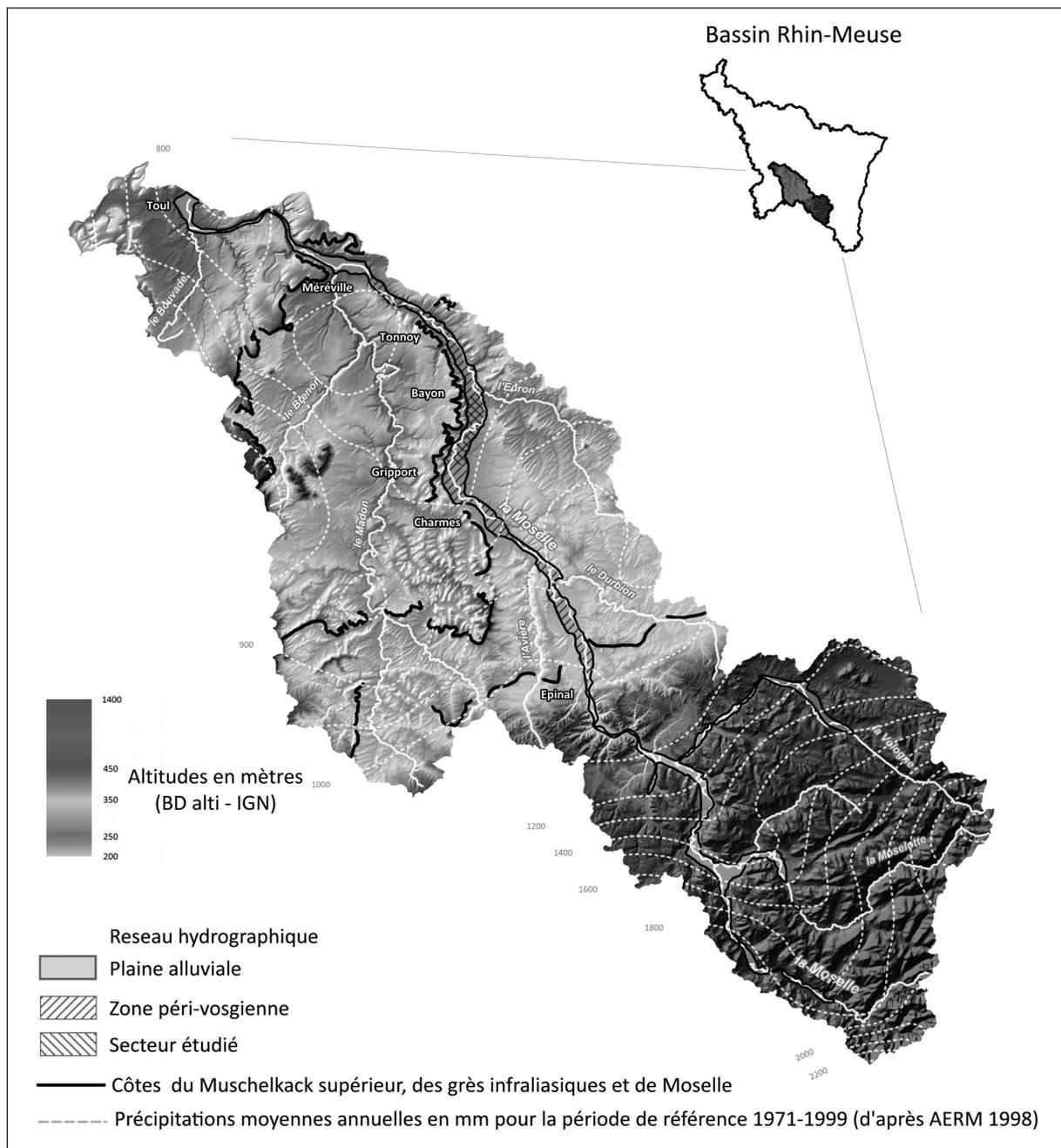
Les perturbations morfo-sédimentaires liées aux extractions de granulats ont fait l'objet de plusieurs études à partir des années 1980 (Maire et Gobert, 1981 ; BCEOM, 1981 ; Maire et Lasserre, 1991 ; Maire et Corbonnois, 1999 et 2000). Leur objectif était de définir des mesures visant à maîtriser le processus de creusement du lit sur la base d'investiga-

tions géomorphologiques, de levés topographiques et d'analyses granulométriques. On dispose ainsi d'un état du lit à un moment clé, correspondant à l'arrêt des prélèvements dans le lit mineur et à la veille de fortes crues intervenues en 1982 et 1983 (d'occurrences décennale à vicennale).

La comparaison du levé topographique effectué en septembre 1979, au profil de la Moselle réalisé à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle (profil Grandes Forces Hydrauliques réalisé entre 1865 et 1884, Maire et Gobert 1981), met bien en évidence le rôle majeur joué par les extractions en lit mineur et la propagation depuis les principales fosses de fronts d'érosion régressive. Seul le secteur compris entre le barrage de Bainville et le pont de Bayon et sur lequel porteront nos mesures réalisées à partir du début des années 2000, est alors en excédent sédimentaire (Figure 2c). Les études réalisées dans les années 1980 (Maire et Gobert, 1981 ; BCEOM, 1981) ont montré que la Moselle évacuait à Velle Saint Mard 90 000 tonnes de sédiments en moyenne par an pour une injection à l'amont, à Épinal, de 11 000 tonnes/an (estimation faite à partir de l'application de la formule de Meyer-Peter et Muller, de données topographiques et d'analyses granulométriques des alluvions). Auparavant, Frécaut (1971, 1972) avait évalué à quelques milliers de tonnes de matériaux entrant à Épinal et à quelques dizaines de milliers sortant en aval. L'analyse du BCEOM a mis également en évidence le « piégeage » local de matériaux dans les plus anciennes fosses d'extractions, en cours de comblement.

À partir de ces données anciennes, nous avons estimé des puissances spécifiques à l'échelle de tronçons élémentaires longs de 500 mètres. Les résultats (Figure 2d) montrent bien la fragmentation fonctionnelle du lit avec une alternance de secteurs de faible puissance spécifique (capacité de transport faible, voire nulle) et de secteurs où la chenalisation et l'incision du lit amplifient la capacité de transport et ainsi la vidange sédimentaire.

En 1991, les travaux de Maire et Lasserre ont souligné les effets dévastateurs des crues de 1982 et 1983 dont les actions morphogènes se sont superposées à celles des extractions. Les auteurs y voient la liquidation des éléments d'artificialisation antérieure (destruction du barrage d'Igney, comblement des fosses d'extractions...) et posent l'hypothèse de l'initiation d'une phase d'auto-restauration du



**Figure 1.** Caractéristiques du bassin versant, localisation de la zone péri-vosgienne et du secteur analysé

milieu fluvial et de rétablissement de la continuité fonctionnelle du lit, organe de transfert d'eau et de sédiments.

Plus récemment, du fait de l'évolution rapide de certains secteurs lors des crues de l'hiver 1998-1999 (d'occurrence quinquennale), un diagnostic portant sur des tronçons de Moselle compris dans la zone d'étude (Maire et Corbonnois, 1999 et 2000) a montré les modifications des secteurs les plus exposés. Il met en lumière les processus intervenant dans l'instauration d'un nouvel équilibre dynamique en

réponse aux aléas hydrologiques, aux extractions de sédiments en lit mineur ainsi qu'à l'endiguement du lit de la Moselle lié au report massif des extractions vers le lit majeur (après leur arrêt en lit mineur). Basés essentiellement sur des approches qualitatives (cartographie comparative des états successifs du lit de la Moselle), des scénarii d'évolutions futures ont conduit à plusieurs interrogations et concluent sur la nécessité d'acquérir de nouvelles connaissances (notamment de mesures de terrain) afin de quantifier les processus et de valider les hypothèses formulées. Ainsi, l'objet des mesures de terrain et de leurs

traitements présentés dans la suite de l'article, s'inscrivent-ils dans la continuité de ces travaux. Ils ont pour principale finalité d'appréhender les processus morpho-sédimentaires en lien avec l'auto-restauration de l'hydrosystème mosellan en cours dans le secteur péri-vosgien.

#### IV. DONNÉES ET MÉTHODES DE TRAITEMENT DES MESURES

Les données utilisées, de différentes natures, sont constituées : 1) d'informations non exploitées dans les études précitées, se rapportant à la géométrie de lit : levés topo-bathymétriques réalisés dans de cadre des « opérations blanches » effectuées suite aux crues de 1982-1983 (issus des archives VNF de Nancy) et levés topo-bathymétriques de 1989 similaires à celui réalisé en 1979 (BETURE-SE-

TAME-EST, 1991) ; 2) de cartes des morphologies fluviales réalisées en 2001 (Corbonnois et Beck, 2002, CEGUM, 2006) ; 3) de nos mesures de terrain acquises depuis 2003 : levés bathymétriques et analyses de la granulométrie des sédiments du lit et des berges de 2003 à 2012 ; 4) des photographies aériennes disponibles sur la période 1975–2014, préalablement géoréférencées et redressées sur la base d'orthophotoplans récents par l'emploi de logiciels dédiés (ARCGIS et ERDAS IMAGINE).

Leurs traitements ont servi à produire des indicateurs utilisés pour retracer les conditions de la morphogénèse.

Pour l'ensemble du linéaire compris entre Golbey et Méréville, leurs traitements effectués pour des tronçons de 500m de long (les mêmes que ceux de la Figure 2) ont permis : 1) de dresser un état du lit de

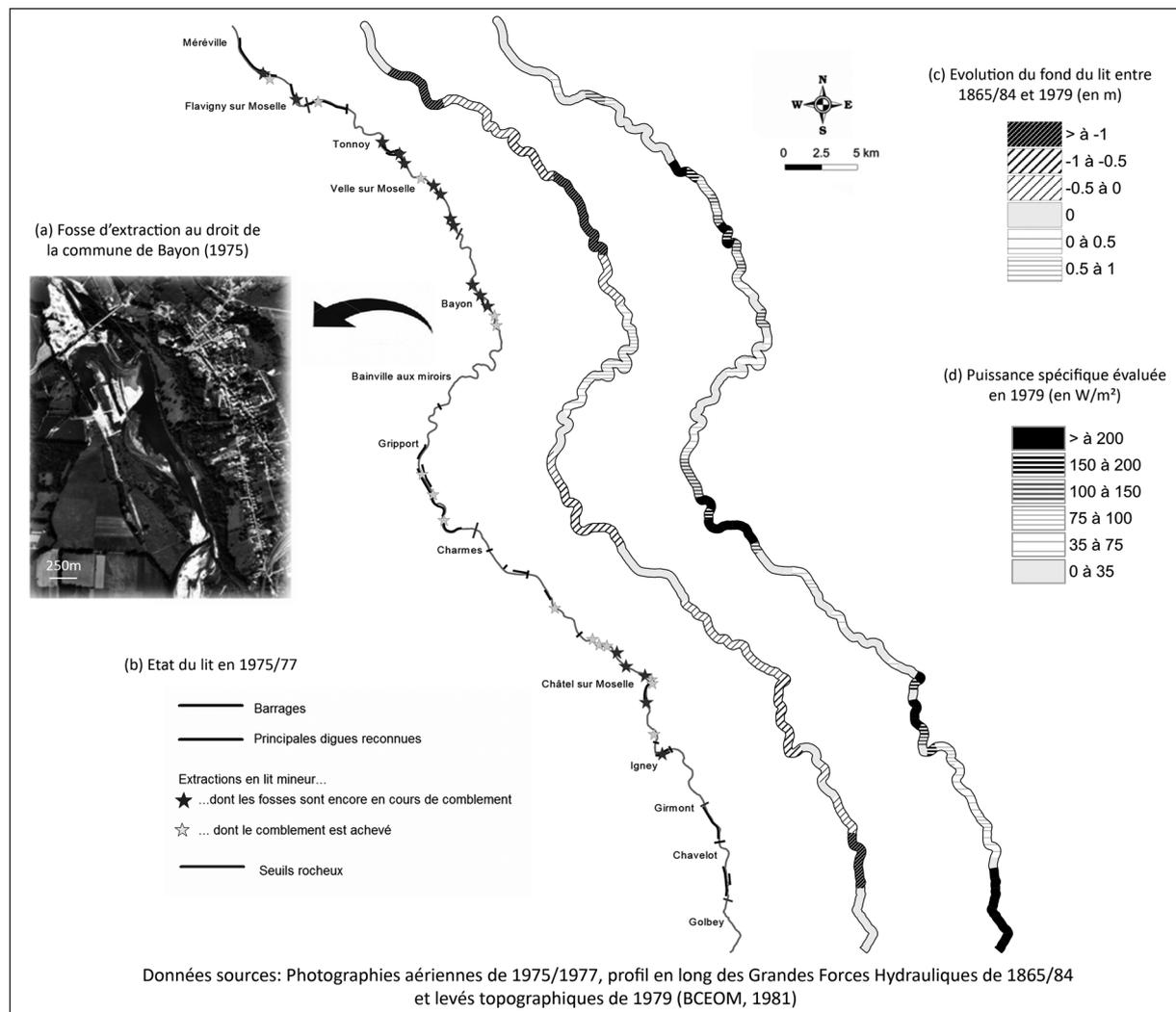


Figure 2. État du lit de la Moselle au tournant des années 1980 (d'après Beck et Corbonnois, 2003)

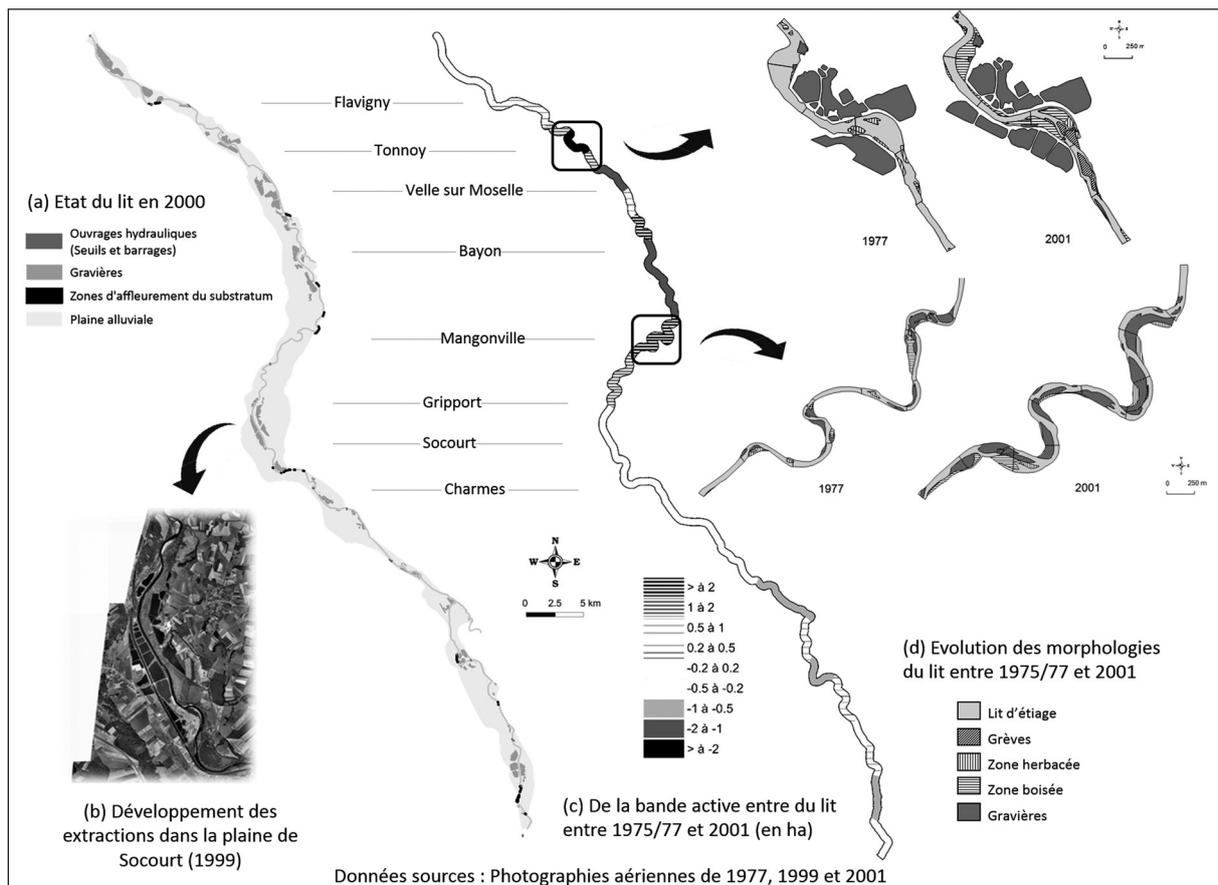


Figure 3. État du lit de la Moselle et évolution entre 1975 et 2001 (d'après Beck et Corbonnois, 2003)

la Moselle au début des années 2000 comprenant la localisation des extractions d'alluvions en lit majeur et les ouvrages transversaux susceptibles d'influer sur le transit des matériaux du lit (Figure 3a et b) ; 2) de déterminer l'évolution de la bande active entre 1975/1977 et 2001 (Figure 3c) qui comprend à la fois la surface en eau et la surface en grève. La bande active est considérée comme révélatrice de l'ampleur de la dynamique de l'hydrosystème ; 3) et pour deux tronçons, de mettre en évidence la modification des morphologies fluviales (Figure 3d) à partir de leur cartographie en 1977 et en 2001.

Pour le secteur compris entre Gripport et Bayon, étudiés plus en détails : 1) des profils longitudinaux de la Moselle issus de 4 campagnes comprenant 75 à 85 profils transversaux : levés en 1979 et 1989 (études BCEOM de 1981 et BETURE-SE-TAME-EST de 1991), et levés de 2003 et 2012 (issus de nos mesures), sur lesquels sont reportés les cotes du lit rocheux reconstituées à partir d'observations de terrain et des données de sondages bancarisés par le BRGM (<http://infoterre.brgm.fr/>) (Figure 4). Du fait de l'importante mobilité latérale

du lit, une homothétie a été réalisée à partir de repères fixes (ponts, profils situés au droit de sections rectilignes peu mobiles...) pour re-projeter les profils d'archives sur le talweg du lit de 2003 (année du démarrage de notre suivi) et ainsi permettre la superposition de profils en long des différentes années ; 2) les volumes de sédiments mobilisés par la Moselle entre 1979 et 2012 pour l'ensemble du tronçon et en des tronçons spécifiques affectés par des recouvrements de méandres. Ces volumes ont été calculés à partir d'une approche morphologique menée sur la base des levés topographiques des différentes périodes (Martin and Church, 1995 ; Eaton and Lapointe, 2001 ; Fuller *et al.*, 2003 ; Ham, 2005) (Figure 5). Cette approche repose sur le concept de continuité du transfert des alluvions (Martin and Church, 1995 ; Eaton and Lapointe, 2001 ; Ham, 2005). Elle considère que les modifications de la morphologie du chenal liées au déplacement des matériaux dans le lit permettent d'estimer les volumes charriés. On calcule ainsi un budget sédimentaire de la charge grossière en appliquant le principe de continuité des matériaux constitutifs du lit, tel que pour un tronçon et pour

une période d'observation donnée :

$$S_o = S_i - \Delta S$$

Avec :

$S_o$  : le volume de sédiments sortants

$S_i$  : le volume de sédiments entrants

$\Delta S$  : la variation du stock sédimentaire

L'ensemble des données d'archives (levés de 1979, 1983-1984 et 1989) a été numérisé et traité sous DAO afin de reconstituer pour chaque levé la géométrie du lit de l'ensemble du secteur. Le positionnement des profils de 1989 a servi de référence pour générer les surfaces de comparaison des levés réalisées aux différentes dates. Les levés de 2003 et de 2012 épousent également le canevas de 1989 tout en se densifiant au gré des singularités rencontrées lors de leurs réalisations. La précision des volumes de sédiments ainsi calculés, qui prennent en compte ceux potentiellement extraits lors des deux « opérations blanches » réalisées sur le secteur (archives de VNF Nancy), est admise comme suffisante pour comparer les périodes les unes aux autres ; 3) une représentation des surfaces, érodées et déposées, évaluées à partir des photographies aériennes de l'IGN en 2000, 2003, 2010 et 2014, en vue de compléter l'analyse précédente et de disposer d'une information subactuelle (Figure 7).

## V. RÉSULTATS

### A. Ampleur de l'évolution morphologique de l'ensemble de la zone d'étude entre 1980 et 2000

L'évolution de la bande active est considérée comme le reflet des réajustements intervenus après l'arrêt des extractions en lit mineur et leur report en périphérie du lit vif au cours des décennies 1980 et 1990. Les contrastes observés d'un tronçon de 500 m à l'autre ont été classés en trois types, exprimant différents états : diminution de la surface de la bande active, augmentation de cette surface et relative stabilité (Figure 3c).

Les secteurs de forte diminution correspondent à d'anciennes fosses d'extraction qui se sont comblées. Les remplissages émergents ont été fixés par la végétation depuis le début des années 80. Aussi, à l'inverse du rétablissement de la continuité fonctionnelle du lit à l'issue du comblement de ces fosses – suggéré par Maire et Lasserre en 1991 –

leur végétalisation contribue à initier d'autres discontinuités ; elle fixe des hauts fonds qui favorisent à leur amont des dépôts régressifs comme c'est le cas de la fosse comblée, située en amont du pont de Tonnoy, où ces dépôts se sont propagés sur un linéaire long de plus d'un kilomètre (Figure 3d).

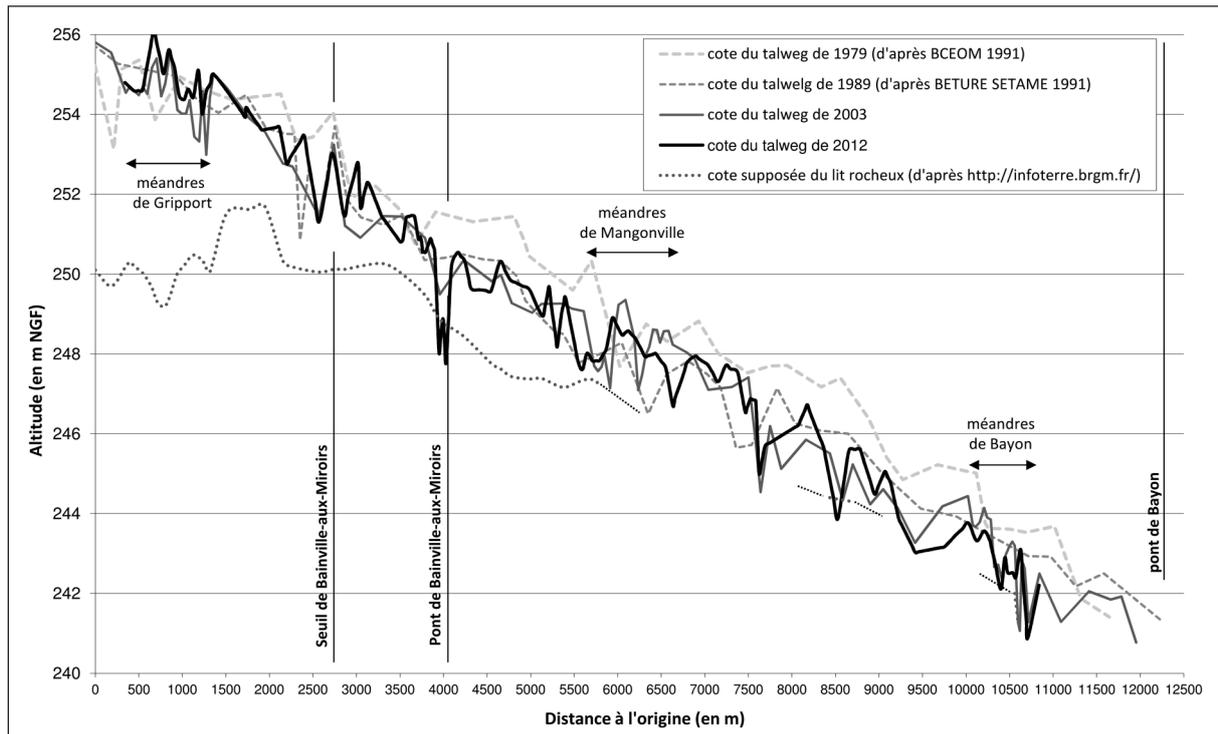
Les secteurs de forte augmentation de surface comprennent des bancs vifs en extension alimentés par des apports amont et des apports latéraux abondants issus du recul des berges. À Mangonville (Figure 3d), l'augmentation de la surface de la bande active est liée à la forte divagation du lit dans un secteur non contraint par des extractions récentes de sédiments en lit majeur.

Si l'analyse de l'évolution de la bande active qui permet d'identifier une succession d'unités géomorphologiques d'ablation ou d'accumulation, n'est pas suffisante pour appréhender finement les réajustements opérés, elle permet cependant d'apporter des éléments contextuels pour mieux comprendre les dynamiques qui animent le secteur compris entre Gripport et Bayon.

Ce secteur, à l'exception des « opérations blanches » réalisées pour rétablir ponctuellement les sections d'écoulements après les crues de 1982 et 1983, ne comprend aucune fosse d'extraction (Figure 2b). Néanmoins, il a enregistré les effets des perturbations intervenues sur les portions de linéaires l'encadrant, à savoir : 1) une vague d'érosion régressive initiée par les importantes fosses d'extractions non encore comblées situées en aval, celle du pont de Bayon était encore exploitée à la fin des années 1970 (Figure 2a) ; 2) une alimentation en matériaux, depuis l'amont, résultant de l'importante incision de la Moselle entre Charme et Socourt en lien avec les extractions d'alluvions en lit mineur (Figure 2b), puis avec l'endiguement généralisé du lit entre les gravières ouvertes en lit majeur (Figures 3a et 3b).

### B. Variations du profil en long du lit de la Moselle sur le secteur Gripport-Bayon

À l'inverse de ce qui était suggéré précédemment à partir de l'analyse de la bande active, la comparaison des levés de 1989 à ceux de 1979 montre qu'en dix ans, le lit de la Moselle ne s'est pas exhaussé mais il s'est globalement abaissé (Figure 4). Les extractions de granulats situées en amont et en aval du secteur ont modifié significativement



**Figure 4.** Évolution du profil en long de la Moselle (secteur Gripport - Bayon)

la géométrie du chenal en entraînant l'incision de la rivière et la vidange partielle des alluvions (prédominance de l'ablation et du transport depuis le début des extractions en lit mineur). Entre 1989 et 2003, l'incision est plus faible mais dans le détail l'évolution se traduit par la formation de courts tronçons en approfondissement et en exhaussement. Cette configuration, en lien avec l'amortissement de l'impact de l'érosion régressive, résulte également de la mise à nu, localement, du lit rocheux ou d'un pavage du fond par les matériaux les plus grossiers hérités (Beck et Corbonnois, 2007).

La réalisation de levés topo-bathymétriques en 2012 montre que le profil du lit de la Moselle a peu évolué depuis 2003. Les modifications concernent de courts secteurs qui correspondent à des ajustements localisés déterminés par des situations spécifiques, en lien notamment avec le développement récent de points durs en berges et de recouvrements de sinuosités (cf. infra).

### C. Évolution des modalités du transit sédimentaire

#### 1. Analyse morpho-sédimentaire du lit principal

La Figure 5 représente les bilans sédimentaires volumétriques ainsi que l'évolution des volumes

charriés moyens annuels, estimés pour les trois dernières décennies. Les résultats montrent une réduction significative du transit entre la première période (1979-1989) et les deux suivantes (Figure 5). Pour la dernière période, cette situation ne résulte pas tant du caractère moins morphogène des débits (Tableau 1) que de l'amortissement de l'érosion régressive initiée par les fosses d'extractions de granulats. Mais dans le détail et comme le montraient déjà les profils en long, les contrastes sont notables d'une période à l'autre et d'un tronçon au suivant. Ils sont déterminés par le recouvrement de méandres et la formation de chenaux souvent calés sur d'anciens tracés (Figure 6). Ces événements transforment la redistribution des alluvions mobilisées par la Moselle et les volumes déplacés mis en évidence par les bilans sédimentaires.

#### 2. Analyse morpho-sédimentaire des zones de recouvrement

Deux recouvrements sont étudiés à partir des levés topo-bathymétriques effectués en 2003 et 2012 (pas de mesures antérieures).

Le recouvrement principal ((a), Figure 6) est intervenu au cours de l'hiver 2002-2003. Le nouveau chenal court-circuite le seuil de Bainville-aux-Miroirs. Il a un tracé subrectiligne et une pente géné-

rale marquée (de l'ordre de 2.5 %) qui le raccorde, après un trajet de 1200m au lit de la Moselle. En 2012, la moitié du linéaire est recalibrée par l'érosion régressive qui se propage à partir de la confluence avec la Moselle. La puissance spécifique est passée de 15w/m<sup>2</sup> en 2003 à 45w/m<sup>2</sup> en 2012. L'agrandissement des sections d'écoulement s'est traduit par la remobilisation et la réinjection dans le lit de la Moselle d'un volume de matériaux de l'ordre de 20 000 m<sup>3</sup>.

À l'aval de la confluence du chenal de recouplement avec la Moselle, l'afflux d'alluvions ennoie le lit et entraîne l'ouverture d'un autre chenal de recouplement qui raccorde les deux boucles de Mangonville ((b) Figure 6). Ces deux recouplements réempruntent pour partie d'anciens chenaux un moment déconnectés du chenal principal du fait de son incision.

Mais les chenaux nouvellement réactivés ne se développent que lentement compte tenu de l'abondance des sédiments à mobiliser (profil irrégulier et puissances spécifiques contrastées). Il en résulte de nouvelles évolutions et notamment le développement de ravines et chenaux de crues pour l'instant discontinus mais qui préfigurent un troisième recouplement de méandres ((c) Figure 6).

#### D. Évolution de la bande active au cours de la période récente

La quantification des surfaces érodées et déposées effectuée à partir des photographies aériennes IGN de 2003, 2010 et 2014 permet de montrer comment les morphologies fluviales se reconfigurent au cours de la dernière décennie et comment le linéaire fluvial se fragmente entre secteurs d'accumulation et d'ablation (Figure 7).

Entre 2003 et 2010, pour partie en lien avec une légère réduction du nombre de jours morphogènes (Tableau 1), l'érosion fluviale est moins active qu'antérieurement (Figure 7b). L'hydrosystème enregistre les premiers effets du recouplement du train de méandres de Bainville-aux-Miroirs par un chenal secondaire.

À partir de 2010, les modifications observées résultent principalement de l'instauration de nouveaux ajustements commandés par une sollicitation plus fréquente du lit majeur liée en plus de l'encombrement du lit, à des débordements plus fréquents qu'antérieurement. Cela se traduit par la formation de nouveaux recouplements de boucles en lien avec les évolutions morpho-sédimentaires étudiés dans les paragraphes précédents. Ces évolutions accen-

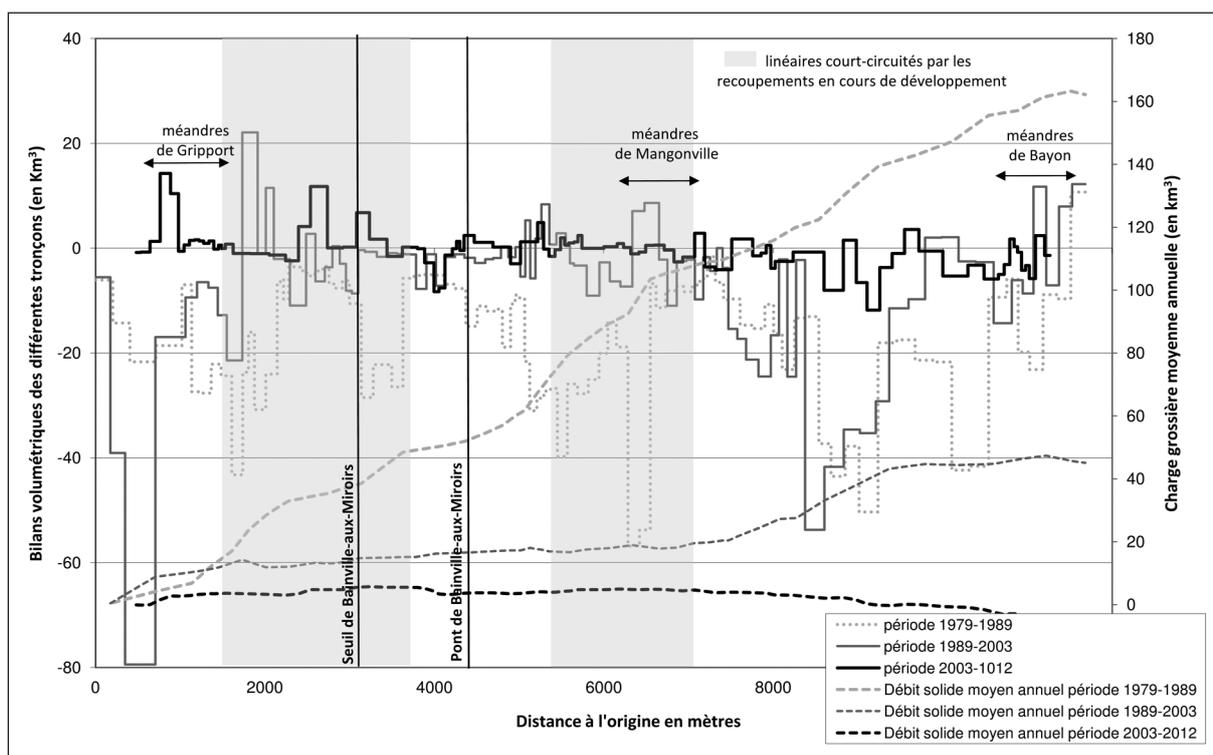
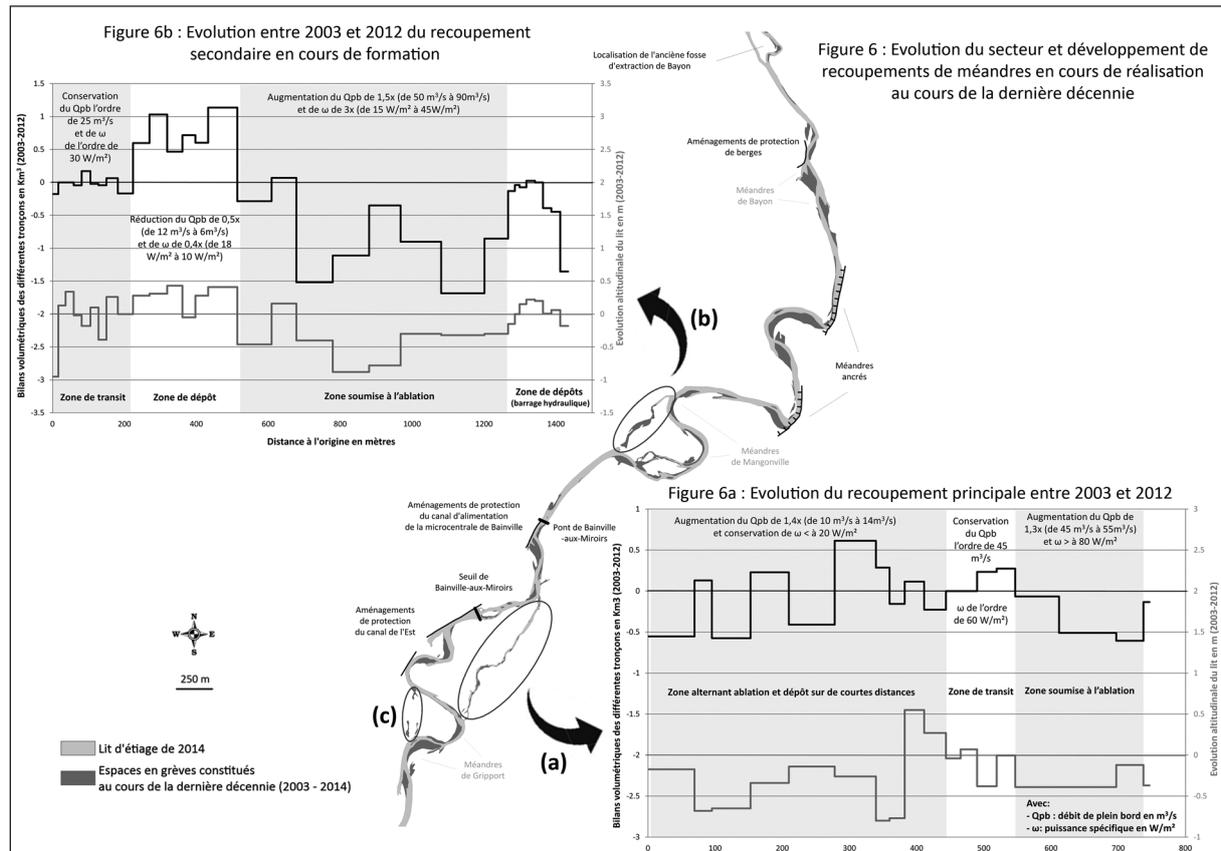


Figure 5. Évolution des volumes charriés au cours des trente dernières années



**Figure 6.** a) Évolution du secteur et développement de recouplements de méandres en cours de réalisation au cours de la dernière décennie. Évolution du recouplement principale entre 2003 et 2012, b) Évolution du secteur et développement de recouplements de méandres en cours de réalisation au cours de la dernière décennie. Évolution entre 2003 et 2012 du recouplement secondaire en cours de formation

tuent encore les contrastes spatiaux et préfigurent de nouvelles modifications (Figures 7b, 7c et 7d) qui se propagent d'amont en aval et agissent sur les différents méandres selon des modes variés : 1) le linéaire amont (méandres 1 à 7) : la dynamique du lit mineur se calme en lien avec la contraction significative des sections d'écoulement (Figure 7d), combinée à la réduction des apports amont. Les eaux de crue envahissent plus fréquemment le lit majeur et façonnent ou refaçonnent des chenaux. Entre les méandres 2 et 4 on observe en 2012 des dépôts d'alluvions dans un chenal nouvellement ouvert. L'incision du méandre n°4, « ancré » dans les aménagements de protection du canal de l'Est, contribue à amplifier la sinuosité 5 et favorise le développement de ravines qui annoncent la formation d'un futur recouplement de méandres. En aval, des reculs de berges dans les sinuosités 6 et 7 alimentent la sédimentation dans la Moselle qui reçoit également les matériaux issus du chenal secondaire. Cette évolution est bien visible entre 2012 et 2014 ; 2) la partie médiane du secteur (méandres 8 à 10) : elle est soumise aux apports de matériaux amont,

mais n'évolue plus beaucoup entre 2010 et 2014.

La dynamique tend à se reporter sur le chenal de recouplement ; le raccord avec la Moselle (méandre 10<sup>1</sup>) est le plus dynamique mais l'érosion se calme rapidement vers l'aval (méandre 10<sup>2</sup>) ; 3) la partie aval (méandres 11 à 20) : les contrastes modérément affirmés répondent à d'autres logiques. L'ancrage dans le versant rocheux de la sinuosité 12 crée un coude qui gêne le transit des sédiments et favorise les dépôts dans le méandre 11. Là l'encombrement du lit entraîne un élargissement du chenal qui a fait reculer considérablement les berges depuis 2003 (Figures 7c et 7d). Le même phénomène concerne les méandres suivants, 13 et 14. Les matériaux qu'elles livrent sont reconnus dans le lit par leur granulométrie plus fine que celle des sédiments du fond (Beck, 2012). Un schéma similaire concerne la sinuosité 15 encore plus fortement ancrée dans le versant que la 12. Au delà (à partir du méandre 16), la mobilité du lit est expliquée par les extractions de granulats d'abord en lit mineur puis en lit majeur (double sinuosité de Bayon).

	Sous-périodes		
	2000-2003	2003-2010	2010-2014
Débit moyen de la période (en m <sup>3</sup> /s)	56.0	42.3	47.7
Hydraulicité (débit moyen de la période/module)	1.2 (forte)	0.9 (modérée)	1.0 (moyenne)
morphogénèse modérée en lit mineur (nombre de jours dont le débit est compris entre une crue d'occurrence annuelle et biennale)	116 / 39 j.an	143 / 20 j.an	123 / 31 j.an
morphogénèse active en lit mineur (nombre de jours dont le débit est compris entre une crue d'occurrence biennale et quinquennale)	42 / 14 j.an	39 / 6 j.an	45 / 11 j.an
morphogénèse active en lit majeur (nombre de jours dont le débit est supérieur à une crue d'occurrence quinquennale)	1 / 0.33 j.an	3 / 0.45 j.an	1 / 0.25 j.an
nombre Total de jours morphogènes	159	185	169

module de la période 1980-2015: 48.5 m<sup>3</sup>/s

**Tableau 1.** Caractérisation de l'hydraulicité des différentes périodes du suivi à la station hydrométrique de Tonnoy (BV : 1976km<sup>2</sup>)

## VI. DISCUSSION

L'image de l'état de la Moselle a été construite à partir des caractéristiques de tronçons longs de 500 m. L'ensemble des levés permet de retracer les variations du lit au cours des trente dernières années et de déterminer l'ampleur et la caractéristique des perturbations morpho-sédimentaires qui ont affecté la rivière. Ces variations sont attestées par plusieurs indicateurs : profils longitudinaux (variation maximale de l'altitude du fond de 2m), modification de la surface de la bande active (de plus ou moins 2 à 3 ha/tronçon de 500m) évolution du tracé (migration latérale des méandres et formations/réactivations de chenaux latéraux, surfaces des bancs vifs), bilan sédimentaire (entre -50km<sup>3</sup> et + 20km<sup>3</sup>).

En comparaison avec d'autres systèmes fluviaux, ces caractéristiques sont bien celles d'une rivière de moyenne énergie mais dont le fonctionnement a été forcé par les extractions de granulats, en lit mineur puis en lit majeur.

Actuellement, le lit de la Moselle présente une succession de trois secteurs : 1) l'amont de Bainville : les variations sont modérées à faibles en liens avec les conditions du milieu ; proximité du substratum résistant, pavage d'alluvions grossières, contrôle par les barrages et fosses d'extraction de granulats le plus fréquemment comblées. Le lit de la Moselle se relève après 1979 puis se stabilise. La bande active est mobile jusqu'en 2001 et l'érosion latérale qui reste active jusqu'en 2003 se calme ensuite. Le système semble se stabiliser comme le montre l'état de 2014 ; 2) la partie centrale autour de Bainville et Mangonville : l'incision du lit s'effectue entre 1979 et 1989, puis le niveau du fond se stabilise ou se relève. À l'inverse du secteur précédent, l'érosion reste active ultérieurement. À partir de 2003 l'énergie de la rivière se répartit entre le chenal principal et des chenaux latéraux. La situation en 2014

montre que les alluvions surabondantes continuent d'encombrer le lit et favorisent l'ouverture d'autres chenaux latéraux ; 3) la partie aval : l'incision du lit d'abord modérée entre 1979 et 1989 se poursuit après 1989 (extractions de granulats en lit mineur tardivement arrêtées). Si la largeur de la bande active a peu varié jusqu'en 2001, les bancs à vif sont importants et continuent leur développement jusqu'en 2014.

On peut ainsi retenir que les formes fluviales actuelles se sont mises en place avant 2000 à l'amont et après 2003 à l'aval où elles sont actuellement plus dynamiques. Mais il n'est pas possible d'attribuer cette situation à la propagation d'une vague d'érosion unique. L'évolution est déterminée par de nombreuses commandes qui agissent globalement ou localement sur le lit fluvial et sur l'expression de sa dynamique. Leur combinaison détermine des changements dans la trajectoire fonctionnelle du lit ou en d'autres termes, peuvent impulser au même endroit des dynamiques opposées, qui s'instaurent momentanément ou durablement.

Des travaux ultérieurs auront à montrer, par des investigations à plus grande échelle ce que les tronçons de 500 m de long, pris en référence ici, pourraient masquer.

## VII. CONCLUSION

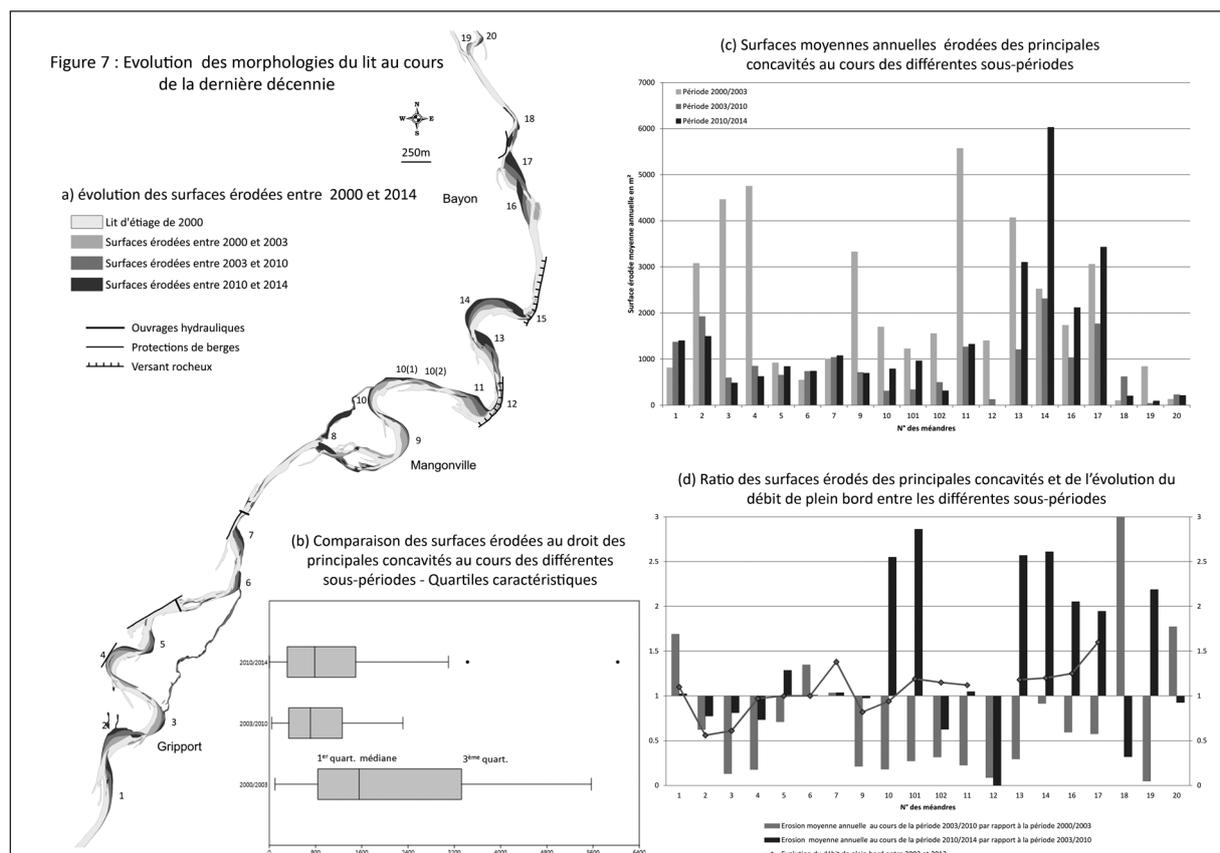
Le fonctionnement géomorphologique actuel de la Moselle montre une série de modifications du système fluvial qui conduisent ou ont conduit à une adaptation dans le détail aux conditions du milieu, naturelles et anthropiques. Ce fonctionnement répond à : 1) une commande principale intervenant sur le temps long (climat, drainage du plateau péri vosgien, mais également héritages géomorphologiques) qui a permis que se mettent en place des alluvions épaisses et grossières ; 2) une commande secondaire qui intervient sur des périodes de plusieurs décennies, déterminée par les interventions anthropiques qui modifient les conditions naturelle : aménagement du lit, extractions de granulats. Elles ont permis une vidange partielle des alluvions du lit fluvial ; 3) une commande locale qui agit à l'échelle de l'année ou de la saison : événements hydrologiques mais aussi ruptures et discontinuités du transfert des alluvions qui fragmentent l'espace et modifient le

tracé des écoulements par la création de chenaux latéraux. Comme cela a été montré, ces commandes impulsent des dynamiques variées qui font bouger la Moselle irrégulièrement dans l'espace et au cours du temps. Alors dans ce dispositif comment peut-on considérer le temps de résilience qui traduit l'aptitude d'un de la rivière à résister aux chocs et à reprendre sa structure initiale. Ici les chocs qui génèrent des perturbations, sont des événements aléatoires comme les crues ou non aléatoires, comme les extractions de granulats. La difficulté réside dans la définition de la structure initiale. Pour l'hydrosystème Moselle, elle est déterminée par plusieurs caractéristiques qui expriment un équilibre ou un déséquilibre morphodynamique.

On peut considérer qu'entre Gripport et Bayon, la structure initiale correspond à la situation de 1979 (Figure 2) lorsque tout l'ensemble du

tronçon présente des caractéristiques similaires. Actuellement, il est composé de trois secteurs (définis précédemment). Ainsi les effets des perturbations enregistrées par le lit fluvial depuis 1979 ne sont pas résorbés si on considère que l'état initial doit se reconstituer. Mais les transformations intervenues peuvent être irréversibles et conduire à une nouvelle structure puisque l'hydrosystème évolue selon des cycles qui se modifient au cours du temps, impulsant ainsi de nouvelles trajectoires fonctionnelles. Le temps de résilience est finalement celui qui permet de passer d'un cycle à l'autre. Entre Bayon et Gripport et par rapport à la situation de 2014, il a duré près de 35 ans et n'est probablement pas arrêté.

Aujourd'hui, le secteur est préservé de toute nouvelle altération anthropique, du fait des mesures de protections dont il fait l'objet. Il offre ainsi une



**Figure 7.** a) Évolution des morphologies du lit au cours de la dernière décennie. Évolution des surfaces érodées entre 2000 et 2014, b) Évolution des morphologies du lit au cours de la dernière décennie. Comparaison des surfaces érodées au droit des principales concavités au cours des différentes sous-périodes-Quartiles caractéristiques, c) Évolution des morphologies du lit au cours de la dernière décennie. Surfaces moyennes annuelles érodées des principales concavités au cours des différentes sous-périodes, d) Évolution des morphologies du lit au cours de la dernière décennie. Ratio des surfaces érodées des principales concavités et de l'évolution du débit de plein bord entre les différentes sous-périodes

opportunité rare de continuer à appréhender les processus morpho-sédimentaires sur ces hydrosystèmes à moyenne énergie.

## BIBLIOGRAPHIE

- Arnaud-Fassetta, G. (2011). L'histoire des vallées, entre géosciences et géoarchéologie. *Méditerranée*, 117, 25-34. URL : <http://mediterranee.revues.org/5877>.
- Ashmore, P. E. & M. A. Church. (1998). Sediment transport and river morphology: A paradigm for study, in *Gravel-Bed Rivers in the Environment*, edited by P. C. Klingeman, R. L. Beschta, P. D. Komar, and J. B. Bradley, pp. 115–148, Water Resour. Publ., Highlands Ranch, Colo.
- BCEOM (1981). Stabilisation du lit de la Moselle entre Epinal et Neuves-Maisons. Rapport d'étude. AERM. Metz. 72p.
- Beck, T. & Corbonnois, J., (2003). Les différents états du lit mineur de la Moselle entre Epinal et Méréville, étapes de la reconstruction d'un nouvel équilibre. Actes du Colloque «le fil de l'eau», Nancy, 10-12 mars 2003.
- Beck, T. & Corbonnois, J., (2007). Le transport sédimentaire actuel de la Moselle amont, comparaison de deux méthodes d'évaluation. Poster - Colloque AFEQ, Nancy 6 Juin 2007.
- Beck, T. (2012). Note relative aux évolutions récentes constatées sur le secteur Grippont-Bayon, non publié
- BETURE SETAME EST (1991). Étude d'aménagement de la Moselle entre Bayon et Grippont.
- Bonnefont, J-C. & Carcaud, N. (1997). Le comportement morphodynamique de la Moselle avant les aménagements. *Géomorphologie*, 4, 339-355.
- 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. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(9), 973-990.
- Brunsdon, D. (2001). A critical assessment of the sensitivity concept in geomorphology. *CATENA*, 42(2-4), 99-123.
- Carcaud, N. (1992). Remplissage des fonds de vallée de la Moselle et de la Meurthe en Lorraine sédimentaire. Thèse de doctorat. Université de Nancy. 281 p.
- CEGUM (2006). L'érosion fluviale de cours d'eau lorrains d'origine vosgienne : Moselle, Meurthe, Vezouze, Mortagne, Sarre. Rapport final. AERM, Conseil Régional de Lorraine, Zone Atelier de la Moselle.
- Chardon, V. (2014). Étude de l'évolution morphologique de la Moselle sauvage et de la dynamique de zones à forte mobilité. Mémoire de Master soutenu à l'université de Strasbourg. 147 p.
- Corbonnois, J. & Beck, T. (2002). Cartographie de la dynamique fluviale de la Moselle en amont du confluent de la Meurthe. Rapport CEGUM/DIREN Lorraine, 67p + annexe cartographique.
- Cordier, S., Harmand, D. & Beiner, M. (2002). Colloque international Q3 "Fluvial Archives Group", Clermont-Ferrand, 9-11 sept.2002 : communication "Pleistocene accretion in the Eastern Paris Basin : lithofacies and incision rhythms in the Meurthe and Moselle valleys".
- David, M., Carozza, J-M., Valette, P., Llubes, M., Py, V. & Groparu, T. (2015). Évolution de la dynamique fluviale de la moyenne Garonne toulousaine : apport d'une approche multi-sources cartes historiques, stratigraphie et géophysique sur le site Grenade-Ondes. *Géomorphologie*, 21, 21-43.
- Dufour, S., Rinaldi, M., Piégay, H. & Michalon, A. (2015). How do river dynamics and human influences affect the landscape pattern of fluvial corridors? Lessons from the Magra River, Central-Northern Italy. *Landscape and urban Planning*, 134, 107-118.
- Eaton, B.C. & Lapointe, M.F. (2001). Effects of large floods on sediment transport and reach morphology in the cobble-bed Sainte Marguerite River. *Geomorphology*, 40, 291-309.
- Edelblutte, S. (1997). Paysages et organization de l'espace en Lorraine: la vallée de la Moselle d'Epinal à Neuves-Maison. Thèse de doctorat en Géographie. Université de Nancy 2.
- Frecaut, R. (1971). Etude de charriage et de la Haute Moselle au moyen de galets radioactifs, CEA Saclay, Département Radioéléments.
- Frecaut, R. (1972). La Moselle et son bassin. Contribution à l'hydrologie et à la dynamique fluviale en milieu tempéré océanique, Thèse de doctorat d'Etat, Brest.
- Fuller, I.-C., Large A.-R.-G., Charlton M.-E., Heritage G.-L. & Milan D.-J. (2003). Reach-scale sediment transfers: an evaluation of two morphological budgeting approaches. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 889-903.
- Ham, D-G. & Church, M. (2000). Bed-material transport estimated from channel morpho-dynamics: Chilliwack River, British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 1123-1142.
- Ham, D-G. (2005). Morphodynamics and sediment transport in a wandering gravel-bed channel: Fraser River, British Columbia. Thesis. University of British Columbia. 224p.
- Jung, D. (2012). Lettre d'information de la réserve naturelle régionale «Moselle sauvage». Bulletin N°2.
- Kondolf, G.M. (1994). Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape and Urban Planning*, 28, 225-243.
- Lague, D., Brodu, N. & Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial

- laser scanner : application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 10-26.
- Landon, N., Piégay, H. & Bravard, J.P. (1998). The Drôme River incision (France): from assessment to management. *Landscape and Urban Planning*, 43, 119-131.
- Lespez, L., Viel, V., Rollet, A.-J. & Delahaye, D. (2015). The anthropogenic nature of present-day low energy rivers in western France and implications for current restoration projects. *Geomorphology*, 264, 64-76.
- Maire, G. & Gobert, A. (1981). Stabilisation du lit de la Moselle entre Epinal et Neuves-Maisons. Cartographie morphodynamique du lit et du fond de vallée : secteurs représentatifs au 1/50000. Rapport CGA-ULP pour le compte du BCEOM, 43 p + annexes.
- Maire, G. & Lasserre, S. (1991). Structure et fonctionnement d'un système fluvial déséquilibré par l'intervention anthropique : La Moselle non canalisée à la sortie du Massif Vosgien. *Mosella*, XVIII(n° spécial), 39-81.
- Maire, G. & Corbonnois, J. (1999). Évolution récente du lit de trois cours d'eau lorrains (Meuse, Moselle, Meurthe) en divers sites caractéristiques, AERM.
- Maire, G. & Corbonnois, J. (2000). Évolution morphodynamique récente de la Moselle entre Charmes et Bayon. Diagnostic de l'état actuel du lit, choix d'un type de gestion de l'espace fluvial. *RGL*, 75, 305-315
- Martin, Y. & Church, M. (1995). Bed-material transport estimated from channel surveys: Vedder River, British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20, 347-361.
- Martín-Vide P., Ferrer-Boix C. & Ollero A. (2010). Incision due to gravel mining: Modeling a case study from the Gállego River, Spain. *Geomorphology*, 117, 261-271.
- Nasermoaddeli, M. H. & Pasche, E. (2008). Application of terrestrial 3D laser scanner in quantification of the riverbank erosion and deposition. In: Proceedings of Riverflow2008, Cesme-Ismir, Turkey, Sep. 3-5, Vol (3), pp.2407-2416, (ISBN 978-605-60136-3-8).
- Rollet, A.-J. (2007). Étude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain. Thèse de doctorat. Université Jean Moulin (Lyon). 305 p.
- Rollet, A.-J. & Piégay, E. (2013). De l'intérêt de la quantification pour la gestion des systèmes fluviaux : exemple de la basse vallée de l'Ain. *Géomorphologie*, 1, 63-78.
- Schmidt, L., Bravard, J.J. & Rey, F. (2013). Maîtriser les évolutions du lit des cours d'eau (incision, atterrissement, ...) et mieux gérer les formes fluviales. In Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques : Pourquoi ? Comment ? Chocat, B. (coord). pp. 84-93.
- Wishart, D., Warburton, J. & Bracken, L. (2008). Gravel extraction and planform change in a wandering gravel-bedriver: The River Wear, Northern England. *Geomorphology*, 94, 131-152.

Coordonnées des auteurs :

Thierry BECK  
Ingénieur d'études  
Oteis  
thierry.beck@oteis.fr

Jeannine CORBONNOIS  
Professeure  
UMR 6590, ESO le Mans CNRS  
jeannine.corbonnois@univ-lemans.fr