



HAL
open science

Study of some Loir river sections (downstream Loir Basin) as a means to determine the dynamics of a low energy, harnessed river

Jeannine Corbonnois, Mathieu Bonnefond, Valentin Chardon, Stéphane Rodrigues, Philippe Jugé, José Cali, Jérôme Verdun, Elisabeth Simonetto, Wilfrid Tchekpo, Eric Labergerie, et al.

► To cite this version:

Jeannine Corbonnois, Mathieu Bonnefond, Valentin Chardon, Stéphane Rodrigues, Philippe Jugé, et al.. Study of some Loir river sections (downstream Loir Basin) as a means to determine the dynamics of a low energy, harnessed river. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 2016, 22 (4), pp.345 - 361. 10.4000/geomorphologie.11559 . hal-03635133

HAL Id: hal-03635133

<https://hal.science/hal-03635133>

Submitted on 11 Apr 2022

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

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



Détermination des conditions de la dynamique fluviale d'une rivière aménagée de basse énergie, à partir de secteurs du Loir (Bassin de la Loire aval)

*Study of some Loir river sections (downstream Loir Basin) as a means to
determine the dynamics of a low energy, harnessed river*

**Jeannine Corbonnois, Mathieu Bonnefond, Valentin Chardon, Stéphane
Rodrigues, Philippe Jugé, José Cali, Jérôme Verdun, Elisabeth
Simonetto, Wilfrid Tchekpo, Eric Labergerie et Guillaume Fauchoux**



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/geomorphologie/11559>

DOI : 10.4000/geomorphologie.11559

ISSN : 1957-777X

Éditeur

Groupe français de géomorphologie

Édition imprimée

Date de publication : 31 décembre 2016

Pagination : 345-361

ISBN : 978-2-913282-74-2

ISSN : 1266-5304

Ce document vous est offert par Bibliothèque nationale et universitaire de Strasbourg (BNU)



Référence électronique

Jeannine Corbonnois, Mathieu Bonnefond, Valentin Chardon, Stéphane Rodrigues, Philippe Jugé, José Cali, Jérôme Verdun, Elisabeth Simonetto, Wilfrid Tchekpo, Eric Labergerie et Guillaume Fauchoux, « Détermination des conditions de la dynamique fluviale d'une rivière aménagée de basse énergie, à partir de secteurs du Loir (Bassin de la Loire aval) », *Géomorphologie : relief, processus, environnement* [En ligne], vol. 22 - n°4 | 2016, mis en ligne le 11 janvier 2017, consulté le 11 avril 2018. URL : <http://journals.openedition.org/geomorphologie/11559> ; DOI : 10.4000/geomorphologie.11559



Détermination des conditions de la dynamique fluviale d'une rivière aménagée de basse énergie, à partir de secteurs du Loir (Bassin de la Loire aval)

Study of some Loir river sections (downstream Loir Basin) as a means to determine the dynamics of a low energy, harnessed river

Jeannine Corbonnois^{a, e*}, Mathieu Bonnefond^{b, e*}, Valentin Chardon^b, Stéphane Rodrigues^{c, e}, Philippe Jugé^{d, e}, José Cali^b, Jérôme Verdun^{b, c}, Elisabeth Simonetto^b, Wilfrid Tchekpo^a, Eric Labergerie^b, Guillaume Fauchoux^b.

^aUniversité du Maine, UMR 6590 CNRS Espaces Sociétés (ESO) – Avenue Olivier Messiaen 72000 Le Mans, France.

^bEcole Supérieure des Géomètres et Topographes, Conservatoire National des Arts et Métiers, EA 4630 Laboratoire Géomatique et Foncier (GeF) – 1 Bd Pythagore, 72000 Le Mans, France.

^cUniversité François Rabelais de Tours, UMR 7324 CITERES – 33-35 allée Ferdinand de Lesseps, 37200 Tours.

^dUniversité François Rabelais de Tours, CETU Elmis ingénieries – 11 Quai Danton, 37500 Chinon, France.

^eZone Atelier Loire, INEE CNRS-LTER, France.

RÉSUMÉ

Les travaux conduits pendant 2 ans sur un tronçon du Loir (débit moyen de 24 m³/s, largeur moyenne de 40 m, profondeur moyenne de 2,5 m) et sur trois sites (Ruillé, Bruant, et Cherré), ont permis de déterminer les conditions de la dynamique fluviale pour ce cours d'eau de faible énergie, dont la pente du lit est inférieure à 1 ‰. Deux campagnes de mesure ont été effectuées entre 2013 et 2015 : mesure du recul des berges par LIDAR terrestre 3D et levés bathymétriques par échosondeur multi-faisceaux. La faiblesse de l'érosion a nécessité la mise au point d'une méthodologie adaptée (et transposable à d'autres systèmes fluviaux de faible énergie) pour le traitement et l'interprétation des résultats des mesures afin d'évaluer les modifications réelles intervenues d'une campagne de mesure à l'autre. Celles-ci sont ponctuelles, et les formes ainsi façonnées sont très variées. Les résultats principaux mis en évidence sont : (i) des reculs de berges de 0,80 m à 1,40 m intervenus localement en quelques mois, au cours de la saison de hautes eaux (sans crues de forte magnitude), (ii) de faibles modifications du fond du lit qui comprend par ailleurs entre les hauts fonds toujours submergés, des surcreusements (mouilles) de 1,5 à 1,8 m de profondeur. La charge solide mise en mouvement dans le chenal, majoritairement de texture fine (sables fins et limons), est évacuée vers l'aval. Des matériaux grossiers (galets de 5 à 9 cm de longueur), qui affleurent localement dans les berges, tapissent le fond du lit où ils forment un pavage. Cela oblige l'érosion, là où elle se manifeste, à se reporter sur les berges.

Mots clés : érosion, rivière, faible énergie, dynamique fluviale, Loir, aménagement fluvial.

INFORMATION SUR L'ARTICLE

Reçu le 29 juin 2016

Reçu sous sa forme révisée le 21 octobre 2016

Définitivement accepté le 11 novembre 2016

*Auteur correspondant. Tél : +33 2 43 83 31 97

Courriels :

jeannine.corbonnois@univ-lemans.fr (J. Corbonnois)

mathieu.bonnefond@cnam.fr (M. Bonnefond)

chardonvalentin@gmail.com (V. Chardon)

srodrigues@univ-tours.fr (S. Rodrigues)

juge@univ-tours.fr (P. Jugé)

jose.cali@esgt.cnam.fr (J. Cali)

jerome.verdun@esgt.cnam.fr (J. Verdun)

elisabeth.simonetto@esgt.cnam.fr (E. Simonetto)

wilenock@yahoo.fr (W. Tchekpo)

eric.labergerie@esgt.cnam.fr (E. Labergerie)

guillaume.fauchoux@cnam.fr (G. Fauchoux)

ABSTRACT

The experiments carried out for two years on three sites (Ruillé, Bruant, and Cherré) of a single stretch of the Loir river (rate of flow: 24 m³/s; mean width: 40 m; mean depth: 2.5 m), a weak energy stream whose channel slope never exceeds 1‰, allowed for the conditions of the river's dynamics to be determined. Two surveys were conducted between 2013 and 2015: riverbank recession and bathymetry measurements using 3D terrestrial LIDAR and multibeam sonder respectively. A new method suitable for processing and interpreting data acquired in moderate erosive zones (thus applicable to any other weak energy river) has been developed and applied to the surveys, in order to assess the changes occurring from one survey to the other. Those changes are local and the resulting riverbank shapes diverse. Our major findings are the following: (i) some local shore line recessions ranging from 0.80 to 1.40 m in length, which appeared in the course of a few months during the high-water period (in the absence of major floods), (ii) Some minor changes in the riverbed floor, including a deepening of 1.5 to 1.8 m in depth between permanently submerged shallow areas. The solid load carried by the stream channel, mainly made up of fine-textured materials (fine sand and silt), is released downstream. Coarse materials (cobbles of 5 to 9 cm in length), that sometimes jut from the banks, cover the bottom of the riverbed where they form a thick layer. Erosion is thus restricted to riverbanks.

Keywords: erosion, river, low energy, fluvial dynamics, Loir River, fluvial management.

1. Introduction

La thématique du transport sédimentaire et des changements morphologiques des systèmes fluviaux est très largement étudiée,

en particulier pour les systèmes fluviaux caractérisés par une forte énergie (puissance spécifique supérieure à 30 W/m²). C'est le cas des rivières de montagne (Piton et Recking, 2016) et des grands cours d'eau (Claude et al., 2012 ; Arnaud et al., 2015). La littérature est peu

abondante quand il s'agit des rivières à faible énergie (Petit et al., 2015 ; Lespez et al., 2015 ; Melun, 2012). Cependant, depuis quelques années ces rivières intéressent les chercheurs et les gestionnaires des cours d'eau. Elles sont, comme tout autre cours d'eau, l'objet de réaménagements dans le cadre de la DCE (Directive Cadre sur l'Eau de 2000 ; ONEMA, 2013) qui prescrit le libre écoulement de l'eau afin d'assurer les continuités écologiques et sédimentaires.

Les travaux récents mettent le plus souvent en évidence, outre la faiblesse générale de la dynamique fluviale, la grande hétérogénéité des configurations qui se révèle au fur et à mesure des recherches (Harnischmacher, 2007 ; Csiki et Rhoads, 2014 ; Rollet et al., 2014 ; Dufour et al., 2015 ; Depret et al., 2015 ; Kuo et al., 2015). Elles sont liées aux conditions géomorphologiques des cours d'eau ou tronçons de cours d'eau étudiés (tracé, pente du lit fluvial, caractéristique des sédiments disponibles pour le transport solide, etc.), à la diversité de l'impact des conditions hydrologiques sur les morphologies fluviales (rôle des crues, du débit à pleins bords), et également des situations hydrologiques intermédiaires au cours desquelles les sédiments qui se déposent seront évacués lors de la crue suivante, plus ou moins forte). Le développement de technologies adaptées performantes a permis de la révéler. Il s'agit des mesures par bathymétrie et par LIDAR terrestre 3D (Light Detection And Ranging) en particulier (Thoma et al., 2001 ; Nasermoaddeli et Pasche, 2008 ; Merwade, 2009 ; Melun, 2012 ; Foerst et Rütther, 2013 ; Hamel et al., 2013) ainsi que par profileur acoustique Doppler ADCP (acoustic Doppler current profiler) permettant d'évaluer la structure de l'écoulement (Le Coz et al., 2009 ; Dongsu et Muste, 2012 ; Claude, 2012).

Par ailleurs, une grande partie des caractéristiques des cours d'eau de faible énergie est reliée aux aménagements des lits, souvent importants et anciens de plusieurs siècles (seuils transversaux, digues, chenalisation, etc.). Ils ont contribué à modifier l'écoulement en agissant sur la vitesse de l'eau, les volumes écoulés et leurs variations au cours de l'année. Ils ont également contribué à modifier les caractéristiques du transport sédimentaire en réduisant la mobilité de la charge la plus grossière et en donnant ainsi la faveur aux éléments fins tels que les limons et les sables (Talbot et Lapointe, 2002 ; James et Marcus, 2006 ; Gregory, 2006 ; Ikeda, 1984 ; Jaeggi, 1984 ; Hohensinner et al., 2014 ; Ollero, 2010). Le rôle des barrages sur les cours d'eau, largement étudié, est assez bien connu, du moins dans les grandes lignes (Williams et Wolman, 1984 ; Hadley et Emmett, 1998 ; Schmidt et Wilcock, 2008 ; Zahar et al., 2008 ; Csiki et Rhoads, 2010 ; Baker et al., 2011 ; Lobera et al., 2015 ; Rinaldi et al., 2013). On admet généralement que la stabilisation des lits fluviaux a permis que les paysages se modifient (fixation des lits fluviaux, modification de la végétation des berges, transformation de la fonction des rivières et des aménagements associés, etc.) (Germaine et Barraud, 2013). Ainsi, la situation actuelle des cours d'eau est-elle issue de la combinaison des conditions naturelles de l'érosion fluviale et de l'ajustement des cours d'eau à des modifications anthropiques dont les effets se superposent ou se juxtaposent aux conditions naturelles.

Les travaux conduits sur le Loir permettent de préciser l'ampleur du rôle de ces transformations anthropiques dans le fonctionnement actuel de la rivière et de confirmer ou non les caractéristiques du transport sédimentaire qui concerne surtout des limons et des sables fins. Malgré la faible énergie du cours d'eau (de l'ordre de 5 W/m^2), des secteurs fortement érodés se sont développés ; nos mesures visent à montrer quels sont les processus qui y participent. Le terrain d'étude prend en compte un secteur de Loir long de 60 km (de Poncé sur le Loir à La Flèche), qui sert à déterminer les conditions générales de la dynamique de la rivière (énergie fluviale et état des berges). Ce secteur comprend trois sites implantés à proximité de barrages (Ruillé, Bruant, et Cherré) où sont réalisées des mesures de

l'érosion du lit fluvial. Les résultats obtenus devraient contribuer à la compréhension du fonctionnement des rivières de faible énergie souvent modifiées par les interventions anthropiques.

2. Terrain d'étude

2.1. La vallée du Loir

Dans sa partie aval, le Loir est incisé de 60 à 80 m dans les plateaux sédimentaires de l'ouest du bassin de Paris (fig. 1). La rivière draine un fond de vallée large en moyenne de 2 000 m à l'intérieur duquel le lit majeur est dominé par une très basse terrasse culminant entre +1 à +3 m (fig. 2). Les matériaux du fond alluvial, épais de 4 à 5 m, ont été décrits par Piana et al. (2011) et Despriée et al. (2003). Ils sont composés de bas en haut par des cailloutis très grossiers surmontés par des graviers (diamètre 5 cm) disposés en niveaux sub-horizontaux, épais d'une cinquantaine de centimètres et séparés par des niveaux de sables et de graviers. Au-dessus, on observe 1,50 à 2 m de sédiments limono-argileux récents.

Le Loir, profond de 2,5 m et large de 40 m environ, décrit un tracé sinueux (coefficient de sinuosité de 1,3) dont les boucles les plus serrées (rayon de courbure de l'ordre de 150 m) sont héritées de tracés anciens (Piana et al., 2011). La faible pente du lit fluvial est comprise entre 0,2 ‰ et 0,4 ‰. Le lit mineur est délimité par des berges hautes de 0,5 à 1,5 m, fixées par une végétation arbustive et buissonnante, à l'exception de quelques endroits où elles sont soumises à l'érosion (fig. 3-4).

Le Tableau 1 donne les caractéristiques hydrologiques principales du Loir. Les valeurs atteintes sont le fait (i) des apports pluviométriques atteignant 650 mm en moyenne par an, et (ii) de la lithologie du substratum (calcaire et grès), qui soutiennent les écoulements en période de basses eaux. Les crues sont caractéristiques des régions océaniques tempérées de plaine et plateau, avec une montée et une descente de crue en 4 à 7 jours (Larue, 1989). Des aménagements au fil de l'eau ont été réalisés pour permettre différents usages. De discrètes marques semblent liées aux travaux effectués pour le flottage du bois (en aval de la Flèche, entre la Forêt de Bercé et la Loire) et la navigation arrêtée dès le début du XIX^e siècle (secteurs de lit rectifiés, anciens seuils noyés, chenal dédoublé, réalisations anciennes encore suggérées par la toponymie, port, gué, etc.). Les aménagements les plus visibles sont les travaux de canalisation du lit dans la traversée des bourgades (Le Lude, Château du Loir), et les barrages. Ces derniers, d'une hauteur comprise entre de 1,5 et 1,8 m, comprennent une chaussée souvent oblique et des clapets mobiles (Corbonnois et Techkpo, 2013). Le long du tronçon d'étude, ils servent à la production d'hydroélectricité, au maintien de zones humides et surtout à la gestion des niveaux d'eau. Plusieurs sont en ruine (fig. 2). Le Loir est concerné par la directive cadre européenne sur l'eau (2000) qui prescrit le rétablissement des continuités écologiques et sédimentaires qui devra intervenir avant 2027 ; ici, l'objectif principal est de permettre que s'améliore la qualité de l'eau et des milieux aquatiques (SAGE Loir, 2016).

2.2. Les sites de mesure

Les trois sites (Ruillé, Bruant, et Cherré) retenus pour l'étude détaillée des conditions de l'érosion fluviale concernent un tronçon de lit sinueux de 100 à 300 m de long, caractérisé par des berges en partie érodées (fig. 2). Les caractéristiques géomorphologiques des trois sites ont été cartographiées à partir du terrain et de photographies aériennes. La Figure 5 représente celles du site de Bruant (SEDILOIR, 2016).

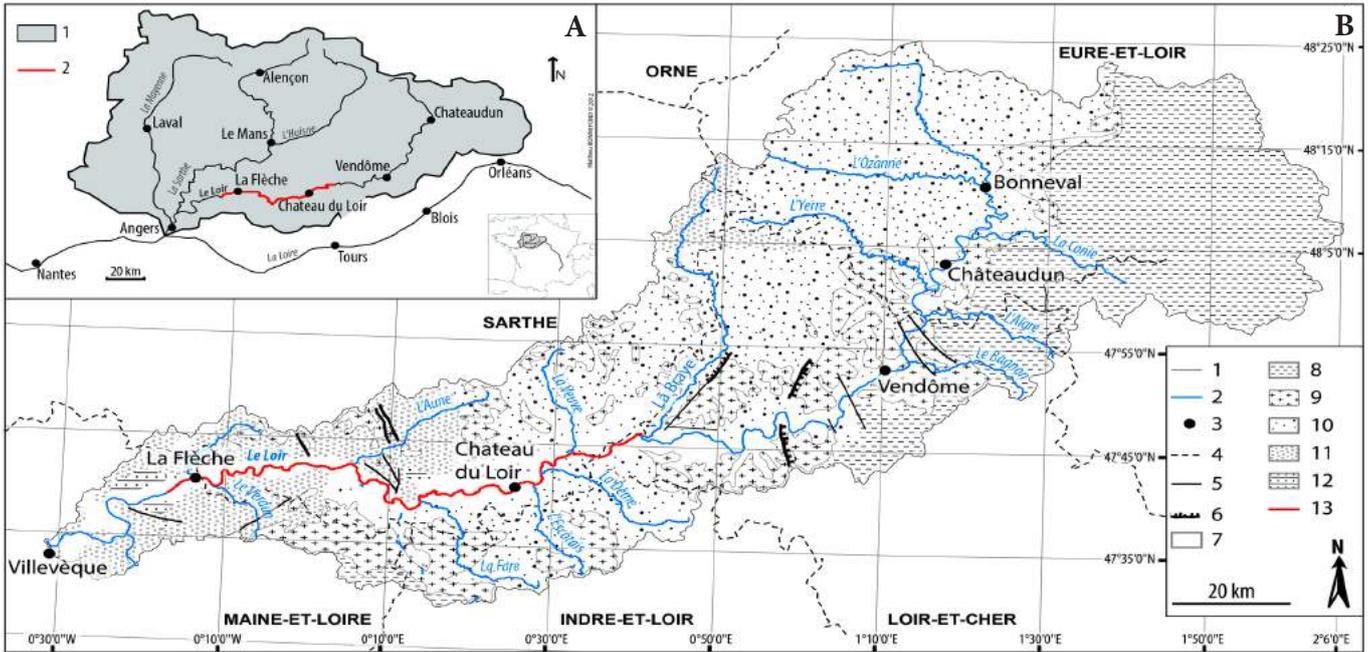


Fig. 1 – Le bassin versant du Loir.

A. Situation. B. Grands ensembles lithologiques. 1. Limite du bassin versant du Loir ; 2. Loir et principaux affluents ; 3. Ville principale ; 4. Limite de département ; 5. Faille ; 6. Faille avec compartiment affaissé ; 7. Sable, argile et graviers de fond de vallée ; 8. Calcaire de Beauce ; 9. Argiles à silex des collines du Perche ; 10. Craie du Turonien et du Sénonien ; 11. Sables et grès du Cénomaniens ; 12. Calcaire en affleurement du Jurassique ; 13. Tronçon fluvial étudié.

Fig. 1 – Loir's watershed.

A. Situation. B. Major lithological units. 1. Catchment area ; 2. Loir river and main tributaries ; 3. Main cities ; 4. Administrative limit (« département ») ; 5. Fault ; 6. Fault and downlifted zone ; 7. Sand, clay, and gravel of the bottom valley ; 8. Lacustrine limestone of beauce ; 9. Flint clay of the perche hills ; 10. Turonian and senonian chalks ; 11. Cenomanian sands and sandstones ; 12. Jurassic outcrops limestone ; 13. Fluvial section studied.

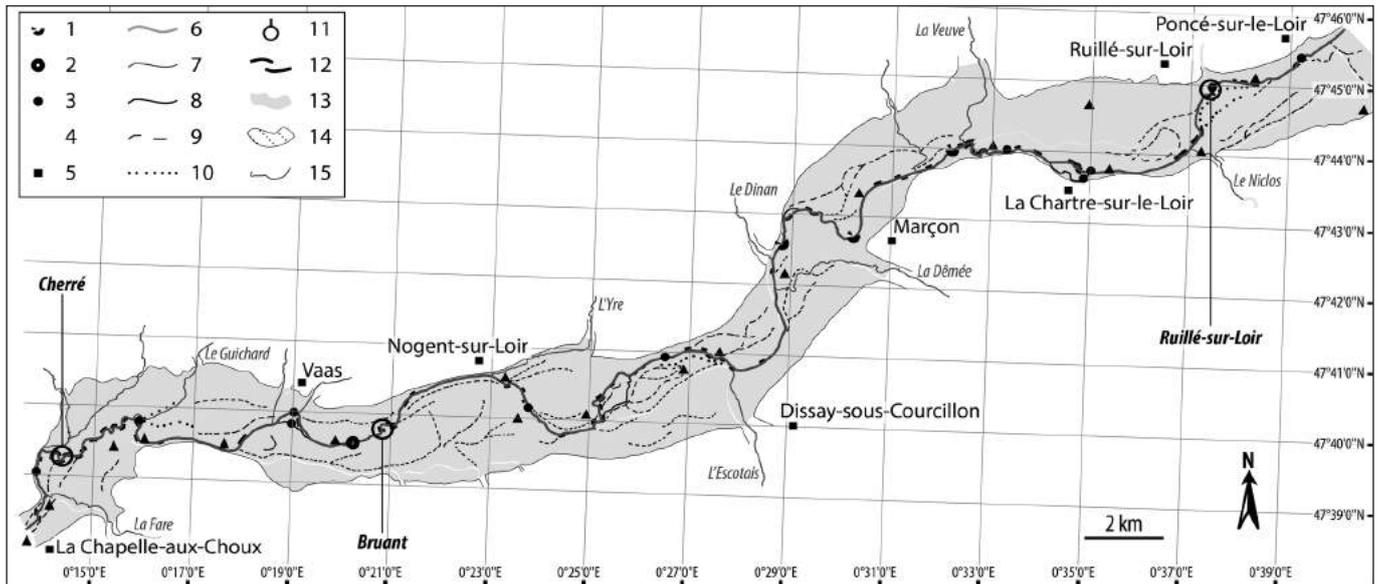


Fig. 2 – Partie de la vallée du Loir comprenant les sites de mesure.

1. Vestige de seuil hydraulique ; 2. Seuil hydraulique ruiné ; 3. Seuil hydraulique fonctionnel ; 4. Point coté ; 5. Principales communes ; 6. Le Loir ; 7. Affluent ; 8. Bras de dérivation ; 9. Ancien chenal ; 10. Canal exploitant un ancien chenal ; 11. Site de mesures ; 12. Principaux sapements ; 13. Lit majeur ; 14. Basse terrasse ; 15. Limite du fond de vallée.

Fig. 2 – Part of the Loir's valley where measurement sites are localized.

1. Remnants of ancient sill ; 2. Removed sill ; 3. Sill ; 4. Altitude ; 5. Main villages ; 6. Loir River ; 7. Tributary ; 8. Spillway ; 9. Paleochannel ; 10. Canal located in a paleochannel ; 11. Survey sites ; 12. Main lateral erosion sites ; 13. Major bed/floodplain ; 14. Terrace ; 15. Floodplain (including terraces).

Tab. 1 – Débits moyens annuels et mensuels sur le secteur d'étude (données issues de la Banque Hydro consultée le 22 mai 2016).

Station	Superficie de BV (km ²)	Module (m ³ /s)	Q moy. journalier de crue F1/2 (m ³ /s)	Q moy. journalier de crue F 1/10 (m ³ /s)	Q moy. mensuel d'étiage (m ³ /s)
Flée (depuis 1993)	5940	24	150	240	8,3
Durtal (depuis 1961)	7920	31,9	160	290	10,7

Tab. 1 – Annual and monthly mean rates measured in the studied area (Data from Hydro database accessed May 22nd 2016).



Fig. 3 – Berge limono-sableuse à Cherré (juin 2015).

Fig. 3 – Loamy sand riverbank at Cherré (June 2015).



Fig. 4 – Matériaux grossiers en pied de berge à Cherré (octobre 2014).

Fig. 4 – Coarse materials at the riverbank base visible at Cherré (October 2014).

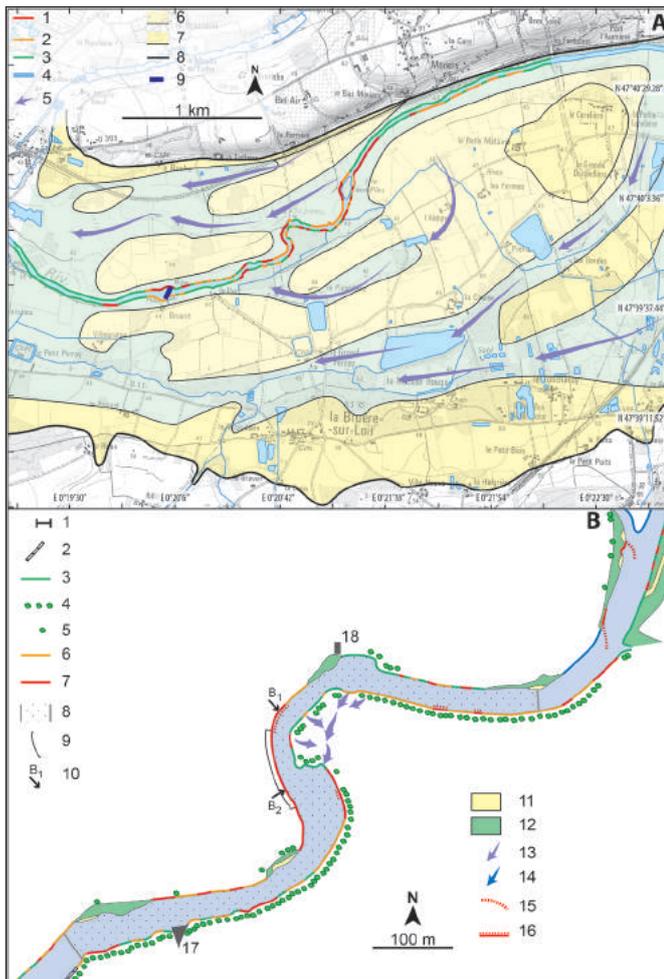


Fig. 5 – Caractéristiques géomorphologiques du Loir au site de Bruant.

A. Fond de vallée. 1. Berge sapée ; 2. Berge dégradée ; 3. Berge stable végétalisée ; 4. Lit mineur ; 5. Ancien passage du loir ; 6. Très basse terrasse ; 7. Basse terrasse ; 8. Limite du fond de vallée ; 9. Barrage. B. Lit du loir. 1. Ancien déversoir ; 2. Berge protégée (maçonnée, palplanche...) ; 3. Berge stable, végétalisée ; 4. Berge boisée ; 5. Arbre isolé ; 6. Berge dégradée ; 7. Berge sapée ; 8. Zone de levé bathymétrique ; 9. Secteur de berge « scannée » ; 10. Profil sédimentaire ; 11. Banc vif d'alluvions ; 12. Banc d'alluvions végétalisés ; 13. Chenal de crue ; 14. Ligne principale de courant ; 15. Seuil et niveau graveleux ; 16. Passées graveleuses dans les matériaux des berges ; 17. Rampe de mise à l'eau ; 18. Station de pompage.

Fig. 5 – Geomorphological characteristics of the Loir River at Bruant.

A. Valley floor. 1. Eroded bank; 2. Degraded bank; 3. Vegetated stable bank; 4. Active channel/river bed; 5. Paleochannels; 6. Lower terrace; 7. Terrace; 8. Floodplain (including terraces); 9. Dam; b. Loir's channel. 1. Ancient spillway; 2. Ripraped bank; 3. Vegetated stable bank; 4. Vegetated stable bank (dense riparian tree cover); 5. Isolated tree; 6. Degraded bank; 7. Eroded bank; 8. Bathymetrical survey; 9. Terrestrial lidar survey; 10. Sediment architecture and grain size survey; 11. Bar; 12. Vegetated bar; 13. Flood channel; 14. Main stream; 15. Threshold and gravel level; 16. Coarse sediment beds (gravels) in fine bank sediments; 17. Boat access area; 18. Pumping station.

3. Données utilisées

À l'exception de 106 profils transversaux du lit du Loir levés en 2004 tous les 500 m entre la confluence de la Brayre près de Poncé-sur-le Loir et l'amont de la Flèche (fig. 2) (EPL, 2004 ; HYDRATEC, 2008), toutes les données utilisées proviennent de mesures effectuées dans les trois sites entre l'automne 2013 et mai 2015 (fig. 6, tab. 2), pour différentes conditions hydrologiques afin d'en saisir les impacts sur le façonnement des formes fluviales. Des traitements spécifiques ont permis de restituer les actions ténues de l'érosion enregistrées par les berges et le fond du lit. Les données des trois sites ont été traitées selon des méthodes similaires. À titre d'exemple, la Figure 6 représente pour le site de Bruant l'hydrogramme journalier couvrant la période du suivi, ainsi que les dates et les types de mesures réalisées.

4. Traitements des données

4.1. Caractéristiques hydrauliques du lit du Loir

Les 106 profils transversaux ont permis de calculer (i) le débit à pleins bords du Loir à partir des données de la station de Flée ; il est de l'ordre de 140 m³/s (selon la loi de Gumbel) et varie longitudinalement en fonction des configurations morphologiques du lit, (ii) les puissances spécifiques (Petit et al., 2005 ; Schmitt et al., 2001). Pour toute la section fluviale concernée, ces dernières sont généralement faibles, atteignant le plus fréquemment quelques watts par m². Les plus élevées (une vingtaine de valeurs) dépassent 15 W/m² mais restent inférieures à 30 W/m². Parfois, la pente du lit trop faible pour être évaluée avec une précision suffisante, conduit à obtenir des valeurs de puissances spécifiques proches de zéro.

4.2. Topographie par LiDAR terrestre

L'auscultation des berges réalisée grâce à un Scanner Laser 3D (modèle Leica Scan Station C10) permet un relevé précis de la

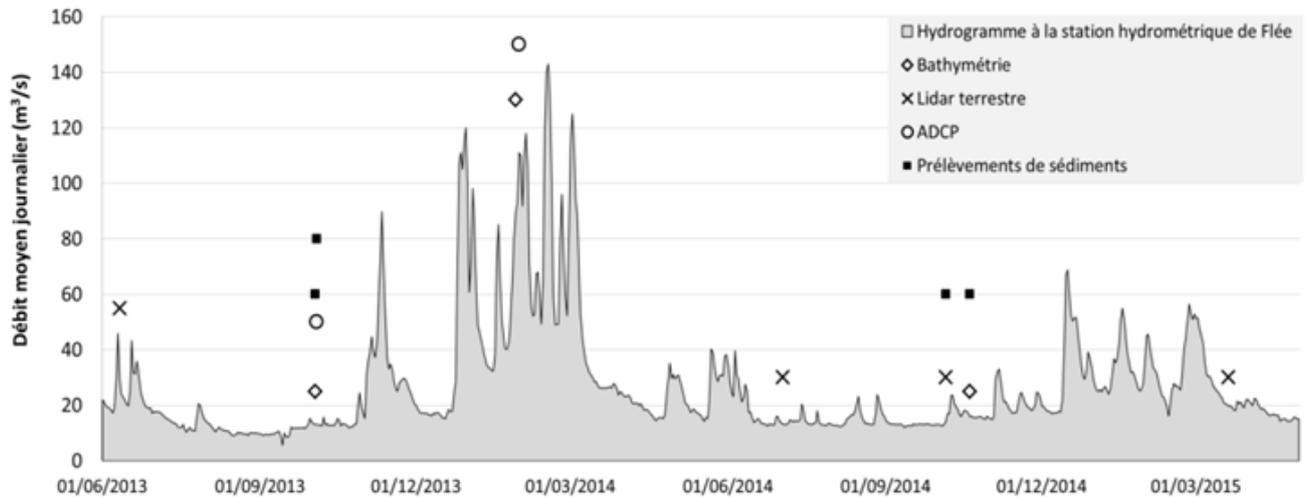


Fig. 6 – Hydrogramme de la station de Flée (juin 2013 à mai 2015) et mesures effectuées sur le site de Bruant.

Fig. 6 – Hydrograph acquired at Flée gauging station (from June 2013 to May 2015) and measurements carried out at Bruant.

Tab. 2 – Mesures réalisées sur les trois sites d'étude.

Tab. 2 – Measurements carried out on the three sites examined.

Secteur d'étude	Type de mesures	Bathymétrie	ADCP	LIDAR terrestre	Prélèvements de sédiments	
					Chenal	Berge
Ruillé-sur-Loir (47°44'N ; 0°37'E)		16/10/2013	16/10/2013	08/10/2013	08/10/2013	
		31/01/2014	31/01/2014	20/10/2014	16/10/2013	08/10/2013
		16/12/2014	29/09/2014		16/12/2014	
Bruant (47°39'N ; 0°20'E)		03/10/2013		11/06/2013	04/10/2013	
		28/01/2014	04/10/2013	03/07/2014	06/10/2014	03/10/2013
		20/10/2014	30/01/2014	06/10/2014	20/10/2014	06/10/2014
		22/04/2015		20/03/2015		
Cherré (47°39'N ; 0°39'E)		10/10/2013	10/10/2013	12/06/2013	10/10/2013	
		27/01/2014	30/01/2014	30/06/2014	21/10/2014	30/06/2014
		21/10/2014		13/04/2015		

topographie des berges sur toute leur hauteur (0,7 à 2 m). L'érosion est évaluée à partir de la comparaison des relevés effectués à chaque campagne de mesures. Les données collectées sur le terrain se présentent sous la forme de nuages de points denses (fonction de la fréquence d'échantillonnage spatial : ici au minimum 1 point par 5 cm²). Une classification hiérarchique descendante permet d'isoler les points représentant les matériaux qui composent les berges de ceux correspondant à la végétation rivulaire (sur 0,2 à 0,3 m sous la surface du sol). La méthodologie appliquée est identique à celle proposée par Brodu et Lague (2013), soit la sélection d'échantillons caractéristiques de l'environnement ausculté et la création d'une classification multi-échelles. Seuls les points classifiés ayant un indice de confiance supérieur ou égal à 90 % ont été sauvegardés (des mesures supplémentaires ont été faites à Bruant et à Cherré en mars et avril 2015 pour le traitement des parties supérieures de berges avant que la végétation annuelle se développe). Pour évaluer le recul des berges d'une campagne à l'autre, les nuages de points ont été consolidés et géoréférencés dans le système géodésique français RGF93.

Le calcul des distances de recul des berges et des volumes érodés est fait à partir de deux algorithmes dénommés respectivement « Distance Computation – According to a Given Direction » (DC-AGD) et « Volume Computation – According to a Given Direction » (VC-AGD), et développés au sein du Laboratoire Géomatique et Foncier du Conservatoire national des arts et métiers (Fadili,

2015). S'agissant du calcul du recul de berge, l'algorithme DC-AGD s'inspire de l'algorithme M3C2 développé par Lague et al. (2013). La différence principale réside dans la prise en compte de la direction de l'évolution du recul de la berge au cours du temps (perpendiculaire ou oblique) et non selon la normale comme le proposent les deux auteurs. Ceci permet d'obtenir une meilleure adéquation avec les dynamiques observées. Une distance de recul point par point est alors calculée. Pour le calcul du volume érodé, l'algorithme VC-AGD permet des cubatures comprises entre deux surfaces et selon une direction donnée. Le principe est de projeter une surface maillée, qui correspond ici à la campagne la plus ancienne, sur le nuage de point de la campagne la plus récente. Afin d'évaluer les marges d'incertitude liées au calcul, une simulation de nuages fictifs a été réalisée là où les distances de recul et les volumes érodés sont connus. L'incertitude est inférieure à 0,005 m pour les distances ; elle est de 0,01 m³ pour les volumes calculés. À titre d'exemple, la Figure 7 représente pour le site de Bruant, la distribution statistique d des distances de recul entre les différentes campagnes calculées à l'aide de l'algorithme DC-AGD. Ainsi le 1^{er} et le 9^{ème} décile, la médiane, ainsi que le 1^{er} et 3^{ème} quartile, sont représentés afin de réaliser une comparaison diachronique des résultats obtenus.

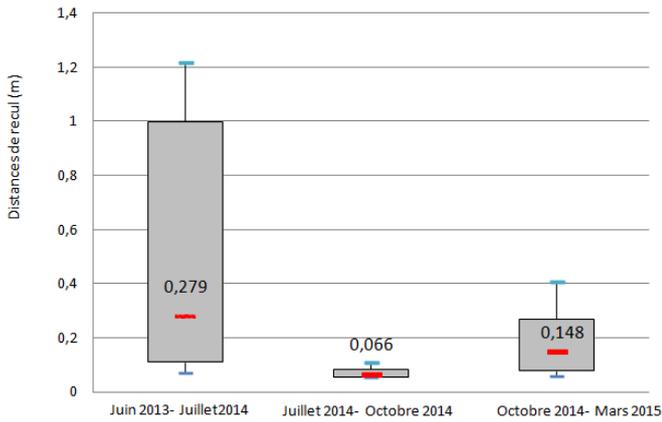


Fig. 7 – Distribution statistique des distances de recul calculées à l'aide de l'algorithme DC-AGD selon la direction Est-Ouest sur le site de Bruant.

Fig. 7 – Statistical distribution of recession distances from east to west on the site of Bruant, calculated using DC-AGD algorithm.

4.3. Bathymétrie mono- et multi-faisceaux

Le logiciel Hypack a été utilisé pour l'acquisition des données sur le terrain (Hypack Survey). Le géoréférencement des levés bathymétriques est réalisé par GPS en mode temps réel RTK (Real-Time Kinematic) utilisant le réseau de stations permanentes Orphéon. L'incertitude sur la hauteur est estimée à 0,1 mètre. Par ailleurs, du fait des conditions du terrain (pied de berge difficile à mesurer et végétation en fond de lit en période estivale) les mesures ont été contrôlées par des mesures manuelles et mono-faisceau (sondeur bathymétrique Tritech PA500 kHz, gamme de profondeurs : 0,1 à 10 m). Différents Modèles Numériques de Terrain, avec un pas de 0,5 mètre ont été produits à l'aide du logiciel Surfer 3D. Les résultats du traitement ont permis de repérer de manière satisfaisante la topographie du fond du lit (fig. 8), puis de mettre en évidence son évolution et de calculer des bilans sédimentaires pour la période de temps considérée.

4.4. Courantométrie par ADCP

Pour ces mesures, nous avons mis en œuvre un ADCP M9 (SonTek) depuis une embarcation légère de type Neveu Secu 12. Le suivi planimétrique du profil théorique a été réalisé par le pilote du bateau grâce au logiciel Hypack 2013A et par l'asservissement d'un DGPS Magelan Proflex 500 en mode RTK équipé du système différentiel (l'incertitude altimétrique est estimée à 10 cm). Le traitement des données (5 profils par site, soit au total 15 profils de mesures) a permis de déterminer dans les sections mouillées, les champs de vitesses du courant. Nous utiliserons les résultats obtenus durant la campagne de janvier 2014 alors que le débit du Loir était proche du débit à pleins bords (fig. 9). Les codes MatLab développées par Claude (2012) pour exploiter ces informations ont été mobilisés dans ce travail.

4.5. Les sédiments des berges et du fond du lit

Les échantillons de sédiments ont été prélevés manuellement. Dans les berges dénudées (fig. 3-4), les prélèvements ont été faits tous les 20 à 30 cm de la surface du sol jusque sous le niveau de l'eau. Dans le fond du lit, les matériaux ont été échantillonnés au droit des 15 sections de mesure ADCP, réparties dans les 3 sites, à raison de 3 à 5 échantillons par section (fig. 10). La granulométrie de la fraction grossière (supérieure à 2 mm) a été obtenue par tamisage humide sur une colonne de tamis à mailles comprises entre 2 à 50 mm (NF ISO 3310-1 et 3310-2). La fraction fine (inférieure à 2 mm) a été analysée par granulométrie laser (Mastersizer 3000 - ISO 13320).

4.6. Modélisation hydraulique 1D

Dix-huit profils en travers ont été mesurés sur les secteurs de Bruant et Cherré dans le but de réaliser une modélisation hydraulique 1D en régime permanent non uniforme à l'aide du logiciel HEC-Ras 4.1. Le levé de la partie terrestre a été effectué par GPS en mode NRTK (Near Real-Time Kinematic) et celui de la partie aquatique par levés réalisés avec un mono-faisceau Tritech PA500 couplé à un GPS en



Fig. 8 – Levé bathymétrique à Bruant le 28 janvier 2014.

Fig. 8 – Bathymetric survey conducted at Bruant on January 28th 2014.

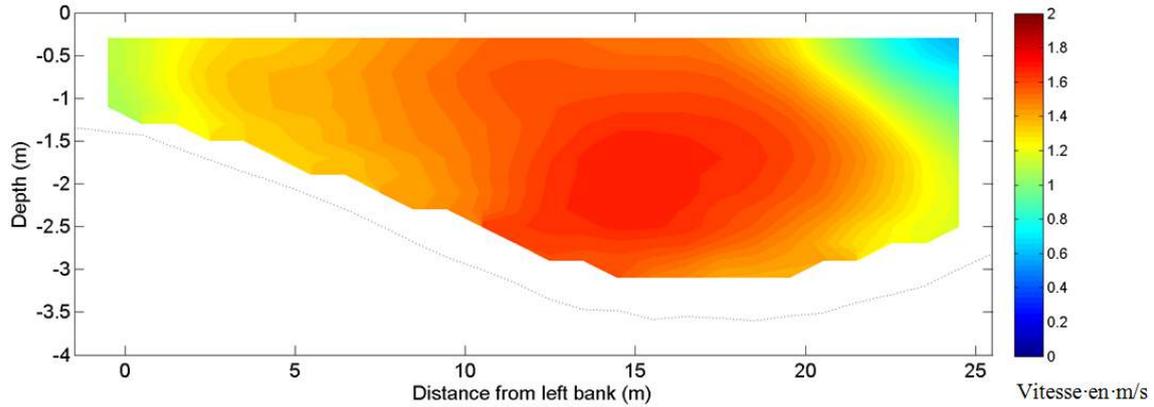


Fig. 9 – Exemple de représentation des vitesses longitudinales en m/s issues du traitement réalisé à l'aide du développement MatLab de Claude (2012 ; profil 9 mesuré à Bruant)

Fig. 9 – Cross section of the Loir showing the longitudinal stream velocities in m/s provided by Claude's (2012) MatLab code (profile n° 9 acquired at Bruant).

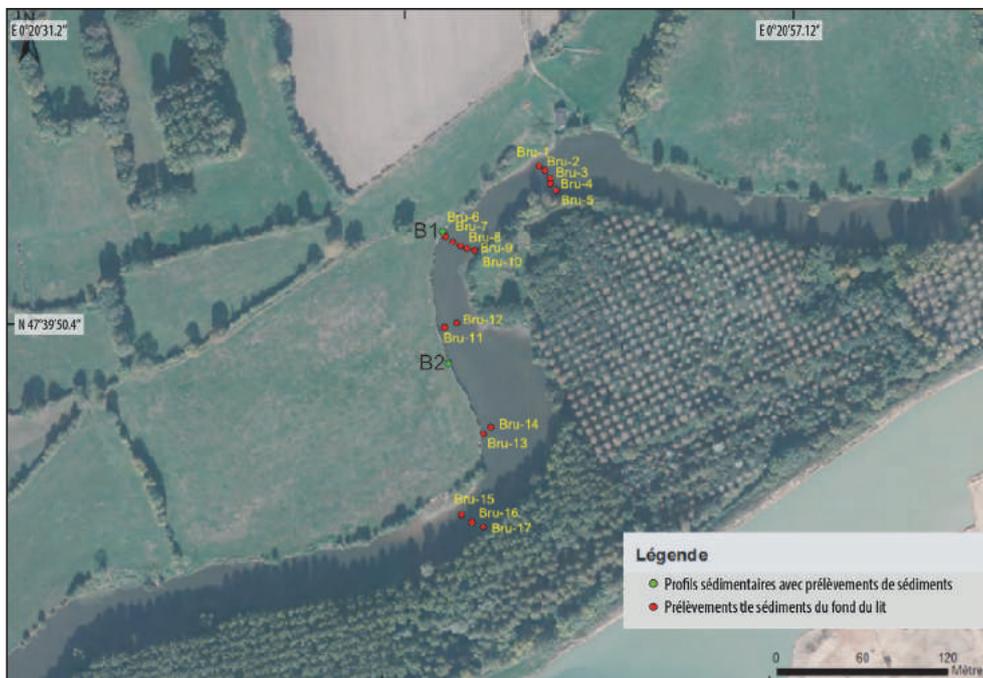


Fig. 10 – Localisation des prises d'échantillons de sédiments (berges et fond du lit). Site de Bruant.

Fig. 10 – Location of sediment sampling sites (riverbanks and riverbed bottom) at Bruant.

mode NRTK. L'incertitude des mesures de ce levé est inférieure à 0,05 m dans les trois composantes. Cette modélisation sert à mettre en évidence, à l'échelle du site, l'évolution des paramètres qui influencent la dynamique de la rivière et à établir des relations avec les résultats de nos mesures.

5. Résultats

5.1. Conditions principales de l'érosion fluviale du Loir

Dans la partie inférieure du Loir, la densité des mesures apparaît insuffisante pour que des corrélations significatives puissent être établies entre la puissance spécifique calculée pour chaque profil transversal du lit et les conditions du milieu (surface des sections mouillées, pente, aménagements, débit), en particulier la présence de barrages (SEDILOIR, 2016). Pour ceux-ci, aucune influence forte n'est démontrée comme cela a également été mis en évidence par

les travaux de Csiki et Rhoads (2014) pour des rivières américaines. Tout juste peut-on établir d'après la Figure 11, qui prend en compte la dispersion des puissances spécifiques, des tendances ; les barrages successifs contribuent à la faible énergie dans les secteurs 2 et 4. Dans les autres, les liens ne peuvent pas être établis. Les puissances spécifiques, toujours inférieures à 30 W/m², expliquent que l'érosion fluviale généralement soit peu active. D'après les prospections de terrain, 85 % de la longueur du lit du Loir sont stables et présentent des berges végétalisées. Les 15 % restant comprennent des marques d'érosion, en particulier des sapements de berges (fig. 2, 12-13) situés dans les boucles les plus serrées du tracé ou encore associés localement à des désordres provoqués par les interventions anthropiques. Nos sites de mesures sont localisés dans les secteurs 3, 4, et 5 en des endroits où la puissance spécifique est de l'ordre de 5 W/m², mais où l'érosion fluviale est bien visible.

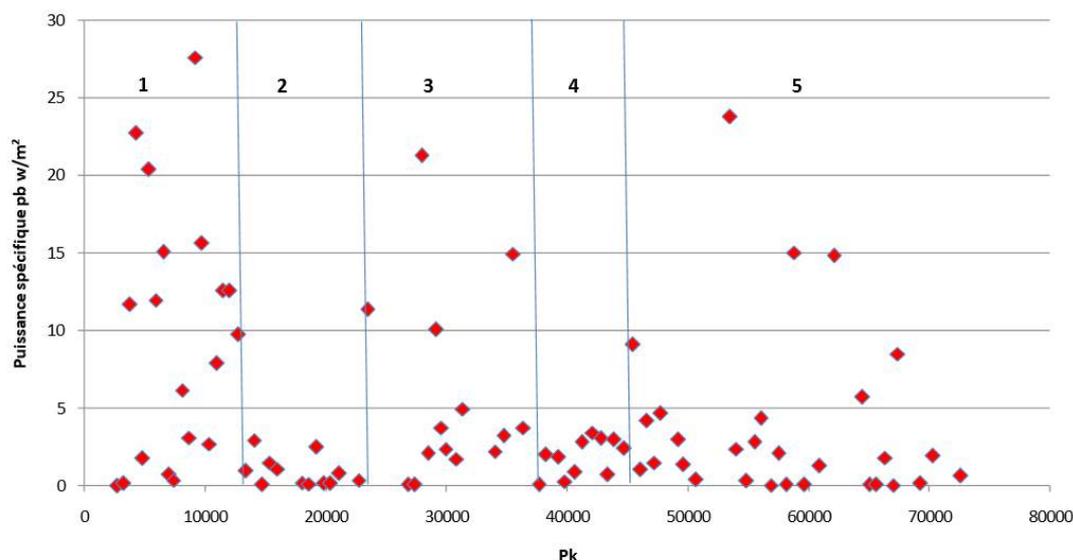


Fig. 11 – Puissances spécifiques du Loir, de l’aval (La Flèche) à l’amont (Poncé-sur-le-Loir).

Fig. 11 – Variation of the unit stream power of the Loir River from the Braye confluence to upstream of La Flèche.



Fig. 12 – État des berges (site de Bruant).

Fig. 12 – Riverbank situation (Bruant).



Fig. 13 – Barrage de Cherré.

Fig. 13 – The dam of Cherré.

5.2. Érosion des berges

À l’échelle des trois sites d’étude et pour la période d’observation, les résultats des mesures montrent que les berges reculent très irrégulièrement. Sur le site de Bruant (47°39’N ; 0°20’E), quatre campagnes de LIDAR terrestre ont été réalisées en juin 2013, juillet 2014, octobre 2014 et mars 2015. Au cours de l’ensemble de la période d’observation, la station de Flée a enregistré neuf pics de crue entre juin 2013 et juillet 2014 (débits supérieurs à 80 m³/s pour un maximum de 143 m³/s) et trois entre octobre 2014 et mars 2015 (débits entre 45 m³/s et 68,8 m³/s). Le maximum enregistré sur la période correspond au débit de crue de fréquence 0,5 (fig. 14). L’érosion a fait reculer certaines portions de berge sur une distance de plus de 1,50 m (fig. 15). Mais ce recul reste inférieur à 0,15 m pour 75 % des points entre juillet 2014 et octobre 2014 (saison estivale) et inférieur à 0,30 m entre octobre 2014 et mars 2015 (saison hivernale). Les reculs plus importants, mesurés pour l’ensemble de la période allant de juin 2013 à juillet 2014, sont liés à la plus longue durée de cette période (13 mois) mais aussi aux conditions hydrologiques plus favorables à l’érosion (3^{ème} quartile égal à 0,99 m). Ces reculs, très irréguliers (fig. 15), indiquent que l’essentiel se fait par l’approfondissement d’encoches d’érosion puis par l’ablation des « promontoires » qui les séparent (fig. 16). Ces actions surviennent principalement en période hivernale comme le montre la Figure 14 qui représente pour le site de Bruant, les volumes de sédiments érodés en m³ par m² de surface de berge scannée, en regard de la variation de débits.

5.3. Évolution annuelle et saisonnière de la forme du lit (bathymétrie)

Les levés bathymétriques montrent que le lit du Loir a une forme irrégulière, en adéquation d’abord avec le tracé de la rivière (Bravard et Petit, 1997 ; Malavoi et Bravard, 2010). Il comprend (i) de rares bancs d’alluvions fines, souvent végétalisés ou surmontés par une mince tranche d’eau ; ils sont allongés contre la berge ou présents dans les zones où la vitesse du courant est très faible, (ii) des hauts fonds en aval des points d’inflexion des sinuosités, formés de graviers et petits galets, le plus souvent immergés, (iii) des mouilles

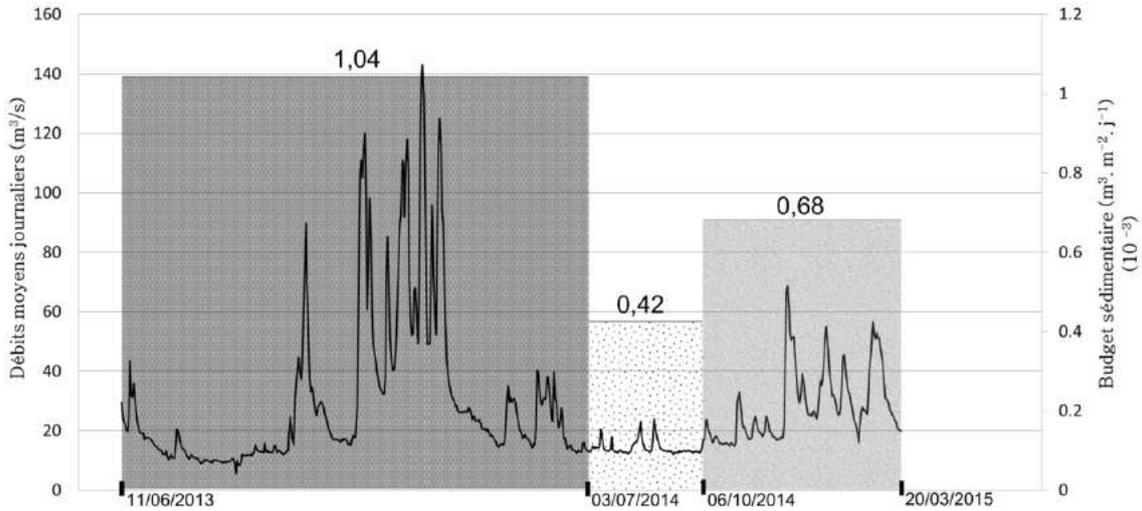


Fig. 14 – Hydrogramme des débits moyens journaliers à la station de Flée et bilan sédimentaire des berges à Bruant (calculé à l’aide de l’algorithme VC-AGD).

Fig. 14 – Hydrograms of mean daily discharges at Flée station and sedimentary budget of riverbanks calculated using DC-AGD algorithm at Bruant.

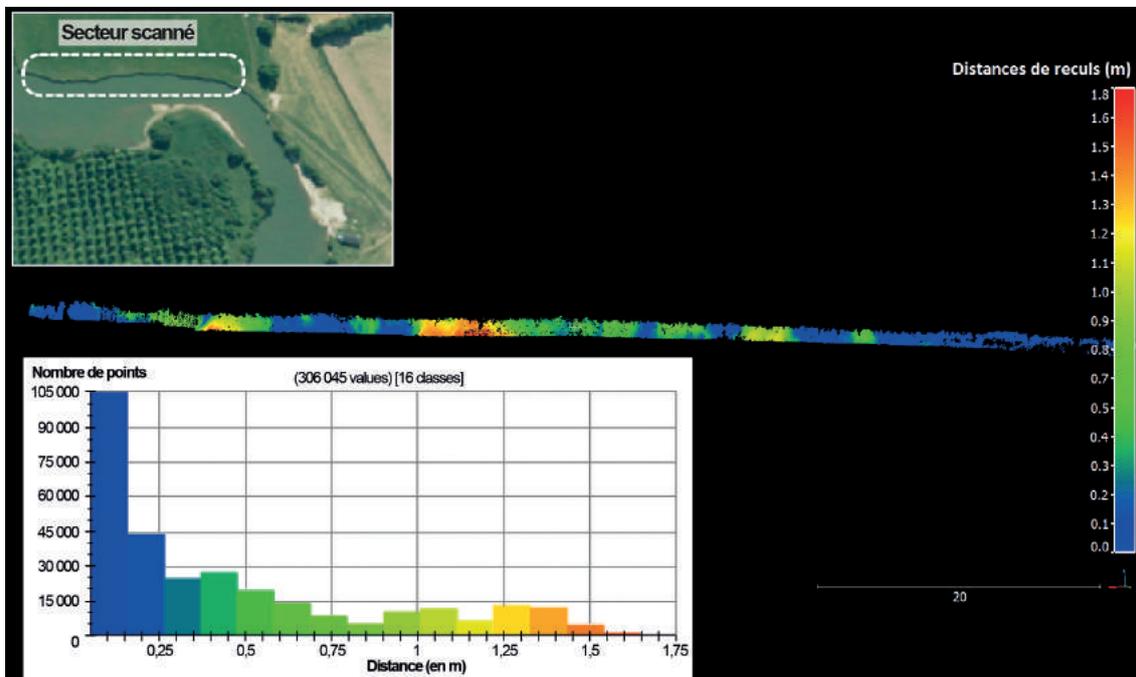


Fig. 15 – Distance de recul point par point de la berge entre Juin 2013 et Juillet 2014 sur le site de Bruant calculée à l’aide de l’algorithme DC-AGD selon la direction Est-Ouest.

Fig. 15 – Point to point recession distance of the riverbank between June 2013 and July 2014 at Bruant calculated by means of DC-AGD algorithm in an east-west direction.

atteignant 1 à 3 m de profondeur, creusées dans le fond du chenal, et localisées en rive concave d’une sinuosité ou bien dans l’axe du chenal, (iv) des traces d’aménagements divers ayant modifié la forme du lit surtout aux abords des barrages (fond plat à l’amont de barrages, surcreusement en aval).

Nos mesures montrent que ces formes se sont peu modifiées pendant la période d’observation, de l’automne 2013 au printemps 2015. Des variations de la morphologie du fond, de l’ordre du décimètre, sont liées aux dépôts et reprises de sédiments qui affectent indifféremment toutes les unités. La Figure 17 indique pour le site de Bruant les modifications intervenues entre janvier et octobre 2014. Celles-ci concernent surtout les bancs de vase mobile, situés sous l’eau. Ailleurs il n’y a pas de lien avec la topographie du fond du lit. Il apparaît ainsi que ce sont surtout les matériaux fins qui

sont déplacés, en faibles volumes. À Bruant (budget sédimentaire : $-0,32 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ entre le 10 octobre 2013 et le 28 janvier 2014, et $+0,38 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ entre le 28 janvier 2014 et le 20 octobre 2014), on estime qu’ils sont mis en mouvement à partir d’un débit de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ survenu une dizaine de fois pendant la période d’observation. La situation est la même dans les autres sites.

5.4. Dynamique des sédiments soumis à l’érosion

Les résultats montrent que les matériaux issus du recul des berges sont majoritairement évacués. Les dépôts dans le fond du lit sont quasi-négligeables (tab. 3). À Ruillé, où le site de mesure est directement en aval d’un ancien barrage qui dérive vers le canal d’un moulin une partie du débit en crue (ce barrage est percé par

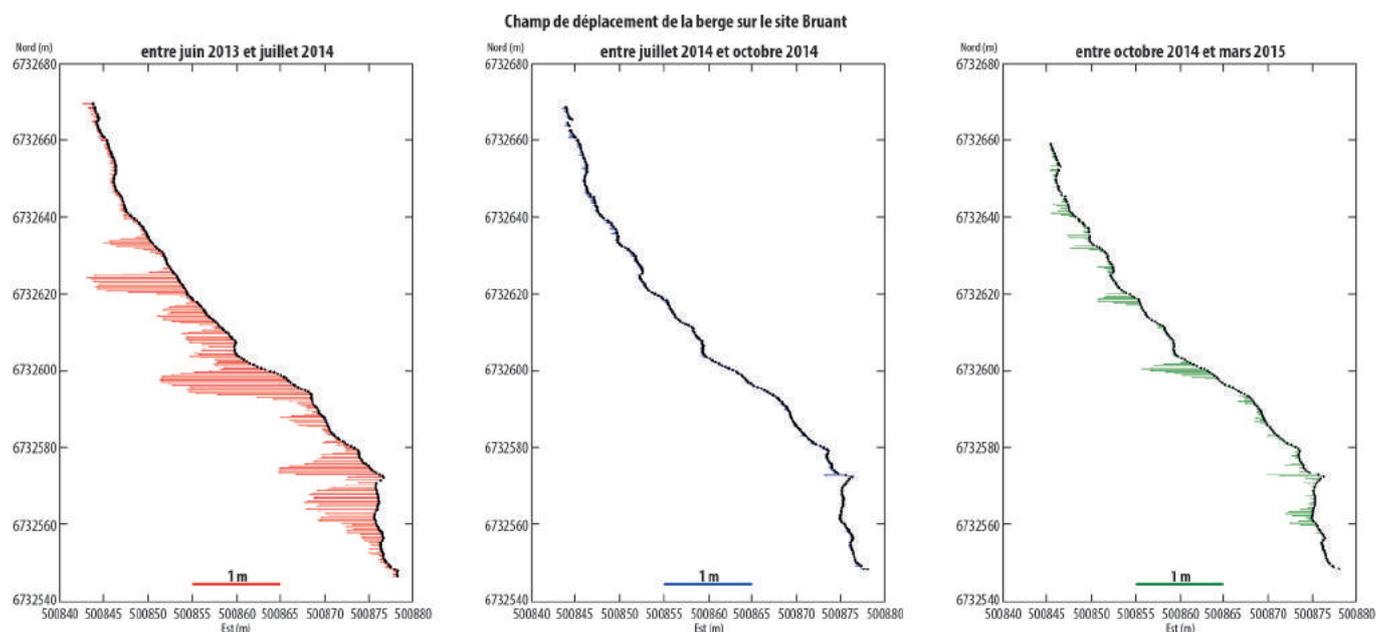


Fig. 16 – Distance de recul moyennée par tranche de 0,5 mètre de long sur le site de Bruant à l'aide de l'algorithme DC-AGD.

Fig. 16 – Recession distances acquired from east to west on Bruant and averaged in slices of 0.5 m in width, calculated using DC-AGD algorithm.



Fig. 17 – Écart d'altitudes du fond du lit entre le 28 janvier et le 20 octobre 2014 (site de Bruant).

Fig. 17 – Differences of river bottom elevation measured between January 28th and October 20th 2014 at Bruant.

plusieurs brèches), les berges livrent le moins de matériaux. Sur le fond, les sédiments proviennent principalement de vase déposée là où la vitesse du courant est très faible et facile à remobiliser lors des crues. L'érosion est plus importante dans les deux autres sites. À Bruant, les berges livrent autant de matériaux que le chenal en évacue. À Cherré, les apports de berges sont moins efficacement entraînés vers l'aval. En ces deux sites, la puissance spécifique du Loir, calculée pour un débit à pleins bords à partir de profils transversaux serrés mesurés en mars 2015, est faible ; ce résultat est en cohérence avec ceux obtenus ailleurs le long du Loir (fig. 11). Elle atteint au maximum 12,5 W/m² à Bruant (fig. 18) et 20 W/m² à

Cherré. Cette énergie suffit à évacuer les fines fournies par les berges. Elle est insuffisante pour prendre en charge la fraction grossière qui par ailleurs a peu bougé pendant la période de mesure, comme le montrent les résultats de la bathymétrie.

Tab. 3 – Résultats des mesures de l'érosion.

Tab. 3 – Results of erosion measurements.

Type	Site	Période de mesure	Volume total mis en mouvement en m ³	Charge spécifique m ³ /m ² /jour
Érosion des berges	Ruillé	8 oct. 2013 / 20 oct. 2014	- 10	0,80. 10 ⁻³
	Bruant	11 juin 2013 / 3 juil. 2014	- 49	1,04. 10 ⁻³
	Cherré	12 juin 2013 / 30 juil. 2014	-29	1,5. 10 ⁻³
Érosion du chenal en eau	Ruillé	16 oct. 2013 / 16 déc. 2014	+72	+0,44. 10 ⁻⁵
	Bruant	3 oct. 2013 / 20 oct. 2014	+183	+0,06. 10 ⁻⁵
	Cherré	10 oct. 2013 / 21 oct. 2014	+170	+0,83. 10 ⁻⁵

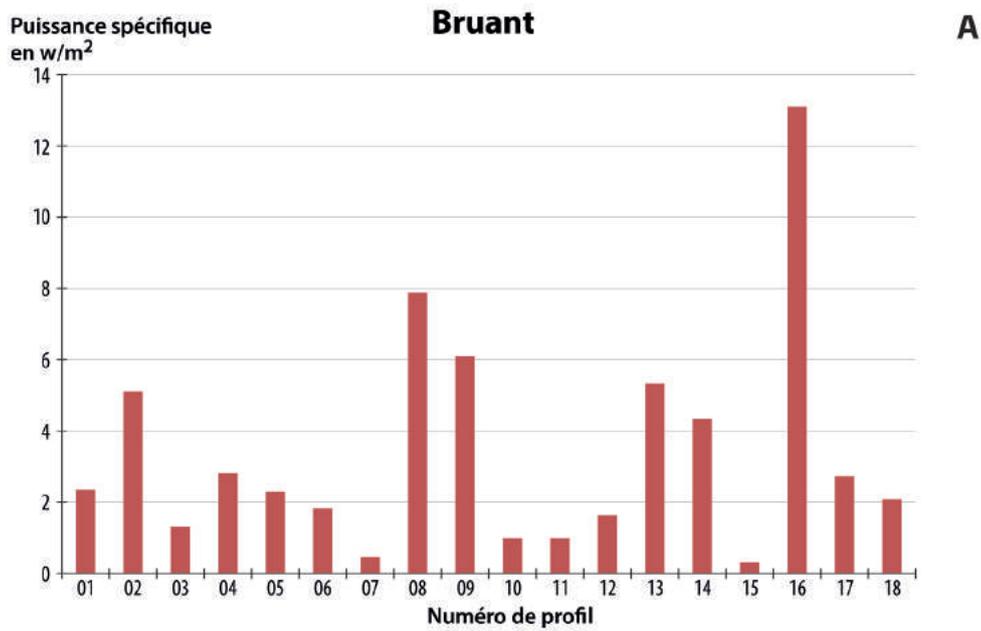


Fig. 18 – Puissances spécifiques calculées sur les 18 profils réalisés sur le site de Bruant.

Fig. 18 – Unit stream power computed on the 18 cross sections carried out at Bruant.

5.5. Comportement du fond du lit et lien avec la vitesse du courant

Nos résultats issus de l'interprétation des analyses granulométriques montrent que la fraction grossière présente dans le fond du lit du Loir a une taille supérieure à celle des graviers et galets qui affleurent dans les berges (échantillons BR 02, 03, 04 prélevés dans le profil B1). Les galets (> 50 mm) sont les plus abondants à Bruant où leur part dépasse 40 % du poids des échantillons dans la moitié des prélèvements (contre 1/5 à Cherré et 1/6 à Ruillé). Le reste des matériaux est majoritairement constitué par des graviers et granules de 20 à 50 mm et de 5 à 20 mm de diamètre. Les fractions inférieures à 5 mm sont peu abondantes sauf en des points particuliers, comme les pieds de berge alimentés par des éboulements de paquets de limons sableux et des bancs d'alluvions vaseuses (échantillons Bru 11 et 13 sur le site de Bruant) (fig. 19). Ainsi, si la faible capacité de transport du Loir limite le transfert amont-aval des sédiments, les profils ADCP mesurés à Bruant en janvier 2014 pour un débit proche du débit à pleins bords (fig. 9-10, 19), montrent que les champs de vitesses, assez variés d'une section à l'autre et à l'intérieur d'une section mouillée, semblent suffisamment contrastés pour générer des turbulences capables de mouvoir des éléments grossiers dans certaines parties du lit mineur. L'analyse des résultats de nos campagnes de mesures permet d'établir des liens entre diamètres de particules et vitesses du courant (tab. 4, fig. 20). Ainsi est-il possible de proposer plusieurs hypothèses relatives à la dynamique des sédiments grossiers dans le fond du lit du Loir. Il comprend (i) des galets quasi-immobiles en pied de berges concaves (diamètre

supérieur à 50 mm) ; ils constituent ou dépassent 70 % du poids des échantillons (Rui 14, Bru 6, 7, 15, Che 8, 9, 10). Ils sont hérités (recouplement par le Loir de niveaux grossiers remplissant le fond alluvial) et forment un pavage qui bloque l'approfondissement actuel du lit, (ii) des graviers de 20 à 50 mm de diamètre (fraction prédominante dans la plupart des échantillons) et dans une moindre mesure, de granules de 5 à 20 mm de diamètre. Mobilisables par les courants les plus forts, ils forment une armure qui protège de l'incision sauf en conditions exceptionnelles, (iii) des matériaux fins en transit dans le chenal et dont la mobilité au cours des saisons hivernales a été montrée à partir des mesures de bathymétrie.

Tab. 4 – Dimensions des particules et classes de vitesses du courant à l'intérieur d'une section mouillée du Loir (janvier 2014 pour un débit proche du débit à pleins bords).

Tab. 4 – Particle sizes and stream velocity classes on a wetted cross section of the Loir River (on January 2014 given a flow rate close to the bankfull discharge).

Classes de particules sédimentaires	Classes de vitesses du courant
Fraction fine < 2 mm	< 0,4 m/s
Granules de 5 à 20 mm	< 0,8 m/s
Graviers de 20 à 50 mm	< 1,6 m/s
Galets > 5 mm	>1,6 m/s

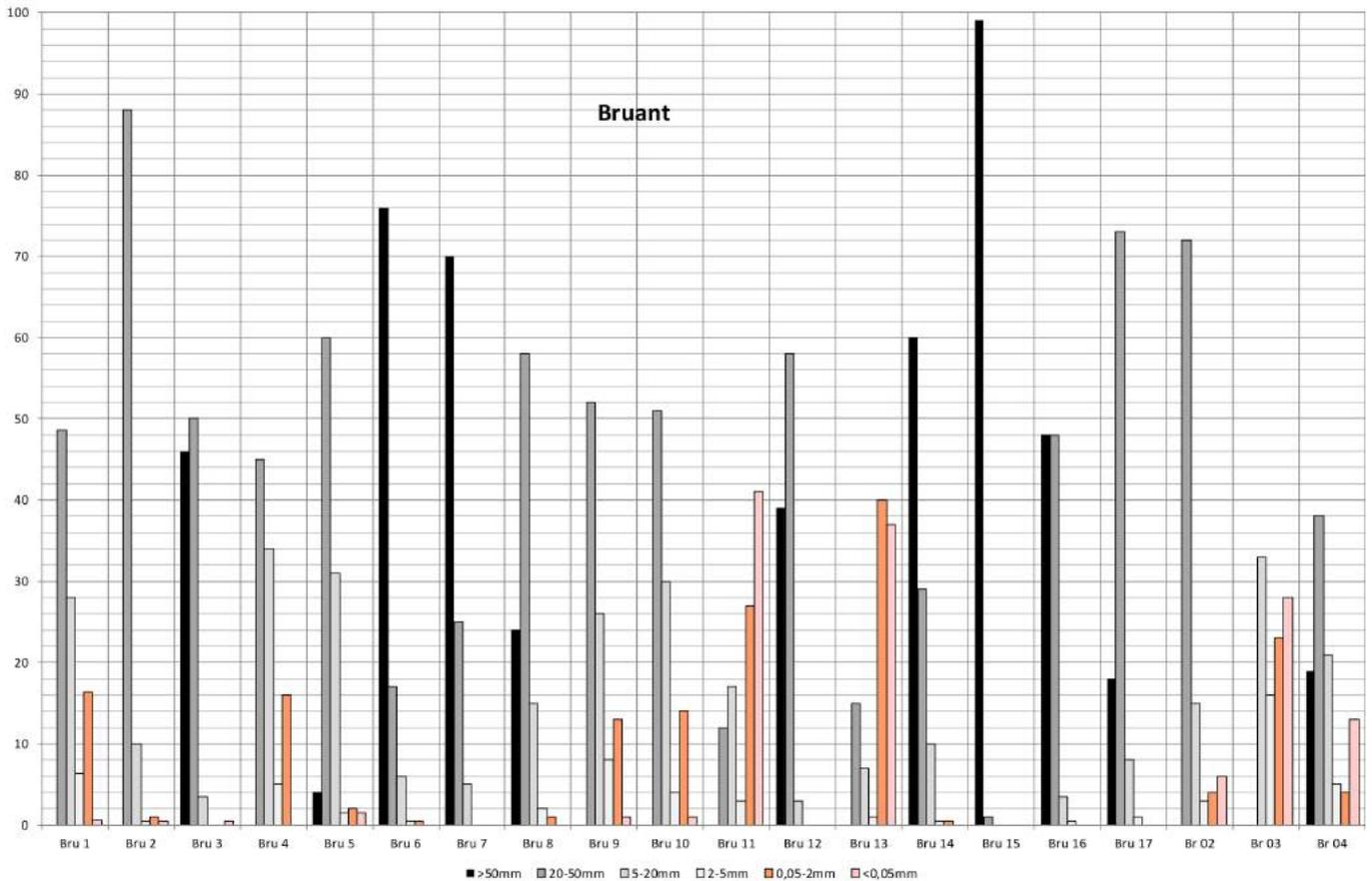


Fig. 19 – Principales fractions granulométriques des échantillons prélevés sur le site de Bruant exprimé en % (Bru. Matériaux du fond du lit ; Br. Matériaux des berges).

Fig. 19 – Main grain size classes (in %) of the samples taken at Bruant (Bru. Riverbed materials ; Br. Riverbank materials).



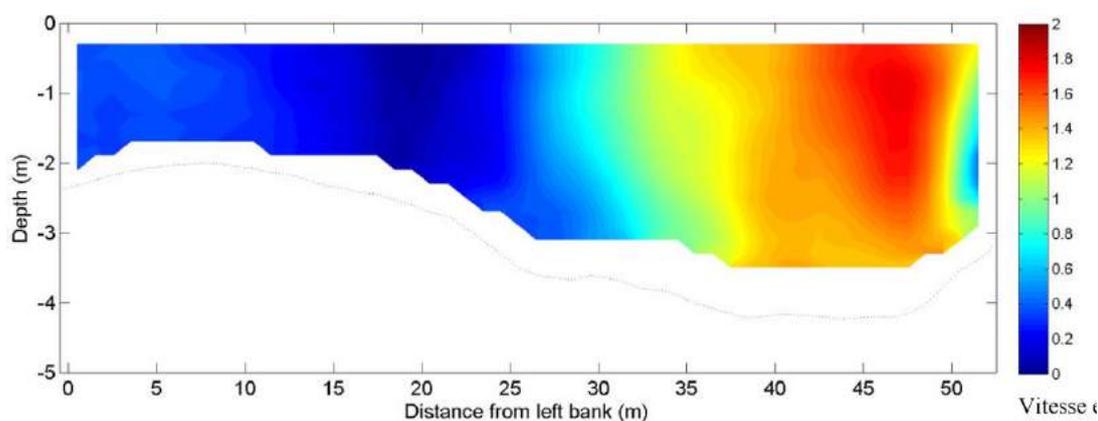


Fig. 20 – Champ de vitesse du Loir. Exemple du profil N° 7 à Bruant (débit proche du débit à pleins bords).

Fig. 20 – Velocity field of the Loir River. Example from the profile #7 acquired at Bruant.

6. Discussion

L'hypothèse généralement admise est que les aménagements des cours d'eau comme le Loir ont contribué à la modification d'un paysage fluvial dont on ne connaît pas l'état l'antérieur du fait de l'ancienneté des installations. Ce paysage fait référence davantage à la végétation des berges et aux usages du cours d'eau qu'à l'érosion fluviale. Les ouvrages hydrauliques ont fixé un lit naturellement peu mobile compte tenu de la faiblesse de la pente et de sa faible capacité à mobiliser une charge sédimentaire abondante. La puissance spécifique moyenne, calculée à partir des 106 profils transversaux mesurés sur le Loir sur une longueur de 60 km, est de 11 W/m^2 ; elle est donc proche des 12 W/m^2 mesurée par Depret et al. (2015) sur le Cher. Dans 70 % des cas, cette puissance est inférieure à 5 W/m^2 et dans 10 % des cas seulement, supérieure à 20 W/m^2 . Ces caractéristiques sont en cohérence avec l'état du lit dont les berges très peu mobiles sont végétalisées sur 85 % du linéaire de la rivière. Ailleurs, la stabilité du lit est ou a été rompue du fait d'aménagements parfois très anciens ou en lien avec le tracé du Loir (rives concaves des boucles les plus serrées). Le processus principal de l'érosion des berges là où elle s'est développée, est le sapement. Il agit sur les matériaux cohésifs souvent disloqués par la météorisation (variations d'humidité et de température). Les éboulements de nature gravitaire observés sur d'autres cours d'eau sont peu fréquents (Vandenberghé et al., 2012), et n'interviennent que lorsque des lentilles de graviers affleurent en pied de berge (Nasermoaddelli et Pasche, 2008).

Sur les sites de Bruant et de Cherré, une érosion notable a entraîné le recul des berges d'une dizaine de centimètres en moyenne aux endroits des mesures. Le recul est plus important dans les encoches (jusqu'à 1,50 m). Les sédiments évacués par la rivière sont des fines (fraction inférieure à 5 mm). Les processus interviennent pour une très large gamme de débits et ne nécessitent pas de fortes crues. Comme l'ont montré d'autres recherches dont celles de Nardi et al. (2013), de Hooke (2015) ou de Palmer et al. (2014), il n'y a pas de corrélation directe entre les débits, en particulier la magnitude des crues, et l'érosion des berges pour des rivières de faible énergie. Le déblaiement des sédiments qui conduit au recul des berges a besoin d'une phase antérieure de préparation des matériaux lorsque le niveau limnimétrique est bas (période estivale ou entre deux crues), avant leur évacuation lors d'évènements hydrologiques favorables (remontée et/ou variation du niveau d'eau).

Sur le Loir, le déblaiement ne concerne que la fraction fine inférieure à 5 mm de diamètre. Les mesures réalisées sur le site de Bruant (fig. 16), montrent que les modifications du trait de berge sont surtout visibles après la période des hautes eaux. Au cours de

la période de basses eaux, les matériaux affaiblis par des fentes de dessiccation s'éboulent en pied de berge d'où ils seront repris au moment des crues. Mais ces éboulements ne concernent que de faibles volumes de sédiments.

Ces modifications du lit interviennent malgré la faible énergie du cours d'eau. À Bruant et à Cherré, la puissance spécifique moyenne est respectivement de 6 et 4 W/m^2 , Il faut donc prendre en considération d'autres moteurs. Dans le détail, la forme du lit du Loir est irrégulière ; le fond comprend des mouilles profondes (jusqu'à 2,5 à 3 m) et les berges sont échanquées par des encoches qui accroissent leur rugosité et contribuent à accentuer les forces de cisaillement. Ces caractéristiques sont propices à la formation d'un écoulement plus turbulent qui doit amplifier l'érosion. La turbulence à l'intérieur du chenal a été étudiée en laboratoire sur canal expérimental (Yue et al., 2015) et dans le cadre d'approches hydro-écologiques pour la définition des habitats (Kronvang et al., 2012). Dans nos sites, elle permet que les sédiments fins prélevés dans le lit soient évacués. Sont ainsi mis à nu des matériaux délaissés par une érosion insuffisamment puissante ; les conditions hydro-climatologiques actuelles ne permettent pas la reprise de ces matériaux et l'incision du lit. On peut émettre l'hypothèse que leur mobilisation est très peu fréquente. La précision actuelle de nos mesures n'est pas suffisante pour évaluer les paramètres hydrauliques qui pourraient le confirmer (contraintes de cisaillement et forces tractrices). La granulométrie des éléments grossiers hérités des conditions hydro-climatiques du Quaternaire et leur distribution sont variables tant dans le fond du lit que dans les berges, comme cela a été montré ; ces caractères n'ont pas permis de proposer un diamètre médian de galets représentatif pour un tronçon de cours d'eau. Par ailleurs, la très faible inclinaison des lignes d'eau nécessite des mesures complémentaires pour saisir leur modification lorsque les conditions d'écoulement varient (conditions hydrologiques ou influence anthropique liées aux manipulations associées aux barrages). Ainsi, l'essentiel de l'énergie de la rivière, en particulier celle qui est déterminée par les vitesses les plus fortes à l'intérieur des sections mouillées, se dissipe latéralement, ce qui permet aux berges de reculer principalement par sapement et localement seulement, par éboulement.

Le fonctionnement du Loir répond ainsi à des règles générales révélées par les longs tronçons de cours d'eau, où la stabilité ne peut être remise en cause que par des événements catastrophiques. Le tracé de la rivière bouge peu. À plus grande échelle, l'érosion se manifeste de manière très irrégulière et en des secteurs de berges courts et discontinus correspondant à des sites spécifiques. Dans ce fonctionnement hydro-géomorphologique, le rôle des héritages

géomorphologiques sur la dynamique fluviale est aussi grand que celui des conditions actuelles, tant du climat que des actions anthropiques.

Il est probable que l'arasement des barrages envisagé par l'application de la loi sur l'eau ne change pas fondamentalement les conditions de la morphogenèse compte tenu de la faiblesse des pentes. Les changements dans les faciès d'écoulement liés à l'abaissement de la ligne d'eau ainsi que les caractéristiques de la morphologie du fond n'auront probablement qu'un impact modéré. On peut émettre cependant l'hypothèse qu'une partie de l'activité morphogène mise en évidence sur le site de Bruant soit influencée par l'érosion régressive associée au percement du barrage situé 500 m en aval (perçement naturel intervenu au cours des années 1980). Mais dans tous les cas, la dynamique fluviale est sous le contrôle de l'énergie, insuffisante pour mobiliser les matériaux grossiers.

Ainsi sera-t-il nécessaire de compléter les mesures que nous venons d'analyser, d'une part par une approche spatio-temporelle se rapportant à de plus longs tronçons de rivière et suivis au cours d'événements hydrologiques plus nombreux. Et d'autre part par des mesures de ligne d'eau de précision sub-centimétrique. Il s'agit ainsi de mieux prendre en compte l'hétérogénéité des conditions de l'écoulement et de ses implications hydro-géomorphologiques.

7. Conclusion

Les résultats obtenus sur le Loir contribuent à la compréhension du fonctionnement des cours d'eau de faible énergie, du moins dans ses grandes lignes. S'ils ne sont valables que pour les conditions dans lesquelles nos mesures ont été faites (pas de forte crue survenue au cours de la période de mesure, débit à pleins bords atteint une seule fois) ils sont cependant révélateurs des processus qui participent à la dynamique fluviale : très grande discontinuité des manifestations de l'érosion, tant spatiales que temporelles, prédominance de l'ablation sur les berges et formes construites très rares, forte influence des héritages et de l'aménagement des lits fluviaux. Par ailleurs, les travaux réalisés sur le Loir ont un caractère exploratoire. Ils ont permis que soient mises au point des méthodes de traitement des données de terrain adaptées aux caractéristiques de l'érosion des rivières de faible énergie. La chaîne d'acquisition pour quantifier les transports sédimentaires et l'évolution géomorphologique du Loir a combiné pour partie la chaîne de mesures développée dans le cadre des travaux de thèse de doctorat de Nicolas Claude sur les processus et flux hydro-sédimentaires en rivière sablo-graveleuse (Claude, 2012) et une méthode d'auscultation des berges par scanner 3D développée au sein du Laboratoire Géomatique et Foncier du CNAM (traitements importants tant au niveau du nettoyage des données que du développement de méthodes de quantification). Une approche pluridisciplinaire a été appliquée afin d'appréhender au mieux le fonctionnement hydro-sédimentaire et morphologique du Loir. Mais il est encore nécessaire d'une part de continuer à affiner les mesures à grande échelle afin d'avoir une connaissance plus fine des phénomènes d'érosion, et d'autre part de développer une méthode pour passer de l'échelle du site à celle du tronçon et du cours d'eau afin de comprendre et de quantifier plus largement les processus du transport sédimentaire sur le Loir.

Remerciements

Nos travaux ont été développés dans le cadre du projet SEDILOIR inscrit dans la Plan Loire et financé par la région Pays de la Loire, le FEDER et l'Agence de l'eau Loire-Bretagne (n° PRESAGE 38212). Nous remercions les relecteurs de l'article pour leurs remarques utiles, qui ont permis d'approfondir la réflexion et d'améliorer la présentation de nos résultats.

Références

- Arnaud F., Piégay H., Schmitt L., Rollet A.J., Ferrier V., Beal D. (2015)** – Historical geomorphic analysis (1932-2011) of a bypassed river reach in process-based restoration perspectives: the Old Rhine downstream of Kembs division dam (France, Germany). *Geomorphology*, 236 (1), 163-177.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2015.02.009
- Baker D., Bledsoe B., Albano C., Poff N. (2011)** – Downstream effects of diversion dams on sediment and hydraulic conditions of rocky mountain streams. *River Research and Applications*, 27 (3), 388-401.
DOI : 10.1002/rra.1376
- Bravard J.P., Petit F. (1997)** – Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial. A. Colin, Coll. U., Paris, 222 p.
- Brodu N., Lague D. (2013)** – 3D terrestrial LIDAR data classification of complex using a multi-scale dimensionality criterion: applications in geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68, 121-134.
DOI : 10.1016/j.isprsjprs.2012.01.006
- Claude N. (2012)** – Processus et flux hydro-sédimentaires en rivière sablo-graveleuse : influence de la largeur de section et des bifurcations en Loire moyenne (France). Thèse, Université François Rabelais, Tours, 366 p.
- Claude N., Rodrigues S., Bustillo V., Breheret J.G., Macaire J.J., Jugé P. (2012)** – Estimating bedload transport in a large sand-gravel bed river from direct sampling, dune tracking and empirical formulae. *Geomorphology*, 179, 40-57.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2012.07.030
- Corbonnois J., Tchékpo W. (2013)** – Quel devenir pour les ouvrages hydrauliques du bassin de la Maine ? *Norois* 228, 27-38.
DOI : 10.4000/norois.4721
- Csiki S., Rhoads B. L. (2010)** – Hydraulic and geo-morphological effects of run-of-river dams. *Progress in Physical Geography*, 34 (6), 755-780.
DOI : 10.1177/0309133310369435
- Csiki S., Rhoads B. L. (2014)** – Influence of four run-of-river dams on channel morphology and sediment characteristics in Illinois, USA. *Geomorphology*, 206, 215-229.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2013.10.009
- Depret T., Gautier E., Grancher D., Virmoux C., Brunstein D. (2015)** – Hydrological controls on the morphogenesis of low-energy meanders (Cher River, France). *Journal of Hydrology*, 531 (3), 877-891.
DOI : 10.1016/j.jhydrol.2015.10.035
- Desprie J., Voinchet P., Bahain J.J., Falgueres C., Lorain J.M., Duvalard J. (2003)** – Les nappes alluviales pléistocènes du Loir dans la région de Vendôme (Loir-et-Cher, France) : contexte morpho-sédimentaire et chronologie RPE. *Quaternaire*, 14 (4), 207-218.
DOI : 0.3406/quate.2003.1743
- Dongsu K., Muste M. (2012)** – Multi-dimensional representation of river hydrodynamics using ADCP data processing software. *Environmental Modelling & Software*, 38, 158-166.
DOI : 10.1016/j.envsoft.2012.05.011
- 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.
DOI : 10.1016/j.landurbplan.2014.10.007

- ETABLISSEMENT PUBLIC LOIRE (EPL) (2004)** – Etude PPP, Prévision, Prévention, Protection. Crues du bassin de la Maine. 49 p. (non publié).
- Fadili M. (2015)** – Modélisation des nuages de points acquis par lasergrammétrie en milieu naturel. Application à l'auscultation des berges de rivières à faible énergie. Mémoire de diplôme d'ingénieur, spécialité Géomètre et Topographe, ESGT Le Mans (72), 59 p.
- Foerst M., Rütther N. (2013)** – Measuring bank retreat in fluvial environments with Terrestrial Laser Scanning (TLS), Earth Surface Dynamics Discussion, 1, 951-972.
DOI : 10.5194/esurfd-1-951-2013
- Germaine M.A., Barraud R. (2013)** – Restauration écologique et processus de patrimonialisation des rivières dans l'Ouest de la France. VertigoO.
DOI : 10.4000/vertigo.13583
- Gregory K. (2006)** – The human role in changing river channels. *Geomorphology*, 79 (3-4), 172-191.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2006.06.018
- Hadley R., Emmett W. (1998)** – Channel changes downstream from a dam. *Journal of the American Water Resources Association*, 34 (3), 629-637.
DOI : 10.1111/j.1752-1688.1998.tb00960.x
- Hamel V., Buffin-Bélangier T., Héту B. (2013)** – Contribution à l'étude de l'érosion des berges : analyse à haute résolution spatio-temporelle des mouvements subaériens sur une berge de la rivière Ouelle, Québec, Canada. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 19 (2), 119-132.
DOI : 10.4000/geomorphologie.10176
- Harnischmacher S. (2007)** – Thresholds in small rivers? Hypotheses developed from fluvial morphological research in western Germany. *Geomorphology*, 92 (3-4), 119-133.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2006.07.036
- Hohensinner S., Habersack H., Jungwirth M., Zauner G. (2014)** – Reconstruction of the characteristics of a natural alluvial river-floodplain system and hydromorphological changes following human modifications: The Danube River (1812-1991). *River Research and Applications*, 20 (1), 25-41.
DOI : 10.1002/rra.719
- Hooke J.M. (2015)** – Variations in flood magnitude – effects-relation and implications for flood risk assessment and river management. *Geomorphology*, 251, 91-107.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2015.05.014
- HYDRATEC (2008)** – Étude de cohérence du Bassin de la Maine - Synthèse - Rapport d'étape 2 : Étude hydrologique et analyse des crues de référence, EPTB Loire. 54 p. (non publié).
- Ikeda S. (1984)** – Prediction of alternate bar wavelength and height. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110 (4), 371-386.
DOI : 10.1061/(asce)0733-9429(1984)110:4(371)
- Jaeggi M. (1984)** – Formation and effects of alternate bars. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110 (2), 142-156.
DOI : 10.1061/(asce)0733-9429(1984)110:2(142)
- James L., Marcus W. (2006)** – The human role in changing fluvial systems: Retrospect, inventory and prospect. *Geomorphology*, 79 (3-4), 152-171.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2006.06.017
- Kronvang B., Audet J., Baattrup-Pedersen A., Jensen H.S., Larsen S.E. (2012)** – Phosphorus load to surface water from bank erosion in a Danish lowland river basin. *Journal of Environment Quality*, 41 (2), 304-313.
DOI : 10.2134/jeq2010.0434
- Kuo C.W., Brierley G., Chang Y.H. (2015)** – Monitoring channel responses to flood events of low to moderate magnitudes in a bedrock-dominated river using morphological budgeting by terrestrial laser scanning. *Geomorphology*, 235, 1-14.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2015.01.019
- Lague D., Brodu N., Leroux J. (2013)** – Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner : Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 10-26.
DOI : 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009
- Le Coz J., Larrarte F., SAYSSET G., Pierrefeu G., Brochot J.F., Marchand P. (2009)** – Mesures hydrologiques par profileur à effet Doppler (ADCP) en France : application aux cours d'eau et aux réseaux urbains. *La Houille Blanche*, 3, 123-131.
DOI : 10.1051/lhb/2009035
- Larue J.P. (1989)** – Les crues du Loir : phénomènes naturels contrariés par l'intervention de l'homme. *Norois*, 143, 257-272.
DOI : 10.3406/noroi.1989.7440
- Lespez L., Viel V., Rollet A.J., Delahaye D. (2015)** – The anthropogenic nature of present-day low energy rivers in western France and implications for current restoration projects. *Geomorphology*, 251, 64-76.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2015.05.015
- Lobera G., Besné P., Vericat D., López-Tarazón J.A., Tena A., Aristi I., Díez J.R., Ibisate A., Larrañaga A., Elosegi A., Batalla R.J. (2015)** – Geomorphic status of regulated rivers in the Iberian Peninsula. *Science of the Total Environment* 508, 101-114.
DOI : 10.1016/j.scitotenv.2014.10.058
- Malavoi J.R., Bravard J.P. (2010)** – Éléments d'hydrogéomorphologie fluviale. ONEMA, 224 p.
- Melun G. (2012)** – Évaluation des impacts hydromorphologiques du rétablissement de la continuité hydro-sédimentaire et écologique sur l'Yerre aval. Thèse de doctorat, Université Paris 7. 337 p.
- Merwade V. (2009)** – Effect of spatial trends on interpolation of river bathymetry. *Journal of Hydrology*, 371 (1-4), 169-181.
DOI : 10.1016/j.jhydrol.2009.03.026
- Nardi L., Campo L., Rinaldi M. (2013)** – Quantification of riverbank erosion and application in risk analysis. *Natural Hazards*, 69 (1), 869-887.
DOI : 10.1007/s11069-013-0741-8
- Nasermoaddelli M.H., Pasche E. (2008)** – Application of terrestrial 3D laser scanner in quantification of the riverbank erosion and deposition. In: *Proceedings of Riverflow 2008*, Cesme-Ismir, Turkey (Sep. 3-5), 3, 2407-2416 (ISBN 978-605-60136-3-8).
- Ollero A. (2010)** – Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain. *Geomorphology*, 117 (3-4), 247-260.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2009.01.015
- ONEMA (2013)** – Les acteurs de la politique de l'eau en France pour la mise en œuvre de la directive cadre européenne sur l'eau (DCE). <http://www.onema.fr/-Onema-?archives=2013>
- Palmer J.A., Schilling K.E., Isenhardt T.M., Schulz R.C., Tomer M.D. (2014)** – Streambank erosion rates and loads within a single watershed: Bridging the gap between temporal and spatial scales. *Geomorphology*, 209, 66-78.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2013.11.027
- Petit F., Hallot E., Houbrechts G., Mols J. (2005)** – Évaluation des puissances spécifiques de rivières de Moyenne et Haute Belgique. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 46, 37-50.
- Petit F., Houbrechts G., Peeters A., Hallot E., Van Campenhout J., Denis A.C. (2015)** – Dimensionless critical shear stress in gravel-bed rivers. *Geomorphology*, 250, 308-320.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2015.09.008

- Piana J., Carcaud N., Cyprien-Chouin A.L., Visset L., Leroy D. (2011)** – Dynamique paysagère tardiglaciaire et holocène dans la vallée du Loir à Pezou (Loir-et-Cher) : développements méthodologiques et premiers résultats. *Noroiis*, 213, 73-88.
DOI : 10.4000/noroiis.3047
- Piton G., Recking A. (2016)** – Effects of check dams on bed-load transport and steep-slope stream morphodynamics. *Geomorphology*. (sous presse).
DOI : 10.1016/j.geomorph.2016.03.001
- Rinaldi M., Wyzga B., Dufour S., Bertodi W., Gurnell A. (2013)** – River processes and implications for fluvial ecogeomorphology : A European Perspective. In Shroder, J., Butler, D.R., Hupp, C.R. (Eds.): *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, CA, 12, Ecogeomorphology, 37-52.
DOI : 10.1016/B978-0-12-374739-6.00321-3
- Rollet A.J., Piégay H., Dufour S., Bornette G., Persat H. (2014)** – Assessment of consequences of sediment deficit on a gravel river bed downstream of dams in restoration perspectives : application of multicriteria, hierarchical and spatially explicit diagnosis. *River Research and Applications*, 30 (8), 939-953.
DOI : 10.1002/rra.2689
- SAGE. Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin versant du Loir (2016)** – Contrat régional de bassin versant (CRBV). Synthèse des enjeux et programmes d'actions 2016-2018. Rapport adopté par la commission locale de l'eau de 24 mars 2016. 130 p. <http://www.sage-loir.fr/wp-content/uploads/2015/11/Rapport-Pr%C3%A9alable-CRBV-VF.pdf>
- Schmidt J., Wilcock P. (2008)** – Metrics for assessing the downstream effects of dams. *Water Resources Research*, 44 (4).
DOI : 10.1029/2006WR005092
- Schmitt L., Maire G., Humbert J. (2001)** – La puissance fluviale : définition, intérêt et limites pour une typologie hydro-geomorphologique des rivières. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., 45 (2), 201-224.
- SEDILOIR (2016)** – Quantification des flux sédimentaires dans le lit des rivières de faible énergie. Étude du Loir moyen entre Ruillé-sur-Loir et Bazouges-sur-le-Loir. EPL, Plan Loire grandeur nature. Rapport final provisoire. 165 p. (non publié).
- Talbot T., Lapointe M. (2002)** – Numerical modeling of gravel bed river response to meander straightening: The coupling between the evolution of bed pavement and long profile. *Water Resources Research*, 38 (6), 101-110.
DOI : 10.1029/2001wr000330
- Thoma D.P., Gupta S.C., Bauer M.E. (2001)** – Quantifying River Bank Erosion with Scanning Laser Altimetry. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 31 (3/W4), October 22-24, Annapolis, MD, 169-174.
- Vandenbergh J., De Moor J., Spanjaard G. (2012)** – Natural evolution versus human impact in a present-day fluvial catchment: the Geul River, southern Netherlands. *Geomorphology*, 159-160, 1-14.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2011.12.034
- Williams G., Wolman M. (1984)** – Downstream effects of dams on alluvial rivers. *US Geological Survey Professional Paper*, 1286, 88 p.
- Yu M., Wei H.Y., Wu S.B. (2015)** – Experimental study on the bank erosion and interaction with near-bank bed evolution due to fluvial hydraulic force. *International Journal of Sediment Research*, 30 (1), 81-89.
DOI : 10.1016/s1001-6279(15)60009-9
- Zahar Y., Ghorbel A., Albergel J. (2008)** – Impacts of large dams on downstream flow conditions of rivers: aggradation and reduction of the Medjerda channel capacity downstream of the Sidi Salem dam (Tunisia). *Journal of Hydrology*, 351 (3-4), 318-330.
DOI : 10.1016/j.jhydrol.2007.12.019

English abridged version

The experiments carried out for two years on three sites (Ruillé, Bruant, and Cherré) of a single stretch of the Loir River (rate of flow: 24 m³/s; mean width: 40 m; mean depth: 2.5 m), a weak energy stream whose channel slope never exceeds 1‰, allow for the conditions of the river's dynamics to be determined. The erosion, measured by observing the banks' state and the riverbed floor, occurs only in specific zones located in the tightest meanders of the Loir River or close to the dykes of old dams (of height less than 2 m). Their lengths range from 700 to 1,000 m, and together they represent nearly 15% of the studied 90 km stretch.

Two surveys were conducted between 2013 and 2015: riverbank recession and bathymetry measurements using of 3D terrestrial LIDAR and multibeam sonar respectively. A new method suitable for processing and interpreting data acquired in moderate erosion zones (thus applicable to any other weak energy river), has been developed and applied to the surveys, in order to assess the changes occurring from one survey to the other. Those changes are local and the resulting riverbank shapes diverse. Our major findings are the following:

- some local shoreline recessions ranging from 0.80 to 1.40 m in length, which appeared in the course of a few months during the high-water period (in the absence of major floods),
- some minor changes of the riverbed floor, including a deepening of 1.5 to 1.8 m depth between permanently submerged shallow areas.

The solid load carried by the stream channel, mainly made up of fine-textured materials (fine sand and silt), is released downstream. Coarse materials (cobbles of 5 to 9 cm in length), that sometimes just from the banks, cover the bottom of the riverbed where they form a thick layer. Given that the extent of erosion is linked to the stream's energy and the nature of sediments subjected to the erosion caused by hydrological events and river development, a model describing the behaviour of weak energy rivers can be inferred.

It is posited that the facilities on a river such as the Loir caused a change in the landscape, whose initial condition cannot be retraced due to the age of the constructions. Those facilities however prevent the displacement of coarse loads and the shaping of evolved forms. Sediment transport thus mostly occurs through suspension, involving fine materials only. This phenomenon is actually observed along 85% of the Loir's course; it is conform to the principal model leading to the longitudinal and lateral mobility of a weak river bed, as indicated by the trees and shrubs that cover the banks. In this case, the hydrological energy is weak and well under control of the river installations.

In the remaining 15%, the river bed's current or former instability has allowed various, previously studied, shapes to be created. They depend on the Loir's course (tight or loose curls), the presence of riverbed's facilities which have disturbed the natural environment, and, on a wider scale, riverbed's deepening (up to 2.5 to 3 m depth) and thresholds. These conditions foster a turbulent flow that causes

erosion and coarse ancient materials, which might not be incised under the current hydroclimatic conditions, to show up.

River bank erosion, occurring mainly during the high-water season, contributes to the deepening of notches in relation with a local increase of the riverbank's roughness, which strengthens hearing forces. During low-water periods, the materials, riddled by desiccation cracks, tumbledown to the riverbank feet, from where they are carried away again during high-water periods. Most of the river's energy, as evidenced by the highest velocities inside stream cross sections, is thus dissipated on the edges. The riverbank recess

proceeds primarily from sapping and secondarily from slides clearly visible on the field (Klösch et al., 2015).

Past geomorphological conditions have an influence on the Loir River dynamics and amount to current conditions, such as climate or anthropic actions. Overall, the river dynamics is controlled by the stream's energy, which is not strong enough to disturb the coarse materials located at the bottom of riverbed. The landscape seems not to have been significantly altered by river facilities, and the impact of dams is likely to be less than that usually admitted.