

ANALYSE COMPARÉE DE LA DYNAMIQUE DES ÎLES FLUVIALES DE TROIS GRANDS COURS D'EAU – LENA, NAPO ET LOIRE

Emmanuèle GAUTIER, Stéphane GRIVEL, Coral GARCIA GOVEA, Thomas DÉPRET,
Clément VIRMOUX, Daniel BRUNSTEIN

Résumé

L'objet de cet article est l'analyse de la dynamique des îles fluviales, qui ont été quelque peu négligées par la littérature scientifique. Associées au style fluvial en anabranche, les îles sont généralement considérées comme des formes stables. L'étude porte sur trois cours développant des îles fluviales dans des contextes hydro-climatiques très différents, la Loire (France), le Rio Napo (Pérou) et la Léna (Sibérie). À partir d'une analyse diachronique, on démontre la mobilité de ces formes à une échelle pluri-décennale. Des modèles d'évolution sont déterminés, ainsi que trois types principaux d'îles caractérisés par des vitesses de migration et des processus de formation différents. Sur un pas de temps court, deux processus en termes de sédimentation sont identifiés : l'accrétion verticale est dominante sur les îles jeunes, tandis que les îles anciennes évoluent préférentiellement par accrétion latérale.

Mots-clés

îles fluviales, migration, sédimentation, Loire, Rio Napo, Léna

Abstract

This paper is dedicated to the analysis of fluvial islands that have been neglected by the scientific literature. Associated to the anabranching fluvial pattern, fluvial islands are generally considered as stable landforms. The study is based on three rivers that develop islands in different climatic and hydrologic environments: the Loire River (France), the Rio Napo (Peru) and the Lena River (Siberia). On the basis of a diachronic analysis, the mobility of islands is demonstrated at a pluri-decadal temporal scale. Evolution models and island patterns are determined with regards to their migration rate and to their formation processes. On a shorter time scale, two main sedimentation mechanisms are identified: vertical accretion is the dominant process on young islands, whereas older islands are mainly constructed by lateral accretion.

Keywords

Fluvial islands, migration, sedimentation, Loire River, Napo River, Lena River

I. INTRODUCTION

En géomorphologie fluviale, la littérature n'a accordé que peu d'attention aux îles. En 2001, Gurnell *et al.* soulignaient le fait que le terme même d'île n'apparaissait pas dans les textes faisant autorité en géomorphologie fluviale. Bomer, en 1972, est l'un des premiers dans son article sur la Loire « Les îles fluviales, évolution ou stabilité ? » à se pencher sur leur origine et leur évolution. Osterkamp (1998) propose huit facteurs ou processus à l'origine de la formation des îles, parmi lesquels on retiendrait principalement le mécanisme d'avulsion, la croissance végétale durant une période de calme hydrologique, l'incision, la formation d'un dépôt en arrière d'un obstacle. En milieu intertropical, l'af-

fleurement de seuils rocheux ou de très gros blocs du substratum explique souvent la présence d'îles, comme c'est le cas sur le Mékong (Gupta et Liew, 2007) et sur le Niger (observation personnelle). L'étude de la très grande île Majuli sur le Brahmapoutre montre que la néotectonique peut être également à l'origine de ces formations fluviales et de leur évolution historique (Lahiri et Sinha, 2014).

Au cours des vingt dernières années, on note donc un intérêt un peu plus prononcé pour les îles fluviales, même si peu de publications sont effectivement centrées sur ces formes (Osterkamp, 1998 ; Gurnell *et al.*, 2001 ; Sarma et Pukhan, 2004 ; Gautier et Grivel, 2006 ; Zanoni *et al.*, 2008 ; Grivel et Gautier, 2012 ; Lahiri et Sinha, 2014 ; Baubiniené

et al., 2015). La végétation dense, généralement forestière, lorsqu'elle a été préservée, témoigne de leur stabilité sur le moyen terme, à l'échelle pluri-décennale, voire pluriséculaire. Ainsi, on a souvent mis l'accent sur le fait que la colonisation végétale des lits fluviaux est le signe d'un réajustement morphodynamique du système fluvial, et plus précisément d'une diminution de l'activité hydrologique parfois accompagnée d'une décroissance du flux de sédiment : des bancs médians peuvent évoluer en îles en relation, par exemple, avec une réduction des pics de crue d'origine naturelle ou artificielle (Baubinié *et al.*, 2015) ; la stabilisation et la végétalisation des formes fluviales peuvent être également provoquées par un enfoncement du plancher alluvial (Grivel, 2008). La littérature abondante sur le réajustement des formes fluviales des rivières des Alpes et de leur piémont au cours du 20^e siècle témoigne d'une forte expansion des ripisylves, et par voie de conséquence, une extension des îles (voir par exemple Marston *et al.*, 1995 ; Vautier, 2000 ; Liébault et Piégay, 2002 ; Descroix et Gautier 2002 ; Nguyen *et al.*, 2002). Il s'agit donc dans ces cas-là d'une réponse des systèmes en tresses à une forte réduction des charges solides transportées, mais aussi des débits liquides.

Une première approche tend donc à montrer que les îles semblent être des formes fluviales s'ajustant particulièrement rapidement aux changements environnementaux. La chenalisation à outrance accompagnée par la construction de barrages peut provoquer une quasi-disparition des îles fluviales, comme c'est le cas sur le Danube (Hohensinner *et al.*, 2004). À l'inverse, la déforestation du bassin de la rivière Araguaia au Brésil a entraîné une forte croissance de la charge solide, ce qui a provoqué une réduction du nombre d'îles, les petites ayant été érodées et les plus vastes rattachées à la plaine (Latrubesse *et al.*, 2009). Sur la Léna, la croissance des débits moyens mensuels et des écoulements de crue conjuguée à l'augmentation de la température de l'eau du fleuve, a provoqué une accélération du recul des têtes d'îles (Costard *et al.*, 2007 ; Gautier *et al.*, 2011). Sur la Loire, de nombreux facteurs expliquent la colonisation rapide des bancs médians par la forêt alluviale, ainsi transformés en îles : l'absence de grandes crues depuis le début du 20^e siècle, les extractions massives de sédiments dans le chenal actif des années 1950 au début des années 1990 (Gautier *et al.*, 2008). Cependant, les recherches ont démontré qu'il s'agit plutôt d'un retour de la

forêt sur un fleuve où tout concourait à entraver le développement de la végétation alluviale. Les îles étaient donc soit bâties (La Charité-sur-Loire, Amboise), soit cultivées (osier, chanvre, jardins potagers...) et pâturées, soit arasées pour favoriser la navigation (Gautier et Grivel, 2006 ; Grivel et Gautier, 2012). Sur la Saône, le nombre d'îles a fortement régressé depuis le 18^e siècle du fait de la multiplication des endiguements et des perrés aboutissant à la chenalisation de la rivière ; certaines îles ayant même été arasées (Astrade, 1996).

Les îles fluviales accompagnent les deux patrons fluviaux à chenaux multiples : les rivières en tresses d'une part, et les chenaux en anabranches d'autre part, avec une différence notable entre les deux. Dans le premier cas, en raison de l'énergie du système, les îles subissent un *turnover* rapide : peu d'entre elles subsistent plusieurs décennies et leur surface reste nettement inférieure à celle des bancs vifs (Gurnell *et al.*, 2001 ; Gurnell et Petts, 2002 ; Zanoni *et al.*, 2008). Comme nous l'avons écrit plus haut, la présence des îles est généralement synonyme d'un assouplissement de la dynamique fluviale. Dans le second cas, l'île est l'élément dominant du paysage fluvial et sa présence est parfois pluriséculaire, même si la forme évolue au cours du temps (Sarma et Pukhan, 2004 ; Lahiri et Sinha, 2014).

La multiplication, depuis une vingtaine d'années, des publications sur les patrons fluviaux en anabranches aide à la compréhension de la dynamique des îles, sans pour autant consacrer d'analyse à ces formes (Knighton et Nanson, 1993 ; Nanson et Knighton, 1996). Les deux auteurs ont montré que le stockage sédimentaire dans les îles (où l'accrétion verticale est dominante) est déterminé à la fois par une charge sédimentaire qui excède la capacité de transport et, possiblement, par des écoulements morphogènes brefs, dont l'inefficacité est renforcée par la faiblesse des pentes. La principale caractéristique soulignée par les auteurs travaillant sur des systèmes fluviaux développant des anabranches, est leur stabilité apparente. Effectivement, les berges des chenaux semblent être *relativement* épargnées par l'érosion latérale. Les premières études à l'avoir souligné sont celles de Smith (1976) et Smith et Smith (1980) sur trois rivières anastomosées de l'ouest de l'Alberta. La pente faible semble être le contrôle principal du développement d'anabranches. La formation d'une

multitude de chenaux permet d'augmenter l'efficacité hydraulique sur des pentes faibles (Nanson et Knighton, 1996 ; Huang et Nanson, 2007).

La connaissance de ce patron fluvial a donc réellement progressé en ce qui concerne les facteurs de contrôle ; elle laisse cependant dans l'ombre la dynamique même de ce qui semble être la variable d'ajustement principale, à savoir les îles. Il semblerait que le fait d'être qualifiées de formes « stables » ait gelé la réflexion sur ces éléments importants de nombreux hydrosystèmes. Notre objectif est donc, en nous appuyant sur trois grands cours d'eau développant des îles fluviales, d'analyser la dynamique même de ces formes. Nous examinerons donc les éléments dynamiques d'îles fluviales formées par la stabilisation d'un dépôt sédimentaire dans le chenal (un banc médian) par la végétation ; les images et photographies aériennes attestent de la présence de ces formes sur plusieurs dizaines d'années et démontrent leur mobilité. L'analyse des trois hydrosystèmes porte sur un suivi des îles sur plusieurs décennies : depuis le 19^e siècle sur la Loire, au cours des cinquante dernières années sur la Léna (1967 à aujourd'hui) et depuis les années 1980 sur le Rio Napo. Enfin, les dynamiques sédimentaires ont été également analysées sur un pas de temps plus court, à l'échelle de l'année et de la crue.

A. Le cadre de l'étude

1. Les cours d'eau étudiés

L'étude est fondée sur trois cours choisis dans trois biomes différents, ce qui permet d'identifier les invariants dans la dynamique insulaire. Il s'agit de la Léna moyenne, dans la partie amont de sa plaine, le Rio Napo, affluent équatorial puis péruvien de l'Amazone supérieure et enfin, la Loire moyenne (Tableau 1).

La Léna est étudiée dans la partie supérieure de son cours moyen sur environ 250 km, là où se forme une plaine alluviale relativement vaste de 8 à 25 km de large, de la ville de Pokrovsk (61°28'N, 129°09'E) à la confluence de l'Aldan (63°26'N, 129°27'E), en République Sakha. Prenant source dans les montagnes de Pré-Baïkalie, la Léna traverse la Sibérie orientale et septentrionale, caractérisée par un climat périglaciaire à pergélisol épais et continu (Gautier et Costard, 2000). Le fleuve est enchâssé dans une forêt alluviale dense, très peu défrichée,

sauf à la hauteur de la ville de Yakoutsk. Le fleuve Léna montre une très forte immodération de son régime, avec des très basses-eaux d'hiver et des crues de débâcle très puissantes en mai ou juin (Gautier et Costard, 2000 ; Costard *et al.*, 2014).

Le Rio Napo est un affluent de l'Amazone supérieure, prenant source dans les Andes et descendant vers le sud-est en direction de l'Amazone qu'il rejoint en aval d'Iquitos. Le tracé étudié couvre 600 km de la moyenne et basse vallée : du pied des Andes jusqu'à la confluence. Le bassin draine une surface de 100 500 km², essentiellement en zone équatoriale (entre 0°50'N et 3°31'S), ce qui lui confère un régime assez régulier et un écoulement spécifique moyen abondant de l'ordre de 60 à 80 l s⁻¹ km⁻². La rivière traverse des plaines relativement préservées des défrichements, hormis dans la basse vallée où des auréoles cultivées autour de villages jalonnent son cours. Aucun aménagement ne vient perturber son tracé (Garcia Govea, 2008).

À l'aval du Bec d'Allier, les îles de Loire constituent un élément majeur et structurant dans le paysage. En effet, les îles sont présentes du Bec d'Allier à Briare dans des secteurs de bande active large occupée par des chenaux multiples ; elles se développent également dans les parties étroitement corsetées par les levées (en aval de Briare) et même dans les rares méandres (secteur allant de Sully-sur-Loire à Châteauneuf-sur-Loire). La zone plus spécifiquement étudiée s'étend sur une centaine de kilomètres, de la confluence Loire - Allier (le « Bec d'Allier » 46°57'N ; 3°55'E) à Briare (47°37'N ; 2°44'E), là où les levées sont discontinues et relativement éloignées du chenal actif. Les seuils naturels auxquels les îles les plus anciennes sont souvent associées, sont à l'origine de l'emplacement des ponts et par là, de la fondation de nombreuses villes. Certaines îles ont connu un passé glorieux, Amboise, d'autres ont suivi un destin plus modeste, le Faubourg de la Charité-sur-Loire, pour ne citer que deux exemples.

2. Données et méthodes

L'approche se focalise sur les différents rythmes d'évolution des formes insulaires depuis l'échelle du tronçon géomorphologique homogène jusqu'à l'unité fluviale. À l'échelle moyenne, on cherche à caractériser le lit fluvial dominé par les îles en s'appuyant sur des données morphométriques, sé-

	Léna moyenne Sibérie Centrale	Rio Napo Amazonie centrale	Loire Moyenne Sud du Bassin Parisien
Largeur de la plaine (amont – aval) <i>Mean Floodplain Width (upstream – downstream)</i>	8 – 25 km	3 – 10 km	1,5 – 3,5
Style fluvial <i>Fluvial Pattern</i>	Anabranches à chenaux rectilignes <i>Anabranching, straight channels</i>	Anabranches à chenaux sinueux <i>Anabranching, sinuous channels</i>	Anabranches à chenaux rectilignes <i>Anabranching, straight channels</i>
Pente du cours d'eau (m m⁻¹) <i>River slope</i>	0,0001	0,0001 - 0,0003	0,0004 - 0,00048
Puissance spécifique (W m⁻²) pour le débit à pleins bords <i>Specific Stream Power for bank-full discharge</i>	2,5 – 3,2	7 – 8,5	11 – 15
Module– Mean discharge (m³ s⁻¹) Station et surface BV à la station <i>Gauging site - basin area</i>	7210 Tabaga (897 000 km ²) (Annuaire Hydrologiques)	6270 Bellavista (100 520 km ²) (Programme HyBam)	326 Gien (35 500 km ²) (BanqueHydro)
Mésoformes principales <i>Main fluvial landforms</i>	Chenaux secondaires, îles <i>Secondary channels, islands</i>	Chenaux secondaires sinueux, îles <i>Sinuous secondary channels, islands</i>	Chenaux secondaires, îles, francs-bords <i>Secondary channels, islands, lateral margins</i>
Type de sédiments de plaine <i>Floodplain sediment</i> Type de sédiments de chenal actif <i>Channel sediment</i>	Limons, argiles, dépôts organiques <i>Silt, clay, organic deposits</i> Sables <i>Sand</i>	Limons, argiles, dépôts organiques <i>Silt, clay, organic deposits</i> Sables et limons <i>Sand and silt</i>	Sables et limons <i>Sand and silt</i> Sables, graviers, galets <i>Sand, gravel and cobble</i>
Mobilité moyenne du chenal principal (% largeur du chenal) et période d'étude <i>Main channel mobility (% active channel) and study period</i>	0,05 - 0,1 1967 - 2010	1 - 4 1985 - 2005	0,1 – 1,8 1933 - 2008
Surface du lit occupée par les îles (%) <i>Bed area occupied by islands (%)</i>	20 - 25	15 (amont) – 38-50 (aval) <i>15 (upstr.) – 38-50 (downstr.)</i>	25
Îles : Migration moyenne (m an⁻¹) <i>Island mean migration (m year⁻¹)</i> Migration maximale (m an⁻¹) <i>Maximal migration (m year⁻¹)</i>	14 – 21 40 - 120	21 (amont) – 15 (aval) <i>21 (upstream) – 15 (downstream)</i> 57 (amont) – 30 (aval) <i>57 (upstream) – 30 (downstream)</i>	2 - 3 6
Densité des zones humides – Wetlands density Type de zones humides <i>Wetlands Type</i>	Elevée / <i>High</i> Lacs thermo-karstiques, bras morts <i>Thermo-karstic lakes, abandoned channels</i>	Elevée / <i>High</i> Bras morts <i>Abandoned channels</i>	Moyenne à faible / <i>Medium or little</i> Bras morts <i>Abandoned channels</i>
Paysage - Occupation du sol <i>Landscape / Land use</i>	Forêt alluviale – Prairies humides <i>Alluvial forest / wet grassland</i>	Forêt alluviale dense <i>Dense alluvial forest</i>	Forêt alluviale ; cultures intensives en arrière des levées <i>Alluvial forest / agriculture behind the dikes</i>
Aménagements fluviaux <i>Fluvial engineering works</i>	Aucun <i>None</i>	Aucun <i>None</i>	Levées en rive gauche <i>Left side dikes</i>
Type/sub-type de rivière en anabranches (d'après Nanson et Knighton, 1996) <i>Type / sub-type of anabranching river (From Nanson et Knighton, 1996)</i>	Type 2 « Sand dominated – island forming »	Type 1 « Cohesive sediment (anatomosing) » / Hyper Humid / Organic »	Type 6 « Gravel dominated / stable » »

Tableau 1. Principales caractéristiques des cours d'eau étudiés

dimentologiques et biogéographiques. Une analyse diachronique apporte la dimension dynamique au lit fluvial avec l'évolution et les rythmes de formation des îles (formes en plan). Enfin, l'approche à grande échelle s'intéresse aux processus hydro-sédimentaires qui régissent l'évolution des îles : rythmes de sédimentation et d'érosion (latéraux et verticaux), effets de divers événements hydrologiques sur les processus sédimentaires.

Les mêmes méthodes d'analyse spatiale et de caractérisation *in situ* des corridors fluviaux ont été élaborées et utilisées sur les trois hydrosystèmes, ce qui permet d'exploiter des paramètres physiques et des schémas d'évolution facilement comparables entre eux (Tableau 2). Les sources utilisées et les mesures de terrain sont évidemment adaptées en fonction

des contraintes du terrain et de la disponibilité des sources ; ce dernier élément étant étroitement lié au contexte historique du pays.

L'analyse de la dynamique des îles a été entreprise sur les trois cours d'eau à deux échelles temporelles (Tableau 2). Environ (selon les images ou les photographies) 150 îles ont été suivies sur la Léna, 420 sur le Rio Napo et 250 sur la Loire.

i) Une analyse diachronique pluri-décennale a été menée à partir de la comparaison des formes insulaires sur un corpus de photographies aériennes, d'images satellites, voire de cartes anciennes (Tableau 2). La position des têtes d'îles a été déterminée sur chaque image ou photographie. Le contour des îles et la ligne de berge des chenaux ont été digitalisés. Les

	Lena	Rio Napo	Loire
Analyse diachronique <i>Diachronic analysis</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 150 îles - <i>islands</i> • Photographies Corona - <i>Corona pictures</i> - 1967 & 1980 • Images Landsat (ETM & TM+) – <i>Landsat images</i> - 1992 & 2002 • Images SPOT – <i>SPOT images</i> - 2008 & 2010 	<ul style="list-style-type: none"> • 420 îles - <i>islands</i> • Images Landsat – <i>Landsat images</i> (ETM & TM+) 1987 à (to) 2005 	<ul style="list-style-type: none"> • 250 îles - <i>Islands</i> • Carte de Coumes – Coumes map (<i>circa</i> 1850, source : Dreal de Bassin Loire, <i>Regional Environment Agency</i>) • Carte du lit de la Loire (1933, Ville de Paris) – <i>Map of the Loire River Bed</i> (<i>Paris municipality, 1933</i>) • Orthophotos 1956 à (to) 2005, (source : Dreal de Bassin Loire, <i>Regional Environment Agency</i>) - • Profils transversaux – <i>Cross-sections</i> 1970 – 1995 (Agence de l'Eau Loire-Bretagne – <i>Water Agency Loire-Bretagne</i>)
Estimation des taux annuels de sédimentation / érosion <i>Estimation of annual sedimentation / erosion rates</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 2008 – 2012 • 5 îles / <i>5 islands</i> • Levés topographiques (station totale) et bathymétriques (échosondeur) – <i>Topographic and bathymetric surveys (total station and echosounding system)</i> • Pièges à sédiments (tapis) sur 2 ou 3 profils par île - <i>Sediment plastic mats on 2 or 3 cross-sections per island</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • 2006 – 2007 • 1 île / <i>1 island</i> • Levés topographiques (station totale et DGPS) et bathymétriques (ADCP) – <i>Topographic surveys (total station and DGPS) – Bathymetric surveys (ADCP)</i> ; 1 île / <i>1 island</i> • Pièges à sédiments (tapis) sur 2 profils transversaux – <i>Sediment plastic mats on 2 cross-sections</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • 2002 – 2008 • 5 îles / <i>5 islands</i> • Levés topographiques (station totale et DGPS) et bathymétriques (échosondeur) - <i>Topographic surveys (total station and DGPS) – Bathymetric surveys (echosounding system)</i> • Pièges à sédiments (tapis et tubes) sur un profil par île - <i>Sediment plastic mats and tubes on one cross-section per island</i> • LiDAR résolution de 15 cm – <i>15cm - resolution</i>

Tableau 2. Données et méthodes

valeurs entre deux documents ont été retenues si elles excèdent les marges d'erreur liées à la précision des images et aux erreurs de géoréférencement. Les valeurs moyennes présentées sur le Tableau 1 ont été calculées entre deux dates et sur les deux dates extrêmes pour lesquelles nous disposons des documents.

ii) Sur la Léna, ont été utilisées les photographies Corona : ces photographies étaient prises par des satellites espions par les États-Unis, des années 1960 aux années 1980 (elles ont été déclassifiées au début des années 2000). Des images Landsat et Spot ont été exploitées des années 1990 à aujourd'hui.

Sur la Loire, on dispose de documents plus anciens avec la Carte de Coumes, levée après la grande crue de 1846 (1/20 000), complétée en 1933 par une carte d'ingénieurs très précise (1/10 000) de la plaine de la Loire au centre de notre secteur d'étude, levée par la Ville de Paris qui cherchait alors à diversifier son approvisionnement en eau. Enfin, des profils topographiques transversaux très précis ont été levés par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne en 1970 et réactualisés 25 ans plus tard dans le cadre du Plan Loire Grandeur Nature. Le LiDAR, levé en 2002 et 2003 sur toute la plaine de la Loire à haute résolution spatiale et altimétrique (15 cm) appliqué aux îles, a permis de déterminer des volumes sédimentaires stockés sur ces formes depuis leur date de formation et d'établir des modèles de submersion des îles en fonction des débits.

Le Rio Napo a été étudié au moyen d'images Landsat, échelonnées du milieu des années 1980 au début des années 2000. On dispose donc

sur ce cours d'eau d'un recul temporel moins important.

iii) L'estimation des vitesses de recul et des dépôts sédimentaires à l'échelle annuelle a été réalisée sur les trois cours d'eau avec des moyens similaires. D'une part, des levés topographiques par station totale et/ou GPS différentiel ont permis de délimiter finement les contours des îles au moins une fois par an, après les crues. Sur le Rio Napo, où seulement deux missions de terrain ont pu être réalisées, les mesures intégraient les effets de plusieurs montées de débit. Dans le cas de la Loire, ces relevés ont été exécutés plus fréquemment, après chaque crue survenue entre 2002 et 2008. Dans le cas de la Léna, un seul pic de crue est enregistré chaque année ; les levés ont été effectués en été de 2008 à 2012.

Les dépôts ont été quantifiés au moyen de tapis à sédiments (« *Sediment plastic mats* » mis au point par Lambert et Walling, 1987) sur les trois cours d'eau. Ces tapis (30x30 cm) étaient installés en tête d'île et le long de un ou deux autres profils transversaux (milieu et queue d'île). Le nombre de tapis par profil varie de quatre à sept en cas de long profil.

L'ensemble des données est intégré dans un Système d'Information Géographique (ArcGis).

B. La dynamique pluri-décennale des formes en plan insulaires

1. Des îles mobiles dans un chenal « immobile »

Sur les trois cours d'eau étudiés, on observe une forte stabilité pluri-décennale des berges des che-

naux principaux. Le recul des berges est faible sur les trois cours d'eau étudiés (Tableau 1) : les valeurs les plus basses sont observées sur la Léna, où la migration moyenne du chenal principal représente en moyenne 0,05-0,1% de la largeur du chenal, avec localement des valeurs maximales de 0,45%. Sur la Loire, les érosions latérales annuelles sont très ponctuelles, les valeurs locales allant de 0,1% de la largeur du chenal à un maximum de 1,8%. Sur le Rio Napo, la bande active est un peu plus mobile (Tableau 1). Sur ce dernier, l'érosion latérale augmente légèrement le long des 600 km étudiés, de la sortie des Andes, jusqu'à la confluence avec l'Amazone. Le Rio Napo illustre le fait que les changements longitudinaux sont assurés par les îles qui prennent de plus en plus de place vers l'aval : de 0,5 km² par km linéaire en amont à 3,5 km² par km linéaire en aval (Figure 1). La part de la surface du lit occupée par les îles varie entre un cinquième et la moitié de la surface du lit mineur, cette valeur maximale est mesurée sur la partie aval du Rio Napo, juste en amont de sa confluence avec l'Amazone. On note en particulier sur ce cours d'eau, la forte croissance de la part des îles en aval immédiat d'un affluent très chargé en sédiments (le Rio Curaray, Figure 1). Sur la Loire, du fait des levées, on ne note pas de variation longitudinale notable : plus les levées sont éloignées du lit, plus la part occupée par les îles est forte. Ainsi, au Bec d'Allier, les îles représentent entre un quart et un

tiers de la surface du lit. La mobilité au sein du chenal est à rechercher du côté des îles. Ce sont ces dernières qui évoluent de deux façons : elles migrent, d'une part et leur morphologie évolue, d'autre part. Tout d'abord, les îles sont loin d'être des formes stables ; elles migrent en effet vers l'aval – majoritairement – par érosion de leur tête et accumulation sédimentaire dans leur partie aval (Figure 2 et Figure 3). La migration moyenne varie fortement (Tableau 1 et Figure 2), avec des vitesses de quelques mètres par an à plusieurs dizaines de mètres. Sur le Rio Napo et sur la Léna, la moitié des îles « file » vers l'aval à plus de 10 m par an, tandis que sur la Loire, la migration moyenne excède à peine 2 m par an (Figure 2).

Deux facteurs principaux contrôlent la mobilité des îles. Le premier est leur position dans le chenal. Les îles affectées par la mobilité la plus forte sont celles situées dans le chenal principal, même en position marginale, dans la mesure où il n'y a pas de banc ou une autre île située en amont immédiat. Ces îles « rapides » sont de forme allongée : avec un rapport longueur/largeur supérieur à 2,5 (Rio Napo), voire supérieur à 4 (Loire, Léna ; Tableau 3). La migration est liée au recul de la tête de l'île, tandis que la queue subit une accumulation sédimentaire, compensant l'érosion de la tête, voire dans la plupart des cas, permettant un agrandissement de l'île. Les îles migrant le plus lentement sont celles situées en

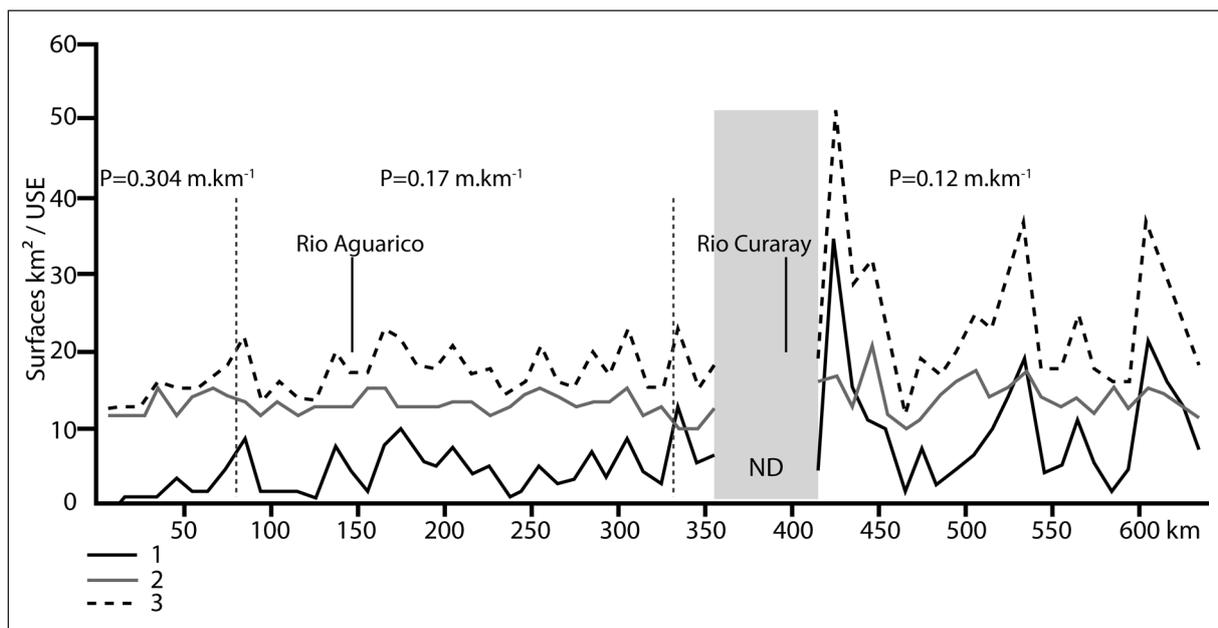


Figure 1. Variation longitudinale des surfaces du Rio Napo. 1 : îles ; 2 : bande active ; 3 lit mineur ; P : pente du chenal ; USE : unité de 10km de longueur

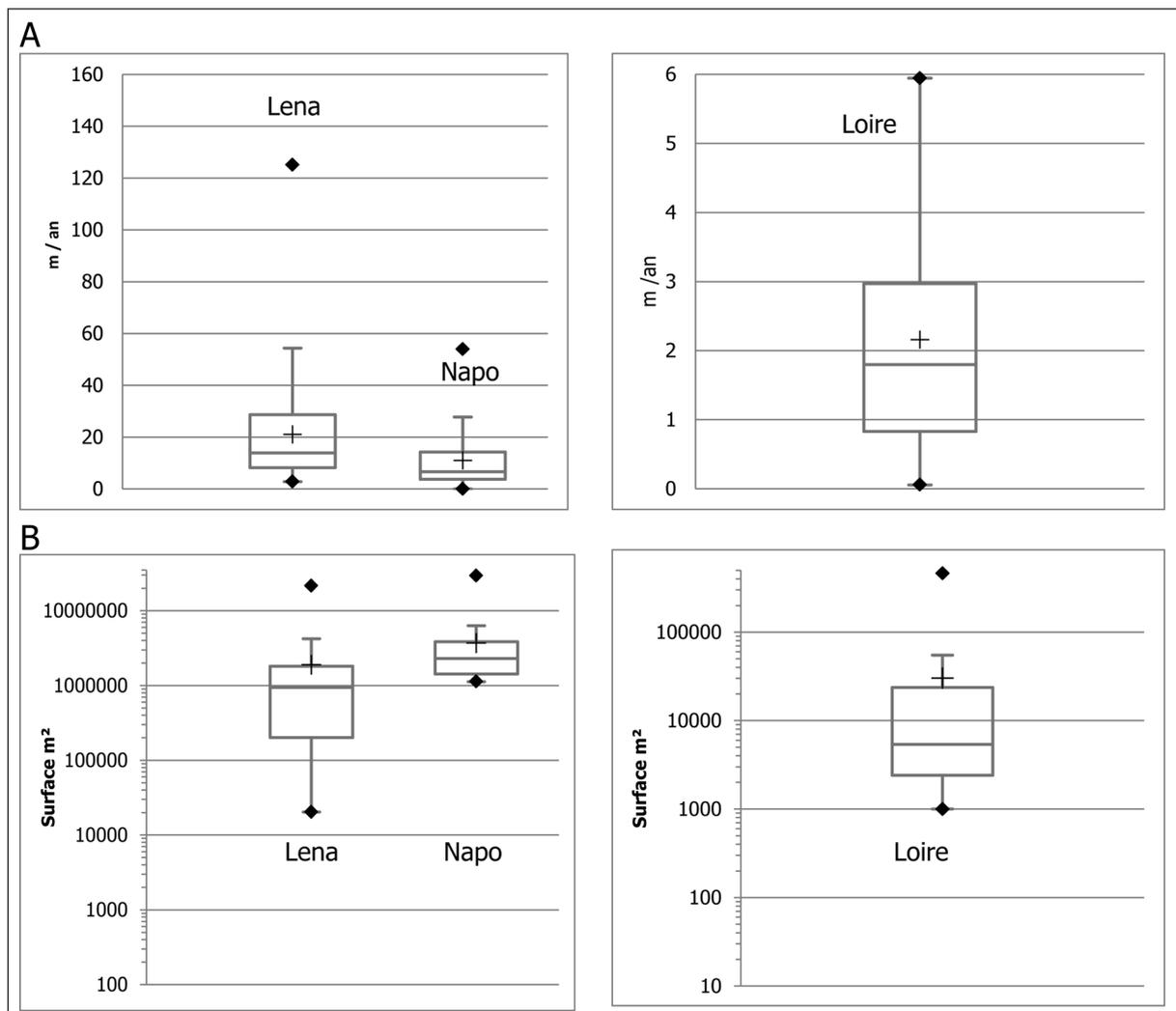


Figure 2. Caractéristiques des îles étudiées. A : taux d'érosion annuel des têtes d'îles (m) ; B : surface des îles (m²); Croix : moyenne ; boîtes : médiane, 1^{er} et 3^e quartile ; points : valeurs minimales et maximales

aval d'un banc ou d'une autre île comme l'illustre la Figure 3 présentant un secteur de la Léna moyenne.

Le second facteur est la pente. Les mobilités les plus fortes sont liées au profil en long plus redressé ; c'est le cas en particulier sur le Rio Napo, à l'amont où la pente est deux fois plus forte que dans les sections médianes et aval (Figure 1) (Garcia Govea, 2008).

Enfin, il existe un lien très net entre la vitesse de migration d'une île, son évolution morphologique et la mobilité du chenal. Nous venons de voir que les îles les plus rapides sont de forme allongée, avec un rapport Longueur/Largeur élevé ; leur tête s'érode tandis que leur partie aval progresse par formation d'un grand banc qui sera progressivement colonisé par la végétation. Les îles moins mobiles présentent

deux caractéristiques : elles sont généralement de plus grande taille (occupant entre le tiers et la moitié de la largeur du lit). Sur le Napo, les îles les moins mobiles sont d'une taille supérieure à 6 km² ; elles ont également une forme plus arrondie avec un rapport longueur/largeur plus faible (inférieur à 2,5 en général). Ce sont des îles qui croissent par dépôt sur l'un de leurs côtés (voire sur les deux).

L'accrétion latérale de l'île « pousse » le talweg et provoque ainsi la migration du chenal principal et l'érosion de sa berge. C'est particulièrement visible sur la Figure 3, où la berge droite de la Léna a reculé depuis 1967 sous l'effet de l'accrétion latérale d'une très grande île. Les îles sont donc un facteur de mobilité du chenal. Il apparaît en effet que la formation d'une île en position latérale entraîne le recul de la berge du chenal, qui était restée jusqu'alors stable.

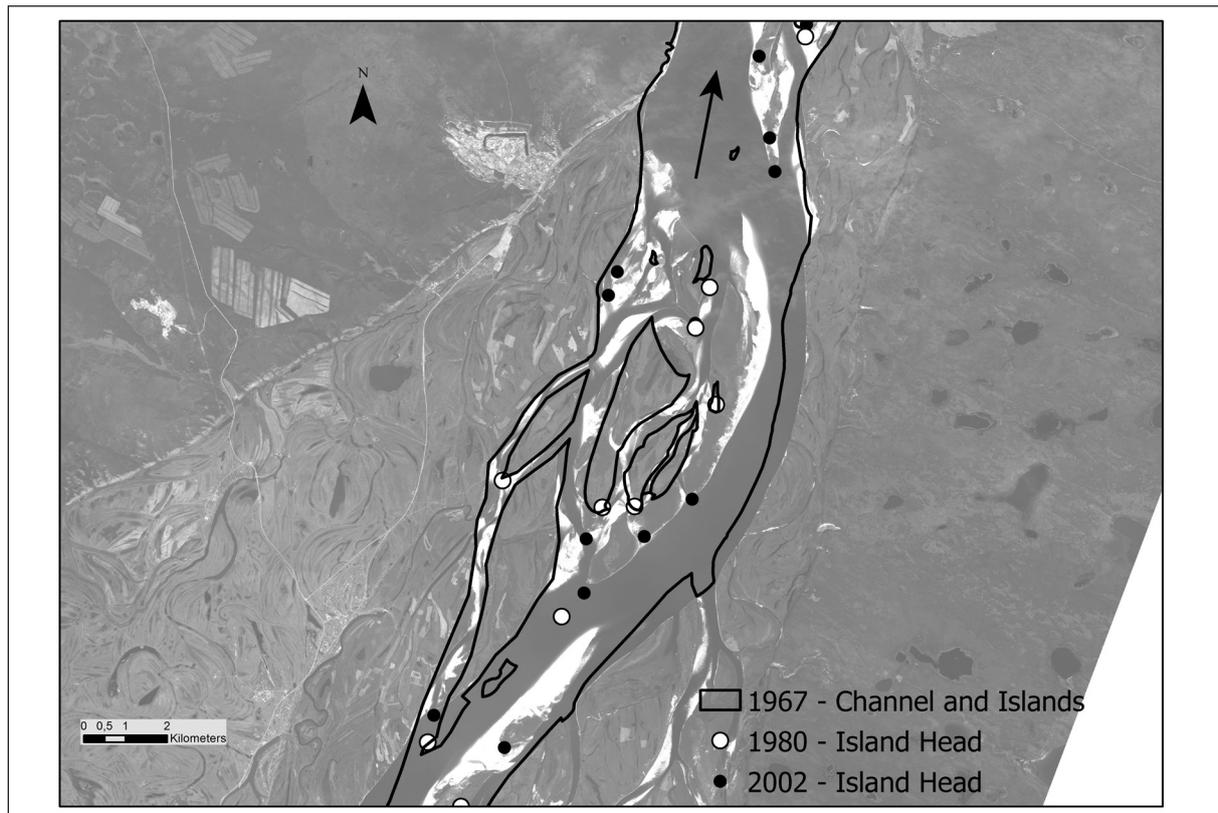


Figure 3. Evolution des îles d'un secteur de la Léna en Yakoutie centrale ; image de fond Spot (2008). © CNES – Distribution Spot Images SA, France

2. Scenarii d'évolution des îles

Nous venons de voir que les îles peuvent être distinguées par leur vitesse de migration. Ces vitesses sont liées aussi à des modèles d'évolution, synthétisés sur la Figure 4. Entre les trois hydrosystèmes, on retrouve les mêmes patrons, avec des variantes dans la vitesse d'évolution et dans la proportion respective de chaque type. Ainsi on distingue bien plusieurs types d'évolution (Figure 4 et Tableau 3).

Type I : les îlots ou jeunes îles. Il s'agit de la première phase rapide (quelques années) où un banc est colonisé par la végétation pionnière. Dans les trois cas étudiés, cette végétation est dominée par le genre Saule. Ces îles jeunes sont minoritaires (Tableau 3). Un seuil de taille a pu être déterminé : elles occupent moins de 10% de la largeur du lit et sont situées dans l'axe du chenal principal. Un seuil de taille a été déterminé sur les trois cours d'eau : leur surface est de moins de 5000 m² sur la Loire moyenne, moins de 200 000 m² sur la Léna moyenne et moins de 3 km² sur le Rio Napo (Figure 2). Certaines îles au-dessous de ce seuil peuvent disparaître totalement par érosion, mais on note sur

les trois cours d'eau, qu'une fois dépassé ce seuil, l'érosion de l'île ne sera plus que partielle (sur les pas de temps analysés). On note que ces îles éphémères sont moins nombreuses sur la Loire que sur les deux autres cours d'eau, où la mobilité est plus

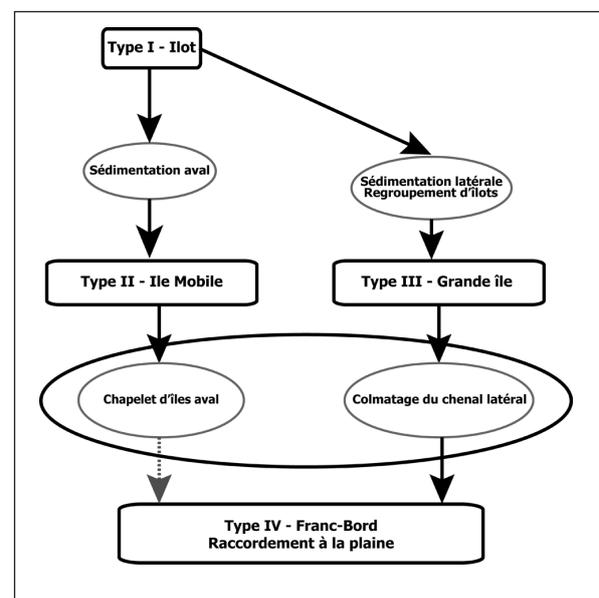


Figure 4. Schéma morphodynamique des îles fluviales

	Type I – Îlot - <i>Small island</i>	Type II – Île allongée mobile – <i>Elongated mobile island</i>	Type III – Grande île (arrondie) – <i>Large (round) Island</i>
Pourcentage Largeur de l'île / largeur du chenal - <i>% Island width / channel width</i>	< 10	10 < La < 25	30 < La < 60
Rapport Longueur / Largeur de l'île <i>Island Width / Length ratio</i>	Lo/La > 2,5	2,5 < Lo/La < 4	1,5 < Lo/La < 2,5
Pourcentage des différents types d'îles <i>Percentage of the different island types</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 15 – 19 • 5 • 11 	<ul style="list-style-type: none"> • 72 - 75 • 75 - 80 • 84 	<ul style="list-style-type: none"> • 5 • 15 - 20 • 5
Durée de vie (ans) <i>Life span (years)</i>	10	10 < DV < 40	DV > 40
Processus sédimentaire dominant <i>Main sedimentation process</i>	Accrétion verticale et progradation aval ; érosion possible <i>Vertical accretion and downstream progradation; possible erosion</i>	Accrétion verticale et progradation aval <i>Vertical accretion and downstream progradation</i>	Accrétion latérale ; colmatage des chenaux inter-îles <i>Lateral accretion ; inter-island channel in-fill</i>
Vitesse annuelle de migration (m) – <i>Annual migration rate (m)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 40 • 50 – 60 • 6 	<ul style="list-style-type: none"> • 22 – 30 • 20 - 40 3 	<ul style="list-style-type: none"> • 7 – 10 • 10 – 15 • 0 - 1

Tableau 3. Types d'îles et principaux paramètres.

	Crue - Flood		Dépôt (cm) – <i>Deposits (cm)</i>	
	Débit maximal - <i>Maximal discharge</i> $m^3 s^{-1}$	Durée (N jours) – <i>Duration (N days)</i>	Jeunes îles (<40 ans) – <i>Young islands (<40 years)</i>	Îles anciennes (> 40 ans) – <i>Old islands (>40 years)</i>
Décembre 2002	1600	6	3 – 8	0
Février 2003	2200	7	10 - 40	2 - 5
Décembre 2003	3350	8	40 - 60	2 – 5 (centre - <i>center</i>) 15 – 50 (berges - <i>banks</i>)
Janvier 2004	1710	18	20 - 50	2
Avril 2005	1780	9	5 - 10	1 - 2

Tableau 4. Dépôts sur les îles de Loire en fonction des crues.

grande d'un point de vue général. À partir d'un îlot « primitif », les îles qui ont « échappé » à l'érosion, connaissent un agrandissement qui peut se faire suivant deux modèles morpho-sédimentaires :

Type II : Les îles allongées les plus mobiles vont s'étendre vers l'aval : leur tête s'érode rapidement (on y mesure les taux maximaux d'érosion sur les trois rivières ou fleuves) ; la sédimentation se fait exclusivement à l'aval, en queue d'île. Leur évolution « finale » observée sur les images est la formation en aval de l'île de deux, voire trois autres îles, « sous le courant » de l'île originelle. Ce modèle d'évolution est proportionnellement important sur la Léna et sur le Rio Napo (Figure 3 et Tableau 3).

Type III : Les îles de grande taille migrent plus lentement. Elles sont de forme plus arrondie que les précédentes et occupent une grande largeur du chenal. Ces formes peuvent atteindre plusieurs kilomètres de long et occuper plus de la moitié du lit. Elles s'élargissent de deux façons : accrétion latérale et regroupement d'îlots (Figure 5). L'accrétion latérale représente une forte proportion sur la Loire et le Napo. Il se forme d'épais bourrelets de berge, l'intérieur de l'île se retrouvant donc légèrement ou fortement plus bas. Ces bourrelets sont

inexistants sur la Léna : au début de la débâcle, la glace remonte sur les bords des îles et des chenaux, rabotant comme un bulldozer les dépôts précédents (Costard *et al.*, 2014). Sur le Napo, certaines îles prennent une forme semi-sphérique et atteignent de très grandes tailles : elles s'accroissent du côté du chenal secondaire, repoussant celui-ci qui migre au détriment de la plaine ; l'accrétion latérale est telle que le chenal bordant l'île est repoussé dans la plaine (Figure 6). L'agrandissement d'une île par regroupement d'îlots est très courant sur la Léna où les îles conservent une forme plus allongée que sur les deux autres cours d'eau (Figure 3). La même dynamique est observée sur la Loire. Les petits chenaux qui séparent les îlots se comblerent et les îles deviennent jointives. Sur le Rio Napo, certaines îles ayant été formées par regroupement d'îlots peuvent aussi subir une forte sédimentation à leur tête.

Type IV : il s'agit d'îles qui vont se rattacher à la berge et donc, être intégrées à la plaine. On les appelle les francs-bords en Loire (Grivel et Gautier, 2012). Ces îles sont peu nombreuses actuellement sur la Léna (de l'ordre de 5 %), ou plus précisément nous pouvons dire que sur les 50 ans d'observation, nous avons identifié très peu de cas de rattachement à la plaine. Cependant, les images satellites

montrent dans la plaine un grand nombre de ce qui semble être d'anciennes îles, séparées entre elles par des bras plus ou moins comblés (Figure 3). La durée sur laquelle a porté notre analyse (50 ans) ne nous permet donc pas de déterminer le pas de temps sur lequel s'effectue le rattachement d'une île à la plaine. Sur le Rio Napo, les grandes îles semi-sphériques précédemment décrites vont voir leur chenal latéral s'atrophier et ainsi, vont être incorporées à la plaine (Figure 6) : ce mécanisme est plus rapide que sur la Léna dans la mesure où plusieurs cas d'intégration d'une grande île à la plaine ont été observés sur les images Landsat dont les plus anciennes datent du milieu des années 1980.

C. Dynamique sédimentaire des îles

1. La succession de deux mécanismes identifiés à l'échelle pluri-décennale

On dispose sur la Loire de profils transversaux levés sur les mêmes sites à 25 ans d'écart, à un moment où les îles ont connu une très forte croissance (Gautier et Grivel, 2006). La période allant des années 1970 à la fin des années 1990 montre en effet un taux de croissance des îles très fort : elles « gagnaient » chaque année 0,15 - 0,17 % de la surface du chenal. Ces profils permettent d'estimer finement les processus et vitesses d'accrétion (Figure 7). Les profils traversent deux îles anciennes, qui se sont

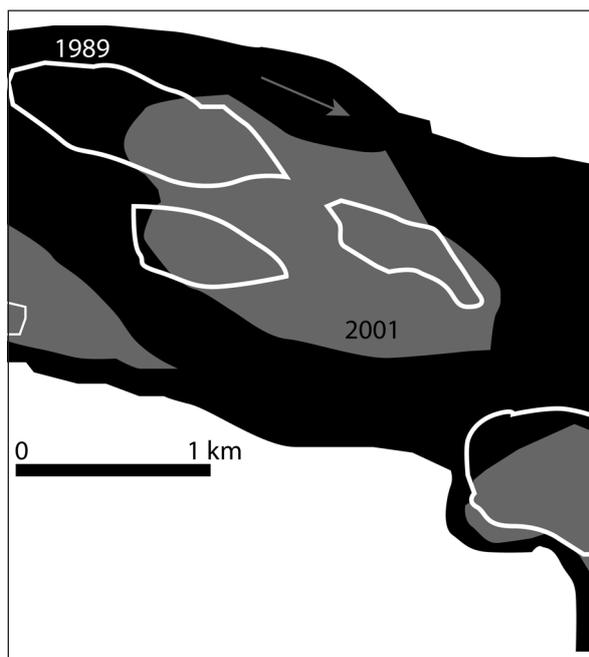


Figure 5. Evolution des grandes îles d'un secteur du Napo de 1989 à 2001 (moyenne vallée). En blanc : contour des îles en 1989 ; en gris : 2001

formées au début des années 1930 : le profil A159 avec la grande île de Marzy et le profil A162 avec la grande île des Joigneaux ; ce sont des îles de type III. Les deux autres profils montrent des îles plus jeunes, formées au début des années 1970 (A158 Bec d'Allier et A161 Bois des Chaumes), qui sont passées d'un Type I au début des années 1970 à un Type II au milieu des années 1990. L'île du profil amont (A158) s'est depuis rattachée à la berge droite.

De 1970 à 1995, les îles jeunes ont crû très rapidement avec des vitesses d'accrétion verticale de 8 à 20 cm par an. Elles sont étroites, majoritairement composées à la base de graviers et galets roulés, recouverts de sables transportés par suspension graduée. On trouve au sommet des éléments fins apportés par suspension uniforme. La colonisation très rapide de ces îles par les jeunes Saules et Peupliers a favorisé le dépôt des particules.

Les îles de Marzy et des Joigneaux montrent un taux de sédimentation annuel plus faible de l'ordre de 4 à 8 cm. Elles se sont formées toutes deux par regroupement de petites îles, à partir des années 1930 : on voit encore sur le profil des chenaux inter-îles, à sec hormis lors des crues. On y trouve une grande diversité de taille de sédiments, avec cependant, un affinement granulométrique du bas vers le haut. Cependant, ces îles se sont aussi agrandies grâce à la formation de bourrelets latéraux épais où le dépôt par suspension graduée a été très rapide (5-15 cm par an). Les bourrelets sont colonisés par

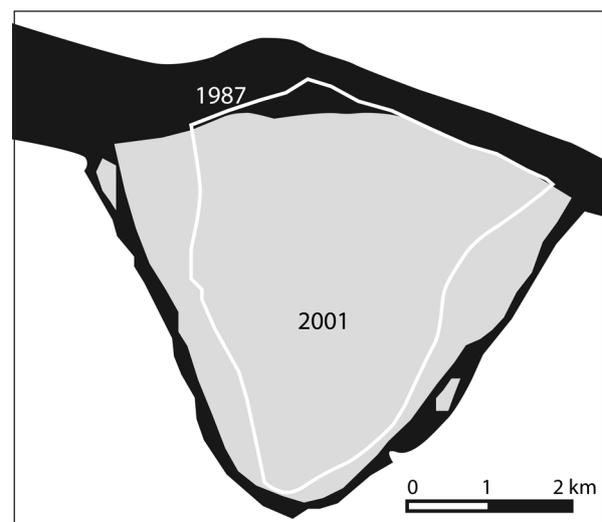


Figure 6. Evolution d'une grande île arrondie et migration du chenal latéral – Exemple du Rio Napo (basse vallée). En blanc : contour de l'île en 1987 ; en gris : île en 2001

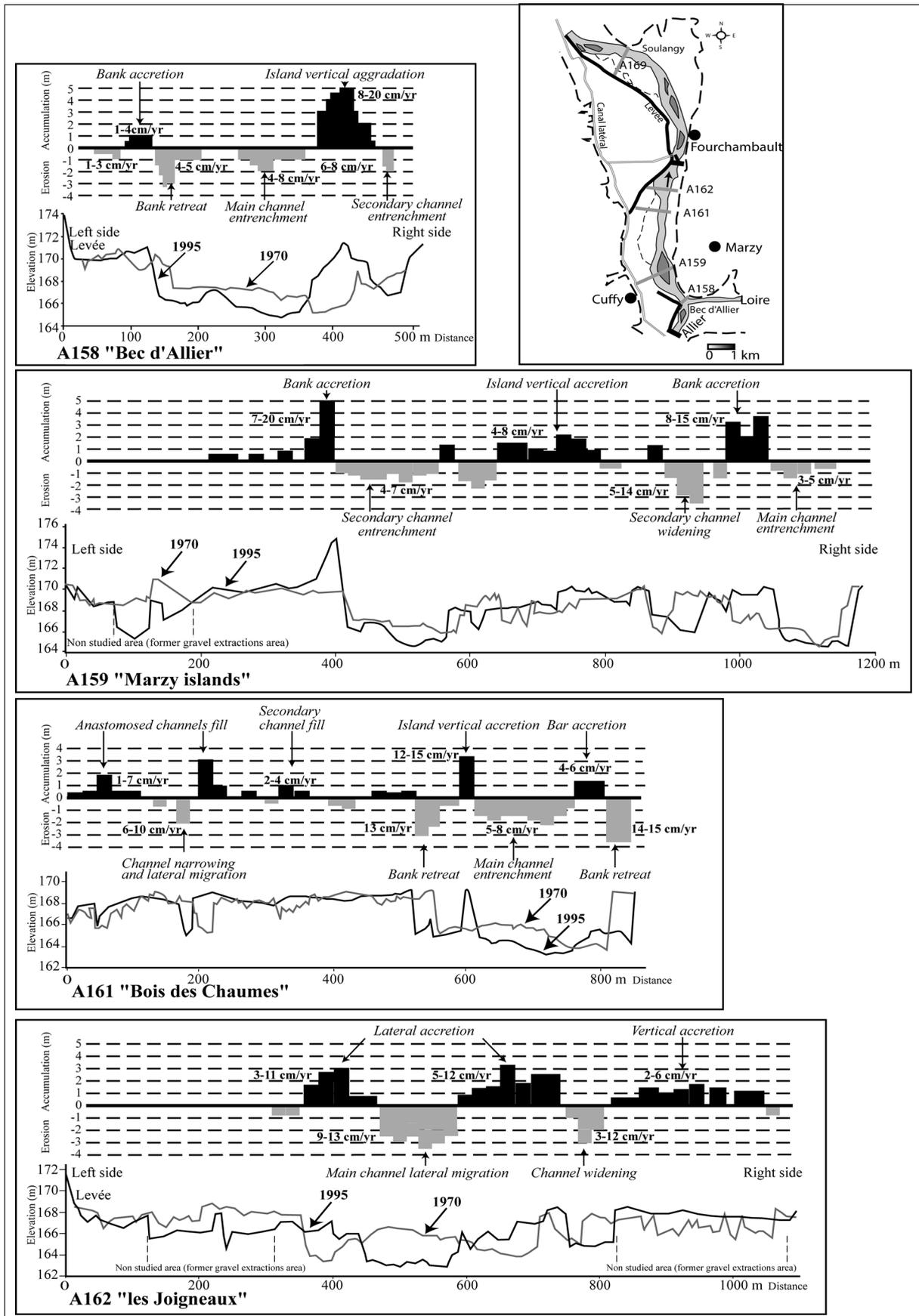


Figure 7. Evolution des profils transversaux de la plaine de Loire moyenne (Agence de l'Eau Loire-Bretagne et Plan Loire Grandeur Nature)

une Saulaie blanche, tandis que l'intérieur montre une marqueterie de forêt alluviale à bois tendre et à bois dur (Gautier *et al.*, 2008). On voit donc grâce à ces profils espacés de 25 ans deux mécanismes de construction qui se succèdent dans le temps : une accrétion verticale rapide, puis une accrétion essentiellement latérale ; l'intérieur de l'île évolue alors plus lentement avec des dépôts fins.

2. Évolution sur le pas de temps court – Le rôle des crues et de leur durée

La comparaison des dépôts à la suite de crues d'intensité et de durée diverses sur la Loire, démontre le fait que les îles les plus jeunes, qui sont aussi les plus basses, subissent une sédimentation plus forte (Tableau 4), étant submergées en moyenne 70 jours par an (Grivel et Gautier, 2012). Les jeunes Saules et Peupliers, d'une taille inférieure à 2 m, sont ceux qui piègent le plus efficacement les sédiments. L'accrétion maximale est mesurée au centre de l'îlot (ou de l'île). Les îles plus anciennes, qui sont plus hautes et moins fréquemment inondées (entre 5 et 12 jours par an ; Grivel et Gautier, 2012), vont fixer les sédiments efficacement sur les berges du fait de la densité de végétation, mais par contre, en leur centre, les dépôts sont nettement moins épais et de granulométrie beaucoup plus fine. Les berges, caractérisées par des dépôts plus frais sont colonisées par une végétation pionnière plus dense ; l'intérieur étant occupé par des arbres plus hauts et une strate arbustive et herbacée en sous-bois beaucoup moins dense. Ceci aboutit sur les îles, à une quasi-inversion de leur topographie : les bourrelets de berges sont parfois plus élevés que le centre de l'île (Figure 7). Le suivi des îles d'âges différents par des relevés topographiques et des pièges à sédiment montre donc que les facteurs principaux des taux de sédimentation sont de deux ordres : la durée de la submersion d'une part et la présence d'une végétation pionnière, d'autre part.

Sur la Léna, les dépôts sont très variables au sein de l'île et selon l'année. Les deux îles équipées d'une vingtaine de pièges à sédiment ont enregistré des dépôts de crue variant entre 1 mm et plus de 30 cm, sans compter les énormes dépôts en tête d'île mesurés après la très forte débâcle de mai 2010 (Costard *et al.*, 2014). Les plus fortes épaisseurs mesurées se sont produites certes lors de la crue la plus longue, en 2009 ; entre 20 et 25 jours de submersion sur les deux îles ont permis des dépôts de 5 à 30 cm

d'épaisseur de sables fins et limons. Cependant, la glace joue dans le cas de ce fleuve un rôle majeur. La glace fluviale, présente sur le fleuve plus de 240 jours en hiver, est soulevée lors de l'arrivée de l'onde de crue et poussée véritablement à l'intérieur des îles (comme en 2010) ou bien alors, cette glace fond progressivement (comme en 2009). Dans le premier cas, la glace va se conduire comme un véritable bulldozer sur les îles en raclant d'énormes quantités de sédiments, creusant donc localement ou accumulant en d'autres endroits ; dans le cas d'une fonte progressive de cette glace, sans embâcles, on observe des dépôts dont l'épaisseur est déterminée, comme sur la Loire, par la proximité à la berge et par la durée de la submersion.

II. DISCUSSION

Selon Huang et Nanson (2007), lorsque le cours d'eau dispose d'insuffisamment d'énergie (en raison d'une pente trop faible), le développement d'anabranches permet d'optimiser le transport de la charge solide. La multiplication des bras permet de diminuer en effet le rapport largeur/profondeur de chacun d'entre eux, permettant ainsi d'accroître vitesses et contraintes de cisaillement sans augmenter la pente (Nanson et Knighton, 1996), ce qui permettrait d'augmenter capacité de transport de l'ordre de 10 % (Huang et Nanson, 2007). Notant que la quasi-totalité des très grands cours d'eau (au débit dépassant $17\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$) développent systématiquement des chenaux multiples, Latrubesse (2008) en conclut que le développement d'îles représente donc la variable d'ajustement des méga-rivières. La proportion relative entre charge de fond et charge en suspension est cependant à l'origine d'un gradient au sein même des formes en anabranches. Les grands fleuves où la charge solide est quasi exclusivement transportée en suspension montrent des chenaux sinueux, encadrant de grandes îles, mais très peu de bancs mobiles (comme sur l'Amazone, Mertes *et al.*, 1996), alors que les cours d'eau où la charge de fond est proportionnellement plus abondante, stockent leur charge solide à la fois sous forme d'îles et de bancs mobiles (Latrubesse, 2008 ; Gautier et Costard, 2000 ; Sarma, 2005).

Les trois rivières ou fleuves étudiés ne répondent pas à l'ensemble des critères de définitions des systèmes en anabranches tels que définis par Nanson et Knighton (1996) ; on a cependant identifié un cer-

tain nombre d'invariants quant à leur dynamique. De plus, il est évident que certains types définis par les deux auteurs en 1996 reposaient alors sur très peu de cas d'étude. Les trois cours d'eau étudiés ici disposent d'une pente moyenne (Napo supérieur et Loire moyenne) ou faible (voire très faible sur la Léna et le Napo inférieur), ce qui leur confère une puissance spécifique faible (Tableau 1). On peut certes rapprocher facilement le Rio Napo du Type 1 « *Cohesive sediment, anastomosing* » et plus précisément du sous-type a « *Hyper-Humid, organic* ». La dynamique du Rio semble très proche de celle de son collecteur, le Rio Solimoes (ou Amazone supérieure) étudié par Mertes (1996). La dynamique de formation des îles jusqu'à leur incorporation dans la plaine semble en effet procéder des mêmes mécanismes et rythmes que ceux mesurés sur le Rio Solimoes (Garcia Govea, 2008). L'accrétion latérale de l'île entraîne une migration du chenal qui va se colmater et ainsi, l'île se raccorde à la plaine (Type III, Figure 6). La Léna se rapprocherait du Type 2 défini par Nanson et Knighton (1996) ; Ashworth et Lewin (2012) classent également la Léna dans les rivières anastomosées. La Léna diffère cependant un peu de ce Type 2 (Gautier et Costard, 2000). La présence du pergélisol épais et continu est un facteur essentiel de la dynamique fluviale, les berges étant affectées à la fois par l'érosion mécanique, mais aussi et surtout par l'érosion thermique : la pénétration de l'onde de dégel dépend de la température de l'eau et de la durée de la crue (Costard *et al.*, 2014). La Loire pose plus de difficultés dans la mesure où le style fluvial actuel est récent et semble encore en cours de réajustement. Il est évident que tout concourrait jusqu'à la fin du 19^e siècle à la disparition des îles fluviales : les enjeux économiques pesaient d'un tel poids sur le fleuve, et en particulier la navigation, que toute forme de boisement était réglementairement interdite.

La croissance de la végétation pionnière est fondamentale dans l'établissement des îles (on citera parmi les nombreuses publications sur ce thème : Amoros et Petts, 1993 ; Gurnell *et al.*, 2001 ; Gurnell, 2014 ; Gurnell et Petts, 2002 ; Naiman *et al.*, 2005). Deux facteurs principaux peuvent expliquer la croissance de la ripisylve dans nos cas d'étude : durée des basses-eaux et température. Les basses-eaux sont particulièrement longues sur la Loire et la Léna : de huit à neuf mois (septembre à mai) en Sibérie centrale et de cinq ou six mois sur la Loire. De plus sur la Léna, la crue de printemps est brève et

laisse en moyenne deux mois les bancs à nu, avant que les températures ne redeviennent négatives (en septembre). Cela suffit à la croissance des jeunes Saules. La Loire a traversé la série sèche des années 1990 qui a été très favorable au développement des îlots boisés (Gautier *et al.*, 2008). Nabet (2013) montre que la ripisylve d'une hauteur inférieure à 2 m est celle qui piège le mieux les sédiments dans le lit de la Loire. Sur ce fleuve, Rodrigues *et al.* (2007) ont également identifié différents types morphologiques de végétation, influant sur les dépôts sédimentaires et la micro-topographie des chenaux secondaires.

Dans le cas du Rio Napo, les débits varient relativement peu dans cette partie de son bassin au climat équatorial ; cependant, le bref abaissement du niveau d'eau (janvier à mars) permet un assèchement des bancs sur lesquels la colonisation végétale se fait très rapidement. La charge solide abondante, dont l'essentiel est transporté en suspension, y est piégée de façon efficace (Garcia Govea, 2008).

La colonisation d'un banc par la ripisylve semble donc être sur les trois cours d'eau étudiés le facteur fondamental du développement des îles. Osterkamp (1998) distingue parmi les facteurs de formation d'îles, l'avulsion primaire (ouverture d'un chenal dans la plaine) ou l'avulsion secondaire (réoccupation d'un ancien chenal). Dans les trois cas étudiés, ce mécanisme est peu présent. Les trois cours d'eau développent des îles essentiellement par dépôt à l'intérieur du chenal suivi par une colonisation végétale rapide. Des cas d'avulsion sont observés sur le Rio Napo, mais il s'agit généralement d'avulsions secondaires. Le cycle « formation d'une île / évolution / intégration à la plaine » sur ce cours d'eau amazonien est rapide : deux décennies suffisent. Le rattachement d'îles à la plaine participe largement à sa construction (Garcia Govea, 2008). Sur la Léna, des témoins d'avulsions sont observés dans la plaine : de très nombreux chenaux étroits « quittent » le chenal principal en se dirigeant vers l'intérieur de cette immense plaine, s'atrophiant souvent vers l'aval (Gautier et Costard, 2000). Ces chenaux sont liés très probablement à la formation d'embâcles de glace en début de crue ; cependant, sur l'ensemble du secteur étudié pendant une cinquantaine d'années à partir des images, un seul cas d'avulsion est repéré, et encore s'agit-il d'une avulsion secondaire. L'avulsion semble être beaucoup moins efficace sur ces cours d'eau en anabranches

à faible pente que sur les cours d'eau tressés développant des îles (Gurnell *et al.*, 2001). La puissance spécifique faible et la brièveté des crues (dans le cas de la Loire et de la Léna) sont sans doute des freins à la réalisation d'avulsions complètes et durables.

Le schéma de construction des îles est un facteur important de biodiversité. On observe sur les îles étroites et allongées un gradient de végétation longitudinal, allant d'essences à bois dur à l'amont vers des séquences pionnières à l'aval. Sur les îles de grande taille, plus anciennes, l'hétérogénéité du tapis végétal s'organise transversalement : regroupement d'îlots encore séparés par des dépressions humides, les bourrelets de berge à séquences pionnières en arrière desquels on trouve aussi des prairies humides, des pelouses sur sables secs sur les marges, des forêts mûres sur les îles les plus anciennes... (Gautier *et al.*, 2008). Actuellement, sur la Loire des enjeux majeurs en termes d'environnement sont associés à ces îles. Les îles constituent le cœur des réserves naturelles (Réserve ornithologique du Bec d'Allier, Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire, Réserve Naturelle Nationale de Saint-Mesmin...), du fait de la présence de forêts alluviales représentant des Habitats Prioritaires (Saulaie blanche arbustive, Peupleraies sèches à Peuplier noir, Forêts alluviales et riveraines de bois dur). Une multitude d'espèces animales également protégées y vit (Grivel, 2011). Le même constat peut être fait sur la Saône où les îles restent les derniers refuges de biodiversité au sein d'une plaine artificialisée (Astrade, 2012).

Les îles fluviales ont aussi une fonction sociale, qui a changé au cours du temps. La mobilité de ces îles est parfois attestée par des témoignages : ainsi la propriété des îles de Marzy sur la Loire était revendiquée par deux communes, l'île ayant migré de l'une à l'autre (Figure 7) ... L'enjeu était important : les pâtures insulaires étaient recherchées et les sols sableux légers étaient faciles à cultiver. Sur la Léna, les communautés riveraines, même étant peu nombreuses et disposant d'un espace que l'on peut qualifier d'infini, occupent les îles de façon temporaire, pour la production de fourrage et la présence de pâturages saisonniers pour les chevaux. Sur le Rio Napo, les communautés s'égrènent le long du fleuve. La proximité au fleuve, qui représente le seul axe de communication, est en effet essentielle.

Pour se protéger du risque d'inondation, les maisons insulaires du Rio Napo sont bâties sur pilotis. Selon Lelay et Comby (2013, p. 136), dans nos sociétés occidentales, les îles ont une charge affective positive, « ...appartenant à la famille des images de refuge dont la fermeture est protectrice ».

III. CONCLUSION

Le suivi diachronique des îles met en évidence la mobilité de ces formes qui évoluent selon des modèles et des rythmes précis. Loin d'être des formes « stables », elles évoluent certes lentement, mais selon des modèles relativement semblables dans le cas des trois hydrosystèmes analysés. La formation des îles permet au fleuve d'assurer le transfert de sa charge solide vers l'aval, selon un mode et un rythme différents de celui des bancs alluviaux. La charge solide est non seulement stockée de façon certes plus durable que sur un banc, mais elle est aussi réinjectée dans le chenal par érosion continue, la tête d'île étant la zone préférentielle d'érosion, bien plus que les berges de chenaux. Le taux d'érosion des têtes d'îles est très variable, les valeurs maximales sont mesurées sur la Léna moyenne, où l'érosion thermique assistée par l'érosion mécanique des berges gelées, est sans doute l'un des facteurs expliquant ces taux. Au sein d'un même cours d'eau, la migration varie également. Passé un seuil de taille, les îles évoluent suivant deux grands modèles. Les îles jeunes se construisent essentiellement par accrétion verticale ; les plus étroites migrent rapidement vers l'aval du fait de l'érosion de la tête et de la sédimentation sur la queue d'île. Les grandes îles, plus anciennes, se forment souvent par regroupement d'îlots et évoluent essentiellement par accrétion latérale du fait de la formation de bourrelets de berges ; leur migration est plus lente. Sur la Loire, les îles assurent le stockage de l'essentiel des sédiments, juste après les marges latérales du chenal, qui elles-mêmes sont construites par le rattachement de certaines îles (Grivel et Gautier, 2012). La plaine du Rio Napo se construit essentiellement par l'intégration d'îles (Garcia Govea, 2008). La construction des îles ne témoigne donc pas d'une perturbation du système fluvial, mais elle est bien un ajustement morphodynamique qui permet d'assurer des transferts de sédiments sur des pas de temps de plusieurs décennies.

REMERCIEMENTS

Les résultats présentés dans cet article sont issus de différents programmes de recherche. Sur le Rio Napo : Programme Hybam ; sur la Loire : Programme National de Recherche sur les Zones Humides, programme de collaboration scientifique avec la Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire et Zone Atelier Loire (CNRS InEE) ; sur la Léna, ANR Climaflu. Les données Spot ont été fournies par le programme Isis, CNES – Distribution Spot Images SA, France et les images Landsat par le GLCF.

Les auteurs remercient les deux relecteurs pour leurs remarques constructives ayant contribué à l'amélioration de l'article.

BIBLIOGRAPHIE

- Amoros, C. & Petts, G.E. (1993). Hydrosystèmes fluviaux. Masson (Coll. d'écologie), 300 p.
- Ashworth, P.J. & Lewin, J. (2012). How do big rivers come to be different? *Earth-Science Reviews*, 114/1-2, 84-107.
- Astrade, L. (1996). La Saône en crue : dynamique d'un hydro système anthropisé. Thèse de Géographie, Université Sorbonne-Paris 4, 254 p.
- Astrade, L. (2012). Les îles de la Saône, témoins des relations hommes/crués/paysages. *Paysages en mouvement. Les paysages du Mâconnais et du Val de Saône de la préhistoire à nos jours* : 39-43.
- Baubiniené, A., Satkunas, J. & Taminskas, J. (2015). Formation of fluvial islands and its determining factors, case study of the River Neris, the Baltic Sea basin. *Geomorphology*, 231, 342-352, doi:10.1016/j.geomorph.2014.12.025.
- Bomer, B. (1972). Les îles de la Loire, évolution ou stabilité ? *Etudes Ligériennes*, 11, 70-80.
- Costard, F., Gautier, E., Brunstein, D., Hammadi, J., Fedorov, A., Yang, D. & Dupeyrat, L. (2007). Impact of the global warming on the fluvial thermal erosion over the Lena River in Central Siberia. *Geophysical Research Letters*, 34, L14501, doi:10.1029/2007GL030212.
- Costard, F., Gautier, E., Fedorov, A., Konstantinov, P. & Dupeyrat, L. (2014). An assessment of the erosion potential of fluvial thermal process during ice breakups of the Lena River (Siberia). *Permafrost and Periglacial Processes*, 25, 162-171, doi : 10.1002/ppp.1812.
- Descroix, L. & Gautier, E. (2002). Water erosion in the French Southern Alps: climatic and human mechanisms. *Catena*, 50, 53-85.
- Garcia Govea, C. (2008). *Approche hydro-géomorphologique comparée de deux cours d'eau du bassin amazonien : le Rio Beni et le Rio Napo*. Thèse de Doctorat de Géographie, Université Paris 1, 261 p.
- Gautier, E. & Costard, F. (2000). Les systèmes fluviaux à chenaux anastomosés en milieu périglaciaire: la Léna et ses principaux affluents (Sibérie centrale). *Géographie Physique et Quaternaire*, 54/3, 327-342.
- Gautier, E., Burnouf, J., Carcaud, N., Chambaud, F. & Garcin M. (2008). Les interrelations entre les sociétés et le fleuve Loire depuis le Moyen Âge. In Trémolières M., Schnitzler A. (ed.), *Protéger, restaurer et gérer les zones alluviales, pourquoi et comment*, Tec Doc : 83-97.
- Gautier, E. & Grivel, S. (2006). Multi-scale analysis of island formation and development in the Middle Loire River, France. In J.S. Rowan, R.W. Duck, A. Werrity, *Sediment dynamics and the hydromorphology of fluvial systems, International Association of Hydrological Sciences*, 306, 179-187.
- Gautier, E., Fedorov, A., Costard, F. & Brunstein D. (2011). Impact du changement climatique sur la dynamique fluviale d'un grand fleuve sibérien, la Léna en Sibérie centrale. In Tabeaud M. & Kislov A. (eds), *le changement climatique – Europe, Asie septentrionale, Amérique du Nord, Quatrièmes Dialogues Européens d'Evian, Eurcasia*, 65-73.
- Grivel, S. (2008). *La Loire des îles, du Bec d'Allier à Gien : rythmes d'évolution et enjeux de gestion*. Thèse de doctorat de Géographie, Université Paris 8, 517 p.
- Grivel, S. (2011). Les îles de la Loire, ces lieux de biodiversité. *Etudes ligériennes*, 19-20, 18-28.
- Grivel, S. & Gautier, E. (2012). Mise en place des îles fluviales en Loire moyenne, du 19^e siècle à aujourd'hui. *Cybergeo: European Journal of Geography*, 615, URL: <http://cybergeo.revues.org/25451>; Doi: 10.4000/cybergeo.25451
- Gupta, A. & Liew, S.C. (2007). The Mekong from satellite imagery: a quick look at a large river. *Geomorphology*, 85, 259-274. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.03.036.
- Gurnell, A. (2014). Plants as river system engineers. *Earth Surf. Process. Landforms*, 39, 4-25.
- Gurnell, A.M. & Petts, G.E. (2002). Island-dominated landscapes of large floodplain rivers, a European perspective. *Freshwater Biology*, 47, 581-600.
- Gurnell, A.M., Petts, G.E., Hannah, D.M., Smith, B.P.G., Edwards, P.J., Kollmann, J., Ward, J.V. & Tockner, K. (2001). Riparian vegetation and island formation along the gravel-bed Tagliamento, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 31-62.
- Hohensinner, S., Habersack, H., Jungwirth, M. & Zauner, G. (2004). Reconstruction of the characteristics of a natural alluvial river-floodplain system and hydromorphological changes following human modifications: The Danube River (1812-1991). *River Research and Applications*, 20, 1, 25-41.
- Huang, H. Q. & Nanson, G. C. (2007). Why some alluvial

- rivers develop an anabranching pattern? *Water Resour. Res.*, 43, W07441, doi:10.1029/2006WR005223.
- Knighton, A.D. & Nanson G.C. (1993). Anastomosis and the continuum of channel pattern. *Earth Surf. Processes and Landforms*, 18, 613-625.
- Lahiri, S.K. & Sinha, R. (2014). Morphotectonic evolution of the Majuli island in Brahmaputra valley of Assam, India inferred from geomorphic and geophysical analysis. *Geomorphology*, 227, 101-111. Doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.032
- Lambert, C.P. & Walling, D.E. (1987). Floodplain sedimentation: a preliminary investigation of contemporary deposition within the lower reaches of the River Culm, Devon, UK. *Geografiska Annaler*, 69A (3/4), 393-404.
- Latrubesse, E.M. (2008). Patterns of anabranching channels: the ultimate end-member adjustments of mega-rivers. *Geomorphology*, 101, 130-145. Doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.035.
- Latrubesse, E.M., Amsler, M.L., de Morais, R.P. & Aquino, S. (2009). The geomorphologic response of a large pristine alluvial river to tremendous deforestation in the South American Tropics: the case of the Araguaia River. *Geomorphology*, 113, 239-252, Doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.03.014.
- Le Lay, Y.F. & Comby, E. (2012). Habiter les îles fluviales, géographie d'un eau-delà. *Géographie et Cultures*, 84, 121- 140.
- Liébault, F. & Piégay, H. (2002). Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers and streams of Southeastern France, *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 425-444.
- Marston, R.A., Girel, J., Pautou, G., Piégay, H., Bravard, J.P. & Arneson, C. (1995). Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France, *Geomorphology*, 13, 121-131.
- Mertes, L.A.K., Dunne, T. & Martinelli, L.A. (1996). Channel-floodplain geomorphology along the Solimoes-Amazon River, Brazil. *GSA Bulletin*, 108/9, 1089-1107.
- Nabet, F. (2013). *Étude du réajustement du lit actif en Loire moyenne, bilan géomorphologique et diagnostique du fonctionnement des chenaux secondaires en vue d'une gestion raisonnée*. Thèse de doctorat en géographie physique, Université Paris 1, 442 p.
- Naiman, R.J., Décamp, H. & McClain M.E. (2005). *Riparia, ecology, conservation and management of streamside communities*. Elsevier, Amsterdam, 430 p.
- Nanson, G.C. & Knighton A.D. (1996). Anabranching rivers: their cause, character and classification. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, 217-239.
- Nguyen, T.D., Belleudy, P., Peiry, J.L., Girel, J. & Sauvaget, P. (2002). Hydrodynamique et végétation d'une île de l'Isère. *La Houille Blanche*, 2, 24-31.
- Osterkamp, W.R. (1998). Processes of fluvial island formation, with examples from Plum Creek, Colorado and Snake River, Idaho. *Wetlands*, 18/4, 530-545.
- Rodriguez, S., Bréhéret, J.G., Macaire, J.J., Greulich, S. & Villar, M. (2007). In-channel woody vegetation controls on sedimentary processes and the sedimentary record within alluvial environments: a modern example of an anabranch of the Loire River, France. *Sedimentology*, 54, 223-242.
- Sarma, J.N. (2005). Fluvial process and morphology of the Brahmaputra River in Assam, India. *Geomorphology*, 70(3-4), 226-256.
- Sarma, J.N. & Phukan, M.K. (2004). Origin and some geomorphological changes of Majuli Island of the Brahmaputra River in Assam, India. *Geomorphology*, 60(1-2), 1-19.
- Smith, D.G. (1976). Effect of vegetation on lateral migration of anastomosing channels in a glacier meltwater river. *Geological Soc. Am. Bull.*, 87, 857-860.
- Smith, D.G. & Smith, N.D. (1980). Sedimentation, in anastomosed river systems: examples from alluvial valleys near Banff, Alberta. *Journal of Sedimentary Petrology*, 50(1), 157-164.
- Vautier, F. (2000). *Dynamique géomorphologique et végétalisation des cours d'eau endigués : l'exemple de l'Isère dans le Grésivaudan*. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fournier Grenoble, 376 p.
- Zanoni, L., Gurnell, A., Drake, N. & Surian, N. (2008). Island dynamics in a braided river from analysis of historical maps and photographs. *River Research and Application*, 24, 1141-1159. Doi :10.1002/rra.1086.

Coordonnées des auteurs :

Emmanuèle GAUTIER
Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne et
CNRS UMR 8591
Laboratoire de Géographie Physique
emmanuele.gautier@lgp.cnrs.fr

Stéphane GRIVEL
Ministère de l'Ecologie, du Développement
Durable et de l'Énergie
Direction de l'eau et de la biodiversité
stephane.grivel@developpement-durable.gouv.fr

Coral GARCIA GOVEA
Universidad Autonoma Metropolitana
(UAM-AZCAPOTZALCO), Mexico
coralgg2002@yahoo.fr

Thomas DÉPRET
Université de Lyon et CNRS UMR 5600
Environnement Ville Société, ENS de Lyon
Thomas.depret@ens-lyon.fr

Clément VIRMOUX
CNRS UMR 8591
Laboratoire de Géographie Physique
clement.virmoux@lgp.cnrs.fr

Daniel BRUNSTEIN
CNRS UMR 8591
Laboratoire de Géographie Physique
daniel.brunstein@lgp.cnrs.fr

