



HAL
open science

La Loire des îles, du Bec d'Allier à Gien : rythmes d'évolution et enjeux de gestion

Stéphane Grivel

► **To cite this version:**

Stéphane Grivel. La Loire des îles, du Bec d'Allier à Gien : rythmes d'évolution et enjeux de gestion. Géographie. Université Paris VIII Vincennes-Saint Denis, 2008. Français. NNT : . tel-00455981

HAL Id: tel-00455981

<https://theses.hal.science/tel-00455981v1>

Submitted on 11 Feb 2010

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.

**UNIVERSITE PARIS VIII – VINCENNES-SAINT-DENIS
ECOLE DOCTORALE EN SCIENCES SOCIALES ED 401**

THESE

**Pour obtenir le grade
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS VIII**

Discipline : Géographie et Aménagement

Présentée publiquement

Par

GRIVEL STEPHANE

Le 1^{er} décembre 2008

**LA LOIRE DES ILES, DU BEC D'ALLIER A GIEN : RYTHMES D'EVOLUTION ET
ENJEUX DE GESTION**



Directeurs de thèse : Emmanuèle COSTARD-GAUTIER et Eric GILLI

COMPOSITION DU JURY :

S. Braud	Ingénieur, DIREN-Centre	(Invité)
N. Carcaud	Professeur des Universités, Université d'Angers	(Rapporteur)
E. Costard-Gautier	Professeur des Universités, Université Paris VIII	(Directrice)
A. Da Lage	Maître de conférence, Université Paris VIII	(Examinateur)
E. Gilli	Professeur des Universités, Université Paris VIII	(Directeur)
C. Le Cœur	Professeur des Universités, Université Sorbonne Paris I	(Président)
H. Piégay	Directeur de Recherche, CNRS UMR 5600	(Rapporteur)

REMERCIEMENTS

A l'issue de ce travail de thèse, je tiens à remercier en premier lieu Mme Costard-Gautier, Professeur des Universités (Université Paris VIII) pour sa confiance, son exigence et par dessus tout sa sympathie. Ces années ont été extrêmement enrichissantes à ses côtés tant du point de vue scientifique, pédagogique qu'humain. C'est elle qui m'a fait passer du Grand-Morin à la majestueuse Loire !

Un grand merci à M. Gilli, Professeur des Universités (Université Paris VIII), de m'avoir accompagné dès le commencement.

Je tiens à remercier très vivement les membres du jury de cette thèse qui ont accepté d'évaluer mon travail : M. S. Braud, Ingénieur (DIREN-Centre) ; Mme N. Carcaud, Professeur des Universités (Université d'Angers) ; M. A. Da Lage, Maître de conférence (Université Paris VIII) ; M. C. Le Cœur, Professeur des Universités (Université Sorbonne Paris I) ; et M. H. Piégay, Directeur de Recherche (CNRS UMR 5600).

J'adresse ma plus sincère gratitude aux organismes qui ont constitué les cadres scientifiques, financiers et matériels de cette thèse :

- Ministère de la Recherche
- Ministère de l'Education Nationale
- Université Paris VIII et Ecole Doctorale ED 401
- LADYSS (Laboratoire Dynamiques Sociales et Recomposition des Espaces ; CNRS UMR 7533) et Mme F. Plet.
- Laboratoire de Géographie Physique à Meudon (CNRS et Université Paris 1, UMR 8591), sous la direction de M. C. Le Cœur.
- Equipe de la Zone Atelier Loire : Mme J. Burnouf (Pr. Paris 1), M. Garcin (BRGM) et Mme N. Carcaud.

Merci encore à M. C. Le Cœur, pour ses qualités humaines, pédagogiques et scientifiques uniques, pour sa confiance (petit clin d'œil au Viêt-Nam) et de me faire l'honneur de présider ce jury de thèse.

Merci à M. A Bué (M.C.) pour m'avoir guidé et aidé amicalement dans mon tout jeune parcours d'enseignant, à M. O. Archambeau, M.C. et Dir du Département de Géographie (Université Paris VIII) et les Expéditions Géographiques Françaises pour le développement de la créativité, à M. V. Godard (M.C.) pour ses conseils, son soutien et sa participation à l'analyse de données, et à tous mes collègues du département de Géographie.

Merci aux différents services techniques du LGP et à leurs représentants qui m'ont beaucoup apporté durant ces années aussi bien sur le terrain qu'au laboratoire : Ana Andrieu (I.R.), Daniel Brunstein (I.E.), Franck Goupille (T.), Delphine Grancher (A.I.) et Stéphane Kunesch (A.I.). J'adresse mes plus fidèles remerciements à tous les membres du LGP.

Merci mille fois à tous les doctorants et docteurs pour leur sympathie, conseils et aides respectives : Luc Barruel, Sonia Bensadoue, Cyril Castanet, Sylvestre Da Silva, Philippe Gajevski, Coral Garcia, Claire Lang, Lydie Martinhac, Damase Mouralis, Fouzi Nabet, Morganne Tatibouët, Saïda Teman.

Une thèse est l'occasion privilégiée de rencontrer des personnes exceptionnelles tant au niveau de leur compétence professionnelle que de leur qualité humaine. A ce titre, j'adresse mes plus gracieux remerciements et hommages aux personnes et organismes suivants qui ont tous apporté des éléments à ce volumineux manuscrit (par ordre alphabétique) :

Agence de l'eau Loire-Bretagne, Archives départementales de la Nièvre, Archives départementales du Cher, M Billacois, Bureau de recherche Géologique et Minière (B.R.G.M), M. F. Chambaud, les Conservatoires d'Espaces Naturels des régions Centre et Bourgogne, Division Départementale de l'Equipement (D.D.E) de Briare, DDE – Satur (M. Dubois, pilote émérite de la Loire), Direction Régionale de l'Environnement (DIREN) Bourgogne, DIREN Centre (Mme Borg, M. Braud, M. Miché, M.Reinbold, Mme Sacco, M. Tur), EDF de Belleville (M.Perrichon), Equipe Pluridisciplinaire du Plan Loire (M. J.N Gautier et M. L.Maman), Espaces Naturels de France (Programme Loire Nature), Fédération archéologique du Loiret, LPO Auvergne, M Gazovski (Etudes ligériennes), Mme Garniche (Musée de la Charité-sur-Loire), Mlle P. Heuze, Musée de la Marine de Loire (Châteauneuf-sur-Loire), Maison des Sciences de l'Homme – Paris-Nord (Mme Duval et son équipe), Pavillon du milieu de Loire (M. Guntz et son équipe), Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire (M. N. Pointecouteau et M. Y. Rivière), M. Villar (INRA)...

Je tiens à remercier les riverains de la Loire et les habitants de la plaine d'inondation qui m'ont ouvert leur porte, toujours montré leur sympathie et apporté une aide précieuse (comme accéder en tracteur à des zones isolées par l'inondation !). Merci aux mairies de la Chapelle-Montlinard, Couargues, Herry, Saint-Satur, La Charité-sur-Loire, Mesves-sur-Loire, Pouilly-sur-Loire, Tracy-sur-Loire de m'avoir apporté des archives essentielles. Un grand merci au « Bon accueil » qui n'a pas besoin de changer de nom.

Merci à tous mes amis, certains ont déjà été cité, à mes collègues de travail de l'Université Paris VIII et du Lycée Merkaz Hatorah, aux étudiants de géographie (ceux qui m'ont accompagné sur le terrain, ceux qui ont travaillé avec M. V. Godard pour l'analyse de données, et ceux qui ont suivi mes cours de Licence et de Master) et à mes élèves collégiens et lycéens.

Un merci spécial à mes éternels « potes géographes », Sébastien Vignola (Professeur d'Histoire -Géographie) et Emmanuel Frison (DDE-Rennes), qui ont eu le courage de m'accompagner sur le terrain et ont eu le plaisir de déguster avec moi, sur les bords de Loire, les merveilleux produits viticoles et fromagers de ma région d'étude. « On est géographe ou on ne l'est pas ! »...

Il m'est impossible d'oublier de remercier fidèlement ma famille proche, ma femme Nadia et mes enfants Lenny et Maily, qui m'ont tous soutenu et apporté réconfort dans ce parcours « féroce » de la thèse.

Sommaire

SOMMAIRE	5
RESUME	11
ABSTRACT	12
INTRODUCTION	13

Première partie : cadres et objets d'étude

Chapitre 1 - Le cadre d'étude	37
--------------------------------------------	-----------

A. Le cadre scientifique : de l'étude de l'hydrosystème fluvial aux systèmes anastomosés de la Loire moyenne **37** |

1). Les concepts fondamentaux	37
a). Des concepts fondamentaux adaptées à la Loire	37
b). Les avancées scientifiques	43
2). Les programmes de recherche : les fondements et les nouvelles voies scientifiques	45
a). Les premiers programmes	46
b). Les programmes en environnement	50
c). Les thèses en dynamique fluviale sur la Loire	54
3). La question du style fluvial en Loire moyenne	56
a). Géologie et différents styles fluviaux de la Loire	56
b). De l'anastomose aux systèmes en anabranches	60
c). La question des îles fluviales	67
d). Les autres unités fonctionnelles	75

B. Cadre géographique : La Loire des îles **79** |

1). La Loire moyenne : le cadre géographique de la Loire des îles	79
a). Contexte physique : du bassin versant à la Loire moyenne	79
2). Les Sites Ateliers de la Loire des îles	83
a). Du Bec d'Allier à Gien : les Sites Ateliers de la Loire des îles	83
b). Approche géographique du Site Atelier SA 3	85
c). Une zone d'expansion des crues - Morphologie du corridor fluvial	87
3). Les sites expérimentaux étudiés à grande échelle	92
a). Le Site de La Charité-sur-Loire	93
b). Le Site du Lac	97
c). Le Site des Barreaux	100
d). Le Site des Loges.....	100

Chapitre 2 - Le cadre méthodologique de la thèse	105
---------------------------------------------------------------	------------

A. Méthodologie à moyenne échelle : sources et méthodes de l'analyse spatiale **107** |

1). Les objectifs de l'approche moyenne : comprendre l'évolution de la Loire des îles et les mécanismes de formation des unités fonctionnelles depuis le 19^{ème} siècle	107
2). Protocole d'élaboration du S.I.G. : étapes 1 et 2	107
a). Contexte et principes du protocole SIG	108
b). Caractérisation des données vectorielles	112

3). Développement et applications du SIG	121
a). Caractérisation des formes fluviales et de leurs scénarii d'évolution	122
b). Développement de l'analyse spatiale	125
4). Le LIDAR	128
<u>B. Méthodologie à grande échelle : méthodes de caractérisation des vitesses annuelles et pluri-annuelles de sédimentation et d'érosion de la Loire des îles</u>	130
1). Les objectifs de la grande échelle	130
2). Les mesures topographiques	131
a). Les profils en travers	131
b). Caractérisation des vitesses de sédimentation et d'érosion des bras secondaires et des îles : le protocole de mesures <i>in situ</i>	138
c). Analyse spatiale par MNT	140
3). Les échantillonnages sédimentaires	142
<u>C. Méthodes d'analyse des facteurs hydro-climatiques et socio-économiques</u>	150
1). Suivi du fonctionnement hydrologique	150
a). Analyse des chroniques hydrologiques depuis le 19 ^{ème} siècle	150
b). Suivi du fonctionnement hydrologique du site atelier 3 de 2002 à 2005	150
2). L'évolution des usages	152
a). La recherche archivistique	152
b). Les enquêtes de terrain et les autres ressources documentaires	153
<u>D. Le cadre institutionnel et financier</u>	154
1). Les moyens et les outils	154
2). Des travaux d'équipes et des collaborations	155
Deuxième partie : Rythmes d'évolution de la Loire des îles à différentes échelles spatiales et temporelles	
Chapitre 3 - Les formes fluviales et leur évolution depuis 150 ans - Caractérisation, typologies et diachronie à échelle moyenne	
161	
<u>A. « L'état de référence géomorphologique » entre le Bec d'Allier et Gien : 2002</u>	161
1). Typologie morphologique des formes fluviales végétalisées : îles et francs-bords	161
a). Typologie géomorphologique des îles	161
b). Répartition spatiale des îles	181
c). Étude et analyse des paramètres des francs-bords	185
d). Typologie des annexes hydrauliques (zones humides)	186
2). Distribution sédimentaire et typologie de la sédimentation	192
a). Distribution spatiale des sédiments de surface	192
b). La diversité des sédiments en fonction du type d'île et des différences topographiques	194

3). Caractérisation de la végétation	198
a). Occupation du sol et distribution des cortèges floristiques	198
b). Relations formes fluviales, végétation et sédimentation	199
<u>B. Analyse du réajustement fluvial depuis 1850</u>	201
1). Evolution des formes fluviales au cours des 150 dernières années	201
a). Agencement du « triptyque » bande active-îles-francs-bords	201
b). Rythme d'évolution des formes fluviales du Site Atelier 3	205
2). Progression de la végétation sur 150 ans	215
a). Evolution de la végétation du Site Atelier 3	215
b). Dynamique de progression	220
<u>C. Les modèles d'évolution des formes fluviales</u>	223
1). Typologie d'évolution des îles	223
a). Les îles : les formes du réajustement fluvial	223
b). Modèles d'évolution des îles	228
2). Suivi de la bande active	240
a). Evolution du talweg	240
b). Evolution du profil en long	248
 Chapitre 4 – Evaluation des budgets sédimentaires des différentes unités fluviales à grande échelle	 255
<u>A. Etude pluri-décennale : de 1970 à aujourd'hui</u>	255
1). Evolution du lit de la Loire des îles entre 1970 et 1995 : apport des profils transversaux	255
2). Rythmes d'évolution des îles	261
a). Des îles anciennes au rythme modéré	261
b). Le rythme « effréné » des îles jeunes	263
3). La bande active : entre incision et comblement	264
a). La bande active principale : la confirmation d'une incision généralisée	264
b). La bande active secondaire : la nécessité d'un suivi plus précis	266
c). Synthèse de cette première phase d'analyse	267
<u>B. Suivi des conditions sédimentaires entre la Charité-sur-Loire et Tracy- sur-Loire (Site Atelier 3)</u>	268
1). Bilan sédimentaire à l'échelle spatio-temporelle moyenne	269
a). Sectorisation et quantification de l'érosion et de la sédimentation	269
2). Budget sédimentaire entre la Charité-sur-Loire et Tracy-sur-Loire	276
a). Les îles : des réservoirs de sédiments	276
b). Les francs-bords : les réservoirs	279
c). Les bras secondaires : les zones de transit sédimentaire	281
d). Synthèse du piégeage sédimentaire	286

Chapitre 5 - Le rôle des événements hydrologiques dans les processus d'érosion – sédimentation – analyse à grande échelle .. 289

A. Suivi des rythmes de sédimentation en fonction de différentes conditions hydrologiques : 2002 – 2005	289
1). Différentes conditions hydrologiques et rappel de la méthodologie	289
a). Des évènements hydrologiques diversifiés	289
b). Rappel de la méthodologie de suivi	291
2). Contexte de la crue de décembre 2003	293
a). Les caractéristiques hydrologiques de la crue de décembre 2003	294
b). Fonctionnement hydrologique de la plaine d'inondation	296
3). Analyse des flux en suspension	300
B. Variabilité inter-annuelle des rythmes de sédimentation des îles entre 2002 et 2005	304
1). Le fonctionnement hydro-sédimentaire des îles	304
2). Le piégeage par les îles	315
a). La rétention insulaire	315
b). L'érosion des îles	321
c). La diversité des dépôts inter et intra-formes	323
C. La variabilité spatio-temporelle des processus sédimentaires dans les bras secondaires entre 2002 et 2005	329
1). Bilan morphologique des bras secondaires depuis 2002	329
a). Evolution en plan des bras secondaires étudiés	329
b). Morphologie des bras secondaires par l'approche 3D	337
2). Evaluation des rythmes de sédimentation et d'érosion dans les bras secondaires	343
a). Une variété de fonctionnements hydrologiques	343
b). Des bilans sédimentaires contrastés	347
3). Le fonctionnement hydro-sédimentaire des bras secondaires	358
a). Les modelés sédimentaires post-submersion	358
b). Un processus sédimentaire varié et complexe suivant les régimes hydrologiques	362

Troisième partie : Les facteurs environnementaux et les perspectives de recherche

Chapitre 6 - Plus de deux siècles de changements environnementaux

373

A. Rôle et abandon de la navigation depuis le 18^{ème} siècle	373
1). La navigation en Loire moyenne : un entretien permanent	373
a). La navigation en Loire moyenne	373
b). Historique de l'entretien du lit de la Loire	377
2). Impact actuels des aménagements et des ouvrages de navigation	388
a). Exemple d'un site aménagé pour la navigation : la Charité-sur-Loire	388
b). Rythmes d'évolution des formes en contexte de la Loire navigable	392

<u>B. Rôle et déclin des activités agro-pastorales</u>	
<u>depuis la fin du 19^{ème} siècle</u>	398
1). Historique des activités socio-économiques dans le lit	398
a). Typologie des activités agro-pastorales dans le lit de la Loire	398
b). Fonction socio-économique des îles	401
2). Rôle des communautés riveraines	404
a). Evolution des pratiques agro-pastorales dans le Val de Loire	404
b). Depuis 1996, le retour d'un pastoralisme peu rentable	405
c). Rapport Loire - Sociétés riveraines	406
<u>C. Les changements contemporains : les grandes modifications du 20^{ème} siècle. Du statut de délaissé à celui de convoité</u>	407
1). La place de l'industrie de granulat en Loire moyenne	407
a). Les extractions massives dans le lit mineur	407
b). Impacts en Loire moyenne	408
2). La Loire : un espace convoité et les perturbations actuelles	410
a). Les grands barrages et les centrales nucléaires	410
b). La sollicitation de la nappe alluviale	413
3). L'entretien du lit aujourd'hui : les nouvelles relations avec les formes fluviales	416
a). La gestion des hydrosystèmes fluviaux français	416
b). L'entretien des formes fluviales	417
<u>D. Analyse des chroniques hydrologiques depuis le 19^{ème} siècle</u>	421
1). Evolution des données depuis le Moyen-Age	421
2). L'assouplissement hydrologique depuis la fin du 19^{ème} siècle	424
Chapitre 7 - Nouvelles gestions du lit et perspectives scientifiques	431
<u>A. Perspectives de gestion en Loire moyenne</u>	431
1). Les nouvelles relations avec les formes fluviales	431
a). L'expertise géomorphologique	431
b). L'entretien du lit aujourd'hui	435
2). Maintien de la collaboration entre scientifiques et gestionnaires	441
a). Développement du SIG comme outil de gestion multi-thématique	442
b). Pour une gestion réfléchie	443
<u>B. Perspectives de recherche fondamentale</u>	445
1). Suivi hydro-dynamique des formes fluviales de la Loire moyenne	445
2). La question des îles dans les systèmes anastomosés	449
Conclusion générale	459

Bibliographie	474
Liste des figures	491
Liste des tableaux	499
Liste des photographies	501
Annexes	505

La thèse a bénéficié d'un financement du Ministère de la Recherche (Allocation de recherche 2001-2004) et du Ministère de l'Education Nationale (contrat d'ATER 2004-2006 Université Paris VIII).

La Zone Atelier du Bassin de la Loire (CNRS, département Environnement et Développement Durable), le programme « Fiches hydrauliques » (CNRS) et des contrats de collaboration scientifique, dans le cadre du Plan de Gestion de la Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire, ont contribué financièrement à cette thèse.

Résumé

La Loire des îles, du Bec d'Allier à Gien : rythme d'évolution et enjeux de gestion

La Loire est un des principaux hydrosystèmes fluviaux français. Les îles font partie intégrante du paysage fluvial et tout particulièrement du corridor anastomosé de la Loire moyenne, d'où l'appellation de la Loire des îles. La thèse s'intéresse au fonctionnement méconnu de ce système fluvial. Les îles de la Loire sont à la fois des traceurs morphologiques du réajustement fluvial et des témoins des usages et pratiques par les sociétés du fleuve. L'approche morphologique se consacre ainsi à l'évolution du fleuve depuis le 19^{ème} siècle à travers différentes échelles d'analyse spatiale et temporelle. Sous un Système d'Information Géographique (SIG), il a été possible de suivre l'évolution du lit fluvial depuis 1850 et d'analyser en détail les mécanismes et les rythmes de formation des îles. Les îles ne sont pas des formes entièrement stabilisées et peuvent être considérées comme des formes fluviales de réajustement aux perturbations environnementales (facteur déclenchant : arrêt de la navigation ; facteurs aggravants : absence de grande crue, incision du lit, déclin de l'agriculture, extractions de granulats). Le paysage de la Loire des îles est encore en transition et annonce la tendance à une chenalisation unique dominée par la forêt alluviale. Cette approche à échelle moyenne est complétée par une approche plus fine focalisée sur l'évolution saisonnière et inter-annuelle des îles et des bras secondaires. Des Modèles Numériques de Terrain (MNT) et des profils en travers comparatifs intégrés au SIG permettent alors de quantifier précisément les processus d'érosion et de sédimentation en fonction de l'année hydrologique. Les îles sont les sites privilégiés du piégeage sédimentaire et accentuent le déficit sédimentaire enregistré depuis le milieu du 20^{ème} siècle. Les bras secondaires présentent de grands contrastes entre eux et permettent encore le transit sédimentaire. Cependant, la végétalisation de certains bras s'accélère et compromet leur pérennité. Les budgets sédimentaires des unités fluviales ont donc été établis à différents pas de temps. Cette thèse apporte au final des éléments indispensables à une gestion du fleuve.

Mots-clés : Loire, géomorphologie fluviale, systèmes anastomosés, îles, bras secondaires, SIG, bilan sédimentaire

Abstract

The islands of the Loire River from Bec d'Allier to Gien : rhythms of evolution and management issues

The Loire is one of the main fluvial systems in France. The islands are an integral part of the landscape, particularly the anastomosing fluvial pattern of the Middle Loire, hence the name “Loire islands”. This thesis focuses on the functioning of this unknown river. The islands of the Loire river result from morphological fluvial readjustment as well as customs and practices used by inhabitants of the area. The morphological approach concentrates on the evolution of the river since the 19th century, through different spatial and temporal scales. Under a Geographic Information System (GIS), it was possible to monitor the riverbed since 1850 and to analyze in detail mechanisms and rhythms of the river formation. The islands are not stabilized, therefore they can be regarded as forms of river adjustment caused by environmental perturbations (initiating factors: the discontinuation of navigation; aggravating factors: absence of large flood, incision of the riverbed, decline in agriculture, extraction of sediment). The landscape of the Loire Islands is still in transition and is indicating the trend towards the river channelization, dominated by alluvial forests. The fine scale analysis is based on studies on seasonal and inter-annual evolution of islands, as well as secondary channels. Digital Elevation Models (DEM), longitudinal profiles and topographic cross-sections integrated GIS help to quantify precisely erosion and sedimentation, according to the hydrological year. The islands are sites of sediment trapping and they emphasize the sediment deficit recorded since the middle of the 20th century. The situation of secondary channels is contrasted, but the excessive growth of vegetation in some channels triggers their perennial functioning.

The results of the thesis brings tools to the Loire river management.

Keywords: Loire river, fluvial geomorphology, anastomosing systems, islands, secondary channels, GIS, sediment budget.

INTRODUCTION

Introduction

« Les îles de la Loire : évolution ou stabilité ? ». C'est avec cette question que B. Bomer débutait son article dans les *Etudes Ligériennes* en 1972. 35 ans après cet écrit scientifique sur les formes insulaires du fleuve royal, la question peut toujours se poser. Les îles font partie intégrante du paysage fluvial et tout particulièrement du corridor anastomosé de la Loire moyenne, d'où l'appellation de la Loire des îles. Les cours d'eau anastomosés ont fait l'objet de nombreuses études à travers le monde et nous disposons d'une classification aisée et de paramètres d'interprétation pertinents (Nanson et Knighton, 1996). Cette classification parle d'abord de systèmes en anabranches et réserve le terme d'anastomose aux chenaux secondaires. Les îles ne sont pas au centre de ces recherches et de nombreuses interrogations persistent comme celles que posaient B. Bomer (1972) sur la Loire moyenne. Les îles de la Loire suscitent donc toujours autant de questions sur leur fonctionnement, leur évolution, leur place dans l'hydrosystème et leur rôle dans les transferts sédimentaires. Il s'agit de s'intéresser au fonctionnement méconnu des systèmes anastomosés français (Figure 1). Nous concentrons donc nos recherches sur ce type de système fluvial en prenant comme parti pris que ces îles de la Loire nous semblent être à la fois des traceurs morphologiques du réajustement fluvial et des témoins des usages et pratiques du fleuve par les sociétés.

Il convient de souligner d'abord que ces 150 dernières années correspondent à de lourdes modifications environnementales des cours d'eau européens. La navigation commerciale, la révolution industrielle, les guerres mondiales, la déprise agricole, les progrès socio-économiques d'après guerre se sont succédé au cours de ce laps de temps. Chenalisation, déficit sédimentaire, incision du lit, végétalisation, pollution des eaux sont les maux chroniques de ce siècle et demi écoulé. Ils constituent les réponses des rivières et des fleuves à des perturbations croissantes et qui se sont succédé sur un pas de temps court. Les références bibliographiques abondent et étoffent continuellement la question de l'impact des aménagements sur les cours d'eau, l'évolution morphologique des lits fluviaux

et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Des rivières alpines (Gautier, 1992 ; Piegay, 1995 ; Peiry, 1997 ; Vautier, 2000 ; Dufour, 2005) aux grands hydrosystèmes fluviaux européens (Steiger et Gurnell, 2003), américains (Hupp et Morris, 1990 ; Osterkamp, 1998 ; Kesel, 2003), africains (Abam, 1997 ; Wolski et Savenije, 2006), ou encore asiatiques (Gupta et *al.*, 2002 ; Sarma, 2005), la végétalisation des lits fluviaux et les phénomènes d'incision sont actuellement de véritables problèmes de gestion et de recherche en géomorphologie fluviale.

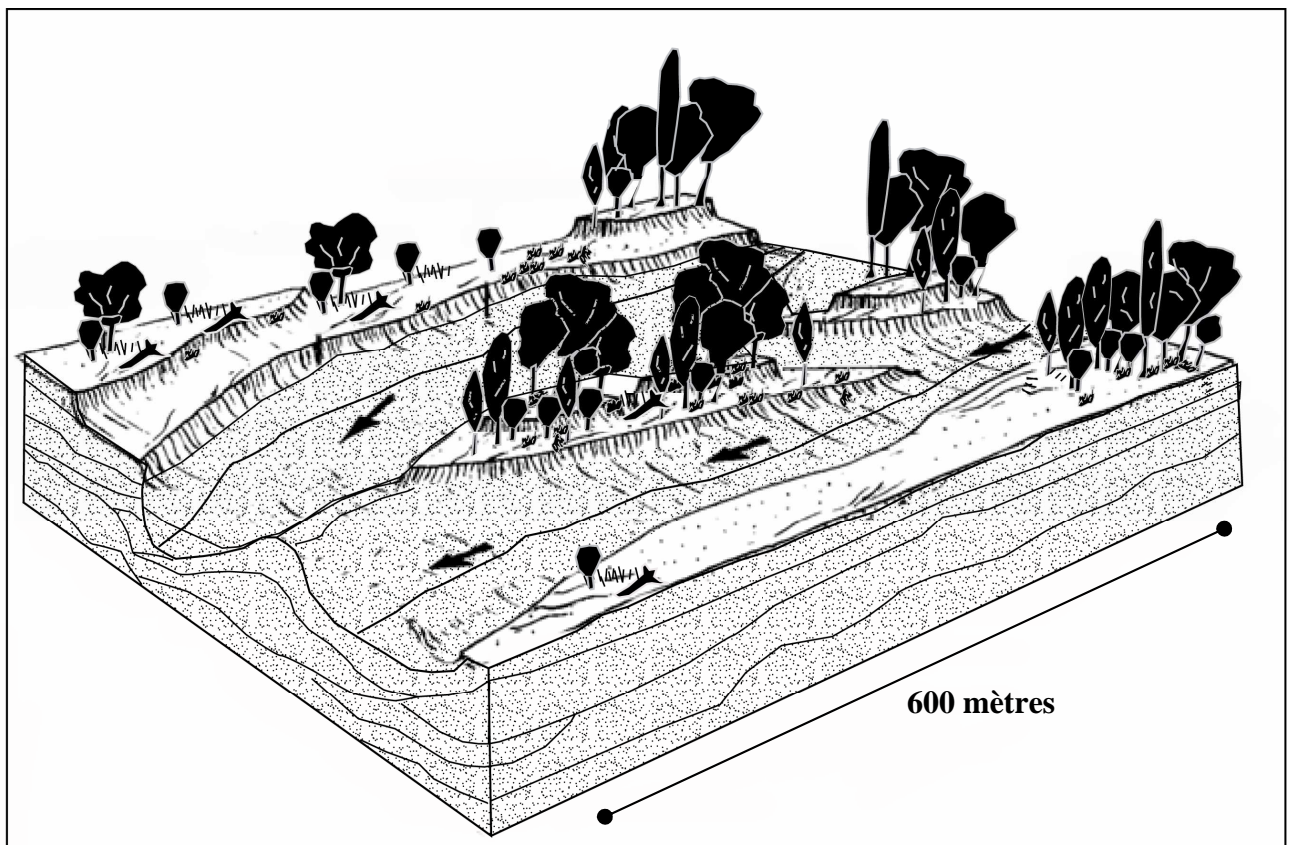


Figure 1 – Le système anastomosé de la Loire des îles.

Ce système se caractérise par des îles végétalisées et un réseau de bras secondaires. Comment un tel système fonctionne-t-il et se décline-t-il sous nos latitudes tempérées ?

Pourquoi la Loire comme exemple français des systèmes fluviaux en anabranches ?

La Loire présente autant d'intérêt pour le chercheur que pour les gestionnaires chargés de mettre en place les programmes de gestion tous révélateurs des enjeux actuels du fleuve. En termes d'hydrosystème fluvial perturbé, la Loire est malheureusement bien classée, puisque incision, végétalisation et endiguement traduisent des

dysfonctionnements majeurs. Les multiples enjeux actuels de la Loire font aussi de cet hydrosystème un exemple de développement durable au regard des revendications et des actions engagées dans son bassin versant. Dans un premier temps, nous nous intéressons aux formes fluviales du lit de la Loire et plus particulièrement les îles fluviales, objets géomorphologiques rarement étudiés. Dans un second temps, nous nous consacrons aux rythmes de réajustement du fleuve et à l'analyse des conditions hydro-sédimentaires qui régissent la dynamique fluviale de tel système fluvial. Dans un dernier temps, la confrontation des perturbations hydro-sédimentaires est mise en regard de l'évolution socio-économique du fleuve et des mutations des sociétés riveraines, par le biais de l'analyse de leur occupation de l'espace fluvial et utilisation du cours d'eau.

Cependant, avant de traiter des problématiques sous-jacentes à notre hypothèse de départ (que les îles sont des indices géomorphologiques du réajustement fluvial de la Loire), il est nécessaire de dresser les grands enjeux actuels du fleuve. Nous pensons en effet que toute recherche en géomorphologie fluviale ne peut pas s'effectuer en ignorant les enjeux socio-économiques, géopolitiques et de gestion qui s'entrechoquent aujourd'hui. Non seulement la connaissance et l'ampleur de ces enjeux permettent de repositionner les futurs résultats de notre démarche scientifique, mais ils représentent des facteurs susceptibles d'influencer l'évolution même du fleuve. Voici en préambule de la thèse, la présentation rapide de ces enjeux majeurs liés à la Loire.

Premier constat à l'aube du 21^{ème} siècle : La Loire est un fleuve perturbé, aux multiples enjeux

La Loire d'aujourd'hui est confrontée à de multiples perturbations environnementales et est l'objet de nombreux enjeux socio-économiques, écologiques et patrimoniaux. L'entretien et la restauration du fleuve, la protection des populations civiles vis-à-vis du risque d'inondation, les valorisations écologiques d'ampleur nationale et même européenne, constituent quelques uns de ces enjeux. Il nous paraît nécessaire de présenter ces enjeux par rapport à notre problématique de recherche. Cette présentation nous amène en effet à poser les fondements scientifiques et à décrire les objectifs de cette thèse.

1). Un fleuve aménagé, incisé et végétalisé

La Loire est considérée comme le « dernier fleuve sauvage d'Europe ». Pourtant son histoire est riche en conquêtes humaines. Tour à tour axe de migration des populations, espace de colonisation humaine, artère stratégique ouverte sur l'océan, la Loire a connu une longue histoire d'occupation par les sociétés riveraines, au moins depuis le Néolithique jusqu'à aujourd'hui. Les héritages culturels, naturels, socio-historiques ont perduré et se sont modifiés à travers les siècles (Burnouf et al., 2003). La Loire d'aujourd'hui est le fruit de ces siècles d'occupation humaine et d'aménagement (Figure 2). Les « anciens » n'ont eu de cesse d'aménager le fleuve. La difficulté du travail notamment des historiens, des géographes et des paléo-environnementalistes consiste à reconstituer cette histoire, ces formes d'aménagements et bien entendu les modifications subies par la Loire (Miejac, 1999).

Les levées représentent les aménagements dominants du paysage ligérien (Figure 3). D'abord turcies, elles prennent le nom de levées à partir de l'époque moderne (Dion, 1961). Ces levées ont été installées pour concentrer et stabiliser les écoulements pour la navigation, privant de ce fait le fleuve d'une bonne partie de sa plaine d'inondation (Garcin et al., 2006). Or, cet endiguement s'est fait progressivement dès le Moyen Age et certains secteurs de la Loire moyenne n'ont été ainsi équipés que tardivement, au cours du 19^{ème} siècle (Dion, 1961 ; Temam, 2005), en particulier dans les Vals moyens que nous étudions ici. Ces secteurs sont donc des zones d'enregistrement des perturbations récentes subies suite à la mise en place d'ouvrages lourds de navigation. Par conséquent, le choix de la zone d'étude et celui de la période d'analyse sont dictés par la jeunesse de son aménagement et des contraintes induites sur la dynamique fluviale. C'est donc le cas du secteur de la Loire des îles, premier long tronçon de la Loire moyenne caractérisée par des paysages où dominant la forêt alluviale, les îles et un réseau de bras secondaires latéraux.

La Loire des îles est un corridor perturbé récemment au regard du fleuve.

Face à la déconnexion morphologique du lit majeur, créée par la présence quasi continue des levées, il faut évoquer la notion centrale de la Zone Atelier Loire (Z.A.L.), celle du 3^{ème} lit ligérien . Le concept du 3^{ème} lit est en effet important dans le programme

de la ZAL : il représente l'ensemble morphologique du lit entre levées. Un des premiers choix du cadre d'étude repose donc sur la possibilité de corrélérer l'analyse fonctionnelle du lit ligérien à un secteur en réajustement face à ces levées récentes. Il est évident que la construction des levées joue un rôle majeur dans l'histoire du cours d'eau, tout en gardant bien à l'esprit que son évolution morphodynamique intègre aussi des changements qui jouent sur des pas de temps plus longs, en particulier à l'échelle de l'Holocène. N. Carcaud (2004) montre la lenteur du réajustement morphodynamique Postglaciaire et l'effet « accélérateur » de l'aménagement des levées à partir du Moyen Age en Loire angevine puis tourangelle.

La Loire subit un déficit sédimentaire bien connu à présent (Maillard, 1972 ; Dambre et Malaval, 1994) et connaît un enfoncement de ses chenaux principaux et parfois, secondaires (Gasowski, 1994 ; Gautier et *al*, 2001) (Figure 4). Ces dysfonctionnements ne sont pas sans poser des difficultés techniques et sociétales : érosion des berges, endommagement des digues et des ouvrages d'art (piliers de ponts, quais des grandes villes...), rabattement des nappes et des niveaux des puits de captage. L'année 1994 a sonné le glas des extractions de granulats au sein même du lit mineur, sans toutefois les éloigner du lit vif, sans les faire quitter la plaine d'inondation. Elles se sont réfugiées le plus souvent derrière les digues.

Effondrement du Pont Wilson à Tours en 1978 (Photographie 1), restrictions répétées des prélèvements d'eau dans le bassin versant de la Loire (2003, 2004, 2005, 2006), amoncellements d'embâcles, végétalisation accélérée des bancs de sable et des bras secondaires, les exemples sont nombreux pour témoigner du déséquilibre sédimentaire et de l'incision du lit ligérien. Les gestionnaires des corridors fluviaux (DIREN, DDE, Conservatoires d'espaces naturels...) sont confrontés à ces difficultés (Steiger et *al*, 2001 ; Wasson et *al*, 1995). Ils oeuvrent pour l'amélioration des conditions d'écoulement des eaux, la réouverture de bras secondaires, la protection de berges, la réintroduction d'espèces, ou encore la préservation de qualités écologiques exceptionnelles.

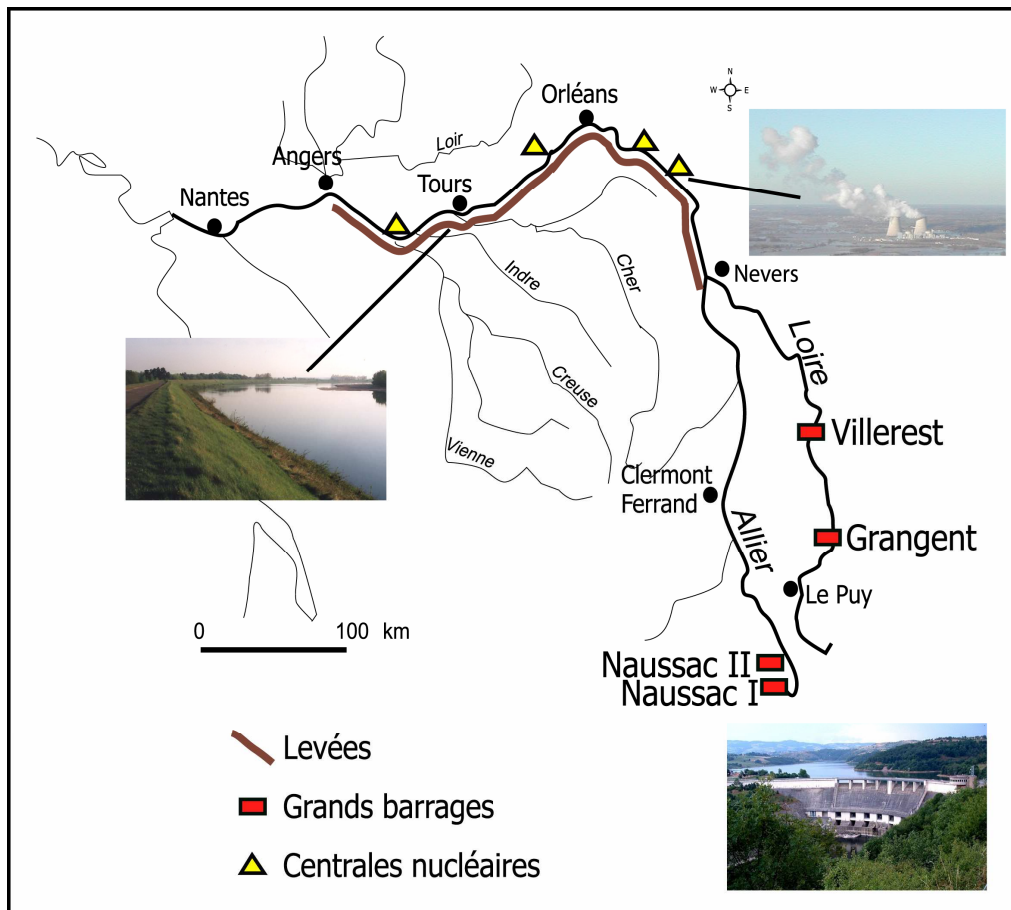


Figure 2 – Les grands aménagements du bassin versant de la Loire.

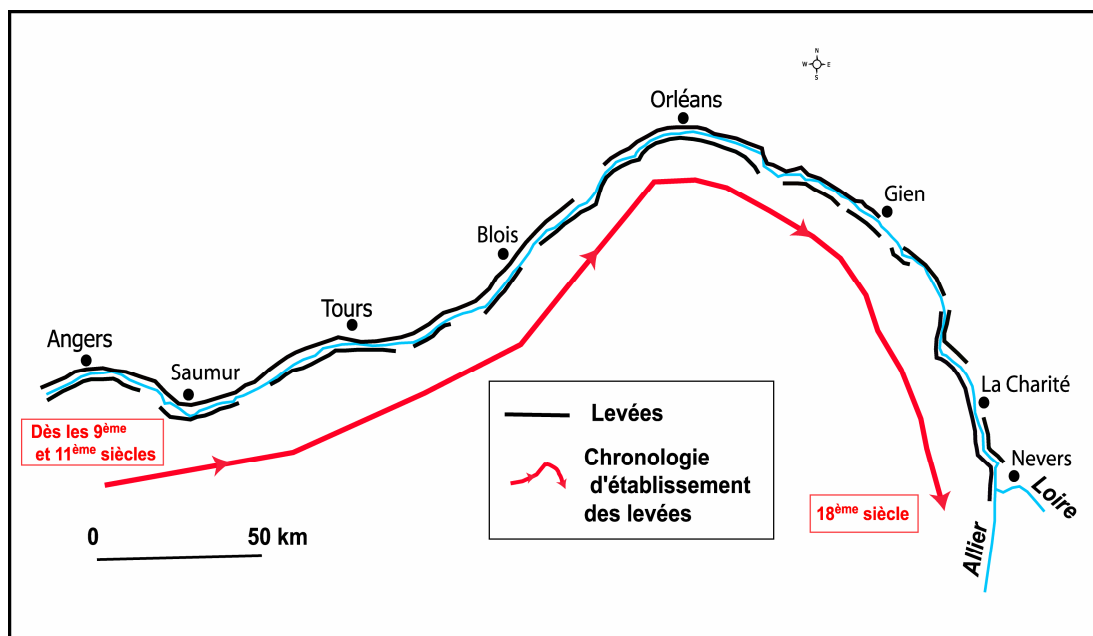


Figure 3 – Un aménagement fluvial marquant dans le paysage de la Loire. Les levées parsèment le parcours du fleuve. Notons que la logique de construction de ces digues, depuis le 9^{ème} siècle s'est réalisée de l'aval vers l'amont.

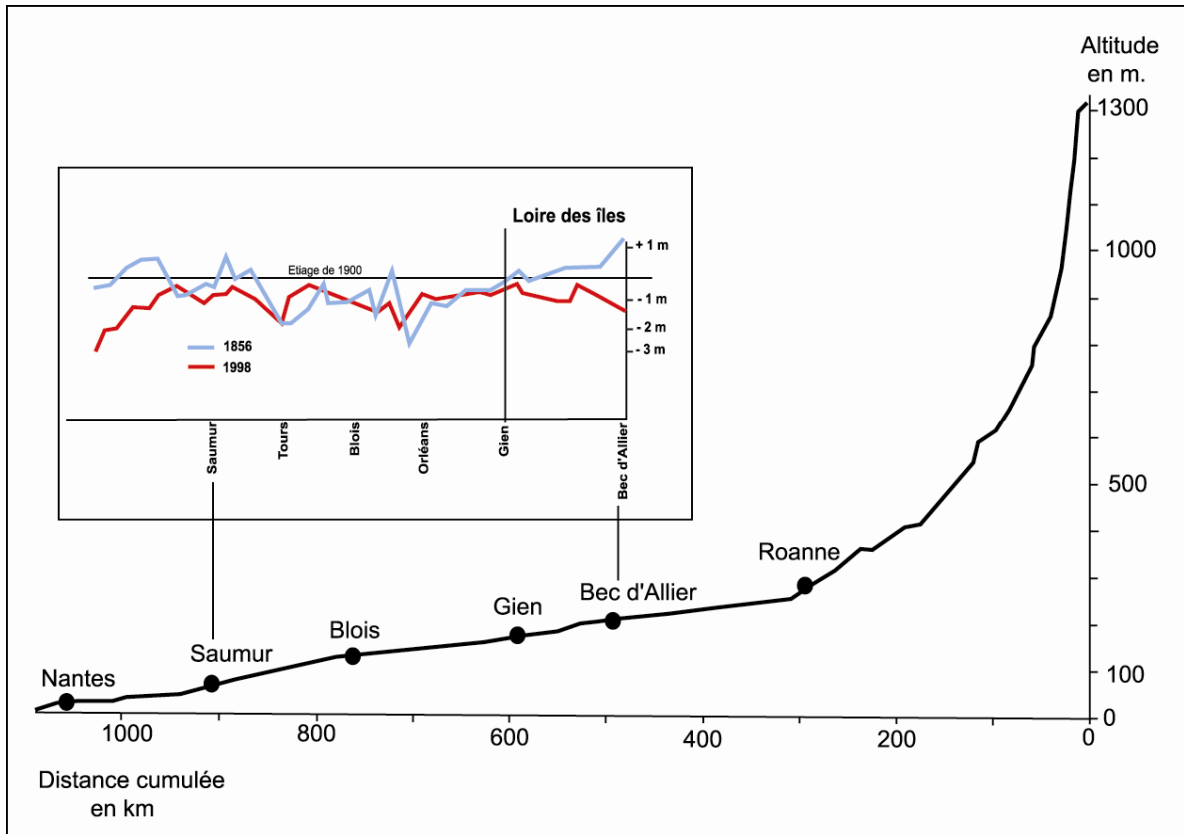


Figure 4 – L'évolution du profil en long du Bec d'Allier à Saumur. Le secteur de la Loire des îles enregistre un des enfoncements les plus importants (adapté de Z. Gazowski, 1994).



Photographie 1 – L'effondrement du Pont Wilson à Tours en 1978. (source privée).

2). Les enjeux socio-économiques en Loire moyenne : des interactions entre les différents enjeux actuels du fleuve

Les problèmes actuels de ce fleuve tant au niveau de son évolution morphologique que de sa gestion sont liés à une longue histoire mouvementée entre aménagements du fleuve, revendications écologiques et rôle de l'Etat. Il existe une certaine gestion centralisée autour d'Orléans où on essaye de concilier ces différents aspects. La Loire est inégalement gérée et reste considérée de différentes manières : Loire naviguée, Loire sacrifiée, Loire patrimonialisée, Loire « ensauvagée ».

a). Les enjeux d'entretien et de restauration du lit fluvial

Avec la mise en route du Plan Loire Grandeur Nature dès 1994, une nouvelle politique d'entretien et de restauration du lit de la Loire se développe. Cette politique s'articule autour de la sécurité des populations par la gestion et la prévention des risques hydrologiques (risque d'inondation, sécheresse), avant tout (Figure 5) (DIREN Centre, 1991). Elle privilégie une intervention directe dans le lit fluvial en favorisant les écoulements des crues. Ainsi, ce volet repose sur une politique interventionniste en dévégétalisant (voire en réouvrant) les bras secondaires, en luttant contre les embâcles et en restaurant les levées.

La politique de gestion du lit cherche aussi à préserver, voire à restaurer les qualités écologiques du milieu fluvial. Un guide méthodologique illustre les directives de cette politique en détaillant les travaux à effectuer dans le lit de la Loire (Plan Loire Grandeur Nature, 2002). Ces enjeux d'amélioration des écoulements sont également liés à la nécessité d'enrayer l'enfoncement de la ligne d'eau d'étiage et pour cela, il est essentiel de favoriser la remobilisation des sédiments. Enfin, le Plan Loire Grandeur Nature cherche à intégrer et concilier la qualité et la spécificité des paysages ligériens et les activités socio-économiques et de loisirs (tourisme, promenade, navigation de loisir, pêche...).

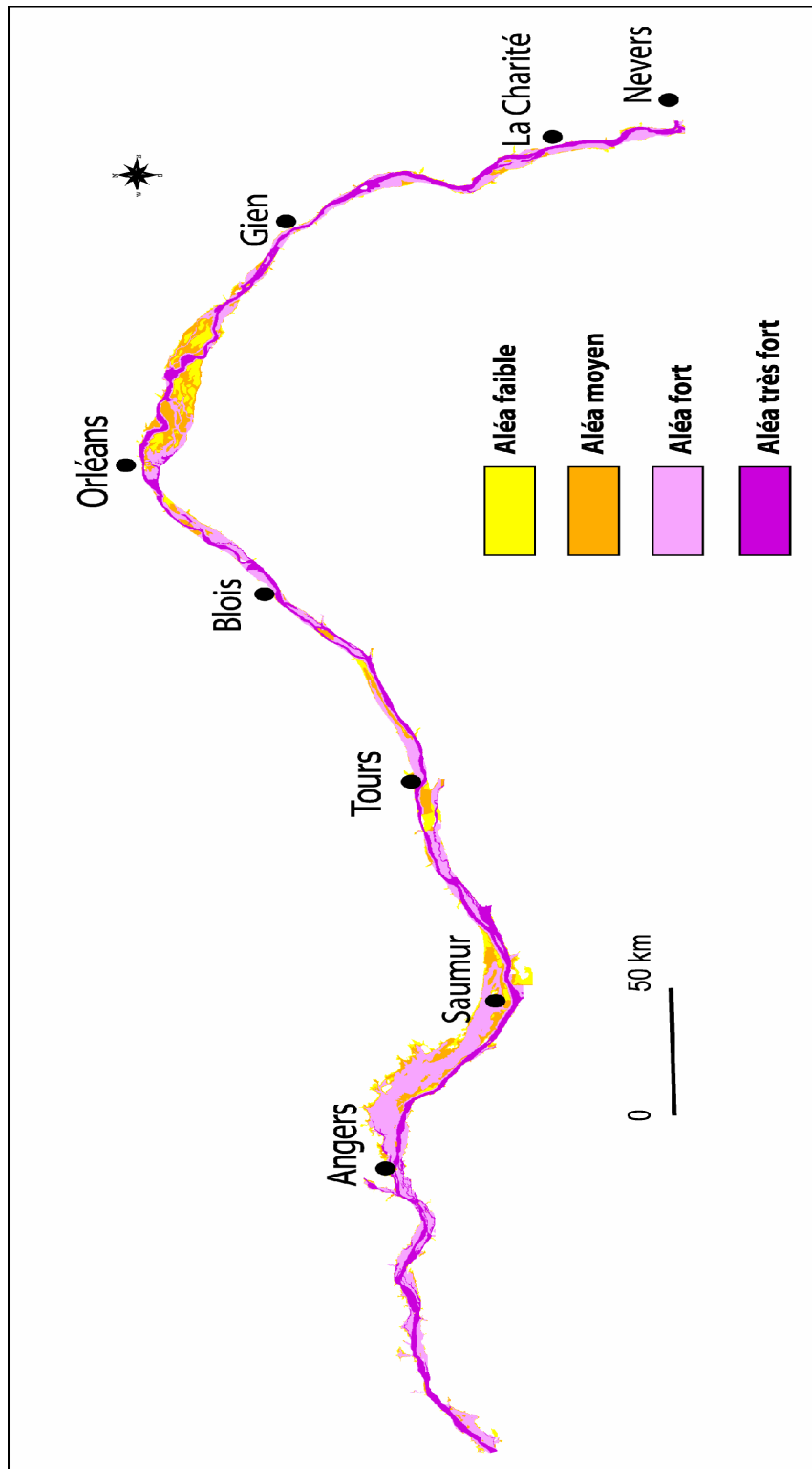


Figure 5 – Etendue des zones inondables en Loire moyenne.

Les formes fluviales constituent des cibles d'intervention de cette politique d'entretien et de restauration. Les îles, les francs-bords (marges du fleuve), les chenaux principaux et secondaires forment donc des enjeux géomorphologiques de premier ordre. Leur place respective dans l'hydrosystème fluvial intéresse fortement les gestionnaires qui

connaissent mal leur fonctionnement. Pouvoir éclairer les connaissances sur ces diverses formes ne peut qu'apporter des clés de compréhension et de gestion importantes.

b). Entre enjeux écologiques et biodiversité ligérienne

Il reste très difficile à présent d'aborder les enjeux de la Loire sans traiter des questions écologiques, autres enjeux majeurs dans la vallée de la Loire. La Loire est sans conteste un fleuve reconnu pour ses richesses écologiques (Figure 6). Au niveau mondial, cette reconnaissance s'illustre par le biais du programme Eau douce du WWF (implication dans le programme Loire Nature) (Collectif, 2006), des Objectifs 2010 (engagement de l'Etat français à appliquer les directives du Programme Environnement des Nations Unies en matière de gestion de l'eau) ou encore par le projet de création d'une réserve de Biosphère de la Haute-Loire et du Haut-Allier (classement UNESCO). A l'échelle européenne, la reconnaissance des atouts écologiques de la Loire est encore plus importante et dicte actuellement les politiques de gestion écologique sur le fleuve. Il s'agit d'une longue liste d'inventaires et de zonages réglementaires.

- des zones d'inventaires comme les Zones Naturelles d'Intérêts Ecologiques, Faunistiques et Floristiques - ZNIEFF I et II, et les Zones Importantes pour la Conservation des Oiseaux - ZICO;
- le réseau Natura 2000 (applications des Directives Oiseaux - Zones de Protection Spéciale (1979) et Habitats - Zones Spéciales de Conservation (1992)).

Au niveau national, la Loire compte quatre réserves naturelles nationales. A l'échelle régionale, les arrêtés de Biotope et les réserves naturelles régionales complètent, sous d'autres statuts, la panoplie des aires de protection écologique. De même, les Conservatoires d'Espaces Naturels Régionaux, du réseau national Espaces Naturels de France (E.N.F.), interviennent *via* l'application des directives européennes et de la réglementation nationale sur la gestion foncière et écologique de milieux fluviatiles en Loire. La gestion des biotopes et des biocénoses tient compte des contraintes environnementales imposées par le biais de plan de gestion et du réseau Natura 2000. La nécessité de replacer ces acquis et ces préoccupations écologiques dans le contexte d'évolution du fleuve s'explique donc parfaitement. Nous avons sélectionné parmi nos sites ateliers, ou sites de recherche, une Réserve Naturelle Nationale fluviale. Elle

constitue le site clé de notre méthodologie de recherche et demeure une des meilleures représentations du style fluvial que nous avons choisi de comprendre, le style en anastomose.

c). Les interactions des acteurs du fleuve et les enjeux patrimoniaux

La Loire fait l'objet d'une patrimonialisation croissante depuis environ une dizaine d'années. Considérer la Loire comme un objet de patrimoine reste, pour nous, un non-sens géomorphologique, car comment faire entrer un hydrosystème, par définition en constante évolution, dans le registre de la patrimonialisation ? Cette patrimonialisation ne risque-t-elle pas aujourd'hui d'homogénéiser en partie toutes facettes dynamiques du fleuve ? Ce qui n'est pas sans conséquences. La Loire est classée dans le Patrimoine Mondial de l'Humanité par l'Unesco, mais il ne s'agit que de la Loire des Châteaux, cette Loire si touristique et pourtant assez différente de la Loire des îles que nous étudions.

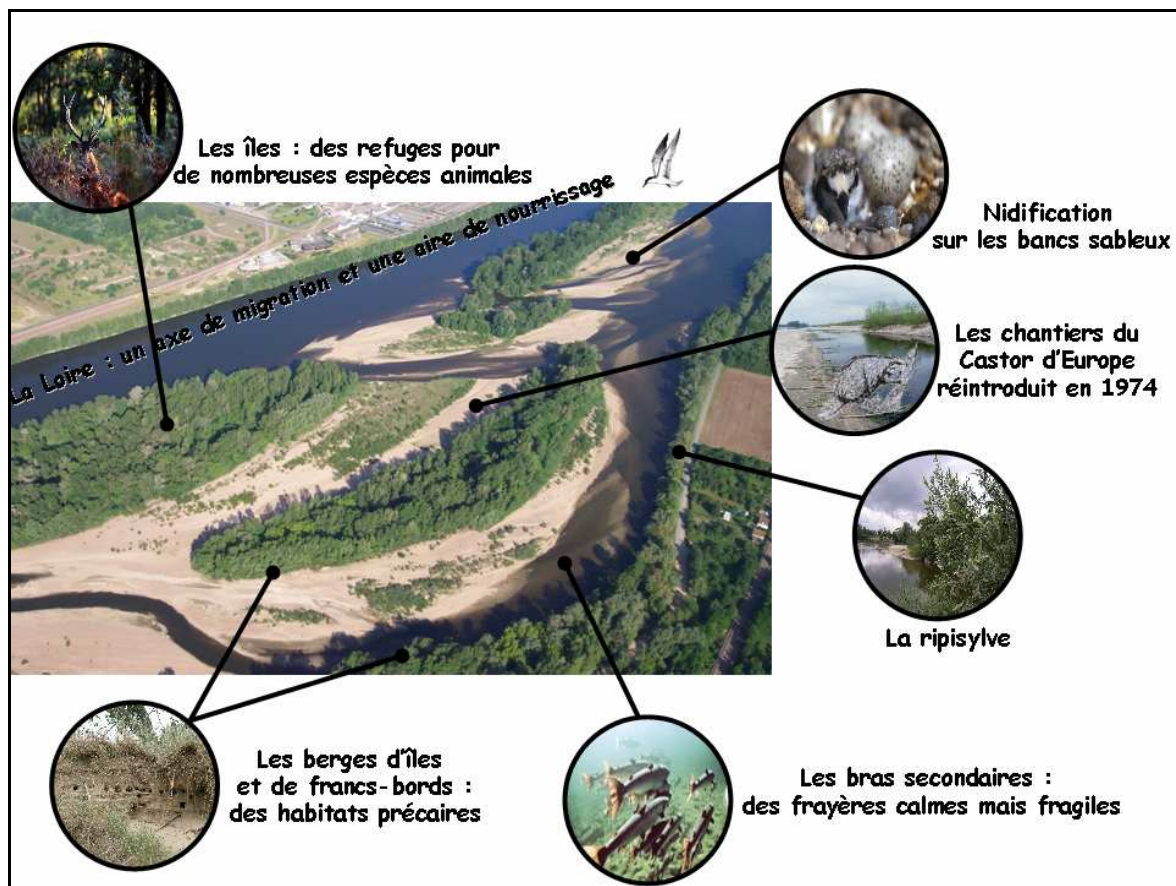


Figure 6 – Association des formes fluviales et de leur rôle écologique en Loire moyenne.

L'inégale considération portée au fleuve rend donc bancable la valorisation générale d'un hydrosystème, qui par définition comporte des échanges multiples et bien plus étendus que cette partie de fleuve patrimonialisée. Dans l'esprit des Ligériens, de ces gens de Loire, cette patrimonialisation n'est pas forcément perçue comme bénéfique.

La Loire se retrouve ainsi patrimonialisée par le biais de ses aménagements séculaires. Les levées, digues ou autres chevrettes sont rentrées dans le patrimoine. Pourtant, tous ces aménagements sont obsolètes puisqu'ils avaient tous été créés dans le cadre d'une Loire intensément naviguée. Aujourd'hui, cette navigation n'existe plus, excepté sur une petite portion en Loire inférieure. Ces « friches hydrauliques » sont ainsi préservées, parfois entretenues et maintenues au titre du patrimoine historique. Ces levées protègent encore des inondations. Des associations militent ainsi pour la protection et le maintien d'ouvrages de navigation abandonnés, mais sous-estimant le rôle contraignant sur la dynamique fluviale. C'est le cas de la chevette (digue submersible favorisant un chenal de navigation) de la Charité-sur-Loire, secteur pour lequel nous analysons longuement dans une partie spécifique cette interaction entre la dynamique fluviale et cet aménagement.

Au regard de ces différents enjeux, nous proposons à présent de mettre en avant les cinq points de problématiques de cette thèse.

Les problématiques et les objectifs de la thèse

- **Premier objectif : Comprendre le fonctionnement du système fluvial anastomosé de la Loire des îles : la place des îles fluviales et des autres formes dans un tel système.**

Il est des sujets que la géomorphologie fluviale, française et internationale, a peu étudiés jusqu'à présent : les îles fluviales. Ces formes, en apparence banales, n'ont pas fait l'objet d'études scientifiques importantes (Babonaux, 1970 ; Bomer, 1972 ; Gautier et al, 2000). Que sait-on exactement de ces formes végétalisées présentes sur tous les cours d'eau ? Les réponses sont aussi vagues que les idées préconçues sur ces formes : formes entièrement stabilisées pour les uns, formes ancestrales qui auraient toujours existé pour

les autres, ou encore formes communes peu dynamiques. Nous proposons une synthèse bibliographique dans le chapitre 2 afin de montrer les acquis scientifiques sur les îles fluviales. Ces formes si particulières ne peuvent être dissociées des bras secondaires qui conditionnent leur insularité.

La Loire moyenne, en aval du Bec d'Allier a un paysage fluvial dominé par une mosaïque de formes fluviales : des îles, un réseau diversifié de bras secondaires, des bancs sableux, des formes marginales végétalisées appelées localement des francs-bords, des annexes hydrauliques (bras morts) plus ou moins connectées au fleuve. Toutes les études consacrées aux styles fluviaux anastomosés intègrent l'île fluviale comme un élément du « décor géomorphologique » en privilégiant avant tout les bras secondaires (Nanson et Knighton, 1996). Les premières études hydro-géomorphologiques menées sur la Loire ont montré la complexité de l'évolution de ces formes, sans apporter de connaissances approfondies sur leurs conditions de mise en place et d'évolution (Gautier et *al.*, 2001). Pour notre part, nous avons centré nos recherches sur ces éléments insulaires que nous supposons dès le départ comme des éléments centraux de la perturbation hydro-dynamique du fleuve. C'est toute l'originalité de ce travail doctoral puisque les îles sont des objets de recherche neufs et quasi méconnus, et nous avons donc replacé ces formes fluviales dans le contexte des déséquilibres du fleuve. Il s'agit de comprendre la genèse des îles, leur fonctionnement hydro-sédimentaire, leur capacité de stockage et de « décharge » sédimentaire dans l'hydrosystème, et leur rôle dynamique exact dans l'expansion végétale. Un rapide examen des cartes anciennes montre en effet que le principal signe du réajustement historique de la Loire est l'expansion des îles. Les études géomorphologiques plus approfondies (Bomer, 1972 ; Gautier et *al.*, 2000 et 2001) posent l'hypothèse que la formation des îles est directement liée aux changements environnementaux des 150 dernières années : absence de grande crue, déficit sédimentaire et chenalisation, mutations des pratiques agro-pastorales sur les terres inondables... Si ces auteurs montrent la complexité de ces mésoformes, ils n'ont pas pu analyser en détail leurs conditions de genèse, leur fonctionnement en terme d'érosion – sédimentation... De plus, quel est le rôle des îles dans le déséquilibre sédimentaire actuel de la Loire et quels enseignements

pourrait-on tirer en matière de gestion du fleuve, en sachant que les travaux de restauration et d'entretien ne concernent essentiellement que les bras secondaires ?

S'intéresser aux îles et aux bras secondaires de la Loire, c'est participer à une meilleure connaissance des processus qui conditionnent à la fois leur existence et leur évolution. **Le secteur choisi en Loire moyenne est particulièrement représentatif de la « Loire des îles ».**

Le raisonnement se fonde alors sur une démarche multi-scalaire. **Une démarche pluri-temporelle consiste à suivre l'évolution de la Loire depuis le 19^{ème} siècle jusqu'à aujourd'hui (approche à moyenne échelle), et d'une année à l'autre (approche à grande échelle) en fonction d'épisodes hydrologiques différents. Une démarche multi-scalaire au niveau spatial permet d'identifier des rythmes d'évolution à l'échelle d'un corridor fluvial expérimental (échelle moyenne), à l'échelle de formes fluviales (îles, chenaux) et à l'échelle de connexions de bras secondaires qui assurent l'insularité. Le « bon fonctionnement » hydrologique de ces connexions conditionne la dynamique des chenaux et l'existence des îles (Gautier et al., 2001 ; Rodrigues, 2004).**

- **Deuxième objectif : Quels sont les temps et les rythmes de réajustement d'un système anastomosé en milieu tempéré à forte emprise anthropique ?**

Dans les vals de Loire, l'attention s'est centrée sur la question de la chenalisation, essentiellement liée au déficit sédimentaire et à la végétalisation du lit fluvial. Peu d'attention a été portée à l'impact différé des levées qui ont été construites sur près d'un millénaire, entre l'aval angevin et le Nivernais. De plus, N. Carcaud (2004) souligne la lenteur du réajustement morphodynamique de la Loire au changement hydro-climatique post-glaciaire, mais le forçage anthropique fort du fleuve dès le début du Moyen Age constitue une perturbation majeure (Garcin et al., 2006). Chaque fleuve a son histoire et ses temps de réponse propres (Bravard et Magny, 2002). Il reste donc à définir des échelles d'analyse spatio-temporelle pertinentes pour comprendre le fonctionnement des hydrosystèmes fluviaux et établir des mesures de gestion adéquates. A cet égard il est difficile d'étudier les environnements fluviaux sans traiter du rôle des sociétés (Muxart et al., 2002 ; Burnouf et Leveau, 2004). La question du réajustement se justifie donc

entièrement (Figure 7) (Steiger et *al.*, 2000). La thèse s'articule ainsi autour de la **compréhension des temps de réponses, passés et actuels, aux perturbations environnementales d'un hydrosystème fluvial anthropisé.**

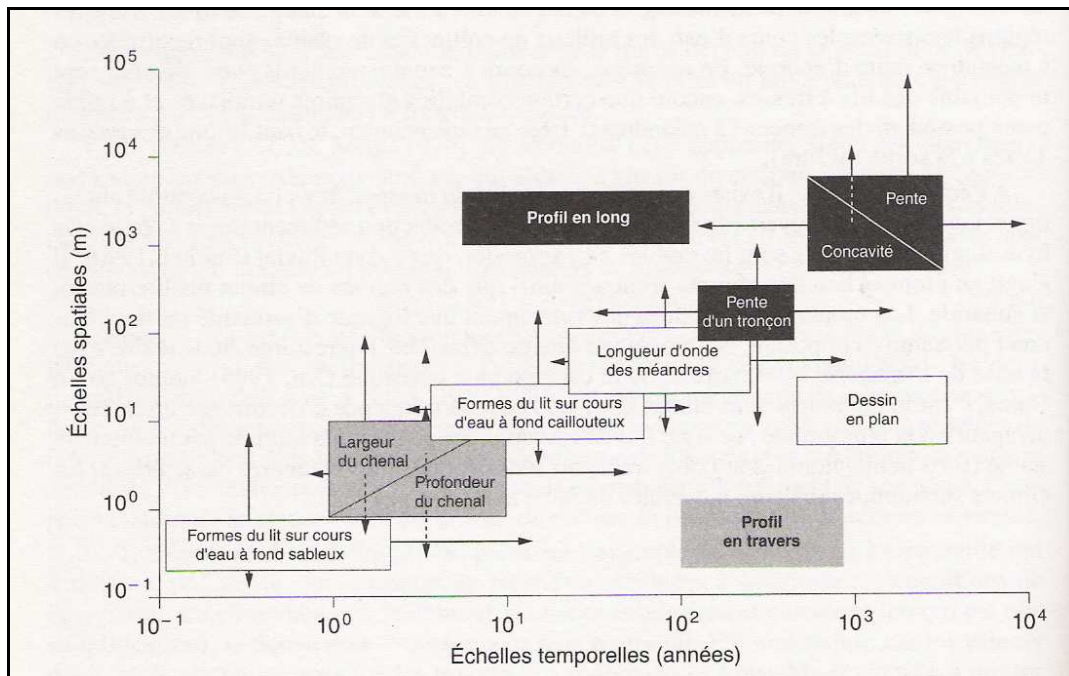


Figure 7 – L'ajustement spatio-temporel des formes fluviales selon A.D. Knighton (1998).

« *La Loire des îles, du Bec d'Allier à Gien : rythmes d'évolution et enjeux de gestion* »
 La Loire moyenne sert ainsi d'anthroposystème fluvial de référence pour mettre en œuvre une méthodologie reposant sur l'analyse à plusieurs niveaux d'échelles spatio-temporelles des formes de réajustement du fleuve depuis le 19^{ème} siècle en tenant compte des interactions Sociétés-Environnement.

L'échelle de temps de la thèse est donc celle de l'époque contemporaine, depuis le 19^{ème} siècle jusqu'à nos jours.

Rythmes d'évolution, effets des conditions hydrologiques et rôle des crues

A l'heure où cette thèse s'achève, on célèbre l'anniversaire des grandes crues de l'année 1856 : l'Europe de l'Ouest était alors frappée d'épisodes pluvieux inédits et longs provoquant les crues de bon nombre de cours d'eau : le Danube, l'Elbe, le Pô, le Rhin, le Rhône (colloque SHF 2006, « Anniversaire des crues de 1856 »). 150 ans c'est long à l'échelle d'une vie humaine, trop long aussi pour conserver intacte une trace de ces crues

historiques. A l'échelle d'un fleuve qu'en est-il ? Ces hydrosystèmes fluviaux enregistrent morphologiquement le passage des crues historiques (Amoros et Petts, 1993). Mais sur quel pas de temps persistent ces enregistrements ? Les impacts sont-ils encore perceptibles aujourd'hui ? En 1856, la Loire a connu une crue historique, une crue de puissance supérieure au débit centennal au même titre que celles de 1846 et 1866 : les laisses de crue sur les édifices, les gravures et les écrits sont les témoins de ces évènements hydrologiques majeurs dans le Val de Loire. Ces trois crues succèdent à plusieurs phases de forte hydrologie et signent la dernière phase du Petit Age Glaciaire. « L'amont temporel » de cette thèse est donc celui d'une forte activité hydro-climatique, qui cesse de façon brutale : toutes les crues postérieures à 1866 sont restées bien inférieures aux écoulements du 19^{ème} siècle. Se pose donc en premier lieu la question du temps de relaxation et de réponse du fleuve à ces écoulements exceptionnels et à leur arrêt brutal.

La crue demeure le facteur de modification de la morphologie des lits fluviaux par sa capacité morphogénique, celle de pouvoir éroder et remanier les sédiments, et en intervenant sur la végétation alluviale. Ce facteur est d'autant plus important que l'on a assisté à un assouplissement hydrologique depuis près de 150 ans. En nous posant la question de la capacité morphogénique du fleuve en temps de forte hydraulité puis de faible hydraulité (depuis le 19^{ème} siècle), c'est de l'avenir morphologique du fleuve qu'il est question. La prévention et la gestion du risque d'inondation, par le biais de modélisations mathématiques et physiques des écoulements, ne sont pas le sujet de cette thèse. Notre travail aborde la question des crues à travers les débits morphogènes et leurs impacts hydro-morphologiques sur le système en anabranches de la Loire moyenne.

Le rôle des épisodes hydrologiques dans les transferts, les dépôts et la répartition des sédiments forme donc un point central de la recherche de cette thèse. Ces questions sont primordiales pour interpréter l'évolution future du fleuve. L'étude approfondie d'une crue majeure dans l'histoire hydrologique de la Loire se place idéalement dans cette analyse. La crue de décembre 2003, crue trentennale est donc analysée finement puis comparée aux crues depuis le 19^{ème} siècle. La comparaison de débits de différentes puissances et durées, entre 2002 et 2005 complète par ailleurs cette analyse à une échelle plus grande. Cette

approche hydrologique est appliquée à petite échelle spatiale, puisque nous cherchons à analyser les effets de chaque événement sur les processus d'érosion – sédimentation de chacune des unités du lit fluvial.

Au même titre que les crues, les étiages et les durées de basses eaux sont tout à fait importants dans l'histoire du fleuve. La végétalisation des corridors fluviaux correspond souvent à des années de basses eaux successives favorables à la colonisation végétale (Dufour, 2005). Pour la Loire, on peut supposer que les étiages et les basses eaux sont l'un des facteurs déterminants de la végétalisation du lit.

Enfin, le suivi hydrologique est associé à une analyse à grande échelle spatiale : celle des différentes unités fonctionnelles du lit fluvial (bras principal, secondaire, chenal abandonné, îles, marges végétalisées...). Comme nous nous intéressons au couple île-bras secondaire, l'étude des débits est essentielle, notamment dans la durée d'activité hydrologique de nos bras secondaires et dans leur durée d'assèchement. En conséquence, nous mettons en rapport l'extension de la végétation dans le lit fluvial et l'influence des conditions hydrologiques (hautes et basses eaux) depuis les mesures de débits existantes en Loire moyenne. Dans quelle mesure les variations de débits influencent-elles l'évolution du lit fluvial ?

● **Troisième objectif : Comment interagissent les sociétés, passées et actuelles, et l'hydrosystème fluvial ?**

La notion d'anthroposystème fluvial trouve ici tout son sens tant la marque de la société est fortement inscrite dans tous les corridors fluviaux. La période de « l'Anthropocène » (Crutzen et Stoermer, 2000), aussi discutée soit-elle, existe et a marqué durablement les hydrosystèmes fluviaux, que l'on ne peut plus qualifier de « naturels ». Si la présence humaine est attestée dans le Val depuis longtemps, le Haut Moyen Âge constitue une période charnière dans les relations entre la société et la Loire. Outre l'intensification de l'agriculture et de l'élevage qui entraîne des modifications profondes du couvert végétal des plaines et des versants (Carcaud *et al.*, 2000 ; Cyprien, 2002 ; Cyprien *et al.*, 2001), on note la multiplication des activités (pêcheries, rouissage du chanvre, moulins sur berge ou sur bateau, ...) (Burnouf et Carcaud, 1999 ; Bouquet, 2000 ; Galinié et Rodier, 2000 ; Noizet *et al.*, 2004). « On observe donc une mutation profonde

des relations entre les sociétés riveraines et la Loire par le passage progressif d'ouvrages temporaires, discontinus et submersibles (9^{ème} – 11^{ème} siècles) à des aménagements continus et « insubmersibles » (à partir du 15^{ème} siècle) protégeant durablement activités et infrastructures contre les mécanismes d'érosions et d'inondation » (Gautier et *al.*, 2007). A plusieurs siècles d'occupation intensive du lit fluvial, succède très rapidement à la fin du 19^{ème} siècle un abandon : la disparition de la navigation, puis plus récemment, la déprise agro-pastorale du lit. L'objectif est donc d'analyser dans leur chronologie et leur implication respective, la part des facteurs anthropiques dans le réajustement fluvial que nous suivons. La recherche des facteurs humains socio-économiques est donc corrélée à celle des facteurs physiques. La Loire représente un cadre de vie pour des modes d'occupation humaine bien spécifiques. Nous proposons de retracer l'évolution de ce cadre de vie, tour à tour cadre de vie privilégié et recherché, délaissé, abandonné et réapproprié. Pour résumer, le travail s'articule autour :

- du concept d'**anthroposystème fluvial** pour définir la relation systémique entre les faits qui relèvent des milieux et ceux qui relèvent des sociétés,
- de l'idée de **co-évolution** constante des systèmes sociaux (économiques, politiques...) et « naturels » (physiques et biologiques).

- **Quatrième objectif : La recherche appliquée et la collaboration scientifique - Trouver des clés de compréhension de l'hydrosystème pour les gestionnaires du fleuve**

« Les enjeux de gestion de la Loire des îles », tel se présente le dernier volet de nos travaux. L'aide à la gestion demeure très forte dans cette thèse qui propose des clés de compréhension du fonctionnement des formes fluviales, îles et bras secondaires. L'intérêt principal est de permettre aux gestionnaires de mieux cibler leurs interventions. A l'image des grands cours d'eau européens, la Loire est l'objet de multiples enjeux. Le titre de la thèse inclus d'emblée ces enjeux de gestion, car ils sont indissociables de notre approche mutiscalaire. Que se soit pour lutter contre les risques d'inondation avec la mise en place d'un Plan Loire, gouvernemental puis interrégional, de 1994 à 2006 (EPPLGN, 1999), entretenir et restaurer les chenaux pour améliorer les écoulements fluviaux (Bacchi et Berton, 1997), conserver et gérer la biodiversité ligérienne (BIOTOPE, 2004 ; DIREN

Centre, 2005) ou encore protéger des ouvrages d'art, la Loire est au centre de nombreux débats et enjeux de gestion. S'intéresser aux temps de réajustement du fleuve (Marston et *al.*, 1999), c'est aussi composer avec les multiples problématiques actuelles de gestion. La multiplication des enjeux de gestion, de protection et même de société, donne une dimension réaliste à cette thèse en confrontant les résultats d'une recherche fondamentale, qui répond à des problématiques scientifiques bien précises, à des volontés d'applications réelles sur le terrain. Chaque individu perçoit un aspect du fleuve qui correspond le plus souvent à des intérêts et des enjeux propres : la Loire qui passe devant chez soi, la place du patrimoine historique fluvial d'une commune, l'inégale situation vis-à-vis du risque d'inondation etc...

La thèse se consacre aux objectifs suivants :

- L'étude se fonde en premier lieu sur l'analyse d'un système anastomosé de la Loire moyenne. Il s'agit de comprendre les spécificités d'un cours d'eau français en anabranches, de le confronter à la classification établie et d'en déduire de nouvelles interprétations.
- Apporter de nouveaux éléments de compréhension de la genèse et de la durée de formation des grandes formes fluviales de la Loire en particulier les îles et les bras secondaires, si peu étudiés jusqu'à présent ;
- Déterminer des seuils temporels et des rythmes de réponses de l'hydrosystème Loire à travers les différentes mésoformes qui composent son corridor ;
- Etablir des bilans sédimentaires en fonction d'années hydrologiques différentes, notamment suite aux crues, dans différents bras secondaires et sur les îles. Il s'agit aussi d'évaluer le rôle des débits de basses eaux, hautes eaux et ceux supposés morphogènes dans nos sites ateliers expérimentaux.
- Cette approche doit permettre de dresser des scénarii d'évolution de ces formes fluviales si spécifiques en Loire moyenne ;
- Analyser finement les interactions Sociétés-Milieu. Il s'agit des relations passées, des héritages et des perspectives d'avenir ;
- Valider une méthode originale en Loire moyenne au service des problématiques environnementales d'incision et de végétalisation du lit fluvial.
- Rapprocher les échelles d'analyse entre l'approche géomorphologique environnementale et les questionnaires des milieux naturels fluviaux.

Nous présentons ci-après l'organisation générale de la thèse. Nous partons de la présentation du cadre et des champs d'étude. Puis, nous montrons les résultats de l'analyse multi-scalaire.

Première partie : cadres et objets d'étude

Il est nécessaire de situer les grands cadres spatio-temporels depuis l'étude du bassin versant jusqu'aux sites expérimentaux, sélectionnés pour répondre aux objectifs, en passant par ce long corridor de la Loire des îles (du Bec d'Allier jusqu'à Gien). La thèse utilise bien entendu les héritages et acquis scientifiques en géomorphologie fluviale. Elle se positionne également dans un élan de recherche très récent en Loire moyenne avec une volonté d'enrichir par de nouveaux concepts les connaissances sur la Loire (chapitre 1)

Par la suite, on détaille les différents niveaux d'échelle d'analyse et la méthodologie mise en place (chapitre 2). Le choix de cette méthodologie est ainsi explicité, commenté et justifié par les objectifs de recherche et mis en application à l'aide des outils de mesures et d'analyse utilisés sur le terrain et en laboratoire.

Deuxième partie : Rythmes d'évolution de la Loire des îles à différentes échelles spatiales et temporelles

La deuxième partie est consacrée au développement de la méthodologie multi-scalaire et ses résultats. A l'échelle moyenne tout d'abord, l'état « de référence 2002 » (chapitre 3) permet de partir sur une caractérisation de la morphologie et de la végétation du lit de la Loire afin de dresser une première interprétation diachronique depuis 1850 (chapitre 4). Ensuite à grande échelle, les rythmes d'évolution des formes fluviales apportent des éléments de réponse fins concernant les modèles d'évolution des formes, la dynamique de la végétation liée à ces formes, et les vitesses d'érosion et de sédimentation enregistrées en fonction de diverses conditions hydrologiques (chapitre 5). Les îles sont au centre de cette partie.

Troisième partie : Plus de deux siècles de réponse de la Loire aux changements environnementaux

La troisième partie s'intéresse aux facteurs anthropiques pouvant expliquer les réajustements du fleuve depuis le 19^{ème} siècle et la formation du système anastomosé actuel. La Loire est un hydrosystème fluvial anthropisé, un anthroposystème fluvial. Aussi, l'étude fine de plus de deux siècles de changements socio-économiques apparaissait indispensable pour expliquer les impacts respectifs des différentes formes d'occupation humaine avant l'évolution morphodynamique intensive du lit de la Loire (chapitre 6). La navigation, les activités agro-pastorales et les modifications contemporaines du 20^{ème} siècle (extraction de sédiments, prélèvements d'eau pour l'irrigation...) sont corrélées aux réponses du fleuve et des formes fluviales.

Les conditions hydrologiques influent en effet fortement sur la végétalisation du lit soit en la contraignant par des périodes répétées de crues, soit en accélérant les processus de végétalisation par de longues périodes de basses eaux. L'étude fine des chroniques hydrologiques permet ainsi d'évaluer la part des débits, forts ou faibles, signes de hautes eaux ou de basses eaux, dans la végétalisation du lit ligérien.

De nouvelles interrogations apparaissent et permettent d'ouvrir des perspectives en matière de gestion du fleuve en Loire moyenne (chapitre 7).

Conclusion générale : la synthèse des résultats et les enseignements à retenir

Cette longue conclusion générale permet de faire le bilan des résultats obtenus tout le long du développement scientifique. A partir des niveaux d'échelles, moyenne et grande, des vitesses d'évolution des formes fluviales et des seuils d'interactions Sociétés-Environnement ont été mis en lumière. De nouvelles connaissances sont définies et une véritable réflexion concernant les systèmes en anabranches et les anthroposystèmes fluviaux est ainsi engagée (Conclusion finale).

Chapitre 1 - Le cadre d'étude

- A. Le cadre scientifique : de l'étude de l'hydrosystème fluvial aux systèmes anastomosés de la Loire moyenne
- B. Cadre géographique : La Loire des îles

Chapitre 2 - Le cadre méthodologique de la thèse

- A. Méthodologie à moyenne échelle : sources et méthodes de l'analyse spatiale
- B. Méthodologie à grande échelle : méthodes de caractérisation des vitesses annuelles et pluri-annuelles de sédimentation et d'érosion de la Loire des îles
- C. Méthodes d'analyse des facteurs hydro-climatiques et socio-économiques
- D. Le cadre institutionnel et financier

Chapitre 1- Le cadre d'étude

A. Le cadre scientifique : de l'étude de l'hydrosystème fluvial aux systèmes anastomosés de la Loire moyenne

Il reste nécessaire de replacer la thèse au sein des courants de pensée en géomorphologie fluviale, puisque notre approche se développe avant tout dans cette discipline. Nous avons posé en introduction un certain nombre d'interrogations sur les systèmes anastomosés en général. Il convient de mieux repositionner notre recherche par rapport à des courants de recherche que nous considérons comme essentiels. Notre recherche se fonde sur des acquis fondamentaux et se donne comme objectif d'apporter de nouveaux champs de compréhension sur les systèmes anastomosés. A travers l'exemple de la Loire moyenne, nous explorons ces nouveaux champs et, par là même, cherchons à développer de nouvelles connaissances sur le fleuve lui-même.

1). Les concepts fondamentaux

a). Des concepts fondamentaux adaptés à la Loire

- Notre positionnement scientifique s'inscrit dans l'approche systémique (Chorley et Kennedy, 1971) et les grands acquis en géomorphologie fluviale de ces 30 dernières années. Ces avancées récentes ont permis une meilleure approche des cours d'eau par le biais de concepts fondamentaux forts. Ainsi, le concept de système fluvial au sens de S.A. Schumm (Schumm, 1977) a ouvert la voie à la fin des années 1970 à de nouvelles approches des cours d'eau. Le système fluvial assure la prise en charge et l'évacuation des flux d'eau et de sédiments. Ce qui implique des interrelations entre les différents éléments du système fluvial. Nous cherchons justement à connaître la place du système anastomosé lui-même dans le budget sédimentaire de la Loire moyenne. Quelle est la part respective de l'érosion, du transfert et du stockage des sédiments dans ce compartiment du système fluvial Loire ? Notre travail concerne de ce fait les conditions de transfert des flux hydro-sédimentaires. En nous intéressant aux systèmes anastomosés nous tentons de comprendre la place de chaque forme fluviale au sein de ce type de système fluvial. Comment se réalisent les processus érosion-sédimentation au sens de S.A. Schumm dans notre modèle

de systèmes anastomosés en milieu tempéré (Figure 8) ? Quelles sont les zones de production et de stockage des sédiments au sein même de la Loire des îles ?

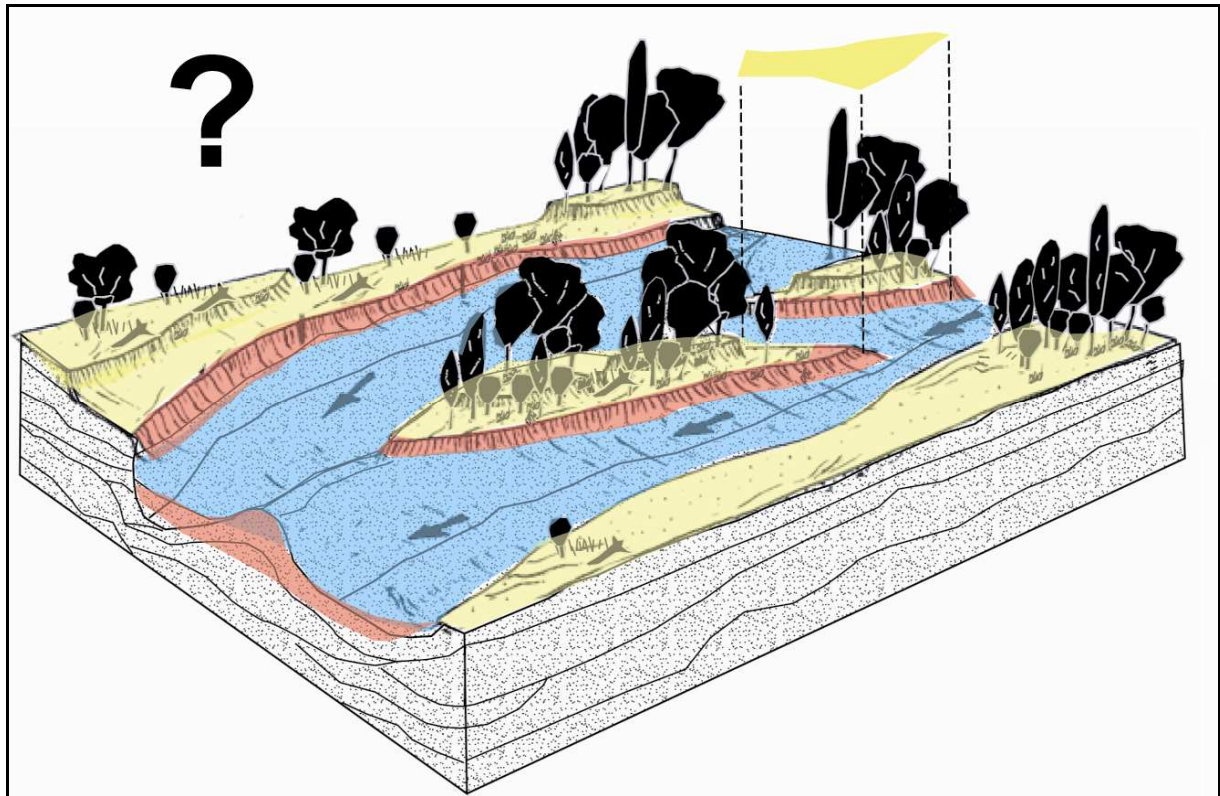


Figure 8 – Part de l'érosion et de la sédimentation à l'échelle de la Loire des îles.

Les processus sédimentaires ne sont pas forcément ordonnés dans une logique amont-aval. L'érosion se réalise alors préférentiellement sur les berges et le fond du lit, alors que le stockage actuel semble s'effectuer sur les îles, les marges et les bras secondaires.

- Ce concept fondamental de la géomorphologie fluviale a trouvé un « pendant » écologique, au début des années 1980 : le concept de « continuum fluvial » (Vannote et *al.*, 1980) (Figure 9). Le continuum sédimentaire et le continuum écologique ne sont finalement qu'un même continuum fluvial puisque les transferts hydro-sédimentaires s'effectuent dans une même direction amont-aval. Pour la Loire, ce concept de continuum fluvial a trouvé une place de choix parmi les approches naturalistes en associant les milieux aquatiques à la dynamique fluviale. Pour notre part, nous tentons de l'appliquer en mettant en relation la dynamique fluviale, les types de formes fluviales et les éléments biologiques. D'autres avancées scientifiques sont venues enrichir et améliorer plus récemment ce concept de continuum fluvial.

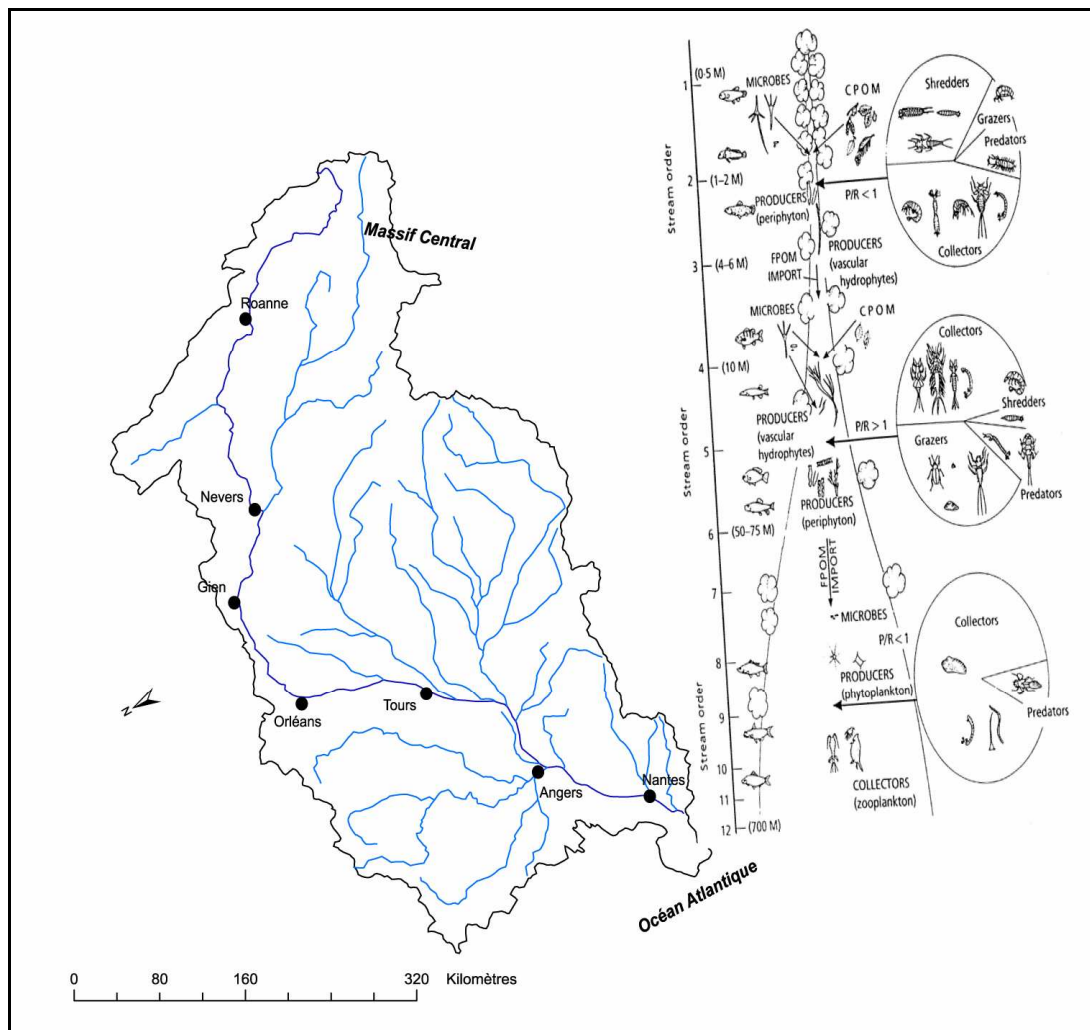


Figure 9 – Le concept de continuum fluvial selon R.L. Vannote (1980).

• Les échanges amont-aval sont finalement bien plus complexes et ne peuvent se limiter à des échanges unidirectionnels (amont-aval). Lorsque apparaît le concept d'hydrosystème fluvial (Amoros & Petts, 1993), les notions de système fluvial et continuum fluvial trouvent une véritable synthèse scientifique (Figure 10). En effet, les systèmes fluviaux sont régis par des échanges hydro-sédimentaires et biologiques pluridirectionnels et pluridimensionnels :

- des échanges longitudinaux (flux amont-aval),
- des échanges transversaux (lien du chenal avec les mésoformes de la plaine d'inondation)
- des échanges verticaux et temporel (lien de la surface avec le compartiment souterrain).

Les grands programmes de recherche récents consacrés à la Loire se sont fondés sur ce concept tout en développant des approches bien spécifiques à ce fleuve ; ce que nous développons juste après. La complexité des échanges entre la plaine d'inondation et le lit de la Loire, et les relations entre les différentes formes fluviales intra-levées nous sont ainsi apparues comme des voies de recherche à développer. Nous portons donc une grande attention à ces approches systémiques pluri-dimensionnelles. La dynamique fluviale reste l'élément essentiel du fonctionnement de ces hydrosystèmes fluviaux (Bravard & Petit, 1997), aussi tenons nous compte des perturbations exercées sur la dynamique fluviale et par là même leurs conséquences sur la « bonne fonctionnalité » de l'hydrosystème Loire.

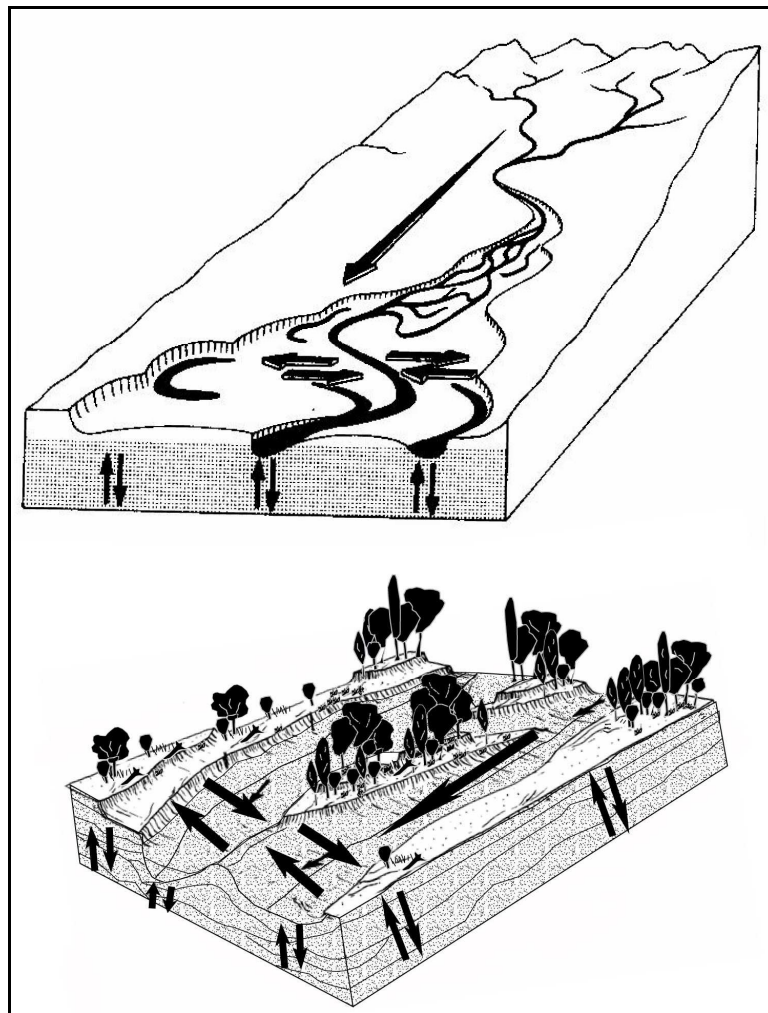


Figure 10 – Le concept d'hydrosystème fluvial.

De nouvelles approches se développent en géomorphologie fluviale. Pour l'étude de la Loire des îles, et de ce système anastomosé, toutes les dimensions d'échanges hydro-sédimentaires et biologiques sont abordées : elles sont les indices du fonctionnement actuel du cours d'eau.

• Les conditions hydrologiques nous semblent d'une grande importance puisqu'elles déterminent l'intensité et l'efficacité du transit des flux liquides et solides dans l'hydrosystème. Le concept de système pulsé ou « *flood pulse concept* » (Junk et *al.*, 1989) correspond parfaitement à cette appréhension fonctionnelle de la dynamique fluviale. Selon les auteurs, la dimension transversale est essentielle. Les crues sont capables de remobiliser et redistribuer les flux solides et également de remanier les écosystèmes aquatiques et humides en créant des mosaïques d'habitats diversifiés. Ce concept de système pulsé a fait ses preuves sur un grand hydrosystème fluvial comme l'Amazone, mais il nous apparaît important d'adapter un des fondements de ce concept pour notre étude d'un système anastomosé en milieu tempéré : celui de l'influence des crues sur le couvert végétal de la plaine d'inondation. La rivière Tagliamento en Italie constitue un des exemples les plus pertinents en matière de contrôle de la végétation alluviale par la dynamique fluviale pulsée en milieu tempéré (Van der Nat et *al.*, 2002 ; Tockner et *al.*, 2000). L'équipe de K. Tockner apportait ainsi une amélioration au concept de Junk et *al.* en l'adaptant à une zone tempérée et en rajoutant de nouvelles variables d'influence (température, topographie) (Figure 11). Ce concept amélioré a ainsi été adopté pour la restauration de la forêt alluviale rhénane (Heuzé et Schnitzler, 2006) en redonnant les conditions d'un système pulsé à la plaine alluviale coupée du lit vif par le système séculaire des digues. E. Gautier et *al.* (2007) parlent du « maintien des pulsations dynamiques » de la Loire au regard de son régime hydrologique immodéré. La Loire est en majorité coupée de sa plaine d'inondation par le biais des levées. Comment un système pulsé peut-il se révéler dans ce contexte d'aménagement ? En observant et analysant des crues de diverses intensités, dans quelle mesure l'hydrosystème Loire est-il un système pulsé ? Nous tentons de répondre à ces questions notamment par l'analyse fine d'une crue historique survenue en décembre 2003. **Nous intégrons ce concept de pulsation à notre étude sur l'hydrosystème Loire, en nous appuyant sur le suivi de conditions hydrologiques variées et sur l'analyse des crues dites morphogènes en contexte de pulsation dans la plaine d'inondation.**

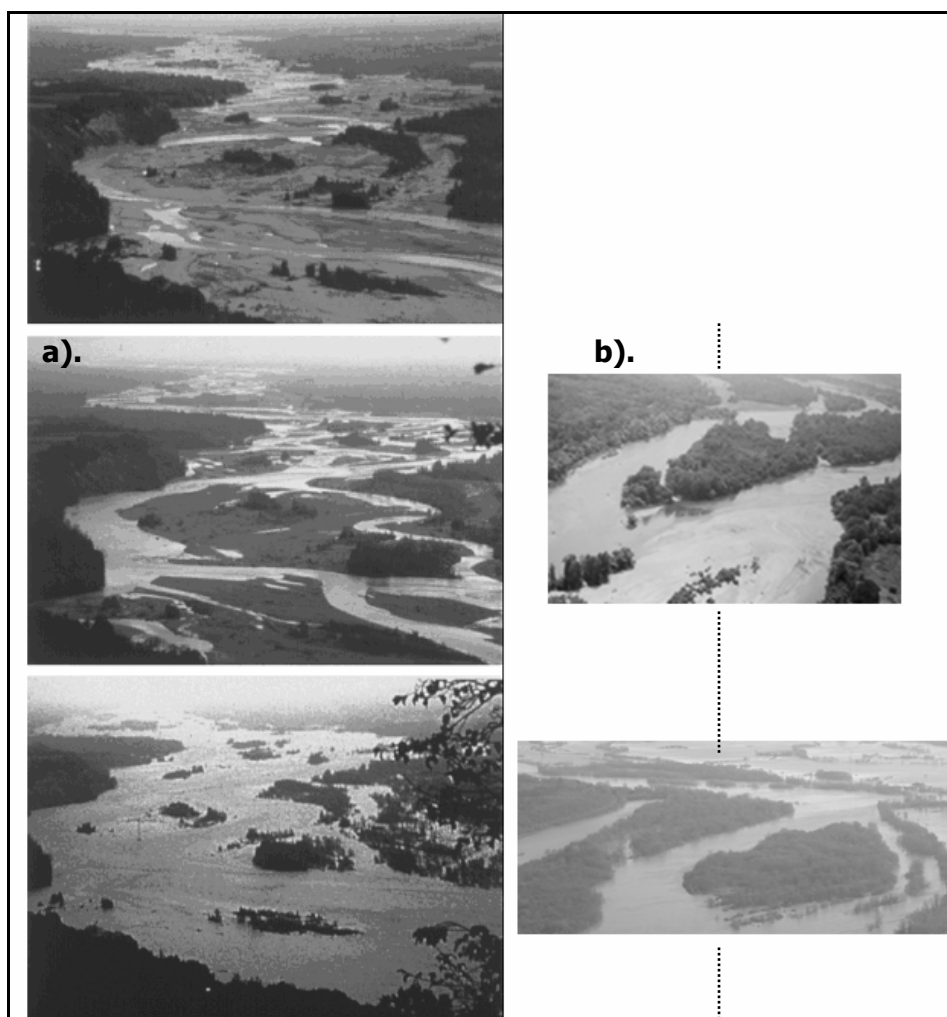


Figure 11 - Application du concept de système pulsé à la rivière italienne Tagliamento. K. Tockner, F. Malard et J. V. Ward (2000) prennent la température comme variable de contrôle sur la végétation. On entre dans des courants de recherche de plus en plus aigus et appliqués à un type de système fluvial. La Tagliamento (a) offre des caractéristiques proches du système anastomosés de la Loire moyenne (b) : régime hydrologique associé à un climat tempéré, réseau de bras secondaires et importance des îles.

- Les Programmes Environnement Vie et Sociétés du CNRS (PEVS) et les Programmes Interdisciplinaires de Recherche sur l'Environnement (PIREN) Seine et Rhône ont été de véritables courants de pensée à eux seuls, car des concepts novateurs et fédérateurs y sont nés et y ont été développés. Ces programmes de recherche français ne sont pas nés du jour au lendemain puisque des études consacrées à la Seine et au Rhône (PIREN Rhône, 1982; Bravard, 1987) ont déjà émergé dans les années 1980. Ce qui ne fut pas le cas pour la Loire, laquelle n'a fait l'objet que de monographies spécialisées jusqu'au milieu des années 1990.

La Zone Atelier Loire, lancée en 2001, décline largement le concept d'**anthroposystème fluvial** à travers les multiples disciplines consacrées au fleuve. « Anthroposystème fluvial » est une notion fédératrice et cohérente des Zones Ateliers du CNRS (voir description plus loin) et tout particulièrement de la ZAL dans l'ensemble du bassin versant ligérien. Ce concept situe tout système fluvial dans une dépendance à l'action des sociétés. Les recherches en environnement, comme celle que nous menons ici, placent en avant le rôle de ces sociétés et leurs impacts sur les composantes physiques, biologiques et écologiques des hydrosystèmes fluviaux. Nous inscrivons donc fortement nos recherches dans ce concept d'anthroposystème fluvial, étant donné l'appartenance de notre équipe aux axes de recherche en Loire moyenne au sein de la ZAL. L'approche géographique se développe d'ailleurs dans ce sens en consacrant une bonne partie de l'interprétation à ces relations Sociétés/Fleuve-Environnement. L'axe transversal AT « Anthroposystèmes marginaux » tient comme objectif de mieux comprendre les formes fluviales comme les îles et les francs-bords. Ces formes fluviales sont qualifiées de marginales dans l'hydrosystème fluvial du fait de leur place dans le système socio-économique actuel : elles en ont été mises à l'écart. Notre recherche sur le système anastomosé de la Loire des îles se réalise dans cet esprit de mettre en relation les variables de contrôle d'un hydrosystème fluvial, la variable anthropique occupant une place importante.

b). Les avancées scientifiques

Notre recherche s'est amorcée en 2002 et se fonde sur des acquis scientifiques de ces 30 dernières années. Les acquis montrent à la fois le niveau de connaissance sur le fleuve mais également de fortes carences scientifiques sur la Loire, contrairement à d'autres hydrosystèmes fluviaux majeurs en France comme la Rhône et la Seine. Nous verrons que les avancées scientifiques sur la Loire sont très jeunes et révélatrices de la volonté de pallier ces carences. Il convient de préciser que des problématiques chroniques pour les cours d'eau ont été à la base même d'une volonté de mieux comprendre les hydrosystèmes fluviaux.

- Les questions de l'évolution historique et de la métamorphose fluviale ont constitué les premières grandes voies de recherche en géomorphologie fluviale dès les années 1980 sur les grands hydrosystèmes fluviaux. Ces voies ont apporté des avancées scientifiques sur le fonctionnement des hydrosystèmes fluviaux en montrant les phases de formation des plaines d'inondation actuelle depuis le Tardiglaciaire. Les travaux sur le Rhône et ses affluents ont démontré l'intérêt des archives sédimentaires pour reconstituer les métamorphoses et les phases de réajustement fluvial d'une plaine d'inondation (Bravard, 1987 ; Peiry, 1988 ; Salvador, 1991 ; Arnaud-Fassetta, 1998). Nous nous inscrivons entièrement dans le courant de pensée de l'école française de géomorphologie fluviale initié par J.P. Bravard dès les années 1980 (Bravard, 1987). Ses travaux de recherche en particulier sur le Rhône ont permis d'une part, de développer un regain d'intérêt scientifique vis-à-vis des grands hydrosystèmes fluviaux français et, d'autre part, de démontrer des points fondateurs en matière d'étude des cours d'eau, notamment les héritages morpho-sédimentaires des plaines d'inondations actuelles. Les travaux sur la métamorphose fluviale et l'évolution historique n'ont été réalisés que bien plus tard pour le Bassin de la Loire. Il faudra attendre le lancement des programmes pluridisciplinaires du milieu des années 1990, comme nous le décrivons ci-après.

- Il est important de noter que les années 1970-fin 1980 ont été consacrées à des études très spécialisées sur la Loire. Ainsi, l'inquiétude face, d'une part, à la pénurie en sédiment, et d'autre part, à l'incision du lit, a incité à mener des études sur les ressources alluvionnaires de la Loire (Berthois, 1972 ; Maillard, 1972) puis à dresser l'ampleur de l'impact de l'industrie de granulats (Gasowski, 1994 ; Calard et Karlsson, 1994 ; Dambre et Malaval, 1993 ; Brossé 1982).

- Ces mêmes années voient l'émergence des revendications écologistes et naturalistes. Les premières études sur la végétation et les ressources biologiques de la vallée de la Loire sont menées essentiellement par les Conservatoires Régionaux d'Espaces Naturels et les DIREN Centre et Bourgogne (Braque et Loiseau, 1980 ; Bugnon et *al.*, 1983 ; Corillion, 1982 ; Cornier, 2002; Loiseau et Felzines, 1992, 1995 ; Schnitzler, 1995). C'est autour d'équipe de

recherche spécialisée en écologie que vont se développer à la fin des années 1980 les travaux sur les hydrosystèmes fluviaux français et plus précisément sur le Rhône et ses affluents (Amoros et *al.*, 1987 ; Pautou et *al.*, 1989 ; Pautou et *al.*, 1985 ; Pautou, 1984) : la végétation alluviale constitue le point de recherche de ces équipes de Lyon. D'autres hydrosystèmes fluviaux sont étudiés comme le Rhône (Rhin et Seine), et surtout les relations entre écologie et géomorphologie fluviale se renforcent d'emblée (Bravard et *al.*, 1997 ; Amoros et Petts, 1996). La Loire semble curieusement avoir échappé à cet élan scientifique des années 1980-1990. Il faut attendre le milieu des années 1990 pour qu'émerge le premier vrai programme de recherche pluridisciplinaire consacré au fleuve et à son bassin versant. C'est ainsi qu'apparaît en 1993 le LIFE Loire Nature.

2). Les programmes de recherche : les fondements et les nouvelles voies scientifiques

Nous distinguons deux ensembles de programmes : l'un regroupe les programmes nationaux à l'origine de l'élan scientifique consacré à la Loire ; l'autre concerne les grands programmes pluridisciplinaires du CNRS (Figure 12).

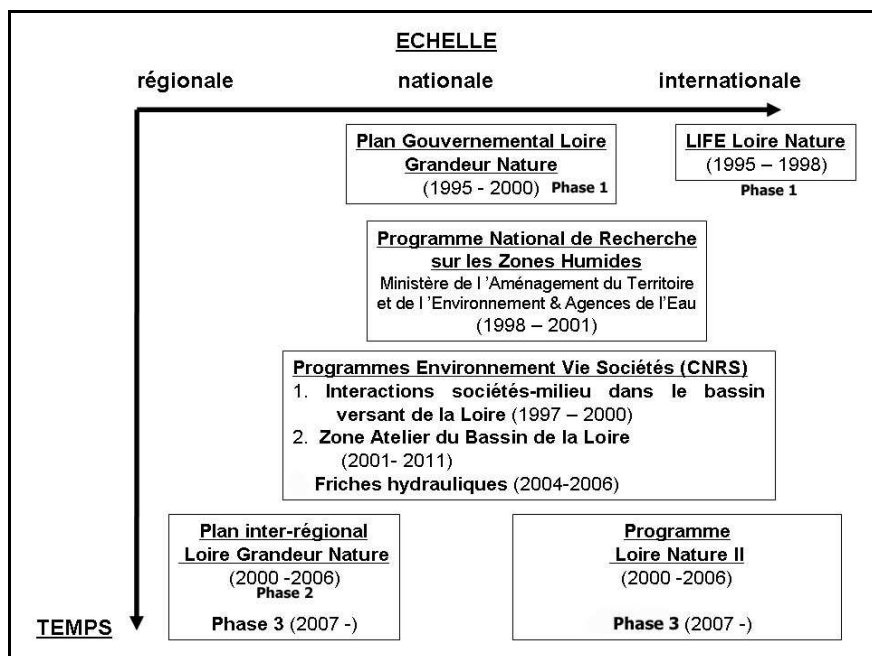


Figure 12 – Programmes pluridisciplinaires majeurs pour le bassin versant de la Loire. Ces dix dernières années ont marqué l'émergence d'une revalorisation scientifique du fleuve notamment grâce aux *Programmes Environnement Vie et Sociétés* du CNRS. Le Plan Loire Grandeur Nature est avant tout un programme de gestion.

a). Les premiers programmes

- Le Plan Loire Grandeur Nature (1994-...)

Dans les années 1980-1990, la recherche française en général s'intègre de plus en plus dans la société ; le fondamental rejoint l'application civile. Cette intégration se réalise également sur le fleuve. Ces revendications d'ampleur internationale contre les projets de grands barrages dans le haut bassin de la Loire ont finalement abouti à des moratoires et au retrait discret de l'EPALA, mais aussi à un fort investissement de l'Etat français avec la création du Plan Loire Grandeur Nature en 1994. Le PLGN d'abord national devenu inter-régional n'est pas un programme de recherche en soi. La phase 3 s'est mise en place en 2006, et son volet « recherche » est désormais placé sous la houlette de l'Etablissement Public Territorial de Bassin Loire. Le volet géomorphologie a abouti à la mise en œuvre de modélisation numérique du lit de la Loire et de certaines études géomorphologiques (Ginestet et Gautier, 1999 ; Halbecq, 1997). Le service écologique a apporté un bon nombre d'études et a contribué à l'établissement de rapports clés en matière de restauration du lit de la Loire (Maman, 1999 ; Cornier et Maman, 1999 ; Cornier, 1996). Le guide méthodologique de l'entretien et de la restauration du lit de la Loire et de ses affluents est directement issu de ces études (Bacchi et Berton, 1997 ; EPPLGN, 2002). Ce guide est une référence pour les gestionnaires du fleuve et nous en tenons compte pour nos études sur les bras secondaires et les îles afin d'apporter d'autres clés de compréhension de leur fonctionnement. Les deux seules thèses en écologie et dynamique fluviale financées par le Plan Loire ont permis une grande avancée sur la dynamique végétale en Loire moyenne (Cornier, 2002) et une meilleure acquisition des données en sédimentologie des bras secondaires de la Loire moyenne (Rodrigues, 2004). Nous nous servons de ces avancées scientifiques respectivement pour caractériser et compléter la dynamique végétale dans le système anastomosé de la Loire des îles et pour comparer nos résultats issus de l'approche fine des chenaux expérimentaux.

- Le programme européen de protection, LIFE LOIRE NATURE I, (LIFE est l'outil financier des mesures de protection environnementale). Ce premier programme est intervenu de 1993 à 1998 sur l'ensemble de la Loire en y sélectionnant 8 sites

représentatifs, dont celui de « La Loire des îles entre La Charité et Sancerre ». Le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, l'Europe, le W.W.F. et Espaces Naturels de France (organisme coordonnateur des C.R.E.N.) ont travaillé ensemble sur ce programme. Le but du LIFE était de « *préserver un espace de liberté à l'hydrosystème et les habitats naturels ligériens* », en y intégrant une démarche scientifique. C'est en somme la première fois en France qu'un LIFE est consacré à un hydrosystème fluvial et surtout implique une démarche scientifique pluri-disciplinaire, dont la géomorphologie fluviale, comme fondement dans la compréhension du fleuve. C'est d'ailleurs dans le cadre de ce Life que sont menées les premières études de l'évolution historique du fleuve (Guerin, 1996 ; Gautier et *al*, 2000). Depuis, ce LIFE pionnier s'est poursuivi sous la forme du programme Loire Nature II de 1998 à 2002, comme représentant du volet écologique du Plan Loire Grandeur Nature. L'aspect scientifique s'est fortement développé faisant même de la géomorphologie fluviale une discipline dominante et réclamée. Aujourd'hui, Loire Nature III est devenu un acteur essentiel de la gestion environnementale dans le bassin versant de la Loire et selon moi, un modèle de développement durable en France. La collaboration scientifique est devenue une composante indispensable à la mise en place des programmes de gestion et s'est naturellement créée grâce au développement en parallèle de véritables programmes de recherche (Collectif, 2006).

- Le Programme National de Recherche sur les Zones Humides (PNRZH, 1998-2001, Agences de l'Eau et MATE) a consacré une large place à la dynamique d'évolution du fleuve avec une approche pluri-disciplinaire (Gautier et *al*, 2001). Inscrit parmi les 16 PNZRH français, ce programme a posé les bases intellectuelles et méthodologiques de cette présente thèse.

Le PNRZH de la Loire a permis l'essor de disciplines multiples dédiées au fleuve. Ce programme pluridisciplinaire a apporté de nouvelles connaissances dans le fonctionnement de la Loire moyenne (Tableau I).

Pour synthétiser, on peut avancer trois points majeurs du programme :

- la complexité du fonctionnement hydrologique et sédimentaire de la plaine d'inondation actuelle et, plus précisément, des zones humides. L'approche hydro-géomorphologique, complétée par des analyses des isotopes de l'eau, a mis en évidence l'hétérogénéité spatiale et temporelle du fonctionnement hydrologique de la plaine : les transferts d'eau entre les nappes, les zones humides et le fleuve s'organisent différemment à l'amont et à l'aval du Bec d'Allier. De plus, à l'échelle de chaque secteur de plaine, les bras morts montrent de fortes dissemblances hydrologiques, en fonction de leur proximité au fleuve, mais aussi et surtout, du poids relatif de l'incision du chenal principal et des pompages d'eau agricoles. Le programme consacre également une part importante aux vitesses de comblement des bras morts et à leurs caractères sédimentaires. La métamorphose des formes fluviales s'est accompagnée d'une réponse sédimentaire, qui se manifeste par un changement des processus de sédimentation, des caractéristiques granulométriques, à l'échelle de chaque unité de la plaine (Gautier, 2006).
- Alors que les bras secondaires étaient réputés être les zones de piégeages préférentielles des sédiments, le PNRZH montre que les îles, entièrement négligées jusqu'alors, ont un rôle essentiel dans le stockage sédimentaire. L'étude souligne, sans approfondir la question, le fonctionnement complexe des milieux insulaires.
- La caractérisation du fonctionnement hydrologique et sédimentaire a été le fondement d'une identification des unités écologiques fonctionnelles. Le travail couplé de l'hydro-géomorphologie, de la phytoécologie et de l'analyse des images satellites, appuyé par des analyses statistiques, a démontré la faible représentation spatiale des milieux humides et la faiblesse de la régénération actuelle du tapis végétal par le fleuve, ce qui abouti à une fermeture du milieu et à un vieillissement des cortèges floristiques. « Le constat souligne le faible impact actuel de la Loire, qui autorise le développement durable de formations végétales particulièrement exigeantes quant à la pérennité des facteurs du milieu environnant et surtout à une dynamique fluviale le plus souvent faible (stabilité durable des facteurs édaphiques) ». De plus, « la mise en place de stades forestiers mûrs [...], implique sur le long

terme (plus de 100 ans), l'absence de perturbation forte, qui favorise leur développement et leur maturation (climax édaphique). Sur le plan dynamique, bien que la sédimentation soit active (accrétion mesurée de plusieurs dizaines de centimètres par an), l'énergie des écoulements reste insuffisante en l'état actuel des événements hydrologiques pour régénérer les milieux arborés stabilisés par la forêt de bois dur ». (Gautier et *al.*, 2001).

- L'approche sociale a été menée sur deux fronts : d'une part, l'étude des usages actuels et passés des terres inondables et leurs impacts sur la structuration des paysages et, d'autre part, l'évaluation de l'intégration des politiques de gestion et de protection des zones humides. Ainsi, l'étude montre le lien étroit entre une présence soutenue - dans le temps et dans l'espace - des riverains, la gestion du Domaine Public Fluvial par les services de l'Etat (DDE essentiellement), et la qualité écologique des milieux. Pour schématiser, on peut dire qu'un espace fluvial marqué par la présence humaine (pâturage, occupation du DPF) a des potentialités écologiques meilleures, et par là, est mieux perçu par la société. Enfin, deux points méritent d'être soulignés : i) l'absence de connaissance de la réglementation des zones humides à l'échelle locale, ce qui a pour conséquence le cloisonnement de la gestion faite des zones humides et ii) la complexité excessive de la gestion des terres humides ligériennes, dont une grande partie dépend du DPF (Lewis et Gautier, 2004)

Tableau I – Les références majeures par discipline issues du P.N.R.Z.H.

Thématiques de recherche	Références
Ecologie fonctionnelle	Gautier et <i>al.</i> , 2002 ; Oberti et <i>al.</i> , 2000 ; Anselin, 1998
Morphodynamique fluviale	Gautier et <i>al.</i> , 2002 ; Gautier, 2001 ; Gautier et <i>al.</i> , 2000 ; Halbecq, 2000 ; Rousseau, 1999 ; Gaultier, 1999
Flux liquides et solides	Grosbois et <i>al.</i> , 2000 ; Negrel et <i>al.</i> , 1999 ; Grosbois, 1998
Sociologie	Lewis, 2001 ; Denis, 2000
Géomatique	Couderchet, 2000 ; Desmedt, 1999

Ces avancées scientifiques en hydro-dynamisme fluvial ont ouvert des voies à la recherche sur les systèmes anastomosés de la Loire moyenne. Nos travaux en sont inspirés et ont été

réalisés dans l'optique de renforcer ces premiers niveaux de connaissance. Nous reprenons d'ailleurs les sites du Bec d'Allier-Marzy (Site Atelier 1) et de Soulangy (Site Atelier 2) pour compléter notre approche réalisée essentiellement sur le Site Atelier 3 (Réserve Naturelle du Val de Loire) au sein duquel nous avons développé notre méthodologie multi-scalaire.

b). Les programmes en environnement

- Les travaux du **Projet Collectif de Recherches** (PCR) « Géoarchéologie de la Loire moyenne et de ses marges » (coordonnée par N. Carcaud et M. Garcin 1996-1999) et ceux du Programme **Interactions sociétés-milieus dans le bassin versant de la Loire, Tardiglaciaire / époque industrielle** (CNRS, 1997-2001) ont éclairé une bonne partie des interrogations en matière d'archéologie, de géomorphologie et de paléoenvironnements pour la Loire moyenne à l'Holocène. Ils sont aussi à l'origine du nouvel intérêt scientifique porté au fleuve. Les évolutions paysagères sont en lien direct avec l'approche à temporalité courte de cette présente thèse : nous considérons ces héritages scientifiques comme indissociables des approches menées sur l'Actuel.

Depuis 1999, les programmes *Environnement Vie et Sociétés* du CNRS ont développé les Zones Ateliers (ZA). Les zones ateliers sont des espaces d'observation des différents anthroposystèmes sur le long terme. En 2003, les ZA ont été rattachées à l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) au moment du projet de création de la cinquième division "Sociétés et Environnement" au sein du CNRS. En 2005, les ZA ont été rattachées au nouveau département du CNRS "Environnement et Développement Durable" (EDD). La Zone Atelier Bassin versant de la Loire (ZAL) en fait à présent partie.

La démarche pluri-disciplinaire et les relations entre les pas de temps courts et longs sont l'essence même de la ZAL. Ce programme de recherche a été soutenu à l'origine par le comité "Zone Atelier" du "Programme Environnement, Vie et Société" (PEVS) du [CNRS](#) ; coordonnée par le CNRS et le BRGM, lancée en 2001 pour « observer dans le long terme (de 15 000 ans BP jusqu'à l'Actuel; Tardiglaciaire et Holocène) un anthroposystème complexe développé sur le bassin versant de la Loire » (Rapport ZAL, 2002)

Ces récentes recherches interdisciplinaires ont établi les principales phases de réajustement du fleuve au cours de l'Holocène et ont mis en évidence l'importance des actions anthropiques sur le fonctionnement hydro-géomorphologique et écologique de la Loire (Gautier et *al.*, 2007; Carcaud et *al.*, 2002). Ces recherches apportent un éclairage nouveau sur les relations entre les sociétés riveraines et le fleuve et ont mis en évidence deux faits essentiels : l'ancienneté des aménagements et le rôle déterminant des sociétés riveraines dans le forçage du cours du fleuve. Les travaux du PCR Géoarchéologie et de la ZAL ont déterminé les rythmes de la métamorphose du fleuve depuis le Tardiglaciaire en relevant plusieurs grandes phases (Figure 13) :

- le tressage du fleuve et l'élargissement de la plaine d'inondation au début Tardiglaciaire, liés à la déglaciation et à l'exhaussement du plancher alluvial par un apport extrême en sédiments depuis les hauts bassins (le schéma théorique de S.A. Schumm en 1977 s'applique alors très bien dans ce contexte) ;
- la rétraction de la bande active entre le Tardiglaciaire et l'Holocène, correspondant à une concentration des flux liquides dans un même chenal. Les Vals sont alors déconnectés « naturellement » de la bande active ;
- ces deux phases de métamorphose précèdent une phase d'anthropisation forte par le biais d'un forçage du cours du fleuve depuis 2000 ans environ (depuis la période gallo-romaine). Le concept d'anthroposystème fluvial apparaît alors comme fondamental dans ce contexte de forçage ;
- le temps du forçage du cours correspond, dans sa plus grande moitié, au Petit Age Glaciaire (PAG du Moyen-Age au 19^{ème} siècle). Pour l'Europe occidentale, ce PAG a correspondu à des hivers rudes, de fortes précipitations et à de grandes crues. Celles du 19^{ème} ont été particulièrement marquantes en Europe de l'Ouest pour la Loire, le Rhône, le Danube... Le fleuve connaît une phase de réajustement à ces nouvelles conditions tout en étant forcé par les sociétés humaines. C'est d'ailleurs dans le réajustement actuel depuis la fin du PAG que nous plaçons notre recherche sur le fleuve. A quel type de réajustement ce style fluvial anastomosé correspond-il exactement ? Il s'agit de déterminer si le style anastomosé est une phase dans le

réajustement fluvial ou alors un style de réponse définitive dans le réajustement fluvial. Il ne faut pas oublier que les levées, érigées au cours du 18^{ème} et 19^{ème} siècles constituent les éléments les plus forts de l'anthroposystème. Aussi, le réajustement fluvial répond aux contraintes subies par ces levées (Garcin et *al.*, 2006).

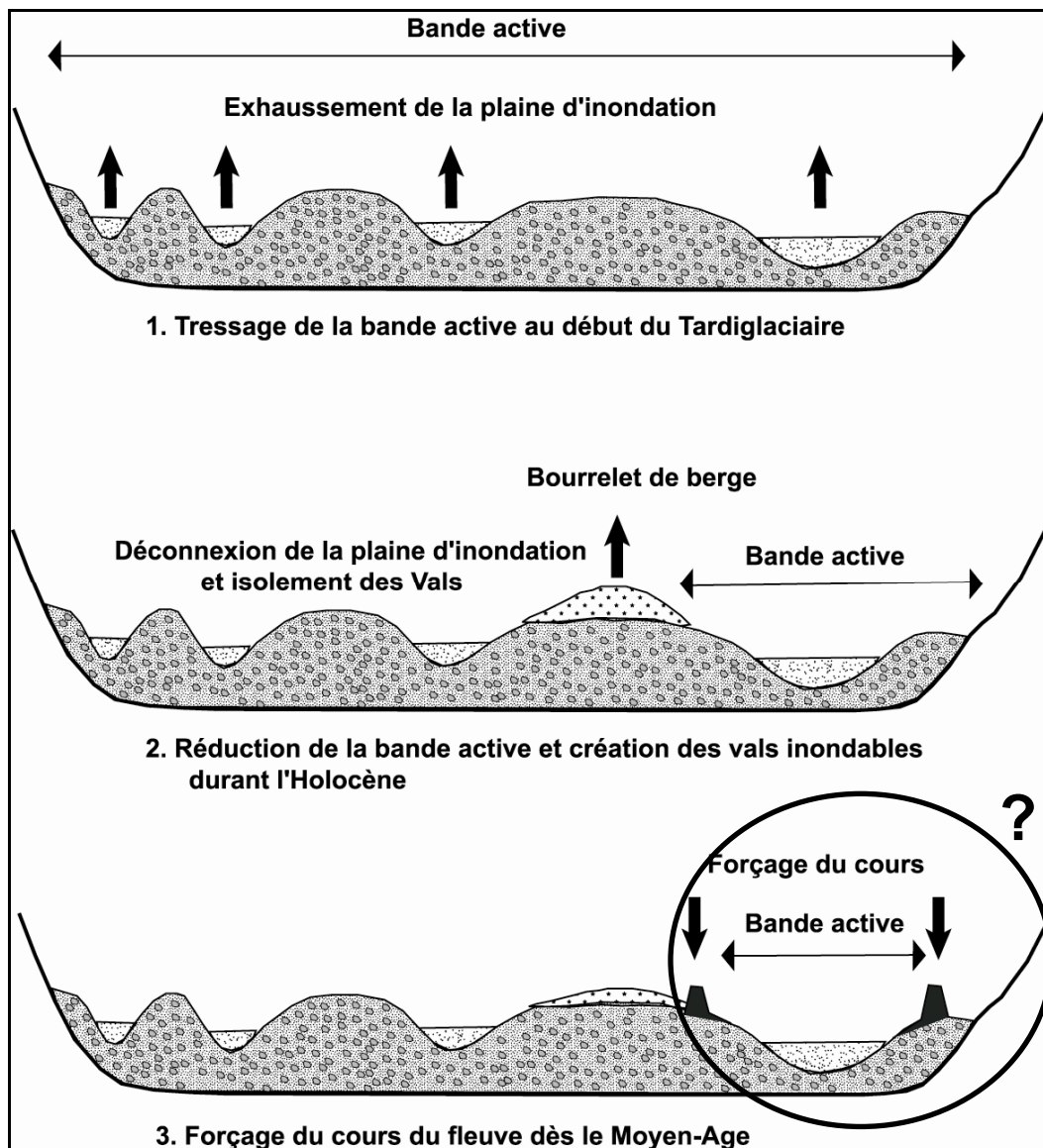


Figure 13 – Les grandes phases de métamorphose de la plaine d'inondation de la Loire.

Depuis le Tardiglaciaire, on note l'isolement progressif des vals inondables et l'importance du forçage du cours du fleuve dès le Moyen-Age (Grivel, 2007 d'après Carcaud, 1999). Notre travail prend le relais de cette recherche en se positionnant sur l'évolution historique de la bande active très tôt forcée par les sociétés humaines.

Notre travail de recherche s'intègre ainsi à l'Action Transversale AT « Anthroposystèmes marginaux » de la ZAL. Nous partons donc de l'hypothèse que cet anthroposystème

fluvial, la Loire des îles, correspond en fait au réajustement actuel de la Loire. Ce style ainsi développé actuellement par le fleuve dans cette partie de son bassin semble enregistré toutes les perturbations subies par la Loire aux époques Moderne et Contemporaine. Nous replaçons donc notre approche dans la réflexion sur la métamorphose et le réajustement fluvial développée sur la Loire par les approches paléo-environnementales du PCR Géoarchéologie et ceux des PEVS du CNRS. Notre approche temporelle courte s'insère donc dans la fenêtre « Actuel » de la ZAL consacrée à l'évolution et à la co-évolution du fleuve depuis 15 000 ans jusqu'à l'Actuel.

De nombreuses thèses sont en cours ou ont été achevées très récemment et montrent cette dynamique engagée dans la ZAL pour mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique actuel et passé du fleuve à travers différentes démarches disciplinaires : les relations végétation-sédimentation dans les bras secondaires en Loire moyenne (Rodrigues, 2004), le rôle de la végétation dans la dynamique fluviale de l'Allier (Petit, en cours), la dynamique fluviale du Val d'Orléans au Tardiglaciaire et Holocène (Cyprien, 2001 ; Castanet, en cours).

Cette thèse représente d'une certaine manière le passage scientifique entre le PNRZH et la ZAL. Les ouvertures offertes en géomorphologie fluviale par le PNRZH trouvent leur aboutissement dans le cadre de la ZAL et l'axe transversal dédié aux îles, franc-bords, chenaux secondaires et autres formes fluviales originales.

L'équipe de recherche ainsi constituée d'une part par le réseau d'étudiants des Universités de Paris 1 (Master 2 de Géomorphologie) et de Paris 8 (Master 1 et Master 2 Recherche de Géographie), d'autre part par les ingénieurs du Laboratoire de Géographie Physique, a égrainé des résultats majeurs largement repris et cités dans cette thèse. Cette thèse n'est pas seulement ainsi le fruit d'un travail individuel, mais elle s'est nourrie des données, récoltées le plus souvent ensemble, et des résultats de cette dynamique de Master et de thèses (Tableau II).

Tableau II – Les références récentes de Master et de thèse pour l’Action Transversale AT
« Anthroposystèmes marginaux » de la Zone Atelier Bassin versant de la Loire.

Thématiques de recherche	Références
Hydro-géomorphologie fluviale	Nabet, 2006 ; Depret, 2006 ; Ramond, 2006 ; Nabet 2005; Grivel, 2001
Risque d’inondation et aménagements fluviaux	Temam, en cours ; Temam, 2005 ; Woudstra, 2005; Joyeux, 2004
Paléoenvironnements fluviaux	Grangeret, 2005
Gestion de l’eau	Martinhac en cours ; Martinhac, 2003
Ecologie	Baldeck, 2006

- **Les friches hydrauliques**

Ce travail de recherche s’est également réalisé dans le contexte d’un autre programme du CNRS, celui des Fiches hydrauliques (2003-2005). Il s’agissait de confronter différentes approches scientifiques autour de ces aménagements rentrés dans le domaine du patrimoine industriel, mais agissant toujours dans les hydrosystèmes fluviaux. Pour la Loire, ce programme s’est très facilement développé puisque les aménagements fluviaux obsolètes - mais encore en place - ont un impact lourd sur la dynamique actuelle. L’impact des ouvrages de navigation (levées, chevrettes, épis...) est notamment au cœur de ces recherches consacrées à l’impact des aménagements fluviaux et du déficit sédimentaire (Nabet, 2005).

c). Les thèses en hydro-morphodynamisme sur la Loire

Contrairement aux thèses engagées depuis 1980 sur le bassin du Rhône (Bravard ; 1987 ; Peiry, 1988 ; Gautier, 1992 ; Peiry, 1994 ; Piegay, 1995 ; Vautier, 2000 ; Dufour, 2005), les thèses consacrées à la Loire se sont réalisées sans lien entre elles, dans aucun programme de recherche fédérateur. Sur l’ensemble du bassin ligérien, nous distinguons trois thèses marquantes en hydro-morphodynamisme. Le manque de lien fait qu’elles peuvent être qualifiées chacune de grande monographie dans une discipline bien précise :

- Morphodynamisme et géomorphologie par Yves Babonaux (Babonaux, 1970) : cette thèse demeure une référence en géomorphologie, puisque finalement c’est bien l’unique existante pour la Loire. Elle apporte des données pertinentes sur la charge

(diminution de la granulométrie de l'amont vers l'aval) et les flux sédimentaires en montrant notamment que l'approvisionnement en sédiments pour l'hydrosystème Loire ne provient presque plus de l'érosion des versants des hauts-bassins mais plutôt de l'érosion des berges et du fond du lit. Le schéma type de S.A. Schumm (fig .) est donc bien théorique et notre proposition de schéma du système fluvial à l'échelle du lit anastomosé (Figure) correspond aux constats de Y. Babonaux (1970).

- Hydrologie par Monique Dacharry (Dacharry, 1974). Cette thèse réalise un rigoureux bilan hydrologique de la Loire en amont de Gien. Ce que M. Pardé (1934) décrivait sur le bassin de la Loire, M. Dacharry l'a quantifié à partir d'une analyse fine des débits et des données pluviométriques. Un des intérêts repose sur la fiabilité des sources démontrant que les stations les plus anciennes comme Blois et Gien disposent de données très fiables et exploitables. L'étude des grandes crues du 19^{ème} siècle nous apporte des éléments de compréhension important sur leur intensité et leur place dans l'hydrologie du bassin versant moyen. Nous nous en servons pour l'étude des débits dits morphogènes. Il est nécessaire de préciser que ce travail de recherche s'est réalisé avant la création des grands barrages qui, on le rappelle, contrôlent essentiellement les débits de basses eaux (pour les centrales nucléaires).
- La recherche hydro-écosystémique par Heriniaina Andriamahefa (Andriamahefa, 1999). Cette approche révèle avant tout de la modélisation écologique et paysagère du bassin versant de la Loire. La démarche, reposant sur l'utilisation des statistiques et de la cartographie automatique, demeure cependant très novatrice pour la Loire. Mais, le choix de la petite échelle, celle du bassin, nous amène à limiter certains aspects en hydro-dynamisme. Ainsi, le lit anastomosé n'est pas étudié et les seules données comparables et utilisables pour notre approche concernent les caractéristiques hydro-géologiques et topographiques. La Loire des îles est comprise dans un des tronçons de la Loire moyenne, mais cela ne nous apporte pas d'informations pertinentes sur le fonctionnement de ce type de lit fluvial. Aussi, notre approche multi-scalaire apparaît nécessaire.

Ces monographies ont été réalisées à différentes périodes ; le temps les ayant réunies à un moment donné. Elles constituent des références à part entière que cette thèse propose d'actualiser pour certains thèmes abordés. Les enjeux sur la Loire ont évolué. Nous retenons que seul le P.N.R.Z.H. s'est intéressé au système anastomosé de la Loire des îles. Comme notre travail a pour objectif de comprendre le fonctionnement actuel et passé de ce type de lit fluvial, il convient de dresser un état de l'art sur le niveau de connaissance des lits anastomosés.

3). La question du style fluvial en Loire moyenne

a). Géologie et différents styles fluviaux de la Loire

Comme nos problématiques de recherche reposent sur l'étude d'un système fluvial à chenaux anastomosés en milieu tempéré, avec l'exemple de la Loire, nous avons sélectionné un grand secteur correspondant à ce type de système fluvial. Du Bec d'Allier à Gien, nous pouvons trouver, selon nous, le plus long secteur anastomosé de toute la Loire : la plus forte densité de formes insulaires de tout le bassin versant de la Loire s'y localise.

- Le Bec d'Allier marque l'entrée dans le grand sous-ensemble géographique dit de la Loire moyenne, dans laquelle notre zone d'étude se localise. Ce cadre géographique de la Loire moyenne se termine à une autre grande confluence, le Bec de Maine. Le bassin versant représente ainsi sur cette partie de la Loire moyenne plus d'un tiers de la totalité du bassin (Figure 14).

D'un point de vue géologique, la Loire moyenne s'étend sur des dépôts récents alluvionnaires et correspond à la Loire des vals, grandes plaines sédimentaires voisines du sud du Bassin parisien, au sein duquel les corridors fluviaux trouvent un vaste terrain d'extension et de divagation. Cette divagation « naturelle » ne peut se réaliser qu'en l'absence d'aménagements contraignants. Pourtant comme nous l'avons déjà évoqué, les levées corsètent la Loire moyenne, surtout à partir de Gien ; ce qui pose un facteur supplémentaire dans l'ajustement du système fluvial.

Cette grande plaine sédimentaire est composée de niveaux sédimentaires plus ou moins épais suivant les secteurs. En Touraine, cette épaisseur atteint 15 m ; entre Berry et

Nivernais autour de 6 m (Brossé, 1982). Le stockage des alluvions semble donc peu important dans la première partie de la Loire moyenne (Brossé, 1982). Ce point demeure essentiel lorsque nous abordons le sujet des bilans sédimentaires à l'échelle de nos Sites Ateliers. Quelle est la dimension réelle du stockage sédimentaire en Loire moyenne et plus précisément au sein du système anastomosé de la Loire des îles ?

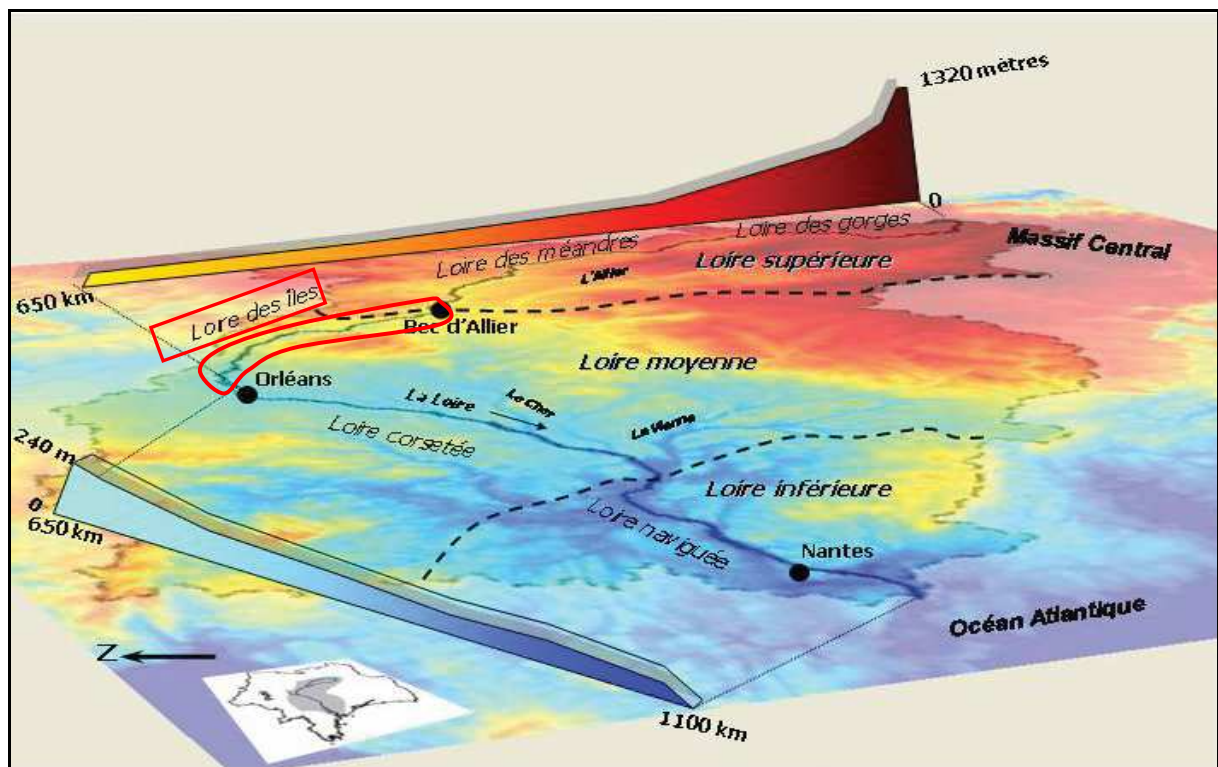


Figure 14 – Régionalisation du bassin versant de la Loire.

De la Loire supérieure à la Loire inférieure, la pente s'amenuise et le fleuve change de style fluvial. La Loire des îles se développe à mi-parcours et avant le corsetage complet du fleuve.

- Du Bec d'Allier à Briare, **l'ensemble géologique** se présente sous la forme d'une vaste table calcaire saignée par des vallées alluviales et caractérisée par l'abondance des formations superficielles (Figure 15) : il s'agit de l'hydro-écorégion des tables calcaires du Sud Loire (Wasson et *al.*, 1993). Ces couches particulièrement perméables vont conditionner un réseau souterrain de nappes. Le rôle de la nappe alluviale ne constitue pas le fondement de notre travail mais ne peut pas être ignoré. Une des variables de contrôle de la dynamique fluviale, la végétation, est en effet fortement dépendante des apports hydrologiques et nutritifs de la nappe alluviale. Aussi, les unités fonctionnelles végétalisées restent fortement liées à ces relations nappes-fleuve.

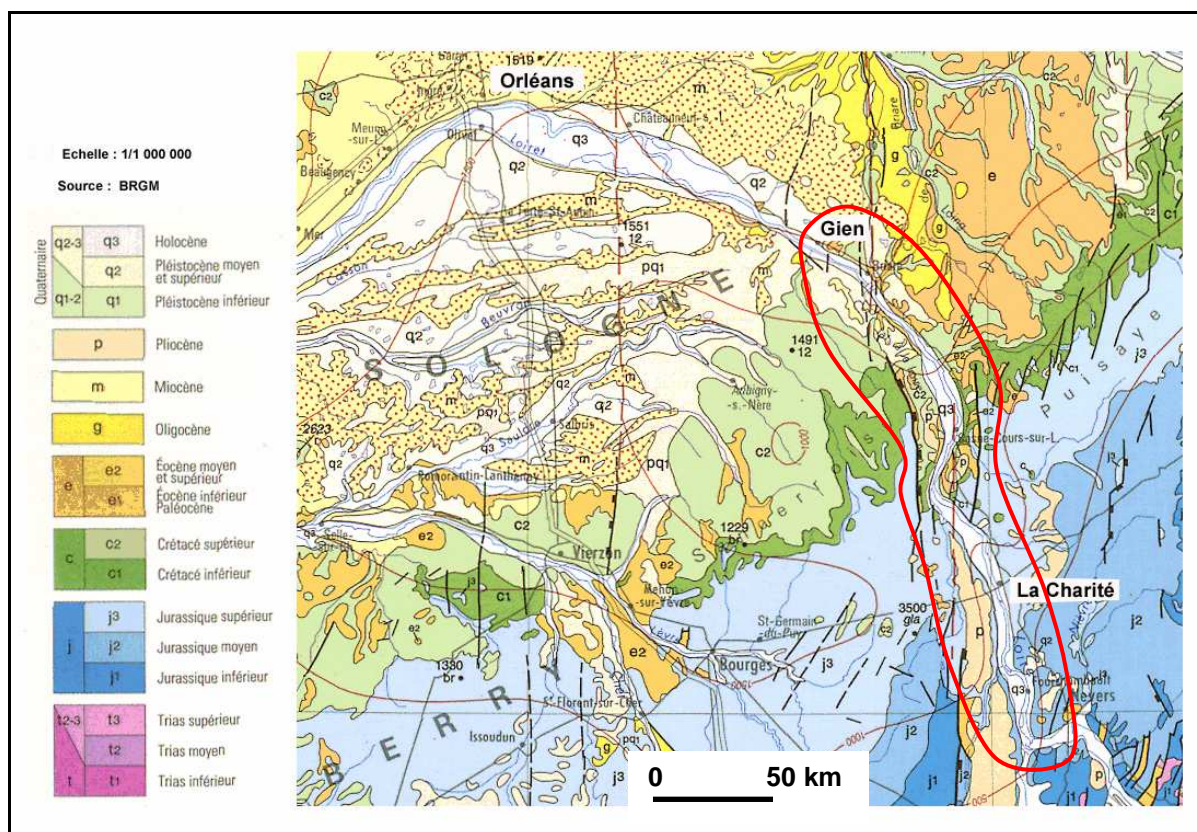


Figure 15 – Géologie du secteur d'étude.

Il correspond au partage de plusieurs ensembles sédimentaires au sein desquels la Loire s'achemine (formations résistantes du Jurassique et du Crétacé). La plaine alluviale est ainsi relativement réduite contrairement au Val d'Orléans.

- **D'un point de vue géomorphologique**, selon Wasson et *al.* (1993), nos Sites Ateliers s'inscrivent dans la morpho-région des vals avec un type de val libre tressé. Cette description en tresse ne correspond pas du tout au style anastomosé de nos Sites Ateliers et encore moins à la classification des chenaux anastomosés de A.D. Knighton (1998).

Ce premier niveau d'aréalisation par Wasson peut être amené à un stade plus fin de hiérarchisation. Les Sites Ateliers 1, 2 et 3 se trouvent inclus dans le tronçon I compris entre le Bec d'Allier et Sancerre déterminés par les études du Plan Loire Grandeur Nature (Ginestet et Gautier, 1999). La Loire, dans ce tronçon de 51 km, suit un alignement de failles de direction nord-sud. La vallée alluviale repose ici sur des couches géologiques datant du Jurassique. Les auteurs attribuent à ce secteur une pente de 0,000487. Le val est dans ce cas présent dissymétrique : la rive droite est quasiment accolée à un coteau (coteau de Pouilly-sur-Loire, coteau de Pougues-les-Eaux) alors que la rive gauche est le domaine

d'extension de la plaine d'inondation. La présence des levées en rive gauche réduit fortement cette plaine d'inondation.

● **D'un point de vue hydrogéomorphologique**, la Loire se décline en de nombreux styles fluviaux influencés par la variété des conditions hydrologiques, les contraintes géologiques et la fluctuation de la pente. La variété de styles fluviaux peut se résumer en une simple typologie du lit, de la source à l'estuaire (Bazin et Gautier, 1996) (Figure 16) :

- ☞ Type 1 : un chenal unique dans les gorges des hauts-bassins cévenols
- ☞ Type 2a : lit à bras multiples
- ☞ Type 2b : méandres très mobiles (comme les méandres de Guilly)
- ☞ Type 2c : **bras multiples enserrant de grandes îles boisées (du Bec d'Allier à Briare).**

Le style en anabranches (Nanson – Knighton, 1996)

- ☞ Type 3a : chenal enserré par des digues. Les variations sont assez importantes dans ce type puisque l'on passe successivement depuis Briare d'un chenal rectiligne parfois entrecoupé d'îles, à un chenal à méandres (entre Saint Benoît et Orléans), puis à des bras multiples (Montlouis).
- ☞ Type 3b : retour des grands secteurs à îles à partir de Tours (comme à Bréhémont) avec toujours ce corsetement
- ☞ Type 4 : un chenal unique très aménagé accédant directement à l'estuaire.

Cette diversité de styles fluviaux laisse apparaître une omniprésence des îles dans le paysage fluvial, essentiellement depuis le Bec d'Allier. Elles tendent à disparaître là où le fleuve est le plus contraint par des levées. C'est d'ailleurs ces secteurs à îles au-delà de la confluence Allier-Loire qui nous intéressent. L'omniprésence de ces formes fluviales dans le lit de la Loire est marquante, d'où l'intérêt de les étudier de près.

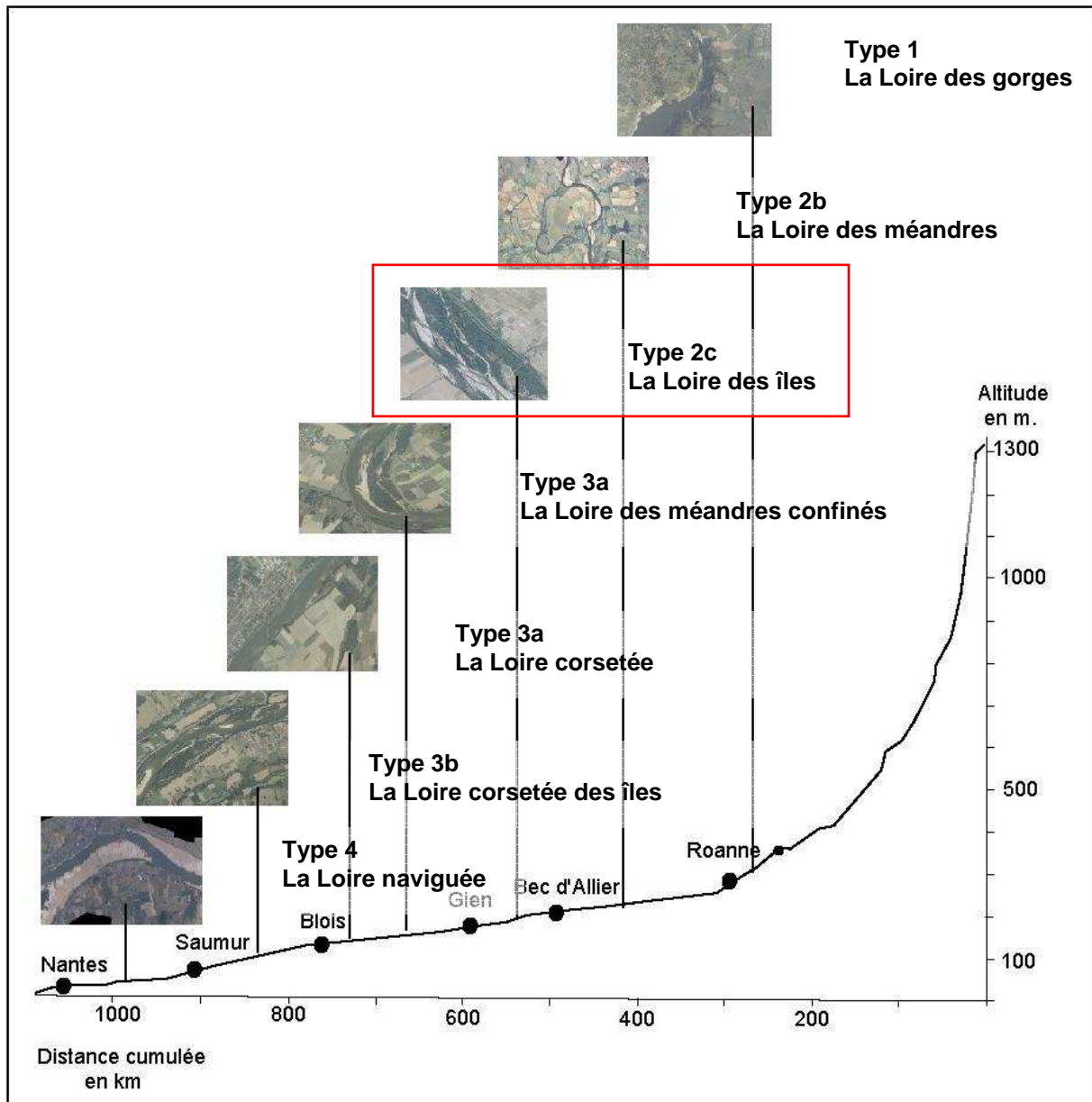


Figure 16 – Les grands styles fluviaux de la Loire.

Les îles sont omniprésentes dans la vallée de la Loire mais le secteur de la Loire des îles concentre la plus grande densité et variété.

b). De l'anastomose aux systèmes en anabranches

Nous considérons que notre discipline, la géomorphologie fluviale, est à même de comprendre le fonctionnement dynamique de l'hydrosystème fluvial à travers le prisme des unités fonctionnelles : les îles, les bancs mobiles, les chenaux secondaires et les marges latérales (Gautier 2006 ; Gautier & Grivel, 2006).

• D'une manière générale, la définition des styles fluviaux avec des îles et des chenaux multiples est sujet à controverse dans les divers ouvrages généraux d'hydrologie et de géographie physique. Certains auteurs parlent de « *divagation* » (Viers, 1967), de « *chenaux entrelacés* » (Coque, 1993), de « *chenaux anastomosés* » (Tricart, 1977) ou de chenaux en tresses. Mais, on a souvent confondu chenaux anastomosés et chenaux tressés (Le Cœur et *al.*, 1996).

Des auteurs ont marqué plus précisément le passage d'un style anastomosé à un style tressé par l'augmentation de la charge solide et des flux liquides (Molard, 1973), mais sans tenir compte des formes en plan que nous estimons pourtant essentielles. Ces constats généraux ne nous satisfont donc pas et il faut chercher dans les études scientifiques menées sur ce type de style fluvial pour déterminer une véritable classification (Figures 17 et 18). Le tressage s'apparente plus à des cours d'eau dont le lit est constitué de bras enserrant de grands bancs grossiers sans végétation et relativement instables.

Pour rappel, selon Smith (1986), les facteurs dominant l'anastomose sont les suivants :

- une pente faible et par conséquent une faible énergie
- une irrégularité des écoulements
- une accrétion verticale dominante
- une plaine végétalisée et riche en zones humides

La Loire répond entièrement à ce schéma caractéristique de l'anastomose.

L'anastomose concerne par contre des lits avec des chenaux plus sinueux et plus stables et des îles végétalisées et stabilisées (Knighton & Nanson, 1993 ; Nanson & Knighton, 1996). Ce dernier style correspond au secteur de la Loire des îles. **Notre zone d'étude s'apparente en effet au style anastomosé au sens de la classification de Knighton et Nanson (1996) caractérisé par des bras multiples enserrant de grandes îles boisées dont la spécificité morphodynamique réside dans « l'opposition entre de grandes formes d'accumulations sédimentaires stables à l'échelle historique et des bancs de sable et graviers mobiles » (Bazin et Gautier, 1996).** E. Gautier et *al.* (2000) rapprochent pour la première fois la Loire du style anastomosé.

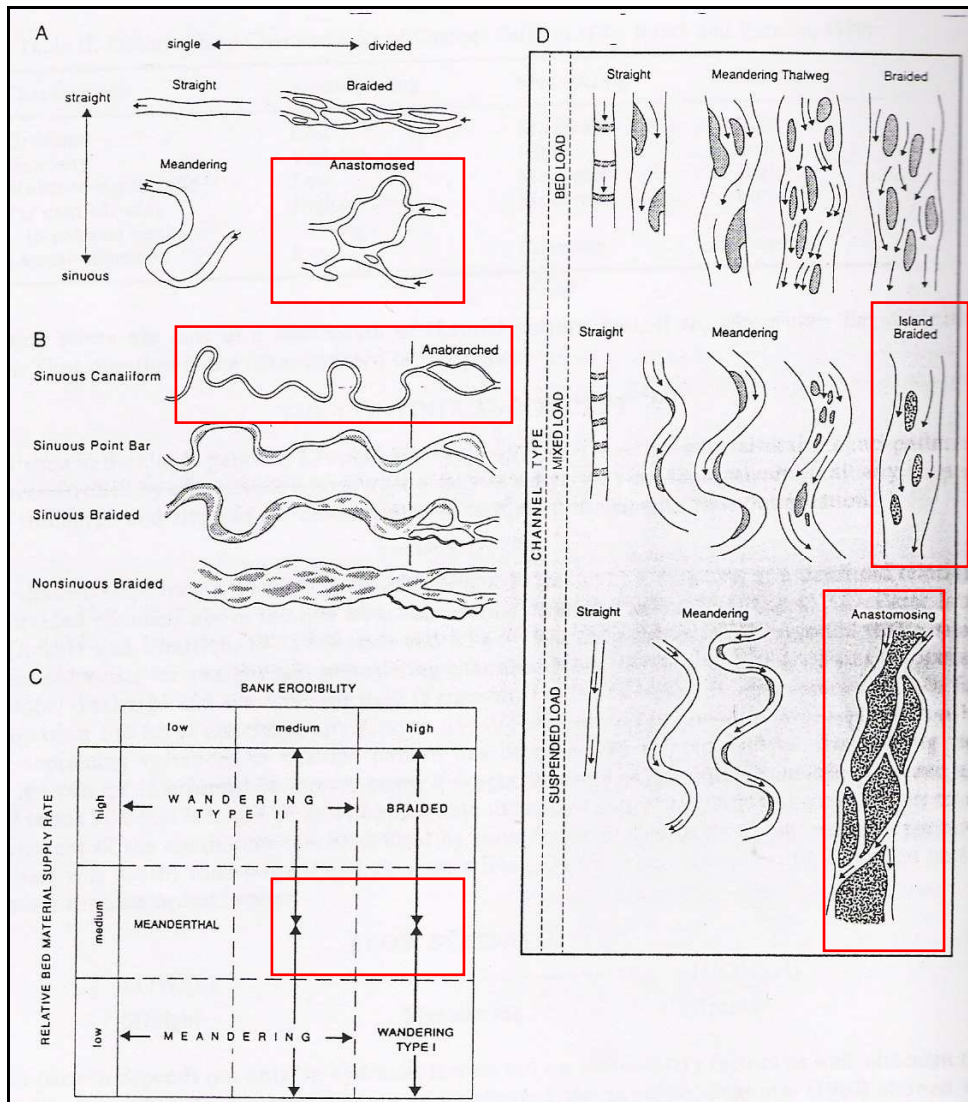


Figure 17 – La place de la Loire des îles dans les grandes classifications des styles fluviaux. Elles se réalisent en fonction de l'indice de sinuosité et du degré de chenalisation (A : Rust, 1978 ; B : Brice, 1984) et en fonction du degré d'érosion des berges et du matériel du lit (C : Carson, 1984). S.A. Schumm (1981) réunit toutes ces variables dans sa classification en tenant compte des formes fluviales. L'anastomose correspond le mieux à la Loire des îles.

• **Le réajustement fluvial des systèmes anastomosés**

La Loire reste vouée comme n'importe quel hydrosystème fluvial à un équilibre dynamique (Bravard, 1987) que des facteurs naturels et anthropiques ont rompu et continuent de perturber. Les formes en plan enregistrent ces perturbations et illustrent les réajustements du fleuve comme des réponses géomorphologiques (Knighton, 1998). Les hydrosystèmes fluviaux se réajustent à des contraintes d'ordres aussi bien naturel qu'humain (Petts et *al.*, 1989). Les cours d'eau se réadaptent à toute perturbation interne ou externe à son système.

Un cours d'eau est constamment en situation de déséquilibre, c'est son fonctionnement propre (équilibre dynamique), à la différence d'un canal : la stabilité n'existe pas dans un hydrosystème.

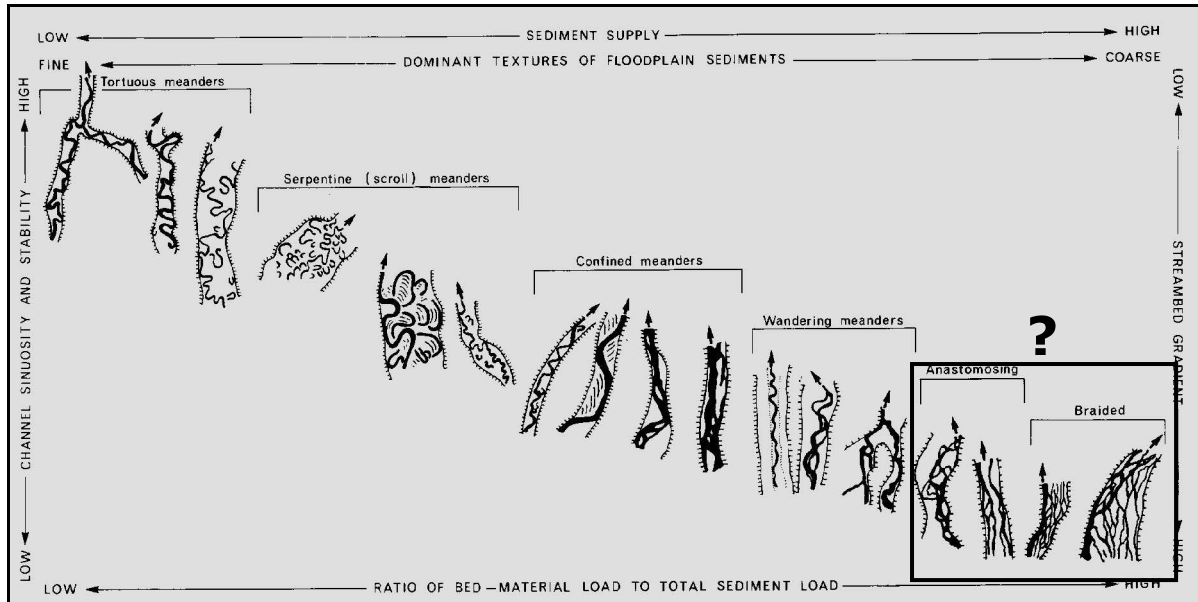


Figure 18 – Les controverses peuvent naître quant à la classification des systèmes en anastomoses. D'après cette classification des styles fluviaux (Mollard, 1973), le passage du style anastomosé (*anastomosing system*) au style en tresse (*braided system*) se réalise en fonction d'une augmentation des flux liquides et solides.

Les rythmes et les questions de temporalité sont au centre de notre étude sur la Loire des îles. Ils sont dépendants du niveau d'échelle d'approche : type de forme (chenal, île, banc...), du secteur fonctionnel (Amoros et Petts, 1993) au sein de l'hydrosystème et du lit vif lui-même. L'ajustement des formes fluviales s'exerce en fonction des variations des débits liquides et de la charge solide (Schumm, 1977 ; Knighton, 1998). La largeur, la profondeur et la pente des chenaux sont les paramètres qui s'ajustent le plus rapidement à ces variations de débits. Les systèmes en anabranchement sont dominés par des formes fluviales diversifiées (îles et réseau de chenaux). Aussi, nos Sites Ateliers SA sont de véritables secteurs fonctionnels au sein desquels s'exercent les réajustements fluviaux. Toute notre méthodologie se développe dans ces secteurs fonctionnels en caractérisant les rythmes spatio-temporels du réajustement par le biais du suivi des bras secondaires et des îles. Ce couple d'unités fonctionnelles représente notre cible privilégiée pour évaluer les rythmes,

les seuils temporels du réajustement fluvial. La recherche des seuils temporels exprime la volonté de déterminer le temps de réponse du système fluvial et le temps de relaxation par rapport à une perturbation des débits liquides et solides ; la recherche des facteurs de l'évolution se faisant parallèlement.

- Ces généralités nous amènent à replacer la Loire des îles parmi les classifications des cours d'eau anastomosés. Il nous semble nécessaire de dresser un état de l'art des systèmes en anastomose pour placer notre étude d'un tel système en milieu tempéré et de surcroît au sein d'un hydrosystème fluvial aussi grand que la Loire. Le style fluvial de la Loire des îles est proche du patron anastomosé décrit par Schumm (1968), Smith (1976), Rust (1978), Bravard (1980), Smith et Putman (1980), Smith et Smith (1980), Knighon et Nanson (1993) et Nanson et Knighon (1996).

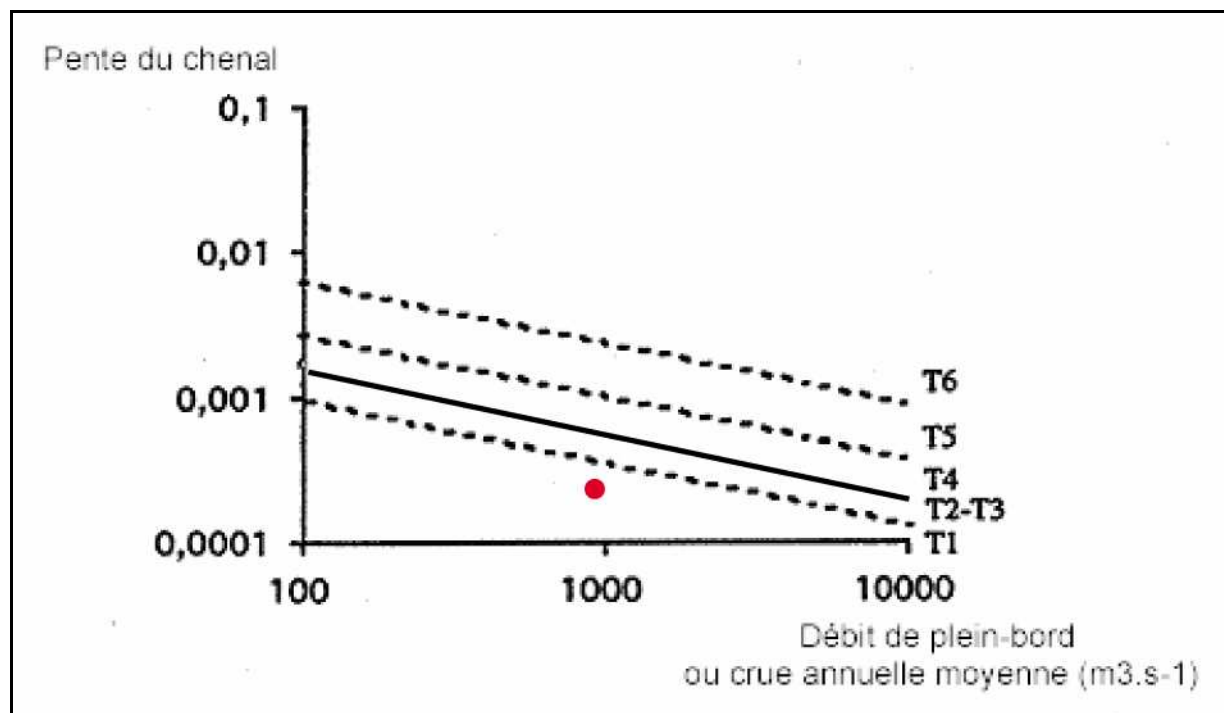


Figure 19 – Essai de positionnement de la Loire moyenne en aval du Bec d'Allier, dans la classification des styles fluviaux par Léopold et Wolman (1957) et des cours d'eau en anabranches (Nanson et Knighon, 1996). Les différents types, de T1 à T6, sont décrits ci-après.

Au regard de la classification des styles fluviaux de Léopold et Wolman (1957), la Loire moyenne se situe à mi-chemin entre les cours d'eau à chenaux en tresse et ceux à

méandres (Figure 19). Elle se place difficilement dans la classification des systèmes en anabranches (*anabranching river*) de Nanson et Knighton (1996). Cette classification a permis de dresser 6 grands types de cours d'eau anastomosés à partir d'un panel d'hydrosystèmes variés sous différentes latitudes.

Type 1 : cours d'eau en anabranches à sédiments cohésifs (systèmes anastomosés) avec différentes variantes des sédiments suivants les régimes hydro-climatiques ; a : systèmes organiques (régime tropical comme l'Okavango) ; b : systèmes organo-clastiques (régime nival et montagnard comme les rivières canadiennes, la Columbia ou l'Attawapiskat) ; c : systèmes à sédiments fins (régime tropical des régions semi-arides comme la rivière australienne Cooper Creek ou américaine Red Creek)

Type 2 : cours d'eau en anabranches à charge sableuse et îles. Les auteurs se sont alors inspirés des travaux sur des rivières australiennes comme la Magela Creek.

Type 3 : cours d'eau, à charge mixte, instables latéralement. Il s'agit d'hydrosystèmes de domaines montagnards humides et tropicaux.

Type 4 : cours d'eau en anabranches à charge sableuse et rides alluviales. On rentre dans le domaine des cours d'eau tropicaux en milieu semi-aride.

Type 5 : cours d'eau en anabranches à charge graveleuse, instables latéralement. Les exemples concernent des rivières canadiennes (domaine continental froid) à fort régime nivo-glaciaire (la Bella Coola).

Type 6 : cours d'eau en anabranches, stables, à charge graveleuse.

Or, il semblerait que le système anastomosé de la Loire des îles s'apparente au type 2 (*sand dominated, island-forming anabranching rivers*) puisque l'on rencontre effectivement des îles entourées de bras secondaires ou d'anabranches relativement stables dominées par des apports sableux (Figure 20). Selon S. Rodrigues (2004), le type 5 correspond le mieux à la Loire des îles en aval de Tours (secteur de Bréhémont) mais au regard de l'évolution diachronique et des travaux en géomorphologie fluviale récents pour ce secteur (Gaultier, 2000), nous ne pouvons pas adhérer à ce classement. En effet, ce type 5 (avec l'exemple de

la rivière Bella Coola au Canada) correspond avant tout à un style en tresse, sous des latitudes froides (continental froid) et différentes de celles de la Loire moyenne, et nous éloigne d'une réalité : la Loire a connu un style en tresse en val du Bec d'Allier (Gautier et al., 2000) et en aval d'Orléans (Carcaud, 1999) mais ce n'est plus le cas, aussi l'anastomose se rapproche du style actuel selon la classification de Nanson et Knighton (1996).

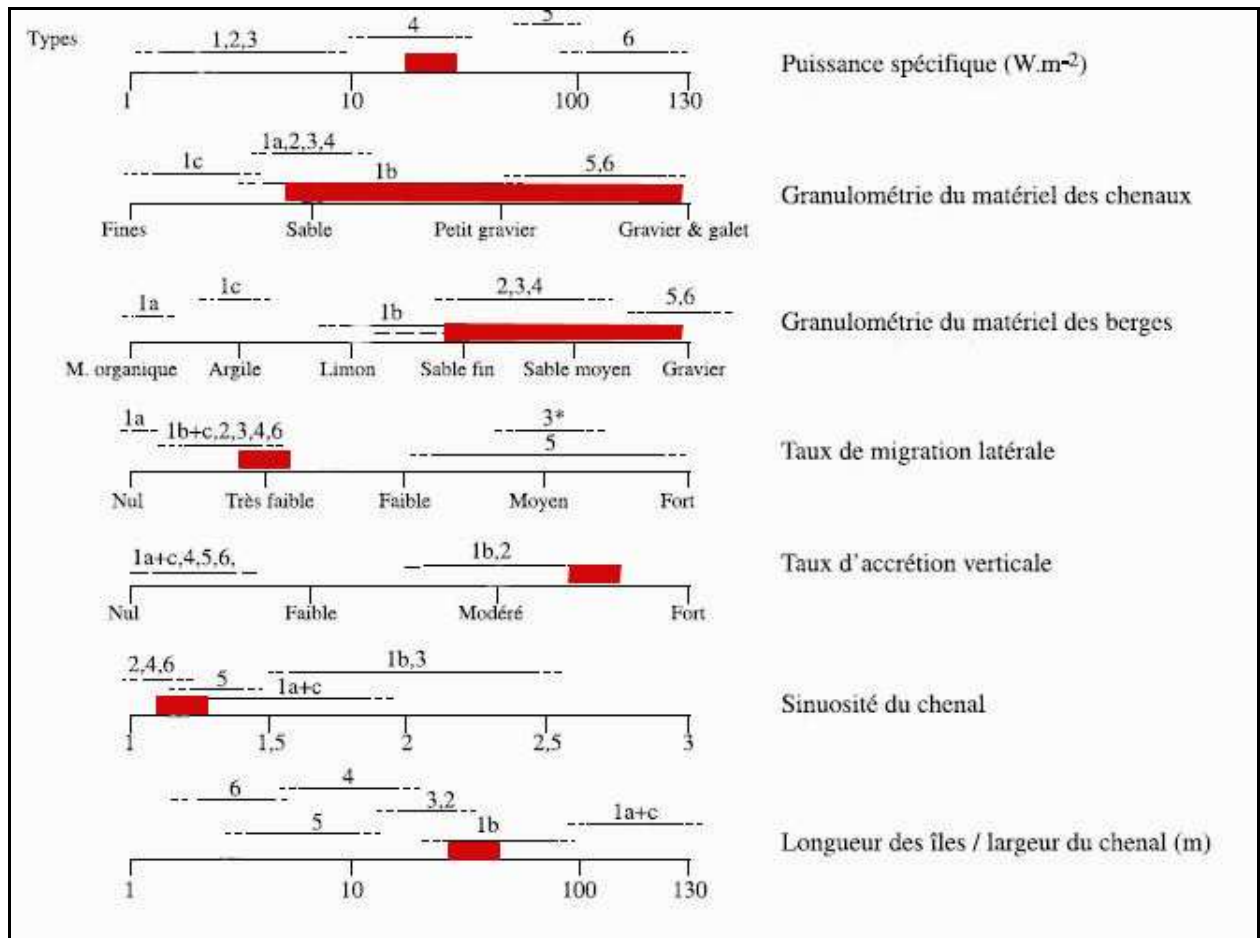


Figure 20 – La Loire des îles selon la classification de Nanson et Knighton (1996).

Adapté de Gautier et Costard, 2000.

Elle présente des caractéristiques de chaque type, à savoir un système en anabranches dominé par des apports sableux et des îles. Que peut-on donc signifier, pour la Loire, ce style anastomosé ?

Mais, au regard des caractéristiques de chaque type d'anastomose, la Loire possède des traits des différents sous-types : une charge dominante de sable fin à gravier, avec pour certains bras secondaires de dépôts de galets, des bras instables d'autres plus équilibrés. Bref, la Loire ne semble répondre à aucune logique de classification de style fluvial. Seul son patron fluvial montre tous les signes de l'anastomose : îles, bras secondaires.

Cette difficulté à classer l'anastomose peut être aussi le signe d'une grande instabilité de cet hydrosystème et du réajustement fluvial qui le caractérise toujours : le caractère récent de l'anastomose montre un réajustement fluvial en cours. Le patron anastomosé pourrait alors être l'expression d'un réajustement en cours à des changements environnementaux récents. **Il reste donc impossible à présent de déterminer le style « normal ou originel » de la Loire.**

D'autre part, il est difficile de conserver ce terme d'anabranches dont la définition française correcte reste les chenaux. Nous qualifions dès à présent la Loire des îles comme un système anastomosé selon Nanson et Knighton (1996).

c). La question des îles fluviales

Le style anastomosé lui-même a donc été beaucoup abordé. Cependant, en descendant à un niveau d'échelle supérieur au style fluvial, au niveau des unités fonctionnelles ou formes fluviales, les îles fluviales ne sont pas au centre des préoccupations des recherches consacrées aux styles anastomosés et en anabranches. Les chenaux constituent le cœur de ces recherches en étudiant leurs paramètres morphométriques : rayon hydraulique, largeur et profondeur, bref les variables dépendantes du style fluvial. Nous n'excluons en aucun cas ces paramètres et toute l'importance de ces chenaux dans les anastomoses fluviales, pour preuve le suivi inter-annuel de notre approche multi-scalaire (Chapitre 2). Il nous semble pourtant essentiel de s'intéresser à ces autres formes fluviales que sont les îles fluviales dans ces systèmes fluviaux. Si on se réfère à toutes études consacrées à ce type de style fluvial, les îles ne semblent pas jouer un rôle prépondérant de par certainement leur apparente stabilité. Toute l'erreur d'appréciation repose sur cette idée de stabilité des formes insulaires, comme si elles n'étaient « vouées » qu'à représenter le stade final des bancs mobiles : du banc mobile à l'île boisée en passant par le banc végétalisé par la végétation pionnière (Bomer, 1972 ; Osterkamp, 1998 ; Gautier et Grivel, 2006). Le suivi des bancs ne nous suffit pas pour comprendre la formation et l'évolution des îles (Figure 21). Lorsque Y. Babonaux (1970) montrait l'importance du « triptyque » banc-seuil-mouille (Figure 22), il ne percevait pas à ce moment un autre couplage de formes fluviales, celui associant les îles, les bras (anabranches en référence aux systèmes

anastomosés) et les francs-bords. Il faut rappeler que ces îles sont une constante du paysage fluvial de la Loire moyenne, comme en attestent les cartes des 18^{ème} et 19^{ème} siècles, même si elles se sont multipliées depuis le 19^{ème} siècle (Figure 23). A ces pistes de recherche sur les îles nous proposons une méthodologie d'analyse. Nous plaçons ces îles au premier plan des processus hydro-sédimentaires des hydrosystèmes anastomosés.

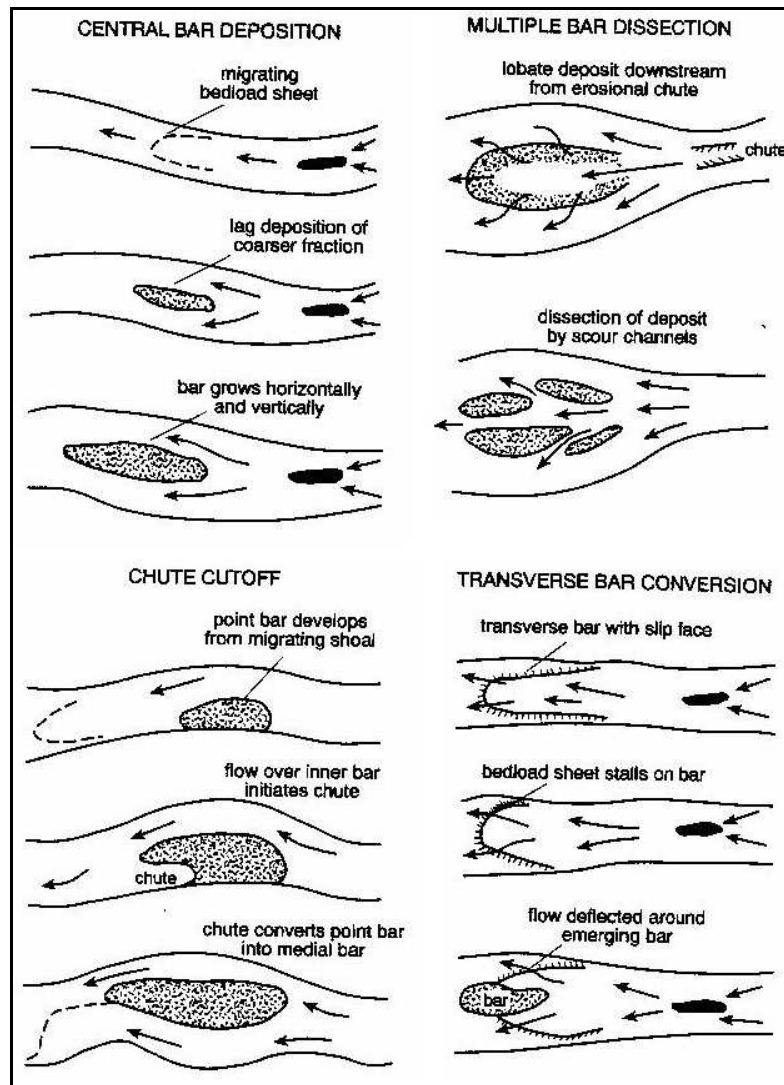


Figure 21 – La place déterminante des bancs dans le système fluvial pour la formation des unités fonctionnelles îles.

Cet aspect n'a été que trop rarement pris en compte, les études se limitant à ces bancs latéraux et centraux dans le lit (Léopold et Wolman, 1957 ; Fergusson, 1984) sans passer à l'étape supérieure de leur évolution, la formation des bancs végétalisés et des îles. Nous proposons donc de nous intéresser à ces unités fonctionnelles typiques du style anastomosé.

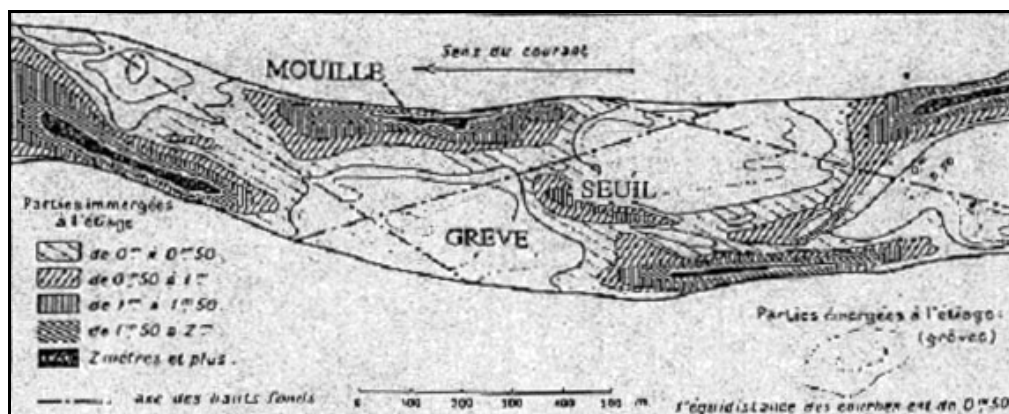


Figure 22 – Le triptyque de formes fluviales selon Y. Babonaux (1970).

Selon nous, pour le système actuel de la Loire des îles, un autre triptyque domine : île - bras secondaire - franc-bord.

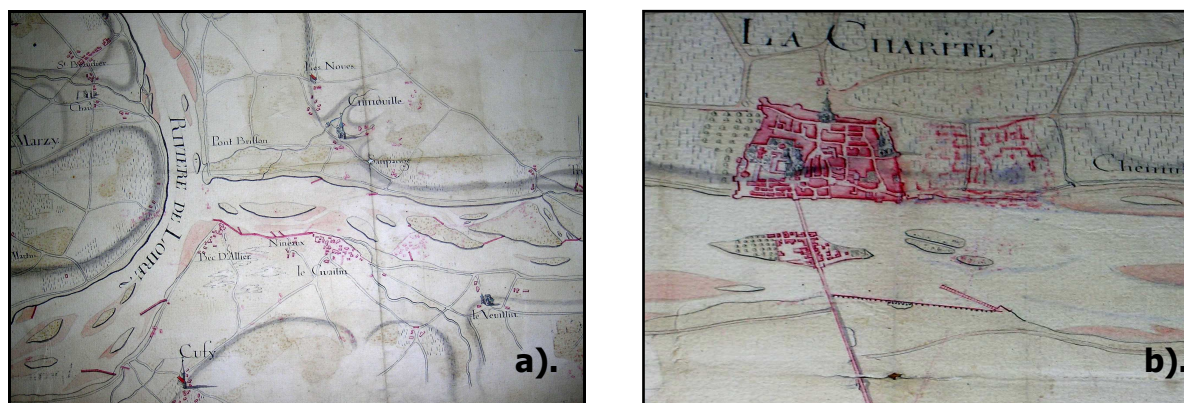


Figure 23 - Cartes de la Loire en 1760 (Archives nationales).

Les îles de la confluence Allier-Loire comptent parmi les plus anciennes de la Loire moyenne (a).

L'île du faubourg de La Charité fut stabilisée dès le Moyen-Age pour rendre plus aisé le franchissement du fleuve (b).

Dans les grandes monographies ligériennes, peu de choses ont été écrites sur les îles, mésoformes fluviales dominantes de ce style fluvial si particulier. Les îles structurent depuis longtemps le paysage fluvial de la Loire. Y. Babonaux décrivait déjà les grands traits de la Loire anastomosée mais sans s'étendre dans des analyses plus fines (Babonaux, 1970). Selon lui, les îles de la Loire se caractérisent par une triple originalité :

- i). « *le lit de la Loire présente une succession de secteur alternativement pourvus et dépourvus* » ;
- ii). « *tandis que les îles des grands fleuves à fond mobile - type Mississippi - se forment généralement en leur milieu, celles de la Loire occupent une position beaucoup plus*

latérale. Inclinant vers une rive ou vers l'autre, elles séparent le lit moyen en deux bras très inégaux » ;

iii). *« l'évolution des îles est très controversée. Fixes ou mobiles, descendant dans le sens du courant, elles n'ont jamais livré, faute de documents anciens suffisamment précis, de conclusions sûres ».*

Y. Babonaux insiste sur le particularisme de ces îles : *« de quelque façon qu'on les observe, les îles de la Loire présentent une physionomie singulièrement différente du type insulaire classique des rivières à fond mobile ».* Ces longues citations suffisent à résumer les problématiques géomorphologiques des îles de la Loire il y a déjà trente ans. Notre objectif consacré aux îles doit en quelque sorte permettre de répondre aux observations d'Y. Babonaux, lequel ouvrait ici des voies de recherche intéressantes qui n'ont pas eu véritablement d'échos immédiats. Nous répondons aux autres questions restées sans réponse par B. Bomer (*« Les îles de la Loire : évolution ou stabilité ? »*) (1972) (Figure 24).

B. Bomer consacre en effet un article sur les îles en reposant la problématique de Y. Babonaux sur l'évolution de ces formes fluviales (Bomer, 1972). Il donne des indices de compréhension de leur évolution en démontrant le rôle important des crues. B. Bomer laissait déjà apparaître cette idée que les systèmes anastomosés sont représentatifs du réajustement fluvial à de nouvelles conditions hydrologiques. Il manque l'importance du facteur anthropique qui selon nous explique ce réajustement fluvial. De plus, les outils applicables en géomorphologie des années 1970 ne pouvaient apporter des données quantitatives pertinentes pour estimer ce réajustement fluvial. Nous proposons en partie d'y répondre grâce à la mise en place d'une méthodologie précise. Il faut attendre presque trois décennies pour commencer à voir apparaître des travaux de recherche sur les îles et les formes fluviales de la Loire (Gautier et *al.*, 2000) (Figure 25). Trente ans après B. Bomer, il était donc temps de s'intéresser de plus près à ces formes si typiques du paysage fluvial ligérien. Il s'agissait également d'éclairer et de quantifier ces questions de stabilité ou d'évolution des îles qui semblaient tant interpeller, mais sans chercher plus loin, les scientifiques sensibilisés à la géomorphologie de la Loire.

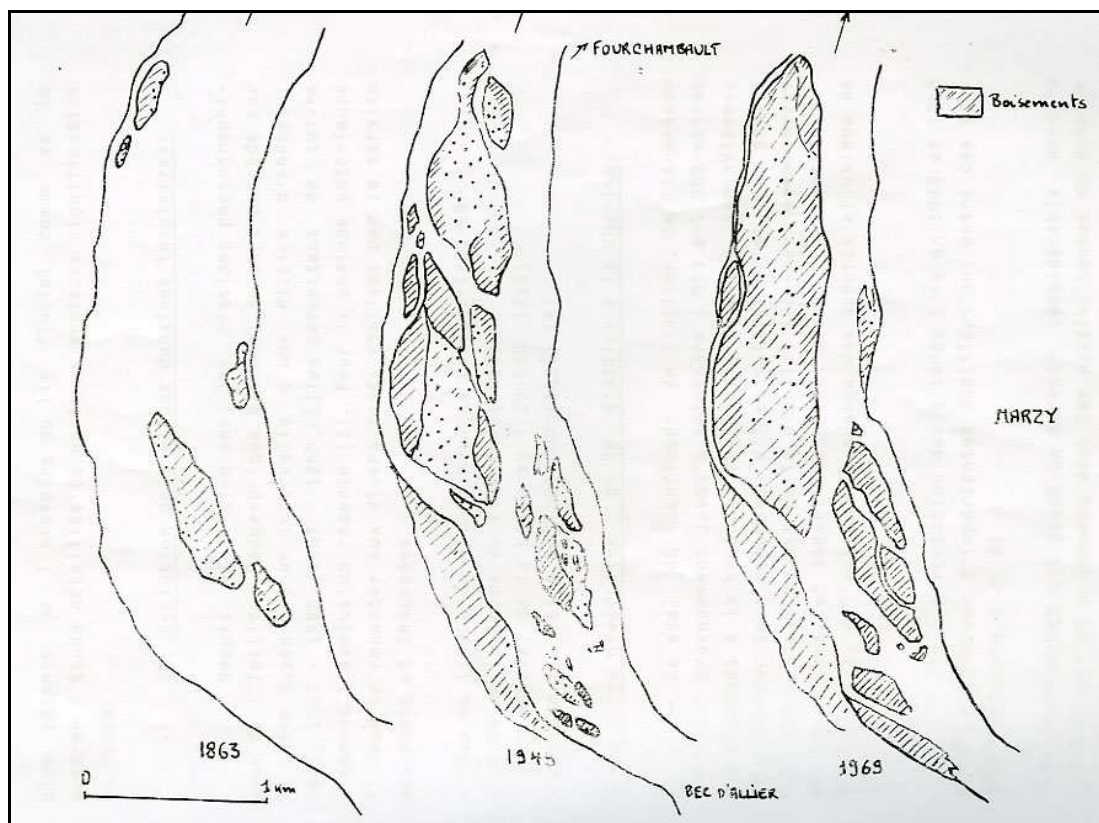


Figure 24 – Evolution du site du Bec d'Allier selon B. Bomer (1972).

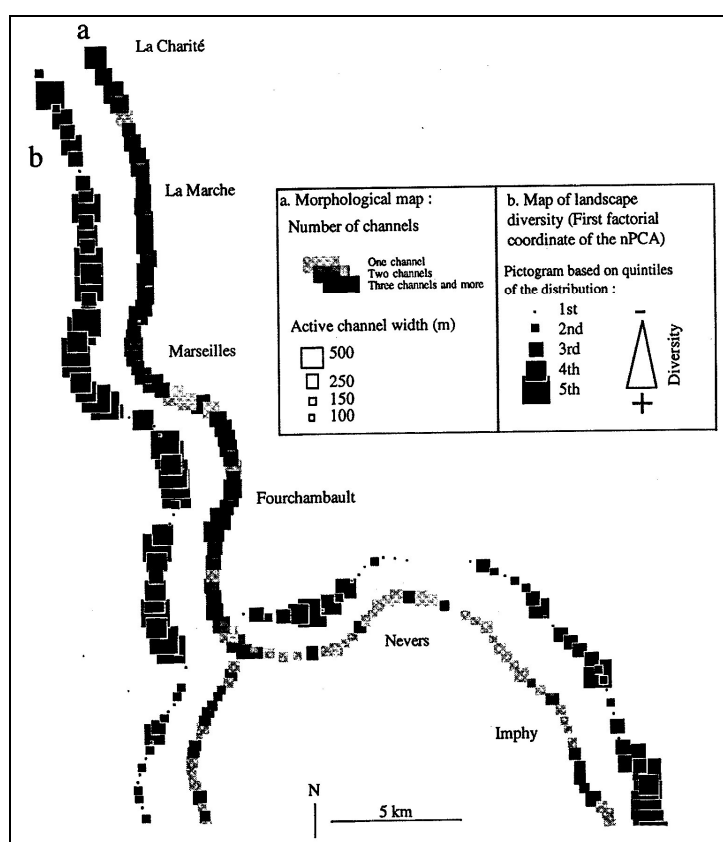


Figure 25 – Etude géomorphologique de la Loire moyenne, entre Nevers et La Charité (Gautier et al., 2000).

Nous disposons à présent d'outils d'analyse spatiale performants, pouvant coupler différents niveaux d'approche scalaire et utilisant différentes sources documentaires mêmes les plus anciennes, à condition qu'elles soient fiables (Kondolf et Piegay, 2003 ; Gautier, 2006). Nous détaillons largement cette méthodologie et notre protocole de recherche dans le chapitre suivant, celui du cadre méthodologique.

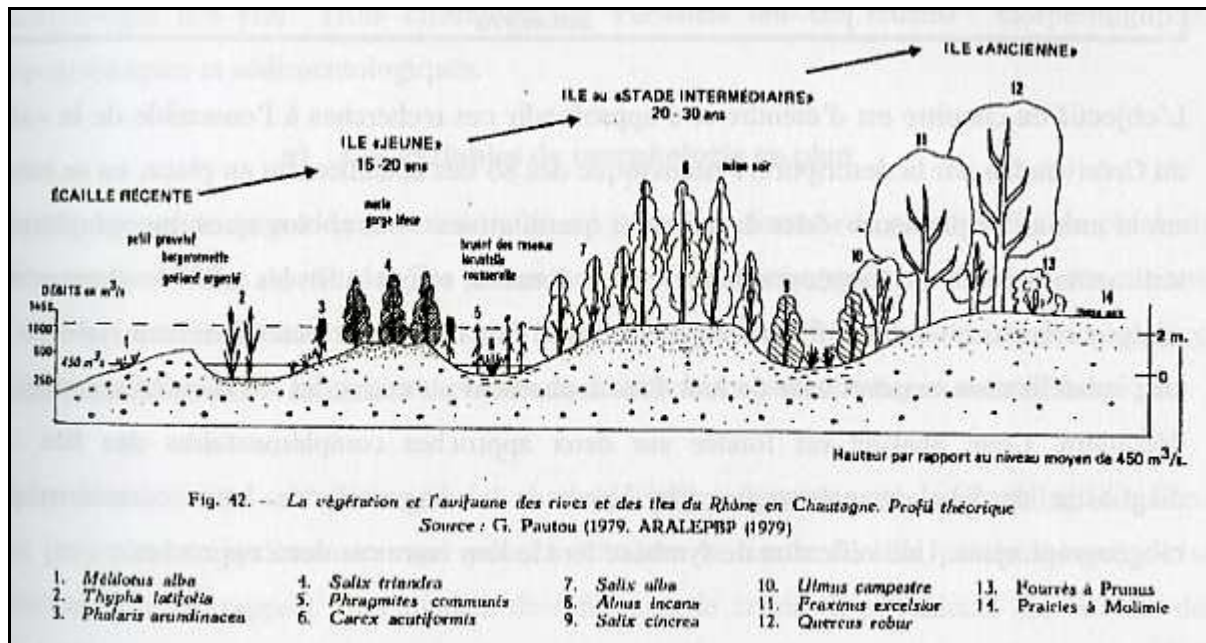


Figure 26 – Relation formes fluviales – végétation dans la vallée du Rhône.

Les travaux de J.P. Bravard (1987) et G. Pautou et Wuillot J. (1989) se sont intéressés aux indices de végétation et à leur relation géomorphologique pour dater les îles du Rhône. L'école de Lyon, en alliant écologie et géomorphologie ouvrait alors la voie à de nouveaux concepts liés aux hydrosystèmes fluviaux.

- En ce qui concerne la littérature internationale, les îles ont été jusqu'alors relativement peu étudiées, alors qu'elles représentent une composante essentielle des styles fluviaux en anabranchement (Knighton & Nanson, 1993 ; Nanson & Knighton, 1996). Elles peuvent être considérées comme de véritables formes d'enregistrement des changements morphodynamiques d'un cours d'eau (Bomer, 1972 ; Osterkamp, 1998).

Les îles ont fait l'objet central d'une étude consacrée à la rivière Plum Creek et sont également appréhendées comme des zones d'archives des changements observés dans ce type de rivière anastomosée (Osterkamp, 1998). Les îles ont une configuration si particulière, encadrées par des chenaux actifs, qu'«elles réagissent plus rapidement et plus

finement que la plaine aux perturbations qui affectent le débit liquide et la charge solide » (Gautier, 2006). Les formes insulaires sont en somme un champ de recherche tout à fait nouveau. En milieu tempéré, les cas d'études consacrés aux îles concernent principalement les styles fluviaux tressés, donc des hydrosystèmes montagnards. Les îles des secteurs tressés de l'Isère ont ainsi été étudiées dans leur place dans la dynamique fluviale et surtout dans leur participation au piégeage des sédiments (Girel et *al.*, 2003; Vautier, 2000) (Figure 27).

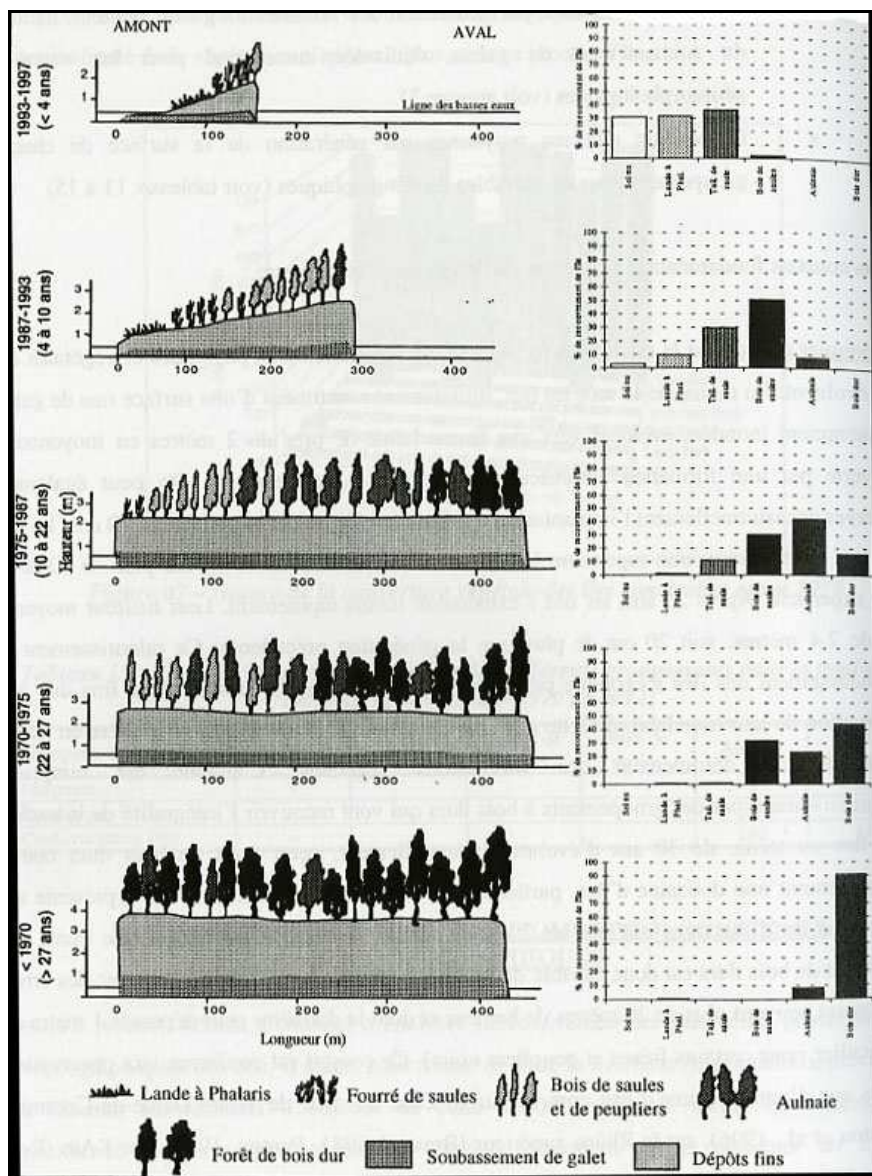


Figure 27 – Étude des îles de la vallée de l'Isère.

Dans la continuité des travaux de J.P. Bravard, G. Pautou et A. Amoros, la thèse de F. Vautier (2000) a établi de nouvelles données sur les îles des rivières en tresse. Les rivières en tresse du bassin rhodanien offrent des caractéristiques intéressantes pour notre travail de comparaison.

Sous des latitudes plus tropicales, J.N. Sarma (2005, 2003) s'est intéressé aux îles du fleuve Brahmapoutre. De très grandes îles se forment sur cet hydrosystème, comme l'île Majuli (Figure 28). Cette île, très ancienne puisqu'elle existait déjà au 18^{ème} siècle, a connu deux grandes phases dans son évolution : tout d'abord une phase de développement fort avec le regroupement de plusieurs petites îles appelées « Chapooris » (les îles les plus petites) ; ensuite depuis le 20^{ème} siècle cette île connaît une érosion importante de ses berges et donc de sa taille. Cette approche reste très géomorphologique et ne tient pas compte du facteur biotique, à savoir celui de la végétation. A. Hassan et *al.* (1999) se sont également penchés sur l'identification des îles fluviales sur ce même cours d'eau à partir d'images satellitales. Nous prenons donc comme éléments de comparaison ces caractéristiques géomorphologiques en milieu tropical afin de les confronter à un milieu beaucoup plus tempéré. Comme les systèmes anastomosés sont représentés sous toutes les latitudes et que le facteur climatique ne semble pas le facteur d'explication de leur présence, il nous semble très intéressant de confronter la Loire des îles à d'autres systèmes proches comme celui du Brahmapoutre.

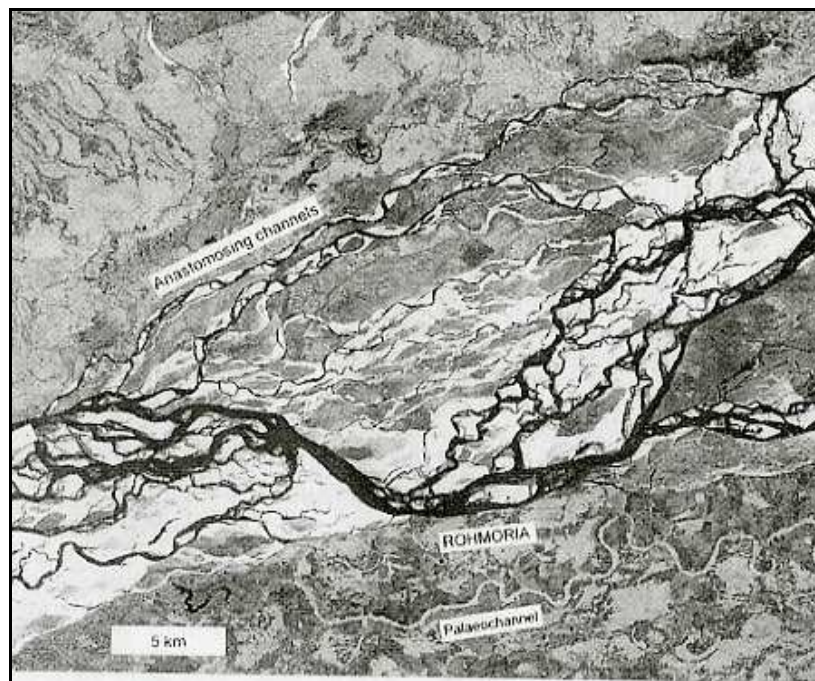


Figure 28 – Les îles représentent les unités fonctionnelles caractéristiques du paysage fluvial indien du Brahmapoutre.

J.N. Sarma et M.K. Phukan (2003), et Sarma (2005) se sont consacrés aux premières études géomorphologiques sur les îles fluviales en Asie tropicale. Ces îles possèdent-elles des similitudes géomorphologiques et dynamiques avec celles de la Loire moyenne ?

Enfin, les études sur les îles de la Léna (Sibérie) présentent l'avantage de se fonder sur des méthodes d'approche similaires à la nôtre (Gautier, 2006 ; Gautier et Costard, 2000). Les conditions hydro-climatiques sont bien différentes de la Loire puisqu'il s'agit d'un cours d'eau de débâcle en milieu périglaciaire à pergélisol épais et continu (Figure 29). Ces travaux montrent, à travers les îles, le fonctionnement d'un système anastomosé dans un tel contexte hydro-climatique, et aussi les conséquences du réchauffement climatique en matière d'érosion des formes fluviales. Les caractéristiques fonctionnelles dégagées de ces études peuvent nous apporter des éléments de comparaison très intéressants pour montrer une autre forme de réajustement fluvial d'un système en anastomose à des perturbations environnementales récentes.

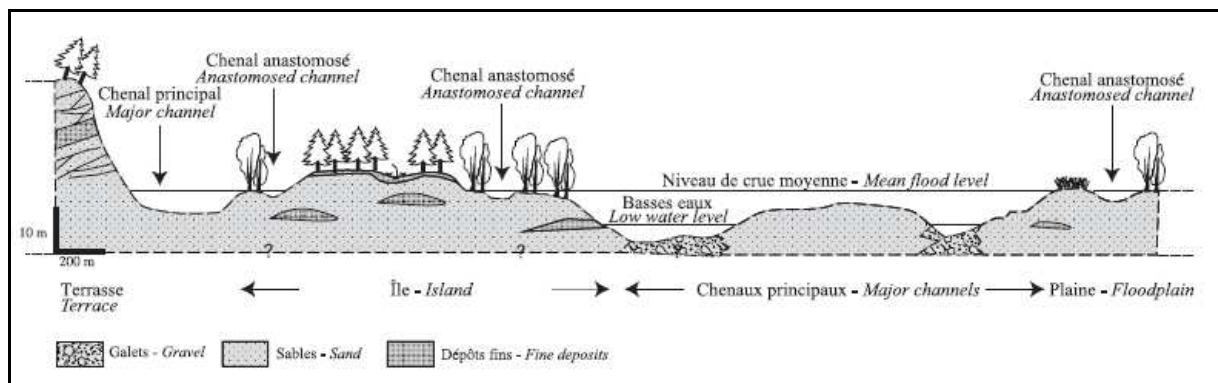


Figure 29 – Coupe transversale de la plaine de la Léna (Gautier et Costard, 2000).

Le système en anastomose transparaît et montre des similitudes avec le patron fluvial de la Loire : chenaux secondaires entourant de larges îles.

Les îles sont présentes aussi bien dans des conditions hydro-climatiques tempérées comme la Loire, que tropicales comme le Brahmapoutre, que périglaciaire comme la Léna. L'anastomose ne dépend donc pas de la variable climatique.

d). Les autres unités fonctionnelles

Les styles anastomosés présentent d'autres unités fonctionnelles tout aussi majeures dans le paysage fluvial que les îles. Ces autres mésoformes fluviales sont soit dépendantes des formes végétalisées, soit présentent des caractéristiques très particulières et indépendantes du lit vif.

Si notre recherche s'est fortement centrée sur les îles, il n'est pas question de les extraire des ensembles fonctionnels auxquels elles sont rattachées au sein du lit (Amoros et Petts, 1995). Ce sont les autres formes fluviales que nous avons déjà décrites telles que les francs-bords, ces marges fluviales, les bras secondaires et les annexes hydrauliques (Gautier, 2006).

- **Ces marges fluviales** que nous appelons francs-bords constituent à elles seules des formes de transition entre le lit vif et la plaine d'inondation. La construction et l'évolution de ces formes renseignent sur l'état du lit et influent sur la largeur des écoulements (Gautier et al, 2000). D'un point de vue géomorphologique, nous pensons que ces marges latérales, au même titre que les îles, représentent des indicateurs morphologiques des perturbations subies par le fleuve. Les marges latérales ne constituent pas non plus des sujets importants de recherche au sein des systèmes anastomosés. Elles n'apparaissent pas clairement comme des formes à part entière. Pour la Loire, ces francs-bords se forment exclusivement entre levées et lit vif. Le Rhin possède quelques vestiges de la plaine d'inondation, des marges encore connectées au fleuve. Ces annexes hydrauliques sont stratégiques, ce qui explique aujourd'hui la volonté de les restaurer et les remettre dans leur fonctionnalité hydraulique : forêt d'Erstein et de Rhinau – Alsace (Heuzé et Schnitzler, 2006). Pour le Rhône, ces marges existent aussi et sont dues à des conditions hydro-sédimentaires fortement perturbées, notamment par la navigation et l'hydro-électricité. Ces marges sont occupées par une forêt alluviale et sont appelées « ségonaux ». Le Mississippi et des rivières affluentes, aussi équipés de digues, connaissent ce type de formes d'accumulations végétalisées. Mais ces dernières ne sont pas considérées comme des formes fluviales à part entière. Notre originalité reste de pouvoir porter notre attention sur ces unités fonctionnelles qui structurent l'hydrosystème fluvial Loire : îles, bras secondaires, marges latérales (Figure 30).

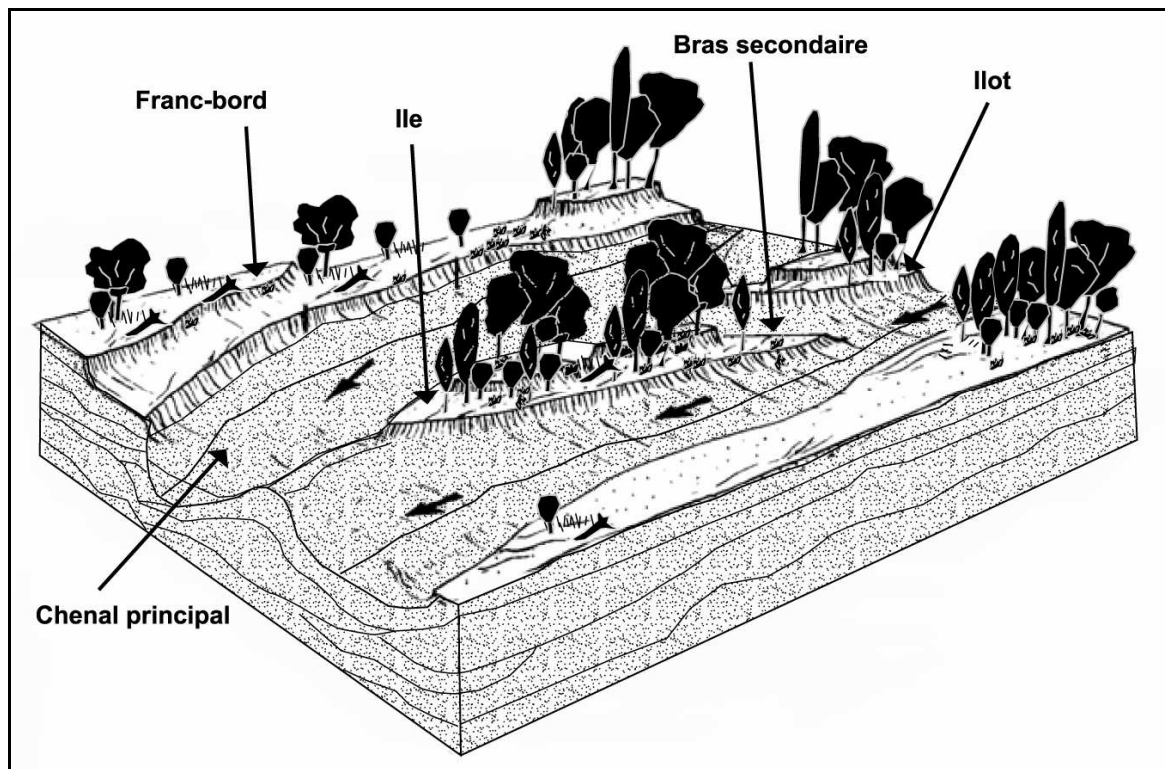


Figure 30 – Bloc diagramme de la Loire des îles.
 Quel rôle joue chaque forme fluviale dans ce fleuve anastomosé ?

- **Les bras morts ou annexes hydrauliques**

Les annexes hydrauliques sont des formes fluviales majeures dans la distribution des flux solides et liquides, et se distinguent des bras secondaires (bande active). Elles expriment aussi l'histoire de la formation d'une plaine d'inondation (Gautier, 2006 ; Bravard, 1987) et également dans le fonctionnement écosystémique d'un fleuve (Amoros et Petts, 1993 ; Maman, 1998).

Trop souvent les bras secondaires sont considérés comme des bras morts. D'un point de vue morphologique il s'agit bien de chenaux. Mais, d'un point de vue fonctionnalité écologique et hydrologique, les bras secondaires sont totalement différents des bras morts : différences dans les échanges de nutriments, les transferts et état de la charge solide, les échanges bras-nappe alluviale, niveau de végétalisation, conditions d'écoulement. Un bras mort est entièrement végétalisé alors qu'un bras secondaire n'est pas ou presque pas végétalisé et se rattache à la bande active. Un bras mort devient actif dans des conditions d'écoulement plus exceptionnelles que pour un bras secondaire : la fréquence de submersion et de remobilisation des sédiments est donc très différente.

Ainsi, sur le terrain, ces formes fluviales sont facilement distinguables. Les bras morts sont sur les îles, les marges latérales ou encore au cœur de la plaine d'inondation. La topographie de ces formes donnera des caractères hydrologiques et fonctionnels différents suivant ces localisations dans la plaine d'inondation. Encore une fois, les bras morts sont indissociables de ces unités fonctionnelles dans le patron fluvial (îles-bras-franc-bords-plaine). Ainsi, pour la Loire ces annexes hydrauliques sont réputées pour être des pièges à sédiments. Mais, cela est bien plus complexe en fait. De plus, elles ont un rôle hydrologique important en participant à l'étalement de l'inondation.

Les annexes hydrauliques font partie de la typologie des zones humides (Gautier et *al.*, 2001). Ces zones humides constituent des enjeux actuels de gestion écologique très forts (BIOTOPE, 2004). Leur rôle est bien connu aujourd'hui sans pour autant connaître leur efficacité hydro-sédimentaire dans la plaine d'inondation de la Loire (Gautier, 2006). C'est pourquoi ces annexes hydrauliques concernent les enjeux actuels de gestion des hydrosystèmes fluviaux : enjeux écologiques, risques d'inondation. Nous tentons dans notre démarche de montrer leur part d'implication dans le système anastomosé.

La thèse se propose donc de répondre à cet ensemble de questions fondamentales en géomorphologie fluviale et tout particulièrement sur la métamorphose de la Loire, dans sa section dite moyenne, et sur la place des différentes formes fluviales dans cet hydrosystème français. Comment s'est réalisée la genèse du style anastomosé actuel ? A quel rythme d'évolution ? Comment fonctionne actuellement la Loire des îles dans une gamme large de conditions hydrologiques ? A l'issue de ces premières questions fondamentales nous nous intéressons à la place de la Loire des îles dans les systèmes anastomosés. Ce style fluvial est-il original dans sa formation et son évolution ? Existe-il d'autres hydrosystèmes fluviaux fonctionnant de manière similaire ?

Le cadre scientifique étant posé, il convient à présent de dresser le cadre géographique de notre travail de recherche sur la Loire des îles.

B. Cadre géographique : La Loire des îles

La présentation du cadre géographique permet de définir les limites spatiales de notre travail et de découvrir les fenêtres de l'analyse multi-scalaire. Nous présentons donc les différents niveaux d'échelles depuis le bassin versant jusqu'aux sites expérimentaux en passant par les Sites Ateliers. Cette présentation permet également de resituer les niveaux d'échelle retenus, les moyenne et grande échelles. Les descriptions climatiques et géologiques devenues classiques d'une thèse à l'autre, d'un mémoire à l'autre, aussi nous privilégions ici le lien entre l'importance du cadre physique et les problématiques de la thèse. Il nous apparaît important de ne pas ignorer le cadre humain, cela fait d'ailleurs l'objet d'un chapitre bien précis.

1). La Loire moyenne : le premier cadre géographique de la Loire des îles

a). Contexte physique : du bassin versant à la Loire moyenne

Nous proposons donc de rappeler le cadre hydro-climatique du bassin versant et les influences générées proprement à notre secteur d'étude.

• **Le contexte hydro-climatique** est dominé par les influences océaniques, flux d'ouest, et par des remontées d'air méditerranéen *via* les couloirs topographiques sud-nord des hauts bassins de la Loire. La Loire moyenne se situe ainsi dans la région d'expansion des crues d'origine océanique, cévenoles et mixtes, dont la genèse dépend grandement des conditions climatiques et météorologiques.

Des influences méditerranéennes se rencontrent dans le bassin supérieur de la Loire au niveau de sa source. L'essentiel des précipitations se déroule au printemps et à l'automne et prend souvent des formes d'orages violents. Des influences continentales correspondent à des étés chauds et bien arrosés alors que les hivers sont très froids et secs. Le relief montagneux confère aux bassins intérieurs une position d'abri dont la continentalité sèche se fait bien ressentir. Des zones de transition entre influences continentales et océaniques : cela concerne une grande partie du bassin versant de la Loire (de la sortie des bassins supérieurs vers Roanne jusqu'à Orléans environ). Les hivers sont

les plus arrosés et les étés sont plutôt secs. Les amplitudes thermiques demeurent fortes. Les influences océaniques sont de plus en plus nettes à mesure que l'on se rapproche de l'estuaire. Toujours est-il que les hivers et les automnes sont les plus arrosés et doux. Les amplitudes thermiques restent modérées à cause de la douce influence océanique.

D'un point de vue régional, le climat de nos différents Sites Ateliers choisis s'inscrit dans le climat du Bassin parisien et de la Loire moyenne (Wasson et *al.*, 1993). Des influences océaniques à tendance continentale donnent dans la région nivernaise et berrichonne des pluies hivernales et des amplitudes thermiques assez marquées pour une moyenne annuelle des précipitations de l'ordre de 700-800 mm (moyenne 1974-1995) (CSNB, 1996). Il faut savoir que la relative faiblesse des précipitations annuelles de la zone d'étude ne détermine pas entièrement le régime des crues. Des pluies abondantes en amont peuvent engendrer un fort débit de la Loire lequel s'écoulera vers l'aval et provoquera une crue dans nos secteurs, comme cela a été le cas d'ailleurs pour la crue de décembre 2003 (crue de type cévenole).

- A cette gamme d'influences climatiques correspondent des **variations hydrologiques des débits de la Loire** dans le temps et l'espace (Tableau III et Figure 31). La Loire se caractérise par une forte variabilité inter-mensuelle et inter-annuelle de ses débits (Babonaux, 1970 ; Dacharry, 1974) (Figure 32). D'une manière générale, la Loire connaît ses plus faibles débits durant l'été (période d'étiage) et ses plus hautes eaux durant l'hiver et le printemps. Ces périodes de hautes eaux s'expliquent par des pluies océaniques et méditerranéennes bien marquées (printemps et automne). Toutefois, ce schéma-type varie fortement d'une année à l'autre. A Gien, le débit a oscillé de 7000 m³/s en 1866 à 11 m³/s pendant l'été 1949, étiage exceptionnel que les barrages empêchent aujourd'hui de se reproduire. Ce simple exemple représente à lui seul toute la complexité de la Loire. Les débits les plus forts enregistrés à ce jour correspondent aux grandes crues du 19^{ème} siècle (1846, 1856 et 1866).

Tableau III – Données hydrologiques de la Loire moyenne (Source : Banque Hydro)

	Loire moyenne à Givry (1967-2007)	Loire moyenne à Blois (1885-2007)
1. Débits moyens mensuels (m^3 / s)		
Janvier	497	547
Février	596	591
Mars	448	557
Avril	413	495
Mai	404	403
Juin	232	280
Juillet	115	164
Août	96,7	116
Septembre	123	133
Octobre	196	219
Novembre	327	370
Décembre	423	489
2. Module (m^3/s)	319	362
3. Maximum journalier (m^3/s)	3290 (6 décembre 2003)	6000 (29 septembre 1866)
4. Débit spécifique ($l/s/km^2$)	9,8	9.5

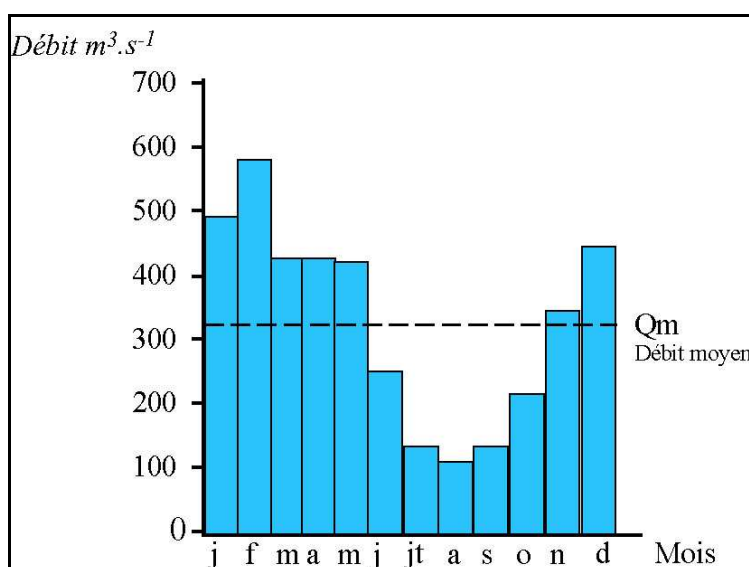


Figure 31 – Régime hydrologique de la Loire à la station de Givry (Cher).

Il se caractérise par une période de basses eaux autour des étés et de hautes eaux centrées sur les hivers (période 1970-2000).

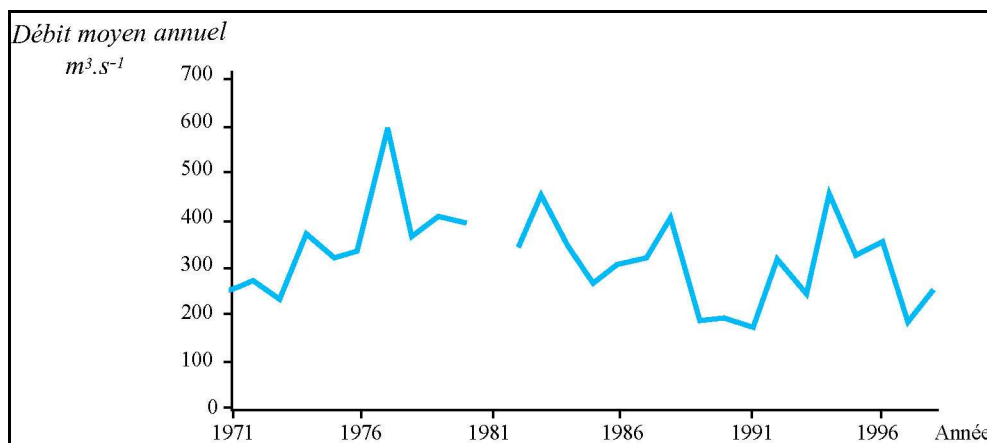


Figure 32 – Variabilité inter-annuelle du régime hydrologique de la Loire. Station de Givry

Le régime des précipitations détermine l'importance des crues. Aussi, du fait de la diversité des influences climatiques, il existe différents types de crues propres à la Loire (Pardé, 1964 ; Dacharry, 1974).

Les crues méditerranéennes : elles sont dites de type cévenol puisqu'elles se localisent dans les hauts bassins de la Loire et de l'Allier et sont sous l'influence méditerranéenne décrite précédemment. Des orages violents et rapides provoquent une ascension subite de la Loire et ses affluents, suivie d'une décrue tout aussi rapide. La crue de décembre 2003 que nous avons suivie peut être qualifiée de crue cévenole.

Les crues océaniques : elles font suite à une longue période de pluie provenant des flux d'ouest. Elles concernent l'ensemble du bassin versant de la Loire car ces influences océaniques remontent loin en amont de la Loire, mais elles se localisent surtout à l'ouest et au nord du bassin versant.

Les crues mixtes : ce sont les crues les plus fortes, les plus dévastatrices car elles sont le fruit de la « collaboration » des deux causes précédentes. La conjugaison de pluies océaniques et de pluies méditerranéennes provoque le gonflement de la Loire et ses nombreux affluents. Ces débits immodérés sur l'ensemble du bassin est particulièrement catastrophique pour les populations riveraines, comme cela s'est déroulé à trois reprises au cours du 19^{ème} siècle. A Gien les trois grandes crues historiques du fleuve, de plus de 7000 m³/s, se sont succédé en l'espace de 20 ans (1846, 1856 et 1866) (Figure 33).

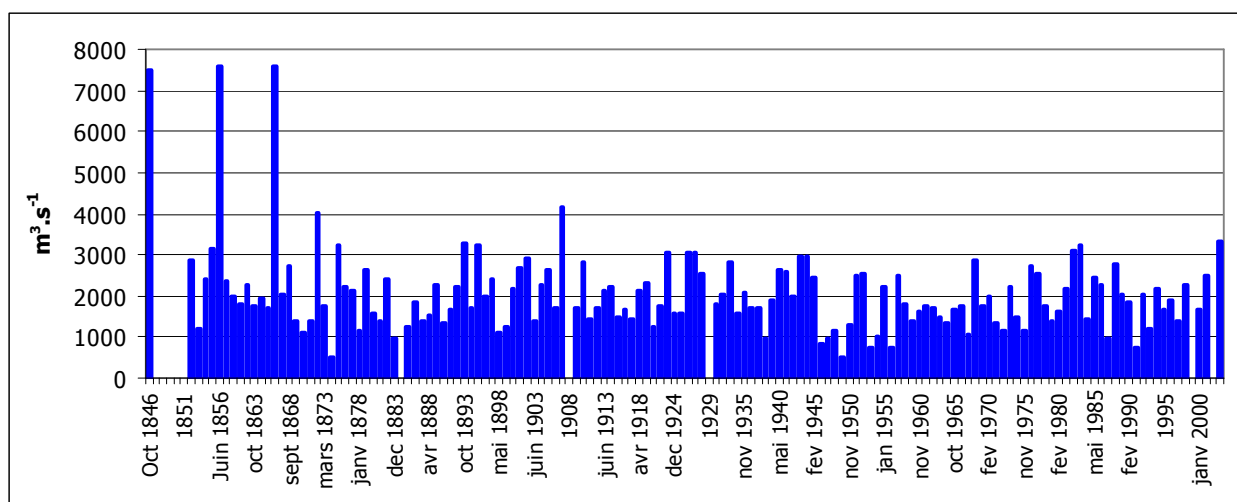


Figure 33 – Chronologie des crues en Loire moyenne depuis 1846.

Cette particularité géo-climatique reste essentielle à connaître. Le régime hydrologique de la Loire conditionne en effet fortement l'expansion de la végétation alluviale (Cornier, 2002 ; Bouchardy, 2002) par les fluctuations des niveaux de submersion. Pour notre cas, l'étude des conditions hydrologiques est très importante puisque l'on s'intéresse de près à la végétalisation du lit de la Loire et à ses facteurs d'expansion. Le rôle des crues constitue également un autre volet fort de notre travail car il s'agit d'évaluer leur capacité morphogénique et la mesure de leur influence sur la végétalisation du lit de la Loire.

2). Les Sites Ateliers de la Loire des îles

Nous présentons ici les grands Sites Ateliers de la fenêtre AT Anthroposystèmes marginaux de la ZAL. 3 grands Sites Ateliers ont été sélectionnés pour représenter la Loire des îles et le système anastomosés présents du Bec d'Allier à Gien.

a). Du Bec d'Allier à Gien : les Sites Ateliers de la Loire des îles

Il est vrai que les îles sont omniprésentes (Babonaux, 1970) pour quiconque observe la Loire. Les îles structurent en effet le paysage fluvial. Les conservatoires d'espaces naturels ont popularisé ce secteur de « la Loire des îles » car la diversité des formes fluviales en fait une variété d'habitats et par conséquent, un formidable réservoir de biodiversité (Collectif, 2006).

- Compte tenu du protocole de travail que nous avons défini au départ, il a été nécessaire de **déterminer des secteurs de référence** et donc de faire des choix. Pour représenter la Loire des îles, nous avons donc choisi trois Sites Ateliers, termes qu'il convient de replacer dans le contexte de la Zone Atelier de la Loire, au sein de laquelle le travail s'effectue à différentes échelles spatiales. Ces Sites Ateliers sont en quelque sorte des sites d'expérimentation de méthodes et d'acquisition de données, les nôtres en l'occurrence en géomorphologie fluviale environnementale.

Pour ce faire, nous reprenons les secteurs à îles du PNRZH Loire (Gautier et *al*, 2001) à savoir le site du **Bec d'Allier-Marzy (Site Atelier - SA 1)** et celui de **Soulangy (Site Atelier - SA 2)**. Un grand secteur expérimental a été choisi spécifiquement dans le cadre de cette thèse, celui de la **Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire**, entre La Charité-sur-Loire

et Tracy-sur-Loire (**Site Atelier - SA 3**) (Figure 35). Au regard de ces trois sites majeurs nous disposons d'une vaste zone représentative de la Loire moyenne et des secteurs anastomosés comme définis par Bazin et Gautier (1996).

Les sites du PNRZH ont été longuement étudiés et nous disposons ainsi de références qui peuvent être comparées avec les résultats de la méthodologie que nous mettons en place dans la réserve naturelle. D'autres sites sont utilisés puisque nous disposons de données analysées dans le cadre de maîtrise, DEA, Master 1 et Master 2 (Figure 34) : site de Guilly (Dupret, 2006 ; Guerin, 1996), sites de Fourchambault et Marseilles-les-Aubigny (Nabet, 2006) ; site de Bréhémont (Gaultier, 2000). Les étudiants étaient intégrés dans les problématiques de la ZAL et dans notre équipe de recherche du LGP.

- **Le choix de la Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire** s'est fait aussi dans un climat de rapprochement entre les géomorphologues et les gestionnaires des conservatoires d'espaces naturels, en particulier ceux des régions Bourgogne et Centre. Il a été convenu ainsi de faire participer les géomorphologues aux programmes menés par ces conservatoires sur la Loire. Et il est évident que les travaux issus directement du PNRZH sont à l'origine de ces rapprochements récents dans le temps.

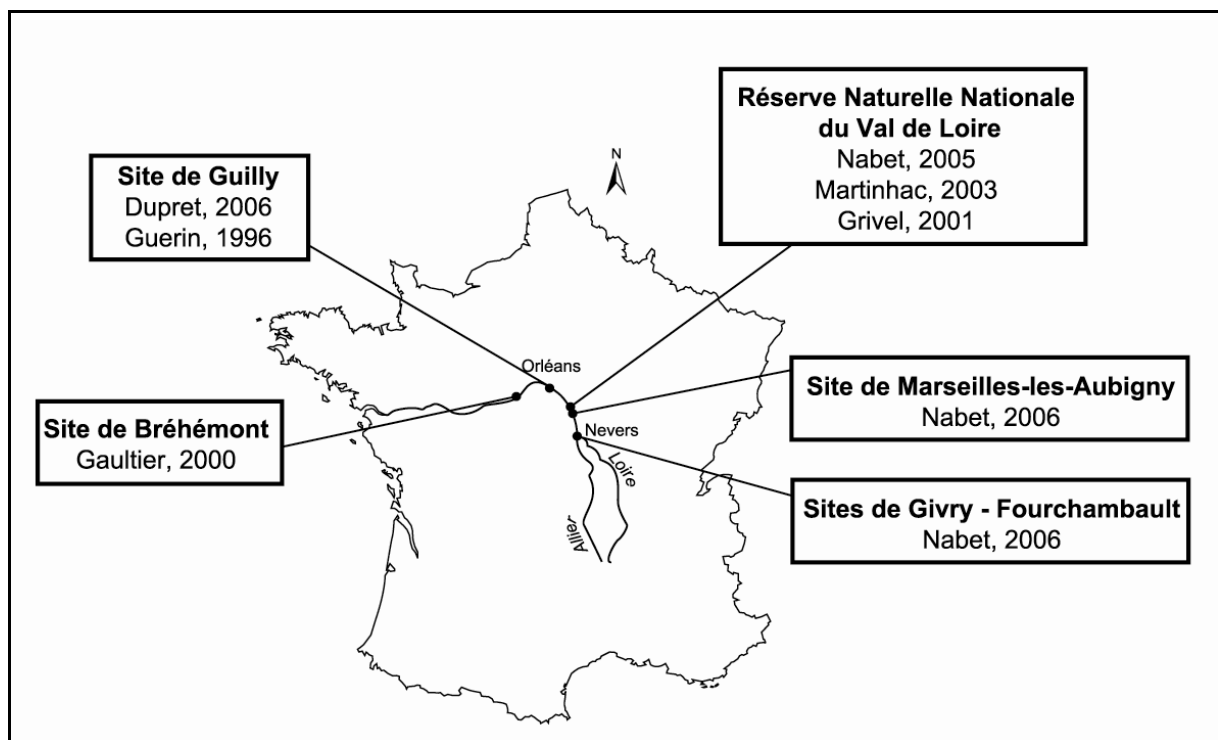


Figure 34 – Sites de la Loire moyenne ayant fait l'objet de recherche en géomorphologie fluviale dans le cadre de Master.

La Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire est relativement jeune, puisqu'elle fut créée en 1995, mais il faut préciser que son plan de gestion n'a été véritablement établi qu'en 2000. Le plan de gestion est découpé en plusieurs volets prenant le nom de Suivis Ecologiques (SE). Sous la forme d'une collaboration scientifique entre le conservatoire Bourgogne, gestionnaire principal de la réserve naturelle, et le LGP CNRS, nous avons pu concilier nos travaux de recherche fondamentale sur la Loire et les exigences du plan de gestion. Les 1500 ha que compte cette réserve naturelle, sont au cœur de notre approche multi-scalaire. Le programme comporte plusieurs volets qui correspondent à différentes opérations de Suivis Ecologiques du Plan de Gestion de la Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire ; nous nous intéressons aux SE consacrés à la dynamique fluviale : SE 1 (suivi des transects tests recoupant divers milieux), SE 3 (suivi par Photographie aériennes et SIG de l'évolution de la bande active) et SE 5 (suivi d'un profil en long et analyses des profils anciens existants).

b). Approche géographique du Site Atelier SA 3

Le Site Atelier 3 correspond donc à une Réserve Naturelle Nationale, statut français le plus fort en matière de protection de l'environnement avec les Parcs Nationaux. Elle est délimitée par des frontières administratives que la dynamique fluviale ignore. Notre travail ne se borne pas d'ailleurs à ses limites administratives, car les limites de la plaine d'inondation des Sites Ateliers les dépassent largement.

• **La Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire** s'étend sur 20 km de cordon fluvial et se situe à la fois sur le département de la Nièvre (rive droite) et celui du Cher (rive gauche) soit respectivement la région Bourgogne et Centre. Elle se situe ainsi dans la région agricole du Sancerrois, au nord de la Loire bourbonnaise, à l'ouest de la Champagne berrichonne et à l'est des Collines du Nivernais (Wasson et *al.*, 1993). Elles englobent 7 communes de part et d'autre de son corridor

Rive droite : La Charité-sur-Loire
Mesves-sur-Loire
Pouilly-sur-Loire
Tracy-sur-Loire

Rive gauche : La Chapelle-Montlinard
Herry
Couargues

Ses délimitations administratives de la réserve naturelle sont essentiellement calées sur les limites du lit mineur. La réserve naturelle recouvre quasiment 15 km² de Loire et de terrains inondables.

Sur ces 1500 hectares, 70 % environ concernent le Domaine Public Fluvial (D.P.F.), les 30 % restant sont partagés entre l'Etat, les communes et des propriétaires privées (CSNB, mars 1996 ; Rapeau, 1997).

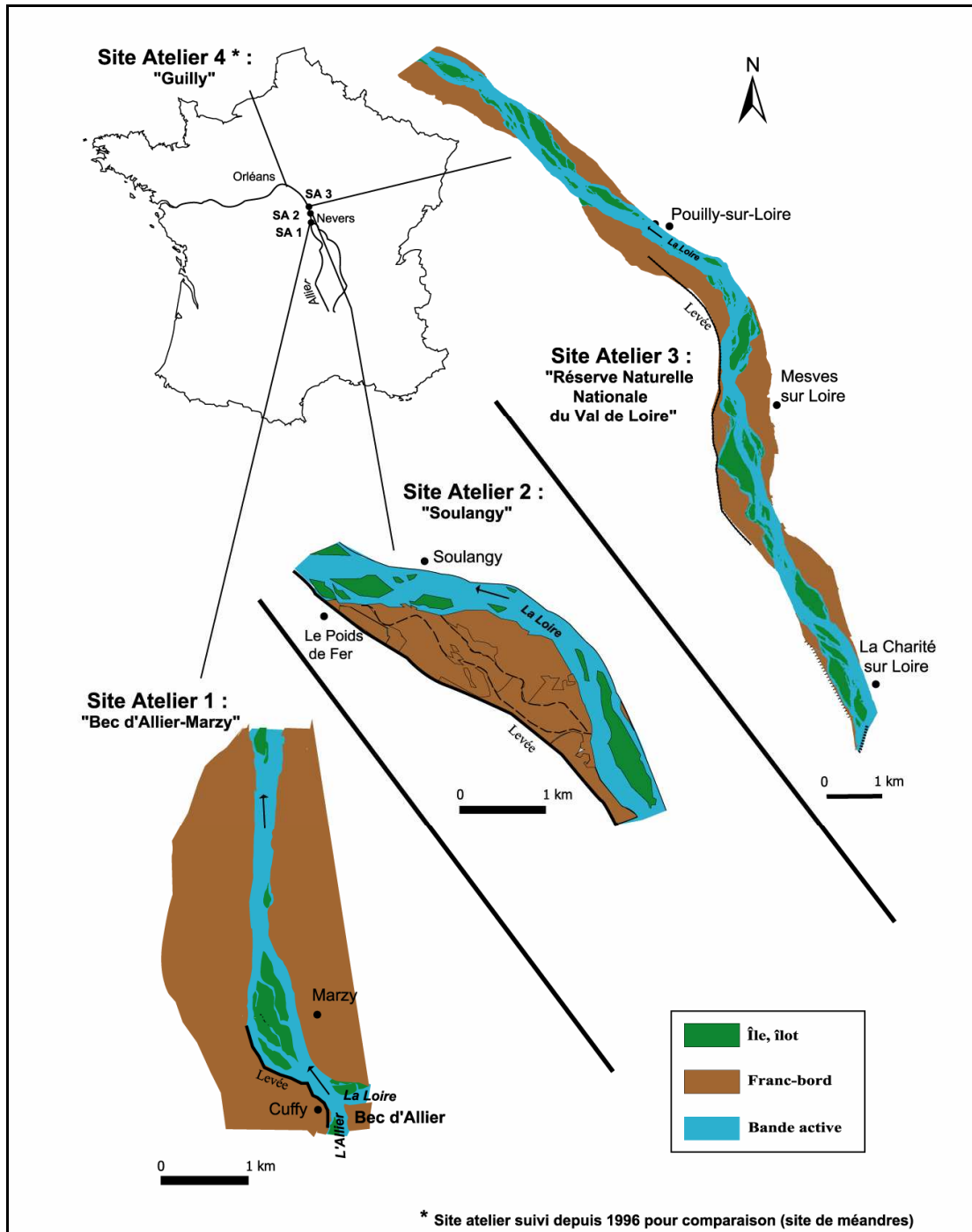


Figure 35 – Les trois Sites Ateliers de la Loire moyenne représentatifs de la Loire des îles.

c). Une zone d'expansion des crues - Morphologie du corridor fluvial

● **Le Site Atelier 3** présente toutes les caractéristiques d'une plaine d'inondation coupée de la bande active par des levées. Le concept de 3^{ème} lit de la ZAL prend ici tout son sens puisque la relative continuité des levées en rive gauche uniquement marque une frontière physique et paysagère frappante. La plaine d'inondation est pourtant large de près de 4 km dans sa plus grande largeur avec une moyenne de 3 km le long de ces 20 km de corridor fluvial de la Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire. Le lit vif ne représente pourtant pas plus de 1 km de large. La morphologie de ce corridor est tout à fait intéressante d'une part en matière de propagation des ondes de crues, et d'autre part dans le fonctionnement de cette plaine d'inondation coupée par le système de levées.

L'aménagement de cette plaine s'est réalisé relativement tard dans l'histoire de la mise en place des systèmes de protection contre les crues depuis le 18^{ème} siècle (Temam, 2005) (Figure 36). Nous trouvons ainsi des levées construites successivement au cours des 18-19^{ème} siècles (1810, 1820, 1830) (Dion, 1961). Deux déversoirs sont installés en marge de la réserve naturelle, voulus par l'ingénieur (Comoy, 1861), l'un sur le lieu dit de Passy, le plus important, l'autre au niveau de la commune de Couargues. Si le premier déversoir est visible facilement par l'interruption de la grande levée de Napoléon, l'autre en aval fonctionne par la submersion d'une levée moins haute que la précédente. La remise en activité de la plaine d'inondation par le jeu de ces déversoirs, et par les relations nappes-fleuve, nous intéresse tout particulièrement. Le suivi de la crue de décembre 2003 nous a apporté des clés de compréhension précieuses dans le fonctionnement hydro-sédimentaire de cette plaine d'inondation et le rôle des formes végétalisées.

La rive droite n'est pas équipée de ce système de levée, excepté dans les anciens sites portuaires (La Charité, Pouilly, Les Loges) marqués par des quais surélevés par rapport à la ligne d'eau. En rive droite, la présence des coteaux calcaires très pentus n'a pas nécessité la présence de ces ouvrages majeurs. Dans la même logique de coupure du lit vif de la plaine d'inondation, une chevrette, digue submersible conçue pour favoriser un chenal de navigation, contraint la dynamique fluviale. Elle se trouve sur le site de La Charité-sur-loire, marquant par la même occasion la limite amont de la dite réserve naturelle.

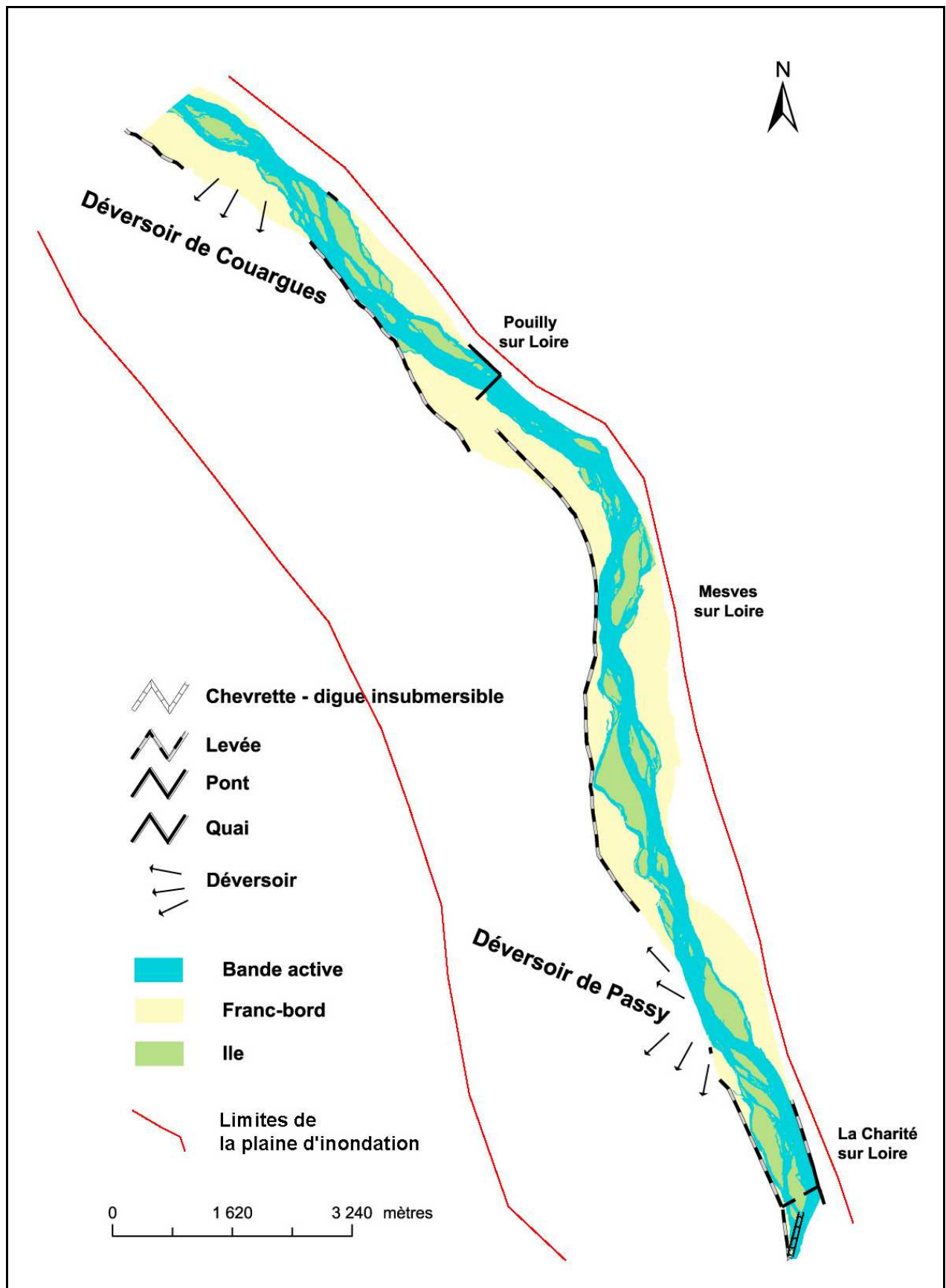


Figure 36 – Typologie des aménagements fluviaux dans le Site Atelier 3. Elle révèle à la fois l'ancienne fonction économique du fleuve, la navigation, et un des enjeux actuels majeurs, la gestion du risque d'inondation dans la vallée de la Loire.

En somme, cette « panoplie » d'aménagements du 19^{ème} siècle est aussi marquante dans le paysage fluvial qu'elle est contraignante pour la dispersion des débits liquides et solides. En terme de risques d'inondation, ces équipements suffisent à rappeler, au même titre que les laisses de crues visibles sur les bâtiments de la plaine d'inondation, que la Loire peut envahir son lit majeur et provoquer des perturbations dans l'organisation sociale de cette plaine d'inondation.

- **Ces secteurs de la Loire moyenne** sont des zones stratégiques en matière de protection du risque d'inondation du fait de l'installation de ces levées et déversoirs, également par la faible densité de population et d'activités économiques (Tableaux IV et V).

Cette stratégie est significative pour la protection des grands pôles économiques situés bien en aval de nos Sites Ateliers. Au-delà du Bec d'Allier jusqu'à Cosne-sur-Loire essentiellement, un relatif espace de liberté est laissé au fleuve pour s'épancher plus facilement par le jeu des déversoirs. Dès Cosne-sur-Loire, les activités économiques et les zones urbanisées sont plus denses. Cosne, Briare, Gien, Sully, Orléans, Tours représentent des enjeux économiques et humains majeurs dans le Val de Loire. De ce fait, en cas de crue, les déversoirs du Bec d'Allier (Le Guetin), de Passy et de Couargues favorisent l'inondation du val « amont » afin d'abaisser la ligne d'eau de crue en aval de Cosne. Ils jouent un rôle donc très important en terme de stratégie de lutte contre les inondations. Les géomorphologues et géographes y trouvent ici un terrain tout à fait propice à la confrontation des enjeux actuels de gestion du fleuve aux perturbations de la dynamique fluviale.

- **Des petits affluents inscrits dans d'anciens bras**

Ils participent à l'activité hydrologique de la plaine d'inondation et sont le seul lien actif et quasi pérenne entre la Loire et sa plaine d'inondation. C'est également par le biais de ces affluents que, en période forte crue, des écoulements secondaires se créent dans la plaine elle-même. Notre suivi de la crue de décembre 2003 permet en effet de le justifier par la suite. Ils ont pour la plupart repris d'anciens tracés de la Loire, donc des paléo-chenaux. Pour le Site Atelier 3, il s'agit des ruisseaux venant des coteaux calcaires suivant :

- le Rû du Lac en rive gauche : le plus long et il prolonge le paléo-méandre dit du Lac pour déboucher proche de la Loire dans une grande zone tampon constituée de nombreuses boires ponctuelles.
- le ruisseau de Passy en rive gauche : il débouche dans un bras secondaire au lieu dit Passy, juste en aval de La Charité-sur-Loire (Photographie 2)
- le Mazou en rive droite : il longe sur plusieurs centaines de mètres la Loire qu'il finit par rejoindre juste à la connexion aval du site expérimental des Barreaux.



Photographie 2 – Un exemple d’affluent de la Loire en rive gauche, le ruisseau de Passy.
Son parcours est en partie calé sur un paléo-chenal de la Loire.

Tableau IV - Les Sites Ateliers et leurs caractéristiques physiques

Site Atelier SA	SA 1	SA 2	SA 3
Nom	« Bec d'Allier – Marzy »	« Soulangy »	« Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire »
Longueur du corridor	5 km	6 km	20 km
Largeur de la plaine	1,5 – 2 km	2 – 3,5 km	2 – 4 km
Style fluvial			Chenaux multiples
Pente du cours d'eau (m m⁻¹)	0,00056 – 0,00045	0,00048 – 0,0004	0,0004
Puissance spécifique	20 - 15 W m ⁻²	15 – 11 W m ⁻²	12 – 11 W m ⁻²
Mésformes principales	Bras secondaires, îles, francs-bords	Bras secondaires, îles, francs-bords	Bras secondaires, îles, francs-bords
Nombre de chenaux	2	2	2 à 3
Type de sédiments de plaine	Sable et limons	Sable et limons	Sable et limons
Type de sédiments de chenal actif	Sables, graviers, galets	Sables, graviers, galets	Sables, graviers, galets
Processus sédimentaires	Accrétion verticale	Accrétion verticale	Accrétion verticale
Type de zones humides	Bras morts	Bras morts	Bras morts
Station hydrologique	Station de Givry	Station de Givry	Station de Givry
Analyse spatiale	Diachronie du site + SIG	Diachronie du site	Diachronie du site + SIG
Topographie	Oui par théodolite	Oui par théodolite	Oui par DGPS et théodolite ; MNT
Suivis annuels	PNRZH Loire (1998-2001)	PNRZH Loire (1998-2001)	2002-2005 4 sites expérimentaux Suivi des îles, bras secondaires et francs-bords

Tableau V - Les Sites Ateliers et leurs caractéristiques socio-géographiques

Site Atelier SA	SA 1	SA 2	SA 3
Nom	« Bec d'Allier – Marzy »	« Soulangy »	« Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire »
Région	Bourgogne (rive droite) Centre (rive gauche)	Bourgogne (rive droite) Centre (rive gauche)	Bourgogne (rive droite) Centre (rive gauche)
Communes	Rive droite : Marzy Rive gauche : Cuffy	Rive droite : Cours-les-Barres, Jouet-sur-l'Aubois, Rive gauche : Germigny-sur-Loire	Rive droite : La Charité-sur-Loire, Mesves-sur-Loire, Pouilly-sur-Loire Rive gauche : La Chapelle-Montlinard, Herry, Couargues, Tracy-sur-Loire
Présence d'ouvrages	Levée en rive gauche	Levée en rive gauche	- Levées en rive gauche - Déversoirs en rive gauche - Chevrette de La Charité
Usages	- Agriculture extensive (pâturage) proche de la Loire - Agriculture intensive outre levée	- Agriculture extensive (pâturage) proche de la Loire - Agriculture intensive outre levée	- Site protégé - Agriculture intensive et extraction en dehors de la réserve naturelle
Paysage de la plaine	Bois, culture, pâturage, landes	Bois, culture, pâturage, landes	Bois, culture, pâturage, landes
Type d'habitat	- Fermes et hameaux dispersés - Villages sur les coteaux de rive droite	- Fermes et hameaux dispersés - Villages sur les coteaux de rive droite	- Fermes et hameaux dispersés - Villages sur les coteaux de rive droite
Enjeux	- Risque d'inondation - Site protégé - Zone Natura 2000	- Risque d'inondation - Sites de restauration du lit - Zone Natura 2000	- Risque d'inondation - Sites de restauration du lit - Site protégé - Zone Natura 2000 - Zone d'Approvisionnement en Eau Potable - Patrimoine historique (chevrette)

3). Les sites expérimentaux étudiés à grande échelle

Au début de la thèse, l'intégralité de la réserve naturelle a été prospectée pour trouver des sites aussi diversifiés permettant la mise en place de notre protocole de recherche en géomorphologie fluviale. En se focalisant sur les couples bras-îles, les sites d'approche ne manquaient pas sur ce SA 3. C'est évidemment la diversité des configurations topographiques et hydro-dynamiques qui a guidé nos choix (Tableaux IV et V). En 2002, les premiers résultats de l'analyse spatiale à moyenne échelle sous le SIG laissaient

apparaître des schémas d'évolution variés et des rythmes de formation différents des îles et des bras secondaires les accompagnant. Nous avons d'abord sélectionné trois sites majeurs, trois secteurs ayant connu une évolution différente et également des bras secondaires présentant d'emblée des degrés d'hydrodynamisme très divergent. Puis en 2004, un nouveau grand secteur expérimental a été sélectionné pour disposer d'abord d'un site de référence dans un contexte de forte perturbation de la dynamique fluviale par le biais des ouvrages de navigation (chevrette, levées, quais et île urbanisée). D'autre part, en 2004, une collaboration scientifique avec le Service de Navigation de la DDE de Nevers-Saint-Satur s'est développée pour mettre en place une expertise de ce site d'intervention dans le cadre de l'entretien et de restauration du lit de la Loire (Nabet, 2005). Nous reprenons une bonne partie des résultats issus de ce travail de Master 1 pour resituer les résultats et montrer l'importance de notre approche géomorphologique dans la compréhension de la dynamique fluviale et la possibilité d'expertiser fiablement les sites ciblés.

Ces quatre secteurs présentent donc des paramètres morphodynamiques différents que nous présentons ici en l'état 2002, tels qu'ils ont été sélectionnés (Figure 37 et Tableau VI). Les modifications de ces sites expérimentaux font l'objet d'un chapitre bien précis par la suite. Les méthodologies appliquées à ces quatre sites sont détaillées dans le chapitre suivant, retenons simplement que les connexions et les seuils de fonctionnalités hydrologiques des chenaux secondaires nous intéressent précisément. Nous présentons ici les caractéristiques premières de ces différents secteurs et les critères de notre sélection d'amont en aval.

a). Le Site de La Charité-sur-Loire

Le site de La Charité reste le dernier site choisi au cours de la thèse. Ce choix s'est essentiellement réalisé du fait de la mise en œuvre d'un sujet de Master 1 Recherche (Nabet, 2005). Il s'agissait alors de reprendre le protocole méthodologique de la thèse (chapitre 2) et de l'appliquer à un site situé dans un contexte très aménagé. L'autre but était de réaliser une expertise géomorphologique du bras secondaire situé en arrière de la chevrette de La Charité-sur-Loire (Figure 38). Cette demande est issue directement de la collaboration avec la Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire. Les maîtres d'ouvrages

des travaux d'entretien et de restauration du lit de la Loire comptaient se fonder également sur une véritable expertise géomorphologique de ce long bras secondaire situé en arrière d'un ouvrage (DDE de Nevers et Saint-Satur).

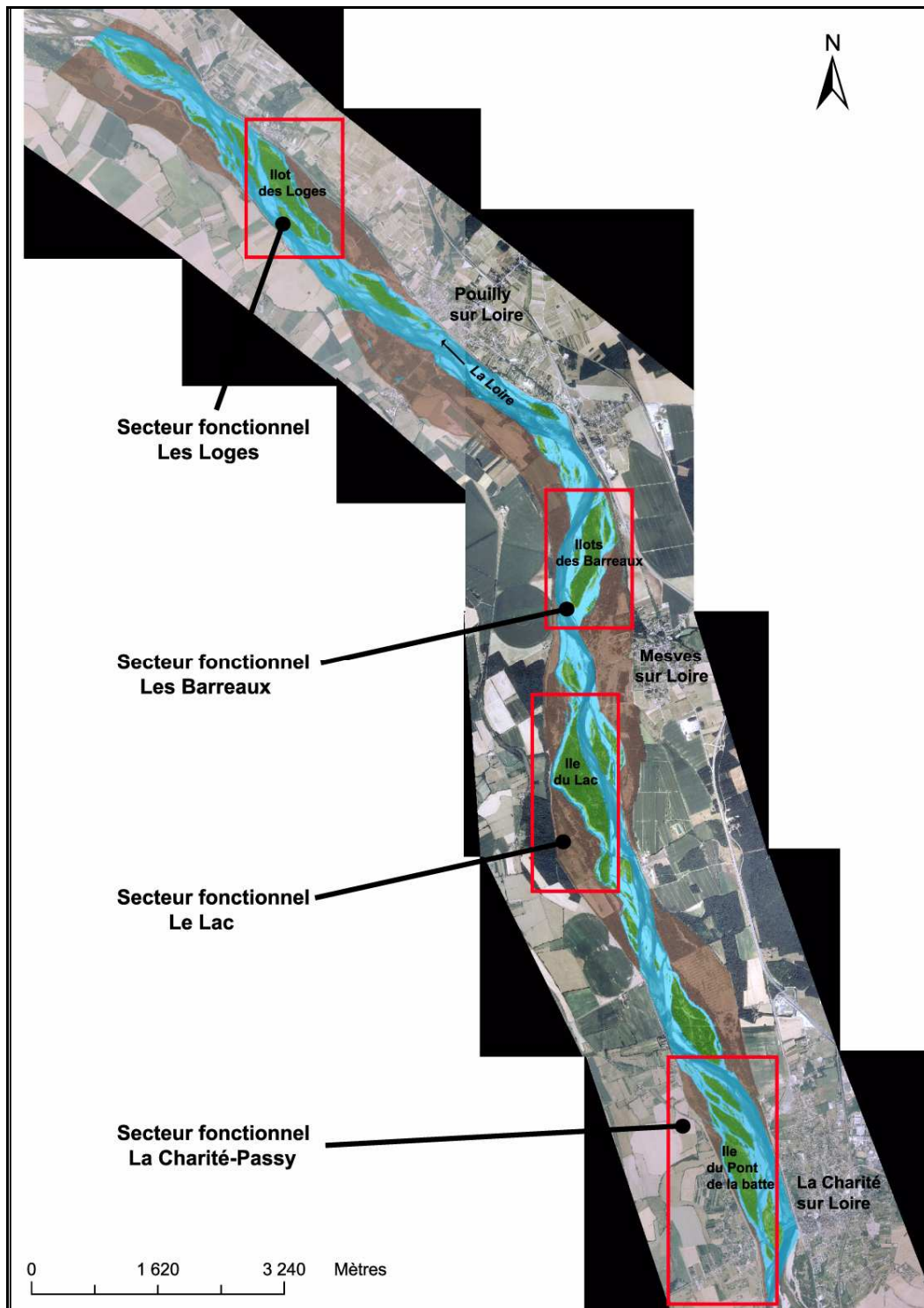


Figure 37 – Les quatre sites fonctionnels du Site Atelier 3. Ils offrent une grande diversité de configuration géomorphologique à partir du triptyque bras-îles-francs-bords.

En effet, une chevrette, construite en 1848, permet la dérivation des eaux courantes vers le port de La Charité-sur-Loire en rive droite. Cette chevrette forme un obstacle linéaire aux flux liquides et solides, et perturbe la dynamique fluviale et la sédimentation en aval de cette digue submersible. Une « panoplie » d'aménagements, typiques de la Loire comme levées, perrés, pont et quais se concentre autour de ce site expérimental. Le bras secondaire en lui-même reste tout à fait particulier : une longueur très importante (2,5 km de long) et une largeur inégale en fonction des parties du chenal. Le chenal en amont est alimenté par les écoulements provenant du chenal principal au niveau de la chevrette. Du fait de la chevrette et de l'île du Faubourg de la Charité-sur-Loire, le chenal principal s'éloigne de la rive gauche pour longer les quais de rive droite de la Charité. Ce n'est qu'au bout de près de 2 kilomètres que le bras principal se rapproche de la sortie aval du bras secondaire, au niveau de Passy. Cette connexion aval se localise dans une zone diversifiée par de nombreux petits chenaux et de grandes îles.

Il apparaît que ces chenaux secondaires sont à des stades différents de végétalisation, mais on observe une certaine cohérence dans l'âge des cortèges floristiques et l'ancienneté des bras : du sud au nord, les trois îles successives, les Ilots de Vaudrilly, encadrent des chenaux secondaires différents : le plus au sud est en stade de lande, de milieux diversifiés mais en transition, alors que le plus au nord révèle toutes les caractéristiques d'un chenal bien actif faiblement végétalisé.

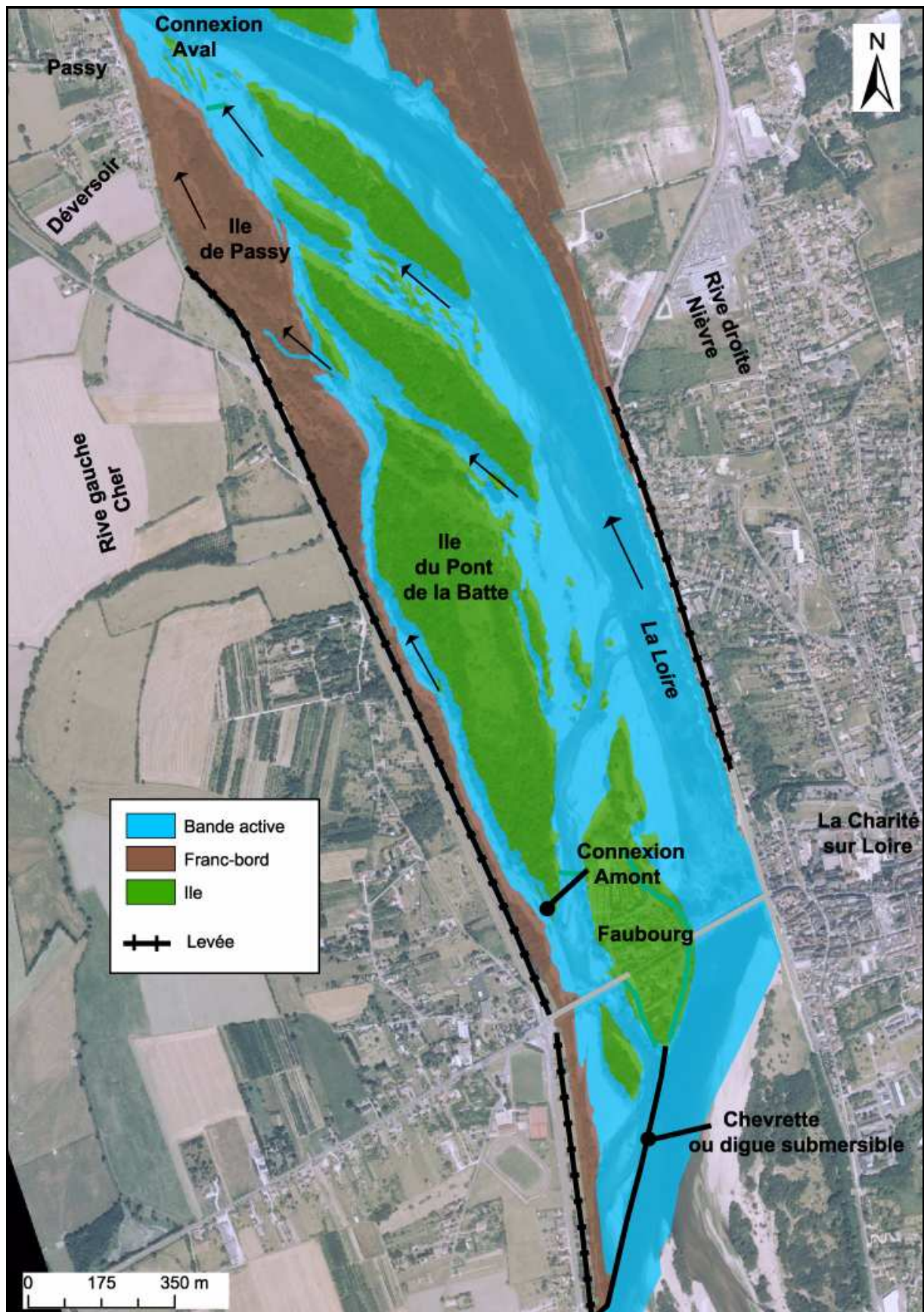


Figure 38 – Le site fonctionnel de La Charité-sur-Loire.
 Il est très aménagé, en aval d’une chevrette et entre des levées.

b). Le Site du Lac

L'île du Lac avait déjà été prospectée lors du LIFE Loire Nature I (1993) et cette première approche avait dégagé les intérêts de recherche.

D'un point de vue géomorphologique, ce site est un ensemble caractéristique des secteurs à îles de la Loire moyenne (Figure 39). On y trouve un chenal secondaire très long (2,3 km) longeant intégralement une très grande île (Ile du Lac), un large franc-bord adossé à la Grande levée de Napoléon (jusqu'à 500 mètres de large) et un ensemble d'îlots. Ce long chenal présente une connexion amont très mince (à peine 10 mètres de large) et une sortie aval un peu plus dégagée (50 mètres de large). En amont, il existe une ancienne connexion entre ce bras et le chenal principal : elle est aujourd'hui comblée et végétalisée. Au regard du SIG, il apparaît que ce chenal encombré était, avant 1995, la connexion hydrologique principale de ce long bras secondaire. Nous nous attardons plus longuement sur cette histoire un peu plus loin. Nos prospections sur le terrain nous ont permis de déterminer un premier seuil de débit de connexion, à partir de $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Cette mince connexion amont, peu profonde, éloignée du chenal principal de plus de 150 m en constituait un cas original dans ce Site Atelier. Cette connexion très mince est très récente, 20 ans environ.

L'île du Lac (443 000 m^2 environ) domine cet ensemble de par la hauteur de ces berges (plus de 6 m en tête d'île). Cette hauteur diminue à mesure que l'on se rapproche de l'aval. Toujours est-il que cette île s'est formée par la coalescence de plusieurs îlots, ce qui explique l'irrégularité de la topographie insulaire (Gautier et Grivel, 2003).

Le chenal secondaire en lui-même est large et la faible végétalisation de son plancher laisse croire une hydrologie assez fonctionnelle pour limiter cette expansion végétale. Pour finir, notre choix s'est définitivement porté sur ce site, du fait de l'existence de profils antérieurs susceptibles d'être réactualisés par notre méthodologie d'approche.

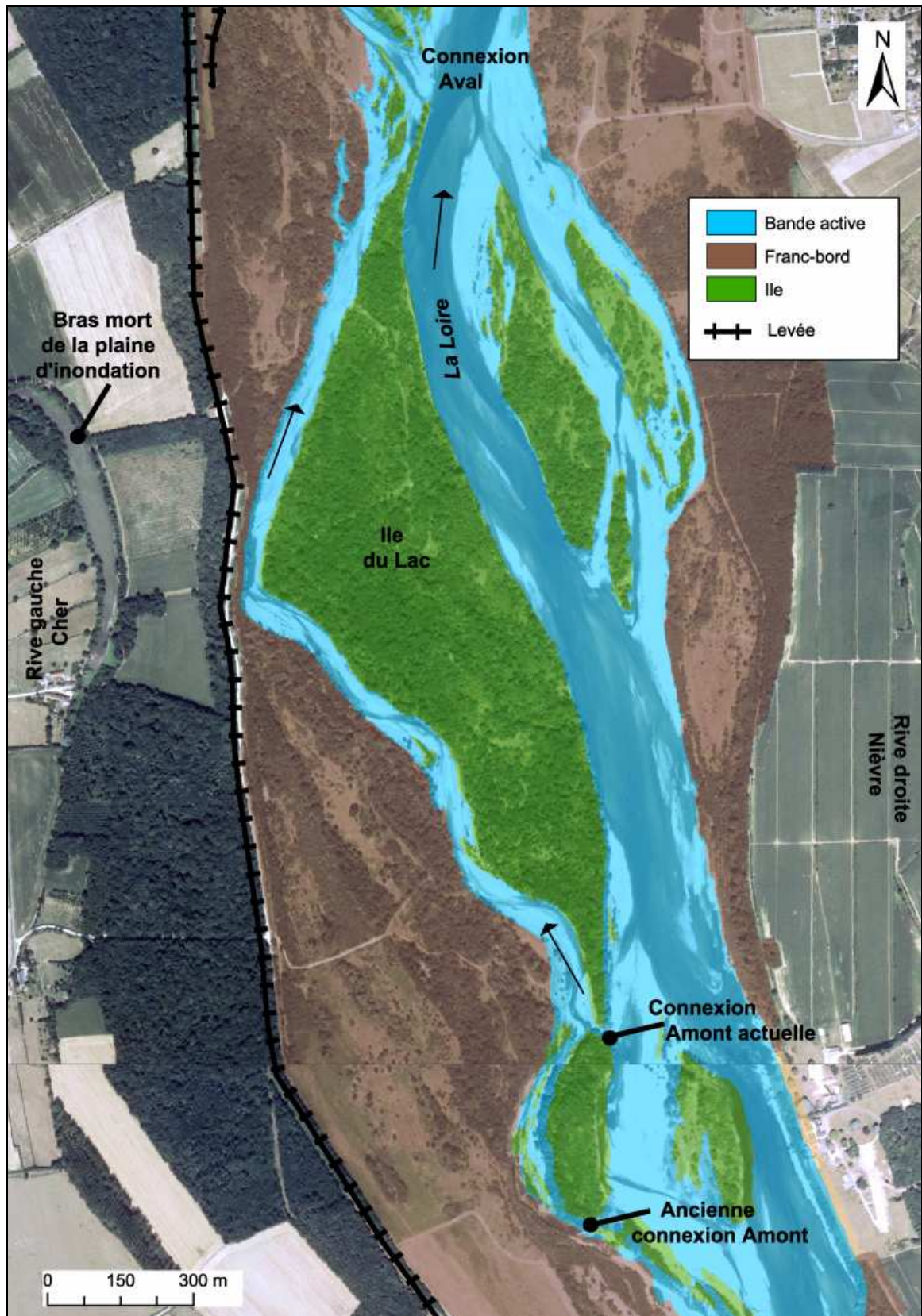


Figure 39 – Le site fonctionnel du Lac.

Il se caractérise en 2002 par une mince connexion amont, un long chenal dégagé peu végétalisé et une queue d'île très mince parcourue de brèches. La dissymétrie de la bande active est très marquée entre le chenal principal en rive droite et le chenal secondaire de rive gauche.

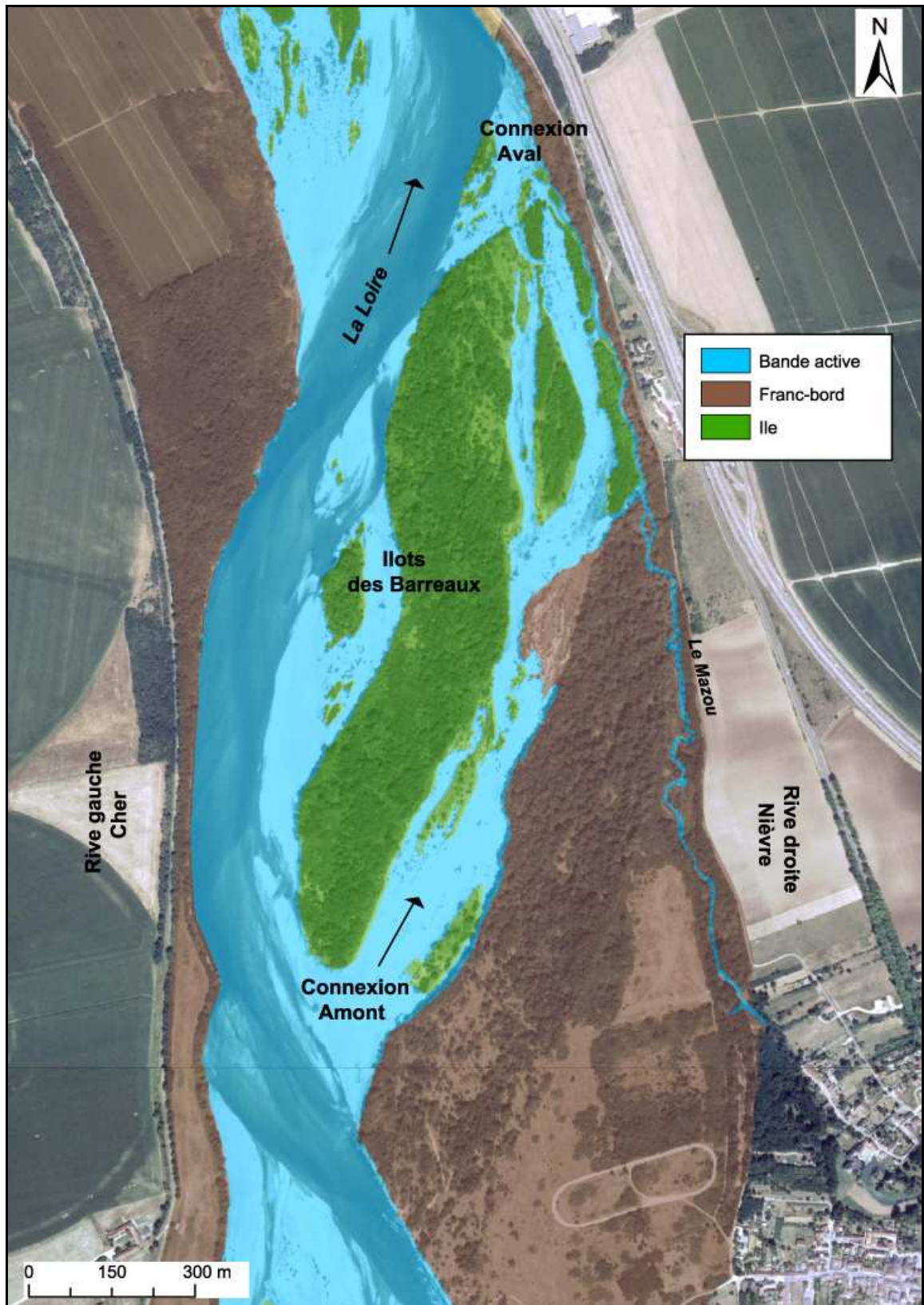


Figure 40 – Le site fonctionnel des Barreaux.

Il présente des formes fluviales très développées : un large chenal secondaire semi-végétalisé, un très large franc-bord en rive droite et une île très large et allongée. Le premier contraste entre une connexion amont dégagée et peu végétalisée et une connexion aval encombrée par des îlots d'arbres invitent à étudier de plus près cette diversité et ces oppositions géomorphologiques.

c). Le Site des Barreaux

Ce site présente un autre type de bras secondaire associé à une très grande île (Ile du Pont de la Batte de 238 000 m² environ) et un franc-bord (Figure 40). Tout d'abord, les dimensions de ce chenal secondaire sont assez exceptionnelles, avec une longueur de près de 2 km et surtout une largeur de 90 à près de 250 m, soit presque aussi large que le chenal principal le jouxtant.

Ce bras était, avant 1960, le chenal principal. Ce basculement, dont nous expliquons la cause dans un autre chapitre, s'est marqué par un exhaussement du bras secondaire. Le « perchement » du bras est effectivement très perceptible par rapport au chenal principal. La reconnexion par l'amont est peu fréquente. Ce n'est qu'à partir de 1400 m³.s⁻¹ que ce chenal se retrouve effectivement entièrement actif.

La végétation semble aussi avoir pris de l'expansion dans ce bras secondaire et tout particulièrement en aval. L'aval de ce bras est en effet le siège d'une forte végétalisation. Deux îlots sont nés au sein même du bras laissant ainsi apparaître deux chenaux distincts de part et d'autre de ces îlots. La dissymétrie, non topographique mais végétale est assez frappante : les écoulements sont libres, alors qu'à mesure que l'on se rapproche de l'aval, les bouchons alluviaux sont bien présents et la végétation de plus en plus envahissante. C'est tout l'intérêt de ce site que de pouvoir disposer d'un exemple concret de comblement et de colonisation végétale intense.

De plus, la présence d'une très grande île, à l'image de l'Ile du Lac, ainsi que celle d'un franc-bord très étendu (4 km de long pour 800 m de large), donnent d'autres arguments de choix. L'île est issue de la formation de plusieurs îlots, ce qui lui donne une topographie complexe et variée.

d). Le Site des Loges

Ce site a été sélectionné pour plusieurs raisons d'ordre hydro-géomorphologique (Figure 41).

La première repose sur une évidence dynamique : les chenaux secondaires sont dans leur intégralité toujours actifs. Cela apparaît clairement à travers la diachronie des images aériennes des cinquante dernières années. L'observation du terrain laisse effectivement

apparaître un long chenal (1,850 km), pas très large (de 60 à 80 m), mais suffisamment profond pour permettre un écoulement pérenne. Il s'agit du bras secondaire le plus actif et le plus profond du Site Atelier SA 3. La Loire est quant à elle calée en rive gauche révélant ainsi une certaine dissymétrie de la bande active.

L'autre raison concerne la présence en amont de trois connexions inégalement activées suivant les débits. L'étude et l'analyse à échelle fine montre d'ailleurs ce particularisme hydrologique (chapitre 4). Une connexion est constamment active et permet cet écoulement pérenne. Les deux autres, moins larges, se localisent de part et d'autre d'un îlot de peupliers noirs légèrement surélevés (plus de deux mètres par rapport aux chenaux secondaires). Les débits de connexion de ces annexes hydrauliques sont en moyenne effectifs à $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Le contexte géomorphologique demeure tout aussi intéressant. Un large franc-bord, né de plusieurs phases d'extension par rattachement d'anciennes îles, joue un rôle de zone-tampon en période de crue, fonctionnalité reconnue de ces zones humides (Gautier et al, 2001). Ce franc-bord se compose de successions végétales de ces marges latérales (formation à bois tendre et à bois dur, landes inextricables à pruneliers). Les présences de dépressions et d'un long bras mort préservé attestent des phases anciennes de comblement et d'extension de cette marge latérale. Un profil topographique réactualisable passe d'ailleurs sur ce franc-bord et les autres mésoformes fluviales qui nous intéressent, ce qui est encore un facteur de choix (Profil A200). Un autre est localisé à la sortie du bras sélectionné et est l'objet également de réactualisation annuelle (Profil A201). Ce franc-bord subit l'érosion de ses berges, parfois hautes (plus de trois mètres), du fait de la capacité morphogénique régulière des débits s'écoulant dans ce chenal.

On trouve ainsi dans ce complexe de formes fluviales des îles de différentes tailles (deux mètres de différence), formées dans des schémas d'évolution différents (que nous développons dans un autre chapitre) :

Le chenal principal est éloigné de ces trois connexions amont de près de 300 m, du fait de deux grandes îles. En aval, la distance au chenal principal dépasse les 350 m.

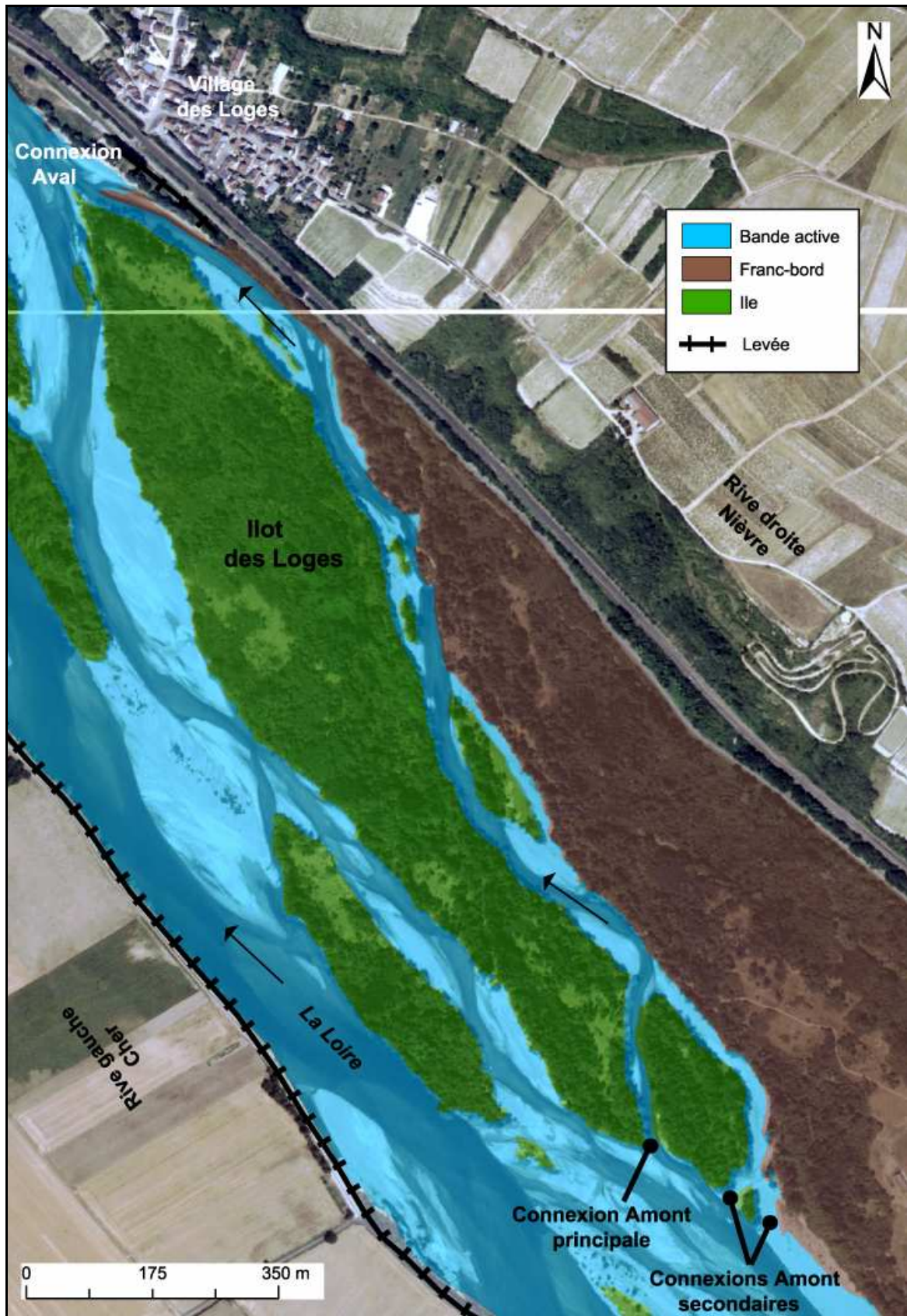


Figure 41 – Le site fonctionnel des Loges.

Son particularisme tient en la triple connexion hydrologique du long bras secondaire. Le levée de rive gauche semble conditionner la formation des îles côté rive droite en favorisant la chenalisation à son pied.

Pour finir la présence d'une levée en rive gauche, doublée d'un enrochement de berge, accélère et concentre l'essentiel des débits de ce côté. Le déversoir de Couargues est directement face à cet ensemble. D'un côté, nous trouvons une zone-tampon naturelle en temps de crue en rive droite, de l'autre un déversoir, remis en eau à partir de 2500 m³.s⁻¹, s'ouvre sur une large plaine d'inondation habitée et cultivée.

Tableau VI – Les caractéristiques des sites fonctionnels du Site Atelier 3

Secteurs fonctionnels	Paramètres morphométriques	Hydro-dynamisme	Contexte géomorphologique	Travaux d'entretien	Aménagements locaux
La Charité	L : 2,5 km l : de 60 à 150 m	Débit minimal de remise en eau du chenal secondaire : 300-350 m ³ .s ⁻¹	- Ile du Pont de la Batte - Ilots de Vaudrilly et Passy - île bâtie du Faubourg	Zone d'intervention privilégiée dans le cadre du Plan Loire : 1996 et 2004	- Quais en rive droite - Quai rive gauche Passy - Levée de rive gauche - Déversoir Rive gauche - 2 ponts au Faubourg
Le Lac	L : 2,3 km l : de 60 à 90 m	Débit minimal de remise en eau du chenal secondaire : 300 m ³ .s ⁻¹	- Ile du Lac - Franc-bord en rive gauche		- Levée Rive gauche
Les Barreaux	L : 1,9 km l : de 90 à 250 m	Débit minimal de remise en eau du chenal secondaire : 600 m ³ .s ⁻¹	- Ile des Barreaux - Ilots annexes - Franc-bord de rive droite	2004	- Levée Rive gauche - Perré en aval
Les Loges	L : 1,850 km l : de 20 à 60 m	Débit minimal de remise en eau du chenal secondaire : 50 m ³ .s ⁻¹	- 2 îles - 3 connexions		- Levée Rive gauche - Déversoir de Couargues en rive gauche - Quai des Loges

Le cadre d'étude a permis de poser les bases conceptuelles de nos problématiques autour du style anastomosé de la Loire moyenne. Les études consacrées aux chenaux anastomosés ne manquent pas, mais il nous est apparu une évidence : peu de références scientifiques existent sur ces systèmes en milieu tempéré, et surtout la place des unités fonctionnelles les constituant n'a presque jamais été considérée. L'omniprésence des îles en Loire moyenne et le peu d'attention scientifique portée à leur égard constituent de ce fait des thèmes de recherche bien novateurs.

Le choix de trois Sites Ateliers entre le Bec d'Allier et Gien se justifie à la fois par un héritage scientifique récent, dans le cadre du PNRZH essentiellement, et par l'élan des travaux engagés dans la Zone Atelier Loire. Les secteurs de Marzy (SA 1) de Soulangy (SA 2) et de la Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire (SA3) représentent ces Sites Ateliers. Ce dernier site (SA 3) constitue notre site expérimental à travers la sélection de quatre secteurs. Ces secteurs fonctionnels constituent ainsi le terrain de notre approche fine depuis 2002, dans le but premier de comprendre le fonctionnement hydro-sédimentaire de la Loire des îles.

De plus, nous considérons notre discipline, la géomorphologie environnementale comme un outil précieux d'analyse, d'interprétation et d'adaptation à la gestion des milieux « naturels ». Etudier la Loire apporte indubitablement des clés de compréhension aux gestionnaires spécialisés.

Chapitre 2 - Le cadre méthodologique de la thèse

Pour répondre à chacun des objectifs définis dans l'introduction, nous avons mis en place un protocole méthodologique bien particulier. Nous avons ainsi choisi une démarche multi-scalaire faisant appel à des outils spécifiques et adaptés à chaque volet de la problématique de la thèse (Figure 42). L'étude de la dynamique de la Loire moyenne peut alors être comprise dans son évolution depuis 150 ans et analysée à travers les processus hydro-sédimentaires actuels.

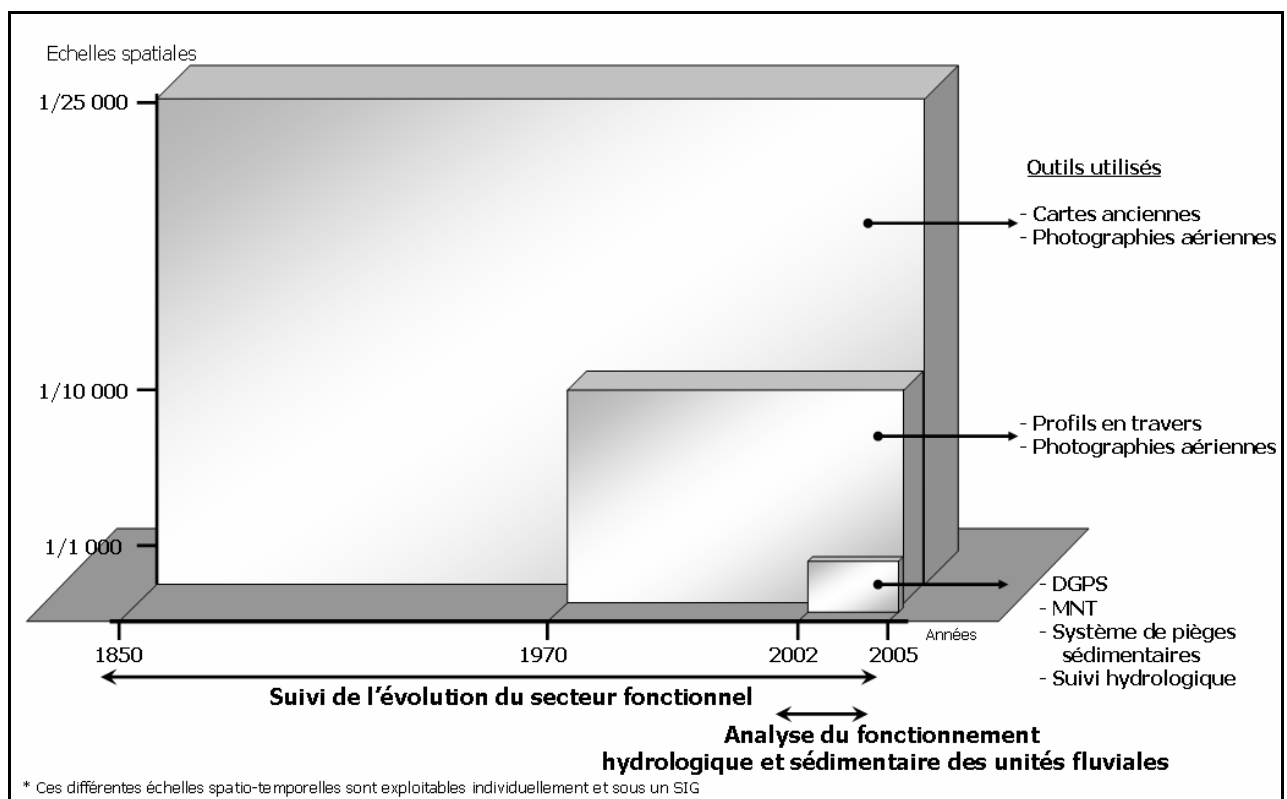


Figure 42 – Méthodes et outils en fonction des échelles de temps et d'espace.

L'approche multi-scalaire déploie de ce fait plusieurs méthodes et d'outils d'analyse spatiale :

- L'approche moyenne, depuis le 19^{ème} siècle jusqu'à aujourd'hui. De cette approche découlent toute la diachronie de l'évolution du secteur fonctionnel et les typologies des formes fluviales. L'échelle historique repose avant tout sur le développement d'un Système d'Information Géographique (S.I.G.);

- **La grande échelle repose sur deux méthodes**

- **1970-1995** : la grande échelle à l'aide de la comparaison de profils topographiques. Certains profils ont été réactualisés en 2002, 2003, 2004 et 2005 ;
- **2002 à 2005** : la grande échelle permet le suivi des bras secondaires expérimentaux, des îles et des processus d'érosion-sédimentation en fonction de diverses conditions hydrologiques. Il s'agit ici de mesures de terrain effectuées tout au long de ces années de recherche ;

Nous distinguons de ce fait **deux échelles de temps** pour répondre à nos interrogations :

- **Sur le pas de temps long : mise en évidence des facteurs hydrologiques et socio-économiques**

L'approche géographique demeure notre discipline de base dans le sens que nous étudions de près les relations et les interactions Sociétés/Milieus. L'étude bibliographique et les méthodes plus « académiques » de recherche documentaire dans les différents organismes ou entités spécialisées (musées, rencontres etc...) ont été largement pratiquées pour déterminer les facteurs anthropiques, et plus précisément des activités socio-économiques. Depuis le 19^{ème} siècle, nous effectuons une synthèse des impacts des différents facteurs bien connus (extractions de sédiment principalement sans pour autant s'étendre sur un sujet aussi bien cerné) et des facteurs bien moins analysés et connus à ce jour (la navigation). En ce sens, la démarche géographique trouve sa place par la mise en relation Usages/Loire ;

- **Sur le pas de temps court : réponse sédimentaire des unités fonctionnelles aux évènements hydrologiques et identification des interactions entre facteurs topographiques, biologiques (végétation) et morphodynamiques.**

- Le facteur hydrologique : ce facteur physique représente à nos yeux de géomorphologues une condition essentielle dans le transit des flux solides et liquides (Bravard et Petit, 1996). L'intensité des crues, l'influence des débits morphogènes, les débits de connexion des différents bras secondaires sont autant de conditions hydrologiques que nous étudions de très près. A l'image de l'approche multi-scalaire, le facteur

hydrologique est étudié sous différentes fenêtres spatio-temporelles : chronologie des crues, durée des basses eaux, conditions hydrologiques de 2002 à 2005 ;

- Le facteur biologique : il s'agit d'un facteur de contrôle clé dans la dynamique fluviale (Dufour, 2005 ; Ruffinoni et *al.*, 2003 ; Cornier, 2002 ; Amoros et Petts, 1993). Il demeure fortement lié à l'évolution morpho-dynamique de la Loire et est à l'interface de la dynamique fluviale et des facteurs socio-économiques.

A. Méthodologie à moyenne échelle : l'analyse spatiale pour comprendre l'évolution de la Loire des îles et les mécanismes de formation des unités fonctionnelles depuis le 19^{ème} siècle

L'évolution de l'ensemble fonctionnel (Loire des îles) repose sur l'approche diachronique. L'échelle moyenne a été analysée à l'aide d'un Système d'Information Géographique (S.I.G.) dont nous énumérons ci-après les grandes étapes. Une base de données géoréférencées a ainsi été mise en œuvre, avec la spécificité d'être réactualisable, chose essentielle pour joindre recherche fondamentale et application auprès des gestionnaires.

1). Les objectifs de l'approche moyenne

Pour rappel, un des objectifs de la recherche doctorale est de caractériser l'évolution du lit de la Loire moyenne à travers trois Sites Ateliers. Nous avons développé ainsi un SIG sur le Site Atelier 3, celui de la réserve naturelle, que nous avons ensuite adapté aux SA 1 et 2.

L'étude prend en compte le lit de la Loire entre les levées (en rive gauche) et le pied du coteau en rive droite soit un linéaire d'environ 20 kilomètres et une surface de 17000000 m². L'analyse temporelle porte sur 150 ans : du milieu du 19^{ème} siècle à 2002. Le protocole d'analyse spatiale du lit de la Loire s'insère dans les méthodologies actuelles en géomorphologie fluviale, ayant largement fait leur preuve, mises en œuvre sous des SIG et faisant appel aux données historiques (Gilvear et Bryant, 2003 ; Gurnell et *al.*, 2003 ; Bravard, 1987).

2). Protocole d'élaboration du S.I.G. : étapes 1 et 2

Les Systèmes d'Information Géographique sont largement utilisés par les géographes depuis plusieurs années dans tous les domaines (climatologie, urbanisme, santé..) les

rendant incontournables et devenant des outils indispensables, au même titre que les cartes et les images satellites pour l'étude des espaces et leurs composantes. Mettre en place un SIG pour comprendre l'évolution d'un milieu fluvial n'est donc pas nouveau (Gustavsson et *al.*, 2006 ; Kondolf et Piegay, 2003 ; Andriamahefa, 1999 ; Gurnell et Montgomery, 1999), mais la manière de l'utiliser et de le rendre pratique, pertinent et même pédagogique peut servir de référence et constitue à ce jour, pour la Loire moyenne, une petite particularité. Nous décrivons longuement le protocole méthodologique qui a permis l'élaboration du SIG en Loire moyenne afin de mieux comprendre les interprétations et les utilisations qui en sont issues. Nous détaillons ici les grandes étapes de construction du SIG et de sa base de données géoréférencées.

a). Contexte et principes du protocole SIG

● **Le cadre spatio-temporel**

Pour comprendre l'évolution spatiale du secteur fonctionnel dominé actuellement par les îles, nous avons mis en place ce Système d'Information Géographique (SIG) sous la gamme de logiciel ESRI (Arc View, Arc GIS). L'intégralité des fichiers numériques que nous décrivons ici est visualisable dans un projet ArcGis : [SIG_RNVL.apr] pour la version 3.x d'ArcView et [SIG_RNVL.mxd] pour la version 8.x et 9.

Un SIG est un outil d'analyse spatiale reposant sur la superposition de données iconographiques, qualitatives et quantitatives, toutes géoréférencées dans le même système de projection. Ce géoréférencement est la base même d'un SIG, puisque pour un même espace, il est possible de caler parfaitement des couches d'information (cartes, photographies aériennes ou couches thématiques ...), alors que ces documents sont à des échelles différentes. Pour notre étude, l'élaboration du SIG a reposé sur plusieurs étapes clés, dont la vue en plan est la représentation de base.

● **Etape 1 : le fond iconographique. Constitution du fond spatio-temporel**

Il s'agit de compiler un ensemble de documents servant de fond de carte à la base de données. Ce fonds iconographique se compose de cartes et de photographies aériennes (Figure 43).

La DIREN Centre de Bassin Loire-Bretagne (située à Orléans) a mis à disposition, dans le cadre de la collaboration scientifique, sa base de données SIEL (Système d'Information sur l'Evolution du Lit de la Loire). Nous avons ainsi utilisé quatre documents rectifiés à partir du Scan25 et géoréférencés en Lambert II étendu : une carte d'ingénieur élaborée en 1850, des ortho-photoplans de 1960 et des images aériennes de 1995 et 2002.

☞ **La carte de 1850, dite de Coumes**, est extraite d'une campagne de relevés réalisée entre 1848 et 1854 sur le cours de la Loire entre Vorey (Haute-Loire) et Saint-Nazaire (Loire-Atlantique). Cette carte d'ingénieur au 1/ 20 000, dressée à la suite de la grande crue historique de 1846 afin de mieux cerner l'espace inondable et ses enjeux, demeure très précise, correcte, géométrique et représente un grand nombre de détails (berges, bancs, végétation spontanée, cultures, pâtures, aménagements ...). Il est ainsi aisé de la comparer à des documents modernes, tels que les photographies aériennes (ortho-photoplans de 1960 et photographies aériennes de 1995 et 2002).

☞ **Une carte du canton de Pouilly/Loire dressée en 1878**, sélectionnée comme période intermédiaire permet d'apprécier l'état du lit mineur et notamment d'observer la densité des îles. Les îles ont été représentées sans toutefois rentrer dans une précision des contours. De ce fait, le document n'a pas été rentré dans l'analyse quantitative (surfaces, évolution..), mais il a permis une évaluation qualitative pour dénombrer les îles. De plus, la zone de la réserve naturelle n'est pas couverte entièrement (il manque le secteur de La Charité/Loire). La carte de 1878 reste également pertinente dans la mesure où les aménagements fluviaux y sont bien représentés (perrés, bacs, quais).

☞ **Des cartes d'Etat-major de 1889, 1903 et 1944** ont également été consultées, mais leur imprécision du lit ligérien risque de fausser l'analyse spatiale. En effet, les contours de certaines îles n'ont jamais été révisés en l'espace de 50 ans.

☞ Nous avons retrouvé également une série de planches photocopiées de **cartes dressées en 1932 et 1933 par des ingénieurs de la Ville de Paris** avec pour objectif un projet de captage des eaux de la Loire pour la région parisienne. Les cotes topographiques parsèment ce document et les formes du lit sont précisément représentées. L'occupation du sol est par contre très sommaire, mais quelques types de couverture végétale sont

indiqués, en particulier sur les îles. Nous avons établi la classification des formes fluviales en fonction de la végétation : les îles sont systématiquement végétalisées et les bancs sont représentés par du sable (voir en détail la méthodologie d'interprétation).

☞ **Des ortho-photoplans ont été réalisés dans la vallée de la Loire en 1960** par l'Institut Géographique National pour le Ministère des Travaux Publics et des Transports. Le service de la DIREN de Bassin centre a découpé ces images puis les a photographiées pour obtenir des planches de la vallée ligérienne à l'échelle du 1/10000. L'ortho-rectification et le géoréférencement sous forme de mosaïque ont permis leur exploitation dans le SIG.

☞ **Les photographies aériennes 1995 et 2002** sont évidemment les sources les plus importantes qui apportent des informations précieuses que les cartes ne peuvent mettre en valeur. Elles ont fait l'objet d'une exploitation très approfondie et rigoureuse pour en extraire les données déterminées dans le protocole de suivi du lit ligérien.

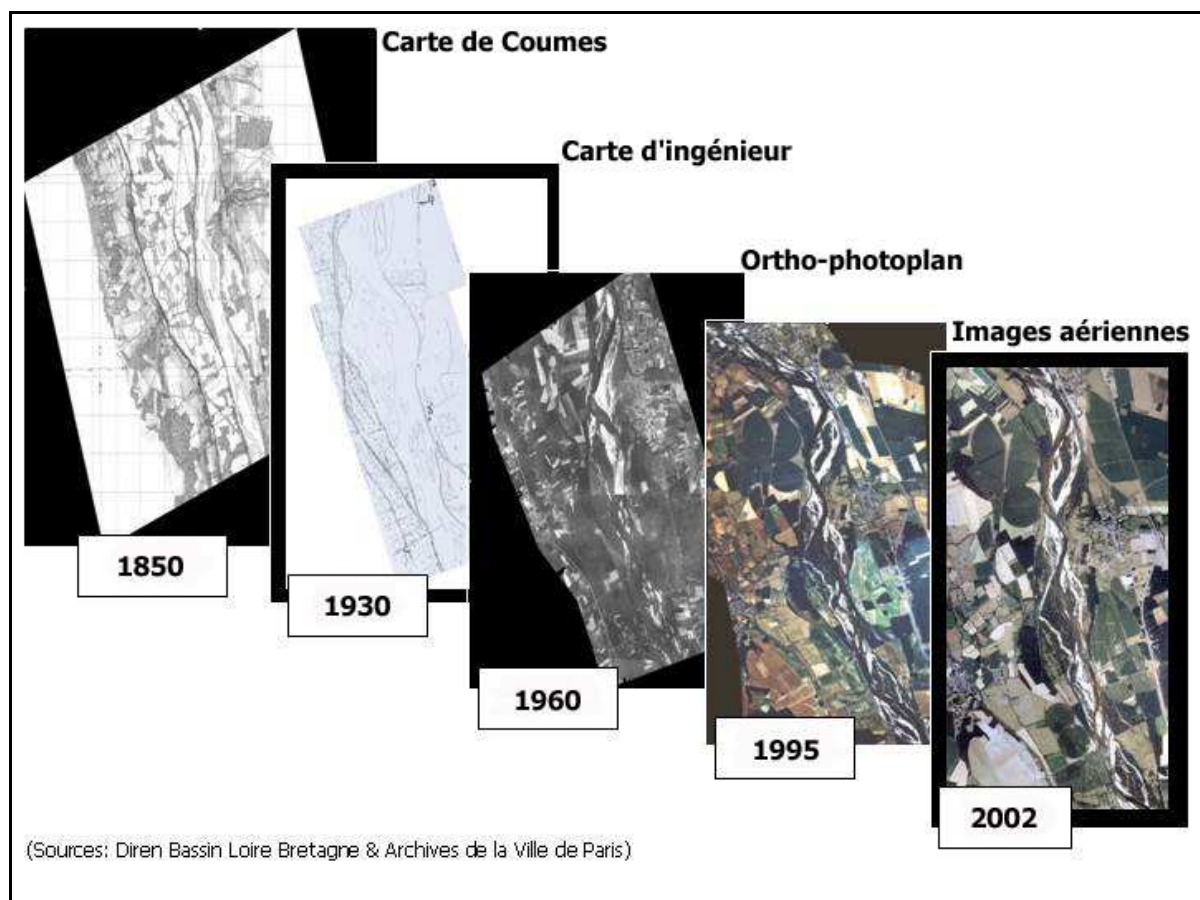


Figure 43 - Les différents fonds iconographiques de l'analyse diachronique à moyenne échelle.

D'autres missions intermédiaires de photographies aériennes ont été consultées à l'Institut Géographique National afin d'apprécier les changements des unités fonctionnelles sur des pas de temps plus courts. Il s'agit des campagnes aériennes de 1949, 1973, 1982 et 1988 (Tableau VII). Il n'y a eu ni digitalisation ni quantification pour ces documents. Un simple calque a été apposé directement sur ces différentes photographies aériennes pour réaliser les contours des îles et les limites des chenaux. Notons enfin que la campagne de photographies aériennes 2005, commandée par la DIREN Centre, a été examinée sans être exploitée sous le SIG car au stade de la rédaction, il était trop tard pour le faire rigoureusement. De plus la DIREN Centre n'avait pas encore validé le protocole de traitement des documents.

Tableau VII - Les données de l'analyse spatio-temporelle

1850	Carte topographique du cours de la Loire (fond DIREN Centre)
1878	Carte topographique cantonale (fond personnel)
1889	Carte d'Etat-major (fond I.G.N.)
1903	Carte d'Etat-major (fond I.G.N.)
1932	Carte topographique du cours de la Loire (fond Mairie de Paris)
1944	Carte d'Etat-major (fond I.G.N.)
1949	Photographies aériennes (fond I.G.N.)
1960	Ortho-Photographieplans (fond DIREN Centre)
1973	Photographies aériennes (fond I.G.N.)
1982	Photographies aériennes (fond I.G.N.)
1988	Photographies aériennes (fond I.G.N.)
1995	Photographies aériennes (fond DIREN Centre)
1998	Photographies aériennes (fond I.G.N.)
2002	Photographies aériennes (fond DIREN Centre)
2005	Photographies aériennes (fond DIREN Centre)

- **L'apport des cartes postales anciennes** (avant et après 1910, date charnière dans la diffusion des cartes postales en France) et des gravures postérieures au Moyen-Age a été essentiel pour reconstruire l'évolution du paysage fluvial et les pratiques socio-

économiques associés au fleuve (Figure 44). Les modes de vie des sociétés riveraines sont privilégiés car ils sont fortement liés au cadre de vie ligérien. La Loire forme ce cadre de vie et suivre l'évolution des sociétés est révélateur de l'évolution du fleuve lui-même. Nous avons ainsi pu trouver des cartes postales d'un même site, à différentes dates, et compléter l'interprétation de l'analyse spatiale sous SIG.

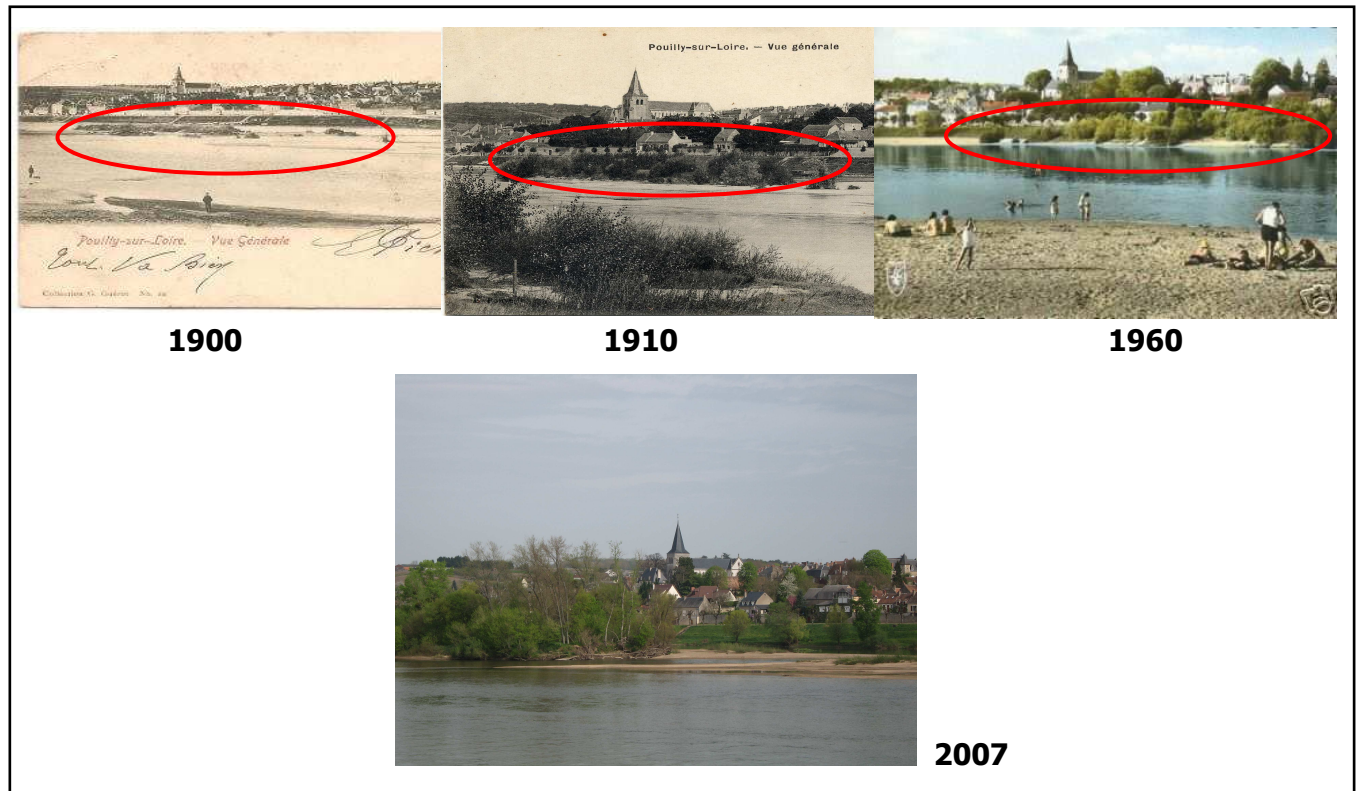


Figure 44 – Evolution du paysage fluvial à Pouilly-sur-Loire, depuis la rive gauche. L'utilisation de cartes postales à différentes dates permet de révéler le degré d'évolution de la végétation alluviale au cours d'une majeure partie du 20^{ème} siècle.

b). Caractérisation des données vectorielles

• Etape 2 : La digitalisation et la charte graphique

Sous ArcView GIS, cette étape a consisté à digitaliser le fonds iconographique.

Les limites de la digitalisation ne sont pas exactement calées sur celles de la réserve naturelle (Figure 45). Les limites nord (aval) et sud (amont) correspondent aux limites administratives de la réserve (de la chevrette de La Charité-sur-Loire à l'Île de Bois-Gibault). Mais pour les limites latérales, nous nous sommes calés sur les levées de rive gauche et sur le pied de coteau en rive droite : donc de levée à coteau.

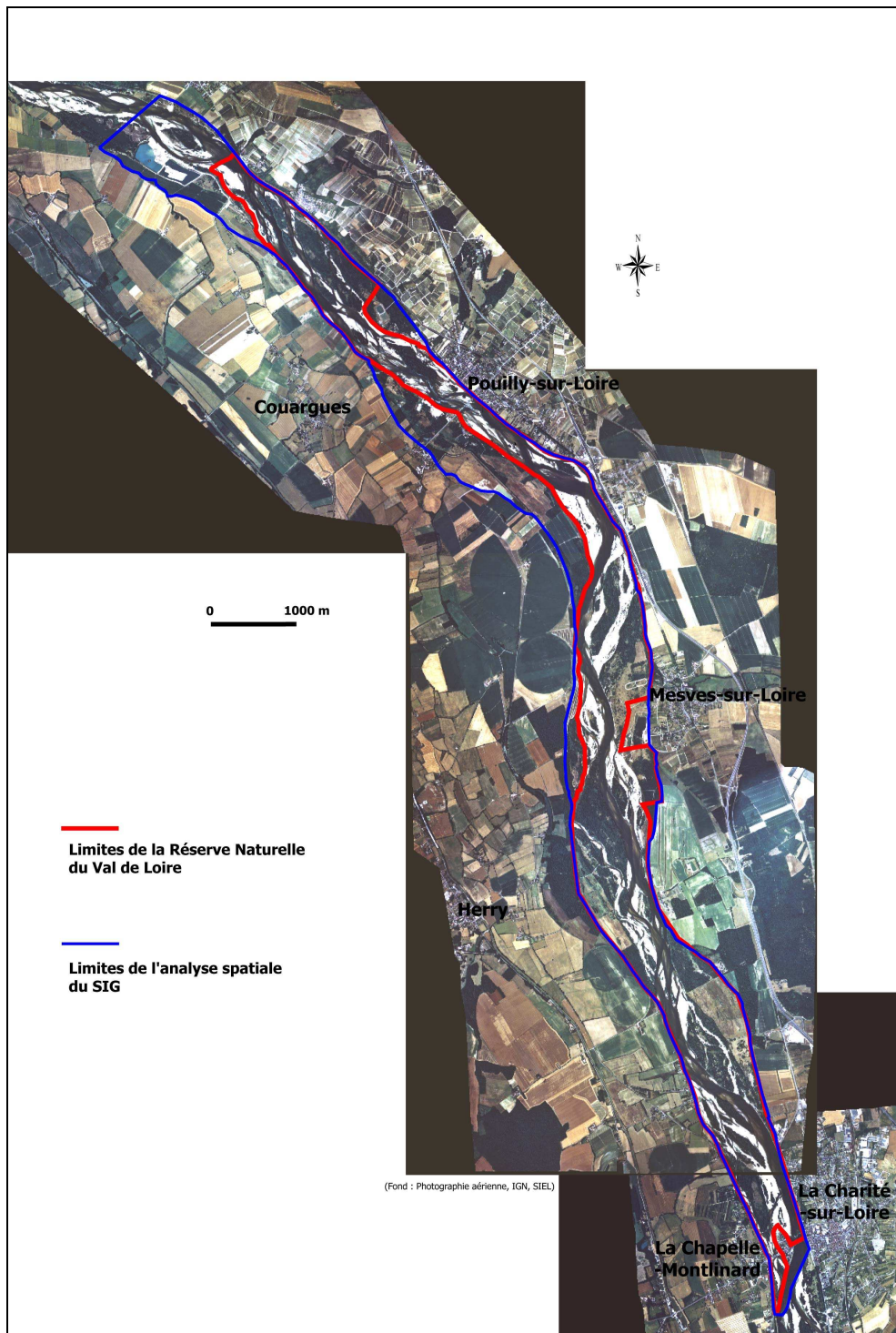


Figure 45 – Limites de la zone d'étude à grande échelle.
 Les limites de l'analyse sont beaucoup plus étendues que celles de la réserve.

L'intégration des données du cadre d'étude

- La représentation ponctuelle est utilisée dans le SIG pour localiser une **toponymie** (nom des 6 communes situées dans le secteur de la réserve naturelle), marquer des **points levés**

au DGPS (donc très précis et qui, on le verra plus loin, servent à dresser des lignes d'eau) ou encore pour servir de **liens dynamiques** vers des photographies et des figures ;

- les **aménagements fluviaux** sont représentés sous le type linéaire : ils sont indissociables du paysage ligérien et leur empreinte marque sévèrement le lit (Figure 46). Dans le secteur de la réserve, il existe de nombreuses formes d'aménagements fluviaux, que nous avons représentés en figuré linéaire. On trouve des **levées**, des **chevrettes**, des **enrochements** de berges, d'**anciens quais** de navigation, des vestiges de **pieux** soit d'anciens ponts ou pêcheries. Toutes ces formes d'aménagements dont la chronologie d'apparition n'est pas toujours aisée à déterminer (Temam, en cours ; Temam, 2005) figurent dans le SIG avec des liens dynamiques vers des figures et des photographies.

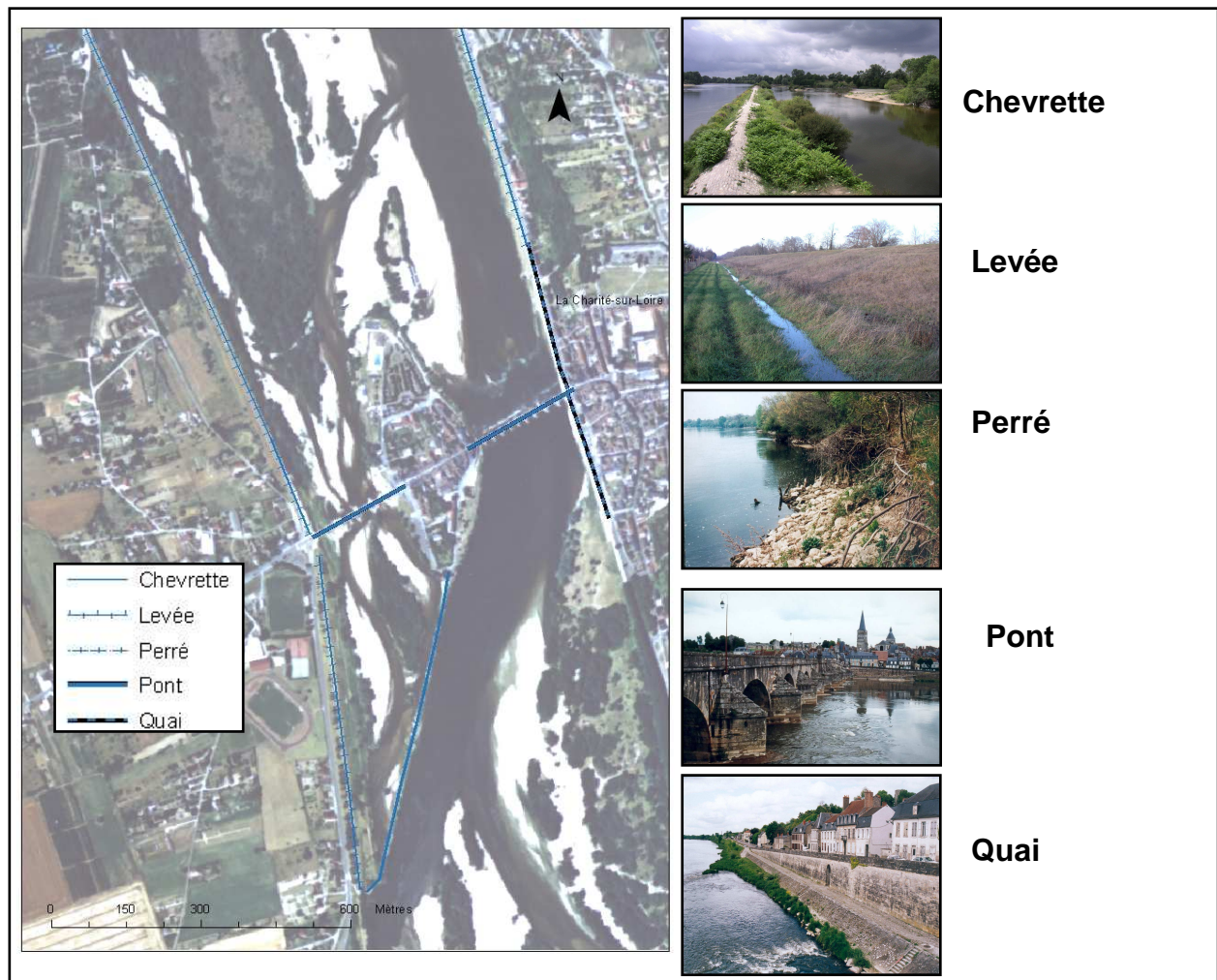


Figure 46 – Différents types d'aménagements fluviaux et leur légende dans le SIG.

Les formes fluviales et leur évolution spatio-temporelle

La typologie des formes fluviales que nous avons retenue a permis de réaliser la digitalisation des formes sous le **Système d'Information Géographique** (Tableau VIII). En géomorphologie fluviale, le découpage classique lit mineur - lit majeur reste insuffisant tant la complexité et la diversité des formes fluviales sont grandes tout particulièrement dans les styles fluviaux anastomosés, que nous étudions (Nanson et Knighton, 1996). Nous préférons dissocier la bande active de la plaine d'inondation car il est plus pratique d'étudier la fonctionnalité hydro-sédimentaire de ces entités et par là même de marquer les transitions d'une partie à l'autre (Gautier, 2006). Nous retenons ainsi d'un côté les formes faisant partie de la bande active et de l'autre côté celles affiliées aux formes stabilisées, que nous appellerons finalement, grâce à l'analyse spatiale, « formes végétalisées ». Elles atteignent suivant leur stade d'évolution le niveau topographique de la plaine d'inondation (Cornier, 2002). Les annexes hydrauliques, ou bras morts, forment aussi une catégorie particulière du fait de leur capacité à évacuer les écoulements exceptionnels, pendant les crues par exemple, et cela malgré leur végétalisation stable.

☞ **Les formes dites « mobiles »**

Les unités fluviales nues (sans végétation), qu'elles soient sur le document analysé en eau ou à sec, témoignent de mécanismes actifs de submersion et de remaniement des sédiments, mécanismes qui sont suffisamment fréquents pour limiter la croissance d'une végétation pérenne (Schumm, 1977) ; elles rentrent donc dans la classification des formes mobiles ou « bande active », qui est composée du **bras principal** et des **chenaux secondaires**, au sein desquels on retrouve les **bancs** occupés ou non par une végétation saisonnière. Du fait des différences de niveau d'eau sur les documents, il n'est pas possible de délimiter de façon fiable les contacts bancs-chenaux. Leur déplacement est d'autant plus difficile à suivre précisément.

☞ **Les formes végétalisées**

La présence d'une végétation pérenne détermine les formes dites « stabilisées ». Dès lors qu'une forme est colonisée par une végétation permanente et bien installée, nous sommes dans le cas d'une unité fluviale dont les modes de submersion, d'érosion-

sédimentation et les rythmes d'évolution diffèrent des chenaux et des bancs : il s'agit alors des îlots, îles et des francs-bords.

Les îles sont donc les formes végétalisées (végétation pérenne arbustive et arborée) et encadrées par deux chenaux actifs (en eau ou à sec suivant les périodes de prises de vue).

Les francs-bords sont les marges latérales végétalisées (végétation pérenne) du fleuve situées entre les levées (rive gauche) ou les pieds de coteau (rive droite) et la bande active.

Ces formes végétalisées interviennent dans la répartition du débit liquide, mais également dans la distribution de la charge solide en permettant le piégeage des sédiments ou l'érosion. Notre travail est de comprendre justement le rôle de ces unités fonctionnelles dans les transferts de sédiments dans le lit de la Loire. Il s'agit aussi de montrer la place des îles et des francs-bords dans le réajustement fluvial (Gautier, 2006).

- Les annexes hydrauliques sont des formes clés dans la plaine d'inondation, car les différences de fonctionnement hydrologique accroissent la valeur écologique et la diversité géomorphologique de cette plaine. Les bras morts des îles et des francs-bords, ou encore de la plaine sont d'une importance évidente dans les transferts de nutriments, sédimentaires et hydrologiques (Amoros et Petts, 1993). Ce sont véritablement les différences de débits qui favorisent la diversité fonctionnelle de ces bras. Suivant leur degré de végétalisation et de comblement sédimentaire ces annexes apportent une variété de transferts. Les bras secondaires en voie de végétalisation font partie des annexes hydrauliques, car ils sont des formes de transition entre un lit vif et une plaine d'inondation moins active. Les seuils de connexion hydrologique des bras secondaires sont à nos yeux des facteurs de contrôle clés dans le fonctionnement de ces bras. D'où la nécessité de suivre annuellement ces connexions et le fonctionnement des bras. Etudier de plus près le passage d'une hydrologie active d'un bras secondaire à un assoupissement complet est donc intéressant.

Un simple transect permet de comprendre alors le lien étroit entre la diversité des formes fluviales, à travers leur niveau de végétalisation et leur topographie, et les possibilités d'accueil offertes aux espèces faunistiques et floristiques. Ce lien se réalise également en

fonction des fluctuations des niveaux de submersion. Au regard de l'analyse spatiale et de ses résultats, cette diversité des formes insulaires a nécessité le développement d'une typologie propre à ces formes fluviales : une typologie d'abord morphologique liée avant tout à la végétation, puis une typologie de l'évolution liée elle à la dynamique d'évolution de ces formes particulières.

- La digitalisation repose ainsi essentiellement sur le zonage, sous forme de polygones, des formes fluviales pour chaque année étudiée (Figure 47). Un polygone va représenter une forme particulière du fleuve (Figure 48). Il convient, dès le départ, de bien différencier les types de formes afin d'obtenir une cohérence sur des documents qui ne sont pas graphiquement identiques. Le protocole de zonage s'appuie dans un premier temps sur la distinction des formes dites « mobiles » et celles végétalisées ; la végétation est le facteur distinctif (Gautier et *al.*, 2001) (Figure 49).

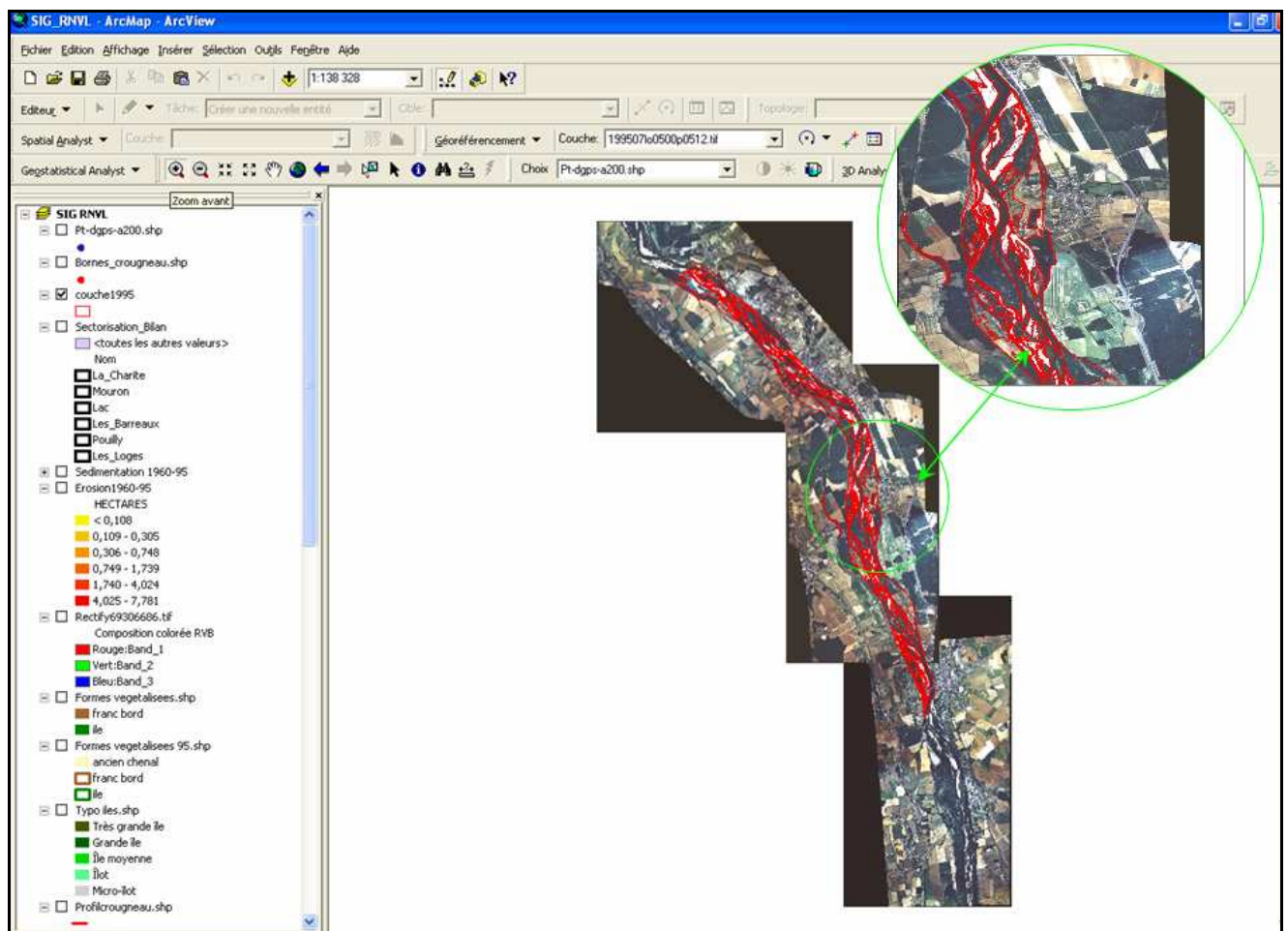


Figure 47 – Mosaïque de polygones issue de la digitalisation.

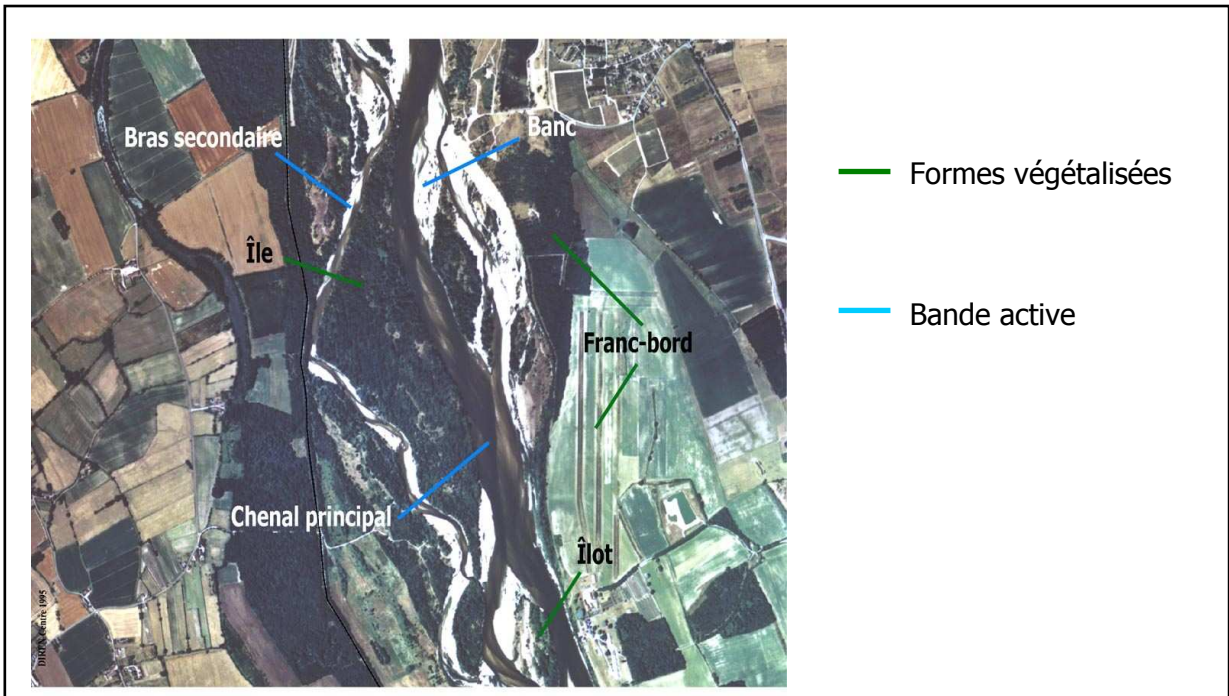


Figure 48 - Identification des types d'unités fonctionnelles

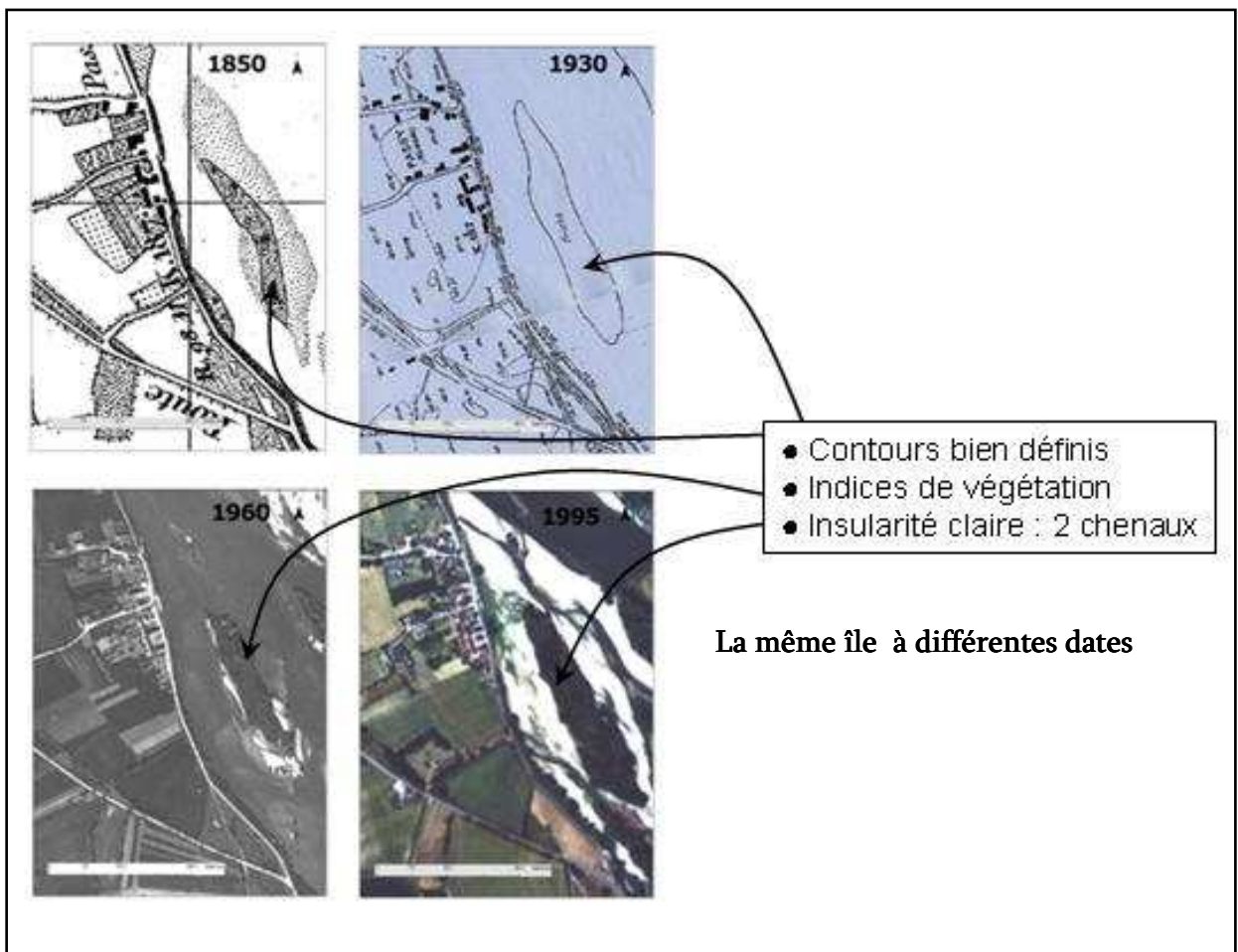


Figure 49 – Indices de reconnaissance et zonage des unités fonctionnelles *îles* sur les différents documents

- Au sein de ces formes, nous avons distingué plusieurs types en fonction, d'une part, de la hauteur de la végétation et, d'autre part, de la végétation spontanée et des surfaces exploitées par les riverains. Nous avons préféré privilégier le degré de couverture végétale plutôt qu'un zonage de toutes les classes de végétation déterminées sur les cartes de la DIREN Centre (Cornier, 1998). Il était difficile en effet d'appliquer cette classification, aussi précise soit-elle, sur les documents antérieurs sans vérification possible sur le terrain. Notre classification, certes très simple, a le mérite de pouvoir être appliqué sur tous les documents, mêmes les plus anciens.

Ainsi ont été délimités les niveaux et les stades de végétation :

- a. les surfaces occupées par une végétation basse et discontinue installée dans les chenaux (saulaie-peupleraie arbustive pionnière, clairement identifiée sur la carte de 1850 et sur des photographies aériennes) : **les séquences pionnières** ;
- b. les surfaces occupées par une végétation basse et continue installée sur les îles et les francs-bords : **les prairies et pelouses** ;
- c. les surfaces occupées par une végétation continue, hétérogène et de hauteur intermédiaire installée sur les îles et les francs-bords : **les broussailles et landes** ;
- d. les surfaces occupées par une végétation haute et continue installée sur les îles et les francs-bords : **les bois** ;
- e. Les surfaces en **cultures et pâtures** sur les îles et les francs-bords. Il est essentiel de souligner un biais : les pousses de saules et peupliers désignées clairement sur la carte de 1850 sous le terme « d'oseraies » sont aussi à l'époque « cultivées » (replantées et coupées régulièrement) du fait de leur utilisation locale (Gautier et *al.*, 2000) ;
- f. Les surfaces dites « urbanisées » ou « anthropisées », celles dont l'emprise anthropique est très forte (sites urbains, infrastructures étendues du type stade, parking ou station d'épuration) ;

Le suivi de ces différents types de végétation au fil des années constitue un excellent indicateur de l'évolution du lit depuis 1850 (Hupp et Bornett, 2003). Nous disposons d'une

comparaison possible entre les années pour exprimer fidèlement l'évolution des niveaux de végétalisation dans le lit mineur et sur une partie du lit endigué (Figure 50).

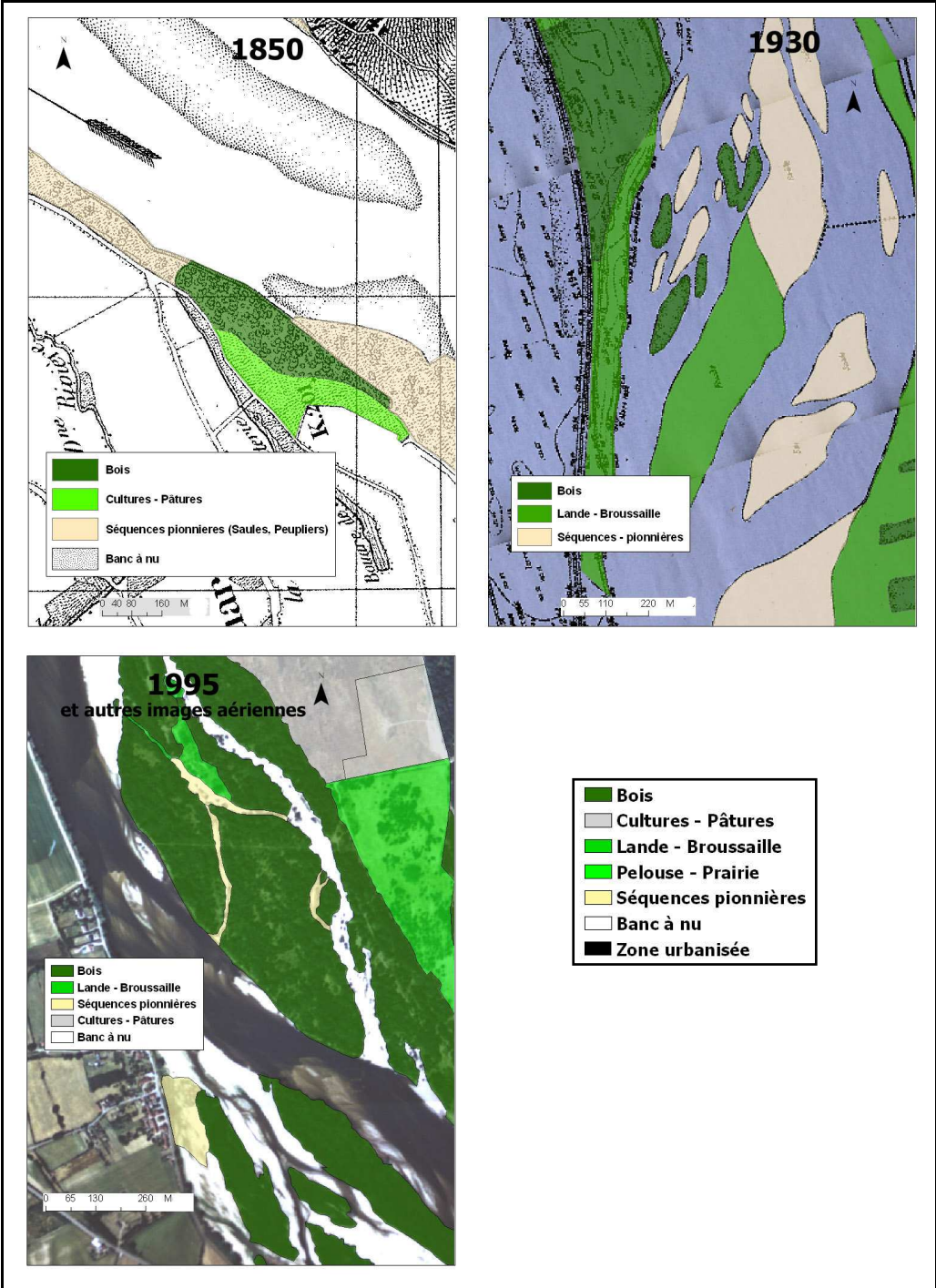


Figure 50 – Exemples d'identification des types de végétation sur différents documents

Tableau VIII – Synthèse de la caractérisation des formes fluviales pour l'analyse spatiale.

	Types de formes fluviales	Types d'occupation associée	Texture/Structure sur images aériennes Noir & Blanc	Identification sur une image aérienne N&B
Bande active	<ul style="list-style-type: none"> • Chenaux en eau : bras principal et chenaux secondaires • Bancs 	<ul style="list-style-type: none"> • Eau • Sable, gravier ou galet 	<ul style="list-style-type: none"> • Eau : surface lisse et sombre (1) • Sable : surface lisse et blanche (2) 	

Bande active	<ul style="list-style-type: none"> • Chenaux en eau : bras principal et chenaux secondaires • Bancs 	<ul style="list-style-type: none"> • Eau • Sable, gravier ou galet 	<ul style="list-style-type: none"> • Eau : surface lisse et sombre (1) • Sable : surface lisse et blanche (2) 	
Formes végétalisées	<ul style="list-style-type: none"> • Îles et flots • Francs-bords • Bras morts 	<ul style="list-style-type: none"> • Bois • Landes et broussailles • Prairies et pelouses • Cultures et pâtures • Séquences pionnières avancées 	<ul style="list-style-type: none"> • Bois : surface « grumeleuse » plus ou moins homogène (houppier, reconnaissance des espèces possible) (3) • Landes : surface discontinue plus ou moins sombre (arbres + pelouses) (4) • Prairies – Pelouses : surface grisée lisse et continue (5) • Cultures – pâtures : surface lisse mais striée (parcelles, traces de labours) (6) 	
Stades intermédiaires	<ul style="list-style-type: none"> • Bancs en voie de végétalisation 	<ul style="list-style-type: none"> • Séquences pionnières 	<ul style="list-style-type: none"> • Séquences pionnières : surface discontinue sombre sur blanc (végétation sur sable) (7) 	

3). Développement et applications du SIG

L'ensemble de ces représentations numériques forme une mosaïque complexe de polygones qu'il a été nécessaire de caractériser dans des tableaux d'attribution.

a). Caractérisation des formes fluviales et de leurs scénarii d'évolution

● **Etape 3 : La caractérisation des données vectorielles**

Pour identifier chacune des formes fluviales et chaque type de végétation, tous respectivement matérialisés par un polygone, nous avons créé des tables de caractérisation reliées aux polygones. C'est le principe même d'un SIG que de pouvoir visualiser les caractéristiques d'une zone spécifique en cliquant simplement sur le polygone qui la symbolise spatialement. Les informations contenues dans ces tables constituent le fondement même de l'analyse spatiale. En somme, nous avons créé des thèmes qualitatifs et quantitatifs qui permettent l'interprétation fine de l'évolution du lit de la Loire. Une charte graphique et cartographique a été spécialement déterminée pour mettre en valeur ces thèmes.

Les polygones ainsi créés sont caractérisés dans une table correspondante dans laquelle sont écrits différents paramètres et thématiques (Tableau IX)

Fichiers : [couche1850] - [couche1930] - [couche1960] - [couche1995] - [couche2002]

Tableau IX - Exemple de tableau d'attribution d'une couche thématique : identification de formes fluviales, mesures quantitatives...

Attributs de couche1995										
FID	Shape*	IDENTITE	TYPE_FORME	VEGETATION	PERIMETRE	SURFACE	X_COORD	Y_COORD	NOM_IGN	
76	Polygone	CP	chenal principal		1336,9	36409,7	647836,74305	2252678,60484		
77	Polygone	IL75	île	bois	172,5	1354,27	647309,24661	2252785,45703		
78	Polygone	FB6	franc bord	pelouse culture	3518,79	295870,55	647610,63739	2252305,80049		
79	Polygone	IL125	île	lande broussaille	180,35	1441,67	647940,32928	2252660,88545		
80	Polygone	FB6	franc bord	bois	1044,99	25337,77	647241,04689	2252504,75164		
81	Polygone	IL73	île	bois	972	37304,98	648205,23572	2252558,85962	Île aux Corbeaux	
82	Polygone	IL124	île	lande broussaille	183,06	1680,78	648018,32575	2252628,7606		
83	Polygone	FB6	franc bord	bois	582,76	8649,59	647963,38444	2252155,80065		
84	Polygone	FB6	franc bord	pelouse culture	476,17	3706,88	647992,97522	2252162,58925		
85	Polygone	FB6	franc bord	pelouse culture	2098,93	192689,42	648177,7892	2251648,64356		
86	Polygone	CP	chenal principal		1302,99	48657,01	648840,77787	2251426,89855		
87	Polygone	IL119	île	lande broussaille	486,09	3433,95	649031,86108	2251278,27213		
88	Polygone	IL67	île	bois	3060,62	245091,79	648749,73791	2250695,91483	Île des Barreaux	
89	Polygone	IL117	île	bois	788,21	20395,16	648991,11573	2251031,60072		
90	Polygone	CS	chenal secondaire		926,59	13665,05	648654,24875	2250991,00071		
91	Polygone	CP	chenal principal		525,65	7958,46	648628,39401	2250983,91784		
92	Polygone	IL70	île	bois	252,54	3653,48	648592,43034	2250896,12668	Îlot 2 des Barreaux	
93	Polygone	IL68	île	bois	450,45	10364,12	648608,60128	2250709,12279	Îlot 1 des Barreaux	

Pour les formes fluviales, il s'agit de :

- a. Identité de la forme : à partir de 1850 chaque île et franc-bord est numéroté (**I**x pour les îles, **FB**x pour les franc-bords). Ainsi, on peut suivre l'évolution de chaque forme stabilisée pour chaque pas de temps. L'attribution des numéros s'effectue dans l'ordre chronologique d'apparition. Par exemple, les îles qui ne figuraient pas en 1960 mais apparaissent en 1995 portent les numéros qui ne sont pas encore attribués dans la liste. De même, les îles ou franc-bords qui perdurent portent définitivement le même numéro. Une île ne peut donc pas porter l'identité d'une île qui n'existerait plus.
Pour la bande active, il s'agit soit du code **CP** (pour chenal principal) soit **CS** (pour chenal secondaire) ;
- b. Type de forme :
 - **chenal principal**
 - **chenal secondaire**
 - **ancien chenal** situé soit sur une île soit sur un franc-bord
 - **île**
 - **franc-bord** ;
- c. Surface en mètre carré (**m²**) et en hectare (**ha**) ;
- d. Périmètre (essentiel pour mesurer la longueur des berges) ;
- e. Type de végétation :
 - **séquences pionnières**
 - **prairies et pelouses**
 - **broussailles et landes**
 - **cultures et pâtures**
 - **bois**
 - **zone artificialisée** pour les zones urbaines et aménagées ;
- f. Coordonnées X (latitude) et Y (longitude) du centroïde de chaque polygone : il s'agit du barycentre ou centre de gravité de la forme (ceci servira à l'analyse spatiale) ;

La caractérisation de la mosaïque de polygones permet la création de nouvelles couches thématiques, ces mêmes couches aboutissent à l'analyse spatiale précise du lit ligérien (Figure 51). Les tables d'attribution sont utiles pour le suivi « individuel » à l'échelle de chaque forme et chaque secteur.

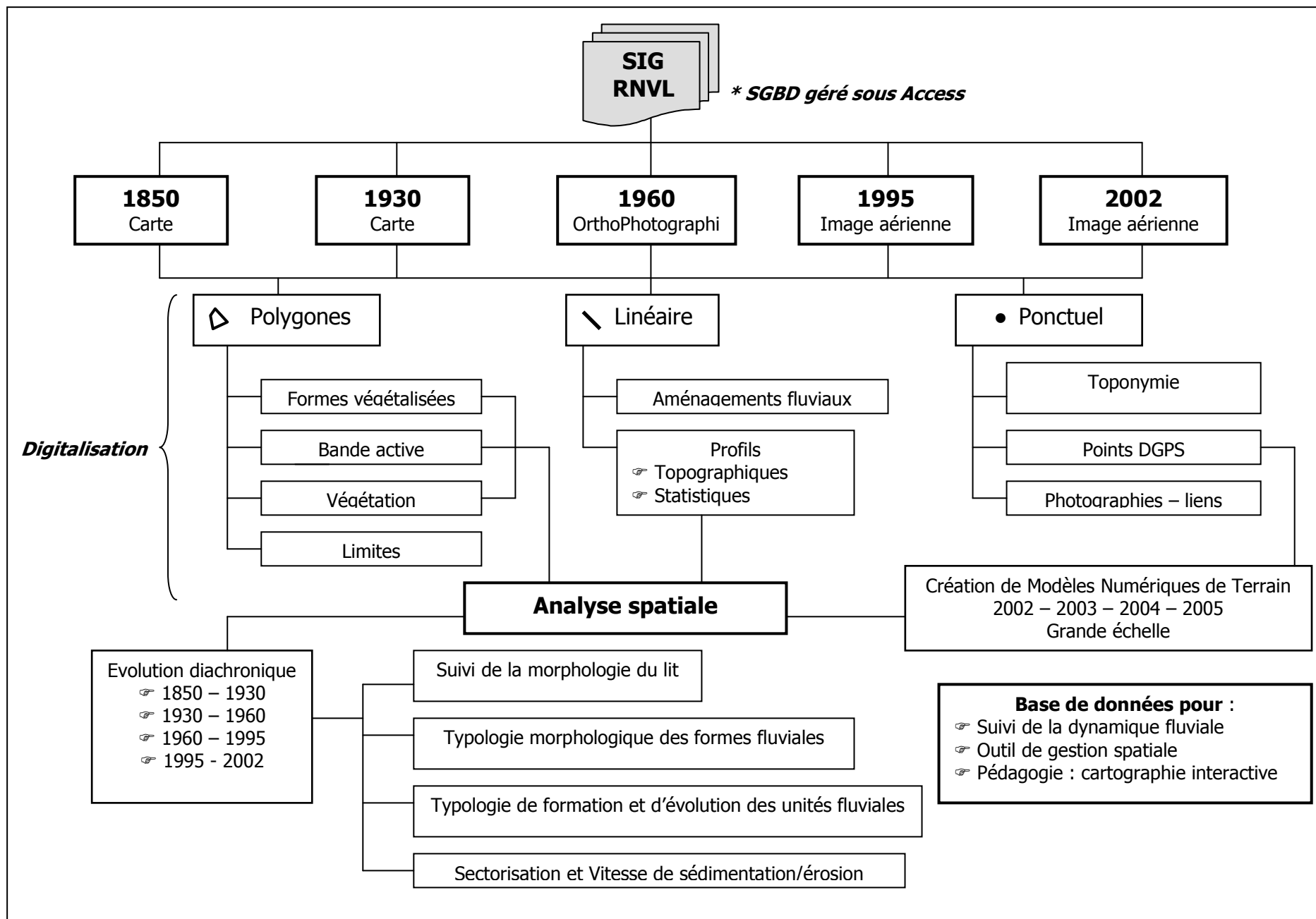


Figure 51- Organisation du S.I.G. de l'analyse à l'échelle moyenne.

b). Développement de l'analyse spatiale

● **Etape 4 : L'analyse spatiale, les éléments de calculs sous le logiciel d'analyse spatiale**

Le logiciel d'analyse spatiale recèle des fonctions et des extensions permettant une large gamme de calculs sur les formes fluviales. L'étude des paramètres morphométriques, de la taille et des surfaces des formes est indispensable. Le choix des figurés surfaciques implique le calcul des surfaces, d'une île par exemple. Le géoréférencement permet la superposition de l'emprise spatiale d'une même île à différentes dates ; il est ainsi possible de **calculer des surfaces d'érosion et d'accrétion, par extraction des zones différentielles** (Finlayson et Montgomery, 2003). La progression spatiale des polygones représentant les francs-bords et les îles favorise l'établissement des modèles d'évolution de ces formes fluviales. Le tapis végétal s'intègre dans ces calculs par suivi des surfaces et par marquage de la transformation des données qualitatives (passage d'une pelouse à une lande par exemple).

Le tableau suivant synthétise les grands calculs réalisés pour l'analyse spatiale sous le SIG (Figure 52). Retenons que cette approche sous SIG permet de comprendre la genèse d'une forme fluviale, sa mobilité et son rythme d'érosion ou de croissance.

● **Organisation des fichiers de l'analyse spatiale**

Le fonctionnement du projet SIG repose sur une interface pratique regroupant d'un côté les couches thématiques (formes fluviales, aménagements, limites administratives etc...) et leur représentation vectorielle, de l'autre les données d'attribution sous forme de tableaux d'information. En cliquant sur tel ou tel polygone, ou telle ou telle ligne, des tableaux de données sont liés afin d'en connaître toutes les caractéristiques (Figure 53). Des liens dynamiques ont également été créés vers des images *.tiff*, des fichiers *Excel* ou encore au format *.pdf*.

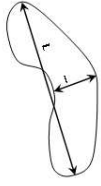
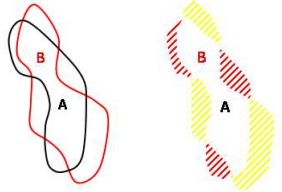


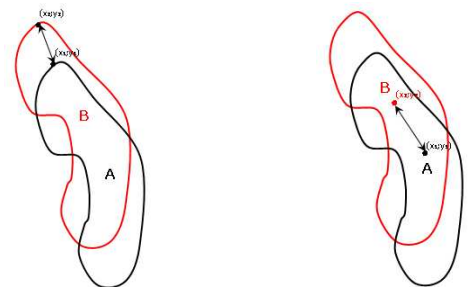
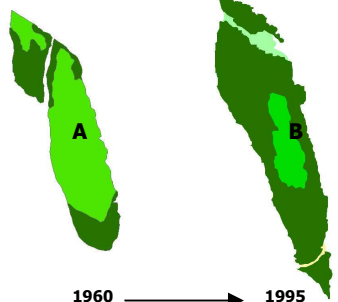
Configuration de calculs sur les polygones	Calculs quantitatifs	Unités	Finalité qualitative
	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de croissance en % • Surface 	<ul style="list-style-type: none"> • m² • Longueur L en mètres • Largeur l en mètres 	<ul style="list-style-type: none"> • Paramètres morphométriques • Typologie morphologique
 <p>A (1995) – B (1960)</p> <p> Erosion</p> <p> Sédimentation</p>	<p>Surface érodées ou étendues en m²/an et ha/an</p>	<p>m² et ha</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sectorisation de la Sédimentation-Erosion • Evolution de la Sédimentation-Erosion • Vitesse de Sédimentation-Erosion
 <p>Déplacement de la tête d'île Déplacement du barycentre</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Distance • Périmètre (berge) • Déplacement du centroïde ou barycentre en mètres 	<ul style="list-style-type: none"> • Distance en mètres • m² • Coordonnées géographiques (Lambert II Etendu) 	<ul style="list-style-type: none"> • Typologie d'évolution • Déplacement des formes fluviales et déplacement des stocks sédimentaires • Sédimentation sur îles : changement de morphologie
 <p>1960 → 1995</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Bois ■ Lande - Broussaille ■ Pelouse - Prairie ■ Séquences pionnières 	<ul style="list-style-type: none"> • Evolution en m²/an et ha/an • Taux de croissance en % • Part des différents niveaux de végétation 	<p>m² et ha</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Typologie d'évolution des surfaces végétalisées • Etat et dynamique de la végétation

Figure 52 – Les calculs de base sur les polygones à l'aide du logiciel SIG.

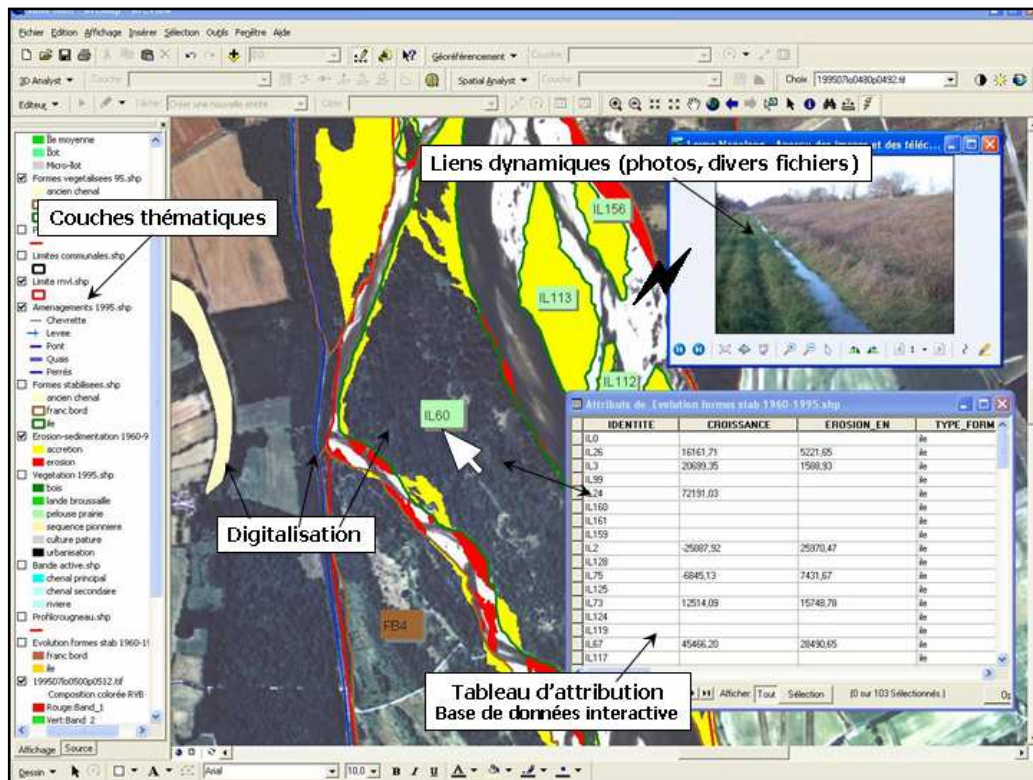


Figure 53 - Interface du S.I.G. sous Arc Gis.

En donnant une signification à chaque polygone, il nous a été aisé de créer les couches thématiques (les fichiers de formes en langage ArcGis) nécessaires à notre analyse spatiale (Figure 53).

La structure du SIG est ainsi au service de l'approche géographique et géomorphologique. Pour la Loire moyenne, le présent SIG répond aux attentes de départ et s'est vu enrichir de paramètres originaux qui n'ont, pour l'instant, pas encore vu le jour parmi les travaux scientifiques consacrés aux formes fluviales.

Au cours des années de thèse, la méthode et les données ont été améliorées ; ainsi des éléments cartographiés en 2002, sur les premiers documents digitalisés, ont dû être caractérisés à nouveau suite à des constats relevés en 2005 et 2006 sur des documents récents. La crue de décembre 2003, qui fait l'objet d'une attention toute particulière dans cet ouvrage, a pu être notamment représentée dans un projet Arc Gis (Voir annexes). Cet aspect est traité en deuxième partie dans le chapitre consacré au suivi de la crue de décembre 2003.

La mise en œuvre du SIG

Les travaux de terrain se sont focalisés sur le suivi de l'expansion de la crue par observations directes et en réalisant des relevés précis au GPS différentiel (permettant des précisions centimétriques et des recalages avec les côtes IGN). Sous le SIG-Crue, une base de données riche et variée permet de répondre aux interrogations géomorphologiques et environnementalistes. Des couches thématiques ont été créées à partir de ces relevés et des mesures de terrain. Ces couches d'information sont interactives et se découpent en plusieurs points :

- l'inondation maximale, du 7 décembre 2003, montrant clairement les surfaces inondées lors de cette crue et révélant les secteurs épargnés dans la plaine d'inondation. Il est tout à fait possible de recréer la chronologie de l'expansion spatiale de cette tâche depuis le 5 décembre jusqu'à la décrue ;
- la localisation et l'orientation des écoulements dans la plaine d'inondation ;
- les hauteurs d'eau tout au long de la courbe de progression de la crue à l'aide des levés au DGPS ;
- des liens dynamiques vers des photographies et des mini-séquences vidéos afin de visualiser et vulgariser l'ampleur de l'événement ;
- des couches d'information complémentaire réalisées par Aurélie Woudstra pour son approche socio-géographique (Woudstra, 2005), donnant une dimension sociale à ce SIG-Crue (typologie d'occupation de la plaine d'inondation, gestion de la crise...).

4). Le LIDAR

Une des limites de l'analyse en plan est de ne pas contenir la dimension altitudinale, essentielle pourtant lorsque l'on s'intéresse à l'évolution des lits fluviaux et aux formes qui y sont associées. Le LIDAR, ou MNT Laser aéroporté, permet de pallier ces limites.

L'analyse spatiale sous le SIG traite des vues en plan et les profils topographiques apportent la dimension verticale. Les données du laser aéroporté permettent de mettre en relief les deux apports précédents de la vue en plan et des profils en travers.

En géomorphologie fluviale, l'utilisation de la 3D est récente et encore en plein développement, demeurant un outil d'analyse spatiale à fort potentiel (Pyle et *al*, 1997). A l'aide du logiciel *ArcGis* d'*Esri* et l'extension *Spatial Analyst*, le traitement des points permet la création de Modèles Numériques de Terrain (M.N.T.) à l'échelle des formes fluviales. Pour ce faire, la DIREN de Bassin Loire a lancé en 2002 une grande campagne de relevés par Laser aéroporté selon une méthode bien rodée (Lohr, 1998). Cette méthode lourde, complexe et très coûteuse permet, après un long traitement, de numériser la plaine d'inondation de la Loire sur tout son long. La précision en altitude est de l'ordre de 15 cm, ce qui est remarquable pour un tel niveau d'analyse et tout à fait exploitable. La limite de cette méthode réside dans l'impossibilité de numériser les surfaces en eau au moment de la prise de vue et des mesures. Le chenal principal ne peut être mesuré que par une campagne bathymétrique, laquelle n'a pas été entreprise dans les secteurs étudiés. L'utilisation du MNT-Laser, disponible actuellement sous différentes formes (fichiers points, formats GRID...), s'avère fort utile pour étudier les différences topographiques au sein des formes fluviales insulaires, sans pour autant être comparé aux données levées par DGPS, à cause des différences de précisions altimétriques. Toutes les îles sont ainsi représentées. Pour notre étude, nous nous sommes limités à récupérer les points de coordonnées X,Y et Z du Site Atelier 3, celui de la réserve naturelle, pour les incorporer dans le travail de construction des M.N.T. sous *ArcGis* et même le logiciel *Surfer*. Les îles, francs-bords et l'essentiel des chenaux secondaires figurent dans la modélisation numérique, ce qui représente une mine d'informations supplémentaires et diversifiées sur les unités fonctionnelles des systèmes anastomosés.

Le but de cette approche est donc le rapprochement des résultats issus de la modélisation numérique à l'échelle des formes fluviales, les îles essentiellement, de manière à affiner la typologie des îles. Pouvoir mettre en relation par exemple les modèles d'évolution de ces mésoformes avec leurs caractéristiques morphométriques et topographiques est une piste d'analyse nouvelle en géomorphologie fluviale et tout particulièrement sur la Loire. Cette méthode de couplage est donc utilisée pour la description géomorphologique des formes fluviales. Les données LIDAR permettent ainsi de calculer des volumes pour les îles, de

révéler les dépressions et bras morts au sein des formes insulaires, et ainsi d'en interpréter des modes d'évolution en corrélation avec l'analyse spatiale à moyenne échelle.

L'échelle moyenne forme ainsi un excellent niveau d'analyse spatiale en combinant l'ensemble des paramètres morphométriques et topographiques indispensable pour établir les typologies, modèles d'évolution et de formation des formes fluviales et du lit de la Loire des îles.

Cependant, il faut reconnaître qu'en matière de dynamique fluviale la moyenne échelle ne permet pas de répondre seule aux problématiques de recherche de la thèse. L'analyse des profils en travers ne renseigne pas sur les volumes de sédiments transitant dans les annexes fluviales ou déposés sur les îles. L'approche par M.N.T. à moyenne échelle n'est pas suffisamment précise pour estimer les volumes sédimentaires érodés ou apportés dans les bras secondaires le temps d'une crue. Une approche à grande échelle s'est avérée ainsi nécessaire.

B. Méthodologie à grande échelle : méthodes de caractérisation des vitesses annuelles et pluri-annuelles de sédimentation et d'érosion de la Loire des îles

1). Les objectifs de la grande échelle

Pour renforcer les résultats obtenus dans le cadre de l'approche à moyenne échelle et pallier les limites de ce niveau scalaire, il est nécessaire de disposer de données axées sur le fonctionnement actuel des formes fluviales en fonction des phénomènes hydro-sédimentaires intra et interannuels. La méthode à grande échelle repose donc sur des prélèvements sédimentaires, des relevés de terrain et le suivi des conditions hydrologiques. Nous montrons dans un premier temps les moyens et méthodologies mis en œuvre pour répondre aux questions de la dynamique fluviale à l'échelle fine. Il s'agit, d'une part, de comprendre les processus hydro-dynamiques de l'hydrosystème à travers ses formes fluviales, et, d'autre part, de confronter les résultats de la grande échelle avec les tendances d'évolution enregistrées à moyenne échelle.

L'originalité de cette thèse est d'avoir mis en œuvre différentes méthodes qui ont permis de caractériser finement les mouvements sédimentaires à l'échelle de chaque unité fluviale et de chaque événement hydrologique depuis 2002. Cela a nécessité un fort investissement

de terrain sur près de 5 ans, été comme hiver. Nous sommes peu nombreux à ce jour à réaliser ce type de mesures aussi précises. Les études en hydro-morphodynamisme consacrées au Rio Beni dans le bassin amazonien (programme Hyban) se fondent sur la même méthodologie : méthodologie de l'équipe hydrosystème du LGP. Le Centre d'Etudes Géographiques de l'Université de Metz (CEGUM) étudie la Moselle sous un angle d'approche assez similaire (Beck et Corbonnois, 2003 ; Corbonnois et Beck, 2004).

Les objectifs à atteindre par la méthode des MNT à grande échelle sont les suivants :

- rythmes d'évolution interannuelle des bras secondaires ;
- suivi pluriannuel de la morphologie des chenaux secondaires ;
- sectorisation et quantification de l'érosion et de la sédimentation aux connexions amont et aval des chenaux expérimentaux ;
- caractérisation de la morphologie des îles et îlots en 2002 ;
- détermination d'une réflexion et d'un savoir-faire sur l'utilisation de tels outils en géomorphologie fluviale et environnementale, en particulier en Loire moyenne.

2). Les mesures topographiques

a). Les profils en travers

La méthodologie de comparaison des profils a été établie dans le cadre du PNRZH Loire (Gautier et *al.*, 2001) (Figure 54). Elle repose ainsi sur la comparaison de deux profils perpendiculaires à l'axe fluvial réalisés sur le même site, mais à deux dates différentes. Ces profils ont été réalisés de levée à coteau en traversant ainsi, suivant les longueurs, la plaine et le chenal actif.

• **L'étude des profils transversaux** nous apporte des informations complémentaires à l'évolution en plan des formes fluviales, tel que l'enfoncement des chenaux ou l'exhaussement des îles. Les vitesses d'érosion et de sédimentation sur les mésoformes fluviales peuvent également être évaluées. La formation des îles peut être mise en valeur ainsi que le degré d'évolution des chenaux, principal et secondaire.

Les profils topographiques sont nombreux sur le cours de la Loire, mais souvent trop ponctuels dans le temps et dans l'espace. Ces profils en travers ont été sélectionnés en fonction de leur qualité géométrique et topographique, parmi bon nombre de missions de géomètres qui ont répondu aux appels d'offres lancés par les gestionnaires du fleuve. C'est

au siège du Plan Loire, à Orléans, et à la DIREN Centre que sont disponibles ces documents papiers et numériques. Ils ont été gracieusement mis à notre disposition par le Plan Inter-Régional Loire Grandeur Nature.

Avec l'expérience du P.N.R.Z.H. (1998-2001), les profils de 1972-1973 (mission Collin) et ceux du cabinet Crougneau (1995) restent les plus précis, les plus nombreux, les plus facilement repérables sur le terrain, par des marquages sous forme de bornes ou clous, et surtout les plus faciles à recalcr. Les profils utilisés possèdent une codification calée sur les PK (Points Kilométriques : distance par rapport au point de départ 0 sur la portion navigable de la Loire, lorsque celle-ci l'était encore) que nous avons respectés et que nous reprenons pour l'analyse spatiale. A noter que les bornes et les clous de ces profils Crougneau ont été repérés précisément au DGPS, leurs coordonnées très précises ont ainsi été transmises au service compétent de la DIREN de Bassin (Photographie 3).

Nos trois sites d'études sont tous pourvus de ces profils avec une nette représentation pour le site de la réserve naturelle (10 profils susceptibles d'être comparés une fois le recalage réalisé).

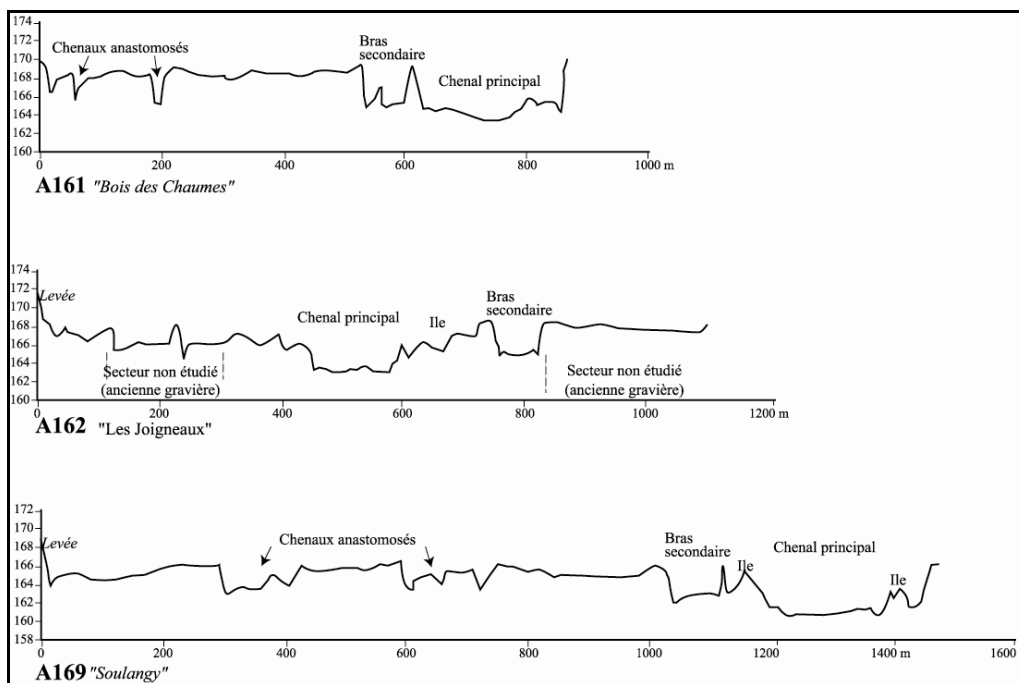


Figure 54 – Exemple de profils topographiques issus du PNRZH (Gautier et *al.*, 2001).



Photographie 3 – Borne type et clou d'arpentage type marquant les extrémités des profils topographiques.

Tableau X – Les différents profils en travers utilisés.

Années	Caractéristiques	Traitement des points et création des profils
<p>1970</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Nom : Profils Collin ● Profils levés au théodolite entre 1972 et 1973 ● Calés sur les PK Loire ● Pas tous exploitables pour comparaison 	
<p>1995</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Nom : Profils Crougeau ● Profils levés au théodolite en 1995 ● Calés sur les PK Loire + bornages (clous, bornes) ● Pas tous exploitables 	
<p>Réactualisations 2002 2003 2004 2005</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Nom : Profils CNRS ● Profils levés au théodolite et DGPS sur un suivi de 4 années ● Réactualisation de 6 profils de 1995 ● Réactualisation de bras secondaires et d'îles 	

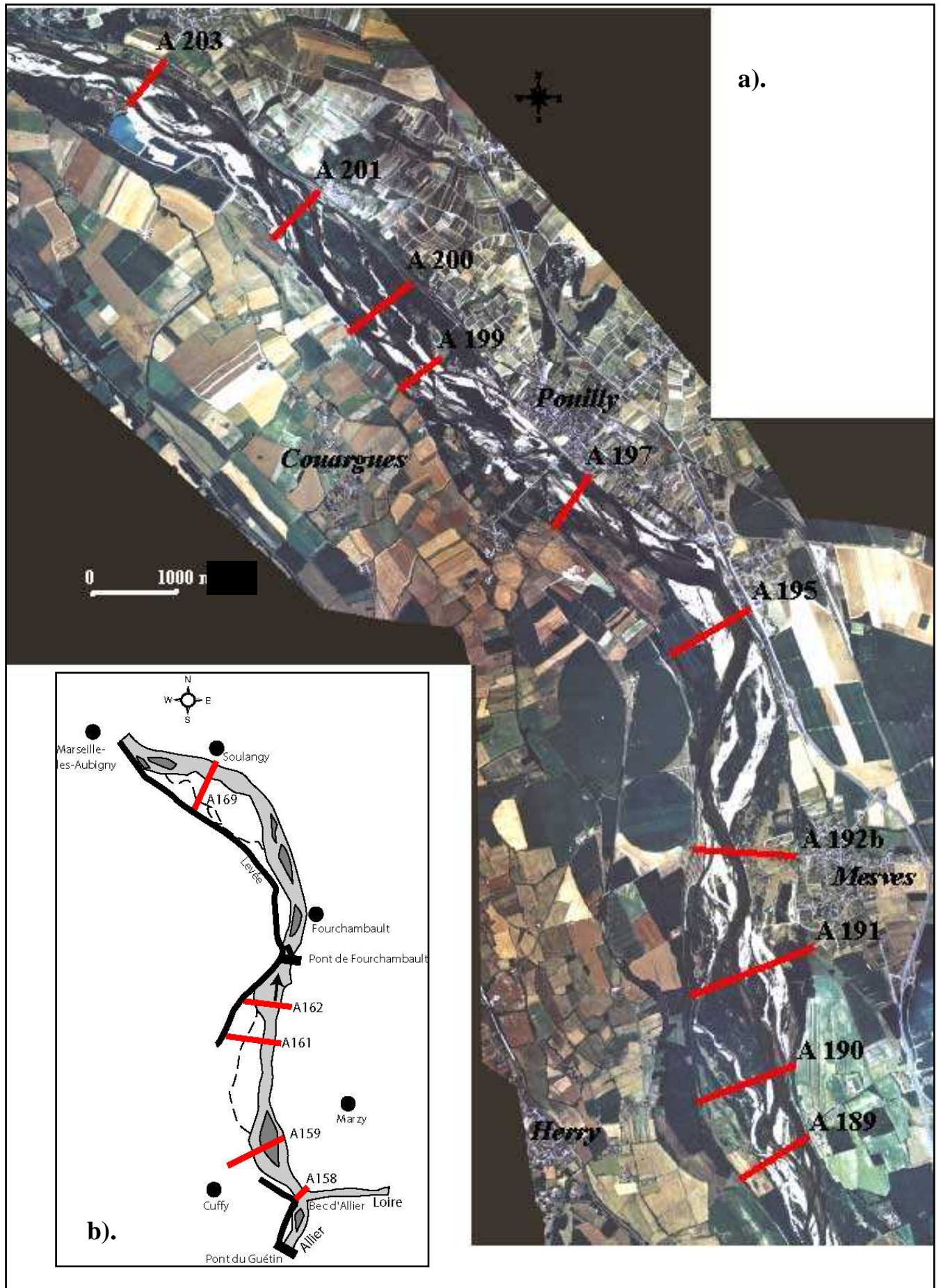


Figure 55 – Localisation des profils en travers aux sites de la Loire moyenne
a). Secteur de la réserve naturelle (SA 3) b). Bec d'Allier (SA1) et Soulangy (SA2) (Gautier, 2001)

• Le recalage et la réactualisation

Les profils ont été ainsi recalés en prenant des repères topographiques fiables (levées, digues, aménagements) et par interprétation géomorphologique (extension de franc-bord, berges peu évoluées, aide des images aériennes). L'azimut des transects a été pris en compte comme facteur discriminant dans le cas de profils non superposables : inadéquation de la longueur des profils superposés et incohérence topographique (déplacement de berge exagéré au regard de la comparaison des images aériennes correspondant aux deux années de suivi).

Or, il a été très complexe de recalcr parfaitement tous les transects à cause de décalage trop important ou même d'anomalies techniques. Aussi, plutôt que de présenter les profils comparatifs avec des taux d'incertitude et d'erreur élevés, nous préférons mettre en évidence ceux pour lesquels le calage est sûr (Tableaux X et XI). Pour la réserve naturelle, il s'agit des profils A189, A192 et A197. Pour autant nous utilisons tous les profils de la réserve naturelle, sauf les A195, A197 et A199, pour la description biogéographique et la typologie topo-sédimentaire que nous décrivons dans la partie consacrée aux échantillonnages sédimentaires.

Certains profils ont été réactualisés à l'aide d'une station totale et d'un GPS différentiel uniquement dans les bras secondaires, ne pouvant pas réaliser la topographie du fond du chenal principal (Tableau XI): profils A189, A190, A191, A192b, A200 et A201. Suivant les conditions environnementales, le couplage DGPS-Station totale a été nécessaire : la végétation faisant office d'obstacle aux ondes radios du DGPS. Ces nouveaux profils ont été calés sur les bornes de commencement des profils existants pour permettre la comparaison.

Le profil A200 a été actualisé dans son intégralité durant la thèse. Ce profil a été en effet équipé de pièges à sédiments ; il fallait donc rattacher cet appareillage à des données altitudinales précises. De plus, l'analyse approfondie des données du profil A200 en 1995 révèle des anomalies que nous ne pouvions conserver pour le besoin de l'étude. Il s'est donc avéré nécessaire de refaire entièrement le profil et notamment sur les formes

végétalisées, îles et francs-bords, car l'état du lit de 1995 ne correspond pas à celui d'aujourd'hui.

Tableau XI– Les profils en travers de l'analyse spatiale

Profils	Site	Recalage	Réactualisation
A158	Site Atelier 1 «Bec d'Allier»	Oui	
A159	Site Atelier 1 «Iles de Marzy»	Oui	Bras secondaire en 1998-1999-2000
A161	Site Atelier 1 «Bois des Chaumes»	Oui	
A162	Site Atelier 1 «Les Joigneaux»	Oui	
A169	Site Atelier 2 «Soulangy»	Oui	Bras secondaire en 1998-1999-2000
A189	Site Atelier 3 «Mouron »	Oui	
A190	Site Atelier 3 «Amont Ile du Lac»	Partiellement	Bras secondaire en 2002, 2003, 2004, 2005
A191	Site Atelier 3 «Aval Ile du Lac»	Partiellement	Bras secondaire en 2002, 2003, 2004, 2005
A192b	Site Atelier 3 «Franc-bord de Mesves»	Oui	Bras secondaire et berge du franc-bord en 2002, 2003, 2004, 2005
A195	Site Atelier 3 « Les Butteaux »	Non	Non
A197	Site Atelier 3 «Amont Pouilly»	Oui	Non
A199	Site Atelier 3 «Pouilly»	Partiellement	Non
A200	Site Atelier 3 «Les Loges Amont»	Non	Entièrement en 2004
A201	Site Atelier 3 «Les Loges Aval»	Non	Bras secondaires en 2002, 2003, 2004, 2005
A203	Site Atelier 3 «Bois-Gibault»	Partiellement	Bras secondaire en 2002

• La comparaison topographique et l'interprétation

Une fois ce calage réalisé, il ne reste plus qu'à comparer ces profils en extrapolant les points de mesures situés sur chaque transect. Par la méthode des trapèzes (Vautier, 2000) la comparaison des points situés sur chaque courbe peut être évaluée : extraction de la différence de hauteur en mètre et détermination des rythmes d'évolution verticaux et latéraux en cm/an sur la période 1970-1995. La quantification de hauteurs érodées ou

sédimentées, des érosions ou des accrétions de berges permet d'évaluer les rythmes de formation ou d'évolution des formes fluviales (méthode PNRZH, 2001).

La superposition des profils fait ressortir alors des zones d'érosion et de sédimentation (Figure 56). En prenant comme exemple, une coupe topographique réalisée en 1970 et 1995 on obtient trois contextes d'évolution :

Profil 1970 > Profil 1995 : Erosion

Profil 1970 < Profil 1995 : Sédimentation

Profil 1970 = Profil 1995 : Stabilité

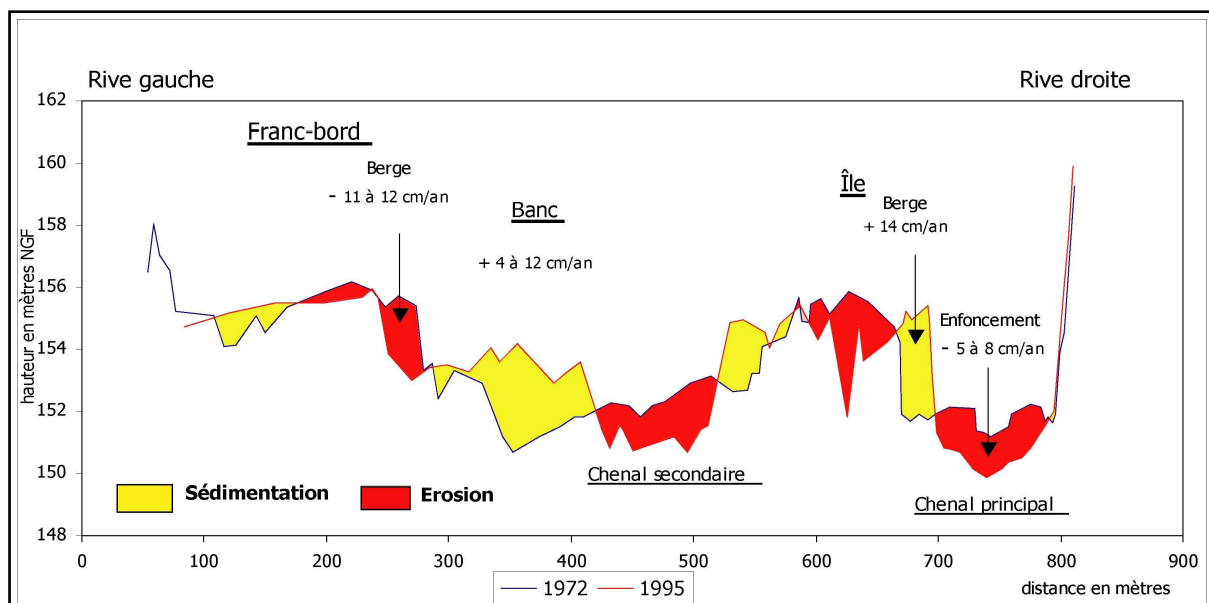


Figure 56 – Exemple de calage de deux profils 1970 et 1995 : les zones d'érosion et de sédimentation apparaissent parfaitement.

La mise en forme de ces calculs se fonde sur la représentation en couleur des surfaces d'évolution entre deux courbes d'années différentes (charte graphique cohérente avec la charte du SIG) : érosion/enfoncement en rouge, sédimentation/exhaussement en jaune. La quantification des hauteurs érodées ou sédimentées, des érosions ou des accrétions de berges permet d'évaluer les rythmes de formation ou d'évolution des formes fluviales. Ce rythme s'exprime en cm/an.

L'étude des profils transversaux nous apporte des informations complémentaires à l'évolution des îles. Les vitesses d'érosion et de sédimentation sur les mésoformes fluviales peuvent être évaluées. La formation des îles peut également être mise en valeur ainsi que le degré d'évolution des chenaux principal et secondaires : enfoncement ou exhaussement. Cet apport de la dimension verticale est mis en relation avec les vitesses d'évolution calculées à l'aide du SIG. L'approche à grande échelle spatiale (échelle des profils en travers) et grande échelle temporelle (25 ans) apporte des explications sur le fonctionnement peu connu des îles fluviales, sur la tendance d'évolution des chenaux fluviaux, elle aussi peu quantifiée jusqu'à ce jour (excepté le travail de Rodriguez, 2004), et au rythme de formation des différentes entités géomorphologiques du lit ligérien.

Cette méthode a permis en 2001 de mettre en évidence que les berges et les îles étaient des zones de piégeages soutenues des sédiments (Gautier et *al.*, 2001).

b). Caractérisation des vitesses de sédimentation et d'érosion des bras secondaires et des îles : le protocole de mesures *in situ*

Pour intégrer cette approche tridimensionnelle, quatre secteurs fonctionnels du SA 3 constituent des sites expérimentaux et d'application de notre approche à grande échelle. Un protocole de mesures *in-situ* est établi pour dresser un maillage de points altitudinaux à l'aide d'un GPS différentiel, lequel est post-traité sous le SIG. Le couplage prend donc forme en associant le fonctionnement et les données de l'approche en plan avec les résultats de la modélisation numérique. Des Modèles Numériques de Terrain (M.N.T.) sont ainsi créés pour représenter en relief des données mesurées sur le terrain (Miliareisis, 2001) et également pour quantifier et qualifier l'évolution du corridor fluvial aux sites étudiés depuis 2002. Les M.N.T. sont reliés au SGBD-Loire et sont les représentations du lit de la Loire depuis 2002. Cette approche est mieux expliquée au cours de la description détaillée des protocoles de mesures *in-situ* et *ex-situ*. Notons d'ores et déjà que tous ces outils d'analyse spatiale fonctionnent aussi bien indépendamment que ensemble, notamment sous le SIG.

En restant à cette échelle moyenne, l'approche 3D complète les résultats obtenus par le suivi des formes en plan et ceux issus de la comparaison des profils. Elle s'obtient par l'interpolation d'un maillage de points géoréférencés et altitudinaux.

L'apport de la 3D permet de quantifier des données importantes en matière de volumes de sédiments déposés et érodés. Ces différentes approches et méthodes n'ont de réel sens que lorsqu'elles sont rapprochées pour répondre aux interrogations de la thèse. Grâce à ces MNT, le suivi des bras secondaires nous renseignera sur le degré de végétalisation et de comblement de ce type d'unité fonctionnelle. Cette approche correspond à la méthode morphologique (Eaton et Lapointe, 2001 ; Desloges and Church, 1992).

Les Sites Ateliers de Marzy et de Soulangy ont fait l'objet d'un suivi topographique par station totale (Gautier et *al.*, 2007 ; Gautier, 2006 ; Gautier et *al.*, 2001). Les quatre sites expérimentaux ont servi de sites d'application de l'outil DGPS pour les besoins du suivi interannuel des bras secondaires. Lorsque le secteur est libre de tout obstacle physique pouvant arrêter ou réfracter les ondes radios et brouiller la réception en mode GPS, la topographie est entièrement réalisée au GPS différentiel. Dans le cas d'obstacles, comme une couverture végétale dense ou encore la présence de bâtiments, la station totale s'impose. La meilleure précision possible est recherchée, quel que soient ces méthodes, ce qui demeure essentiel pour ce type de suivi. Le principe du système DGPS est plus performant en matière de précision altimétrique et planimétrique que le système GPS car il s'articule autour d'une station ou base de référence et d'un mobile permettant les relevés sur le terrain. La donnée devient d'une précision centimétrique en se basant toujours sur la même station de référence.

- **Mise en place du protocole DGPS**

Le protocole DGPS s'appuie sur un semis de points aléatoires mais également indicatifs des changements de micro-formes (mouille, haut de banc, talus, seuil...) (Photographie 4). Un carroyage est ainsi conçu sur chaque connexion en insistant sur la variété des modelés sédimentaires, sans rentrer dans une précision excessive, telle que le dessin des rides sableuses. Ce qui nous intéresse ce sont bien évidemment les vitesses d'érosion et de sédimentation sur ces entrées et sorties de bras secondaires que nous jugeons comme

stratégiques en terme d'hydro-dynamisme. Des trajectoires au DGPS sont dessinées et extrapolées par la suite afin de marquer les limites des grands ensembles topographiques, sédimentaires et biogéographiques qui nous intéressent. La combinaison des semis de points et des trajectoires permet la modélisation précise et informative des bras secondaires.

Des profils en travers levés au DGPS chaque année dans les bras longeant l'île du Lac et de l'île des Barreaux complètent le suivi fin des connexions de ces mêmes bras.

- **Protocole de relevés des profils**

- Que ce soit pour le théodolite ou le DGPS, le protocole de levés est identique et reste tout à fait simple puisqu'il ne s'agit que d'un alignement de points. Il concerne presque exclusivement la réactualisation des profils topographiques dits Crougneau. Lorsqu'il a été possible de retrouver les extrémités de ces profils, c'est-à-dire les bornes ou clous d'arpentage, la topographie par DGPS s'effectue en reprenant l'azimut des profils¹. Pour la réactualisation, seuls les bras secondaires et une partie de la bande principale ont été levés. Chaque changement de topographie, chaque limite de micro-forme fluviale, chaque limite majeure de végétation ont été marqués, enregistrés sur l'ordinateur du GPS et notées sous forme de croquis sur le carnet de terrain. Ces minutes de terrain sont précieuses pour l'extrapolation des points sous les logiciels de construction des profils topographiques.

- D'autres profils participent à la construction des MNT dans les connexions expérimentales. Les profils du site de La Charité-sur-Loire, réalisés en 2004 et 2005, combinent les outils théodolite et DGPS en respectant le même protocole que pour les réactualisations.

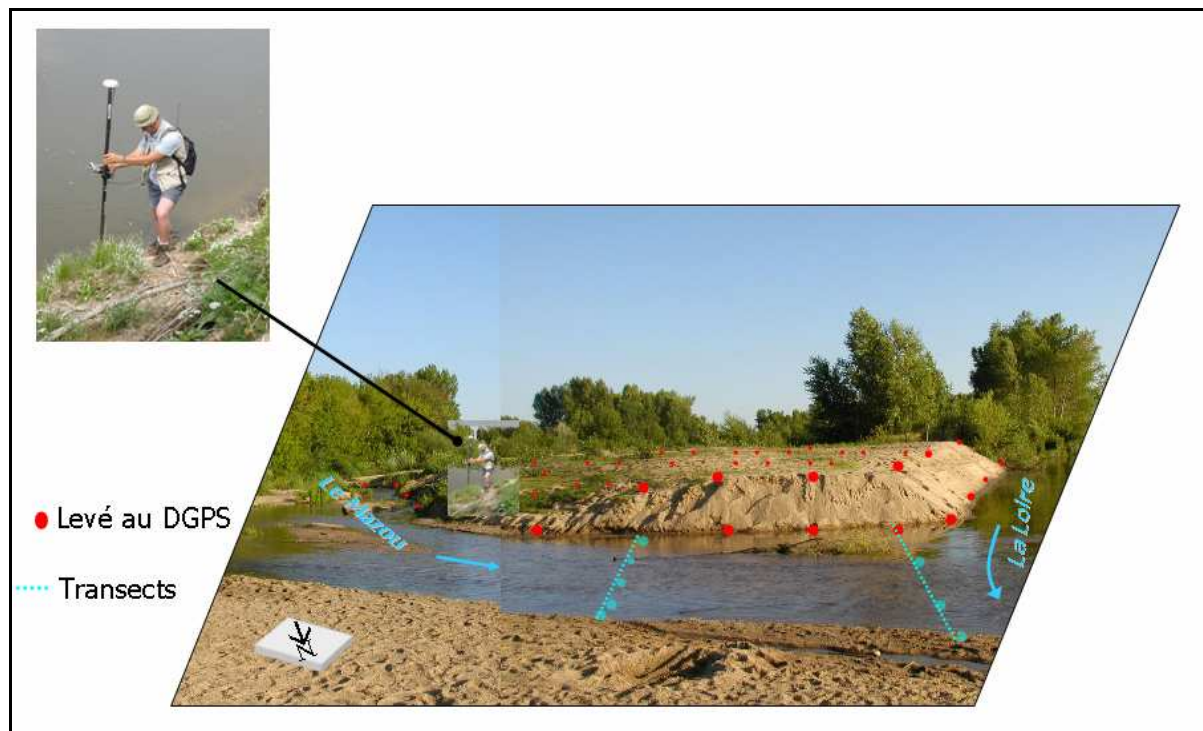
c). Analyse spatiale par MNT

Plusieurs étapes sont primordiales pour la construction des MNT issus des relevés topographiques.

- **Extrapolation des données brutes DGPS. Interpolation avec données théodolite**

Cette phase d'extrapolation des données brutes permet de retirer les points DGPS aux coordonnées altimétriques et planimétriques imprécises : décalage des points erronés,

¹ La déclinaison magnétique annuelle, de 7 centigrades par an, a été respectée à chaque réactualisation



Photographie 4 – Méthodologie de levé au DGPS.

Exemple de la connexion d'un des sites expérimentaux de la Loire moyenne : création d'un maillage de points et de lignes topographiques en vue de la construction de Modèles Numériques de Terrain (MNT) en laboratoire.

incertitude de l'altitude. Les points pris au théodolite et au DGPS, pour réaliser un même profil, sont recalés et positionnés sur le même référentiel géographique.

● **Méthode GRID ou kriging et TIN (triangulation Delaunay) - Construction des MNT sous Spatial Analyst d'ArcGis et sous Surfer, méthode du plus proche voisin** (Figure 57)

La méthode par triangulation (Okabe et *al.*, 1992) a été privilégiée puisqu'elle évite le lissage « visuel » et donc parfois erroné de la méthode GRID. Le kriging est utilisé dans notre cas d'étude pour la distribution sédimentaire au sein des connexions des bras étudiés. Le calcul des volumes sédimentaires est apprécié à l'aide de la méthode du plus proche voisin. Le choix des logiciels est secondaire et les représentations par la méthode TIN ont été indifféremment réalisées sous les logiciels ArcGis et Surfer ; les résultats restant similaires. C'est plus au niveau de l'aspect esthétique et cartographique que le choix s'est réalisé.

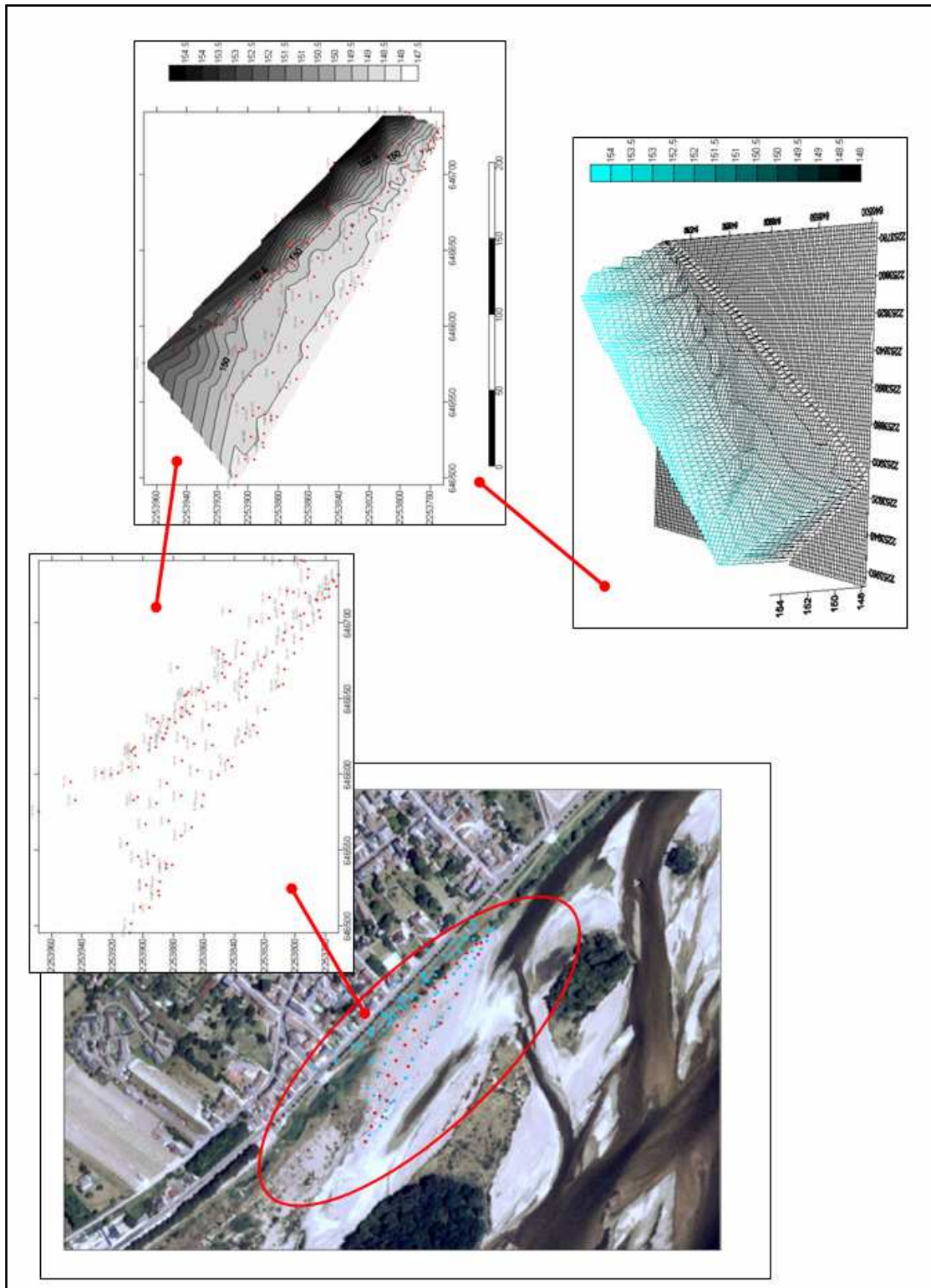


Figure 57 – Les grandes étapes des mesures topographiques depuis les levés de terrain jusqu'à la création des MNT.

3). Les échantillonnages sédimentaires

L'approche sédimentologique est une composante indissociable de toute étude en géomorphologie fluviale (Schumm, 1977 ; Kondolf et *al.*, 2003). Tout comme l'analyse

spatiale, l'étude sédimentaire n'a de sens que si elle permet de répondre aux problématiques environnementales de la thèse (Kondolf, 1997).

Plusieurs méthodes ont été employées pour procéder aux échantillonnages sédimentaires. Au total, ce sont plus de 300 échantillons sédimentaires qui ont été prélevés sur le Site Atelier 3 et analysés en laboratoire. Les données sédimentologiques du PNRZH (Gautier, 2006 ; Gautier et al, 2001) ont également été intégrées dans l'analyse des conditions hydro-sédimentaires et la distribution des sédiments en fonction des formes fluviales. Les prélèvements effectués sur les bras secondaires de la Charité (Nabet, 2005) font partie également de l'analyse globale.

Nous classons ces méthodes en fonction de leur implication dans les objectifs de la thèse.

- **Etablissement d'un premier état des lieux sédimentaires des bras secondaires en 2002.**

Il s'agit essentiellement d'affiner la typologie des bras secondaires en associant les micro-formes de chaque chenal avec sa représentation sédimentaire. La comparaison peut être réalisée entre l'amont et l'aval d'un même bras et entre les différents bras.

Les quatre bras secondaires du Site Atelier 3 ont tous fait l'objet d'une première étude en 2002. En fonction du protocole topographique, en vue de la construction des MNT, annexés aux connexions amont et aval des chenaux, des prélèvements sédimentaires ont été effectués en 2002. En suivant des transects perpendiculaires à chaque chenal, un prélèvement sur 5 cm est réalisé tous les 10 mètres, couplés par une mesure altimétrique au DGPS. La légère première couche de vannage n'est pas prise en compte dans l'échantillonnage, même si les avis divergent sur ce choix (Rice et Church, 1996). Trois transects espacés de 15 mètres ont ainsi été suivis à chaque connexion amont et aval des bras secondaires expérimentaux.

Pour les mesures de bancs de galets, la méthode appliquée sur les cours d'eau torrentiels est reprise (Peiry, 1988 ; Gautier, 1992 ; Piegay, 1995) : mesure moyennée des deux axes des trente galets les plus grands prélevés sur une surface de 1m² au sommet de chaque banc.

- **Distribution des cortèges sédimentaires en fonction des formes fluviales**

Pour répondre à cet objectif, l'utilisation des profils topographiques « Crougneau » ont été repris sur le terrain (Gautier et *al.*, 2001). Le protocole d'échantillonnages est le suivant :

- Echantillonnage systématique dès les changements de faciès topographiques, morphologiques et biogéographique : par type de formes fluviales (bras mort, franc-bord, île, bras secondaire à sec), au sein d'une même forme fluviale (changement de topographie et de couverture végétale, berge, haut de berge, sommet d'île...).
- A chaque point de prélèvement, cinq carottes de 20 cm chacune sont prélevées à l'aide d'un carottier à main. Sur un mètre de sondage, tous les changements de faciès sédimentaire sont relevés (type de grain...).

• **Mesures et caractérisation des dépôts de sédiments et des érosions lors d'événements hydrologiques variés**

- Durant l'automne 2002, nous avons équipé en pièges à sédiments un même profil (profil A200). Les grandes unités fonctionnelles morphologiques apparaissent clairement. Les pièges ont ainsi été placés sur chaque grande unité fonctionnelle et sur les changements nets de topographie au sein du même profil. Nous trouvons un chenal principal, deux bras secondaires, deux îles, un franc-bord et deux bras morts.

Les grands types morphologiques représentés sur ce profil A200 sont (Figure 58) :

- Ile A : berge droite côté bras secondaire, berge gauche côté bras principal, dépression centrale.
- Ilot des Loges : berge droite côté bras secondaire, berge gauche côté bras secondaire, bras mort, partie centrale en dépression.
- Franc-bord : berge, haut de franc-bord, bras mort.

Cette diversité nous permet d'avoir une idée de la répartition des sédiments, essentiellement de manière latérale en comparant pour une même crue la quantité et la qualité des sédiments déposés dans les pièges.

Les pièges sont de deux types :

- **Des tubes ou trappes à sédiments** de 1 mètre de haut et d'un diamètre de 15 cm. A l'intérieur, on place un système en nid d'abeille permettant l'entrée des matières en suspension et empêchant leur sortie, par passage d'un flux turbulent à un flux laminaire (Gautier, 2006 ; Gautier et *al.*, 2001).

- **Des paillasons** : système de tapis artificiels récoltant essentiellement les matériaux en saltation et roulage à la fin de la crue. Cette technique est issue d'une méthode de prélèvement de graines élaborée par des écologues et adaptée sur de nombreux cours d'eau.

L'installation des pièges a donc consisté à placer en un même point un couple de trappes à deux hauteurs différentes et un paillason (Photographie 5). Nous disposons alors de systèmes de piégeage à des hauteurs différentes dont le fonctionnement dépendra des débits et de la hauteur de la ligne d'eau.

Au total, 20 trappes et 16 paillasons ont été installés tout le long du profil topographique.

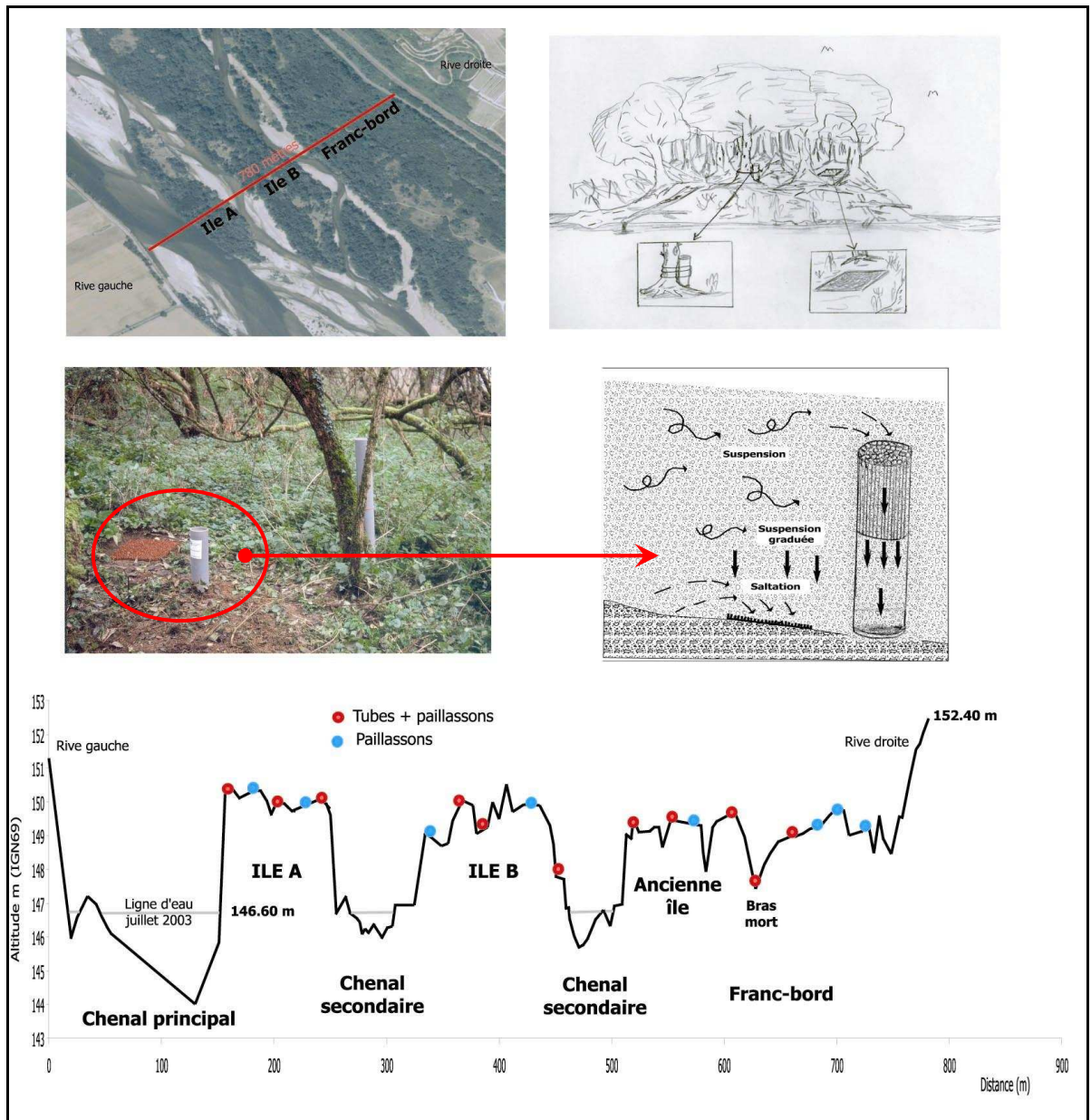


Figure 58 – Le système de pièges à sédiments sur un profil expérimental A200. Il permet de récupérer les matériaux en suspension et en saltation lors des crues. Chaque unité fonctionnelle est équipée de trappes à sédiments et de paillassons. Après chaque événement hydrologique important, ces pièges sont ensuite remplacés et emportés en laboratoire pour analyse.

- Pour chaque île : 1 couple en berge droite; 1 couple en berge gauche, 1 dans la dépression centrale ;
- Pour le franc-bord : 1 couple sur la berge de franc-bord, 2 couples à deux niveaux du haut de franc-bord, 1 dernier dans le bras mort du franc-bord.



Photographie 5 – Point de mesure de la sédimentation sur un franc-bord. Trois niveaux de prélèvements assurent au même point un piégeage large des sédiments lors des submersions périodiques.

En plus de ce système de piégeage, **des files de chaque classe morphologique (du micro-flot à la très grande file) ont été suivies** en mesurant manuellement l'épaisseur des dépôts laissés après chaque crue.

• **Suivi et transfert des Matières En Suspension**

Les Matières En Suspension (MES) sont quantifiées à l'aide de la méthode d'échantillonnage précédente. On peut savoir quelle est la part des matières fines déposées sur les différentes formes fluviales lors de chaque évènement hydrologique. Il manque pourtant au flux de MES la donnée temporelle. A quel rythme s'effectuent ces déplacements de MES lors de chaque crue ? Les flux de MES sont donc analysés. Nous sommes limités par les moyens disponibles pour suivre efficacement les MES. Il faudrait une station de mesure quasi continue pour évaluer ces données et leur transfert au sein de l'hydrosystème ligérien.

- Le service hydro-chimie de la centrale nucléaire EDF de Belleville dispose de mesures mensuelles sur les matières fines transitant au droit du site. Il s'agit d'échantillonnages aléatoires ne tenant pas compte des conditions hydrologiques (une fois par mois). Ce n'est pas leur intérêt de recherche bien entendu mais la collaboration scientifique a été permise entre le LGP et EDF. Toutefois, ces données renseignent sur les variations de MES en

fonction des débits depuis mars 2001. L'exploitation de ces données reste modeste, mais sert l'interprétation des conditions environnementales contemporaines notamment en terme de transport de MES.

- Des prélèvements suite à la décrue de février 2003 ont été entrepris dans les grands bras secondaires du Site Atelier 3 depuis le bateau de la DDE. Ces données originales servent également l'analyse des conditions hydro-sédimentaires

- Nous avons suivi la crue de décembre 2003 à travers notamment les taux de MES relevés très régulièrement aux ponts de La Charité-sur-Loire et de Pouilly-sur-Loire (Figure 59). La courbe des MES a été dressée et apporte des éléments d'interprétation essentiels et rares. Lors de cette crue, nous avons pratiqué plusieurs échantillonnages aléatoires dans le temps, principalement dans les annexes hydrauliques éloignées du lit vif (Figure 59). Nous pouvons ainsi les comparer aux données EDF et aux pièges à sédiments (proportion de MES).

Cette échelle fine se centralise sur les processus hydro-sédimentaires oeuvrant au sein de la Loire des îles. A partir des relevés topographiques inter-annuels et post-crue nous disposons de données sur les rythmes d'évolution des formes végétalisées comme les îles et les bras secondaires. Nous pouvons en déduire des zones privilégiées de sédimentation et d'érosion au sein de notre secteur fonctionnel, en fonction d'une variété de conditions hydrologiques. Comment et dans quelle mesure est piégée la charge sédimentaire ? Quelles sont les formes fluviales les plus « piégeuses », dans quelles parties ? Quelle est l'intensité de l'érosion fluviale ? Comment varient ces processus de piégeage et de transport en fonction des débits ? Autant de questions que cette approche fine permet d'éclairer. Nous pouvons ainsi interpréter l'hydro-morphodynamisme actuel qui caractérise la Loire des îles et ses différentes unités fonctionnelles.

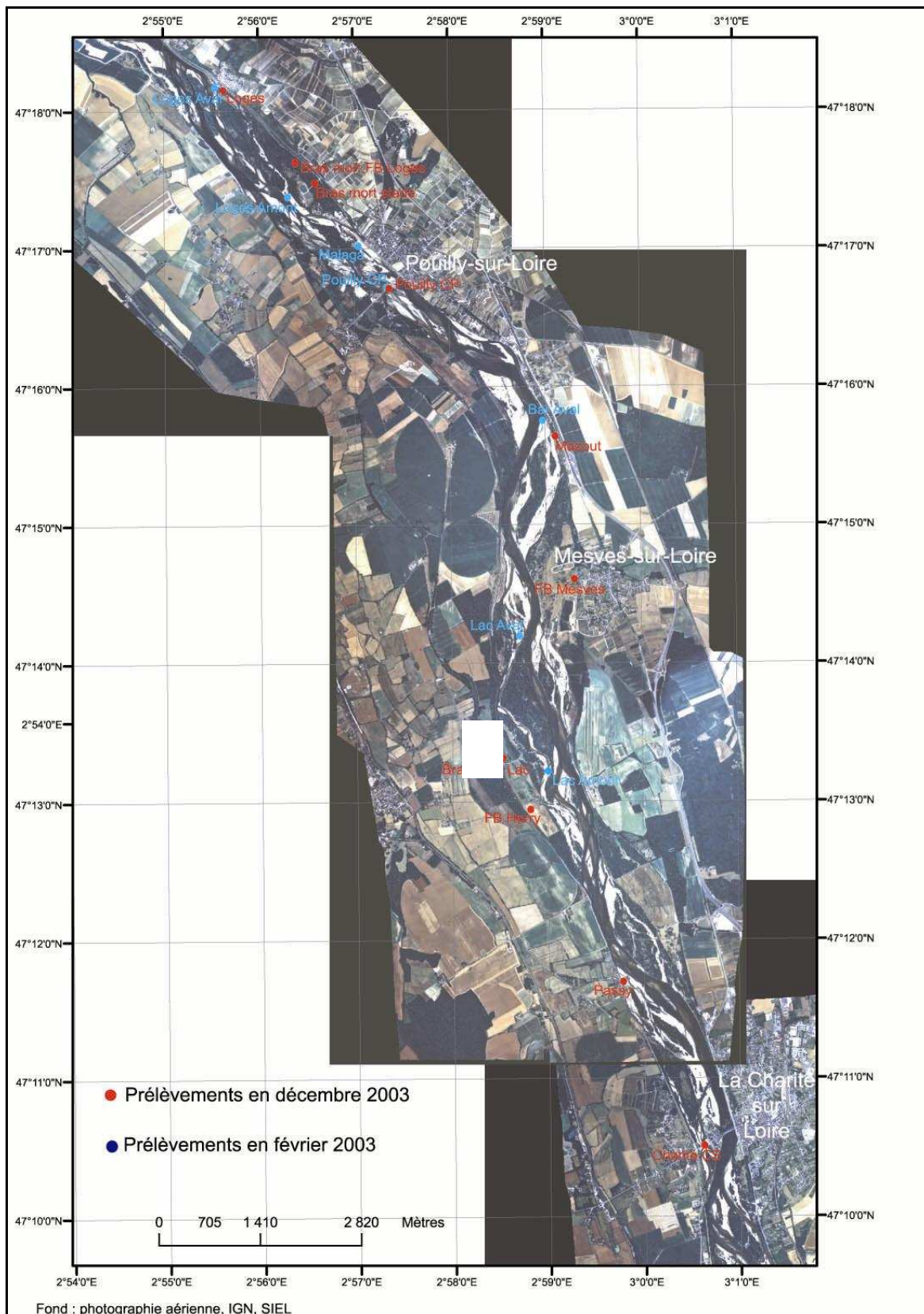


Figure 59 – Localisation des sites de prélèvements des MES dans le Site Atelier 3 lors de deux crues importantes.

C. Méthodes employées pour la recherche des facteurs hydro-climatiques et socio-économiques

1). Suivi du fonctionnement hydrologique

a). Analyse des chroniques hydrologiques depuis le 19^{ème} siècle

La station de Givry-Cours-les-Barres a été sélectionnée pour étudier de près les données hydrologiques en Loire moyenne. Les données sont disponibles depuis 1967, avec une absence de données en 1981. Cette station située dans le Cher en aval immédiat du bec d'Allier concerne un bassin versant de près de 36600 km² et sert de référentiel des débits pour les Sites Ateliers étudiés. Pour élargir, les données hydrologiques et renforcer l'analyse hydro-chronologique depuis le 19^{ème} siècle, les stations de Gien (35500 km² ; données depuis 1984) et de Blois (38300 km²; données depuis 1863) ont été utilisées (Figure 60). Même si les débits les plus anciens sont à utiliser avec une grande précaution, ils restent toutefois de bons indicateurs des tendances hydrologiques au fil des décennies. Si on se réfère aux crues les plus importantes, la station de Blois est fiable (Dacharry, 1974). De plus, nous disposons d'études réalisées par le Service Hydraulique Centralisé, ex DIREN de Bassin (SHCBL, 1988) pour établir cette chronologie des crues de la Loire.

Nous nous sommes intéressés à plusieurs éléments dans cette hydrologie ligérienne :

- durée des débits à plein bord, estimation faite en fonction de nos longues et répétées observations sur le terrain ;
- durée et intensité des crues ;
- durée des basses eaux.

b). Suivi du fonctionnement hydrologique du Site Atelier 3 de 2002 à 2005

Le Site Atelier 3 permet de définir des secteurs fonctionnels quant aux vitesses de sédimentation et d'érosion dans les bras secondaires, sur les îles et les francs-bords. Notre approche fine a reposé sur quatre grands secteurs répartis au sein de cette réserve naturelle. Il s'agit, non seulement, de caractériser ces phénomènes sédimentaires, mais également, de les corrélés aux données hydrologiques dont nous disposons grâce au réseau de la DIREN de Bassin.

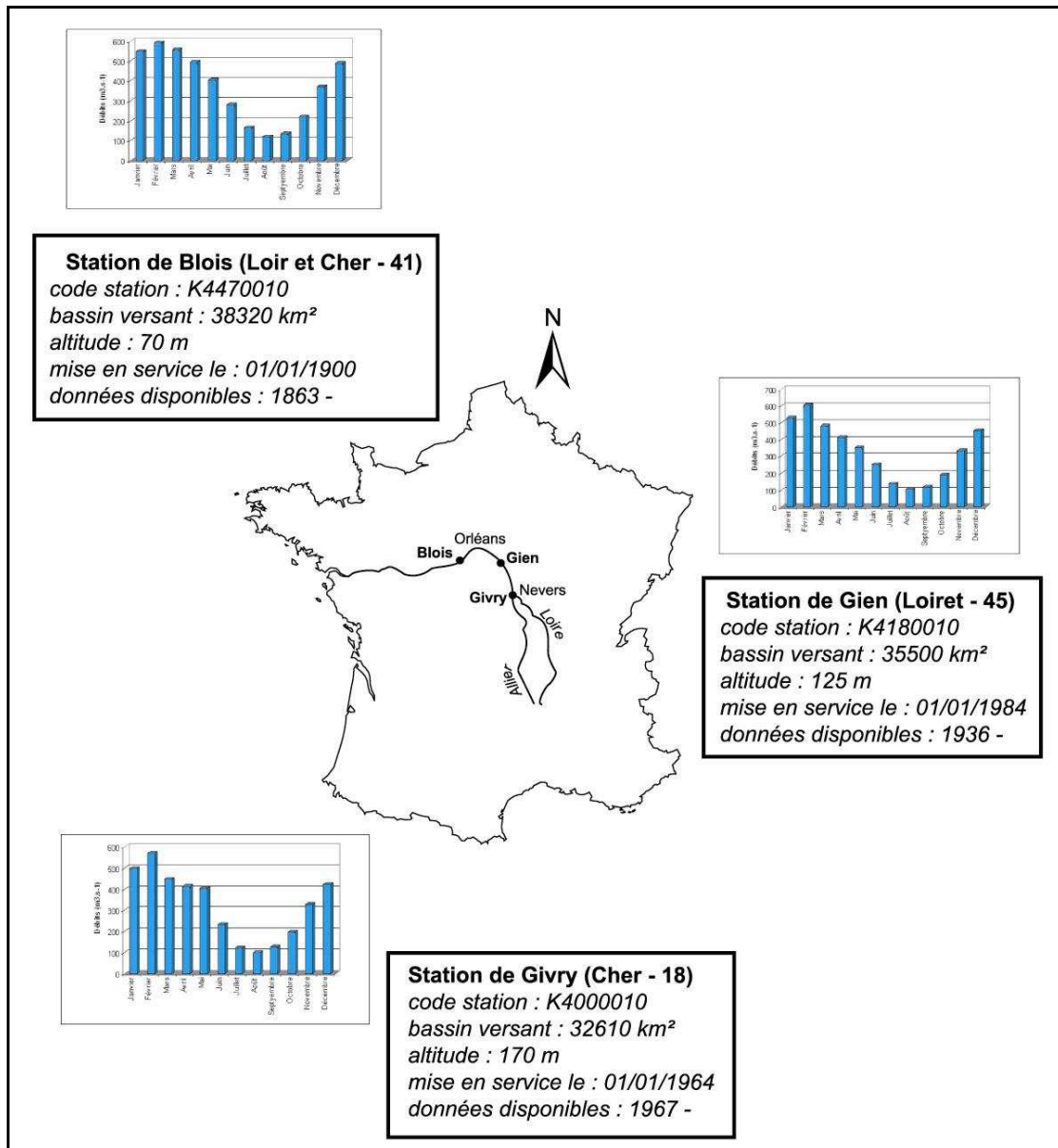


Figure 60 – Localisation des stations hydrologiques de référence pour la Loire moyenne. La station de Blois est la plus ancienne et permettra d’analyser les chroniques hydrologiques.

Les données hydrologiques quotidiennes, sur des pas de temps de 4 heures, nous permettent de réaliser cette corrélation entre la durée et l’intensité des débits et les vitesses de construction ou de destruction des cortèges sédimentaires au sein des formes fluviales types. Les débits de connexion des bras secondaires et les débits morphogènes nous intéressent tout particulièrement. Le suivi hydrologique de la crue de décembre 2003 (Figure 61) a été mis en relation étroite avec les données prises sur le terrain comme les lignes d’eau et les limites géographiques de l’extension de la tâche d’inondation. Nous disposons ainsi de données localisables dans le temps et dans l’espace : suivi des hauteurs

d'eau lors du pic de crue et de la décrue, cartographie précise de l'extension de l'inondation sur près de 48 heures. Ce type de données et ce suivi fin au niveau de l'hydrologie sont assez rares et donc originaux dans l'étude de l'hydrosystème Loire.

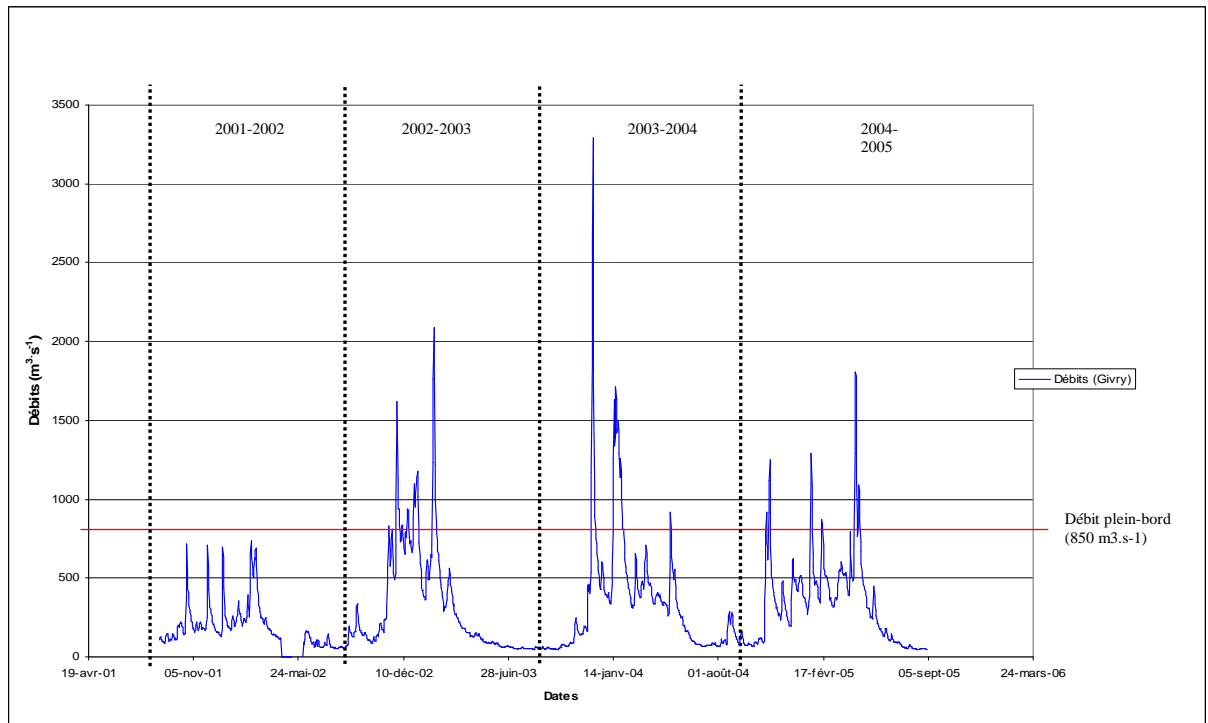


Figure 61 - Evolution des débits entre 2002 et 2005.

La crue de décembre 2003 ressort nettement et représente en effet un événement hydrologique historiquement important.

2). L'évolution des usages

a). La recherche archivistique

Il est une évidence : les usages sont fortement liés à l'évolution morphodynamique du fleuve (Gautier, 2006 ; Gautier et *al.*, 2001). Le tout reste de savoir de quelle façon l'une des entités agit sur l'autre. Cette recherche de l'évolution des usages fait appel à la recherche archivistique, seule ressource documentaire attestant des modes d'occupation et d'usages par les sociétés riveraines du fleuve. Notre travail a été facilité par la présence dans notre équipe de recherche d'une géo-historienne. Saïda Temam a pu apporter une méthodologie de recherche bien particulière qui nous a épargné, reconnaissons-le, bien des journées de labeur dans les archives. Son remarquable travail sur les aménagements du fleuve et du rôle des ingénieurs (Temam, en cours ; Temam, 2005) reste une source importante de notre travail et surtout apporte une synthèse inédite de l'organisation des

corps d'ingénieurs dans l'aménagement du fleuve. Pour notre part, nous replaçons ses conclusions par rapport à l'évolution de la Loire. Nous nous intéressons aux liens Sociétés/Fleuve et aux relations avec les formes fluviales, en terme d'entretien.

Les séries des archives nationales et départementales constituent la première piste de recherche archivistique. Par le serveur des Archives, les bases de données sont explorées pour en extraire les séries qui correspondent le mieux à nos thèmes de recherche des facteurs anthropiques. La recherche de mots-clés sur la base de données ARCHIM permet d'obtenir rapidement les références. Les séries F14 pour les travaux publics sont également consultées pour répondre à nos interrogations.

Pour le dépouillement des archives communales et départementales, nous utilisons une méthode simple d'analyse archivistique. En partant de thématiques pré-définies et de mots-clés (îles, francs-bords, entretien et balisage du lit, morphologie et état du lit de la Loire, perception des formes fluviales par les ingénieurs et mariniers), il a été possible d'identifier des facteurs socio-historiques importantes et en lien direct avec l'étude spatio-temporelle du lit ligérien. Les ressources archivistiques des communes de Pouilly-sur-Loire et de la Charité-sur-Loire, par le biais du Musée municipal, ont été ainsi exploitées. De même les musées de la marine de Loire de Cosne-sur-Loire et de Châteauneuf-sur-Loire ont constitué une solide base de références en matière d'entretien et de balisage du lit de la Loire. Nous nous sommes intéressés en premier lieu à la navigation ligérienne et à tous les travaux d'entretien et de balisage que cette dernière nécessitait (dans le lit vif et sur les marges du fleuve). Non seulement le paysage fluvial de la Loire est fortement marqué par les ouvrages de navigation (quais, chevrettes, levées) mais les activités socio-économiques liées à la marine marchande ont contribué à façonner ce même paysage ligérien. L'agriculture, au sein du lit fluvial et sur ses marges, a constitué l'ordre grand type d'usage auquel nous associons un lien très fort avec les unités fonctionnelles fluviales (francs-bords et îles).

b). Les enquêtes de terrain et les autres ressources documentaires

- **Les sorties de terrain** sont l'occasion de rencontrer les populations locales et obtenir par ce biais des informations précieuses au niveau de la perception de ces riverains de la Loire

par rapport au fleuve. Cet aspect de la perception est riche d'enseignement car il renseigne sur la place qu'occupe aujourd'hui la Loire dans cette société en marge du fleuve. C'est l'occasion entre autres de retrouver des idées reçues comme l'ensablement excessif du fleuve, alors qu'il n'a jamais autant souffert d'un déficit en sédiments, et les « vertus des extractions » pour lutter contre la perte du caractère fluvial de certaines communes (La Charité-sur-Loire et surtout Pouilly-sur-Loire). Ces industries sont pourtant responsables de l'enfoncement chronique du plancher alluvial de la Loire, mais bon nombre de riverains associent la végétalisation actuelle du lit fluvial à l'arrêt des extractions.

- **L'apport des cartes postales anciennes** pour reconstruire l'évolution des pratiques socio-économiques associés au fleuve. Les modes de vie des sociétés riveraines sont privilégiés car ils sont fortement liés au cadre de vie ligérien. Les cartes postales apportent des informations importantes sur ces relations entre les riverains et le fleuve.

D Le cadre institutionnel et financier

1). Les moyens et les outils

Cette thèse a été financée par le Ministère de la Recherche, par une allocation de recherche de l'Université Paris 8 ; Le laboratoire d'accueil principal est le **LADYSS** (CNRS UMR 7533 « LABORATOIRE DYNAMIQUES SOCIALES ET RECOMPOSITION DES ESPACES » Universités Paris 1, 8 et 10). Compte tenu des problématiques de géomorphologie fluviale et d'environnement inhérentes à cette thèse, certes proches des axes de recherche du LADYSS mais demandant un savoir-faire en géographie physique, un rattachement secondaire à un autre laboratoire a été demandé en février 2002.

Le **Laboratoire de Géographie Physique (LGP-Meudon - CNRS UMR 8591)** forme la structure de recherche et d'accueil de la présente thèse. Au sein de ce laboratoire, il a été possible de mettre en place le protocole de recherche grâce aux moyens financiers, matériels et intellectuels que l'on peut y trouver.

- Les travaux à mettre en œuvre rentraient directement dans l'équipe thématique de recherche du LGP, **DYVERLI** « Dynamique des versants et des lits fluviaux » (responsable M. Charles Le Cœur) dont les ingénieurs et techniciens du laboratoire sont impliqués au côté des chercheurs, des doctorants et post-doctorants. L'équipe **DYVERLI** s'organise en

deux groupes de travail (l'un montagne, l'autre hydrosystèmes) et s'intéresse en particulier aux réajustements des milieux aux forçages climatiques et sociétaux. Les thèmes du programme Zone Atelier Loire et celui des Friches hydrauliques trouvent leur place dans cette équipe en s'intéressant aux réajustements historiques de l'hydrosystème Loire aux perturbations hydro-climatiques et anthropiques. La diversité des recherches menées au sein de cette équipe, ainsi que celle des autres équipes, a enrichi le déroulement et l'encadrement de la thèse.

2). Des travaux d'équipes et des collaborations

Un travail de thèse ne se résume pas à un travail solitaire effectué en totale indépendance et soustrait de toute collaboration. Cette présente thèse s'éloigne largement de cette image du doctorant isolé. Ces années de recherche ont été menées personnellement en collaborant avec les gestionnaires du fleuve, ou encore en participant à des thématiques de recherche pluridisciplinaire, en reprenant en somme l'esprit de la ZAL et précédemment celui du PNRZH.

- La thèse a été menée parallèlement à des travaux de master et à d'autres recherches doctorales, dans le cadre de la ZAL et des Friches hydrauliques effectués au LGP. Les relevés de terrain, les méthodologies d'enquêtes et d'analyse spatiale et les interprétations ont été menés ensemble dans un esprit d'équipe et de collaboration scientifique. Ainsi, la gestion de l'inondation de décembre 2003 dans le Val de Loire (Woudstra, 2005), l'impact géomorphologique des travaux d'entretien du lit de la Loire (Nabet, 2005 et 2006), la gestion des zones humides (Ramond, 2006), le réajustement fluvial des méandres de Guilly (Depret, 2006) et l'étude de la construction de la plaine d'inondation bourbonnaise (Grangeret, 2005) sont autant de thèmes de Master liés aux méthodes et données issues de la présente thèse et des travaux engagés sur la Loire depuis plus de dix ans. Ce contexte de mutualisation des données et des méthodologies forme un cadre scientifique de grande qualité pour un futur chercheur.

Les thèses en cours s'effectuent de la même manière. Citons la thèse consacrée aux politiques d'aménagement menées sur la Loire moyenne depuis l'Ancien Régime, à leurs conséquences sur la gestion et la dynamique actuelles du fleuve (Temam, 2005 et en

cours). L'approche géo-historique de ce travail doctoral enrichit et renforce les résultats obtenus dans cette thèse dans le domaine notamment de la gestion du fleuve par les sociétés riveraines. La thèse de Lydie Martinhac consacrée à la gestion de l'eau dans le Val de Loire et à ses enjeux socio-écologiques actuels (Martinhac, 2003 et en cours) apporte des éléments nouveaux quant aux facteurs d'évolution contemporains des annexes hydrauliques et des ressources en eau de la Loire.

- L'appartenance à deux laboratoires de recherche (LADYSS et LGP) est l'occasion de partager des expériences méthodologiques avec d'autres chercheurs et doctorants travaillant sur des thèmes similaires et différents. La méthode d'analyse spatiale a ainsi inspiré des travaux d'autres étudiants, et en particulier, l'étude des formes fluviales mobiles comme les bancs et les grèves sableux pour le suivi des populations de Sternes naines et de Petites Gravelots en Maine-et-Loire- (Binard, 2003).

- Les collaborations avec les opérateurs du fleuve Loire participent à la dynamique de recherche consacrée au fleuve. Les données cartographiques, les images aériennes et bon nombre de données hydrologiques et géomorphologiques ont été fournies par la DIREN Centre de bassin et le Plan Loire. Les appuis logistiques, comme le transport en bateau sur la Loire pendant les hautes eaux, ont été précieux pour effectuer les relevés au sein du lit fluvial et sur les îles. Le service de la navigation de la DDE de Saint-Satur a rempli efficacement cette aide en apportant même une connaissance technique du fleuve. Les inventaires écologiques et biogéographiques ont été réalisés dans un esprit de collaboration avec les gestionnaires compétents du fleuve comme ceux de la réserve Naturelle Nationale du Val de Loire et les Conservatoires d'espaces naturels des régions Centre et Bourgogne. L'accueil dans les locaux de la réserve naturelle, du Pavillon du Milieu de Loire et les mairies riveraines est une forme de collaboration tout aussi précieuse. La recherche des données archivistiques a nécessité des rapprochements forts avec les musées, mairies, DIREN, conservatoires, riverains et professionnels du fleuve.

- Ces cinq années de thèse ont été l'occasion de prospecter le corridor ligérien étudié lors notamment de réunions de travail, de recherche documentaire, d'encadrements d'étudiants, de conférence grand public et bien sûr lors des nombreuses missions de

terrain (Figure 62). La Loire moyenne a été longuement prospectée et tout particulièrement entre le Bec d'Allier et Gien, cœur de la Loire des îles. La connaissance acquise du terrain dans cette partie de Loire en fait un atout majeur dans les propositions et les réflexions à tirer dans le cadre de réunion de travail avec les gestionnaires ligériens et bien entendu lors de séminaires pluridisciplinaires au sein de la ZAL. Les années 2002, 2003 et 2004 ont été riches en rencontres formelles (colloques, conférences...) et informelles (entretiens avec les riverains, les pêcheurs et les différents usagers ligériens), en événements hydrologiques (crues de février 2003, décembre 2003 et janvier 2004), en durée de sécheresse (étés 2003 et 2004). Le bilan de ces journées passées au cœur de la Loire, et pas seulement dans la zone d'étude principale, demeure extrêmement positif et justifie la durée d'analyse, d'interprétation et de rédaction de ce travail doctoral, lequel trouve ici toute son expression.

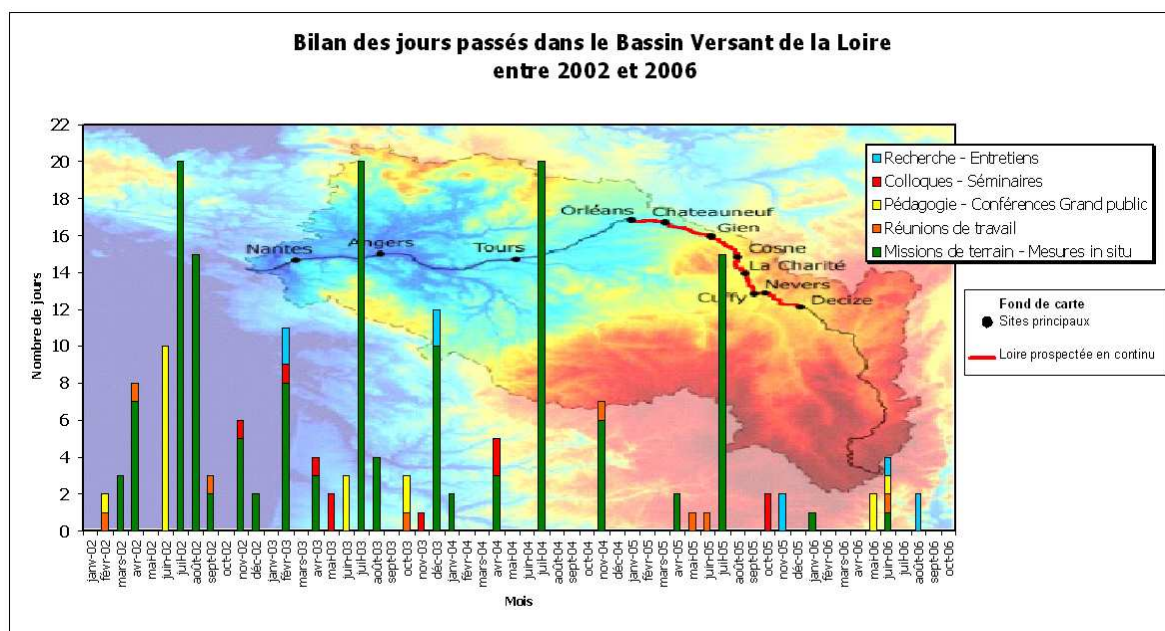


Figure 62 – Bilan des jours passés dans le Bassin versant de la Loire entre 2002 et 2006

En somme, toutes ces collaborations universitaires, scientifiques et professionnelles ont forgé les bases d'une démarche de recherche nouvelle et enrichissante en tous points pour cette thèse.

Le cadre méthodologique est ainsi fixé. Les résultats de ces différentes méthodes se déclinent au fil des chapitres suivants en éclairant au fur et à mesure toutes les questions posées pour la thèse. Le découpage de l'ouvrage est axé sur l'enchaînement des résultats obtenus par l'analyse multi spatio-temporelle.

- Une échelle moyenne analysée à l'aide d'un outil performant, le SIG
 - L'échelle moyenne couvre une période allant du 19^{ème} siècle jusqu'à aujourd'hui et associe les différents niveaux d'approches : analyse des formes en plan, profils en travers comparés et réactualisés, M.N.T. à l'échelle de la plaine d'inondation et des formes fluviales
 - La grande échelle se focalise sur l'évolution inter et intra annuelle des formes fluviales vis-à-vis de diverses conditions hydro-sédimentaires à l'aide de modélisations numériques topographiques et de systèmes de pièges à sédiments.
 - La base même de ce travail repose sur l'étude rapprochée des phénomènes physiques et des actions humaines dans le val de Loire depuis le 19^{ème} siècle. Il s'agit d'une approche géographique au sens large du terme puisqu'elle fait appel, outre aux sciences de la Terre (géomorphologie, hydrologie, géologie...), également aux sciences sociales (Histoire, sociologie, géographie humaine et rurale...). L'interdisciplinarité est l'essence même de ce travail de thèse afin de répondre le plus concrètement possible aux questions de fonctionnement et environnementales dans un milieu fluvial, humanisé et protégé.
- Les protocoles d'analyses hydro-géomorphologiques, topographiques, sédimentaires et archivistiques sont adaptés aux problématiques de recherche.

DEUXIEME PARTIE

RYTHMES D'EVOLUTION DE LA LOIRE DES ILES A DIFFERENTES ECHELLES SPATIALES ET TEMPORELLES

Chapitre 3 - Les formes fluviales et leur évolution depuis 150 ans - Caractérisation, typologies et diachronie à échelle moyenne

- A. «L'état de référence géomorphologique» entre le Bec d'Allier et Gien
- B. Analyse du réajustement fluvial depuis 1850
- C. Les modèles d'évolution des formes fluviales

Chapitre 4 - Evaluation des budgets sédimentaires des différentes unités fluviales à grande échelle

- A. Etude pluri-décennale : de 1970 à aujourd'hui
- B. Suivi de la dynamique sédimentaire entre la Charité-sur-Loire et Tracy-sur-Loire (Site Atelier 3)

Chapitre 5 - Le rôle des événements hydrologiques dans les processus d'érosion – sédimentation – analyse à grande échelle

- A. Suivi des rythmes de sédimentation en fonction de différentes conditions hydrologiques : 2002 - 2005
- B. Variabilité inter-annuelle des rythmes de sédimentation des îles entre 2002 et 2005
- C. La variabilité spatio-temporelle des processus sédimentaires dans les bras secondaires entre 2002 et 2005

Cette approche se focalise sur les différents rythmes d'évolution depuis l'échelle de la Loire des îles jusqu'à l'unité fluviale. Dans un premier temps, l'approche moyenne sert à caractériser le lit fluvial actuel dominé par les îles en s'appuyant sur les données morphométriques, sédimentologiques et biogéographiques des formes fluviales. L'analyse diachronique de la Loire des îles, à travers essentiellement les sites de la Réserve Naturelle Nationale et du Bec d'Allier, apporte la dimension dynamique au lit ligérien en s'appuyant sur l'évolution et les rythmes de formation des unités fonctionnelles. Dans un second temps, l'approche à grande échelle s'intéresse aux mécanismes hydro-sédimentaires qui régissent l'évolution de ces diverses unités fonctionnelles : les rythmes de sédimentation et d'érosion sur les îles et dans les bras secondaires depuis 2002, les effets de diverses conditions hydrologiques sur les processus sédimentaires.

Chapitre 3- Caractérisation, typologies et diachronie à échelle moyenne

A « L'état de référence géomorphologique » entre le Bec d'Allier et Gien : 2002

Partons donc de l'état du lit en 2002, qui correspond à l'année de début de la thèse, mais aussi année la plus récente parmi les images aériennes disponibles et, qui est de ce fait l'année de référence pour l'analyse diachronique. Quel est l'état hydro-géomorphologique et biogéographique du lit étudié en 2002 ? Comment se caractérisent les différentes unités fonctionnelles de la Loire des îles ?

1). Typologie morphologique des formes fluviales : îles fluviales et francs-bords

a). Typologie géomorphologique des îles

Le système en anastomose inclut donc les unités « îles ». Elles présentent, en apparence uniquement, des caractéristiques communes : berges bien définies, végétation pérenne, omniprésence dans le paysage fluvial. Mais, notre analyse révèle une grande diversité de ces unités fonctionnelles du système anastomosé, autant dans leurs caractéristiques

physiques que dans leur mode de formation et d'évolution. C'est ce que nous démontrons dans cette première approche.

- La notion d'insularité

Il convient tout d'abord de s'interroger sur la notion d'insularité dans l'étude du lit de la Loire. Nous considérons, pour notre méthodologie, comme île, **toute forme fluviale pourvue d'une végétation pérenne, quelque soit la strate végétale, délimitée par des berges sur tout son pourtour et séparée des rives par la bande active**. Cette définition correspond à celle d'Osterkamp (1998). La bande active est par définition régie par le régime des débits. Elle connaît donc des fluctuations de niveaux, lesquelles mettront à l'air libre les parties topographiques les plus hautes. Des îles pourront alors se retrouver séparées par un simple filet d'eau ou même par un chenal entièrement à sec. Mais l'île reste dans le « monde » des îles tant que ce chenal n'a pas atteint un niveau de végétalisation et de sédimentation tel qu'il n'appartient plus à la bande active (Figure 63).

Au regard du régime hydrologique de la Loire, les îles ne sont pas toutes identiques. En effet, les îles sont par définition censées être entourées d'eau, séparées soit par un chenal principal et un chenal secondaire, soit par deux chenaux secondaires. Or, comme nous l'avons déjà déterminé, le régime hydrologique de la Loire est si contrasté qu'il ne permet pas le fonctionnement de certains bras secondaires durant la période des basses eaux, celle centrée sur les étés. Par conséquent, des îles connaissent une insularité totale durant les hautes eaux du fait de la mise en activité des deux bras latéraux, alors qu'elles perdent leur insularité par assèchement saisonnier d'un des deux bras adjacents, rendant possible leur accès à pied (Figure 64). D'autres îles en revanche conservent à l'année leur insularité, ne rendant possible leur accès que par embarcation. Cette caractéristique fonctionnelle révèle donc l'inégale insularité des îles. Les différences de submersion altèrent également le degré d'insularité avec les différences topographiques, relatives à leur âge, d'une île à l'autre. Des îles sont entièrement submergées, lors des hautes eaux et des crues, alors que d'autres, plus élevées, restent épargnées. Ou encore une même île peut être submergée seulement sur ses parties basses alors que sa partie sommitale échappe à la submersion. Le caractère paysager du fleuve va de pair avec son caractère fonctionnel : les rapports hydro-

géomorphologiques changent en fonction des fluctuations hydrologiques ; de même le paysage fluvial change suivant les variations de niveaux.

Il nous est donc apparu évident de travailler dans un premier temps sur les paramètres propres aux îles (longueur, largeur et hauteur). Ils déterminent en effet la place de l'île dans la dynamique fluviale : position et place dans le lit fluvial, forme générale de l'île, position altitudinale par rapport à la bande active.

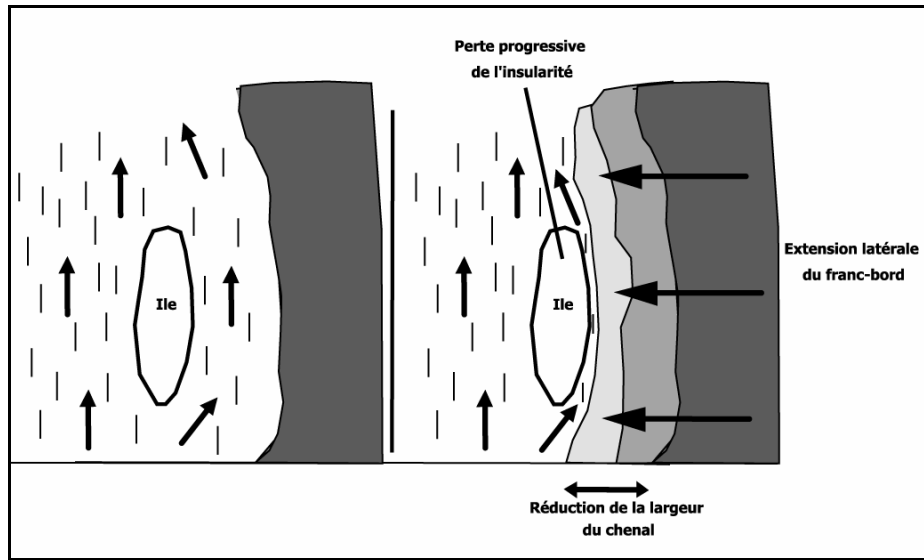


Figure 63 – Perte progressive du degré d'insularité de cette île. Par extension latérale du franc-bord et comblement des connexions du chenal secondaire.

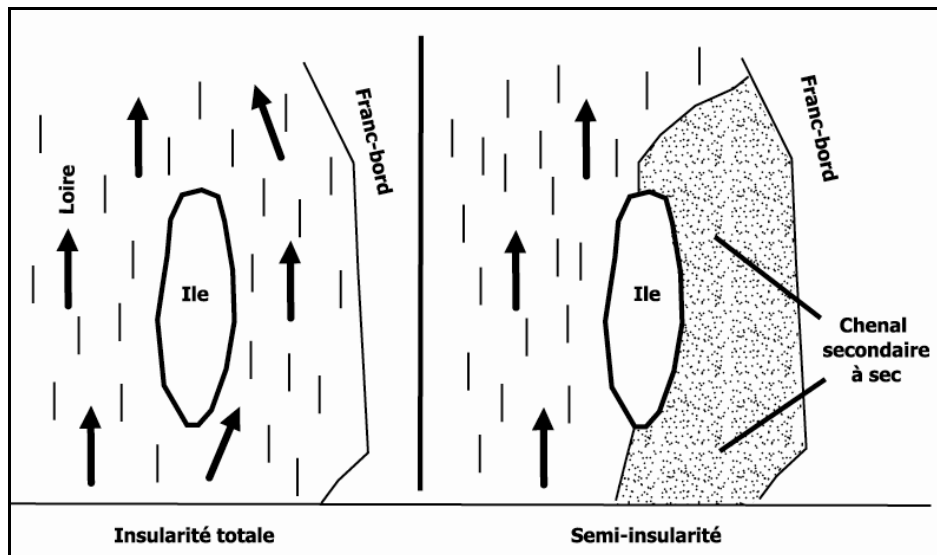


Figure 64 – Une même île, selon la période de l'année, peut perdre son degré d'insularité en fonction du niveau de submersion du bras secondaire qui la sépare de la rive. Nous nous sommes penchés aussi sur le degré d'insularité des îles en évaluant le nombre de jours durant lesquels elles n'étaient plus bordées d'eau, au moins d'une rive. Cette

démarche n'a pu se faire que par observation sur le terrain durant la période de basses eaux, en été. Il en découle une cartographie du degré d'insularité des îles sur le secteur de la réserve naturelle (Figure 65).

Ces différences au sein des îles nous ont incités à proposer par la suite une classification des îles, jusqu'alors inexistante. Le degré d'insularité nous amène encore plus loin dans la recherche des mécanismes de fonctionnement des unités fonctionnelles. Cette notion d'insularité implique de s'intéresser aux bras secondaires, ces unités de transition entre les îles et les marges du fleuve. Ces derniers déterminent en effet, suivant leur degré de fonctionnalité hydrologique, le niveau d'insularité des îles. Nous développons donc cet aspect de la démonstration dans le cadre de l'approche fine.

Avant de mettre en œuvre une typologie de l'évolution des îles, il convient de déterminer une première classification fondée sur la morphologie même de ces formes. Nous nous sommes intéressés en premier lieu à leurs paramètres morphométriques et à leur taille pour établir cette classification.

- Relations morphométriques (rapport largeur/Longueur)

Nous nous sommes interrogés sur l'implication des paramètres morphométriques comme la longueur et la largeur dans la morphologie des îles. La relation Longueur-Largeur représente un paramètre pertinent en géomorphologie fluviale, car il permet d'établir un rapport entre la surface de la forme et sa géométrie (Figure 66). Les îles les plus longues sont-elles vraiment les plus larges ? Peut-on faire un lien entre la taille de la forme et sa géométrie ? Une île est-elle étirée ou plutôt large ? Existe-t-il des logiques dans la formation de ces îles ?

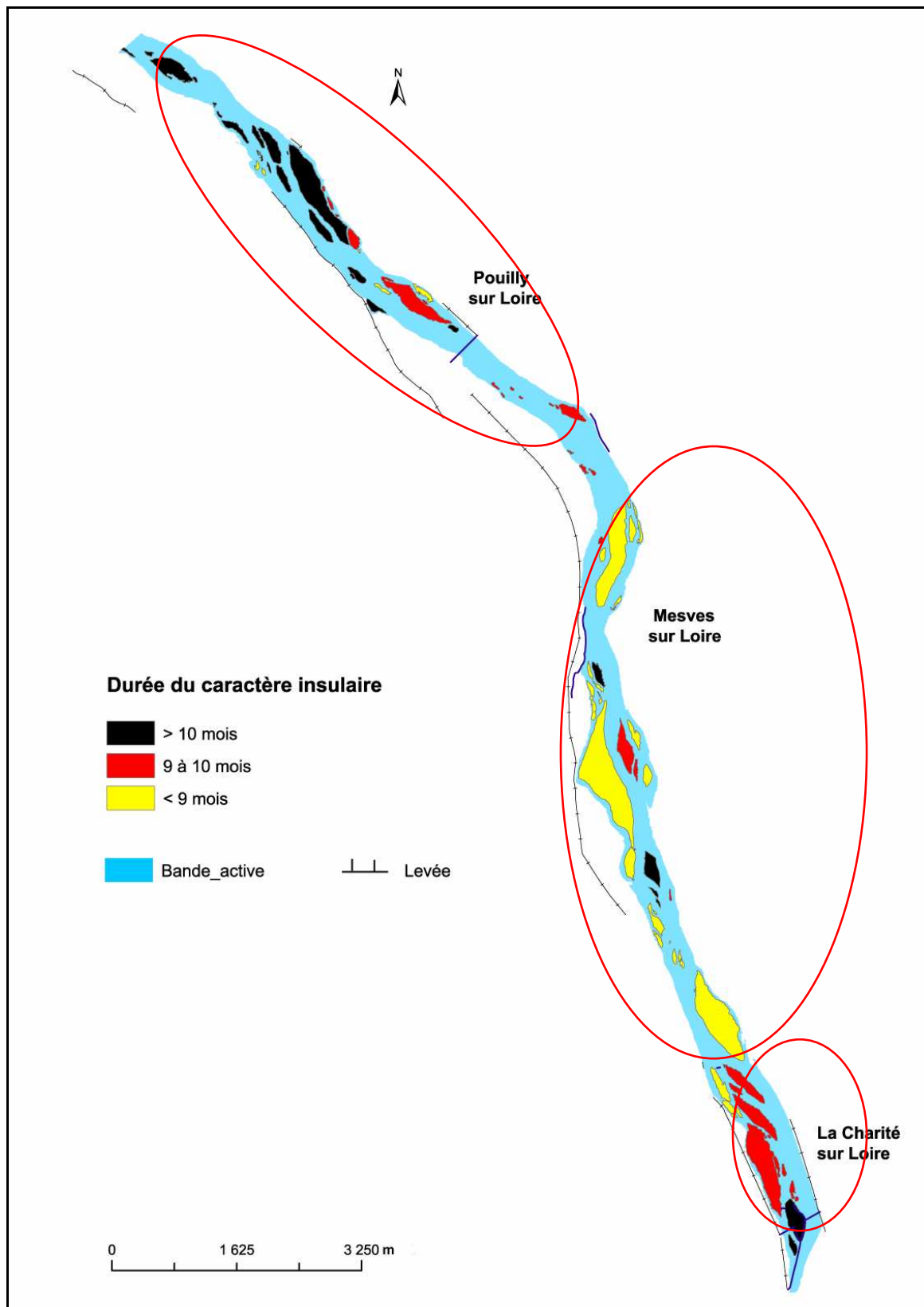


Figure 65 – Sectorisation du degré d’insularité des îles du Site Atelier 3.
 On observe trois grands ensembles homogènes dans la durée du caractère insulaire : le secteur de La Charité-sur-Loire marqué par un degré d’insularité moyen (9 à 10 mois de l’année), un grand secteur à semi-insularité marquée (insularité aux 2/3 de l’année) et celui des Loges montrant un meilleur dynamisme de la bande active secondaire (+ de 10 mois dans l’année).

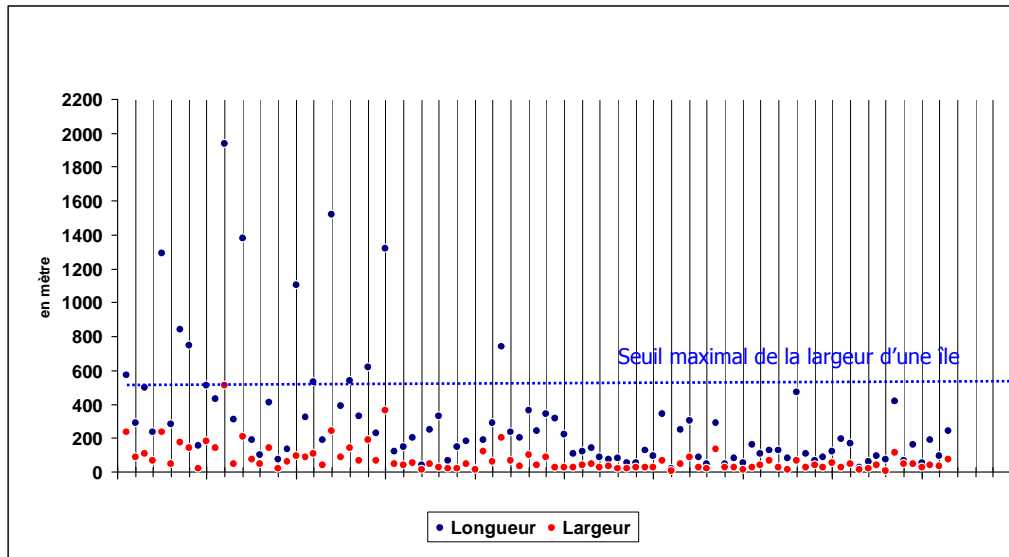


Figure 66 – Echantillons de près de 100 îles, du Site Atelier 3, de 1995 sur le rapport longueur-largeur.

Il existe un « plafond » morphométrique des îles : la largeur maximale est fixée à un peu moins de 600 m. Nous en déduisons que la dynamique fluviale influe forcément sur la morphologie des îles et tout particulièrement sur la largeur. Nous n'avons pas relevé de véritables seuils d'extension longitudinale des formes insulaires. Sur toute la Loire nous pouvons trouver des îles extrêmement longues comme l'île de Cosne (presque 4 km de long) et l'île de Chalonnnes beaucoup plus en aval en Maine-et-Loire (plus de 6 km). En revanche, les îles sont fortement contraintes dans leur extension latérale.

Il faut en déduire que la dynamique fluviale, à travers ses processus d'érosion, limitent fortement la progression latérale des îles : les berges sont sujettes à une érosion du chenal principal. La progression méridienne des îles se réalise quant à elle grâce au processus de sédimentation qui semble donc jouer dans le sens des écoulements amont-aval. Au vu de cette première analyse, nous en déduisons effectivement que les îles ne sont pas des formes entièrement stabilisées et qu'elles semblent être régies par les lois de la dynamique fluviale qui se charge de les sculpter. Cela doit être mis en relation avec la largeur de la bande active.

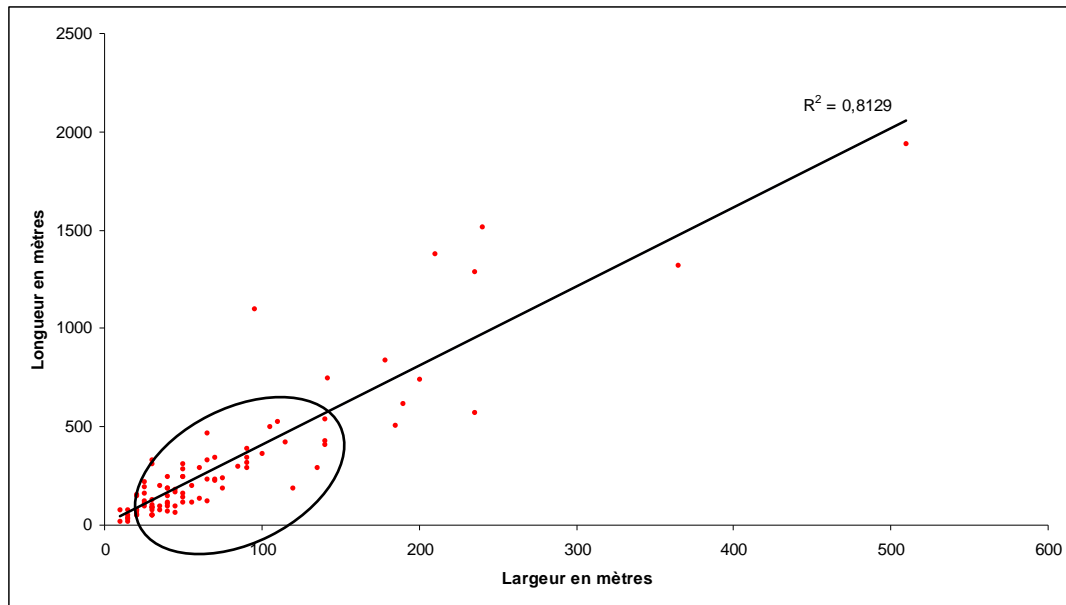


Figure 67 – Corrélation entre la longueur et la largeur des îles.
Jusqu'à 150 mètres de large environ cette corrélation est très forte.

En se penchant un petit peu plus sur les caractéristiques morphométriques, nous avons mis en relation le rapport Longueur-largeur (Figure 67) et avons découvert une certaine originalité de ces formes fluviales. La corrélation est en effet très forte entre la largeur et la longueur d'une même île. Nous constatons que **la longueur correspond en moyenne à 4 fois la largeur** : ce rapport correspond à une géométrie de type lenticulaire. Ceci est d'abord vrai pour les îles dont la largeur est inférieure à 150 m. Au-delà de ce seuil morphologique de 150 m de large, le rapport évolue et signifie que les îles sont de plus en plus de formes allongées et s'affinent à mesure que l'on s'éloigne de ce seuil. La géométrie des îles est bien sûr différente suivant ce rapport Longueur/largeur mais **la forme lenticulaire reste la forme typique des îles**.

A partir de 40 transects statistiques dressés dans le Site Atelier 3, nous avons pu montrer le lien entre la largeur des îles et la largeur du lit fluvial (Figure 68). En moyenne, la largeur d'une île représente 25 % de la largeur du lit fluvial. Cette part oscille exactement entre 8 et 60 % du lit fluvial pour les îles les plus larges.

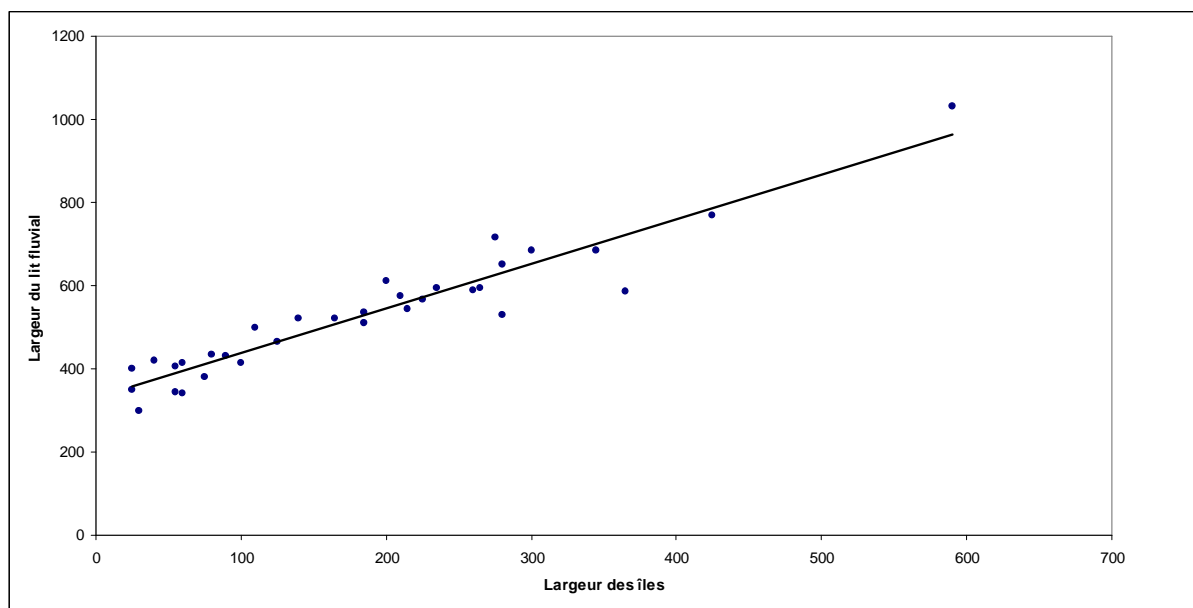


Figure 68 – Corrélation entre la largeur des îles et la largeur du lit fluvial.

- Classification géomorphologique : le choix de la dimension surfacique

La taille des îles, et par conséquent leur surface sont très variées; aussi la distinction par ce critère surface paraît le plus simple et le plus approprié. Au fil de notre analyse, nous nous sommes rendus en effet à l'évidence que le choix de la taille était judicieux puisque les modèles d'évolution, la dynamique végétale et la répartition de la charge sédimentaire sont très liés à cette variable morphométrique, ce que nous démontrons plus loin.

Notre classification s'adapte ainsi à tous les secteurs à îles de la Loire. A partir d'un échantillonnage d'îles analysées sur 150 ans (plus de 200 formes insulaires), nous avons pu dresser une typologie morphologique des îles. En mettant en relation la surface, la longueur et la largeur nous avons pu obtenir une intéressante classification des formes insulaires, ce qui n'avait pas encore été réalisé en géomorphologie fluviale (Figure 69). Cette classification permet également d'avoir une certaine cohérence dans notre démonstration puisque nous nous basons beaucoup sur le type d'îles pour appuyer nos résultats (Figures 70 et 71). Cette typologie fonctionne bien sur la Loire et devrait être validée sur d'autres corridors fluviaux du type 2² de la classification des systèmes anastomosés selon Nanson et Knighton (1996). Sur le fleuve Léna par exemple, cette classification géomorphologique est tout à fait adaptable puisqu'elle ne met pas en avant le

² cours d'eau en anabranches à charge sableuse et îles

type de couvert végétal (Gautier et Costard, 2000). Donc suivant le contexte hydro-climatique, cette classification pourrait s'adapter aux autres types déterminés dans la classification de Nanson et Knighton (1996). Cet aspect ouvre la voie à d'autres perspectives de recherche à l'issue de la thèse.

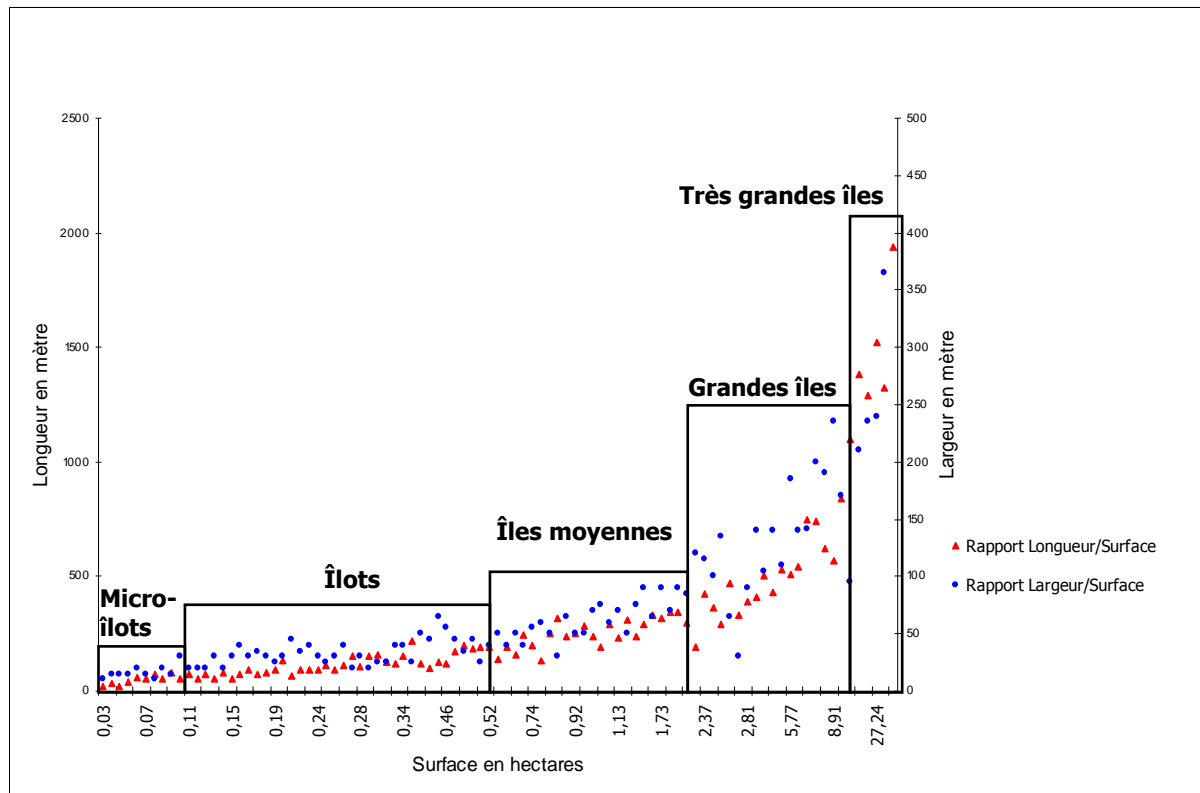


Figure 69 – Classification des formes insulaires de la Loire moyenne à partir de variables morphométriques clés.

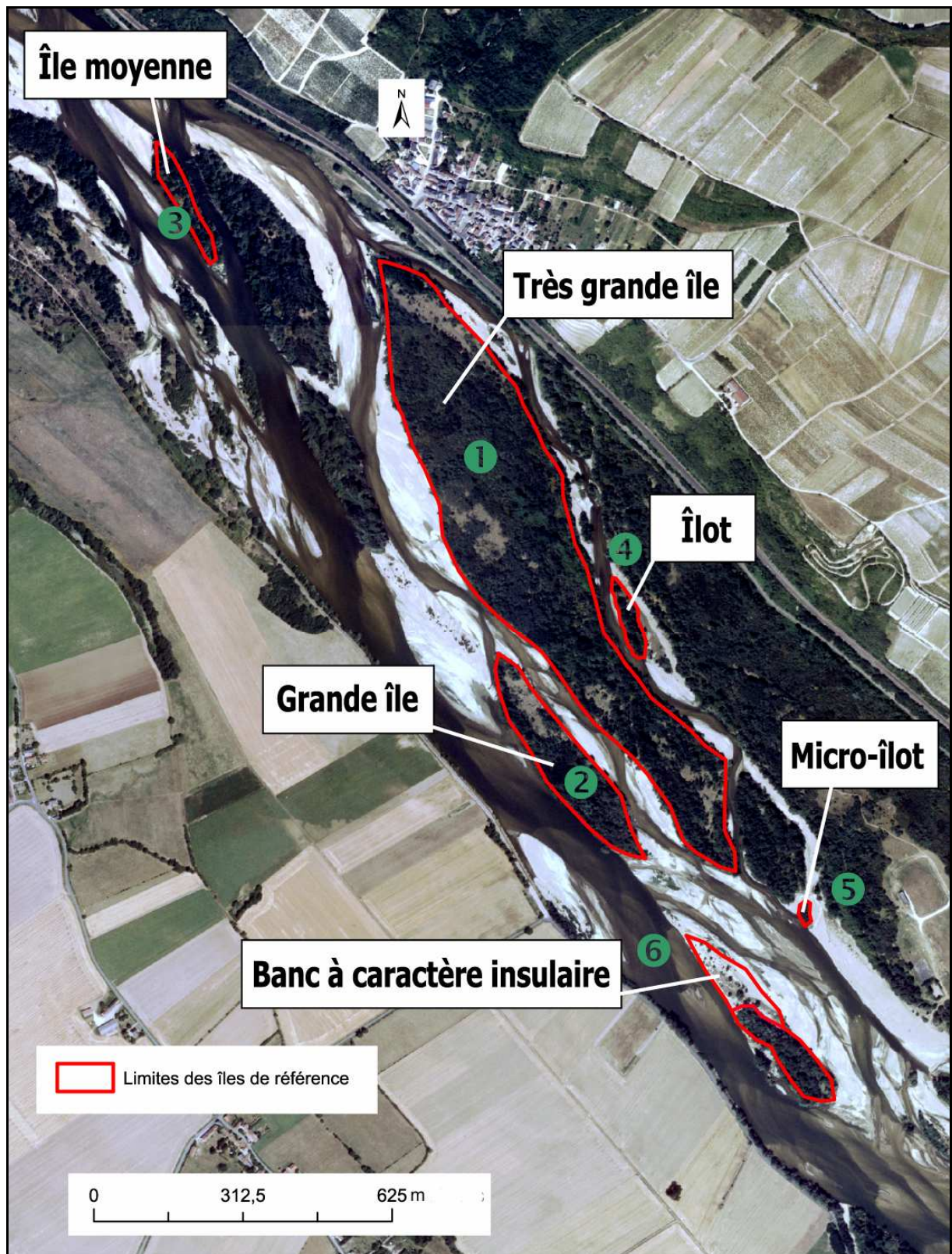


Figure 70 – Identification de la typologie morphologique des îles de la Loire.

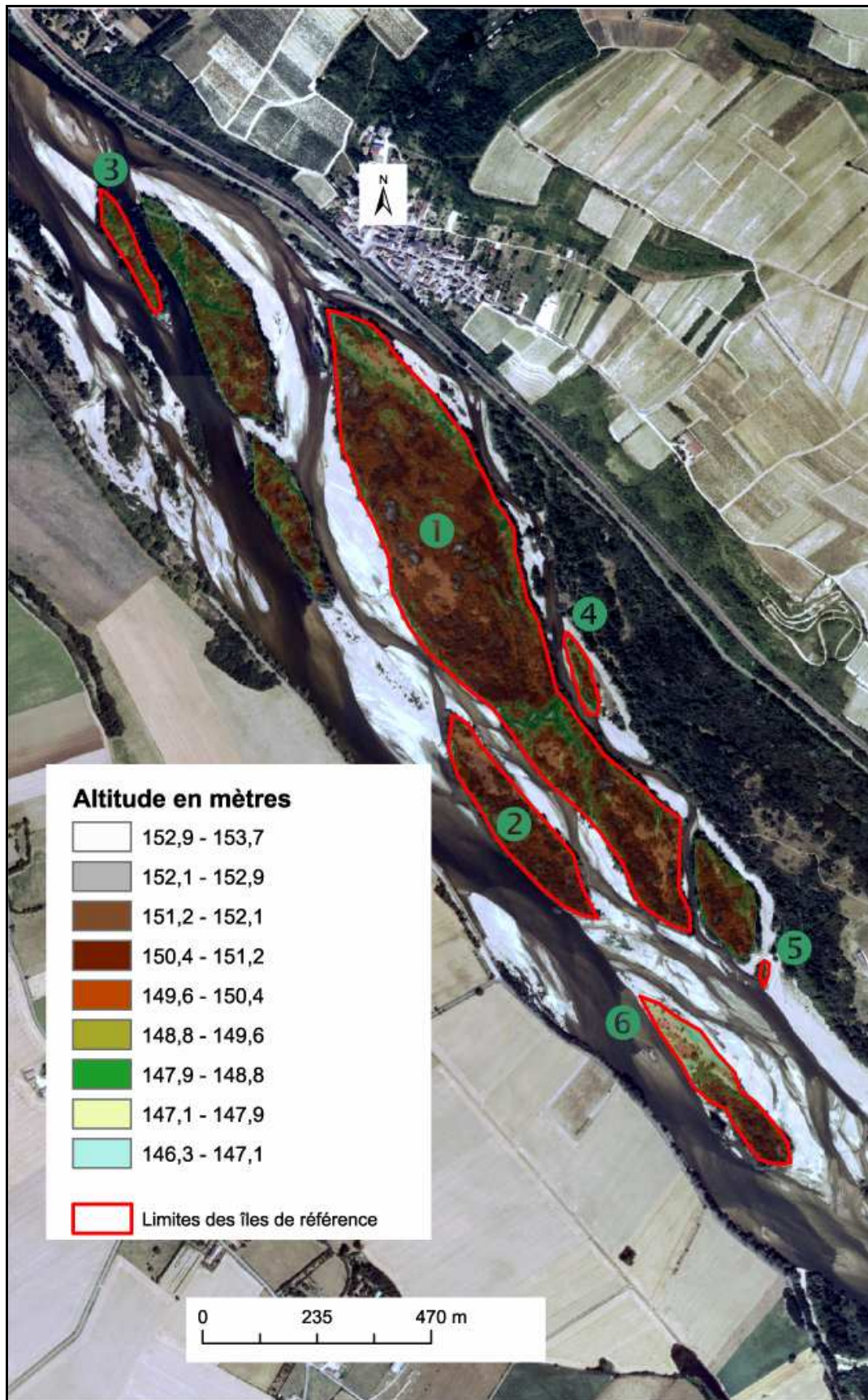
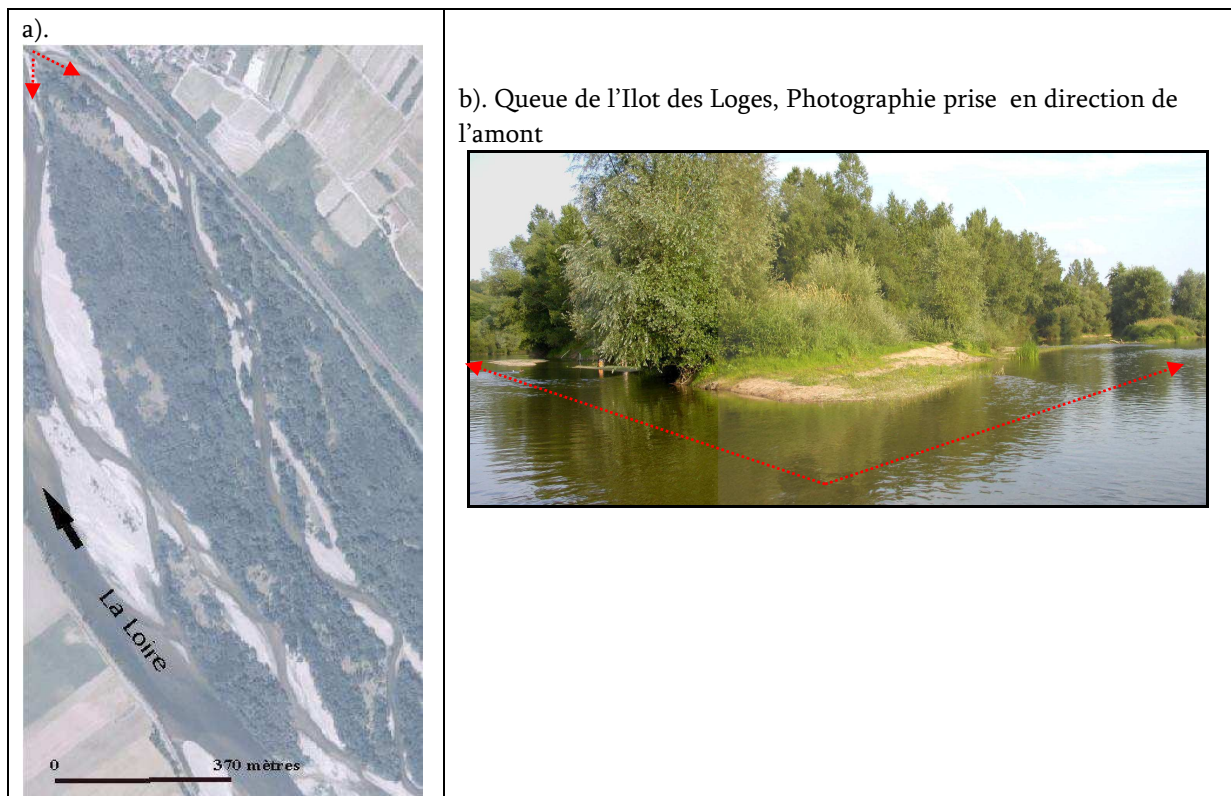


Figure 71 – Construction d'un Modèle Numérique de Terrain (M.N.T.) à partir des données X, Y et Z du LIDAR de la DIREN Centre. Nous retrouvons les classes de la typologie des îles et leur particularité topographique.

Six classes ont été ainsi définies :

- ❶ **Les très grandes îles** (Photographie 6 et figure 72), d'une surface supérieure à 10 ha ($\geq 100\,000\text{ m}^2$). Ce type morphologique correspond aux îles les plus longues et les plus impressionnantes visuellement dans le paysage fluvial. Il s'agit le plus souvent des îles portant un nom (Ile du Lac, Ilot des Barreaux, Ilots des Loges, Ile de Cosnes) ; ce qui indique une certaine ancienneté des îles dans le corridor fluvial. C'est ce que nous essayons de comprendre et de justifier dans notre approche moyenne.



Photographies 6 – Contrairement à la toponymie cartographique actuelle, « l'îlot des Loges » n'est pas un îlot mais une très grande île (a.). Elle s'impose dans le paysage fluvial de par sa longueur (plus de 2 km) et sa couverture arborescente très dense (b.).

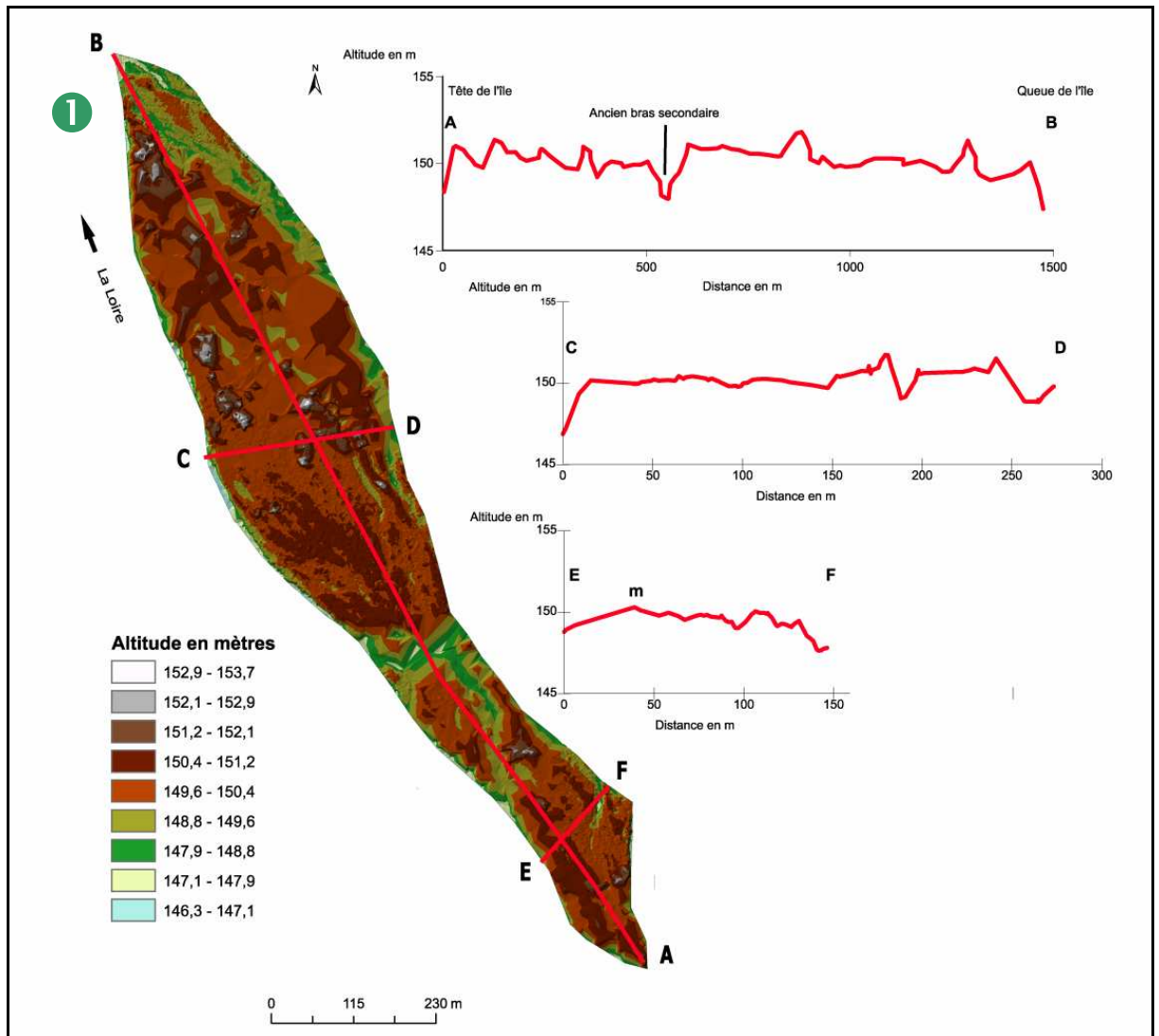
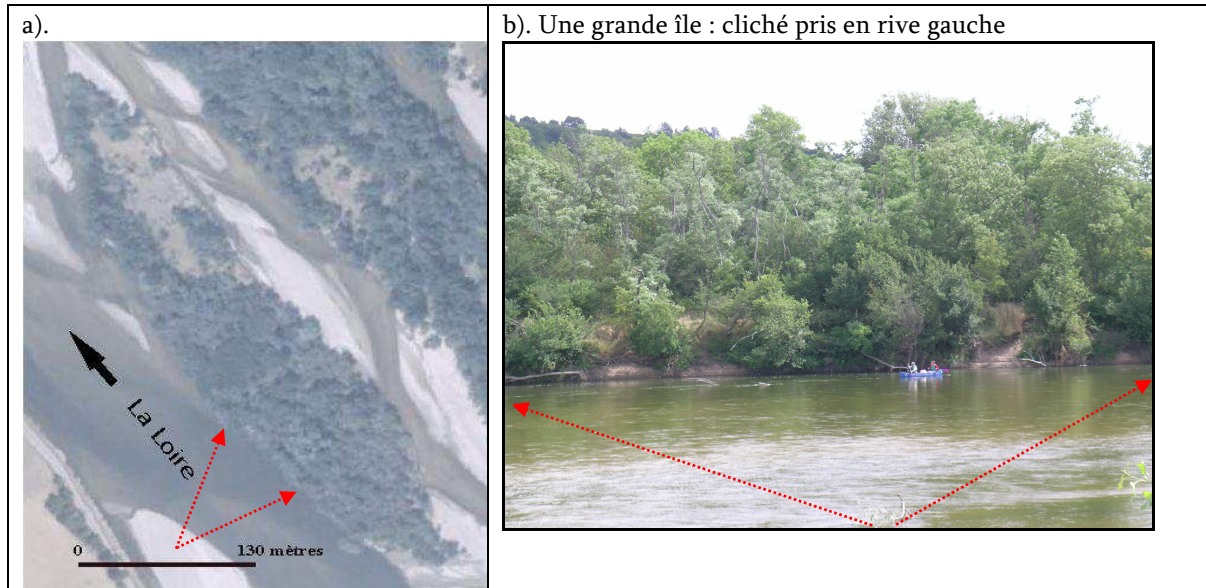


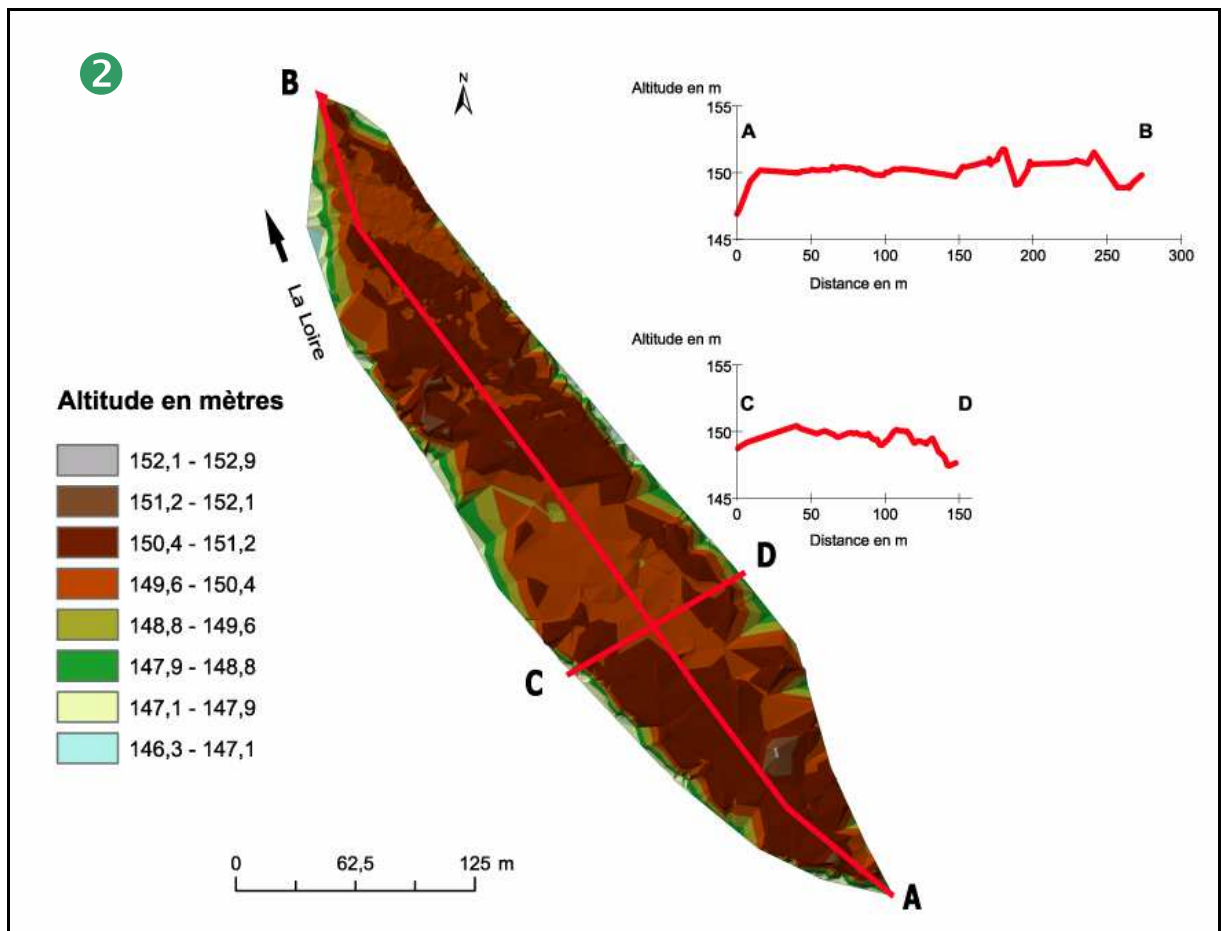
Figure 72 – M.N.T. d'une très grande île (Ile des Loges en aval de Pouilly). Cette très grande île laisse apparaître une partie de son historique à savoir sa formation issue de plusieurs îles.

- ② **Les grandes îles** (Photographie 7 et figure 73) d'une surface comprise entre 2 et 10 hectares ($20\ 000\ m^2 \leq x < 100\ 000\ m^2$). C'est parmi ce type d'île que l'on trouve la plus grande diversité de micro-formes et de couverture végétale. On y trouve des bras morts, des anciens bourrelets de berges, des sommités centrales, des dépressions, des dépôts récents et anciens. Bref, toute une variété de niveaux topographiques s'est développée dans ces grandes îles, tout comme dans les très grandes îles d'ailleurs. Cette variété indique déjà des types d'évolution diversifiés, et certainement complexes, de ces formes insulaires. Les îles semblent donc effectivement de bons traceurs géomorphologiques de processus hydro-

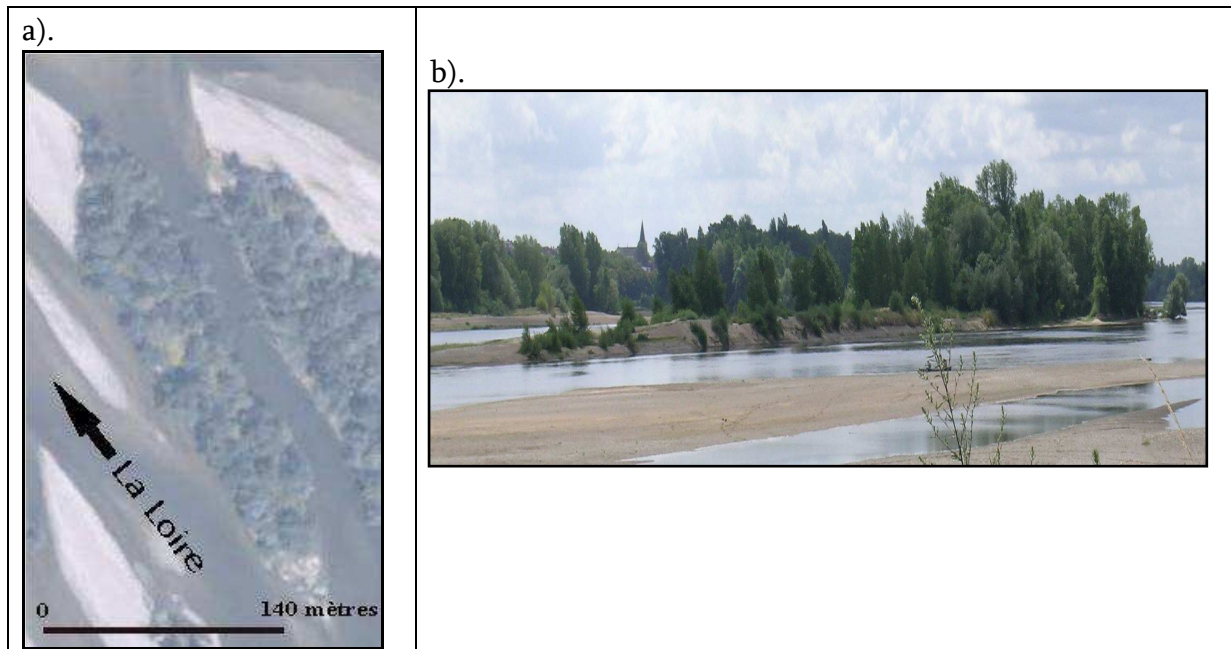
dynamiques anciens et actuels. Cette hypothèse sera développée et étudiée dans les approches à moyenne et grande échelle.



Photographie 7– Une grande d’île demeure moins imposante, à l’échelle du corridor fluvial, qu’une très grande île (a.). Mais, à l’échelle humaine la forêt alluviale y est bien installée tout en laissant la place à d’autres cortèges floristiques (b.).



- ③ *Les îles moyennes* (Photographie 8 et figure 74), de 0,5 à 2 ha ($5\,000\text{ m}^2 \leq x < 20\,000\text{ m}^2$). Cette catégorie correspond en effet à la taille moyenne des îles de la Loire moyenne. Elles sont omniprésentes dans le paysage fluvial. Elles subissent la dynamique fluviale qui se charge alors soit de les éroder fortement, soit de les agrandir par sédimentation. Elles ont un rôle important en effet dans le stockage sédimentaire du fait de leur taille moyenne et de leur faible perchement. De plus elles tendent à poursuivre leur évolution et passer aux niveaux supérieurs de la typologie insulaire.



Photographie 8 – Ces îles moyennes semblent avoir une couverture végétale homogène (a.) tout en constituant des zones de piégeages importantes dans l'hydrosystème (b.)

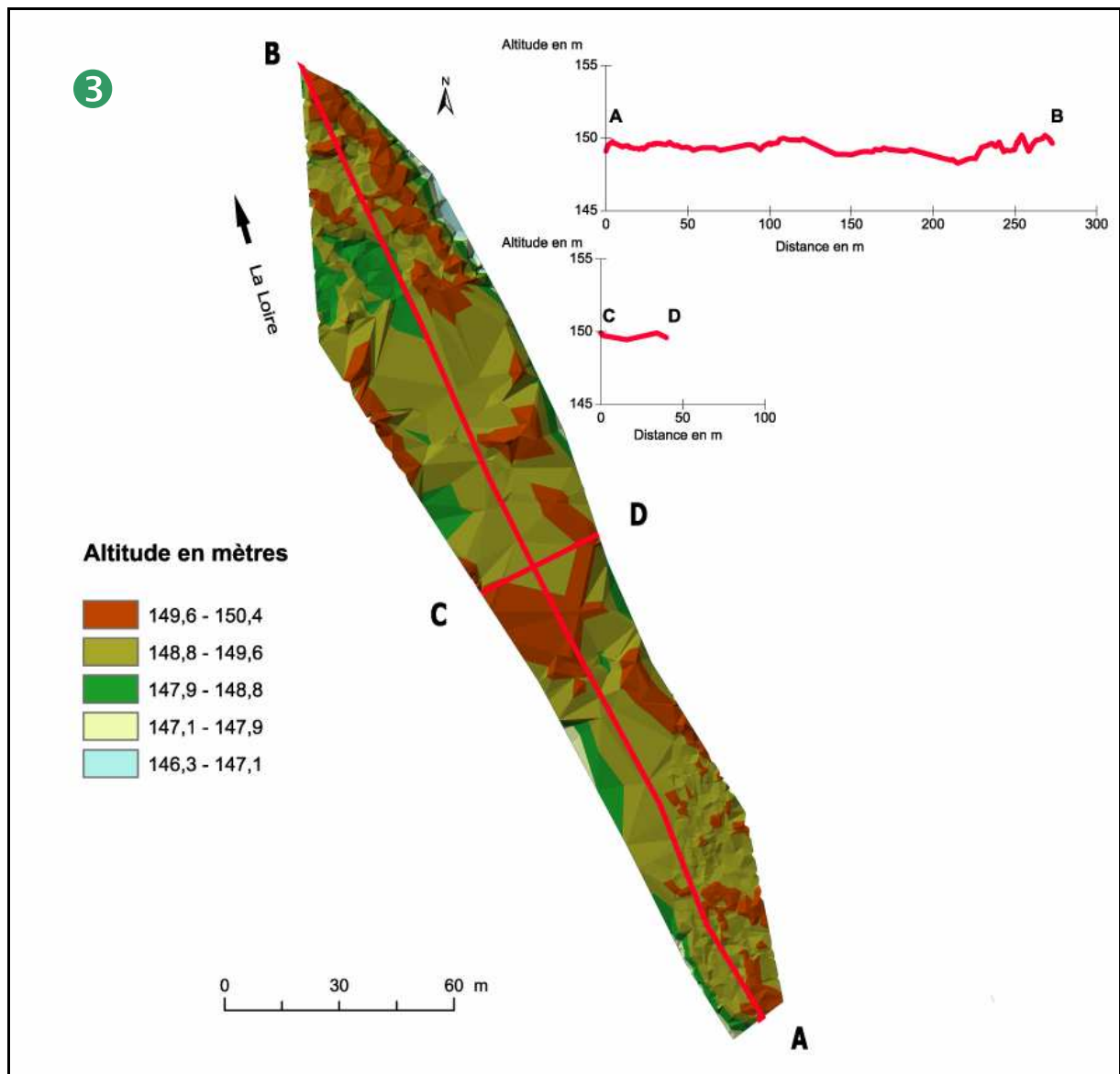
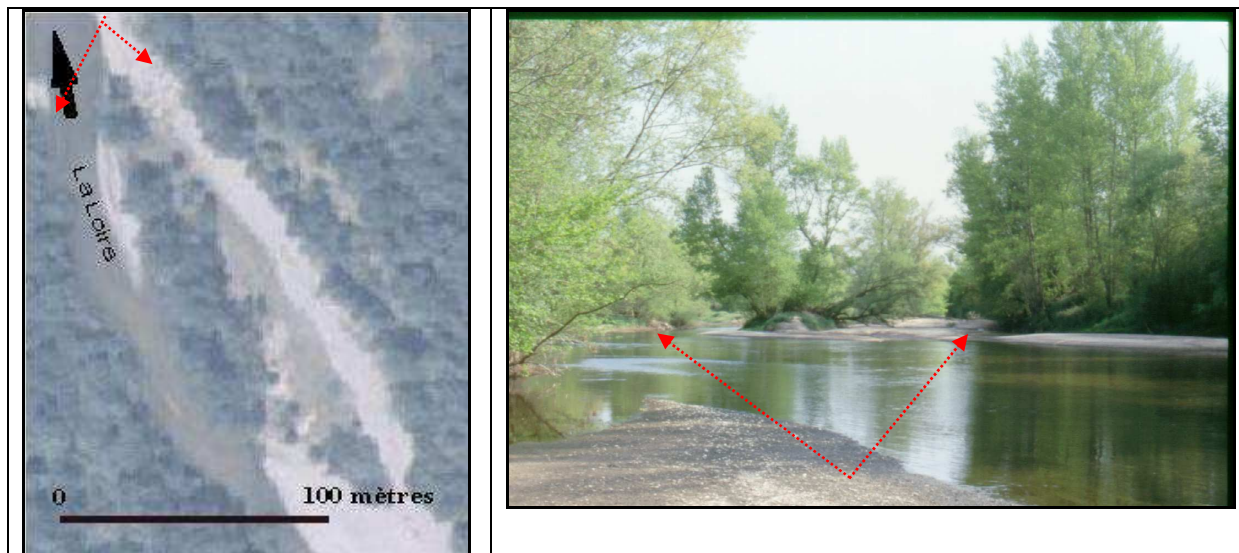


Figure 74 – M.N.T. d'une île moyenne.

- **④ Les îlots** (Photographie 9 et figure 75), de 0,1 à 0,5 ha. ($1\ 000\ m^2 \leq x < 5\ 000\ m^2$). Il s'agit de la classe la plus nombreuse qui symbolise la colonisation rapide des formes fluviales par la végétation croissante de ces dernières années. Lorsque Y. Babonaux (1970) parlait d'omniprésence des îles dans le lit, il s'agissait en grande partie de ce type d'îles. Elles correspondent en effet à un stade intermédiaire essentiel dans le monde des îles : ce sont ces îles qui doivent poursuivre leur évolution et tendre vers les classes supérieures et tout normalement la classe « île moyenne ».

a).

b). Au centre, un îlot type situé dans un bras secondaire



Photographie 9 – Un îlot est peu élevé par rapport au niveau d'étiage et participe ainsi au piégeage des sédiments circulant dans ce bras secondaire.

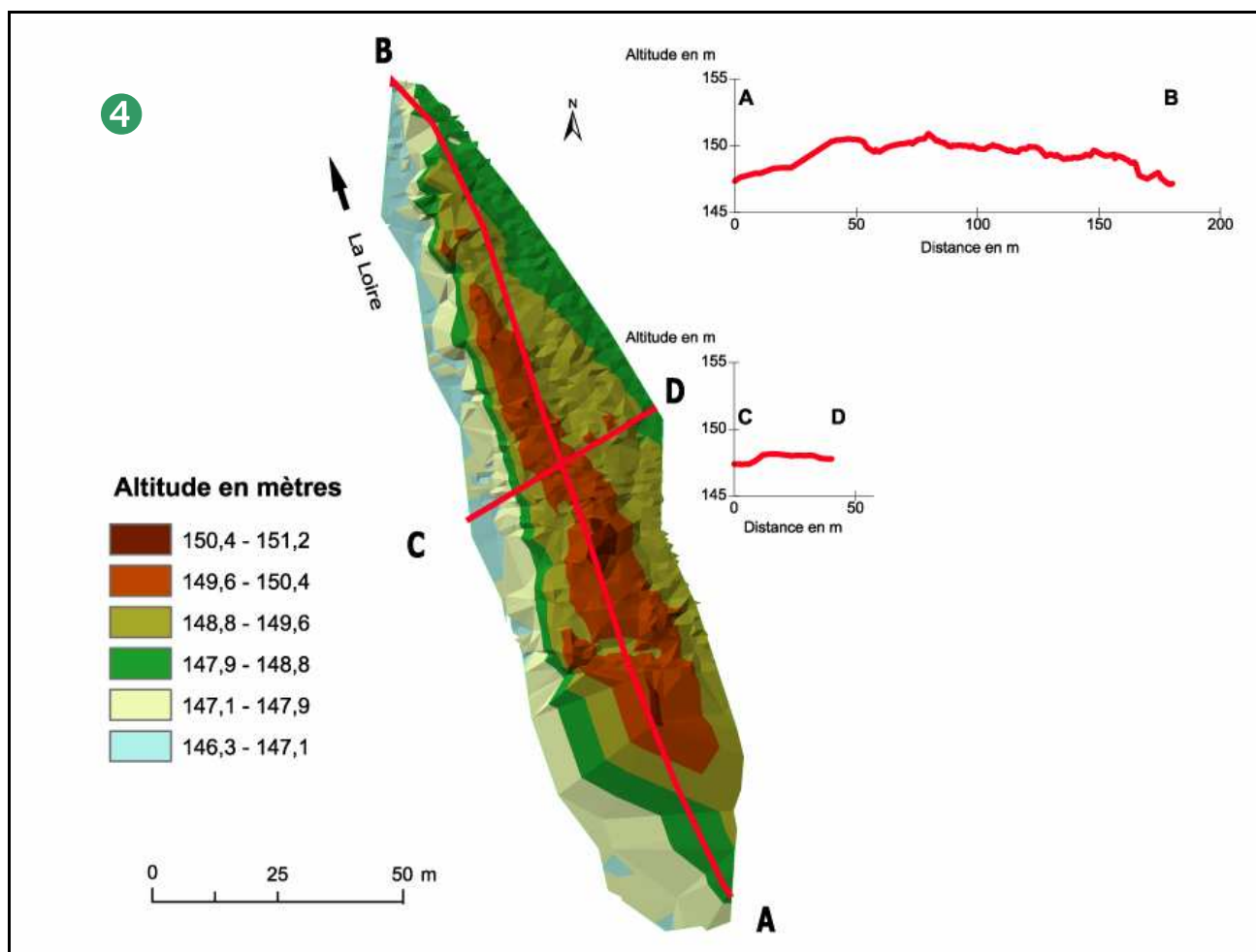
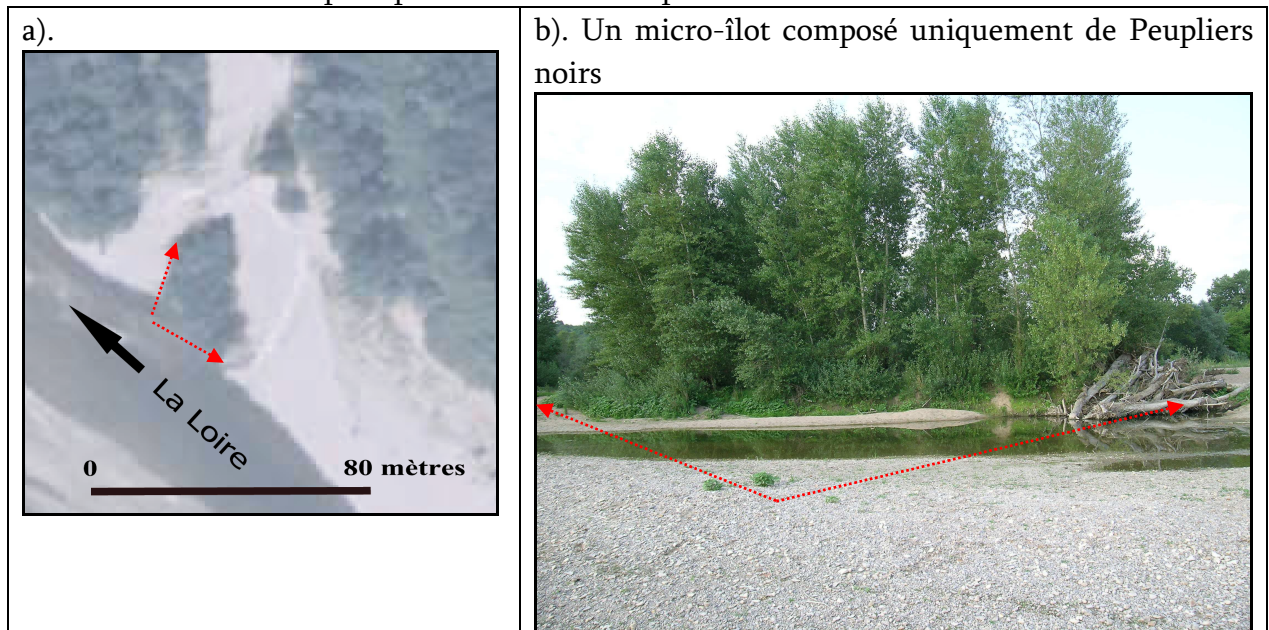


Figure 75 – M.N.T. d'un îlot.

- **5** *Les micro-îlots* (Photographie 10 et figure 76), inférieurs à 0,1 ha. ($x < 1\,000\text{ m}^2$).

Il s'agit du premier stade de formation d'une île. Leur évolution dépend en grande partie de leur degré de végétalisation. Un micro-îlot peut soit disparaître si le niveau de végétation n'est pas très avancé, soit s'étendre, lorsque la formation arborée stabilise le substrat insulaire pour passer aux classes supérieures.



Photographie 10 – Un micro-îlot peut séparer deux connexions amont d'un bras secondaire (a.). Sur ces micro-îlots, la formation arborée est assez dominée par le Peuplier (b.).

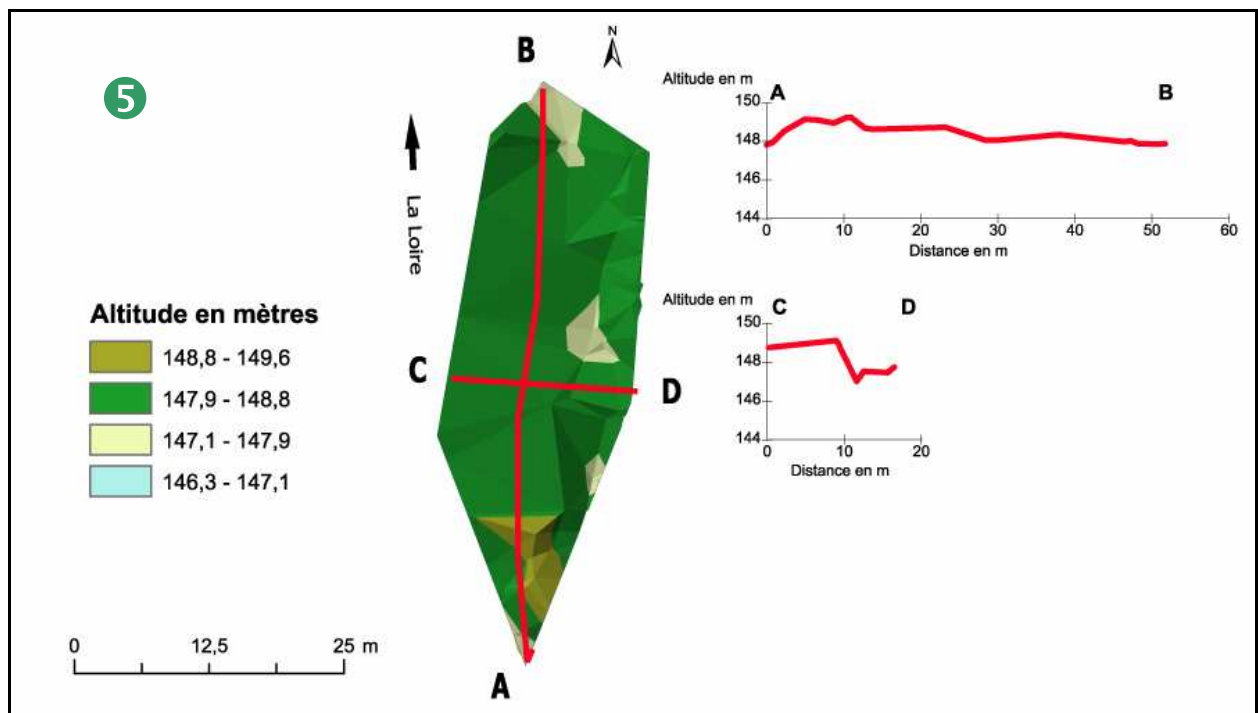
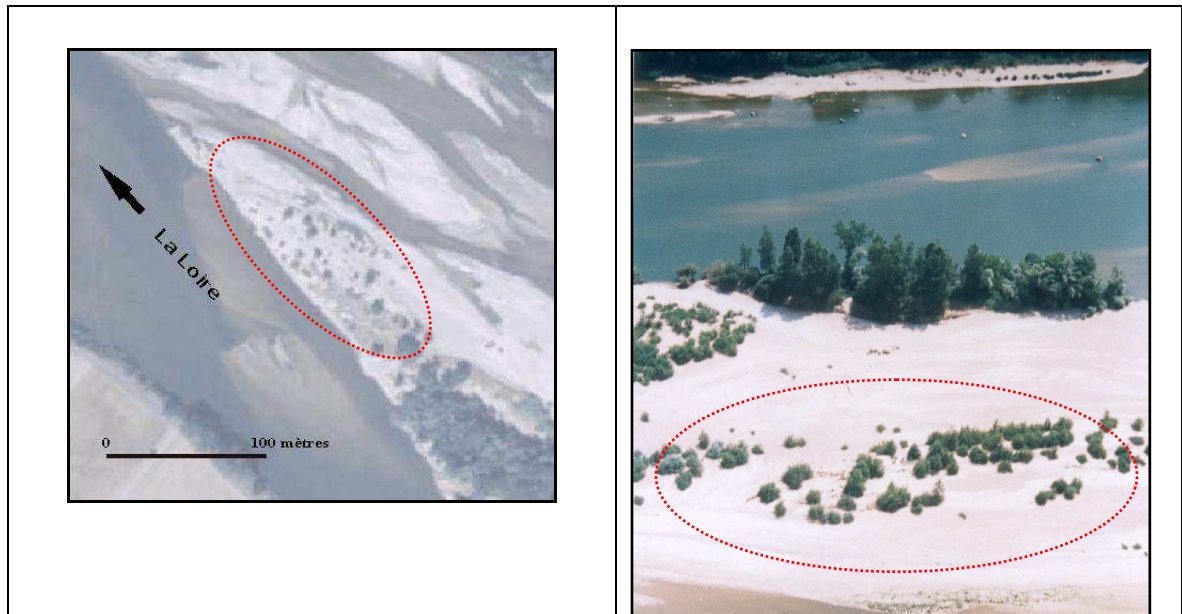


Figure 76 – M.N.T. d'un micro-îlot.

- **⑥** *Les bancs végétalisés à caractère insulaire* (Photographie 11 et figure 77)

Cette classe a été déterminée lorsque l'identification sous SIG était délicate. Le niveau de végétation n'est pas encore suffisamment continu et pérenne pour classer ces bancs parmi

la classe micro-ilôts. Mais le contexte de formation de ces bancs, entouré de la bande active correspond à une tendance à la formation d'îlots. Notre analyse rigoureuse sous SIG nous a fait choisir cette classe par commodité et pour éviter de négliger ces bancs qui illustrent la première phase de développement d'une île. Ces bancs à caractère insulaire n'appartiennent plus tout à fait à la bande active mais n'ont pas encore atteint le niveau de maturité d'une unité insulaire. Cette classe a été récemment justifiée et validée par T. Dupret (2006) pour son travail, basé sur notre protocole méthodologique, sur les îles des méandres de Guilly (amont d'Orléans).



Photographie 11 – Ces bancs végétalisés peuvent être qualifiés de futurs micro-îlots car ils sont délimités par la bande active (a et b) et entrent véritablement dans un processus « d'insularisation ». Ces verdiaux de Peuplier et de Saule, s'ils ne sont pas repris par la dynamique fluviale, tendent à former un micro-îlot homogène (b).

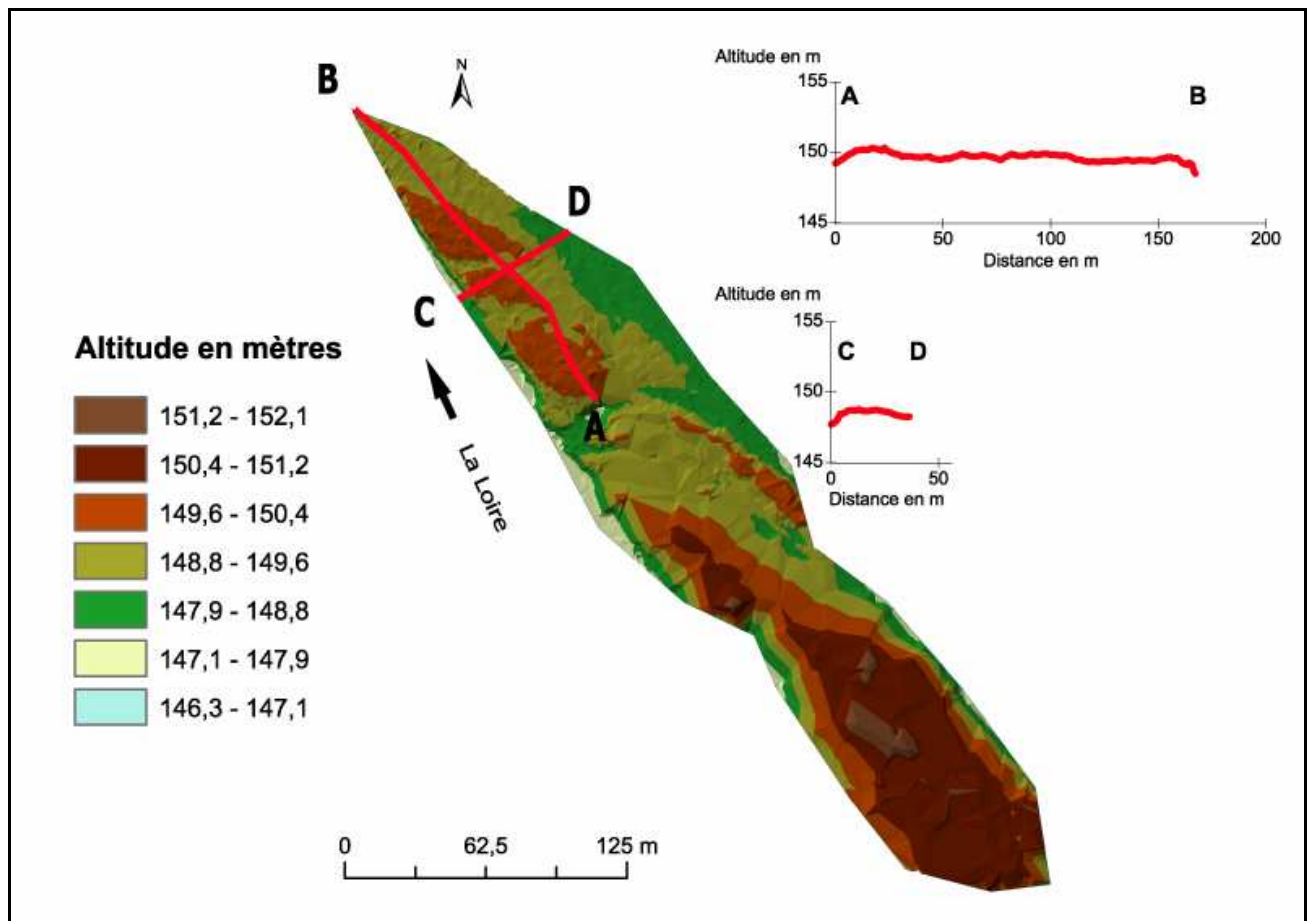


Figure 77 – M.N.T. d'un banc à caractère insulaire.

Cette typologie était essentielle afin de fixer une terminologie simple et claire pour ne plus confondre îlot avec îles. Les jalons ainsi fixés sont repris tout le long de cette recherche. La typologie permet également de se baser sur un référentiel adéquat afin, entre autre, de rattacher des événements hydrologiques à chaque type d'île, de corrélérer des processus hydro-sédimentaires en fonction de chaque type, ou encore mettre en relation la végétation et l'état de l'île.

- La modélisation topographique de la typologie

A l'aide du MNT-Laser, nous nous sommes interrogés sur la relation entre chaque type d'îles et les caractéristiques topographiques. Depuis la vue en plan du SIG et grâce aux données altimétriques du MNT, nous avons pu dégager des indices géomorphologiques de leur formation : présence d'anciens bras, parties sommitales bien définies. Nous avons ainsi développé un exemple d'application du MNT –Laser en géomorphologie fluviale et tout particulièrement sur les îles. Ces nouvelles données

montrent bien que les îles ne se construisent pas forcément en une seule fois mais qu'elles sont bien dépendantes des processus hydro-sédimentaires du fleuve. Le développement de l'analyse spatiale sur 150 ans nous permet d'éclaircir ce premier constat et d'apporter des preuves quantifiées des rythmes de formation et d'évolution de ces unités fonctionnelles. Nous avons ainsi sélectionné une île pour chaque type d'île et affiné notre classification morphologique.

Il apparaît que les îles sont marquées par une hétérogénéité topographique, bien visible sur le terrain, correspondant à un ensemble de dépressions, berges, sommets, bras morts et bancs de sédimentation. La régularité n'existe pas dans ces formes insulaires à cause certainement de la végétation pionnière (arbustive puis arborée) qui piège les sédiments de manière différente. C'est en fonction de la disposition de cette végétation que la morphologie de l'île se sculpte. Il reste donc difficile d'établir une typologie des îles simplement sur leur topographie : celle-ci est trop divergente d'une île à l'autre. C'est pour quoi nous sommes plutôt intéressés à leur logique de répartition spatiale, à leur durée de submersion, à leur dynamique dans le lit et à leur modèle d'évolution.

Nous pensons que nous pouvons trouver tous les indices géomorphologiques de formation de ces îles et en déduire les modèles d'évolution qui régissent ce type de forme fluviale. Les parties les plus hautes sont les parties les anciennes, les dépressions marquent la présence d'anciens bras colmatés, les bras morts, encore bien présents, attestent d'un récent comblement. Bref, l'approche par MNT Laser apporte sa contribution sur les modes de fonctionnement de cette Loire des îles, ce que l'approche à moyenne échelle nous permet d'entrevoir.

b). Répartition spatiale des îles

- Répartition spatiale des îles

Nous nous sommes demandé s'il existait une logique de répartition spatiale au sein du lit des différents types d'îles ainsi définis. Grâce au logiciel d'analyse spatiale, cette question peut être résolue rapidement. La cartographie du site atelier SA3, celui de la réserve naturelle, montre parfaitement cette répartition (Figure 78). Nous nous sommes appuyés pour cela sur l'emprise de chaque île dans la largeur du lit. Sa position exacte a été calculée

sous Arc Gis afin de déterminer son niveau d'occupation dans cette largeur. Si l'île est par exemple à plus de 50 % de sa largeur dans une première moitié du lit alors l'île est en position latérale. Par contre, dès lors que la part de l'île empiète sur les deux moitiés du lit, elle est en position médiane. Nous pouvons ainsi retenir essentiellement les points suivants :

- les îles occupent majoritairement une position très latérale dans le lit de la Loire.
- les îles centrales (sans tenir compte des îles urbanisées comme celle du Faubourg de la Charité) sont soit en zone de confluence (Bec d'Allier avec les îles de Marzy) soit à la sortie de plusieurs chenaux secondaires d'égales largeurs (sortie des Loges à Pouilly-sur-Loire avec l'île de Saint-Thibault). Cela correspond en fait à des apports hydro-sédimentaires assez égaux venant de chaque branche ou de chaque affluent, pour le cas des confluences. Les îles centrales semblent caractériser des secteurs fonctionnels où les chenaux sont d'égales profondeur et largeur, et toujours actifs.

- Y. Babonaux (1970) insistait sur les secteurs pourvus et dépourvus d'îles. Dans le Site Atelier 3 il apparaît effectivement une certaine alternance de grands secteurs à îles sur ces 20 km de corridor fluvial, comme le montre la carte de localisation (Figure 79). Ces secteurs à îles s'alternent ainsi régulièrement d'une rive à l'autre. Ce passage d'une rive à l'autre, nous laisse penser, que la bande active principale dicte l'alternance, à l'image du système des méandres, de zones de sédimentation active (secteurs des très grandes îles) et de zones d'érosion (secteurs constitués de formes insulaires inférieures à la classe des îles moyennes). Ces observations sont importantes, car nous les reprenons à la fois pour mettre en rapport ces secteurs fonctionnels avec l'évolution du chenal principal et de son talweg, et également pour établir une division en grands sites fonctionnels au sein même de la Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire.

- Ces grands secteurs à îles se localisent autour d'une très grande île. Ces très grandes îles sont le signe, d'après nos recherches et cela est justifié plus loin, d'une sédimentation active ancienne. **Elles se sont formées dans des zones de prédisposition au stockage sédimentaire.** Actuellement, une multitude d'îlots et de micro-îlots se localisent dans les

bras annexes à ces très grandes îles. Cela semble traduire une poursuite du stockage sédimentaire et de la végétalisation active de ces secteurs fonctionnels.

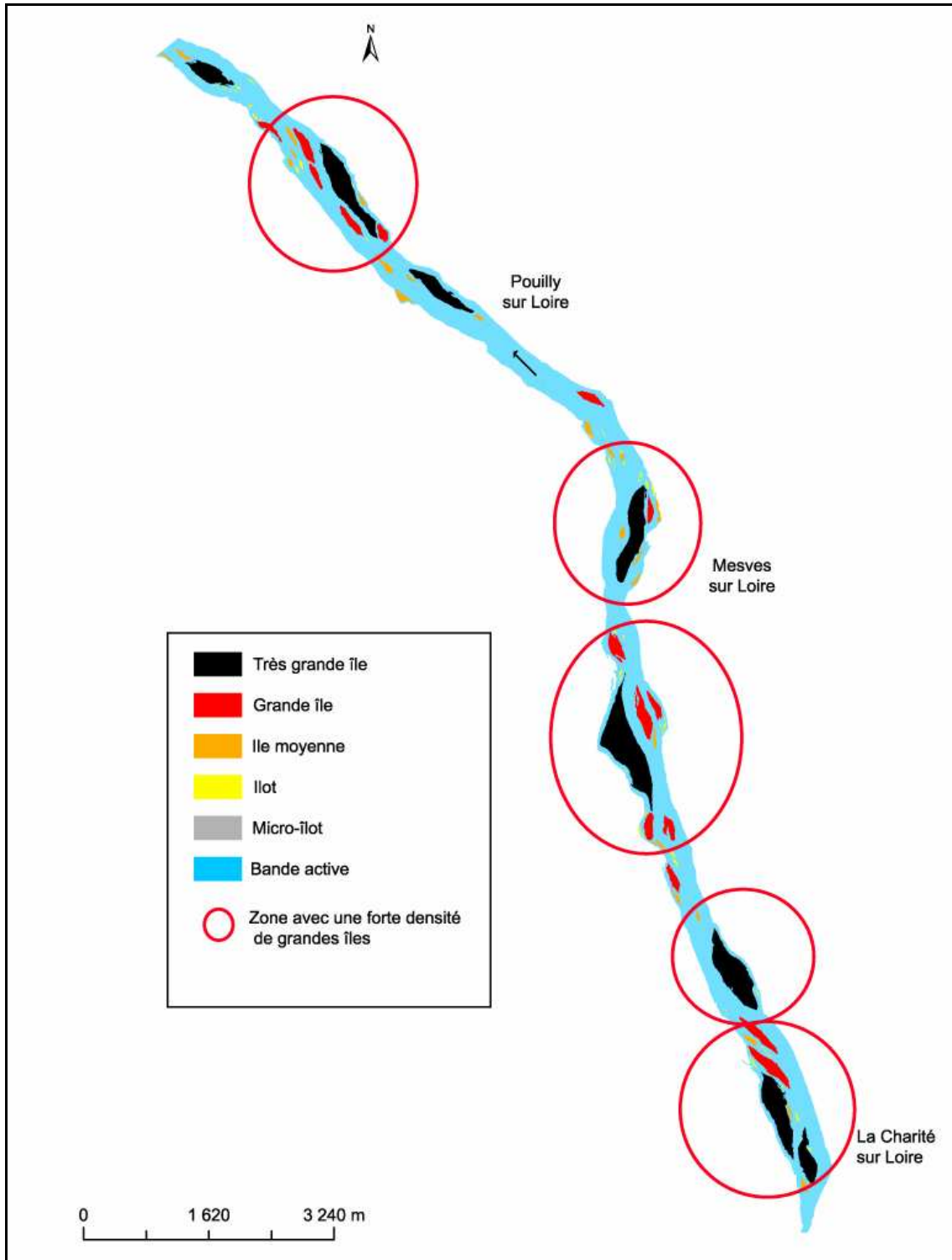


Figure 78 – Répartition spatiale des différents types d'îles en 2002.

On note l'existence de secteurs denses en formes insulaires autour d'une très grande île. Ces secteurs s'alternent d'une rive à l'autre. Entre ces grands secteurs, on trouve une forte représentation d'îlots et d'îles moyennes, semblant indiquer des tendances à la sédimentation et à la végétalisation.

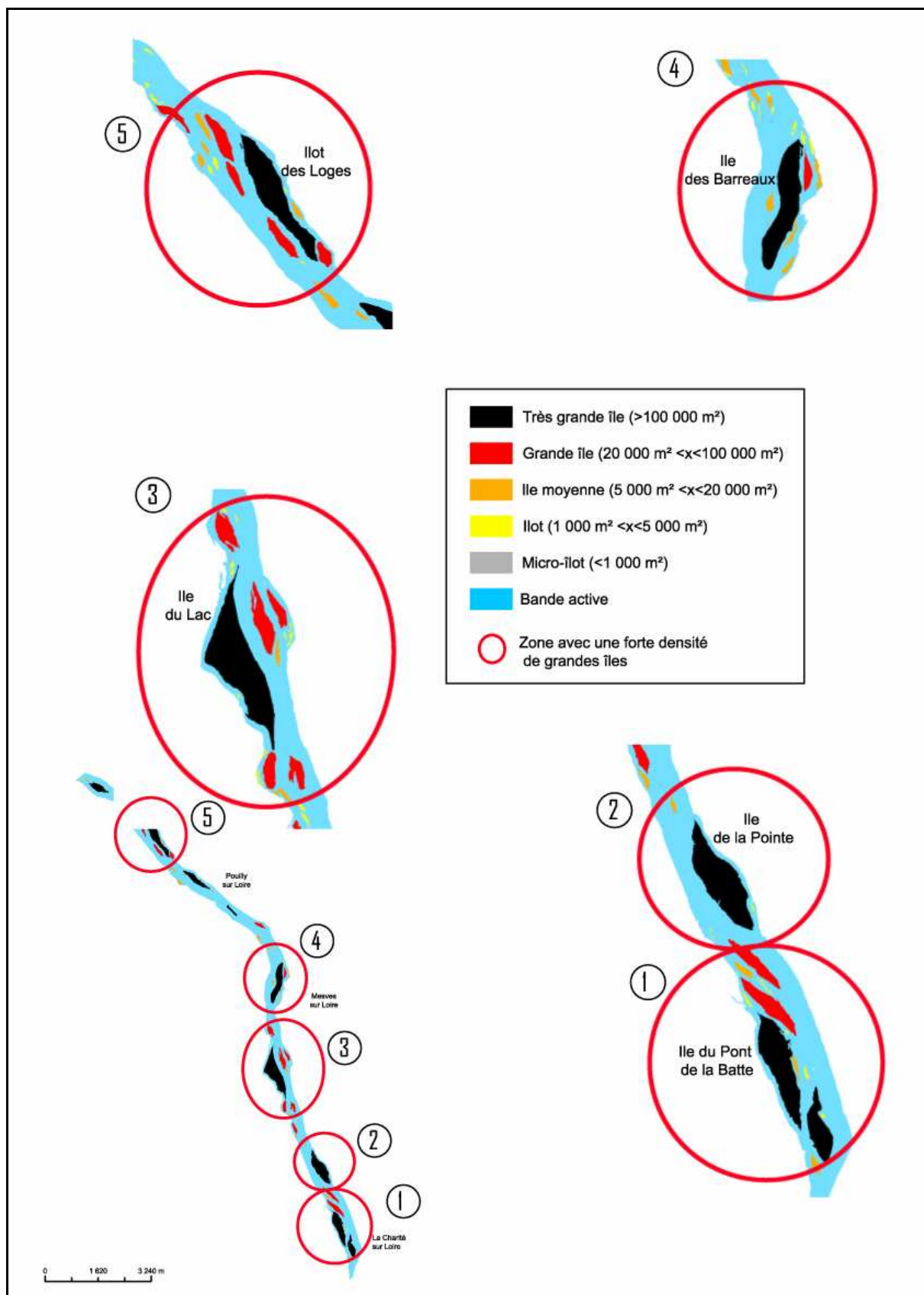


Figure 79 – Les grands secteurs à îles du Site Atelier 3.
 Une très grande île voit se greffer tout un semble d'îles, grandes et moyennes, à sa périphérie.

c). Étude et analyse des paramètres des francs-bords

Il est nécessaire de déterminer également une typologie géomorphologique de ces francs-bords dans la Loire des îles. Qu'est-ce qu'un franc-bord finalement ? Quelles sont sa place et son emprise dans le corridor fluvial ? Ce terme de franc-bord est comme on l'a déjà dit propre à l'hydrosystème Loire. Pourquoi finalement parle-t-on de franc-bord de la Loire et pas dans les autres systèmes anastomosés ?

- Les francs-bords se caractérisent avant tout par leur position marginale dans le lit fluvial. En effet, ces unités fonctionnelles sont des zones de transition entre la bande active et la plaine d'inondation. Ils sont situés au pied des coteaux de rive droite et des levées de rive gauche. Leurs paramètres morphologiques sont donc différents selon que l'on se situe en rive gauche ou en rive droite, et surtout de l'éloignement des levées et des coteaux par rapport au lit vif. Dans les sites ateliers 1, 2 et 3, les coteaux calcaires de rive droite sont majoritairement très proches de la Loire. C'est ce que nous avons déjà décrit dans la présentation de la plaine d'inondation en montrant la dissymétrie de cette plaine : la Loire ne peut s'épancher qu'en rive gauche. Aussi, les francs-bords demeurent des formes de transition d'un point de vue hydrologique (passage des écoulements exceptionnels) et géomorphologique (unité géomorphologique intermédiaire entre le lit vif et la plaine d'inondation).

- La longueur représente en moyenne 7 fois la largeur (Figure 80). Cependant, les francs-bords n'obéissent pas au même schéma de configuration et d'évolution que les îles, du fait essentiel de leur position latérale. Nous verrons plus bas que ce schéma d'extension est bien plus conquérant, au sens d'extension dans le lit, que celui des îles. Leur morphologie dépend grandement de ce schéma d'évolution. Ainsi, on ne peut pas dire que les francs-bords peuvent rentrer dans une typologie, comme celle des îles, en fonction de leurs paramètres morphométriques. Leur typologie se réalise mieux en fonction de leur mode d'évolution : extension par raccordement à une île et comblement de chenaux secondaires, extension par l'éloignement de la bande principale, réduction par reprise d'une activité érosive du chenal principal...

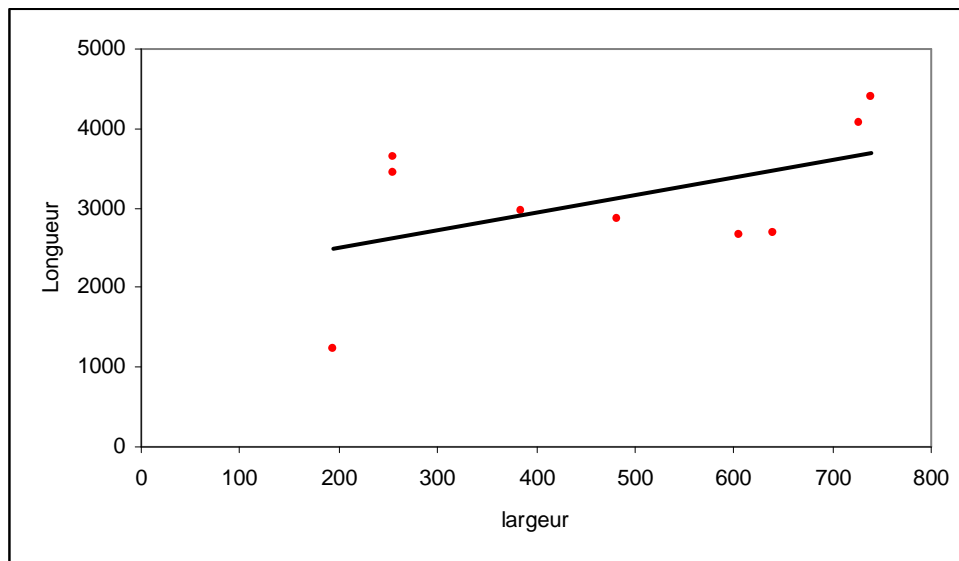


Figure 80 – Rapport Longueur-largeur des 9 francs-bords du Site Atelier 3, panel très représentatif de la Loire moyenne.

d). Typologie des annexes hydrauliques (zones humides)

Les zones humides constituent, à l'heure actuelle encore, des enjeux majeurs de gestion écologique et de préservation (Dupieux, 2004b ; Lewis N. et *al.*, 2004). L'impulsion du Programme National de Recherche sur les Zones Humides de la Loire moyenne (1998-2001) a montré l'importance du maintien de ces zones humides par le biais avant tout des sociétés humaines dans nos Sites Ateliers 1 et 2 de la Loire des îles. Ce constat ne se limite pas à ces secteurs et concerne toute la Loire moyenne en particulier. Rarement, les sociétés humaines ont été considérées comme un facteur de préservation et de maintien des zones humides. Pour la Loire, il apparaît différentes formes de zones humides ou annexes hydrauliques. Il convient d'en dresser une typologie et une cartographie dans notre Site Atelier 3. Ces annexes hydrauliques jouent un rôle essentiel non seulement d'un point de vue écologique (zones d'habitat, biodiversité très riche) mais aussi au niveau hydrologique. En s'intéressant à diverses conditions hydrologiques de 2002 à 2005, nous montrons le rôle de ces annexes hydrauliques au sein d'un système fluvial parcouru par diverses crues (annuelles et trentenales). Comment se comportent alors ces zones humides ? Quel est leur rôle dans l'hydrologie et les écoulements ?

Pour ce faire, nous distinguons dans un premier temps les zones humides situées au sein du 3^{ème} lit (lit entre levées) et celles localisées dans la plaine d'inondation (Figure 81). Ce

sont les conditions hydrologiques qui enclencheront le fonctionnement de ces diverses zones humides. Suivant le débit dans le lit vif et l'inondation de la plaine alluviale, ces zones n'auront pas le même rôle et le même fonctionnement hydrologique. Nous excluons donc de ces annexes hydrauliques les bras secondaires de la bande active qui conservent à l'année une hydrologie fonctionnelle.

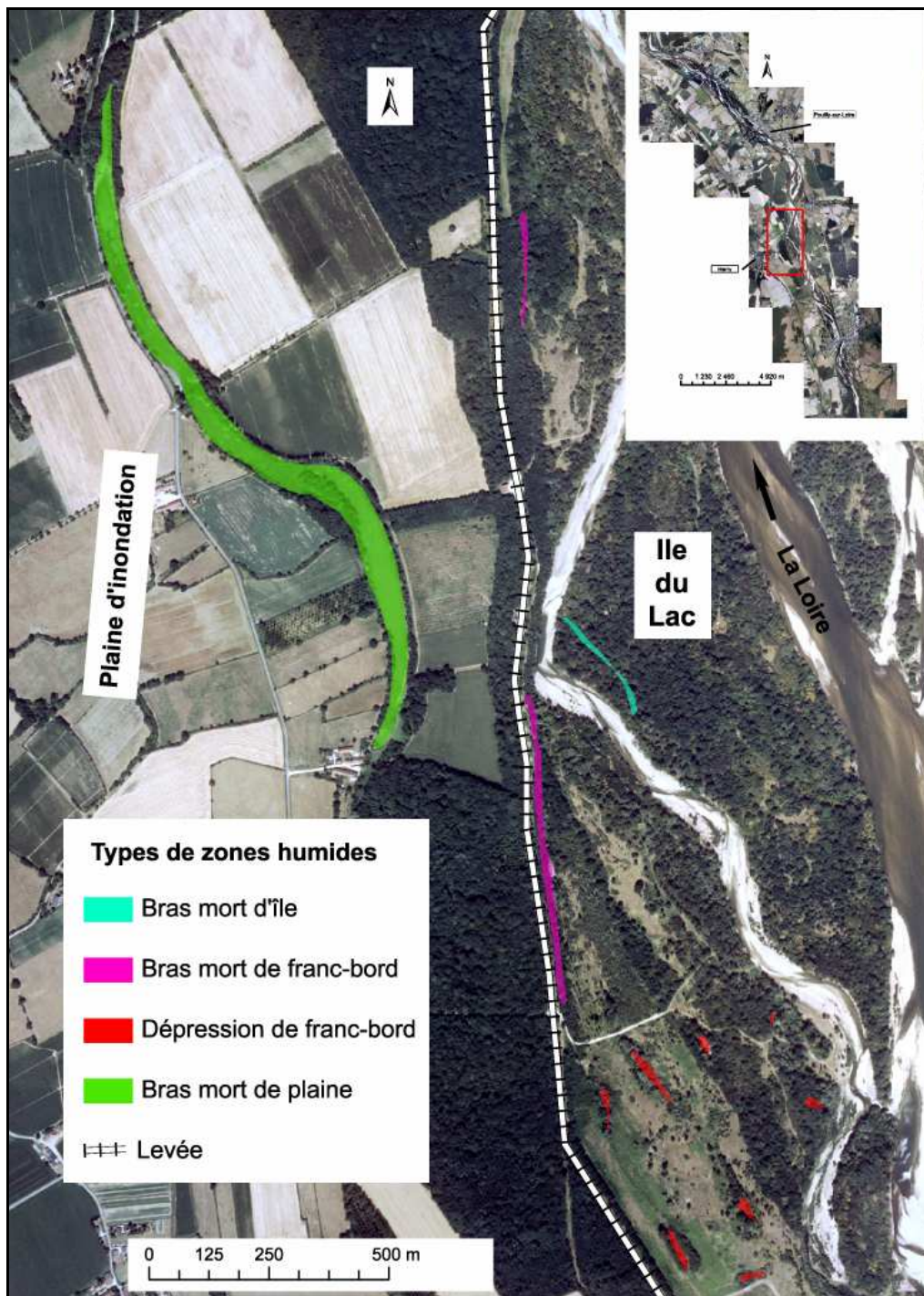


Figure 81 – Typologie des zones humides en Loire moyenne dans un secteur du Site Atelier 3.

- Les annexes intra-lit

- Des dépressions ou boires de francs-bords : ce sont les parties profondes d'un franc-bord alimentées l'essentiel de l'année par la nappe alluviale (Photographie 12). Dans le Site Atelier 3 ces zones humides sont réparties de façon aléatoire. Elles se situent en moyenne à plusieurs centaines de mètres de la bande active. Certaines de ces dépressions correspondent à d'anciens trous d'extractions locales de sable. D'autres sont les indices ponctuels d'anciens chenaux ou d'anciennes mouilles.

- Des bras morts de francs-bords (riots de francs-bords).

Ces annexes hydrauliques sont les parties linéaires les plus profondes d'un franc-bord (Photographie 13). Elles longent le plus souvent la levée de rive gauche. Elles retrouvent une fonctionnalité hydrologique importante dès la submersion des francs-bords. Elles restent ensuite alimentées par la nappe alluviale et sont donc dépendantes à la fois des débits de la Loire et du niveau de la nappe.

- Des dépressions ou boires d'îles.

On les trouve uniquement sur les îles et le plus souvent au pied d'anciens bourrelets de berges (Photographie 14). Elles ont été comblées progressivement par les sédiments au fil des submersions répétées du fleuve. Elles restent donc peu profondes.

- Des bras morts d'îles.

Ces annexes hydrauliques indiquent la présence d'un ancien chenal actif qui petit à petit s'est retrouvé à la fois comblé et végétalisé. Le fonctionnement demeure cependant actif à partir de crues annuelles (Photographie 15). Suivant l'âge de l'île, ces bras morts se reconnectent souvent car ils sont peu élevés par rapport au niveau d'étiage.

D'autres bras morts en revanche nécessitent des débits plus importants pour être reconnectés au chenal principal. Il s'agit alors de bras morts situés sur des îles anciennes et donc plus perchées par rapport à la bande active. Ils indiquent alors des stades plus avancés de végétalisation de l'île et de leur forme elle-même. Leur rôle demeure très important, car ils participent à la dispersion des flux liquides et solides au sein même du lit vif.



Photographie 12 – Une dépression à deux périodes hydrologiques différentes : les niveaux d'eau sont alors bien différents et attestent du niveau de la nappe.



Photographie 13 – Ce bras mort est très végétalisé mais conserve sa forme de chenal avec des berges bien définies et une certaine profondeur : lors des crues exceptionnelles cette morphologie lui permet de jouer son rôle d'évacuateur des flux liquides.



Photographie 14 – La nappe alluviale contribue à l'alimentation de ces petites dépressions situées au centre des îles.



Photographie 15 – Des bras morts situés au sein même d’île canalisent les écoulements de crue.

- Les annexes de la plaine d’inondation (Figure 82).

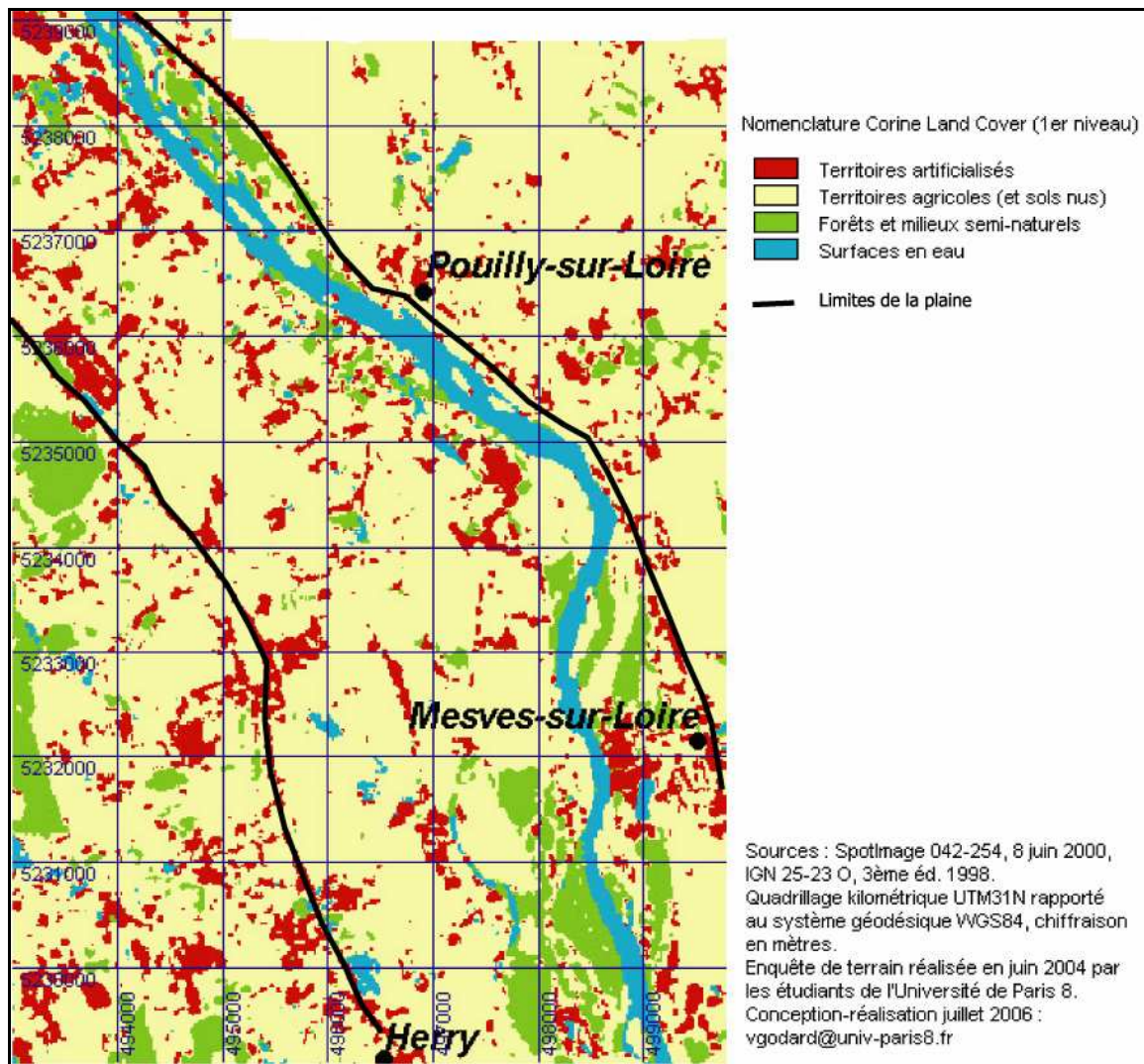


Figure 82 – Occupation du sol de la plaine d’inondation, à partir d’une Image SPOT et d’une enquête de terrain, en juin 2004, après la période de hautes eaux. Les zones humides apparaissent nettement en bleu dans la plaine alluviale.

- Des dépressions ou boires dans la plaine (Photographie 16).



Photographie 16 – Des dépressions parsèment la plaine d’inondation.

Elles sont pour la plupart rattachées à des domaines agricoles permettant l’alimentation des troupeaux ou encore servant de point d’adduction en eau aux systèmes d’irrigation des grandes cultures de la rive gauche.

Ces dépression sont à l’image de celles des francs-bords : assez profondes et alimentées par uniquement par la nappe alluviale. Elles sont liées à des activités humaines et notamment agricoles (Photographie 17). Elles participent au mitage des zones humides dans la plaine d’inondation du fait de leur répartition spatiale très ponctuelle.



Photographie 17 – Une boire dans la plaine d’inondation entretenue sur son pourtour par certains usagers.

- Des paléo-chenaux

Ces zones humides sont très importantes d’un point de vue écologique et hydrologique puisque c’est par le biais de ce type d’annexe hydraulique que la plaine d’inondation rentre

en fonctionnement : des écoulements empruntent les parties les plus basses de la plaine (Photographie 18). Les flux liquides et les transferts de nutriments se concentrent donc dans ces annexes hydrauliques. Ces paléo-chenaux sont des indices géomorphologiques d'un ancien style fluvial de la Loire et marquent l'ancienne emprise spatiale du fleuve dans sa plaine d'inondation bien avant l'installation des levées.



Photographie 18 – Ce bras mort, dit le bras du Lac, demeure le plus long de la plaine d'inondation de la rive gauche. Son ancienneté est avérée et il figurait déjà sur les cartes du 17^{ème} siècle.

Cette « panoplie » d'annexes hydrauliques offre une riche variété de zones tampon et de chenaux de réserves pour le corridor fluvial. Elles vont jouer suivant les conditions hydrologiques des rôles différents à la fois dans les transferts de nutriments, les écoulements des excès d'eau et dans les échanges entre le fleuve et sa plaine d'inondation. Ce qui nous intéresse est bien sûr d'analyser ces rôles et également de mieux comprendre les échanges hydro-sédimentaires qui y règnent. Quelles sont les vitesses de comblement et de disparition de ces diverses annexes hydrauliques ?

C'est ce que nous essayons de relever dans notre analyse à grande échelle.

2). Distribution sédimentaire et typologie de la sédimentation

a). Distribution inter-forme des sédiments de surface

- La campagne de prélèvements sédimentaires de 2002 renseigne sur l'état et la nature de la sédimentation de surface, notamment dans les bras secondaires.

Pour chaque bras secondaire étudié au sein du Site Atelier 3, nous avons pu caractériser le type de sédiments déposés lors des crues annuelles de 2002. Il apparaît à la fois une homogénéisation et une disparité de ces dépôts sédimentaires.

Il apparaît ainsi les classes suivantes de types de sédiments de surface :

- des sables fins à grossiers (70 %)
- des graviers (25 %)
- des galets (5 %)
- Ces différents dépôts ont une certaine logique spatiale dans ces bras secondaires :
 - des galets sur les hauts de bancs
 - des sables grossiers à graviers sur l'ensemble de la largeur avec des alternances suivant les zones de turbulences susceptibles de perturber la dynamique courantologique et les dépôts.
 - le long de la veine de courant active les dépôts sont essentiellement constitués de sable fin à grossier.
- Mode de transport des sédiments déposés dans un système anastomosé de la Loire moyenne.

Nous reprenons ici les résultats du PNRZH (Gautier et *al.*, 2001) dont la méthodologie d'analyse granulométrique et sédimentologique s'est appuyée sur un échantillonnage pertinent et varié du Site Atelier 1 (Iles de Marzy). Ainsi, à partir de la méthode dite de Passega (Passega, 1957), ces échantillons sédimentaires ont été représentés sous la forme d'une image CM (Figure 83). Il en résulte une typologie des modes de transport au sein de ce système en fonction du type d'unité fonctionnelle et des micro-formes.

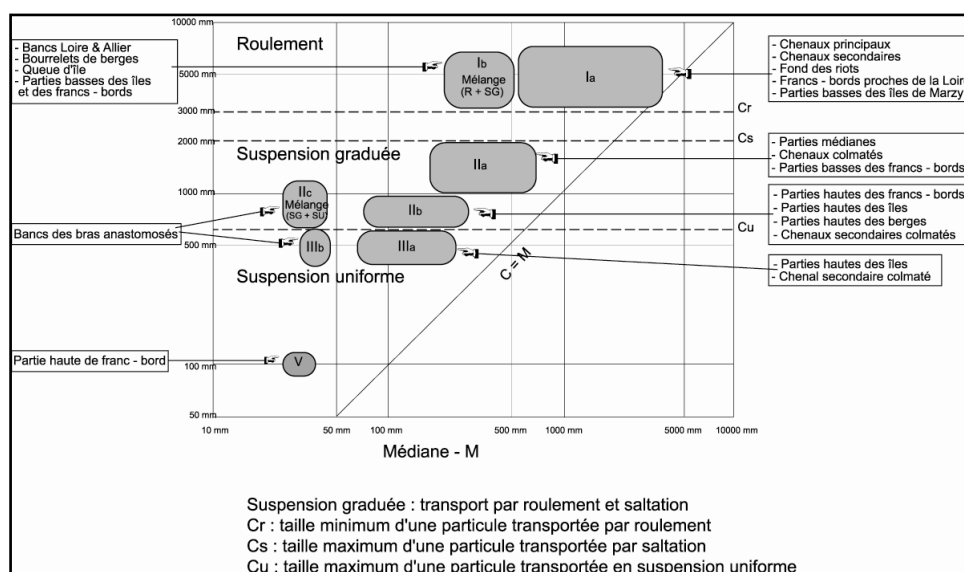


Figure 83 – Image de Passega des modes transports des dépôts sédimentaires prélevés sur les principales unités fonctionnelles de la Loire des îles (Grivel, 2007 d'après Gautier et *al.*, 2000).

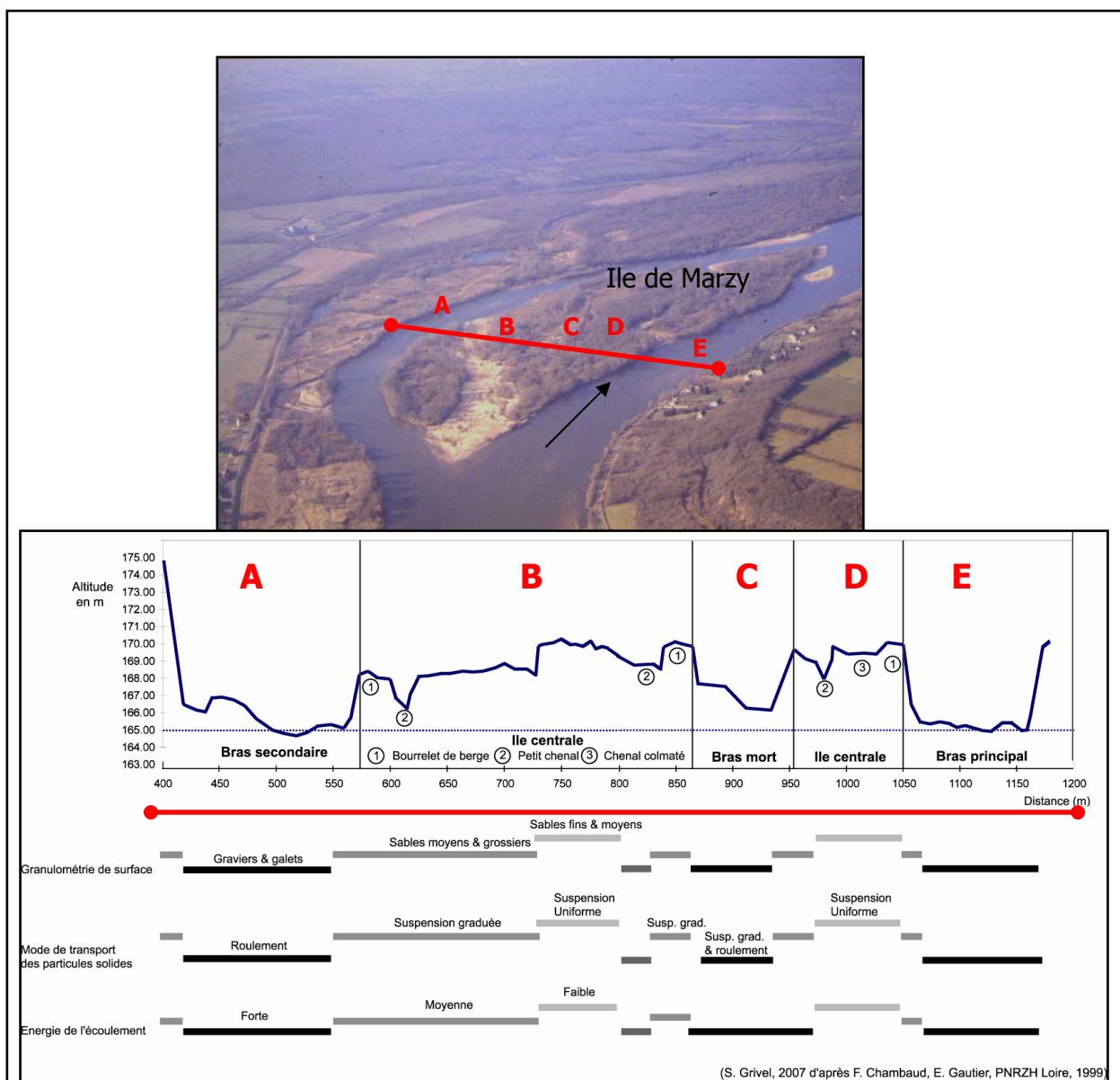


Figure 84 – Caractérisation des dépôts sédimentaires de surface.

En fonction de l'unité fonctionnelle et des niveaux topographiques le long d'un profil type A159 dans le site atelier 1 (Ile de Marzy).

b). La diversité des sédiments en fonction du type d'île et des différences topographiques

La série de prélèvements sédimentaires le long de nos profils de références a permis d'extraire des caractéristiques propres aux formes insulaires. Nous avons pu caractériser les grands types d'îles en fonction de leur identité sédimentaire (Figure 84). Il apparaît ainsi plusieurs aspects essentiels :

- L'épaisseur des sols, très riche en matière organique et en humus ne dépasse pas les 30 cm et reste en moyenne autour de 15 cm.

- Les bras morts et les parties les plus basses des îles possèdent l'essentiel de la charge fine et de sable fin, ce qui participe au comblement actif de ces zones topographiques basses et peu végétalisées.
- Sur le premier mètre les irrégularités sont importantes mais finalement homogènes d'une île à l'autre. Pour synthétiser clairement, le premier mètre de dépôt sédimentaire correspond à une charge fine (limon) à sable fin (70 % du total des dépôts enregistrés sur 1 mètre). Les couches inférieures à un mètre montrent des caractéristiques sédimentaires plus grossières : sable très grossier à galet.
- Les îles enregistrent les événements hydrologiques récents à travers les caractéristiques de leurs dépôts sédimentaires : les irrégularités des épaisseurs déposées et des types de sédiments en attestent. Par exemple, la présence de sables très grossiers à galets entre deux dépôts fins montre le passage d'un événement hydrologique très important compte-tenu de la charge déposée. Ou encore des passées limoneuses entre deux couches de sable fin montrent le passage d'un événement hydrologique.
- Cette hétérogénéité des dépôts récents renseigne sur la variété des conditions hydrologiques en Loire moyenne. Il reste, de fait, difficile de caractériser les îles en fonction de leur typologie sédimentaire tellement l'irrégularité de leur topographie interne (berges, haut de berges, dépressions, bras morts, sommets...) et de leur couverture végétale (pelouse de végétation pionnière, couverture buissonnante, végétation arborée) influencent ces dépôts. Au sein d'une même île, les divergences de dépôts renseignent sur la diversité de la couverture végétale. En effet, suivant la taille de la végétation les dépôts sont différents, l'effet peigne demeurant le plus fort avec une végétation semi-arborée (Rodrigues, 2004 ; Gautier et al. 2001). Nous proposons une synthèse des caractéristiques sédimentaires (Figures 85 et 86).

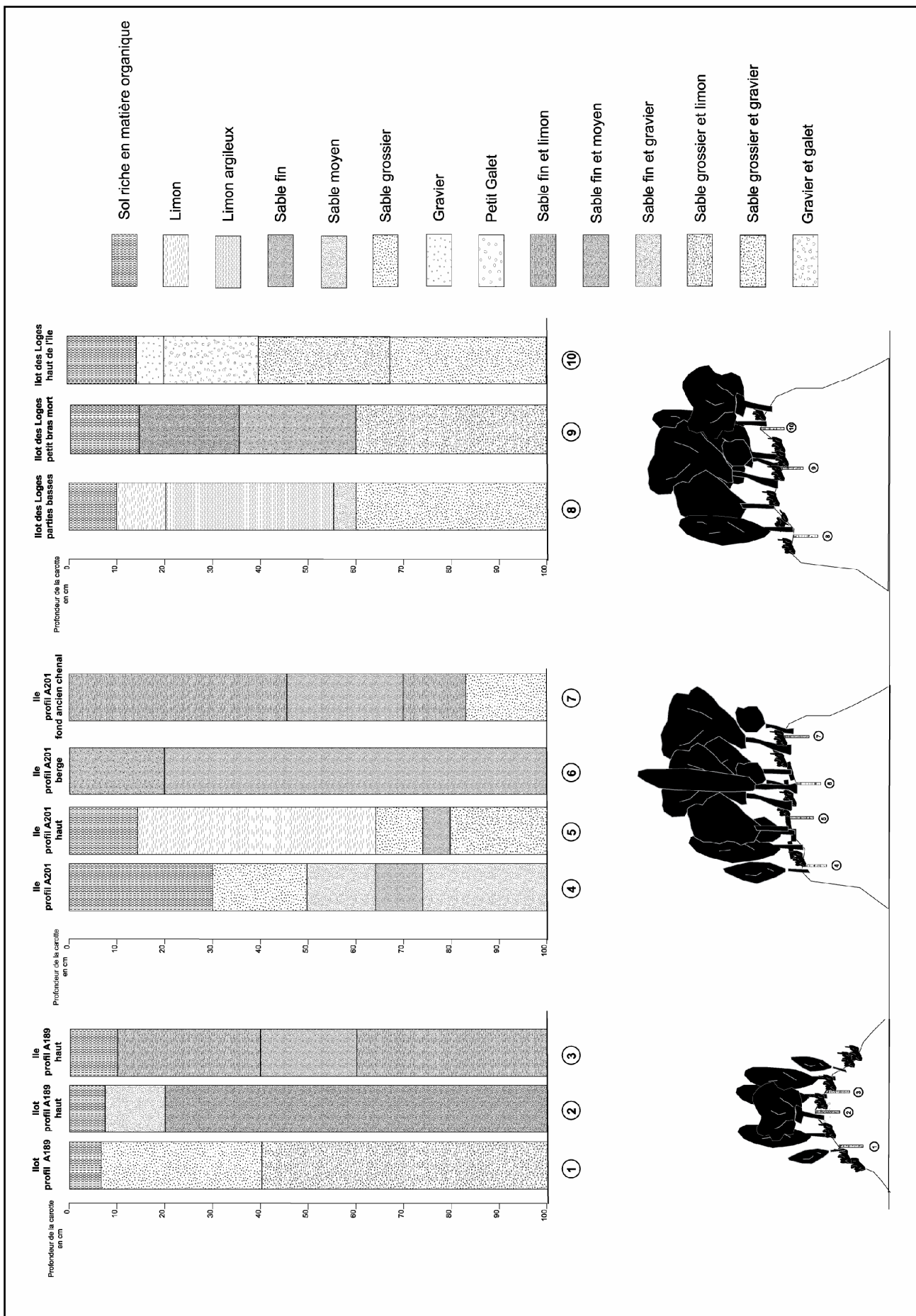


Figure 85 – Caractérisation des dépôts sédimentaires, sur un mètre, en fonction du type d'île (île moyenne, grande île et très grande île).

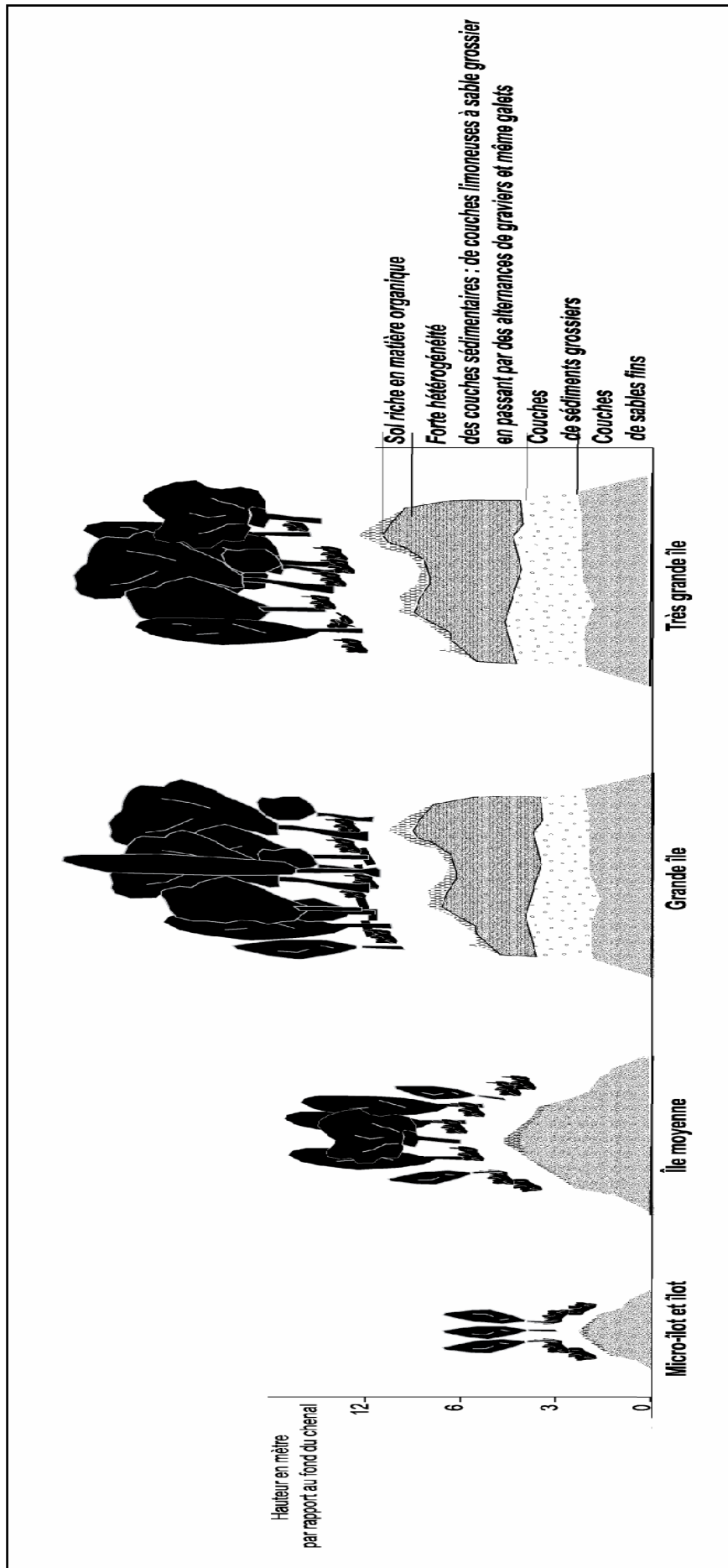


Figure 86 – Synthèse théorique de la composition sédimentaire des différents types d'îles.

- Les micro-îlots sont à 90 % constitués de sables fins sur leurs couches inférieures. Mais du fait de leur taille modeste et de leur submersion annuelle, une charge plus grossière (sable grossier à gravier) se dépose au dessus de ce lit de sable fin jusqu'à atteindre la taille d'une île moyenne. Les caractéristiques des dépôts correspondent ensuite à ce que nous avons analysé, précédemment, à partir des profils de référence. Les îlots se positionnent à un stade intermédiaire entre les micro-îlots et les îles moyennes puisque nous trouvons sur ces formes insulaires des caractéristiques plus proches des îles moyennes du fait du stade avancé de la végétation qui les recouvre.

3). Caractérisation de la végétation

La végétation est essentielle dans la vallée de la Loire et tout particulièrement dans notre système anastomosé de la Loire moyenne. La végétation apporte à la fois la signification d'une biodiversité très riche en Loire mais constitue également un objet de gestion écologique de premier ordre. Chambaud et al. (1996), puis Cornier (2002) précisent que la flore médio-ligérienne - et plus particulièrement celle du lit entre levées - présentent une grande originalité et une forte richesse phytocénotique qui s'expliquent par le maintien d'une dynamique fluviale active. Il s'agit pour notre approche de considérer ce facteur biologique en montrant le lien très fort qui le rapporte à la géomorphologie fluviale (Dufour, 2005 ; Cornier, 2002).

a). Occupation du sol et distribution des cortèges floristiques

Pour la Loire des îles, nous partons de l'état du lit en 2002, tel qu'il a été inventorié et caractérisé par la DIREN Centre (Cornier, 1998). La richesse de cette typologie est très complète, mais pour nous, géomorphologues elle reste complexe tant la précision des espèces inventoriées est importante (Figure 87). Aussi, nous avons préféré tenir compte de la diversité phyto-écologique des milieux ligériens en les mettant en relation avec la topographie des formes fluviales et également des types d'îles. Contentons nous pour l'instant de cette typologie très détaillée et axons notre analyse sur les relations bio-géomorphologiques.

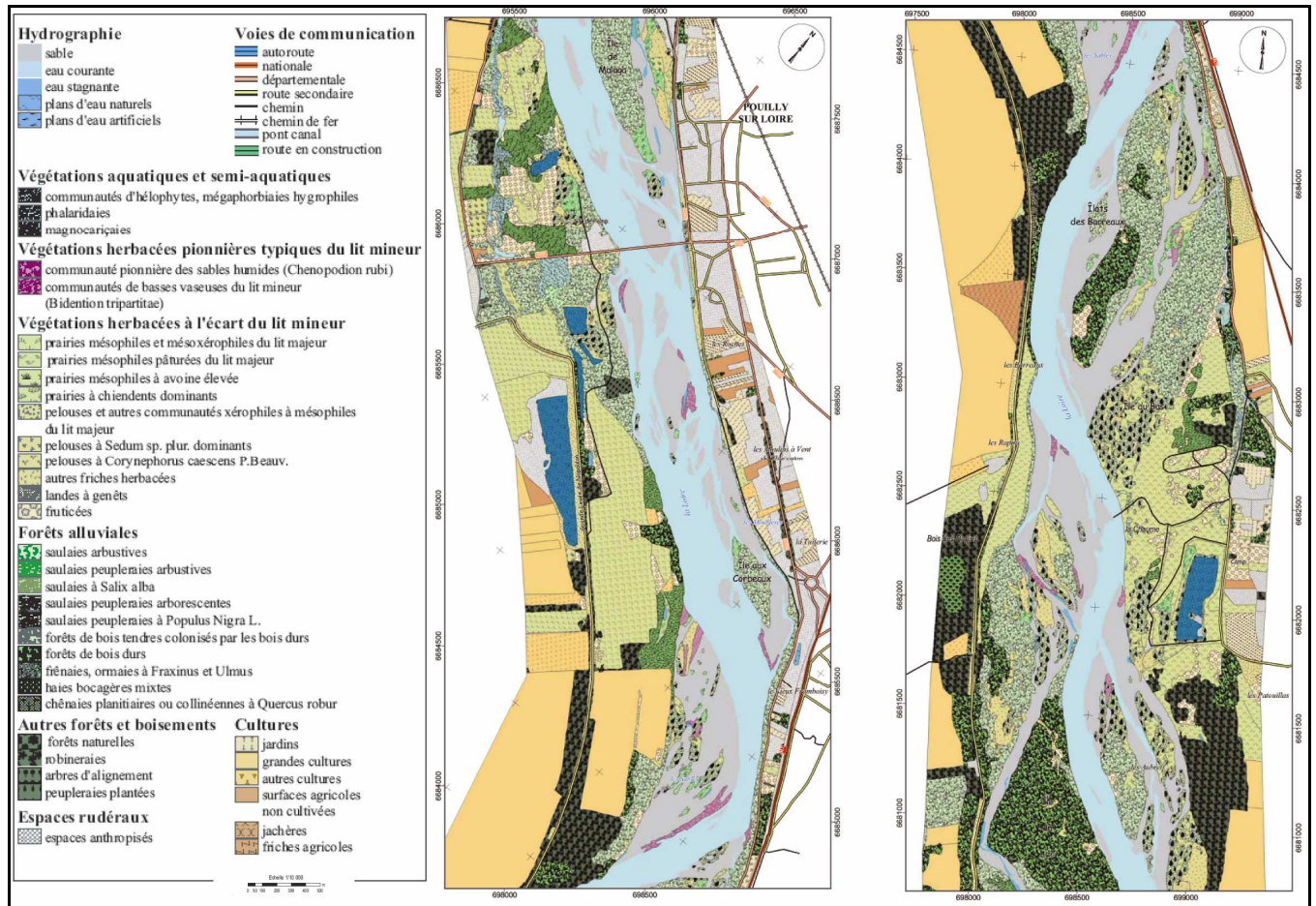


Figure 87 – Caractérisation de la végétation dans le Site Atelier 3 d'après la typologie Cornier (1998) : secteurs de Pouilly et des Barreaux (DIREN-Centre).

b). Relations formes fluviales, végétation et sédimentation

En fonction de la topographie du lit fluvial, et par conséquent des différentes formes fluviales qui le composent, il apparaît une certaine logique de répartition des cortèges floristiques (Figures 88 et 89). Ainsi, les secteurs les plus élevés du lit correspondent à des zones de plus en plus déconnectées de la dynamique fluviale et correspondent à des systèmes arborés à bois dur, comme on peut en trouver en dehors du lit mineur dans la plaine d'inondation : Chênaie pédonculée-Aulnaie-Frênaie des grands cours d'eau, Chênaie sèche, Charmaie et Ormaie. Entre les formes fluviales les plus basses de la bande active (bancs, grèves) et les parties sommitales des îles et des francs-bords, se développent des séries floristiques dépendantes des fréquences et des durées de submersion :

- forêt alluviale à bois tendre sur les îlots et les îles les plus récentes (Saulaie arbustive pionnière, Saulaie blanche arborée, Saulaie-Peupleraie), .

- espèces pionnières (ou « verdiaux » de saules et peupliers) sur sables et graviers
- Prairies et pelouses sur les francs-bords et certaines parties d'îles (zones fraîchement colonisées par la végétation)
- Friches boisées à prunellier sur les francs-bords et sur certaines îles (zones élevées au niveau des francs-bords)

Ainsi, le schéma ci-après (Figure 88) illustre parfaitement cette organisation topographique des cortèges floristiques. La relation avait été également montrée par T. Cornier (1997) sur les îles de Bréhémont.

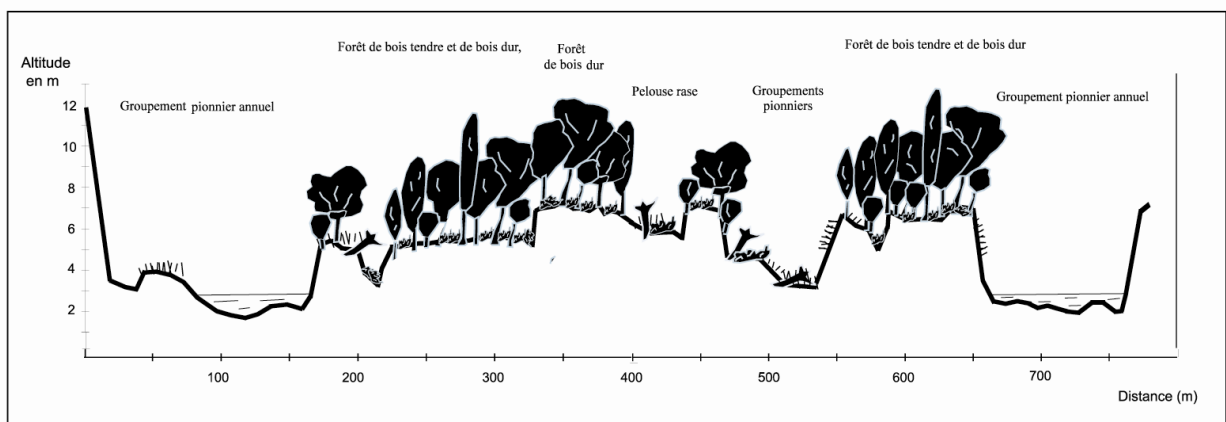


Figure 88 – Relation végétation-topographie.

En fonction de l'unité fonctionnelle et des niveaux topographiques le long du profil A159 du site atelier 1 (Ile de Marzy).

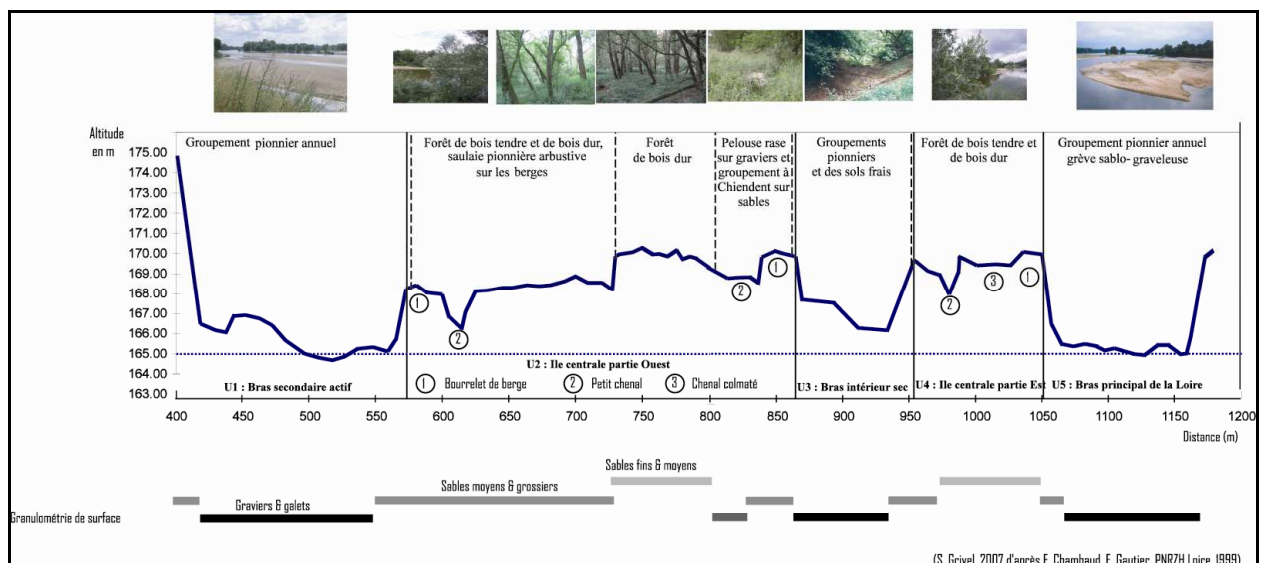


Figure 89 – Relation végétation-sédimentation.

En fonction de l'unité fonctionnelle et des niveaux topographiques le long du profil A159 du site atelier 1 (Ile de Marzy).

B Diachronie du réajustement fluvial depuis 1850

Au regard des diverses caractéristiques de l'état de référence, il convient dès à présent de donner une signification dynamique à ce lit fluvial que nous étudions. Comment les formes ont-elles évolué depuis plus d'un siècle et demi ? Comment les formations végétales de 2002 se sont développées ? Existe-t-il des seuils temporels dans cette diachronie ou les rythmes d'évolution sont-ils réguliers ? Autant de questions qui intéressent en particulier les gestionnaires des milieux naturels ligériens, qui souhaitent connaître l'historique et la dynamique de leur espace de gestion.

L'analyse spatiale, fondée sur le SIG, nous a renseignés dans un premier temps sur l'évolution générale des formes fluviales en plan. Elle met en évidence non seulement la métamorphose du lit de la Loire, mais aussi et surtout la jeunesse et la spécificité des rythmes de formation des îles. Ces mésoformes constituent un élément fort et structurant du paysage actuel du Val de Loire dans cette partie du bassin, et l'originalité du travail a consisté à analyser en détail leurs modes de formation et d'évolution.

1). Evolution des formes sur 150 ans

a). Agencement du triptyque bande active-îles-francs-bords

De 1850 à 2002, le lit de la Loire moyenne s'est considérablement modifié. A notre première échelle d'analyse, nous constatons en effet une réduction drastique de la bande active au cours des 150 dernières années (Figure 90). Cela semble s'amorcer dès la fin du 19^{ème} siècle puisque un très grand nombre d'îles envahit le corridor fluvial. Ceci est vrai pour tous les sites ateliers de la Loire des îles. La cartographie diachronique laisse apparaître des modèles de formation et d'évolution bien particuliers (Figures 91, 92 et 93). La suite de l'approche permet de quantifier ces premiers constats. Des îles existent déjà en 1854 mais en nombre très réduit au regard de « l'explosion » des effectifs insulaires d'aujourd'hui. Elles sont cependant présentes très tôt dans le secteur de Soulangy (Figure 93). Ce que nous observons également, et qui présente des traits très intéressants, concerne la forte réduction de la bande active au profit des francs-bords. En effet ces unités fonctionnelles connaissent une extraordinaire extension depuis 1854. Cette extension ne semble pas homogène à l'échelle de la Loire moyenne puisque nous observons qu'elle se

fait très tôt dans le Site Atelier 3, dès la fin du 19^{ème} siècle alors que pour les Sites Ateliers 1 et 2 elle se réalise ces 15 dernières années (Gautier et *al.*, 2001). Nous voyons que ces jeunes francs-bords se sont formés par le rattachement, apparemment définitif, de grandes et très grandes îles par comblement de minces chenaux qui les séparaient de la rive. Il semblerait que les activités agro-pastorales se soient retirées plus tôt du lit de la Loire dans le SA 3 que dans les autres, notamment du Bec d'Allier, permettant ainsi une extension plus rapide de la végétation de francs-bords.

Les différentes unités fonctionnelles îles-francs-bords-bande active semblent fonctionner ensemble et avoir des liens de formation et d'évolution très interdépendants.

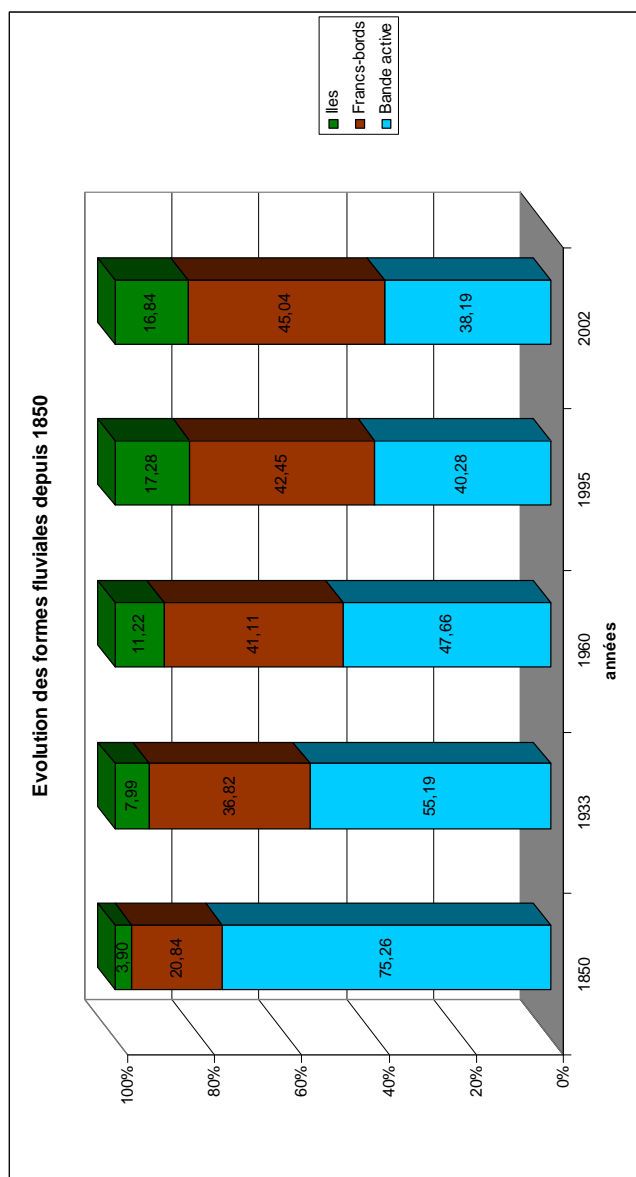


Figure 90 – Evolution sur plus de 150 ans des formes fluviales majeures de la Loire des îles. Site Atelier 3 (Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire).

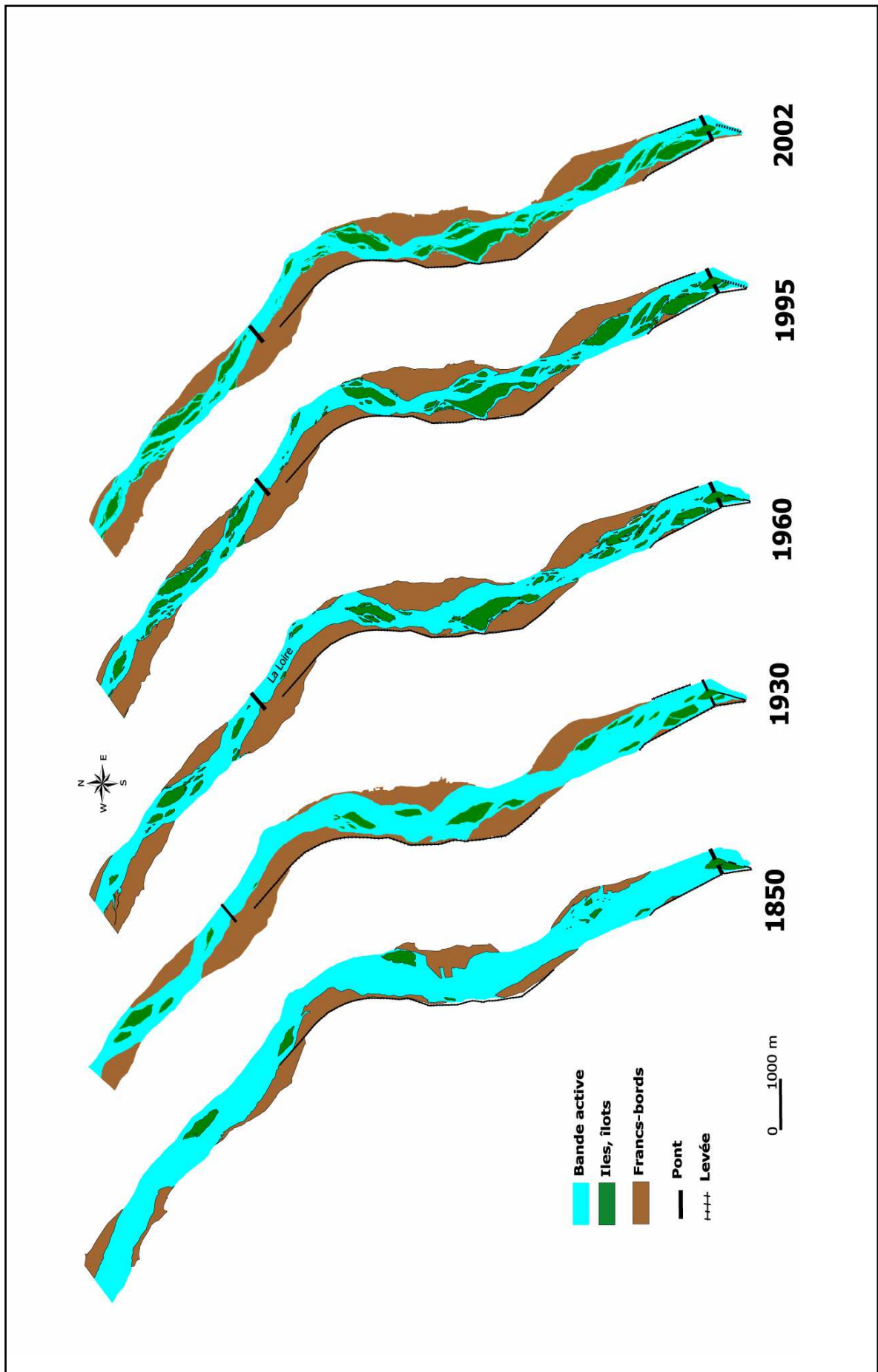


Figure 91 – Cartographie diachronique du Site Atelier 3.

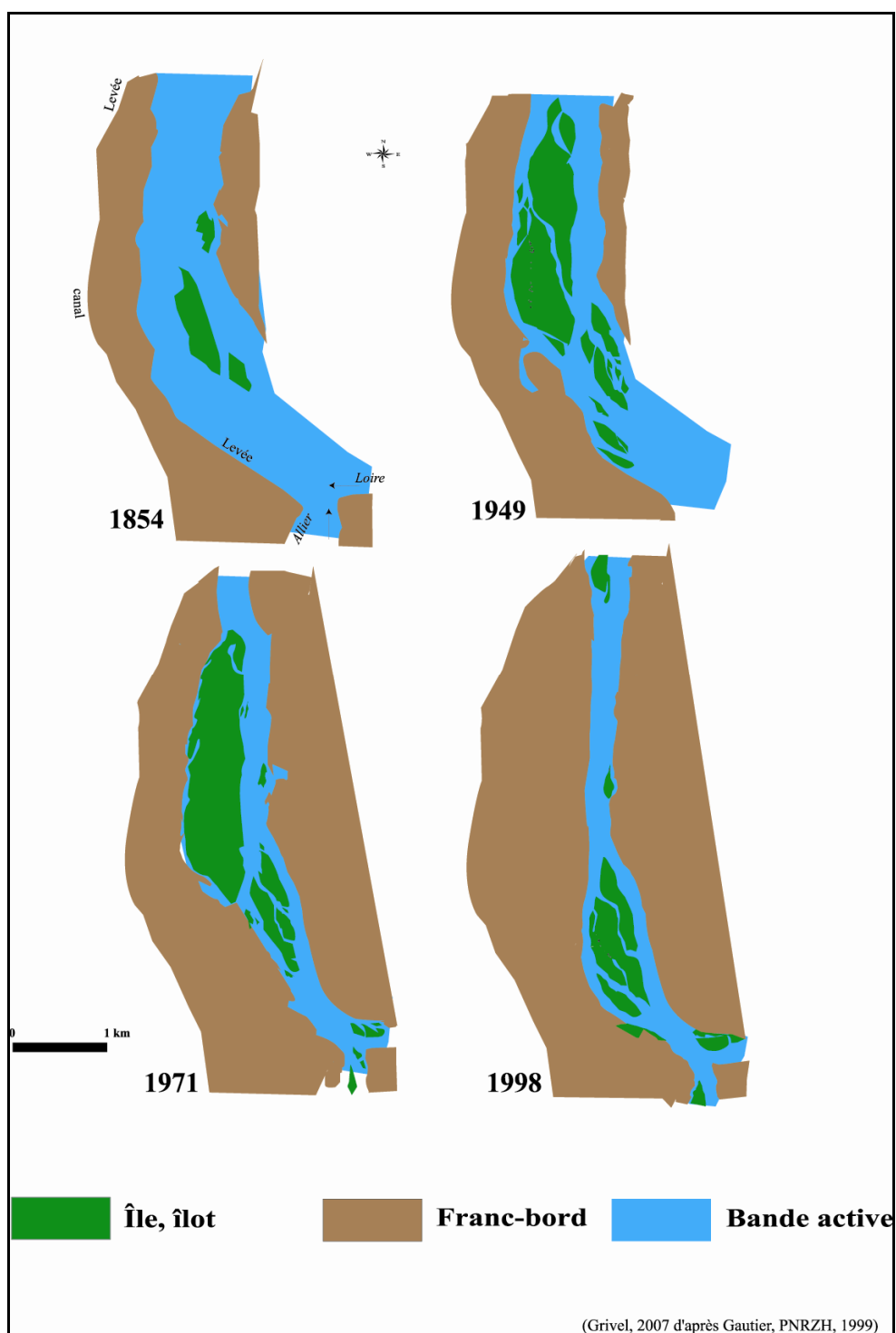


Figure 92 – Cartographie diachronique du Site Atelier 1.
Formation des îles de Marzy et extension du franc-bord de rive gauche.

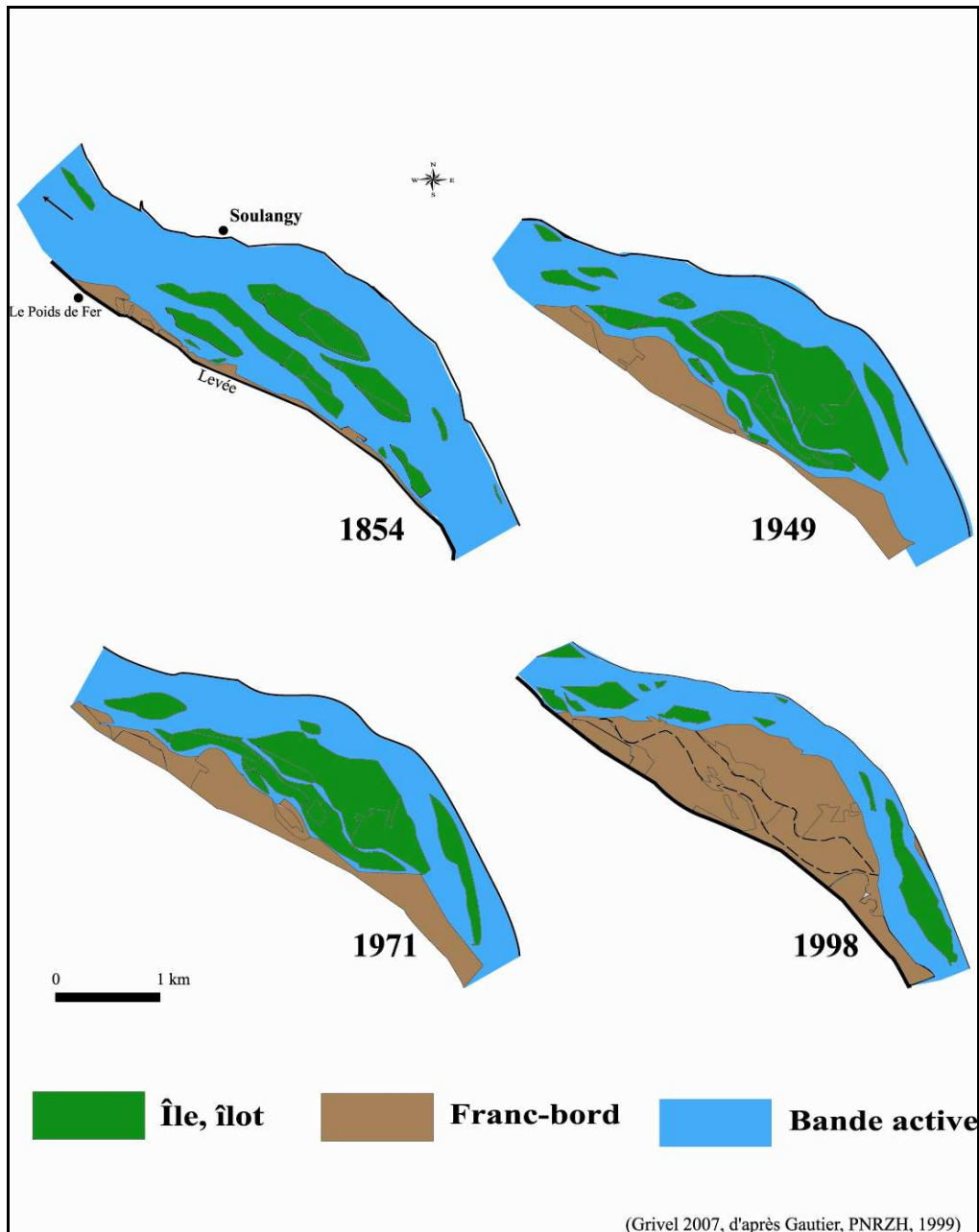


Figure 93 – Cartographie diachronique du Site Atelier 2.
Des îles très anciennes et forte extension récente du franc-bord en face de Soulangy.

b). Rythme d'évolution des formes fluviales du Site Atelier 3

Nous suivons donc cette évolution à trois pas de temps : 1850-1960 (110 ans en tenant compte des pas de temps intermédiaires notamment les tranches 1850-1900, 1900-1930 et 1930-1960) puis 1960-1995 (35 ans) et 1995-2002 (7 ans). Ces différents pas de temps permettent de montrer l'évolution significative du lit de la Loire des îles et surtout de justifier l'importance de la seconde approche à grande échelle (Figure 94). Il est nécessaire

en effet d'analyser les changements et les rythmes d'évolution actuels, d'une année à l'autre. Nous raisonnons essentiellement en surfaces (hectares) ; ces surfaces sont déterminées à l'aide des outils de calcul du logiciel SIG.

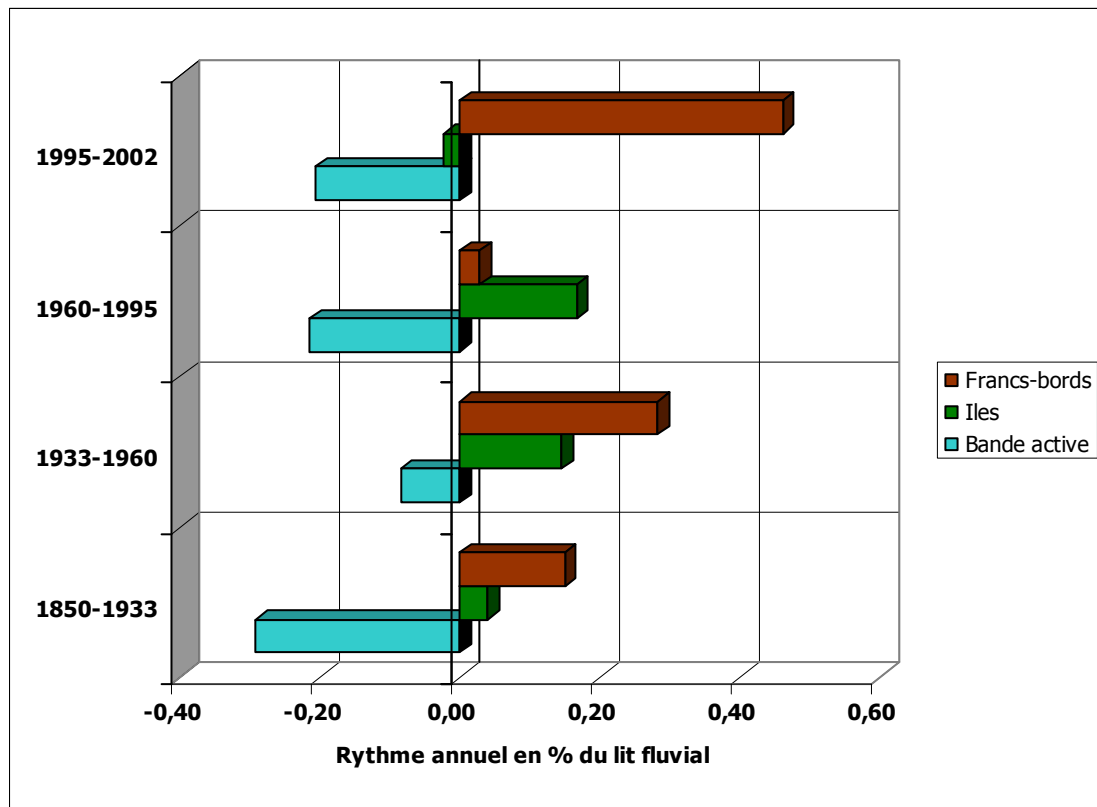


Figure 94 – Rythme d'évolution des formes fluviales de la Loire moyenne sur des pas de temps clés.

- **Evolution générale des formes fluviales entre 1850, 1930 et 1960**

- **La réduction de la bande active**

En comparant le lit ligérien de 1850 avec celui de 1960, la première observation est que la **bande active s'est considérablement réduite**. En 1850, la largeur de la bande active variait entre 230 à 990 mètres, tandis qu'en 1960, elle n'est plus que de 140 à 600 mètres. La réduction s'avère radicale avec des diminutions moyennes de 320 mètres et des maxima de 700 mètres. On note ainsi que la bande active se réduit de près de 56 % en 110 ans, soit un rythme annuel de **-0,24 % du corridor fluvial**. L'essentiel de cette diminution drastique se réalise dès la première moitié du 20^{ème} siècle. Une nette réduction est en effet enregistrée entre 1850 et 1930 (-0,29 % par an), ce qui tend à révéler un seuil temporel majeur dès le début du 20^{ème} siècle.

En 1850, la Loire se caractérisait dans cette zone par un style fluvial proche du tressage, la Loire occupe l'ensemble - ou presque - de l'espace disponible entre pied de coteau et levées. Même si nous ne connaissons pas la hauteur d'eau (et *a fortiori* le débit) correspondant aux levés de la carte de 1850, il est possible de distinguer un bras principal rectiligne, séparé de chenaux secondaires par des bancs. En 1930, le lit change de morphologie avec une forte extension des francs-bords (+ 0,15 % par an du lit fluvial entre 1850 et 1930). En 1960, la morphologie est bien différente puisque le chenal principal s'est réduit comme « peau de chagrin » au rythme de -0,32 % du lit par an (-107 % par rapport à sa surface de 1850). En contrepartie, la surface représentée par les chenaux secondaires s'accroît avec un taux de croissance de + 59,32 % au rythme de + 0,08 % du lit par an. La multiplication des bras secondaires correspond à l'augmentation des formes insulaires dans le lit mineur.

- Le développement des îles

Si la bande active se réduit radicalement, c'est au profit en effet d'une forte stabilisation des formes fluviales. L'évolution de la dynamique fluviale au cours de la seconde moitié du 19^{ème} siècle et de la première moitié du 20^{ème} siècle se matérialise par la croissance du nombre des formes dites stabilisées (principalement les îles). La perte de mobilité des bancs engendre la formation de chapelets d'îles que l'on peut observer en grand nombre dès 1960.

Concrètement, **le lit ligérien de 1850 ne comporte que très peu d'îles** (11 îles soit 3,9 % de la surface totale étudiée). En 1930, les îles représentent déjà près de 8 % du lit fluvial. Durant la période 1850-1930, les formes insulaires se sont développées à un rythme annuel modéré de +0,04 % du lit. En 1960, on en compte exactement 91, ce qui représente 11,22 % de la surface totale ; une véritable métamorphose des formes en plan s'est ainsi opérée (+0,15 % du lit par an). La croissance de l'ordre de + 65 % par rapport à la surface de 1850 atteste de l'extension rapide des îles. D'un d'espace « d'écoulement libre », la Loire dans le secteur de la RNVL évolue en 110 ans vers un chenal « encombré » par les îles.

La diminution de la bande active s'explique également par la forte croissance d'un autre type de formes stabilisées : **les francs-bords**. Cependant, l'évolution est moins franche que dans le cas précédent, puisque ces mésoformes fluviales étaient déjà bien représentées en 1850 (21 % de la surface totale étudiée). Une forte extension des francs-bords s'enregistre avec + 0,15 % par an du lit fluvial entre 1850 et 1930. Au cours des 110 ans, ils s'étendent fortement pour occuper ainsi 40 % de la surface totale. Non seulement les francs-bords antérieurs à 1850 ont vu leur taille croître, mais 65 % des îles présentes en 1850 ont été rattachés à des francs-bords. Seule l'île de Passy conserve son statut d'île ; la chevrette de La Charité-sur-Loire située en amont de cette île forme une protection contre l'influence du bras principal, d'où la relative stabilité de l'île de Passy, qui reste avec le faubourg de La Charité l'île la plus ancienne du secteur étudié.

En résumé, la période 1850-1930 est marquée par l'extension des francs-bords dans l'espace fluvial, et la période 1930-1960 par un fort développement des îles au détriment de la bande active.

- **Evolution générale des formes fluviales entre 1960 et 1995**

La comparaison 1850-1960 renseigne certes sur la modification radicale du lit (passage d'un chenal libre à un lit encombré et parsemé d'îles et de chenaux secondaires), mais la comparaison 1960-1995 apporte la compréhension des processus de formation et d'évolution des chenaux secondaires, îles et francs-bords. En resserrant sur un pas de temps plus court, nous mettons en valeur les rythmes de croissance, l'intensité et la répartition des processus érosion/accrétion.

- **La modification de la bande active se poursuit**

On observe une forte régularité de la réduction de la bande active qui perd annuellement 0,20 % du lit total. De même, le chenal principal poursuit sa rétraction (en moyenne -80 m ; maximum à -370 m), en partie au profit des chenaux secondaires qui eux progressent au rythme de 0,06 % du lit fluvial par an.

En ce qui concerne les îles et les francs-bords, l'évolution est plus contrastée et à l'inverse de la période précédente. En effet, le rythme de formation des francs-bords se ralentit

(0,03 % par an), tandis que la croissance des îles est plus soutenue sur le pas de temps 1960-1995 (+0,17 % par an) que sur la période 1850-1930.

Il y a donc une complexification, apparemment transitoire, du lit au cours du 20^{ème} siècle.

- **Une croissance accrue de la sédimentation des îles**

L'analyse temporelle permet de souligner un point important. Il apparaît que le paramètre qui décrit le mieux le changement n'est pas le nombre d'îles, mais plutôt leur schéma d'évolution. En 1995, 93 îles occupent le fleuve contre 91 en 1960. En s'arrêtant à ces données, l'évolution semble très faible. Mais, en s'intéressant de plus près aux processus qui régissent ces géoformes, on constate une complexité et une diversité des phénomènes d'érosion et d'accrétion. Les 91 îles de 1960 ne sont plus les mêmes 35 ans plus tard, se sont modifiées, ont disparu et d'autres sont apparues... C'est ce que nous démontrons grâce à l'étude fine de ces formes fluviales dans la typologie des modèles d'évolution des îles.

● **Evolution générale des formes fluviales entre 1995 et 2002**

- On note une **forte extension des francs-bords** sur ce pas de temps. Ceci s'explique en partie par un rattachement plus important des îles latérales à la rive (Figure 95). Ces îles perdent leur insularité pour devenir des francs-bords. Le chenal secondaire qui les séparait de la rive s'est fortement végétalisé. Les écoulements exceptionnels (ceux des crues) ont certes continué de submerger ce bras secondaire, mais du fait de la forte rugosité végétale, ils ont été ralentis (végétation croissante du chenal). Cela a entraîné une sédimentation active suivie d'une expansion végétale : la situation apparaît ici comme irréversible, le chenal ne cessant de se fermer pour former au final une expansion continue de la végétation ripicole et celle des îles.

- Cette situation a été très marquée dans le secteur de Passy où le bouchon alluvial formé en aval s'est considérablement végétalisé entre 1995 et 2002, et par là même exhaussé pour atteindre le niveau de l'île de Passy, laquelle, pour rappel, existait déjà en 1850 et avait toujours gardé son caractère insulaire. En seulement 7 ans, cette expansion végétale a été très rapide. Un modèle type d'évolution des îles est ainsi mis en valeur par le biais de l'analyse spatiale : l'île de Passy permet l'extension d'un franc-bord de rive gauche grâce à

la végétalisation forte du bras secondaire qui les sépareit. La circulation des débits annuels s'effectue toujours mais, par effet peigne de la végétation pionnière croissante, le processus est irréversible et amène les bras à s'exhausser de plus en plus.

La longueur (plus de 800 m) et la largeur (de 20 à 200 m suivant les zones) du chenal ainsi modifié attestent de la forte extension des francs-bords en général entre 1995-2002 : +0,09 % du lit par an, rien que pour ce secteur entre 1995 et 2002.

- **Les francs-bords : évolution latérale des formes marginales**

Les francs-bords évoluent à un rythme différent de celui des îles, mais il est nécessaire de montrer au final la relation très proche qui existe entre ces deux types de formes fluviales.

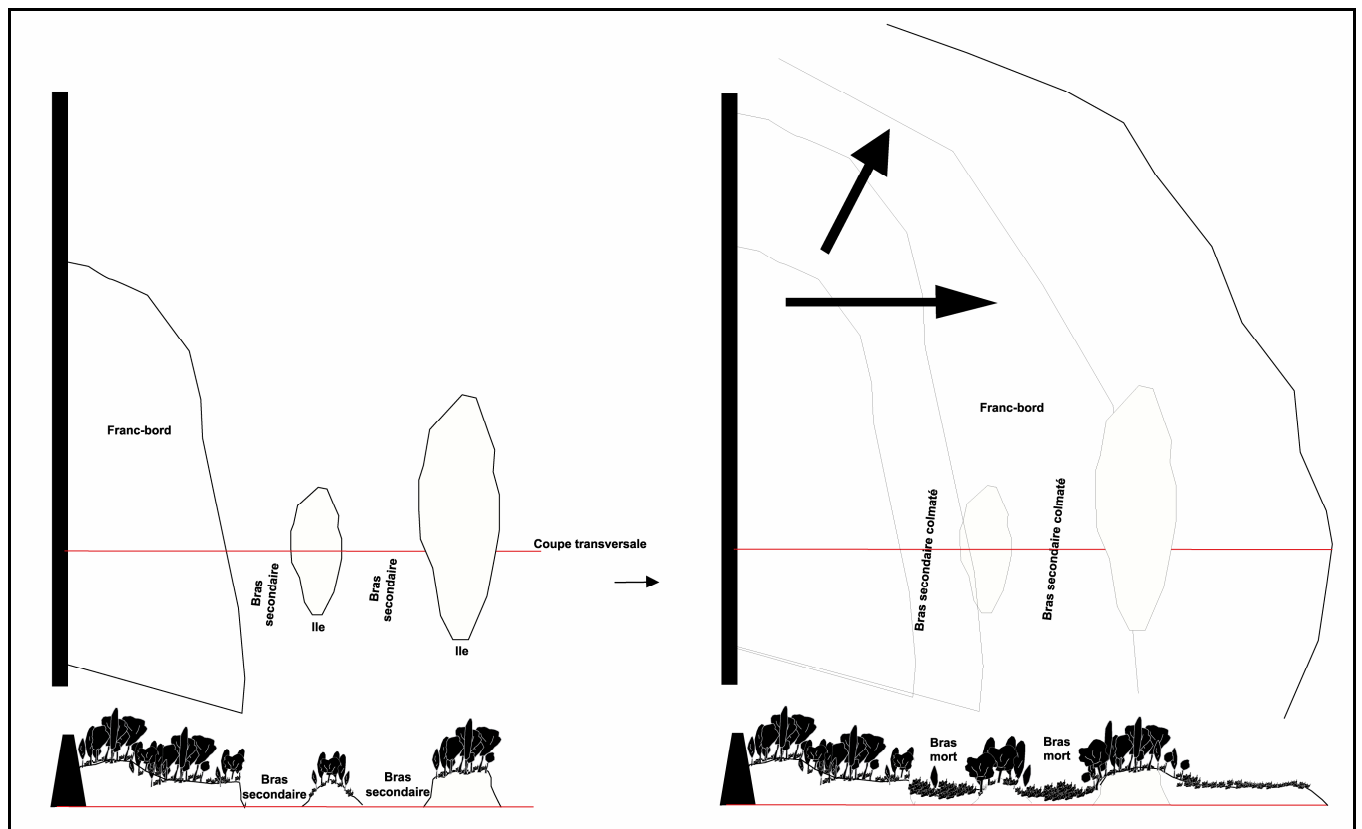


Figure 95 – Extension d'un franc-bord par colmatage de bras secondaire et stabilisation d'îles.

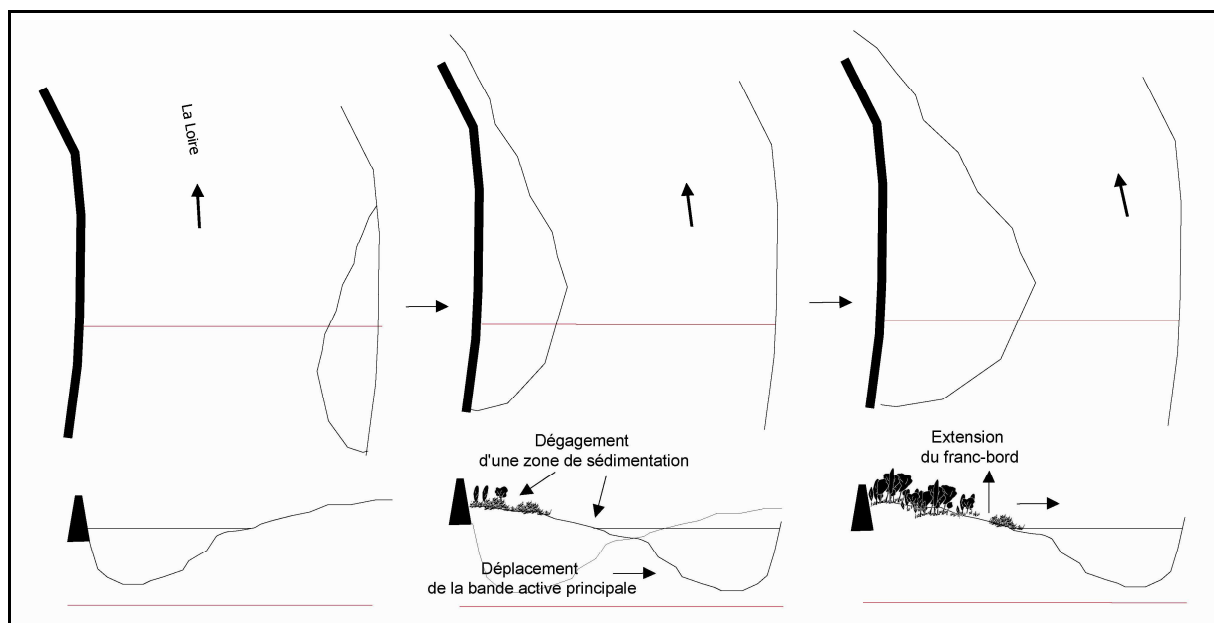


Figure 96 – Extension d'un franc-bord par appui sur une levée. Les levées permettent d'ancrer des zones de sédimentation prédisposées à la colonisation végétale.

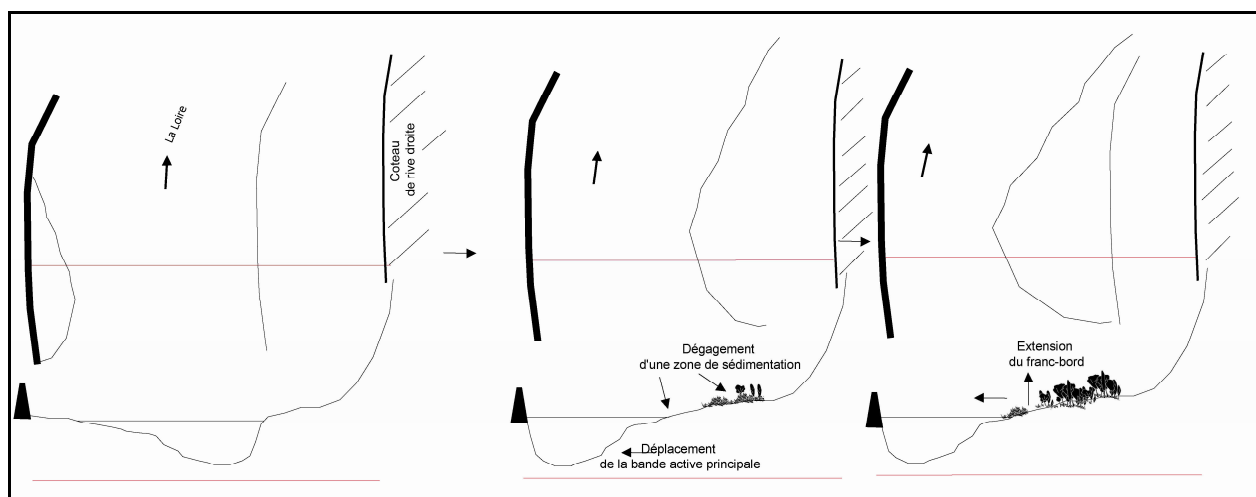


Figure 97 – Formation d'un franc-bord en rive droite au pied des coteaux calcaires.

En amont du Bec d'Allier, les francs-bords de rive droite s'appuient sur les pieds de coteaux pentus. Le schéma d'évolution reste le même que pour les francs-bords de rive gauche, seul le type d'assise change.

- **Les francs-bords ont été formés également grâce à la présence des levées de rive gauche.**

En effet, 95 % des francs-bords de rive gauche ont pris comme point d'appui des levées (Figure 96). Ces levées ont été construites au cours des 18 et 19^{ème} siècle et semblent donc avoir constitué d'excellentes bases pour le développement de ces marges du fleuve. Les francs-bords ont alors pu se former à partir de ces digues et croître latéralement au détriment de la bande active. Tous les francs-bords de rive droite se sont développés entre

1850 et 1930 grâce au rattachement d'une île à la rive (à un rythme de +0,15 % par an du lit fluvial) (Figure 97).

- Les francs-bords de la Loire moyenne se développent donc **d'abord par sédimentation latérale (jusqu'à 50 m par an) et dans une moindre mesure longitudinalement (environ 2 m par an)**. Cela s'est d'abord avéré vrai pour les premières phases d'extension historique de ces francs-bords depuis 1850. La première vague de forte extension amorcée dès la fin du 19^{ème} siècle correspond en effet à un rattachement intensif des îles les plus anciennes, celles déjà existantes en 1850. Les premiers francs-bords se sont étendus au détriment de ces îles trop proches de la rive (à moins de 50 m) pour rester dans le « monde » des îles. Ce processus d'évolution des francs-bords est à mettre en relation avec ce modèle d'évolution des îles qui se rattachent et se stabilisent définitivement à la rive (Figure 95). Ce qui montre parfaitement le lien très étroit des deux types d'unités fonctionnelles au sein d'un style en anabranche. Depuis 1995, une nouvelle grande phase de développement de ces francs-bords s'est véritablement engagée, puisque nous enregistrons très précisément deux grands secteurs de rattachement d'îles induisant de ce fait une extension de francs-bords. Ce modèle d'évolution renseigne bel et bien sur l'état du lit de la Loire des îles : des chenaux secondaires se végétalisent et accentuent la sédimentation en leur sein, et surtout participent à la stabilisation d'île et à la progression latérale de francs-bords. Par définition, l'hydrosystème prend tout son sens puisque toutes ces formes fluviales sont inter-dépendantes à travers leur modèle d'évolution.

- Evolution de la bande active

-D'après l'Indice de Sinuosité Is (Brice, 1984), le chenal principal n'a pas connu de grande modification depuis 1850. Il est resté proche de 1,3 environ et traduit une sinuosité assez stable. Les levées contraignent certainement ce degré de sinuosité. Le chenal est enfermé dans ce 3^{ème} lit entre les levées.

- La bande active, on le voit bien sur la figure 98, n'a eu de cesse de se réduire au cours du 20^{ème} siècle la part de son chenal principal au profit du réseau des bras secondaires, qui s'est formé en même temps que les îles. Aussi, il apparaît que depuis 1995 un nouvel aspect du réajustement fluvial de ce système anastomosé est en train de s'amorcer. La part des bras secondaires semble pour la première fois fléchir au profit du bras principal qui

reprend une place plus importante dans le lit. Cela ne peut s'interpréter qu'en ne tenant compte de ce que nous avons relevé précédemment, à savoir une réduction de la surface des îles, une forte colonisation végétale des bras secondaires et une forte reprise du développement des francs-bords (Figure 99). Tout se corrèle, en effet, puisque si le réseau des bras secondaires se réduit, c'est principalement parce que l'on observe une nette progression des francs-bords qui « grignotent » aussi bien les îles que les chenaux secondaires qui les séparaient.

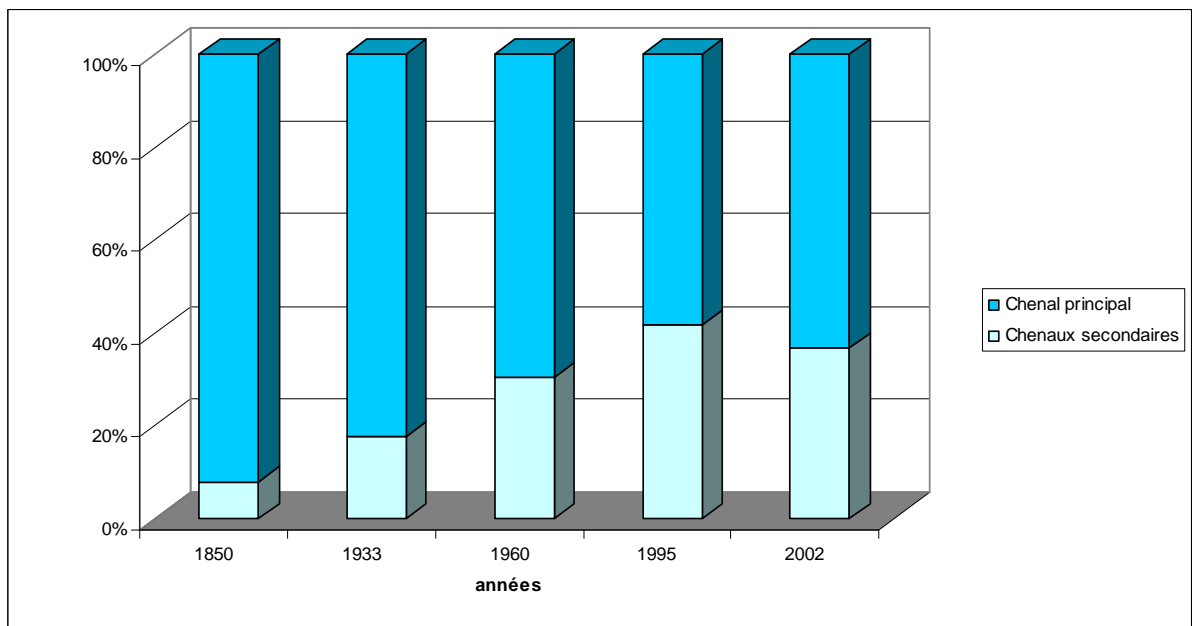


Figure 98 – Evolution de la répartition de la bande active entre le chenal principal et les bras secondaires.

- Une diminution de la surface des îles.

Pour la première fois depuis plus de 150 ans de suivi de ces unités fonctionnelles, nous relevons en effet une réduction, non pas du nombre d'îles, mais de leur surface occupée dans le lit fluvial. Nous enregistrons une perte d'îles à un rythme de -0,02 % par an du lit fluvial. Ceci est à mettre directement en relation avec la nouvelle phase d'extension des francs-bords, importante on l'a vu dans le secteur de Passy et également à l'amont immédiat de l'ancienne connexion du site fonctionnel de l'île du Lac.

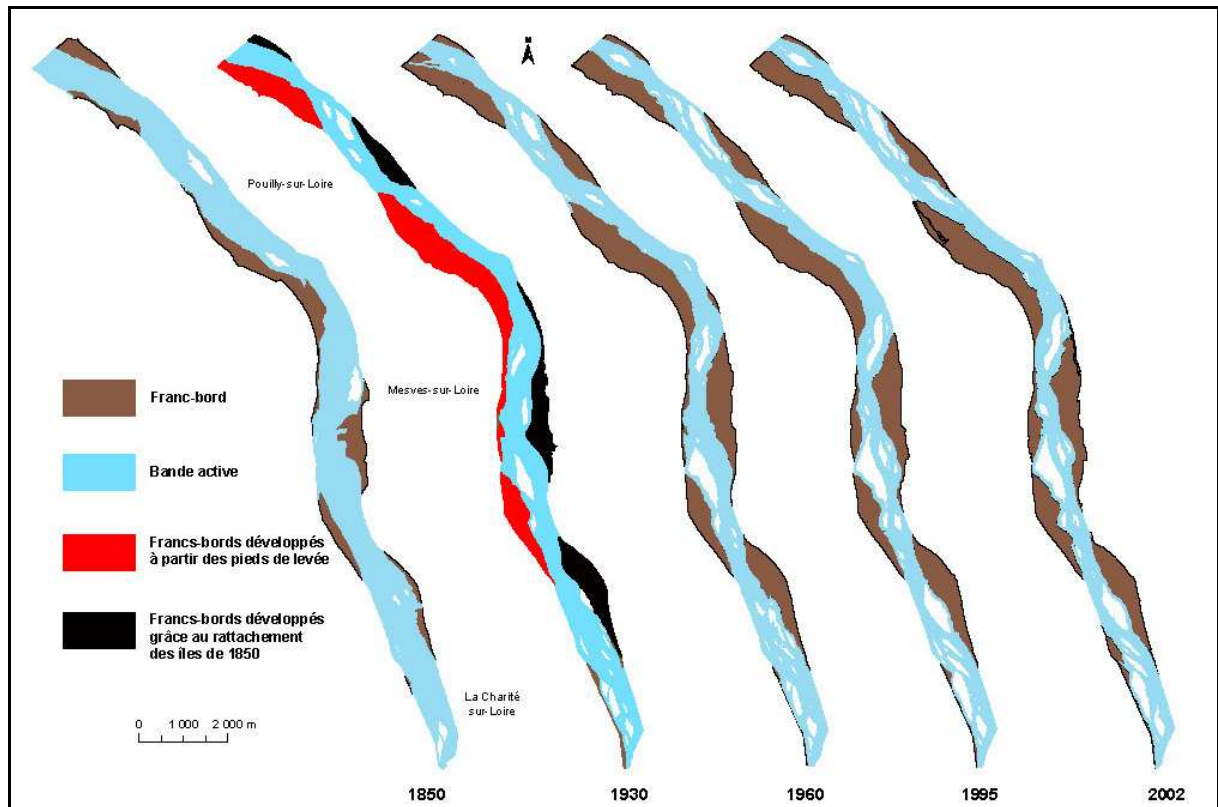


Figure 99 – Evolution des francs-bords du Site Atelier 3.

En l'espace de 7 ans, nous avons pu donc relever une nouvelle tendance dans l'évolution du système en anabranches de cette Loire des îles. La Loire semble donc être dans une nouvelle phase importante de son histoire. Nous prenons toutefois conscience que le pas de temps est trop court et qu'il est encore trop tôt pour déterminer définitivement un seuil d'évolution, il faudra attendre à moyen terme pour valider ou non cette tendance.

- La forte présence des micro-îlots et des îlots renforce une nouvelle fois les résultats. La réduction de la bande active se poursuit au profit des francs-bords et de la végétalisation des chenaux secondaires. Ces îlots se localisent préférentiellement en effet au sein de ces chenaux secondaires, annonçant par là une phase de végétalisation intensive de ces bras. Le nombre croissant de ces micro-îlots illustre très bien ce phénomène : de 1995 à 2002 nous sommes passés de 93 à 123 formes insulaires.

Le fort de taux de croissance des îles entre 1995 et 2002 correspond à une forte végétalisation des bras secondaires. Toutefois la surface totale des îles décroît entre 1995 et 2002 (-0,02 % par an du lit fluvial) car ces îles supplémentaires sont des micro-îlots (donc

de petite surface : < 4000 m²). Il faut ajouter que des îles ont connu une forte végétalisation du bras secondaire qui les séparait de la rive et qu'elles n'appartiennent plus au « monde » des îles mais à celui des francs-bords. Donc il y a une diminution de la surface occupée par les îles au profit des francs-bords qui connaissent eux une très forte croissance : +0,47 % par an du lit fluvial (secteur amont Lac et Passy). Il s'agit d'ailleurs du plus fort rythme annuel d'évolution par rapport au corridor fluvial enregistré pour un type de forme fluvial.

Au regard de notre analyse spatiale, les îles peuvent être caractérisées, au fil de ces 150 ans de suivi et tout particulièrement sur ces 7 dernières années, comme des stades géomorphologiques intermédiaires par excellence. Les formes insulaires les plus récentes sont apparues en effet dans des sites en phase de « métamorphose » ou dans des situations de déséquilibres : franc-bord en voie d'extension, chenal en voie de comblement, végétalisation intensive des bras secondaires. Les îles indiquent toujours des zones de sédimentation active dont elles bénéficient jusqu'à atteindre un seuil d'évolution qui les contraint à se stabiliser ou à disparaître par rattachement à un franc-bord. **L'île est à notre sens un traceur géomorphologique de la métamorphose fluviale.**

2). Progression de la végétation sur 150 ans

a). Evolution de la végétation du Site Atelier 3

- L'approche géomorphologique se complète par une étude de l'évolution de la couverture végétale au sein du lit. Pour le pas de temps 1850-1930, la couverture végétale n'est pas aussi bien détaillée que la carte de Coumes, aussi nous préférons rester, pour la végétation, sur le pas de temps 1850-1960 (Figures 100, 101 et 102). Ainsi, en parallèle à l'évolution morphologique du lit et de ses formes, la couverture végétale se modifie considérablement.

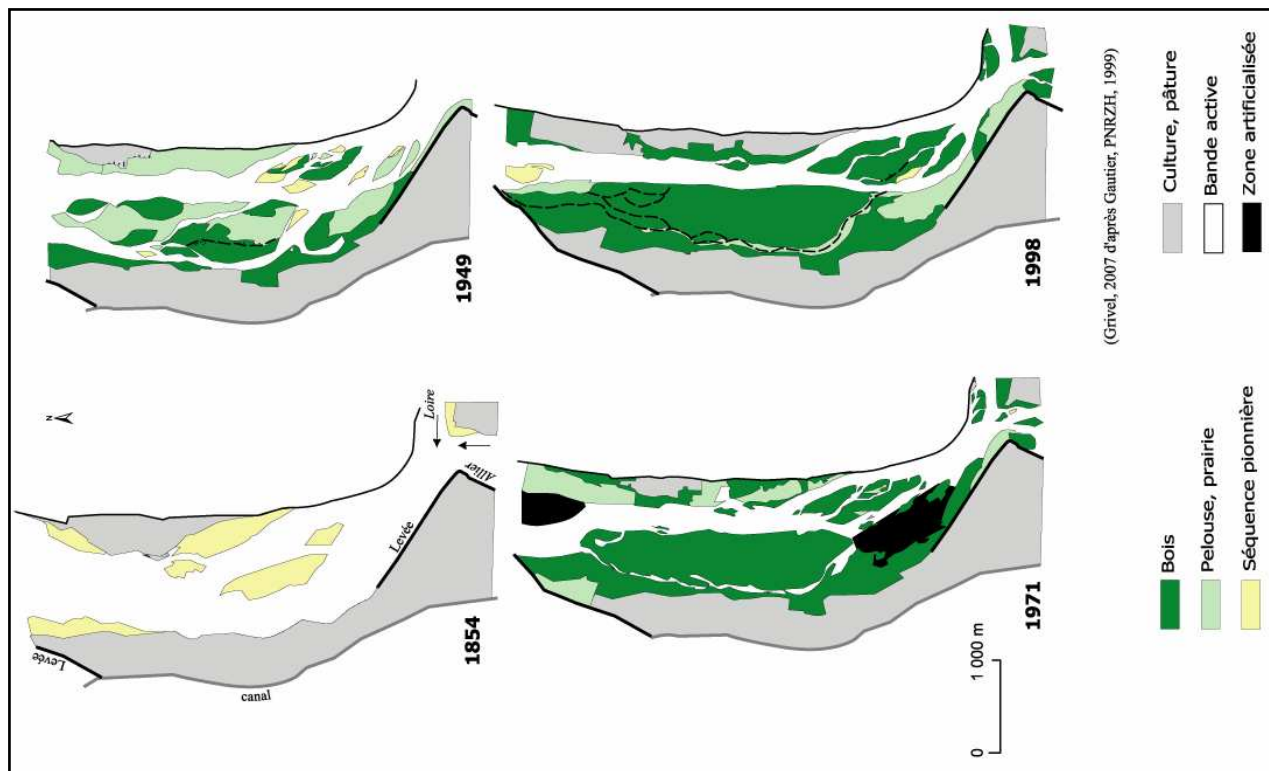


Figure 100 – Cartographie diachronique de la couverture végétale du Site Atelier 1 depuis 1850.

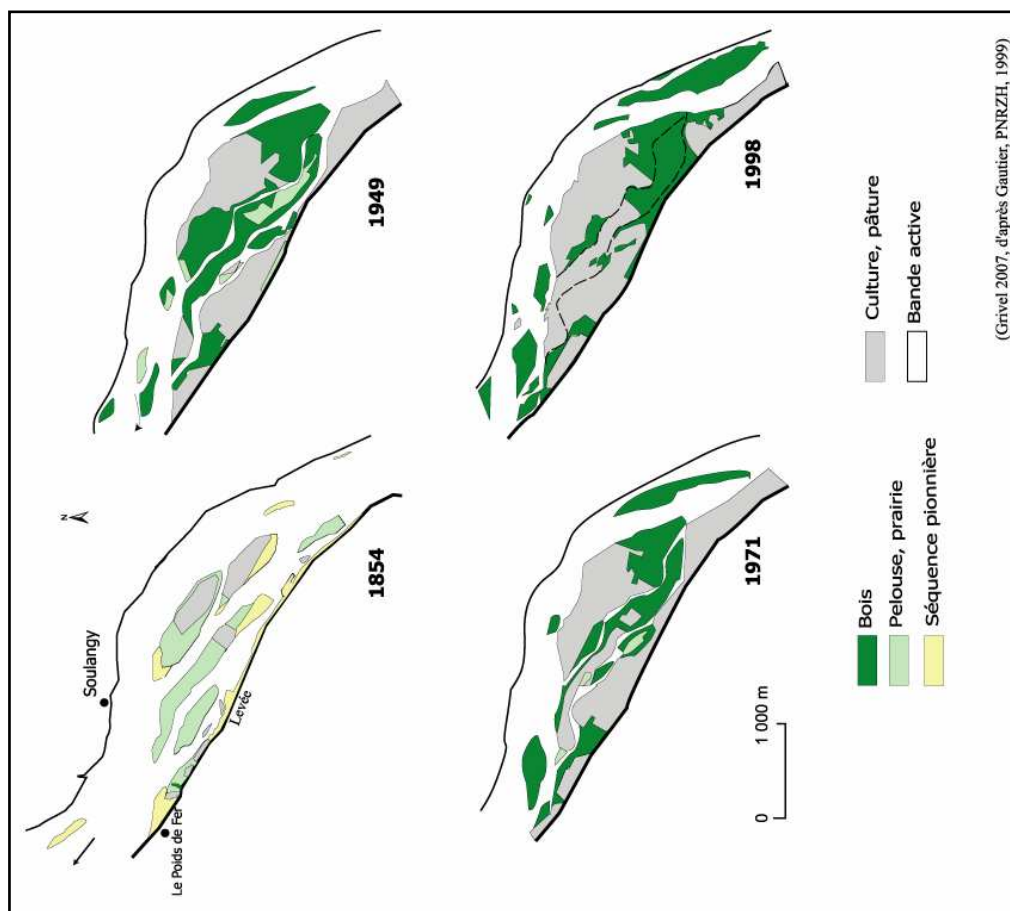


Figure 101 – Cartographie diachronique de la couverture végétale du Site Atelier 2 depuis 1850.

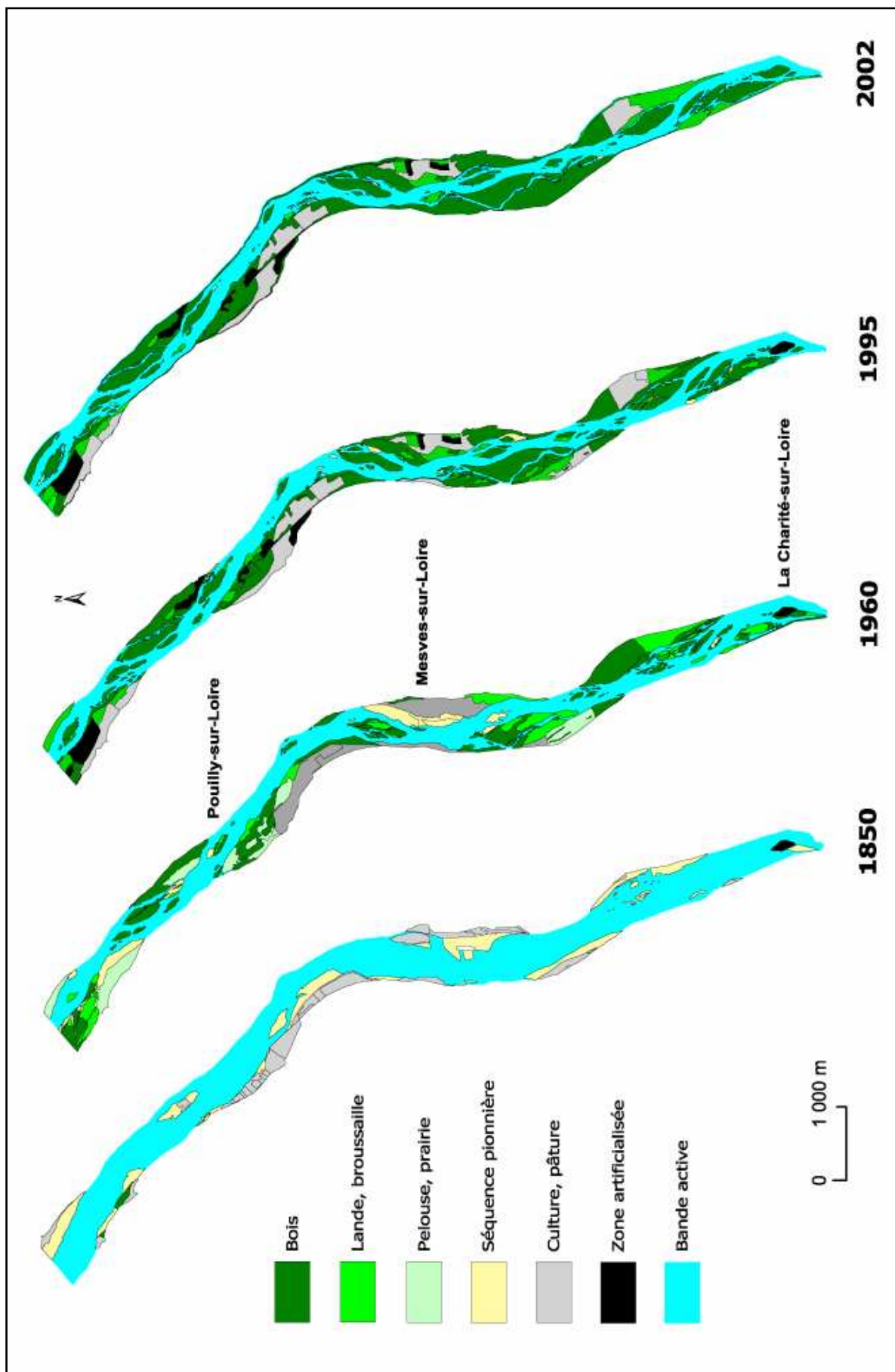


Figure 102 – Cartographie diachronique de la couverture végétale du Site Atelier 3 depuis 1850.

Les boisements en 1850 représentent des surfaces quasi négligeables. Les îles et les marges du fleuve sont occupées essentiellement par les séquences pionnières à jeunes saules et peupliers; les osiers représentent en effet 60 % de la surface des îles et 50 % des francs-bords. Ces jeunes saules poussent spontanément sur les bancs sableux et trouvent idéalement leur place dans cette région à dominante agricole. L'osier servait en effet à la fois à la fabrication de paniers et de liens de ligature pour les vignes de la région (coteaux de La Charité, Pouilly et Sancerre). Les cultures et pâtures occupent le reste des surfaces des îles et francs-bords : les sociétés humaines utilisent alors grandement le lit de la Loire. Aussi, en l'espace d'un siècle, l'abandon de ces formes fluviales par les riverains entraîne une modification des cortèges floristiques.

Entre 1850 et 1960, **le couvert forestier s'accroît à un rythme de +0,17 % du lit par an et conquiert 61 % de la superficie des îles et 59 % des francs-bords** (Figure 103). Le rythme est contrasté spatialement, puisque les bois progressent de +0,06 % par an sur les îles et de +0,23 % sur les francs-bords.

Les prairies et pelouses progressent annuellement de +0,07 % du lit et les landes de +0,09 % (dans les deux cas, essentiellement sur les francs-bords de Herry et de Mesves).

• ***Progression accélérée de la forêt alluviale***

Entre 1850 et 1960, le rythme d'extension spatiale de la forêt était +0,17 % du lit par an, en parallèle à une forte part de la végétation pionnière et intermédiaire (pelouses et prairies). Au cours des 35 années suivantes, ce **rythme annuel est beaucoup plus élevé : de l'ordre de +0,40 % du lit**. En 1995, 89 % de la surface des îles et 45 % des francs-bords sont boisés. Cette évolution s'accompagne d'une réduction des surfaces en pelouses et prairies (perte de 0,23 % du lit par an), ainsi que des séquences pionnières (saule et peuplier, -0,13 % du lit par an). La lande, évoluant vers les stades forestiers se réduit de 0,09 % du lit annuellement. Ceci traduit bien la tendance des milieux : fermeture progressive des îles et francs-bords.

De 1995 à 2002, la progression de la forêt alluviale reste modeste (+0,03 % par an). Ce ralentissement de la progression de la couverture arborée montre une certaine stabilité des îles arborées au cours de ces 7 dernières années. Mais ce constat renforce tout de même la

dynamique enclenchée par ce type de formation végétale : la place prédominante de la forêt alluviale dans le paysage fluvial. Il faut essentiellement noter que la part des stades pionniers a nettement augmenté entre 1995 et 2002 (4,5 fois plus importante que 1995). Cela est à mettre en relation avec **la progression observée des flots et micro-flots dans les bras secondaires qui sont constitués de ces séquences pionnières.**

Un dernier point mérite d'être souligné : les surfaces cultivées et pâturées ont légèrement progressé de 56 ha (+0,09 % du lit par an). Ceci est lié à une politique volontariste de réinstauration de certaines pratiques agro-pastorales notamment par la voie des Conservatoires d'Espaces Naturels (entretien du franc-bord d'Herry en rive gauche, pâturage sur le franc-bord de Mesves-sur-Loire en rive droite). Contrairement au Site Atelier 3 (Figure 102), les zones pâturées et cultivées se sont largement maintenues dans les Sites Ateliers 1 et 2 (Figure 100 et 101). Il semble en effet que les sites de Cuffy (rive gauche du Bec d'Allier) et de Soulangy possèdent un passé agricole très fort au sein même du lit de la Loire. Ceci peut s'expliquer par la présence ancienne des îles qui ont joué un rôle majeur dans la colonisation agricole du lit mineur par les sociétés. Nous débattons de ce point très intéressant dans la partie consacrée aux relations Sociétés-Milieus. Il paraît donc exister au sein même de l'hydrosystème Loire des contextes d'évolution locaux bien différents d'un site à l'autre. Ceci incite à première vue à relativiser les évolutions générales.

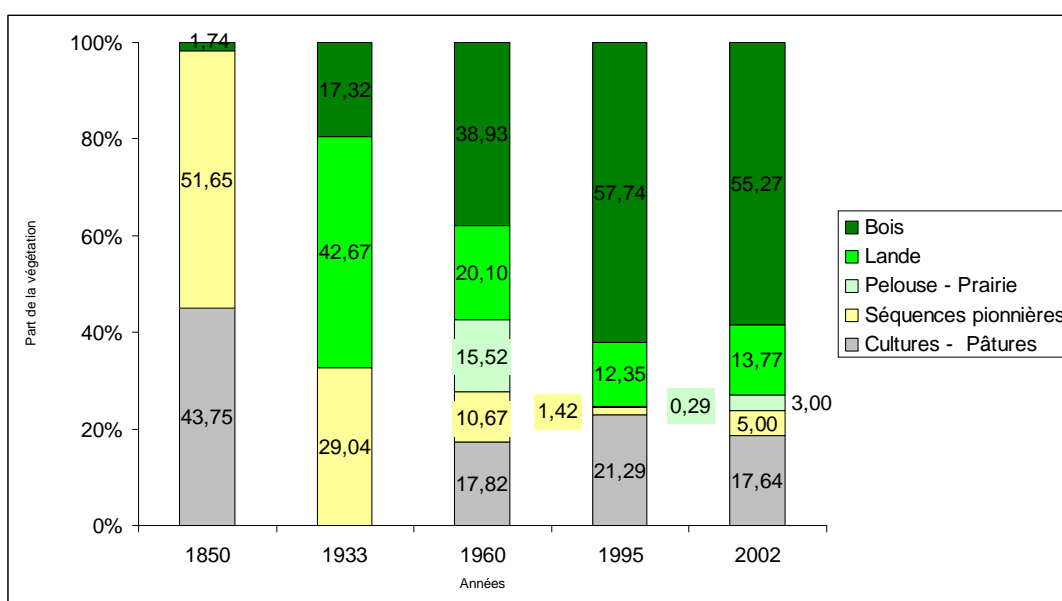


Figure 103 – Progression de la couverture végétale de 1850 à 2002.

b). Dynamique de progression

Le dynamisme de la végétation est en fait très lié au type de modèle d'évolution des formes fluviales. La végétation ligérienne constitue un excellent indicateur à la fois de l'âge de la forme fluviale qu'elle colonise, et des modes de formation qui ont façonné cette même forme. Selon les diverses phases d'évolution de telle ou telle forme la couverture végétale se décline différemment et reflète l'état d'avancée de la forme dans son modèle d'évolution. **La structure de la végétation est étroitement associée à l'origine de la forme et à son modèle d'évolution.**

Ainsi nous avons relevé différentes dynamiques végétales sur les îles et les francs-bords.

- **Des cortèges floristiques suivant un axe de migration de certaines îles** (Figure 104). Il existe un gradient amont-aval de l'âge des cortèges floristiques à mettre en relation avec les processus érosion-sédimentation s'exerçant sur certaines îles. Il apparaît qu'une végétation pionnière s'installe sur des bancs fraîchement déposés suite à l'érosion par exemple d'une tête d'île. Et à mesure que l'on suit l'axe méridien d'amont en aval de cette île, on constate que la couverture est de plus en plus jeune. On trouve en tête d'île des cortèges de bois dur qui sont remplacés vers l'aval par du bois tendre, de la lande et pour arriver en queue d'île avec une végétation pionnière qui en grandissant donnera une forêt à bois tendre. La répartition spatiale de la couverture végétale sur une telle île montre parfaitement la place de la dynamique fluviale dans le rajeunissement de certaines parties.
- **Une répartition floristique axée autour d'anciens bras colmatés** (Figure 105). Sur certaines îles et certains francs-bords, les différences de couverture végétale indiquent la présence d'anciens bras. Leur colmatage s'est réalisé à une certaine période mais la dynamique végétale peut permettre de la déterminer.

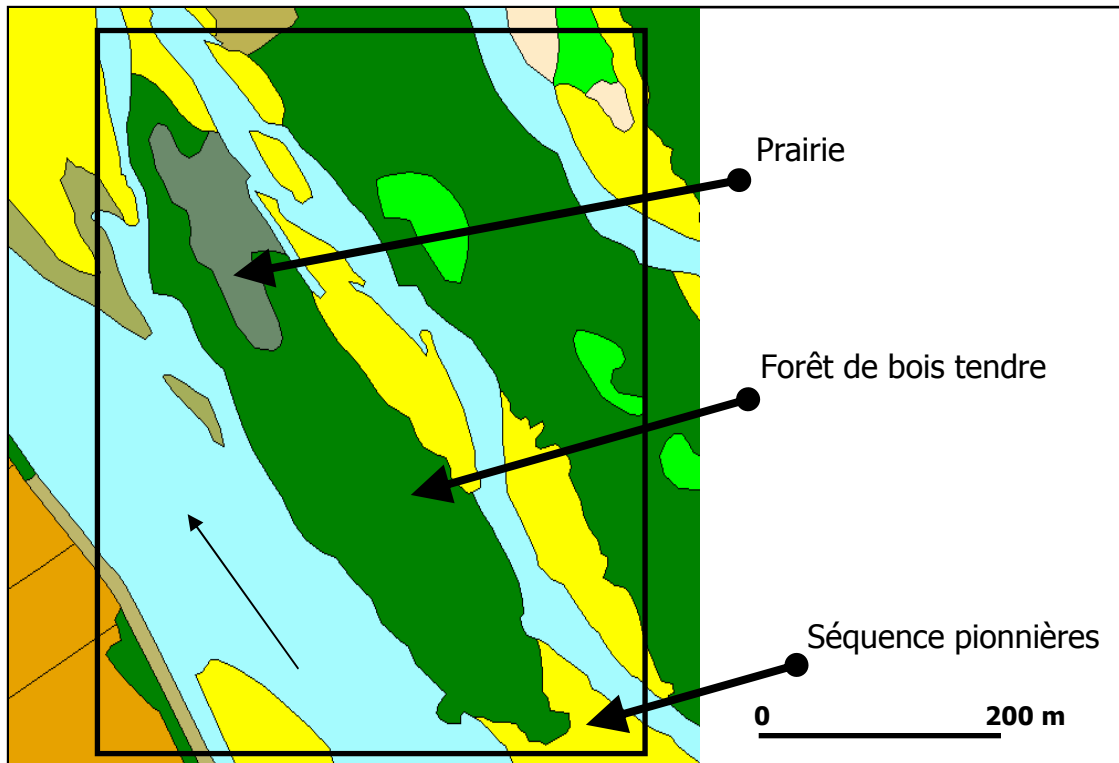


Figure 104 – Dynamique végétale sur une île subissant érosion en tête et sédimentation en aval.
Site des Loges (SA 3).

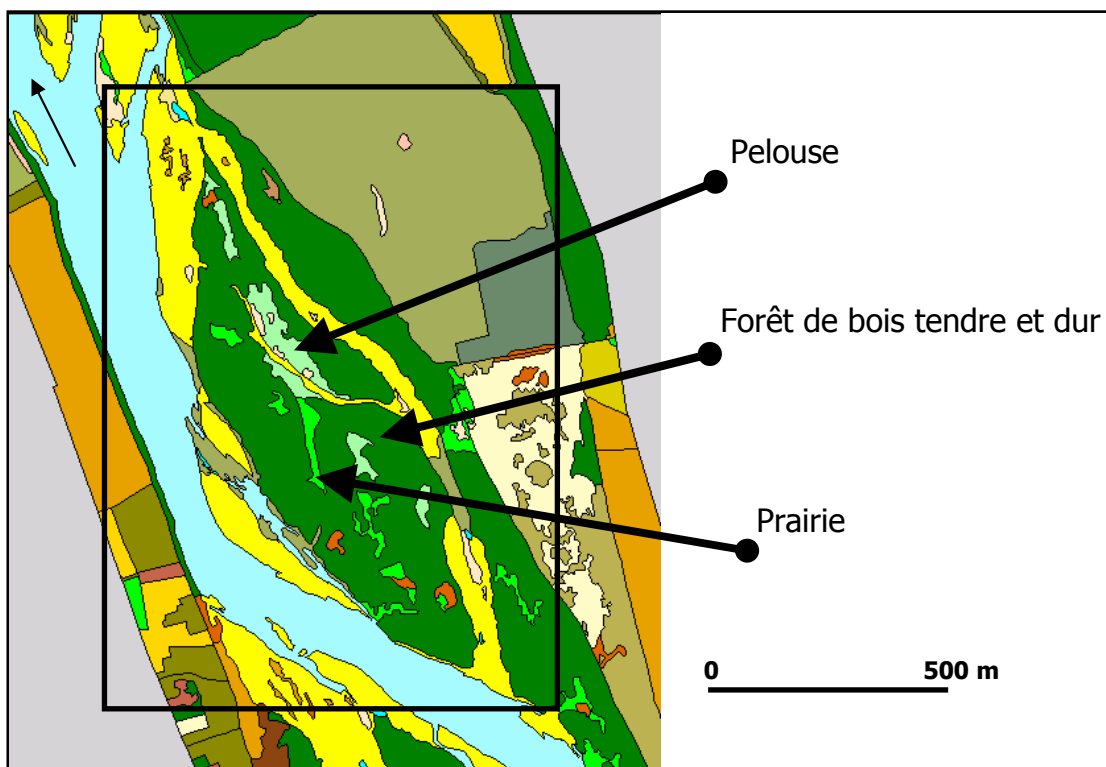


Figure 105 – Dynamique végétale autour des bras morts d'une même île.
Site de la Pointe (SA 3).

- Un patchwork floristique diversifié sur les îles devenus francs-bords **anciennement cultivés et pâturés** (Figure 106). Les activités humaines parviennent encore à maintenir une grande diversité de couvert végétal sur des francs-bords accessibles et hérités de pratiques ancestrales. Les francs-bords encore cultivés ou pâturés l'ont été très anciennement. Cela se vérifie dans tous les sites ateliers de la Loire moyenne, et encore plus sur les sites 1 et 2. La dynamique végétale est donc fortement influencée par les activités humaines. C'est dans ces secteurs maintenus par les sociétés humaines que l'on trouve la plus grande diversité végétale.

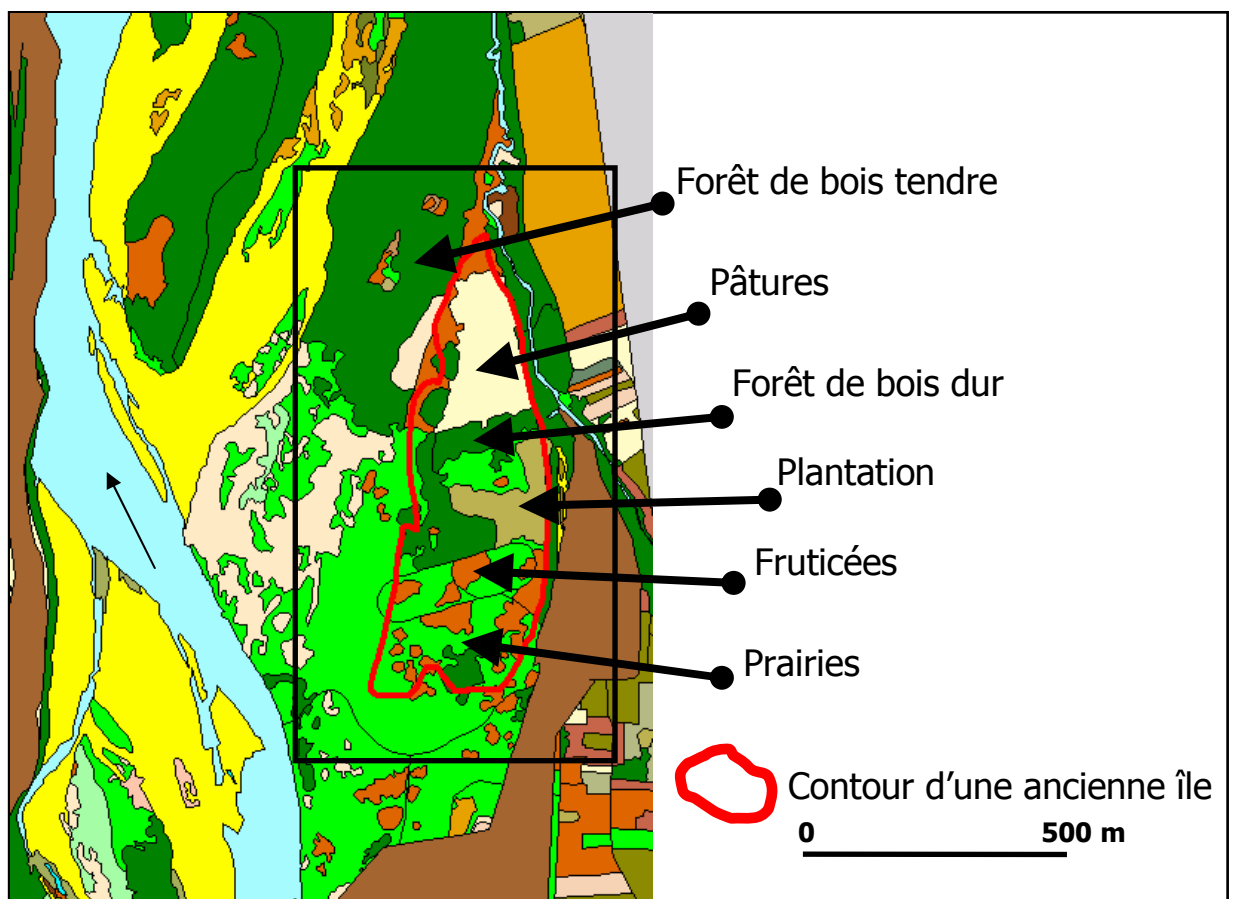


Figure 106 – Dynamique végétale sur un franc-bord. (Mesves-sur-Loire). Cette mosaïque végétale est fortement maintenue par une activité agro-pastorale, dès le 19^{ème} siècle, installée sur une ancienne île. La forêt alluviale trouve une place en dehors de cette zone entretenue.

C Les modèles d'évolution des formes fluviales

1). Typologie d'évolution des îles

Nous nous sommes intéressés aux modèles d'évolution propre aux îles et aux francs-bords puisque nous avons mis en évidence leur forte extension dès le début du 20^{ème} siècle. Comment se forme une île ? Comment évolue-t-elle ? Ces questions de fond peuvent permettre de mieux comprendre ce qui caractérise la Loire des îles actuellement. A partir des modèles d'évolution des unités fonctionnelles centrales du patron fluvial, nous pouvons émettre également des hypothèses quant à l'évolution de ce type d'hydrosystème fluvial.

a). Les îles : les formes du réajustement fluvial

Au cours de notre pas de temps d'étude, de plus de 150 ans, nous avons pu distinguer de grandes phases de développement des îles (Figure 107). Les îles du lit actuel se sont formées au cours du 20^{ème} siècle mais ne sont pas toutes issues de la même génération et surtout reflètent de grandes étapes de formation de la Loire des îles depuis 1850.

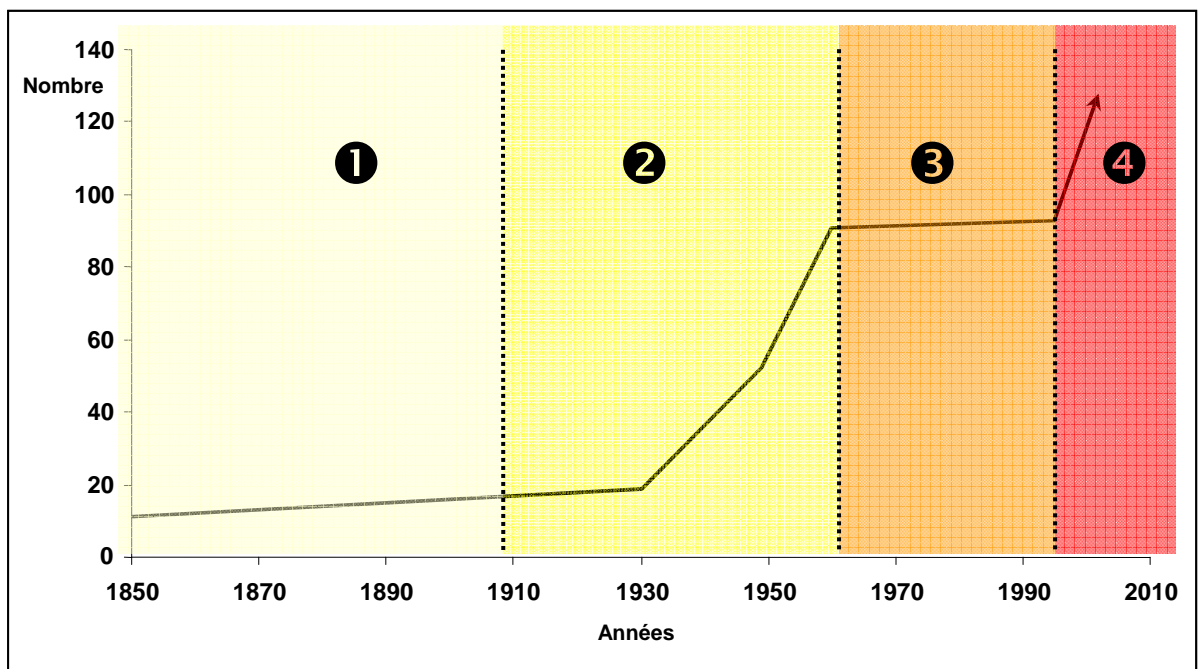


Figure 107 – Evolution du nombre d'îles depuis 1850 et mise en valeur des grands seuils temporels.

- ❶ Présence très modeste des îles
- ❷ 1^{ère} génération d'îles
- ❸ 2^{ème} génération avec stabilisation du nombre
- ❹ Début d'une 3^{ème} génération (hypothèse)

4 seuils temporels se distinguent ainsi :

- La fin du 19^{ème} siècle se caractérise par un nombre très limité d'îles ; des îles anciennes pouvant même être bâties (comme l'île du Faubourg de La Charité) ou cultivées (toutes les îles du 19^{ème} siècle)
- Du début à la moitié du 20^{ème} siècle, un fort développement des îles se réalise (1^{ère} génération) avec une végétation spontanée : seuil marquant de 1930.
- De 1960 au milieu des années 1990, une nouvelle génération d'îles se développe en notant une relative stabilité de leur nombre. Les modèles d'évolution les plus complexes vont se développer durant cette 2^{ème} génération.
- Depuis le début des années 2000, et à l'aube du 21^{ème} siècle, une nouvelle poussée d'îles, pour l'instant des micro-îlots, s'enregistre et révèle une végétalisation accélérée du lit de la Loire des îles.

A ces seuils temporels, nous rapprochons l'évolution du type d'îles. Les représentations graphiques semblent se corrélérer à ces grandes étapes de formation de la Loire des îles. En effet, la place importante des micro-îlots et des îlots atteste du fort degré de végétalisation du lit (Figure 108).

- Nous constatons une accélération du rythme de formation des îles depuis le début du 20^{ème} siècle. Si cette progression est d'abord très modeste (avec un taux de croissance de l'ordre de +0,04 % du lit fluvial entre la fin du 19^{ème} siècle et le début du 20^{ème} siècle), elle s'accélère avec des taux 4 fois plus importants dès 1930 (+ 0,15 % du lit fluvial). Ce taux de croissance augmente un peu après 1960 (+ 0,17 %). Des seuils temporels peuvent être ainsi définis au regard à la fois de ces taux de croissance par rapport au lit fluvial et du nombre d'îles.

- Le modèle type de formation des îles est celui déjà analysé par B. Bomer (1972). Il faut d'abord un banc colonisé par une végétation pionnière. Les espèces colonisatrices sont le Peuplier noir et le Saule (trois espèces de saules). Ces deux genres pionniers vont déterminer, à travers leur croissance verticale, le degré de stabilité du banc. Dès que le banc a développé une couverture végétale homogène et stabilisée par les systèmes racinaires, il peut alors rentrer dans la classe des formes insulaires, quelque soit sa taille.

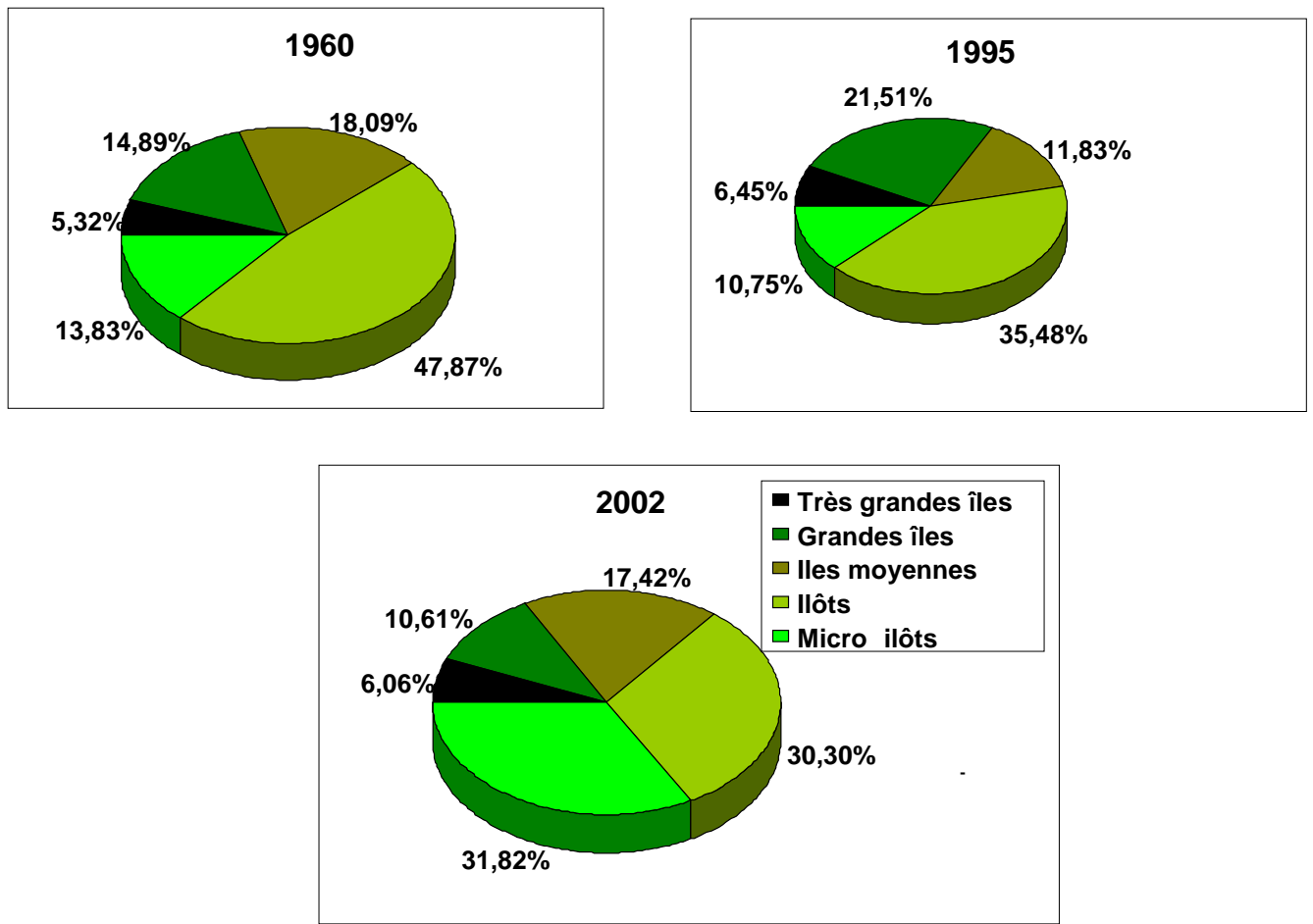


Figure 108 – Evolution de la part de chaque type d'île depuis 1960.

Le plus souvent, et nous l'avons observé pour 90 % des îles, c'est d'abord un micro-îlot qui donnera ensuite, après plusieurs années, un îlot. Cet îlot va devoir remplir deux conditions pour pouvoir s'étendre et passer à un stade de formation supérieur, en devenant par exemple une île moyenne. Il doit d'abord atteindre un niveau d'exhaussement suffisant par rapport à la ligne d'étiage pour permettre à sa couverture végétale de se développer sans trop de contraintes liées à la dynamique fluviale. Cette végétation va jouer son rôle de piégeage en sédiments par effet de peigne et permettre le développement vertical de l'îlot (Figure 109). La deuxième condition est d'avoir justement permis le développement d'une couverture arbustive et arborée suffisamment avancée (+ de trois mètres) pour stabiliser l'ensemble de l'îlot et subir moins fortement les forces mécaniques de l'érosion fluviale. Une fois seulement ces deux conditions remplies, l'îlot va pouvoir s'étendre par le jeu des processus érosion-sédimentation et passer alors au stade de l'île moyenne.

Il faut environ 30 ans à un micro-îlot pour devenir une île moyenne par ce processus. 72 % des îles actuelles se sont formées par ce processus.

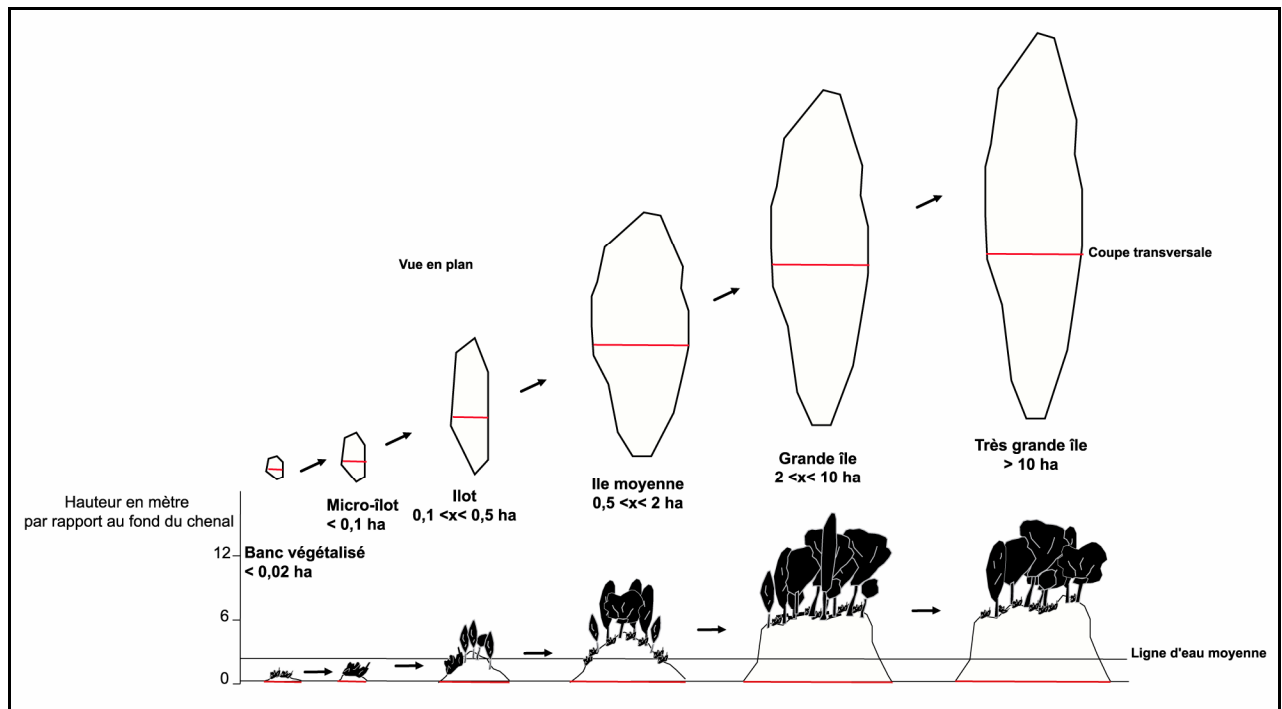


Figure 109 – Schéma-type de formation et de développement d'une île.

Du banc végétalisé à la très grande île, ce type d'unité fonctionnelle passe de grandes phases d'évolution, dont les processus hydro-sédimentaires sculptent latéralement et verticalement la morphologie.

- Une autre possibilité de formation de formes fluviales insulaires se réalise par le démantèlement d'un franc-bord (Figure 110). En effet, nous avons observé un seul cas de formation d'îles issus de la déstructuration d'un franc-bord en plusieurs parties entre 1960 et 1995 (franc-bord de Couargues en rive gauche, à l'aval de Pouilly-sur-Loire). Les parties ainsi issues de ce franc-bord sont séparées par un réseau de chenaux étroits qui donnent alors le caractère d'insularité à ces nouvelles formes. Le franc-bord original disparaît totalement, c'est simplement une partie fragile de sa structure qui est alors reprise par la dynamique fluviale. C'est un exemple de formation d'île tout à fait original qui a pu ainsi être relevé au fil des 150 ans d'observation du fleuve.

Cependant au vu de notre analyse spatiale nous avons observé que les îles ne rentrent pas toutes dans le même schéma d'évolution et leurs modèles sont bien plus complexes qu'il

n'y paraît, surtout lorsque les îles ont atteint un certain niveau de maturité dans l'âge et dans leur dimension.

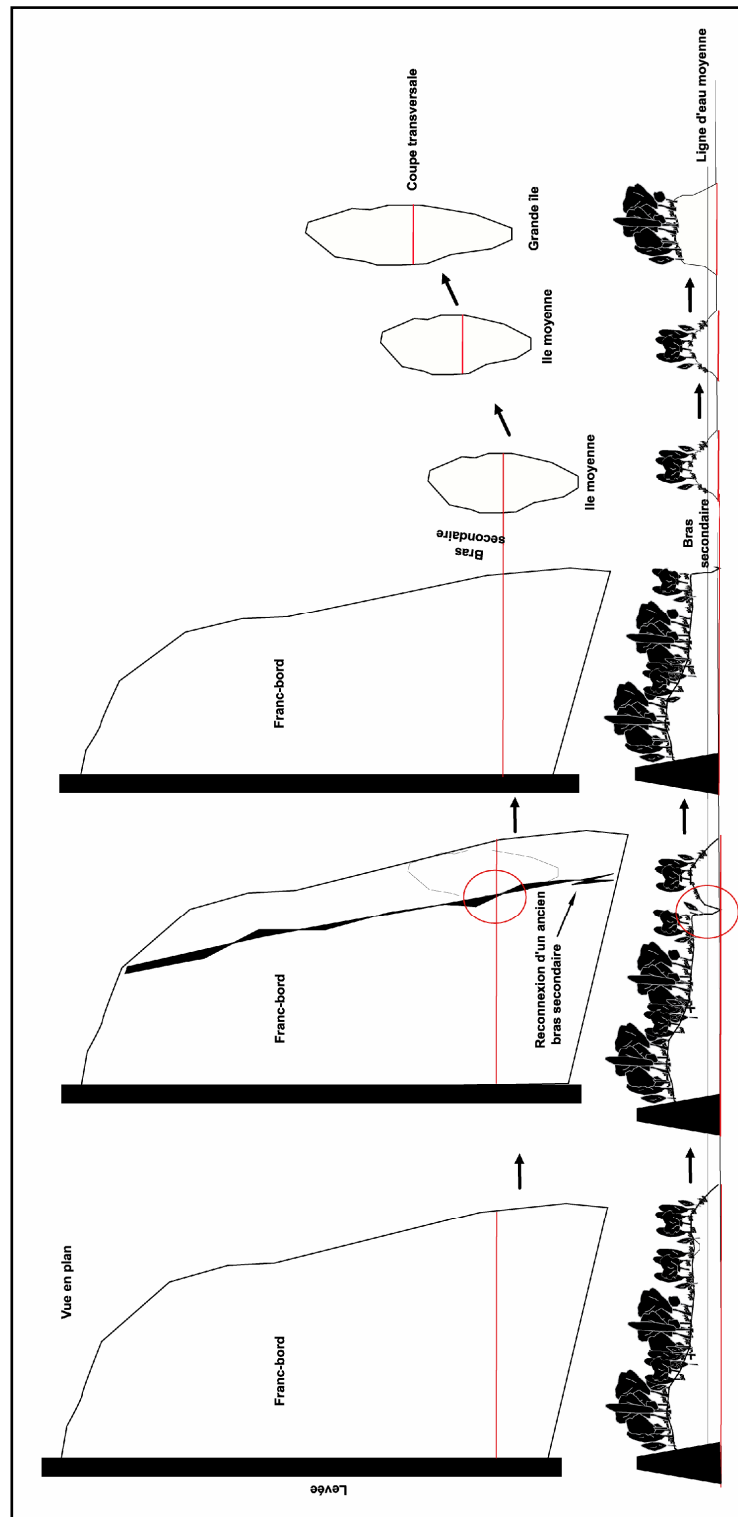


Figure 110 – Schéma-type de formation et de développement d'une île à partir du démantèlement d'un franc-bord.

La Loire érode le franc-bord et, à travers un bras mort, réinvestit cette unité fonctionnelle. Sous l'effet de l'érosion fluviale, une partie du franc-bord se déconnecte et devient par ce phénomène une nouvelle forme, une île, laquelle va suivre son schéma d'évolution propre.

b). Modèles d'évolution des îles

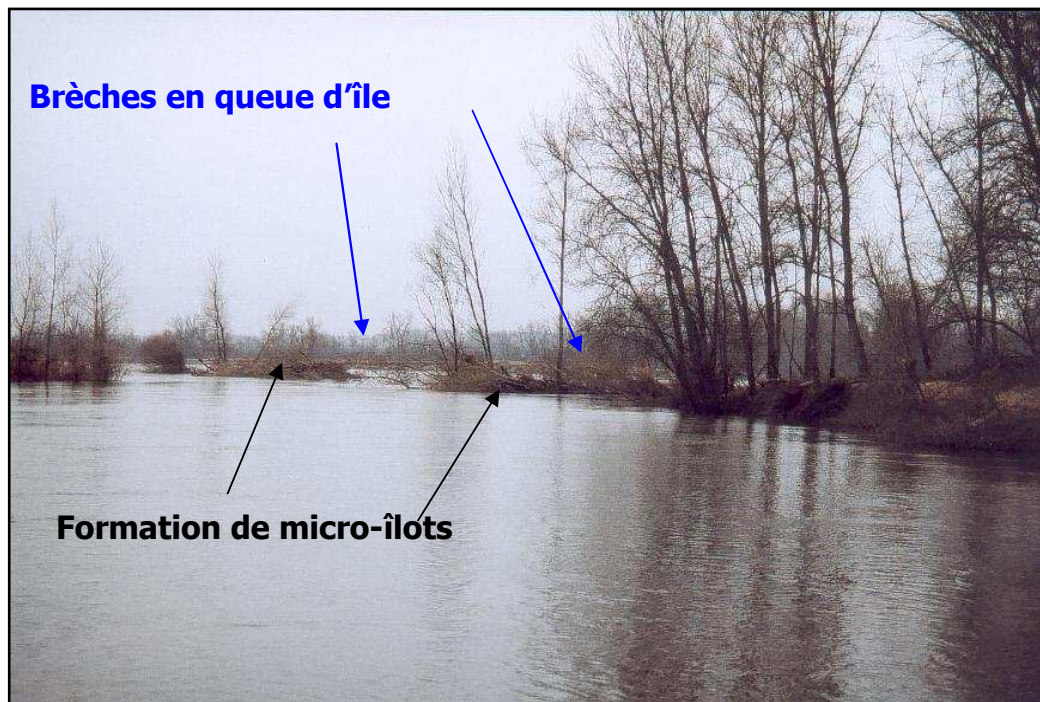
L'analyse de la couverture végétale et de l'évolution générale des mésoformes fluviales invite à approfondir les modes de formation et d'évolution des îles. Nous avons pu en effet dresser une classification des îles en fonction de leur dynamique spatiale et temporelle.

Pour le cas de la Loire, nous pouvons mieux cerner les processus sédimentaires et géomorphologiques qui régissent la formation et le développement à moyen terme des îles. Il nous a été possible de qualifier et même quantifier les différents types d'évolution de ces formes insulaires. Les îles, contrairement à ce que l'on pourrait croire, **ne sont pas des formes fixes**, mais sont l'objet, à différents niveaux, de bouleversements et de modifications : des îles disparaissent, d'autres apparaissent ; certaines se transforment, quelques-unes migrent ou encore se rattachent à des « consœurs ».

Différents scénarii d'évolution se sont ainsi noués depuis 1850, et la période 1960-2002 révèle tout particulièrement les possibilités d'évolution des unités fonctionnelles insulaires (Figure 111). C'est dans cette période que nous avons pu établir la typologie d'évolution des îles. L'identification aisée de chaque île dans le SIG a permis de suivre en effet leur évolution précise et de déterminer leurs processus dynamiques. Les différents modèles d'évolution renseignent sur les degrés de stabilité des îles.

● Démantèlement des grandes îles :

Cela concerne les grandes et très grandes îles dont la tête mais surtout la queue demeurent trop minces par rapport au chenal principal (quand la largeur du chenal principal est 50 fois celle de la queue d'île). Il en résulte une forte érosion qu'une crue de récurrence moyenne (à partir de 4 ans) peut fragiliser en créant des brèches et finir par agrandir (Photographie 19). La partie trop mince finit par se détacher entièrement de cette île et par constituer des îlots et des micro-îlots. Ces micro-formes insulaires n'en demeurent pas moins fragiles et se retrouvent en situation de précarité avancée. Cela reste tout de même un modèle d'évolution dans le cas d'un déséquilibre géométrique d'une extrémité, amont ou aval, de grandes d'îles. Cela rentre ainsi dans les processus d'érosion des îles. 1 % des formes insulaires sont actuellement concernées par un démantèlement.



Photographie 19 – La pointe aval de la très grande île du Lac subit un processus d'érosion bien avancé. Des brèches se créent permettant la fragmentation de la mince queue d'île en de multiples micro-îlots fragiles.

- **Entre apparition et disparition**

- Apparition

1960-1995 se caractérise ainsi par une **forte part de nouvelles îles, puisque 70 % des îles de 1995 ont moins de 35 ans**. Il s'agit d'îlots et de micro-îlots (en moyenne 0,08 ha) évoluant à un rythme de 0,001 % du lit par an (Figure 112 et photographie 20).

- Disparition

La classe « disparition » ne concerne pas ces îles qui ont été rattachées soit à un franc-bord soit à d'autres îles. Il s'agit des îles dont la surface a été totalement effacée du lit fluvial. La surface des îles nouvelles reste toutefois supérieure à celle des îles disparues ; **la proportion étant que pour une île disparue, treize apparaissent (pour la période 1960-1995)**.

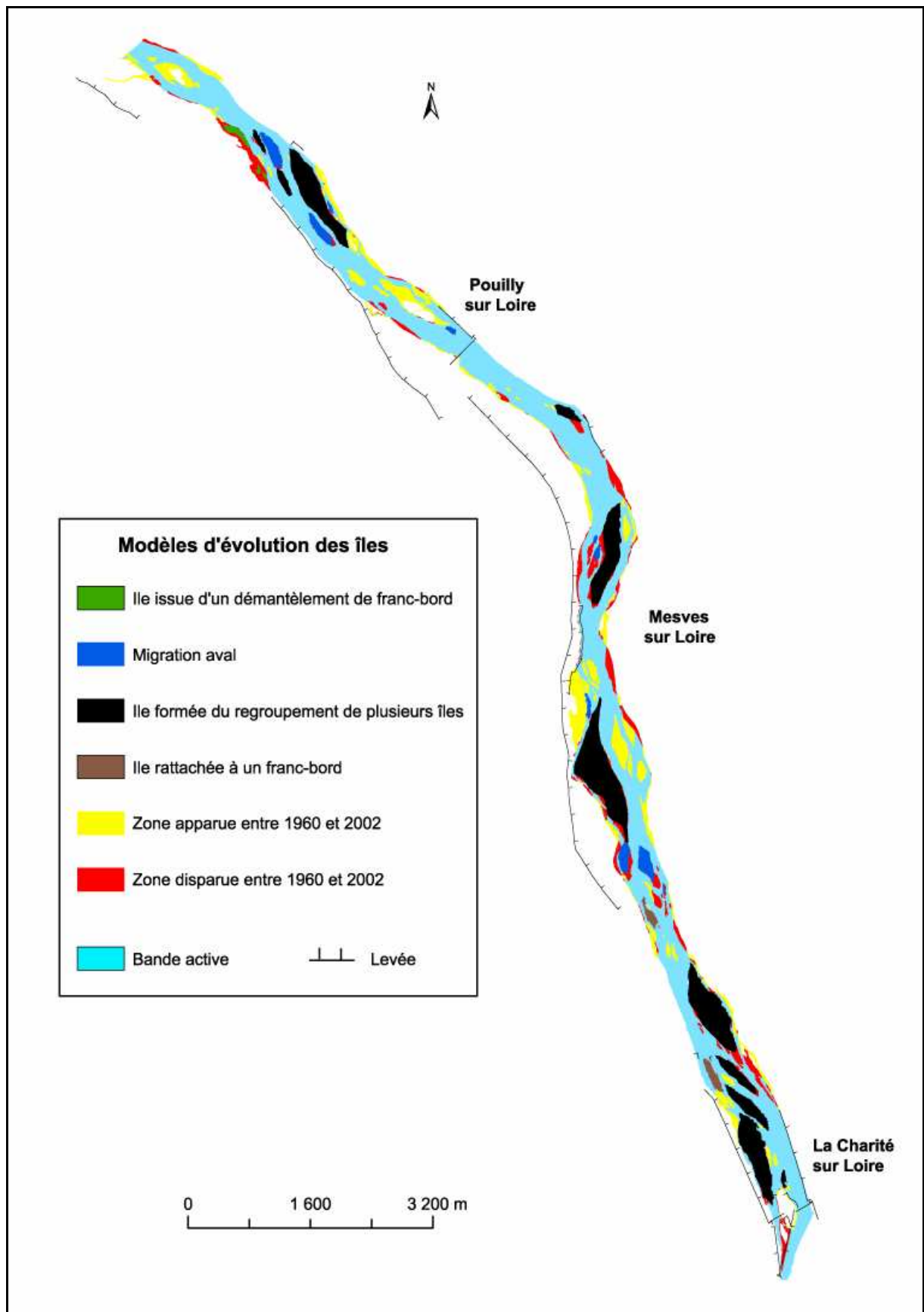


Figure 111 – Spatialisation des différents modèles d'évolution des îles sur la période 1960-2002, au sein du Site Atelier 3.

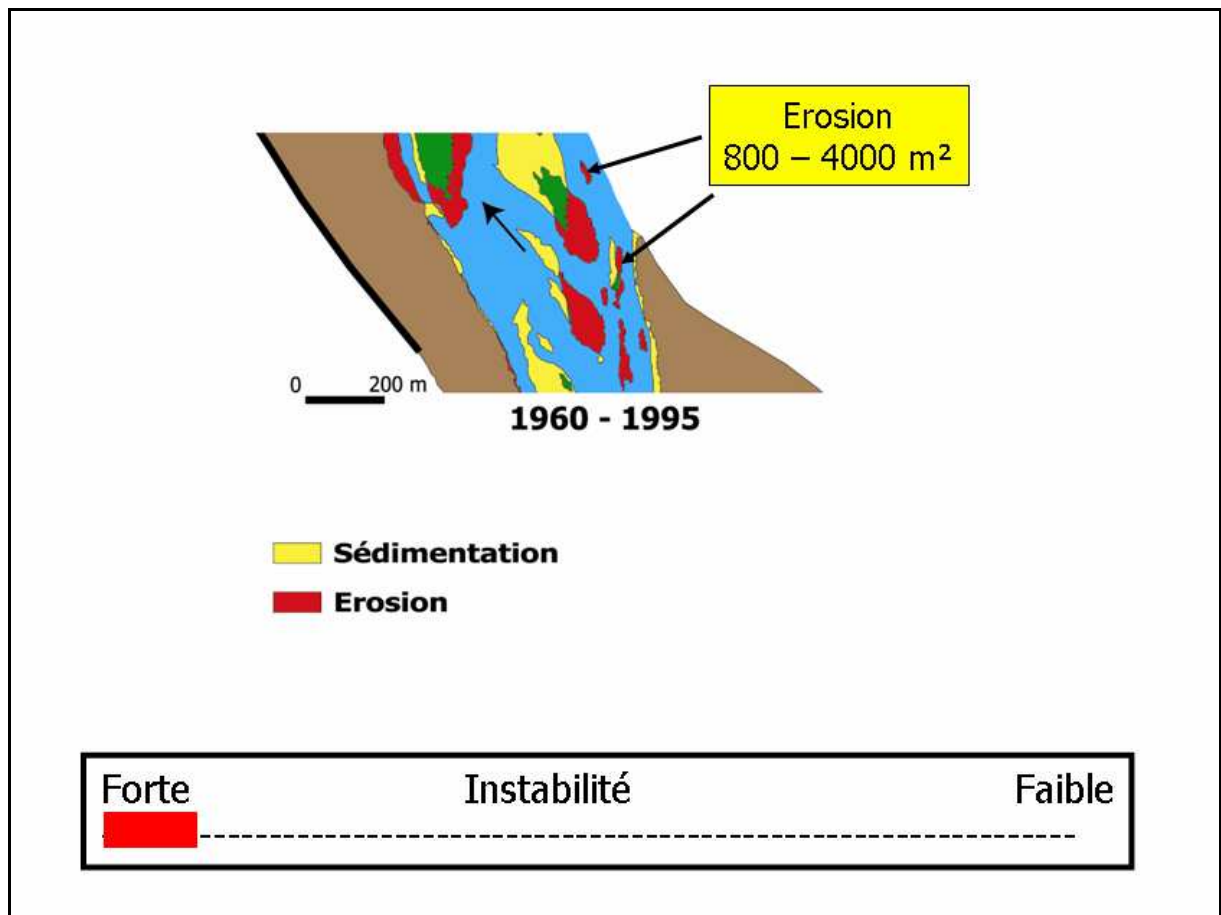


Figure 112 – Les îlots inférieurs à 0,4 ha sont les plus sensibles à l'érosion fluviale.



Photographie 20 – Îlots inférieurs à 0,4 ha.

- **La migration des îles** (Figure 113 et photographie 21)

La méthode de calcul repose sur la comparaison de la position géoréférencée de têtes et queues d'île à différentes dates. L'écart entre ces deux dates donnera une idée du déplacement de cette île : sa distance parcourue dans le lit mais également le sens. En d'autres termes, ce sont les îles qui subissent une érosion à une extrémité et une accrétion à l'autre pour au final se déplacer dans le sens d'action de ces processus.

Quand sédimentation en queue (aval) d'île > sédimentation en tête (amont) \Rightarrow
migration aval

Quand sédimentation en queue d'île < sédimentation en tête \Rightarrow migration amont de
l'île

C'est sur le pas de temps 1970-1995 que nous pouvons mettre en valeur cette dynamique. En 35 ans, 6 îles se sont déplacées vers l'aval après avoir subi de l'érosion en tête et de l'accrétion en queue. Ainsi, en moyenne **ces îles se sont déplacées de 110 mètres vers l'aval à raison de 3,1 m par an**. Les **grandes et très grandes îles** sont concernées par ce phénomène de migration. Les très grandes îles (+ de 10 ha), comme Ile de Malaga et l'Ile des Barreaux se sont déplacées respectivement de 210 et 90 mètres. Ce sont ces mêmes îles qui ont subi une forte sédimentation en queue (par accrétion aval).

Une seule île a « migré » vers l'amont (+ 45 mètres). L'Ile de Passy, la plus ancienne, a quasiment toujours conservé sa position depuis 150 ans. Son déplacement tout relatif s'explique par une extension de sa surface de plus de 50 % en amont. L'Ile de Passy demeure l'île « vestige du 19^{ème} siècle » sans urbanisation directe comme pour le Faubourg de la Charité. Mais, cette île a bénéficié de la protection d'abri offerte en amont par la chevrette de La Charité. Mais à présent elle ne peut presque plus être considérée comme une île car l'état de végétalisation est quasi continu entre la rive gauche et cette île (résultats de 1995-2002). Le chenal qui la sépare de la rive est entièrement végétalisé et fermé par un bouchon alluvial à sa connexion amont. Ceci est dû au rôle de la chevrette en amont qui ralentit les écoulements à l'arrière et permet une forte sédimentation dans les chenaux secondaires.

Ce type d'évolution insulaire montre que les formes fluviales peuvent trouver une dynamique à travers les phénomènes de sédimentation et d'érosion qui les affectent. Dès

lors que l'équilibre positif (c'est à dire quand la sédimentation est supérieure à l'érosion) est trouvé, l'île se déplace morphologiquement ou géographiquement dans le sens du processus qu'elle subit : 11 % des formes insulaires migrent actuellement.

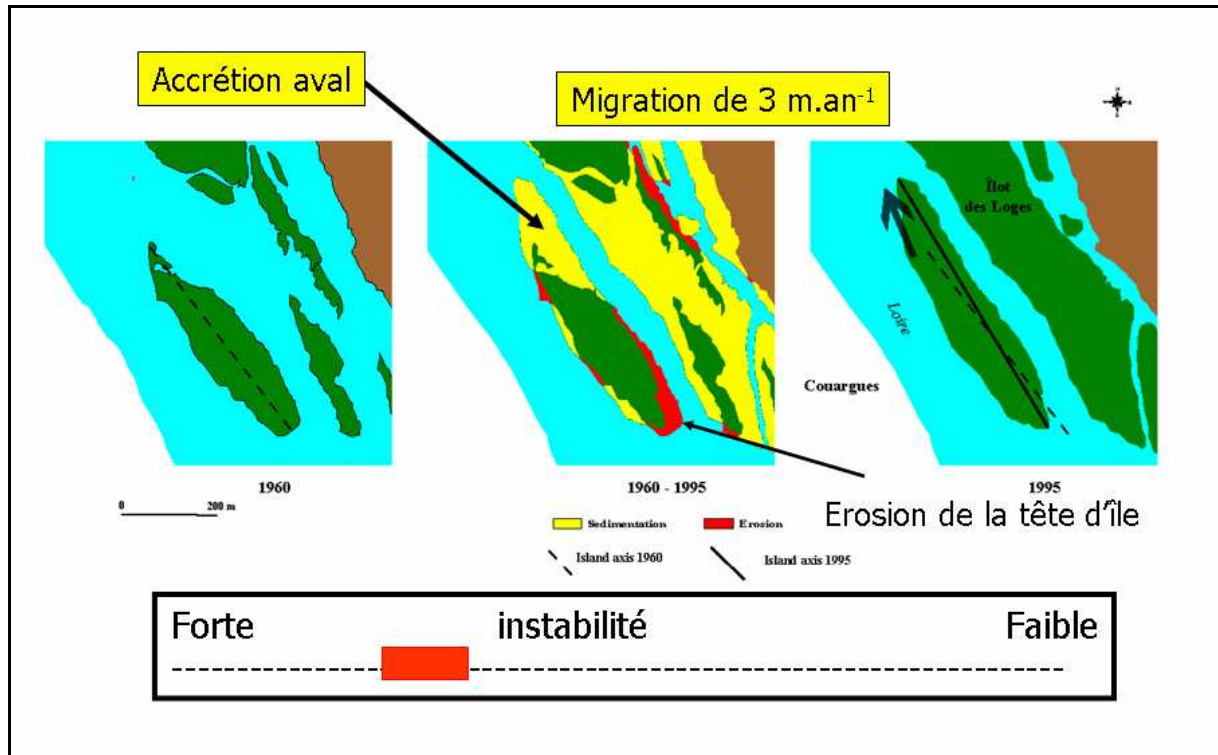


Figure 113 – Schéma de déplacement des îles migratrices.



Photographie 21 – Migration d'une île.

- **Le regroupement des îles** (Figure 114 et photographie 22)

Cette forme d'évolution concerne les îles qui, quelque soit leur taille, voient leur surface augmenter par coalescence de plusieurs autres îles. Les périodes étudiées, 1850-1930, 1930-1960 font apparaître des cas de regroupement de plusieurs îlots, mais nous préférons nous concentrer sur le pas de temps 1960-2002 lequel renseigne, de manière plus précise, sur plusieurs regroupements d'îles. 12 % des formes insulaires actuelles sont issus de ce type d'évolution.

Ainsi, deux cas peuvent être distingués :

- Une grande île à laquelle se rattachent plusieurs îlots. Ainsi, 36 îles (40 % des îles de 1960) se sont regroupées pour former ou agrandir 9 îles. Ces regroupements s'appliquent à l'extension ou à la création de très grandes îles de plus de 10 hectares. Ce sont des îles bien installées avec leur partie centrale ancienne ; elles portent quasiment toutes un nom : Ile du Pont de la Batte, Ile de Vaudrilly, Ile du Lac, Ile aux Corbeaux et Ilot des Loges.

- Plusieurs îlots se regroupent pour former une grande île. Une île remarquable de 31 ha en 1995 s'est formée de la coalescence de 11 îlots (secteur rive droite de La Pointe, commune de la Charité-sur-Loire). **Les regroupements d'îlots s'opèrent préférentiellement par comblement du chenal secondaire étroit les séparant.** Il a fallu 14 ha d'apports en sédiments pour connecter ces îlots à un rythme de 0,4 ha/an. Cette spécificité traduit la forte capacité de sédimentation amenant à rattacher les îlots par comblement des chenaux secondaires et par l'installation rapide et efficace de la végétation d'abord pionnière puis forestière. Dans les secteurs de Soulangy et de Marzy, ce modèle d'évolution s'est réalisé très récemment au détriment de très grandes îles, parfois anciennes (comme pour Soulangy). En comparaison avec le site atelier 3, les îles les plus anciennes du site atelier 2, existantes déjà au 19^{ème} siècle, ont connu une durée de vie plus longue. Cela peut signifier, et nous essayons de le comprendre dans notre analyse, que les systèmes en anabranches n'évoluent pas au même rythme. Les tendances d'évolution d'un site atelier sont rigoureusement identiques pour le cas de la Loire moyenne, mais en même temps des différences locales s'observent à travers les rythmes d'évolution. D'autres facteurs rentrent en jeu et nous pensons qu'ils sont alors plus d'ordre anthropique que physique. Des actions anthropiques ne joueraient-elles pas un rôle majeur dans l'évolution des îles et des francs-bords, et plus particulièrement sur le couvert végétal ? Nous traitons ce point plus loin dans notre analyse et essayons de coupler notre hypothèse avec des résultats déjà apportés dans le cadre du PNRZH-Loire.

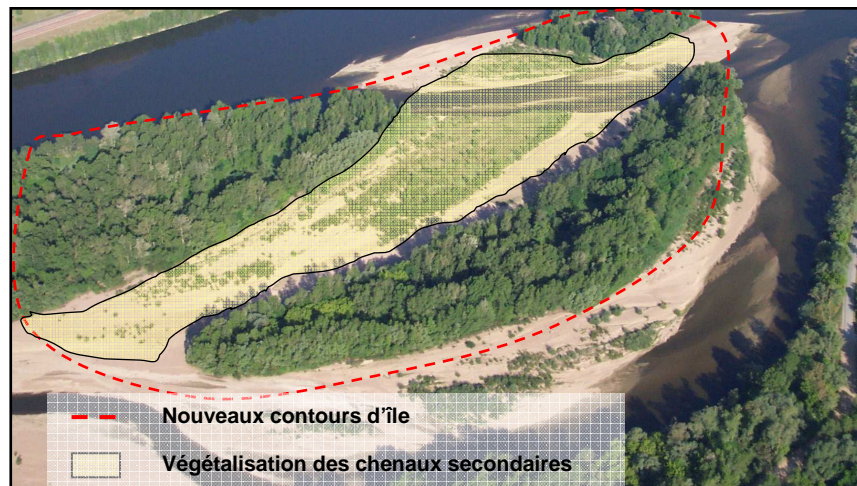
- 95 % des très grandes îles actuelles sont issus de ce type de processus d'évolution.

● **D'îles en franc-bords** : stabilisation définitive (Figure 115)

Il faut essentiellement noter que 64 % des îles de 1850 ont été rattachés à un franc-bord. **Ce mécanisme de rattachement concerne de grandes îles de 6,6 ha en moyenne**, et participent à la forte extension des francs-bords entre 1850 et le début du 20^{ème} siècle. A noter que le franc-bord, en rive droite au niveau de Mesves-sur-Loire, porte actuellement le nom de « Ile du Bas », trace de cette ancienne île de 1850 rattachée à la fin du 19^{ème} siècle (entre 1850 et 1878 environ). Sur le pas de temps 1850-1960, la tendance est au rattachement des îles en franc-bord.

Entre 1960-1995, ce processus s'est largement ralenti car seulement 10 % des îles de 1960 sont concernées par cette forme d'évolution, soit à peu près 4 ha d'îles définitivement stabilisées. Les îlots (en moyenne de 0,4 ha) sont principalement sujets à cette évolution.

En somme, nous relevons pour cette période une tendance des îlots à la stabilisation. Les petits chenaux entre îlot et franc-bord se ferment. Une nouvelle tendance s'amorce depuis 1995, et qui s'est bien affirmée en 2002. Des francs-bords réussissent encore à progresser dans leur extension latérale par ce modèle d'évolution des îles : secteur de Passy à l'aval de la Charité-sur-Loire et l'amont de l'île du Lac. Cela correspond à notre interprétation sur la forte colonisation des îlots et de micro-îlots dans les bras secondaires et qui concourt à la stabilisation de ces mêmes bras secondaires.



Photographie 22 – Ces îles sont issues de la réunion de plusieurs îlots.

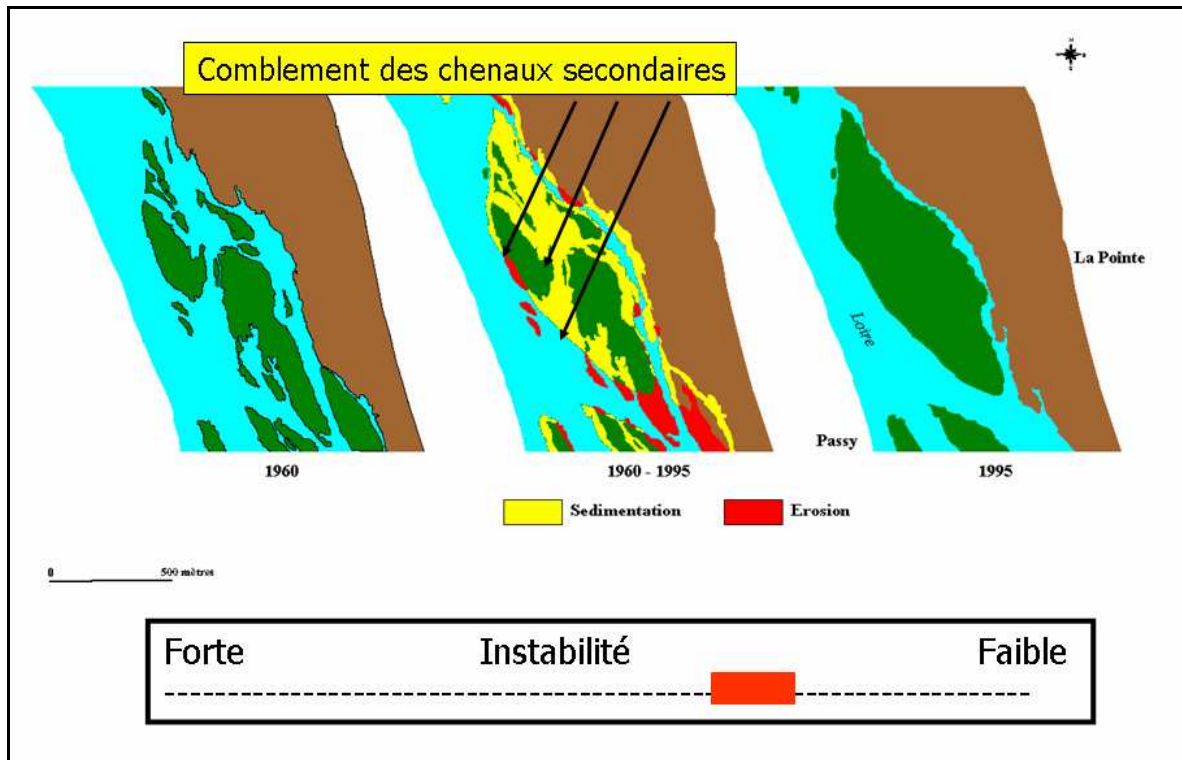


Figure 114 – Exemple de coalescence de d'îlots.

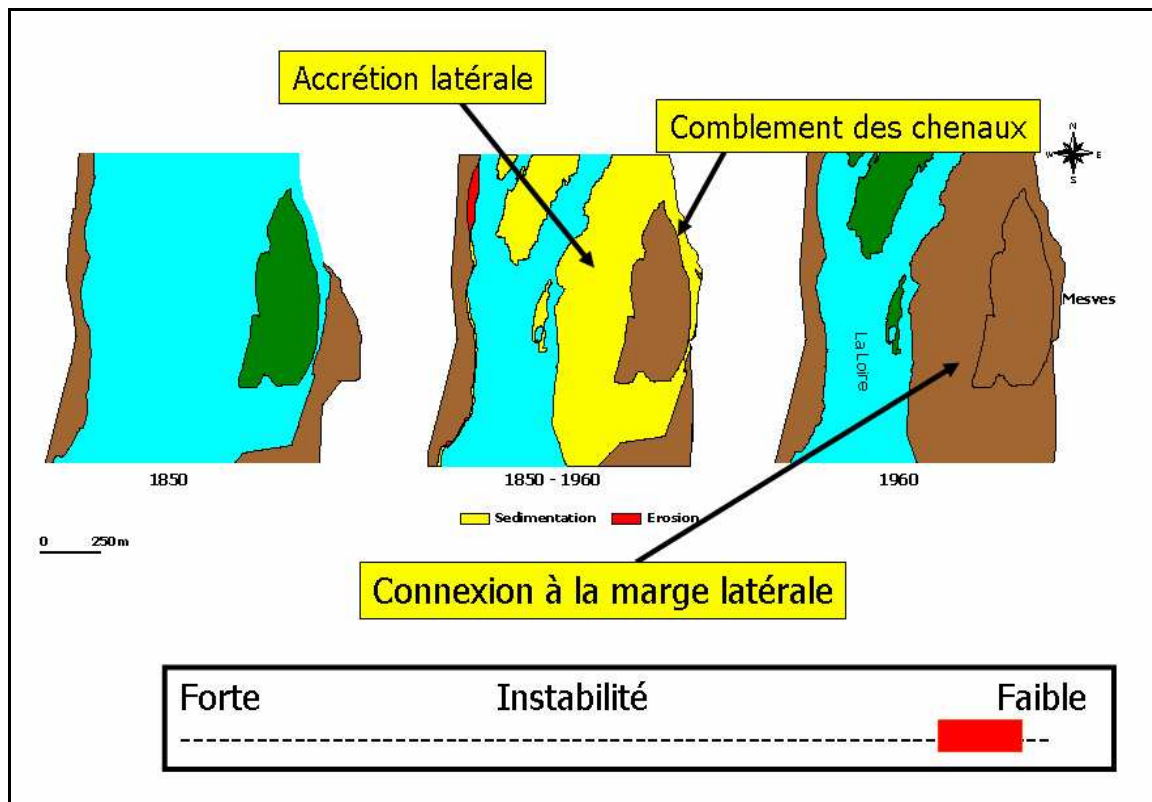


Figure 115 – Le rattachement d'une île à un franc-bord représente le stade définitif de la stabilisation. Ces îles quittent alors le monde des formes insulaires pour rejoindre celui des franc-bords, beaucoup plus stables dans un système en anabranché comme la Loire des îles.

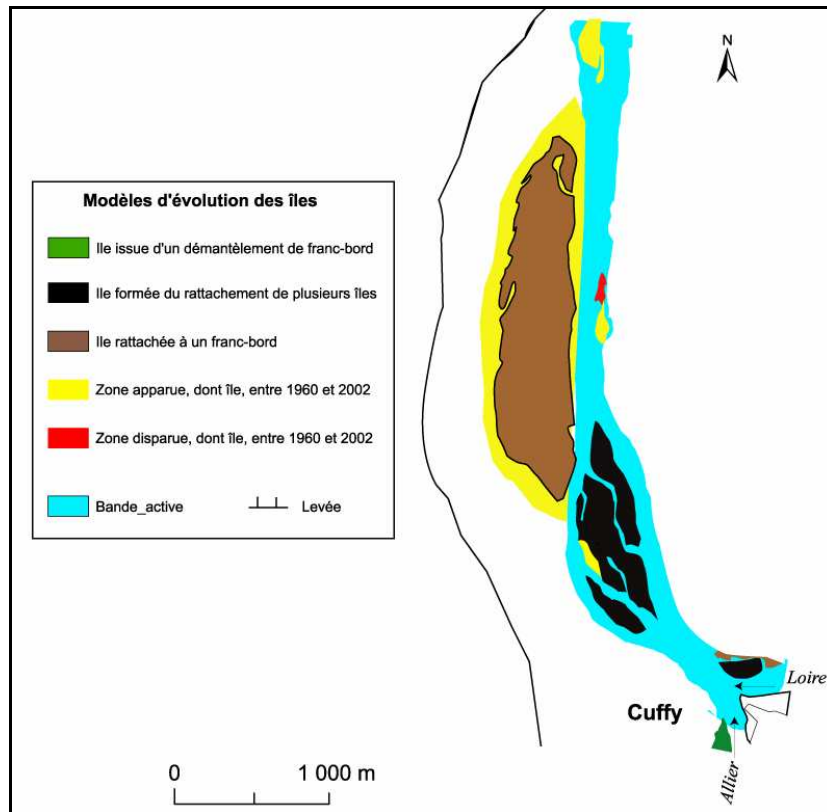


Figure 116 – Spatialisation des différents modèles d'évolution des îles sur la période 1960-2002, au sein du Site Atelier 1.

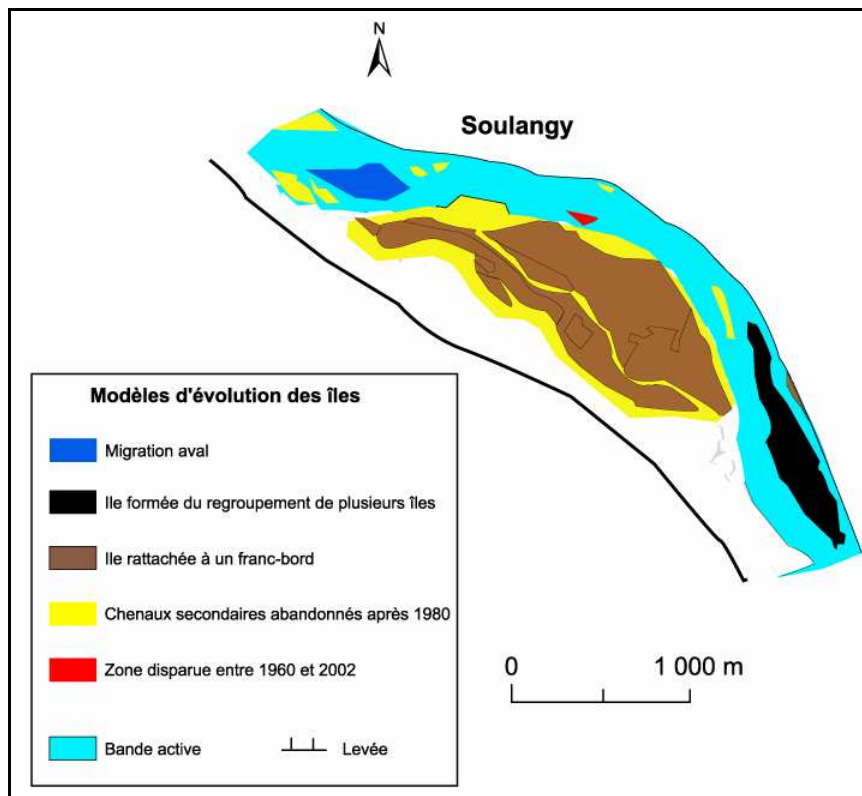


Figure 117 – Spatialisation des différents modèles d'évolution des îles sur la période 1960-2002, au sein du Site Atelier 2.

• **Synthèse sur les processus érosion-accrétion des îles** (Figures 118 et 120)

Plusieurs résultats importants méritent d'être soulignés quant au processus érosion-accrétion s'opérant sur les îles. Pour chaque île, l'érosion et l'accrétion ont été caractérisées et spatialisées : amont (tête d'île), aval (queue d'île) et latérale. La cartographie de ces processus suffit pratiquement à elle-même pour localiser et évaluer leur ampleur (Figures 111, 116 et 117). Nous nous sommes intéressés plutôt à la période 1960-2002 durant laquelle ces processus sont mieux quantifiés.

- **L'érosion exercée sur les îles depuis 1960 s'élève à +0,04 % du lit par an (0,6 ha/an).**

L'accrétion de ces formes y fait largement contrepoids puisque +0,1 % du lit par an est gagné par les îles **(1,8 ha/an)**.

Pour toutes ces îles, le budget sédimentaire est largement positif : plus de sédimentation que d'érosion. Au regard des modèles d'évolution, il y a la place effectivement au processus d'érosion, mais notre analyse spatiale fait apparaître une nette prédominance de la sédimentation. Les îles sont avant tout des zones de sédimentation active, en restant simplement à cette première approche moyenne des formes en plan. Il nous reste bien entendu à approfondir cet aspect des processus d'érosion et de sédimentation en s'attelant dans l'approche fine à caractériser les vitesses de sédimentation verticale. La dimension verticale qui fait défaut dans l'approche moyenne permettra en effet de préciser nos premiers résultats quant au rôle des îles dans la sédimentation de l'hydrosystème fluvial.

- Dans le cas des grandes îles migratrices (Ile des Barreaux, Ile du Lac, Ile de Malaga du Site Atelier 3), le processus érosion en tête et accrétion en queue prévaut. D'autres îles subissent des étirements en queue et en tête avec des processus d'accrétion s'opérant aux extrémités et contribuant à l'allongement de ces îles (Ile des Loges, Ile de Vaudrilly).

- De manière générale, **65 % de l'accrétion se réalisent en queue d'îles**. L'extension en tête et latéralement reste modeste (19 et 16 %). En ce qui concerne l'érosion, ce processus se localise préférentiellement en tête d'îles (64 % des cas d'érosion). 35 % de l'érosion des îles se réalisent sur les berges latérales. L'érosion en queue demeure extrêmement faible (1 %).

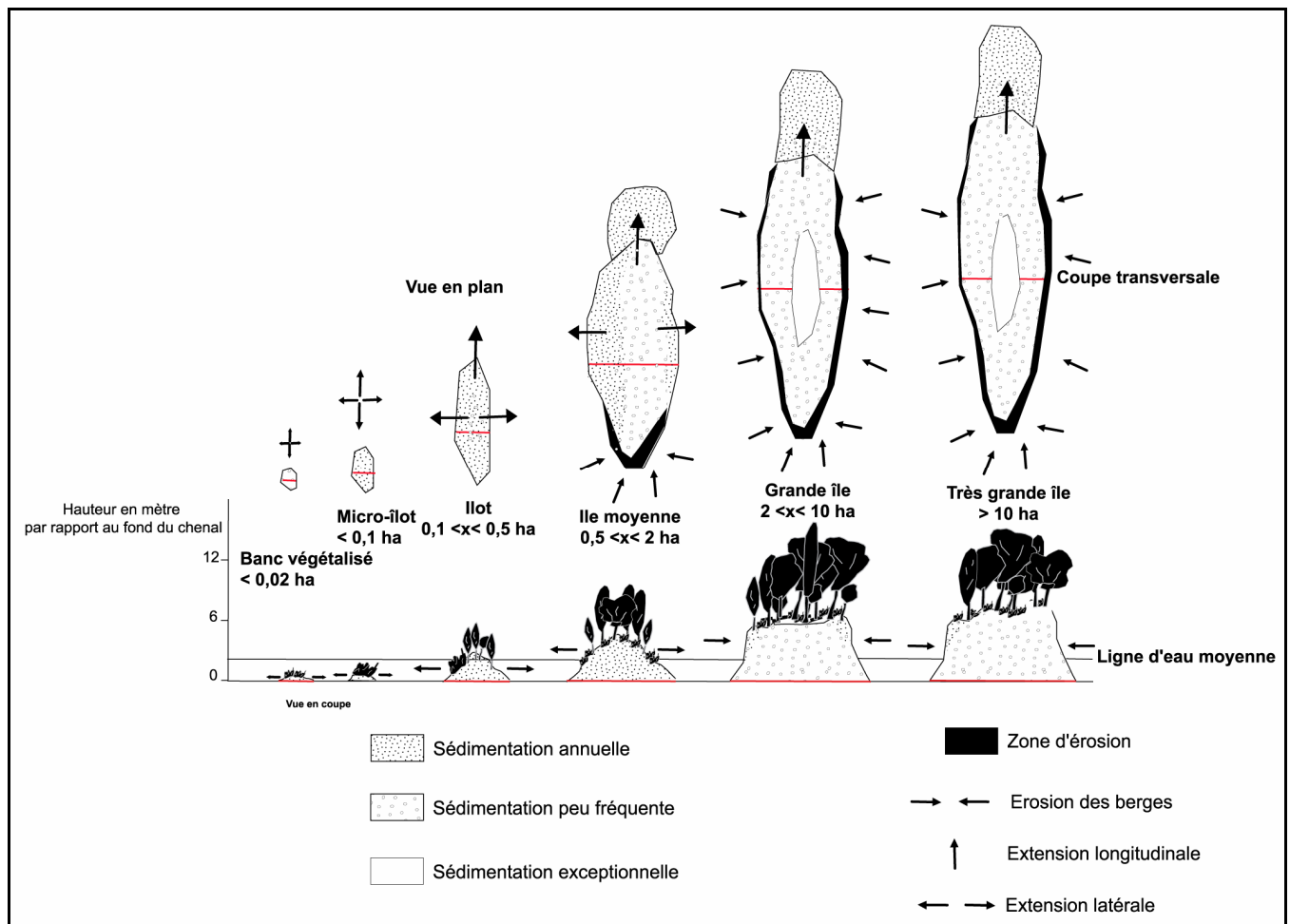


Figure 118 – Processus de sédimentation et d'érosion suivant les types d'îles et leur modèle d'évolution.

- Notre analyse met en évidence un seuil morphologique important parmi les îles : **les îlots et micro-îlots (de taille inférieure à 0,4 ha) sont les seules unités susceptibles de participer à l'apport de sédiments au chenal principal.** En effet, nous avons observé que ces types d'île enregistraient les plus fortes érosions dans l'hydrosystème. Les îles de taille supérieure fonctionnent au contraire plus comme des zones de piégeage des sédiments, puisque à partir d'un certain seuil surfacique de ces îles ne peuvent tendre que vers les stades supérieurs (Figure 119 et photographie 23). En dessous de ces 0,4 ha, l'érosion reprend plus facilement ces unités. Les micro-îlots constituent donc des unités essentielles dans l'équilibre du système dans le contexte de déficit sédimentaire qui concerne la Loire moyenne.



Photographie 23 – La sédimentation est active sur ce type de micro-îlot recouvert d’une végétation pionnière jouant le rôle parfait dans le piégeage des sédiments.

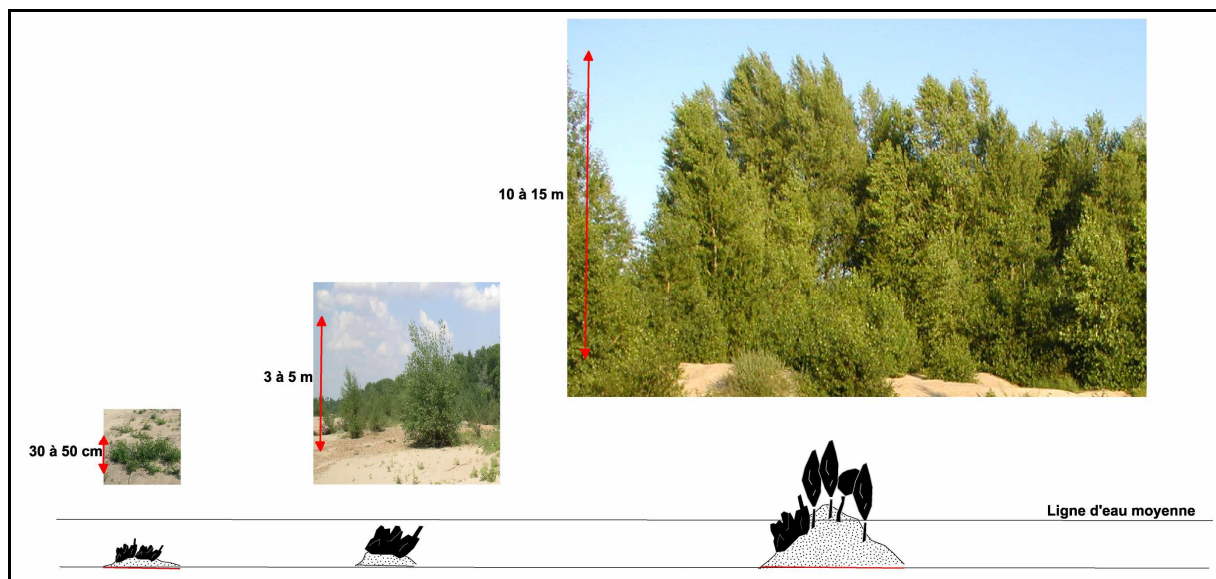


Figure 119 – La taille des îles et des îles moyennes est très liée à la végétation et à la capacité de cette dernière à piéger les sédiments.

2). Suivi de la bande active principale

a). Evolution du talweg

Nous sommes partis du constat que la formation des îles est liée à l’évolution de la bande active et plus précisément du déplacement du talweg (Figure 121). En redressant le fond du talweg sur tout le Site Atelier 3, nous avons pu dégager les fluctuations spatiales de ce talweg et par là même de la bande active. Non seulement cette bande active s’est

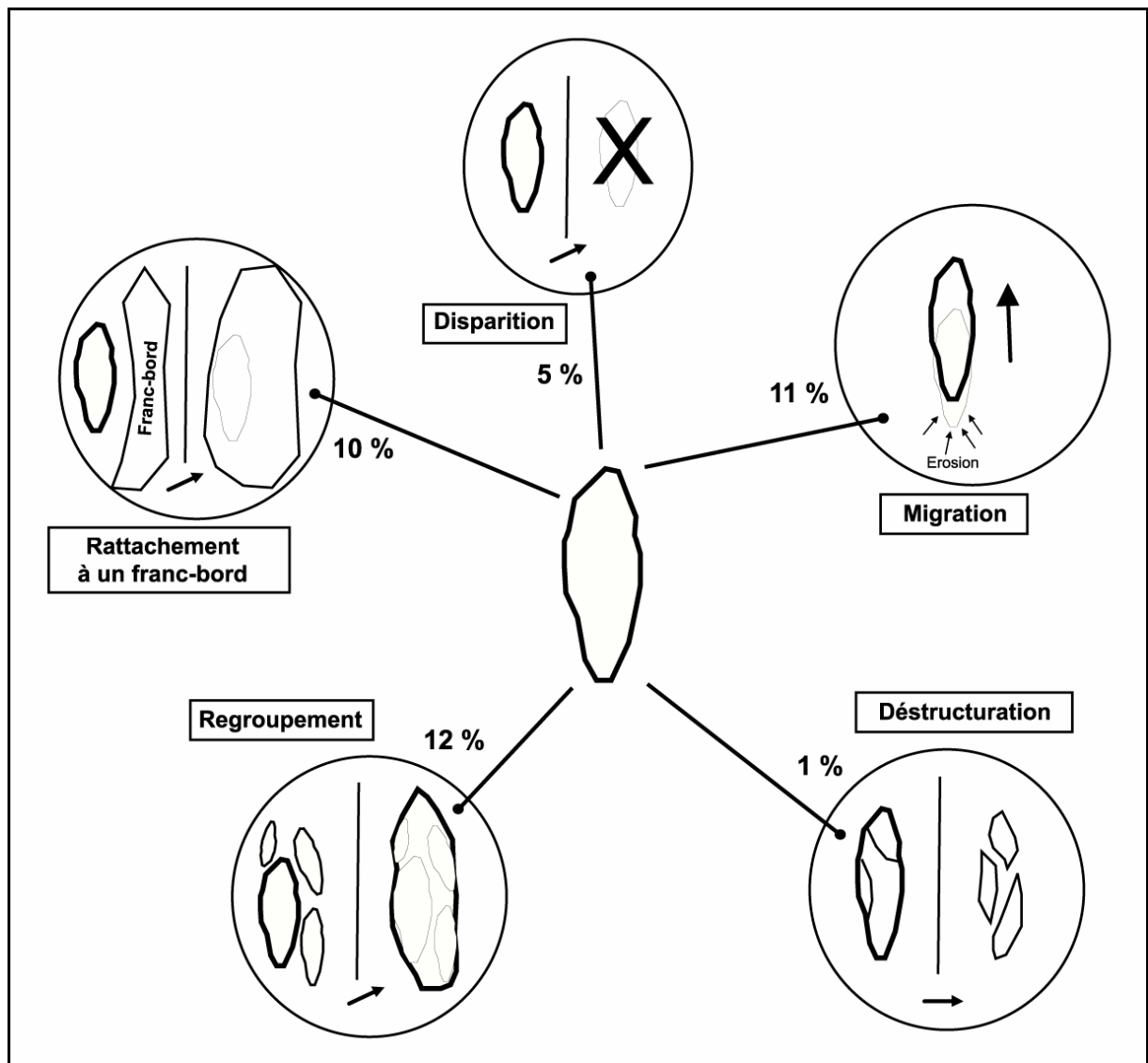


Figure 120 – Synthèse des modèles d'évolution des îles analysées en Loire moyenne depuis 1850.
 Note : Part en % du total d'îles. Le pourcentage restant concerne les processus érosion-sédimentation qui façonnent et sculptent les îles.

réduite comme peau de chagrin, mais son fond ne s'est pas stabilisé pour autant et a connu, au cours de ces 150 dernières années, des phases de basculement majeur. Ces seuils temporels dans l'évolution de la ligne de talweg éclairent sur la position latérale des îles et sur leur omniprésence dans de grands secteurs fonctionnels. Il apparaît ainsi les phases suivantes :

- 1850-1933 : changement net du tracé
- 1933-1960 : une certaine stabilité
- 1960-1995 : basculement net
- 1995-2002 : retour à une certaine stabilité

Nous en déduisons que les phases de basculement latéral du talweg montrent dans un premier temps la capacité « naturelle » de divagation du fleuve dans ces secteurs fonctionnels du Site Atelier 3. En 150 ans, le tracé du talweg s'est considérablement modifié et a montré au final deux grandes phases de basculement : une au cours de la fin du 19^{ème} siècle et du début du 20^{ème} siècle, l'autre au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle. Le talweg est ainsi passé successivement d'une rive à l'autre. Il apparaît ainsi nettement que les levées de rive gauche contraignent fortement cette capacité à divaguer du fleuve. Lorsque le tracé est bloqué par ces digues, un déséquilibre se crée et son tracé doit alors être détourné et retrouver un équilibre géométrique indispensable. Une chose est ainsi sûre, les levées installées très tardivement au cours du 19^{ème} siècle ont fortement contraint le corridor fluvial et son tracé. Ce pas de temps révèle les grandes zones de sédimentation du Site Atelier 3. Les premiers secteurs à îles se dessinent ou sont déjà dessinés et coïncident avec les grandes zones de basculement de la bande active principale (Figure 122).

Ainsi, lorsque le talweg se déplace au cours de ces 150 ans de suivi, il laisse derrière lui de grandes zones de stockage sédimentaire (Figures 123 et 124). **Et cela correspond en effet, à de grandes zones de sédimentation là même où s'est formée la première génération d'île du début du 20^{ème} siècle et la deuxième génération d'îles observée dès la seconde moitié du 20^{ème} siècle.** Ce qui explique également la position avant tout latérale des îles dans le lit fluvial. Notre hypothèse de départ était donc fondée.

La relation entre l'évolution du chenal principal et la formation des îles est donc très forte. **Les secteurs à îles se forment donc là où migre la bande active.** Les écoulements étant plus rapides dans l'axe du talweg, les secteurs qui en sont éloignés seront donc sujets à la sédimentation par diminution de la compétence du fleuve et par la diminution de la submersion de ces secteurs. La végétation peut ainsi croître plus aisément du fait de l'éloignement de l'influence de la dynamique fluviale qui se concentre alors au niveau de la ligne de talweg de la bande active.

L'autre point important de ce suivi du talweg concerne la position actuelle de ce dernier. Il semble avoir quasiment retrouvé sa position de 1850. Ce suivi illustre donc très bien le réajustement fluvial opéré dans ce secteur de la Loire des îles.

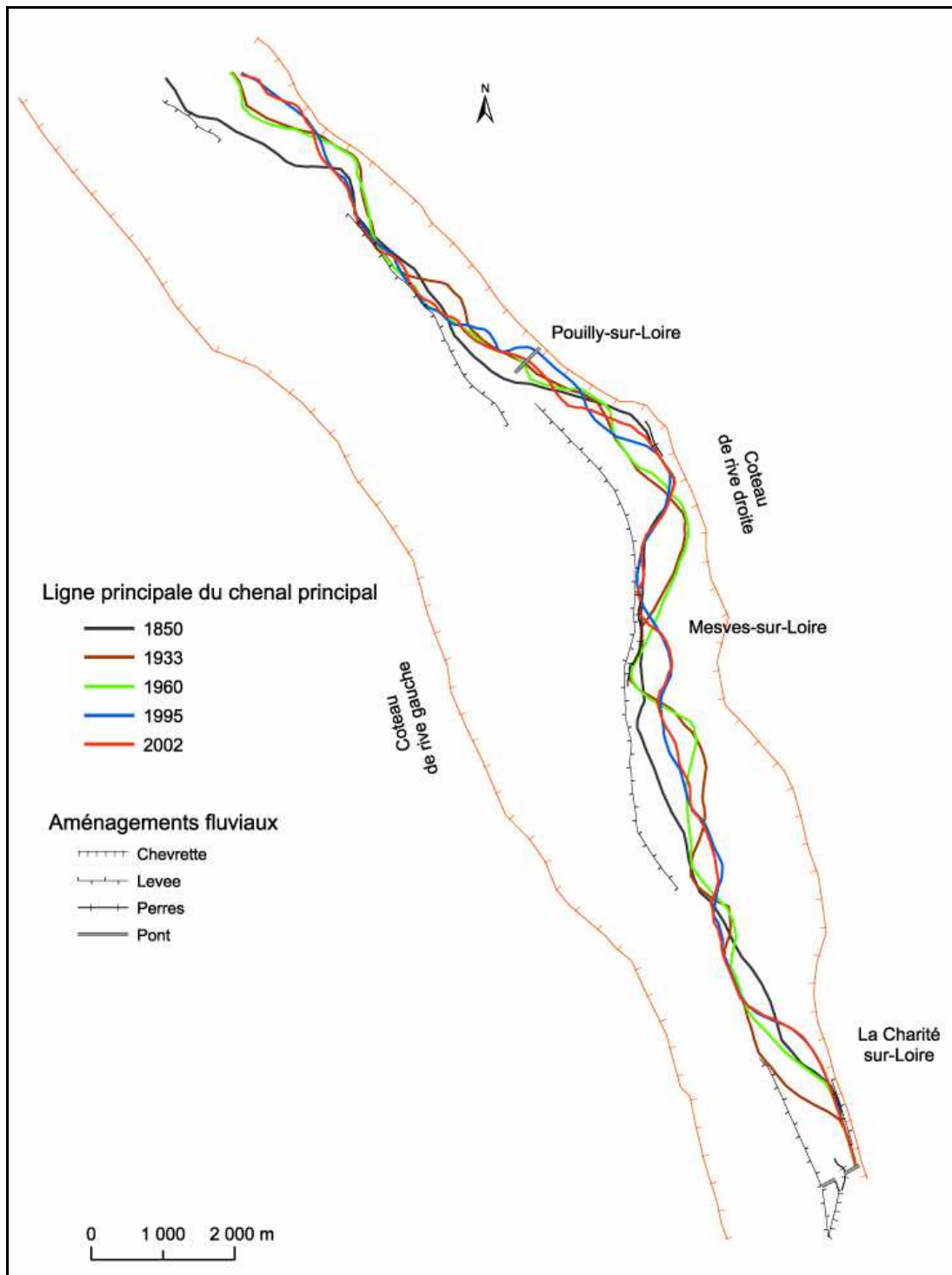


Figure 121 – De 1850 à 2002, le talweg n'a cessé de basculer de rive droite à rive gauche, entre les levées et les pieds de coteau.

Les levées contraignent fortement cette divagation ; la bande active ne cesse donc de chercher un chemin « naturel » dans ce couloir étroit et déconnecté de la plaine d'inondation du fleuve.

Nous en déduisons également que la Loire des îles est le parfait exemple du réajustement d'un hydrosystème fluvial.

Tous les seuils temporels de formation et d'évolution des francs-bords, des îles et de la bande active correspondent de ce fait aux différentes phases de réajustement de la Loire des îles. Il restera par la suite à corrélérer ces différentes phases temporelles avec les facteurs d'explication ; ce que nous réalisons dans la partie consacrée aux facteurs physiques et anthropiques du réajustement fluvial.

- Les îles, en général, se localisent suivant une certaine logique spatiale. Cette logique est dictée avant tout par la profondeur du chenal principal et sa capacité à divaguer dans son lit. La divagation du chenal principal permet en effet de laisser de grandes zones de sédimentation propices à la formation et à l'extension d'îles.
- Les îles semblent « coincées » entre cette capacité du chenal principal à divaguer et l'extension latérale des francs-bords. Notre étude s'intéresse d'ailleurs aux conditions hydro-sédimentaires qui influencent la dynamique spatiale du chenal (sa capacité à divaguer latéralement). Les conditions hydrologiques induisent également le degré d'insularité des îles : suivant le niveau de submersion des bras secondaires, les îles sont soit entourées par des chenaux en eau en permanence, soit bordées par un seul chenal, l'autre étant à sec (semi-insularité). De ce fait, si les francs-bords s'étendent latéralement, cela peut se faire au détriment à la fois de la largeur du chenal secondaire (fermeture progressive du bras), et de l'île que ce dernier conditionne (perte de l'insularité par raccordement au franc-bord).

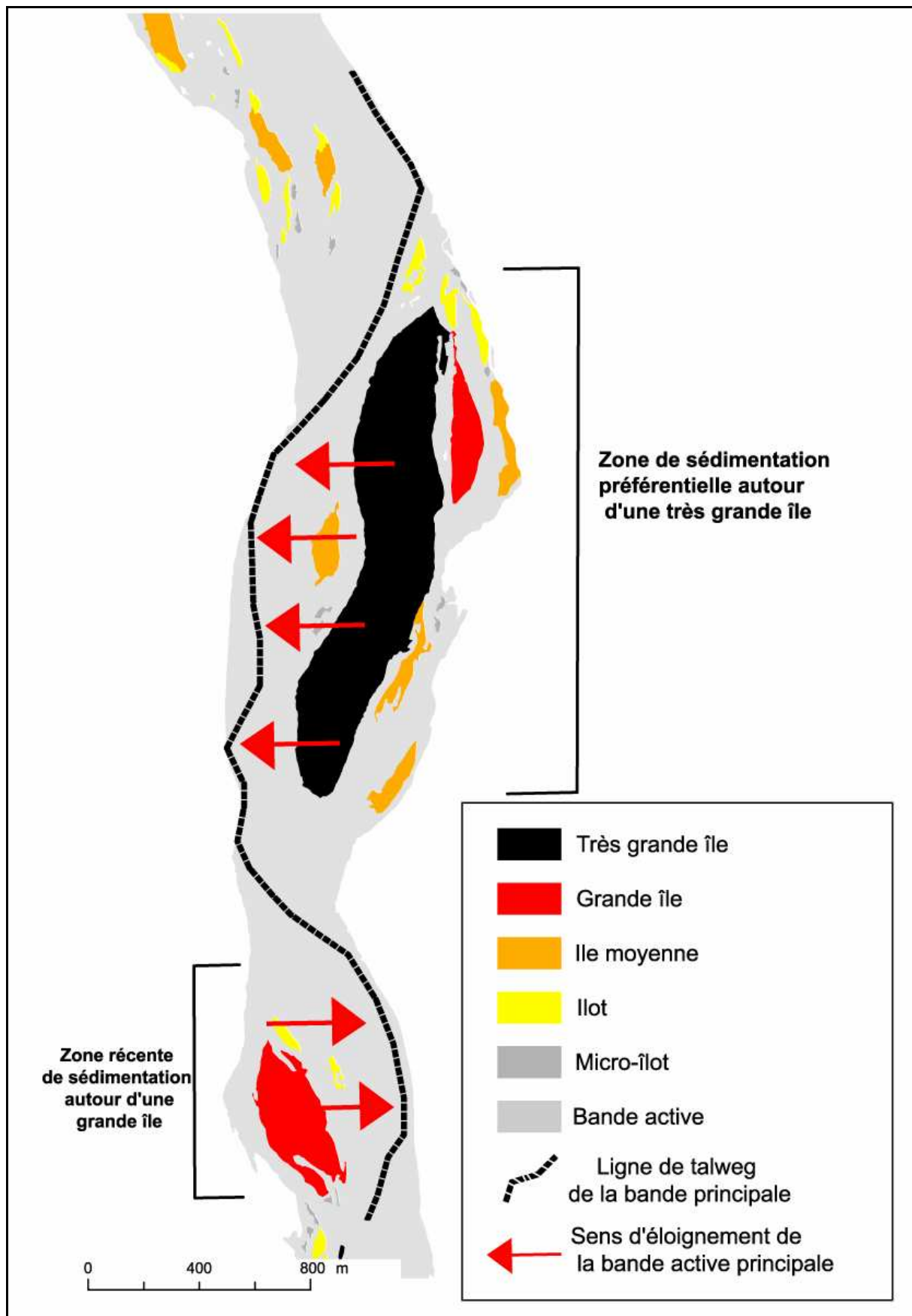


Figure 122 – Relation entre l'éloignement de la bande active et la formation des secteurs à grandes îles.

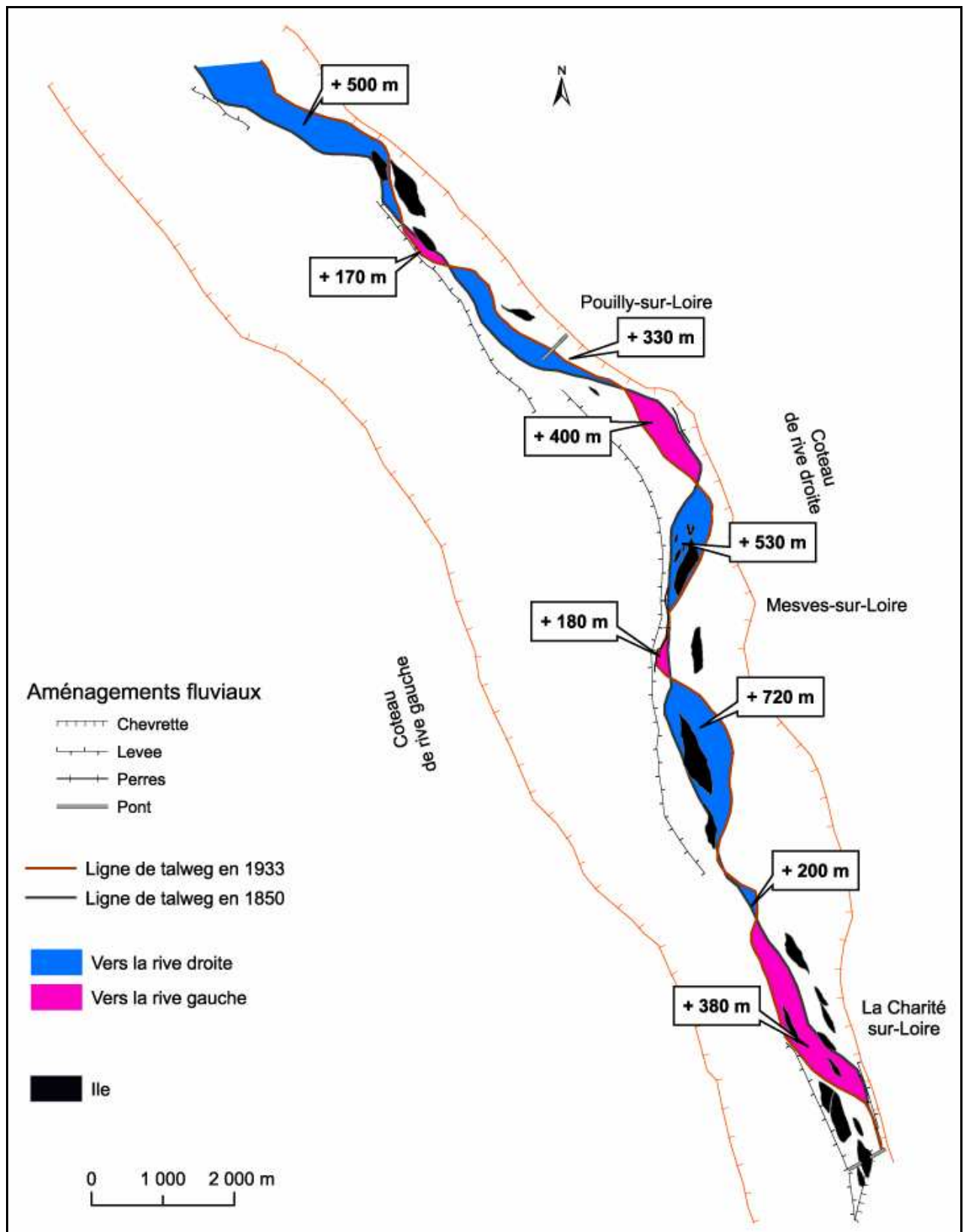


Figure 123 – Zones de basculement latéral de la bande active principale entre 1850 et 1933.

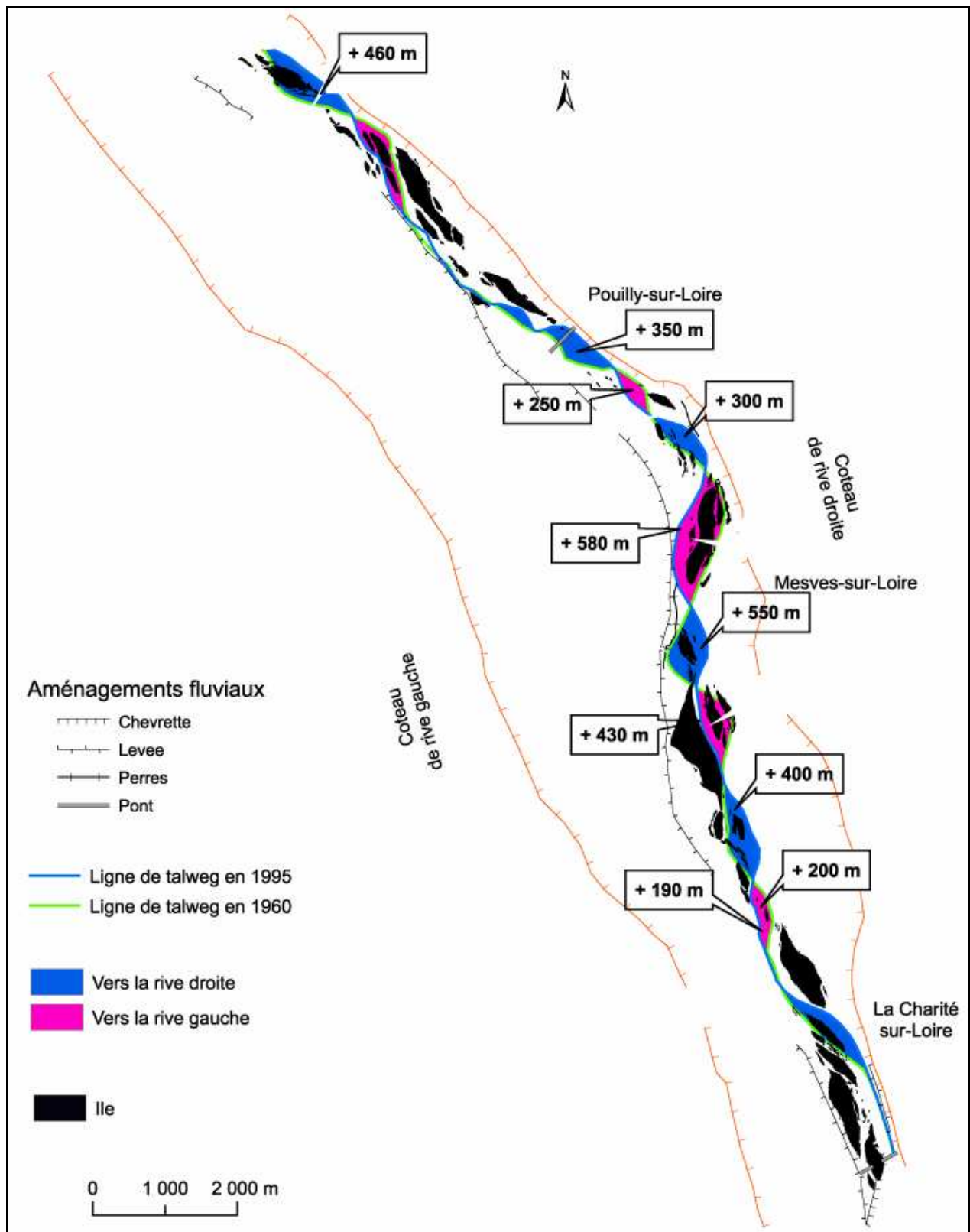


Figure 124 – Zones de basculement de la bande active principale entre 1960 et 2002. Ce pas de temps plus resserré confirme l’alternance des zones à îles, dans les secteurs même où s’éloigne la bande active principale.

b). Evolution du profil en long

Il n'a été possible, jusqu'à présent, de construire les profils en long du secteur de la réserve naturelle qu'à partir des profils en travers dressés en 1970 et 1995. En extrayant le talweg (point le plus bas de ces profils), nous avons pu obtenir deux profils longitudinaux comparatifs. Ce sont les seules données que l'on peut aujourd'hui comparer pour tenter de mettre en valeur l'évolution générale du lit principal.

Il a donc été possible d'établir un profil en long pour 1970 et 1995. Notons dès à présent « l'anomalie » sur le profil A200 (Figure 125) : la contre-pente correspond soit à une erreur de levé soit à la mouille artificielle d'une sablière. L'enfoncement du chenal principal de 0,20 à 1,30 m en 25 ans sur une quinzaine de kilomètres est révélateur des perturbations dynamiques du fleuve. Le contexte, déjà bien connu, d'enfoncement du lit principal est renforcé par l'analyse comparative des deux profils en long (Tableau XII). L'abaissement du plancher alluvial depuis les années 1970 dans le secteur de la réserve naturelle est d'importance inégale ; il est particulièrement prononcé :

- 1) dans le secteur amont de l'île du Lac (-0,81 à -0,93 m) ;
- 2) dans le secteur Mesves – Pouilly (entre -0,87 et -1,23 m).

Les divagations du talweg sont à mettre en rapport avec l'évolution de son profil en long. Il apparaît ainsi ce que Z. Gazowski (1994) avait bien souligné : l'enfoncement du chenal principal au cours essentiellement du milieu du 20^{ème} siècle. Cet enfoncement dans la réserve naturelle est cependant moins important que sur le Site 1 (Bec d'Allier) et le Site 2 (Soulangy) où on mesure jusqu'à 2,5 m d'enfoncement (Gautier et *al.*, 2001).

Cette modification du plancher alluvial, pouvant atteindre par secteur presque 2 m, influe également sur le tracé du chenal principal et notamment de sa ligne de talweg. Nous confirmons ici que les divagations répétées du talweg sont à mettre en accord avec cet enfoncement. En effet, nous constatons que les zones de plus fort enfoncement correspondent aux zones de plus fort basculement latéral. Il semble d'ailleurs qu'une première phase d'enfoncement se soit opérée au cours du 19^{ème} siècle et du début du 20^{ème} siècle, à cause probablement de la présence d'ouvrages de navigation (chevrette, digues,

quais). Nous ne pouvons pourtant pas l'infirmier faute de données précises. Le réajustement fluvial, on l'a vu, s'amorçait déjà à la fin du 19^{ème} siècle.

Tableau XII – Evolution du plancher alluvial entre Mesves et Tracy-sur-Loire

	Distance cumulée en km	1970	1995	Evolution fond du chenal 1970-1995	Rythme en cm/an
A189	0	150,67	149,86	-0,81	-3,24
A190	0,73	150,55	149,62	-0,93	-3,72
A191	1,76	149,65	149,44	-0,21	-0,84
A192b	3,05	149,11	147,88	-1,23	-4,92
A195	5,45	148,28	147,16	-1,12	-4,48
A197	7,5	147,39	146,52	-0,87	-3,78
A199	9,6	146,11	145,64	-0,47	-1,88
A200	10,38	144,61	145,48	0,87	3,48
A201	11,66	145,6	145,16	-0,44	-1,76
A203	13,69	144,75	143,45	-1,30	-5,2

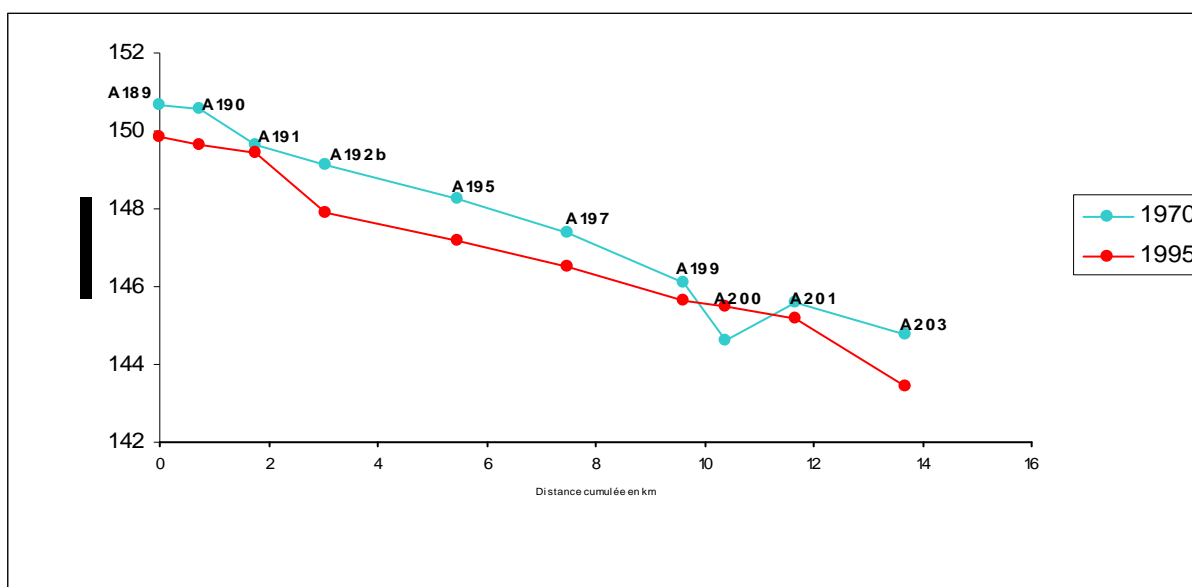


Figure 125 – Reconstruction du profil en long de Mesves à Tracy-sur-Loire à partir des talwegs.

Nous avons réussi à reconstituer le profil en long de la Loire en 1933 à partir des données topographiques établies par les Ponts et Chaussées et le Service du Nivellement Général de la France (Figure 126). Compte tenu de l'année de relevés, le système de référence est soit

celui de Bourdaloue³ soit celui dit Lallemand⁴, et doit être actualisé en IGN69 pour pouvoir être comparé plus précisément. Nous avons retenu une marge d'erreur maximale de +/- 10 cm. Et malgré cette marge d'erreur, nous pouvons interpréter l'évolution du profil en long de la Loire entre 1933 et 1970.

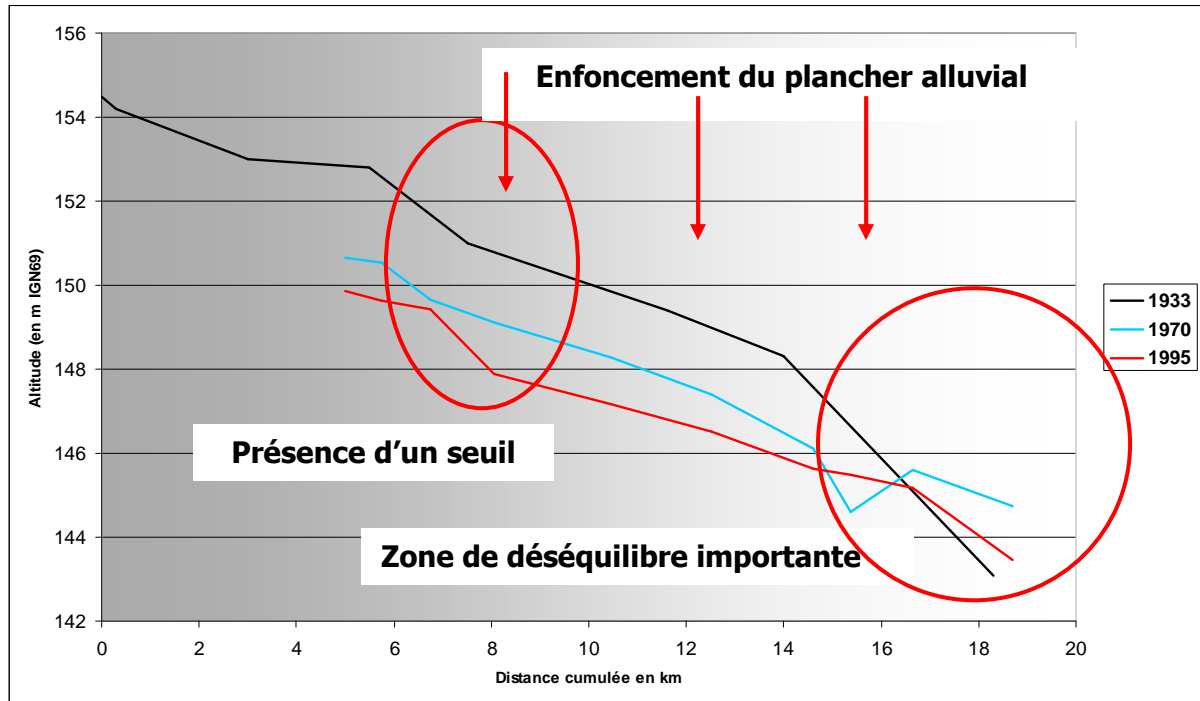


Figure 126 – Reconstruction du profil en long du Site Atelier 3 depuis 1933. Malgré une marge d'erreur certaine entre deux systèmes altimétriques différents, qui ne doit pas excéder les 10 cm, l'enfoncement du plancher alluvial était déjà amorcé dès la première moitié du 20^{ème} siècle.

Nous notons ainsi que le rapprochement des données topographiques du profil en long de la Loire de 1930 fait apparaître sur le Site Atelier 3 un enfoncement déjà amorcé et donc bien antérieur à l'industrie de granulats : en moyenne 1,5 à 2 m d'enfoncement entre 1933 et 1970 (0,04 à 0,05 m par an en moyenne).

Il ne faut pas en déduire aussi hâtivement que les sablières ne sont donc pas responsables de l'enfoncement du lit de la Loire. Loin de nous cette idée facile, car il apparaît que les extractions de sédiments dans le lit mineur ont fortement aggravé un équilibre du

³ Premier nivellement général de la France réalisé de 1855 à 1864 sous la direction de M. Bourdaloue. Le « Zéro Bourdaloue » est matérialisé par le trait 0,40 m de l'échelle des marées du Fort Saint-Jean à Marseille

⁴ Second nivellement dit Lallemand ou orthométrique réalisé de 1884 à 1927. Le « Zéro Lallemand » est 71 mm sous le « Zéro Bourdaloue », soit à la cote 0,329 m de l'échelle de Marseille.

plancher alluvial déjà affecté, au début du 20^{ème} siècle, d'une incision. Cette incision pourrait être liée à la construction des levées (18^{ème}-19^{ème}) et des chevrettes (*Circa* 1840). Il faut souligner en effet que cette phase d'enfoncement notée entre 1930 et 1970 correspond à une accélération de l'abandon de la bande active et du rythme de formation des îles.

Plusieurs points sont à mettre en évidence à la fin de cette longue approche à échelle moyenne. Il nous apparaît en effet essentiel de synthétiser ces résultats et montrer ce que notre recherche en géomorphologie fluviale apporte de nouveau dans cette discipline et sur les systèmes anastomosés.

Les Sites Ateliers de la Loire moyenne montrent un fonctionnement et une évolution toutes particulières.

- **La Loire des îles actuelle n'aurait pas pu être dénommée ainsi avant le 20^{ème} siècle.**

Elle est, en effet, un système anastomosé récent dans le temps puisque la Loire moyenne du 19^{ème} siècle se caractérisait par **une présence très pauvre en îles et chenaux secondaires (< 10 % du lit fluvial de 1850)**. La végétation du lit mineur était quant à elle limitée aux **strictes usages locaux : la culture d'osier (jeunes saules), des plantations éparses de peupliers (40 % de la végétation du lit de 1850)**. En ce qui concerne les marges du fleuve, dont les francs-bords, **la forêt alluviale n'était pas dominante** comme aujourd'hui. Bien au contraire, l'agriculture empiétait fortement sur l'ensemble de la plaine d'inondation jusqu'à atteindre le lit vif. L'occupation du sol a fortement évolué vers l'omniprésence actuelle de la forêt alluviale (35 % du corridor fluvial et 90 % des îles sont aujourd'hui boisés).

- **L'évolution des Sites Ateliers montre de grandes étapes.** Les rythmes d'évolution de la Loire et de ses unités fonctionnelles sont ainsi différents de 1850 à aujourd'hui. Ils laissent apparaître les **grands stades de formation des îles** et du réseau de chenaux secondaires si caractéristiques des systèmes anastomosés. Les îles se développent **d'abord lentement** entre 1850 et 1930 (+0,04 % par an du lit) pour véritablement conquérir le lit fluvial à un **rythme quatre fois plus important** (+0,15 % du lit par an entre 1930 et 1960 ; +0,17 % entre 1960 et 1995). Deux générations d'îles ont ainsi été pu distinguées sur notre pas de

temps d'étude. Le paysage actuel de la Loire des îles s'est donc constitué en plusieurs phases et de manière accélérée au cours de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle.

- **Typologie des îles.**

Une typologie géomorphologique des îles a été établie en fonction de plusieurs paramètres (hauteur, longueur, largeur, surface, végétation). Elle se compose ainsi de :

<i>> 10 ha : Très grande île</i>	☞ <i>6,5 % des îles de 2002</i>
<i>2 < x < 10 ha : Grande île</i>	☞ <i>21,5 % des îles de 2002</i>
<i>0,5 < x < 2 ha : Île moyenne</i>	☞ <i>12 % des îles de 2002</i>
<i>0,1 < x < 0,5 ha : Îlot</i>	☞ <i>35,5 % des îles de 2002</i>
<i>< 0,1 ha : Micro-îlot</i>	☞ <i>11 % des îles de 2002</i>
<i>< 0,02 ha : Banc à caractère insulaire</i>	☞ <i>13,5 % des îles de 2002</i>

Cette typologie pourrait constituer la base d'une nouvelle approche géomorphologique des systèmes anastomosés ; méthodologie à développer sur d'autres hydrosystèmes fluviaux.

- **Fonctionnement des îles : modèles de formation et d'évolution.**

Les îles possèdent une dynamique de formation et d'évolution diversifiée. La majorité des îles (72 %) s'est constituée sur le schéma classique de la formation d'un micro-îlot (< 0,1 ha) se développant et s'agrandissant pour devenir une île moyenne (0,5 < x < 2 ha). Il faut environ **30 ans à un micro-îlot pour s'étendre en île moyenne**, sans tenir compte des rattachements de plusieurs îlots (12 % des îles actuelles) qui pourraient les agrandir plus rapidement. Notons que 95 % des très grandes îles actuelles (> 10 ha) sont issues de la coalescence de plusieurs îles. Les modèles d'évolution peuvent se résumer ainsi :

<i>Démantèlement des grandes îles</i>	☞ <i>3 % des îles</i>
<i>Rattachement à des francs-bords</i>	☞ <i>2 %</i>
<i>Migration des îles</i>	☞ <i>11 %</i>
<i>Apparition</i>	☞ <i>72 %</i>
<i>Regroupement d'îles</i>	☞ <i>12 % (95 % des très grandes îles)</i>

Au regard de cette typologie d'évolution, il apparaît que la Loire des îles est **encore en mutation**. Les modèles d'évolution des îles reflètent les **tendances de mutation du lit fluvial**.

- Au cours du premier pas de temps, 1850-1930, **90 % des îles se rattachent à la rive droite** en permettant l'extension des francs-bords.

- Au cours du 20^{ème} siècle, les **îles se développent fortement (+0,15 % du lit fluvial par an)** : de nouvelles îles apparaissent, des îles se rattachent entre elles pour former des îles

plus grandes, des îles migrent vers l'aval par le jeu de l'érosion amont et de la sédimentation aval.

- Depuis 1995, une nouvelle tendance semble se dessiner, même si notre recul n'est pas suffisant pour le confirmer : des îles **se rattachent à la rive gauche** (-0,02 % par du lit) et permettent une **forte extension de franc-bord** (+0,46 % du lit), des **micro-ilots croissent** dans de nombreux bras secondaires.

- Le basculement latéral de la bande active principale est la clé d'explication des grandes zones de sédimentation, et par conséquent des secteurs à îles. **Les zones de plus fort enfoncement correspondent aux zones de plus fort basculement.**

Depuis 1850, le talweg de la bande active principale n'a eu cesse de basculer d'une rive à l'autre. Nous avons relevé qu'à chaque basculement du talweg correspond le développement de zones de sédimentation et de végétalisation. Les secteurs actuels de grandes îles sont tous issus de ces zones de sédimentation. Ce sont les secteurs les plus larges, là même où la ligne de talweg s'est éloignée le plus loin possible de cette zone d'accrétion (à plus de 100 m).

- L'enfoncement de la bande active enregistré dès la première moitié du 20^{ème} siècle.

Une incision très forte avait déjà été enregistrée au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle, plus importante encore que celle supposée (Gautier et al., 2001). Or, nous avons pu donner une autre dimension à cet enfoncement dans le Site Atelier 3. L'incision s'est réalisée plus tôt, au cours de la première moitié du 20^{ème} siècle et certainement à la fin du 19^{ème} siècle. Nous notons ainsi que l'enfoncement était déjà amorcé et donc bien antérieur à l'industrie de granulats : en moyenne 1,5 à 2 m d'enfoncement entre 1933 et 1970 (0,04 à 0,05 m par an en moyenne). Les extractions ne sont donc qu'un facteur très aggravant de l'enfoncement du lit. Cet enfoncement identifié localement est sans doute lié aux aménagements récents du secteur (levée du 19^{ème} et surtout la chevette de 1838 de La Charité). Il est difficile, en l'état actuel de nos connaissances, de supposer que l'ensemble de la Loire moyenne a subi un tel enfoncement avant les années 1970. Seule l'analyse des archives de la DIREN permettrait de définir l'étendue spatiale d'une première phase d'incision, à l'échelle historique.

Chapitre 4- Evaluation des budgets sédimentaires des différentes unités fluviales à grande échelle

L'approche à grande échelle se place, dans notre analyse spatiale, comme le niveau le plus à même de nous renseigner sur les rythmes de fonctionnement du système de la Loire des îles. A l'aide des différents outils, profils topographiques, SIG et MNT, nous pouvons quantifier précisément, non seulement les rythmes de formation des grandes formes de la Loire des îles, mais également leur vitesse d'évolution. En géomorphologie fluviale, ces paramètres d'évolution sont essentiels et nous renseignent à la fois sur l'évolution d'un tel hydrosystème anastomosé et sur ses spécificités : place des unités fonctionnelles, vitesse d'érosion et de sédimentation.

A Etude pluri-décennale : 1970 – aujourd'hui

Nous plaçons donc dans un premier temps notre analyse à l'échelle de profils transversaux qui ont l'avantage d'être superposables pour certains et apportent des indices de construction et d'évolution des formes dans leur dimension verticale. Comment l'accrétion verticale des îles se réalise ? Quel est l'enfoncement ou l'exhaussement du plancher alluvial ? Une grande partie de ce niveau d'analyse permet de répondre à ces questions.

1). Evolution du lit de la Loire des îles entre 1970 et 1995 : apport des profils transversaux.

Les profils transversaux permettent d'estimer les rythmes d'évolution verticaux des formes fluviales sur 25 années. Cette approche reste très liée à l'analyse en plan puisque, d'une part, nous utilisons ces transects dans la base de données géoréférencées et, d'autre part, nous retrouvons les mêmes unités fluviales que dans l'approche moyenne. Ce stade intermédiaire entre l'approche moyenne et l'approche fine apporte des éléments de compréhension importants. Dans un premier temps, nous dressons la description de chaque profil du Site Atelier 3 (Localisation : voir figure 55). Dans un second temps, nous dégagons les grands traits de l'évolution verticale des principales formes (îles et chenaux).

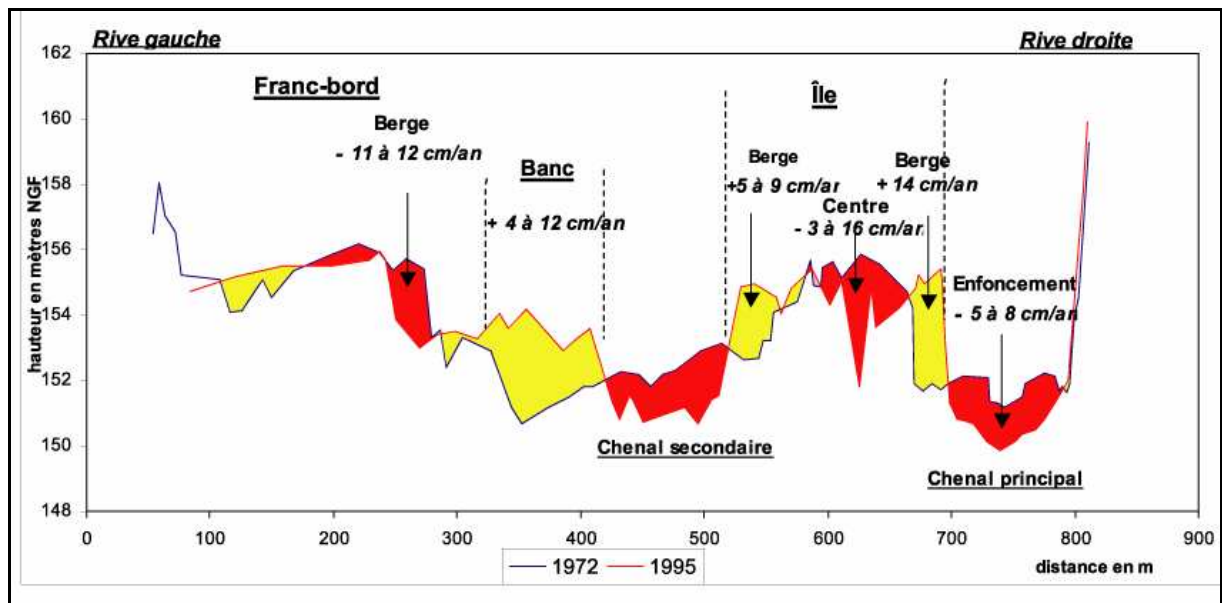


Figure 127 – Le profil transversal A 189.
 Voir localisation des profils sur la figure 55.

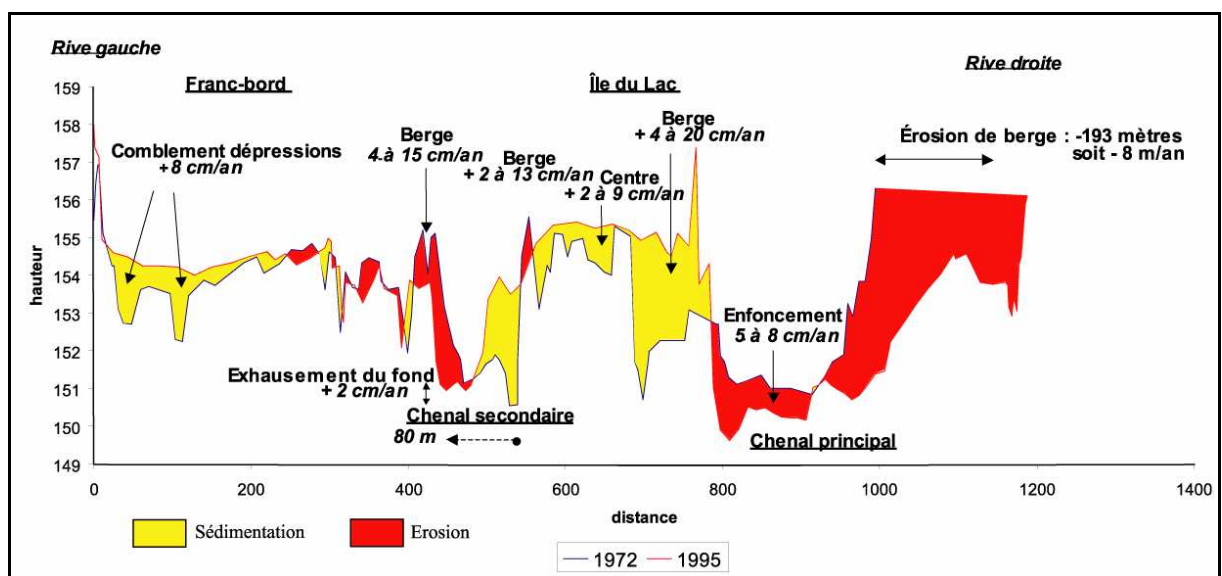


Figure 128 – Le profil transversal A 190.

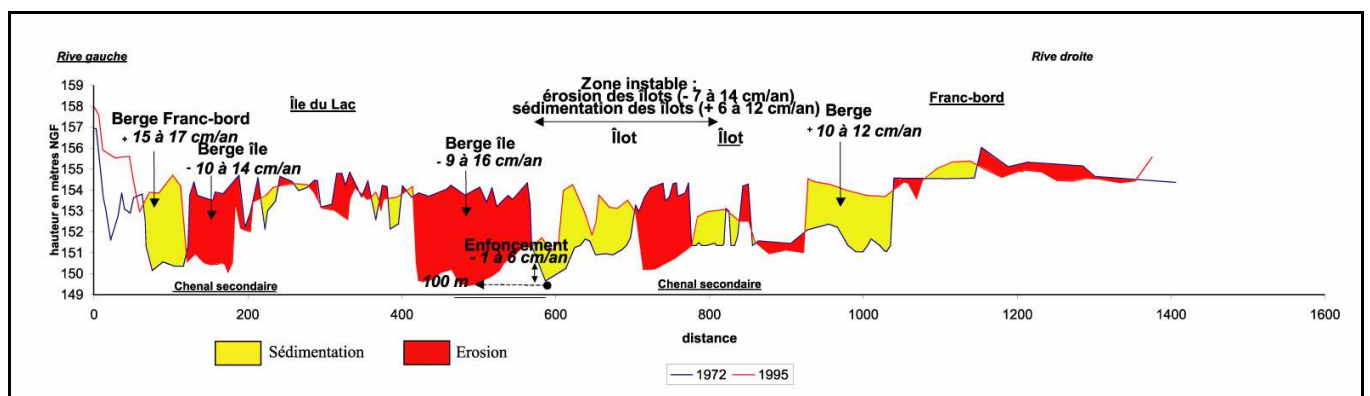


Figure 129 – Le profil transversal A 191.

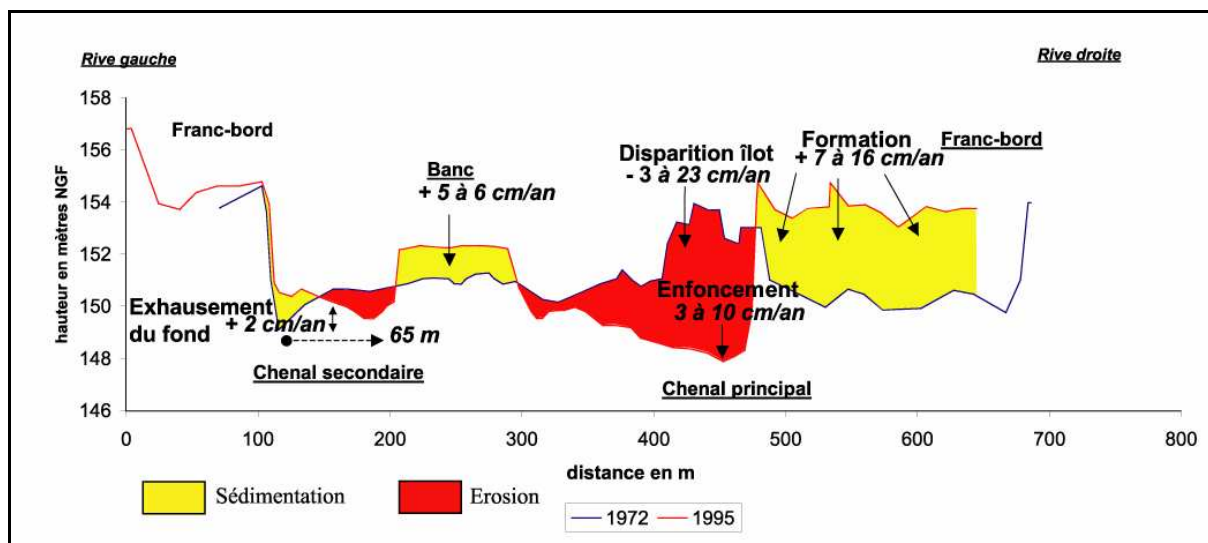


Figure 130 – Le profil transversal A 192b.

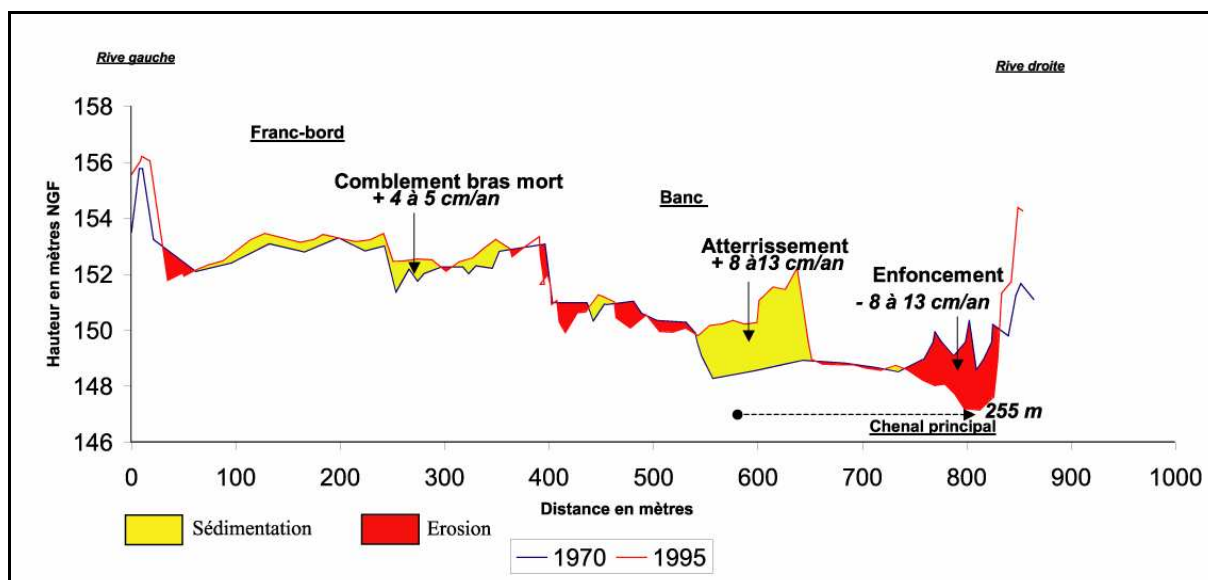


Figure 131 – Le profil transversal A 195.

Profil A 189 (Figure 127) :

Le chenal principal est en 1995 plus étroit et plus profond que 23 ans plus tôt, il s'est en effet enfoncé de 1,25 m, soit 8 cm par an.

Le chenal secondaire a migré latéralement de 140 m vers la rive droite entre 1972 et 1995, sans subir pour autant de modification nette de sa profondeur (relative stabilité). Cette translation latérale s'accompagne d'un exhaussement d'une partie du banc attenant au franc-bord de rive gauche (près de 12 cm par an de dépôts).

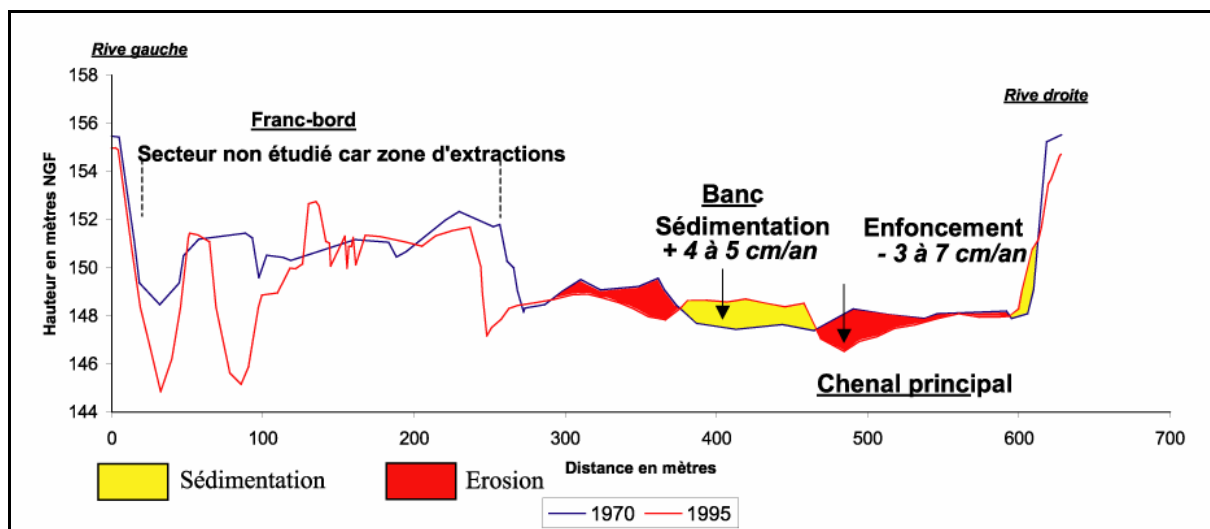


Figure 132 – Le profil transversal A 197.

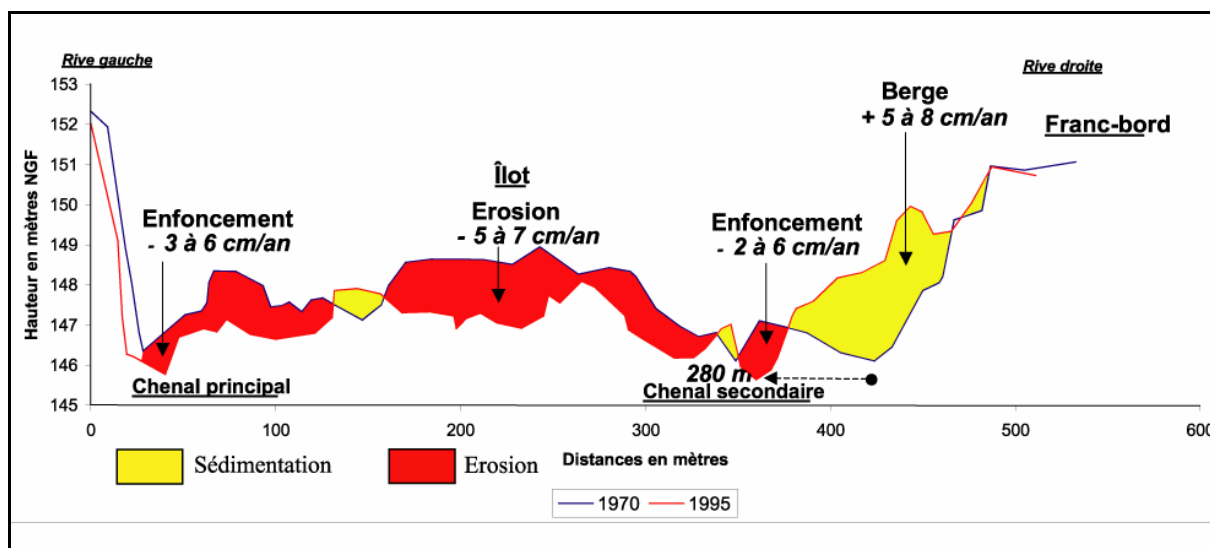


Figure 133 – Le profil transversal A 199.

On note la construction d'épais bourrelets de berge sur les bords du chenal principal et du bras secondaire, ce qui permet un accroissement net de l'île : le taux de sédimentation atteint en rive droite 14 cm par an. L'île - qui était un banc en 1960 - s'est élargie de 100 m, mais elle ne montre pas d'exhaussement prononcé. Un petit chenal en a entaillé le centre. Cette île est au même niveau topographique que le franc-bord de rive gauche, les deux étant assez perchés par rapport au fond du bras principal (5 m environ). Pour le franc-bord, l'évolution semble peu marquée ; la sédimentation y est réduite et concerne

seulement les dépressions, traces d'anciens bras secondaires. On note une érosion active de la berge (12 cm par an de dépôts enlevés).

Profils A 190 et A 191 (Figures 128 et 129) : ces deux profils sont proches et ont l'avantage de représenter le secteur de l'île du Lac et le même bras secondaire (partie amont pour le A 190 ; partie aval pour A 191).

Le chenal secondaire s'enfonce de 5 à 8 cm par an alors que le bras secondaire montre un léger exhaussement de l'ordre de 2 cm par an, tout en se décalant de près de 100 m vers la rive gauche. L'île du Lac connaît une forte accrétion verticale dans sa partie amont (A 190) de l'ordre de 2 à 20 cm par an. Les berges enregistrent les plus forts taux de sédimentation. Ce secteur enregistre de profondes modifications entre 1970 et 1995 avec un remodelage de l'île du Lac et du bras qui l'accompagne. Cette observation correspond à l'évolution de l'île que nous avons pu déjà apprécier grâce au SIG. Durant cette même période, l'île du Lac s'agrandit et se développe par le biais de l'amont. Le bras secondaire se rétrécit et l'île s'étend en largeur.

Profil A 192b (Figure 130) :

Au niveau de la bande active une nette modification apparaît entre 1970 et 1995. Le chenal secondaire migre de 65 m vers la rive droite, en s'enfonçant de 2 cm par an. Le chenal principal connaît une incision forte de 3 à 10 cm par an. Ce profil enregistre également de profondes modifications de ses formes végétalisées.

Le franc-bord de rive droite se développe fortement latéralement et verticalement (+ 7 à 16 cm). Si un îlot disparaît totalement du lit, un banc végétalisé s'est exhaussé du côté de la rive gauche (+ 5 à 6 cm par an). Ce banc qui avait un fort caractère insulaire en 1970, s'est finalement développé en îlot.

Le chenal principal s'est enfoncé également de 2,5 m en 25 ans (soit à peu près 10 cm par an) et s'est déplacé franchement vers la rive droite. L'enfoncement et le déplacement du talweg ont provoqué l'érosion d'un îlot qui existait en 1970. Il est nécessaire de rester sur ce pas de temps de 25 ans car, rapporté à une période plus longue, l'enfoncement afficherait des résultats très forts (4 m depuis 1930 par exemple). Nous ne sommes pas en

mesure de l'attester sans documents plus précis. Notons simplement que cette zone de forte incision correspond à un déplacement du talweg, ce qui explique une telle érosion.

Le chenal secondaire s'est déplacé vers l'est de 65 m entre 1970 et 1995, avec une certaine stabilité de son fond.

Un banc important de 100 m de large s'est installé au centre du lit. Le perchement de ce banc (4 m environ) est propice à l'installation de la végétation pionnière et intermédiaire.

L'ancien chenal bordant l'îlot de 1970 en rive droite a été comblé par un épais dépôt (7 à 16 cm d'accrétion annuelle), permettant ainsi le rattachement de cette partie du lit au franc-bord de rive droite.

Le franc-bord de rive gauche se maintient parfaitement du fait de la berge stabilisée par un ancien perré.

Ce profil fait donc ressortir à la fois la capacité de divagation de la bande active, par le biais du talweg, et les rythmes forts et rapides des formes insulaires jeunes.

Profil A 195 (Figure 131):

Ce profil se caractérise par une réduction de la bande active. Les principales modifications correspondent à l'enfoncement du chenal principal qui reste cohérent avec les autres profils (- 8 à - 13 cm par an), le développement d'un banc de convexité (+ 8 à + 13 cm par an) et la migration de 255 m du talweg vers la rive droite. Le banc s'est d'ailleurs exhaussé sur l'espace laissé par le fond de la bande active.

Profil A 197 (Figure 132):

Ce profil se caractérise par une forte emprise en rive gauche d'une zone d'extractions de granulats aujourd'hui abandonnée. Les fortes perturbations dynamiques et morphologiques intervenues dans ce secteur ne nous permettent pas d'en dégager une évolution pertinente.

L'évolution sur ce profil est peu importante. L'interprétation de cette comparaison se résume très facilement à un constat clair : celui de l'enfoncement du bras principal, moins prononcé que sur les deux profils étudiés plus en amont. Ce profil enregistre en l'espace de 25 ans l'enfoncement du chenal principal (de - 3 à - 7 cm par an) et la formation d'un banc qui s'est exhaussé de 4 à 5 cm par an. La berge de rive droite est stable.

Profil A 199 (Figure 133):

Ce profil marque à nouveau l'enfoncement du chenal principal (- 3 à 6 cm par an). Une forte érosion d'un îlot s'enregistre à un rythme de -5 à - 7 cm par an (érosion quasi-totale de cette forme insulaire).

L'extension latérale et verticale du franc-bord de rive droite (+ 5 à 8 cm par an) est liée à la migration latérale du chenal secondaire (280 m en 25 ans).

L'ensemble de ces profils transversaux confirment l'enfoncement généralisé du lit de la Loire avec en moyenne une incision de l'ordre de 8 cm par an depuis 1970. Cet enfoncement est légèrement plus faible que celui enregistré au Bec d'Allier (Gautier et al., 2001) et sur d'autres sites de la Loire moyenne (SA 1 et SA 2). L'enfoncement du plancher alluvial de ces secteurs de la Loire moyenne est même supérieur à la moyenne enregistrée en Loire moyenne (de l'ordre de 2 à 5 cm par an) (Gasowski, 1994). A partir de ces premières observations, nous proposons à présent d'analyser plus précisément les rythmes d'évolution des îles et de la bande active.

2). Rythmes d'évolution des îles

Nous avons réussi précédemment à déterminer deux classes d'âges des formes insulaires : des îles anciennes, formées il y a plus de quarante ans, et des îles jeunes de moins de quarante ans. Il se trouve que notre approche à grande échelle permet de caractériser des rythmes d'évolution propres à chacune de ces classes.

a). Des îles anciennes au rythme modéré

Les anciennes îles montrent un contraste important entre leur partie médiane et sommitale d'un côté et leurs berges de l'autre (Figure 134). Il s'avère que ces îles connaissent une forte extension latérale par sédimentation au niveau des berges (jusqu'à 20 cm par an) alors que les parties centrales évoluent très lentement (pas plus de 2 cm par an). Cela marque, par conséquent, la forte prédisposition des formes insulaires, en particulier les plus anciennes, à la sédimentation latérale. L'existence d'un seuil topographique limité se dessine, dès lors, certainement, que les événements hydrologiques

ne sont plus suffisamment réguliers et forts pour la submersion de ces parties les plus perchées des îles.

L'approche moyenne, à l'aide du SIG, nous avait permis de spatialiser en plan l'érosion et la sédimentation sur les îles, suivant leur classe de taille (du micro-îlot à la très grande île).

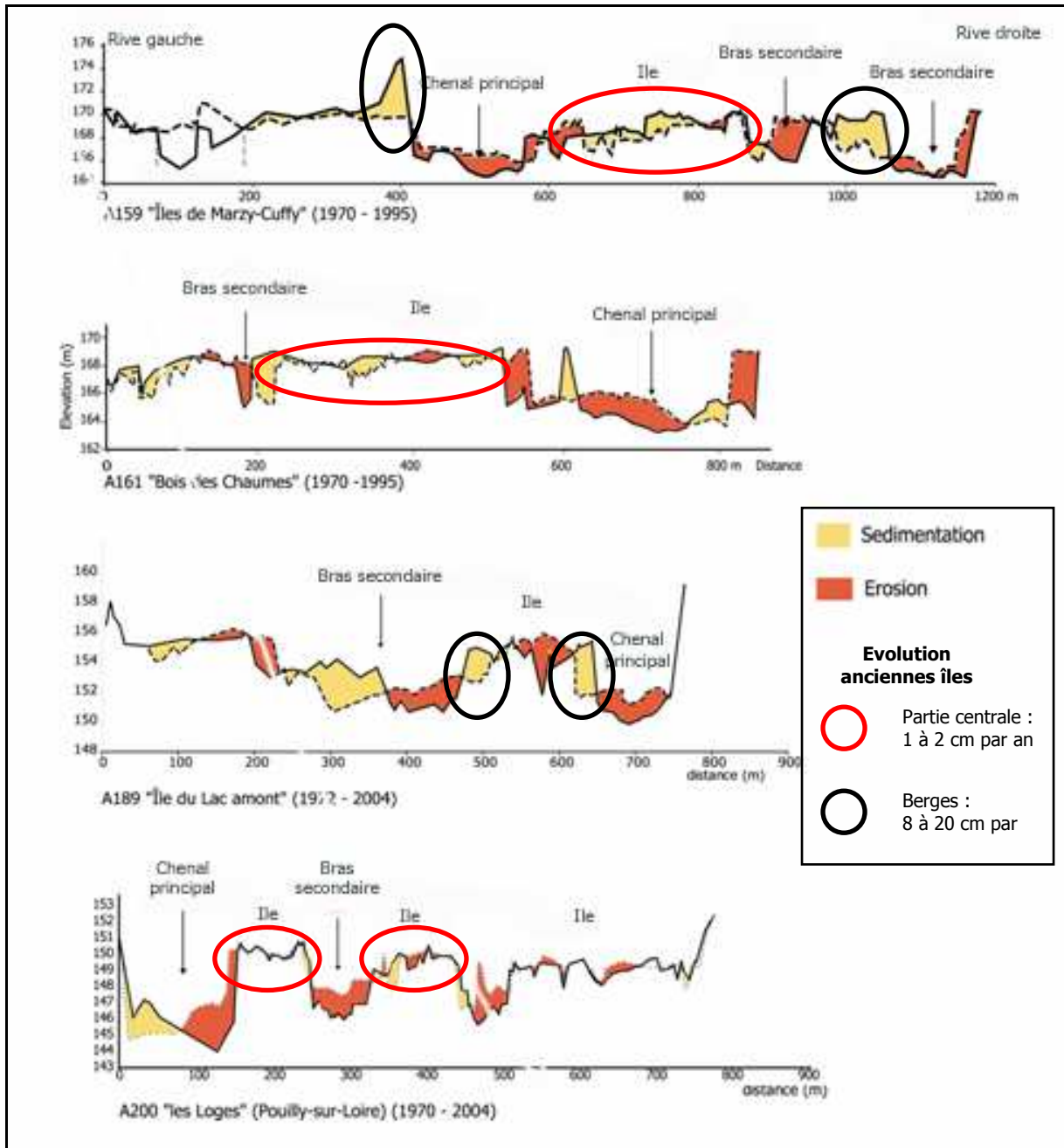


Figure 134 – Profils comparatifs des Sites Ateliers 1 et 3.

La comparaison de profils transversaux apporte des données quantitatives sur les rythmes d'évolution des îles les plus anciennes du corridor fluvial.

b). Le rythme « effréné » des îles jeunes

Les îles jeunes (formées depuis 1970) connaissent une forte accrétion verticale à un rythme pouvant atteindre les 20 cm par an (Figure 134). Cette forte accrétion verticale semble se localiser sur des secteurs à forts apports en sédiments, comme cela est le cas pour le profil A158 à la confluence de l'Allier et de la Loire.

En moins de 40 ans, ces formes insulaires subissent encore très régulièrement les crues annuelles et favorisent la rétention sédimentaire par piégeage. Et au-delà de ce seuil de croissance de 40 ans, les îles sont de moins en moins sujettes à une submersion de leur surface, ce qui a pour conséquence de ralentir cette accrétion verticale qui est si effrénée pour les jeunes îles. Ce point constitue un résultat fondamental dans la compréhension du fonctionnement de l'hydrosystème anastomosé : les îles jouent un rôle décisif dans le piégeage des matériaux et l'évolution de la Loire des îles (Figures 135 et 136). Il nous reste à présent à préciser cette thèse et à déterminer l'intensité de ce rôle en fonction d'années hydrologiques différentes. La comparaison ne fait pas apparaître les rythmes de croissance des bancs à caractère insulaire. Ces bancs nous apparaissent sujets à une forte accrétion verticale et même latérale du fait de leur submersion-émersion très fréquente et aussi du fait de la présence d'une végétation pionnière active. Notre hypothèse doit donc être étayée par l'approche inter-annuelle, seconde phase de notre analyse à grande échelle.

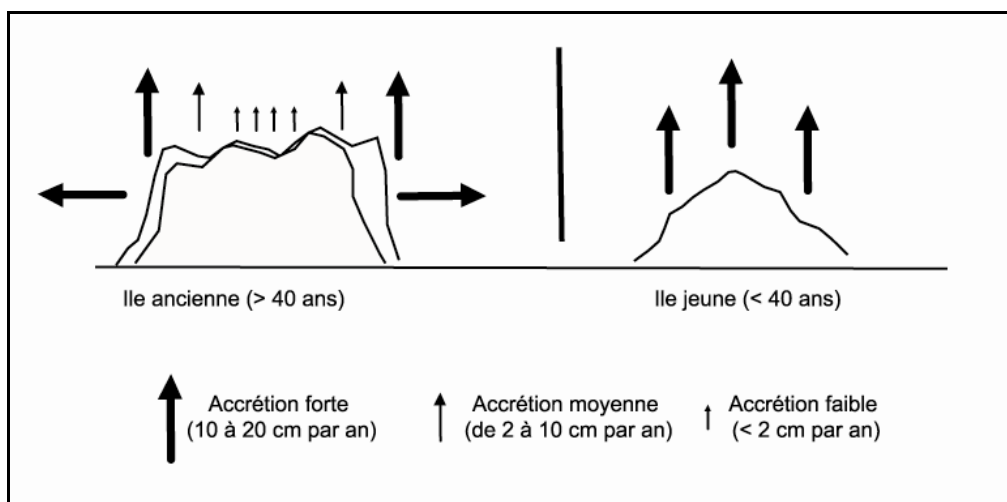


Figure 135 – Rythme d'accrétion des îles.

Les îles jeunes montrent un fort développement vertical qui s'amenuise au cours de leur croissance pour finir par se stabiliser et laisser la place à une accrétion latérale. Ce schéma ne tient pas compte des possibilités d'érosion latérale des îles anciennes.

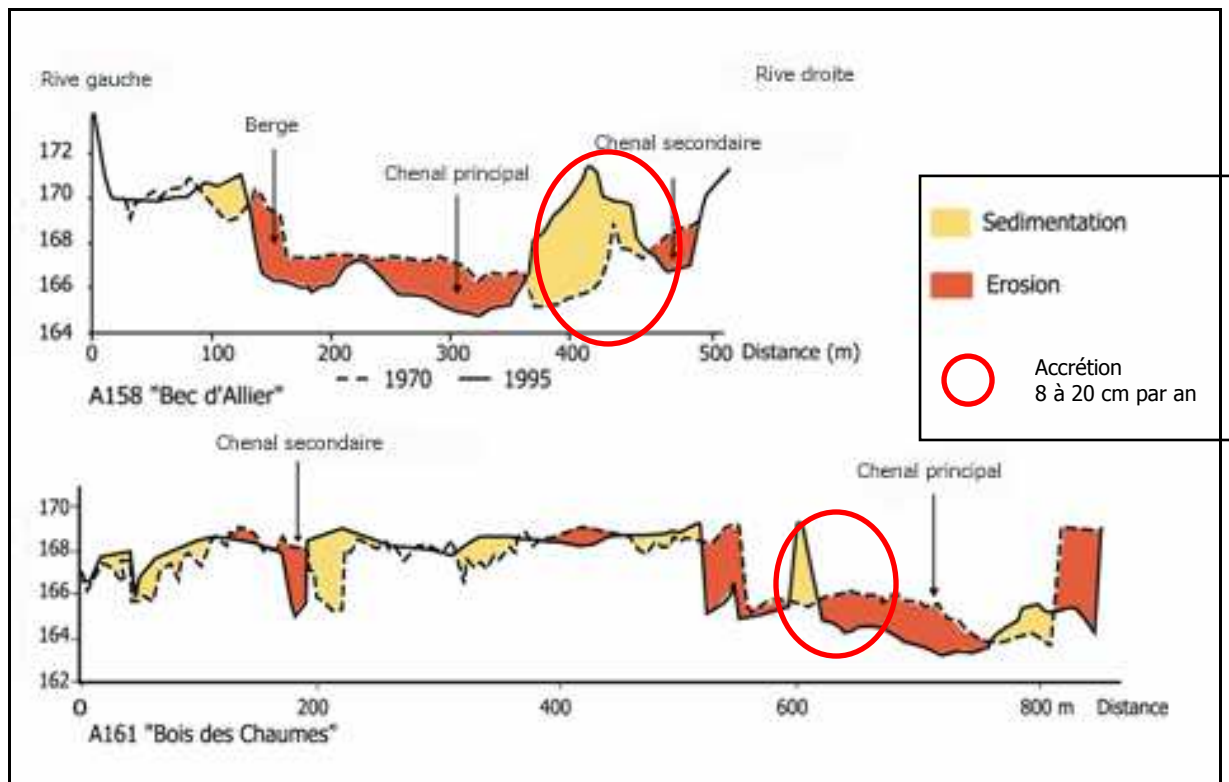


Figure 136 – Profils comparatifs du Site Atelier 1.

Les îles jeunes, moins de 40 ans, se révèlent de fantastiques formes de piègeages de sédiments par leur forte croissance verticale (Gautier et *al.*, 2001).

3). La bande active : entre incision et comblement

A travers l'exemple des profils transversaux précédents et d'autres localisés au sein du SA 3, nous pouvons évaluer le rythme d'évolution de la bande active et tout particulièrement le chenal principal qui constitue un des objets de préoccupation fort parmi les gestionnaires du fleuve depuis les points alarmants émis dans la décennie 1990 (Gazowski, 1994). Ce cri d'alarme avait été suivi, pour rappel, par l'arrêt des extractions en 1994 au sein même du lit mineur.

a). La bande active principale : la confirmation d'une incision généralisée

Du Bec d'Allier à Pouilly-sur-Loire, les profils A158, A189 ou A200 laissent apparaître le même constat : l'incision généralisée du plancher alluvial principal (Figure 137). Le chenal principal est, en 1995, plus étroit et plus profond que 23 ans plus tôt, il s'est en effet enfoncé jusqu'à 1,25 m, soit 8 cm par an. Ces données sont supérieures à celles du lit en général avec un enfoncement estimé à 3 cm en moyenne par an (Hydratec, 1989). Pour le

secteur de la Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire, cet enfoncement est évalué à 5 cm par an entre 1981 et 1993 (Calard et Karlsson, 1994).

La comparaison des profils montre également la capacité de déplacement du talweg des différents chenaux pouvant atteindre des niveaux de migration latérale de l'ordre de 5 m par an. Ceci renforce une hypothèse émise sur l'importance de la fluctuation spatiale de la bande active au profit de la genèse de secteurs à îles. Ce que nous révélons ci- après.

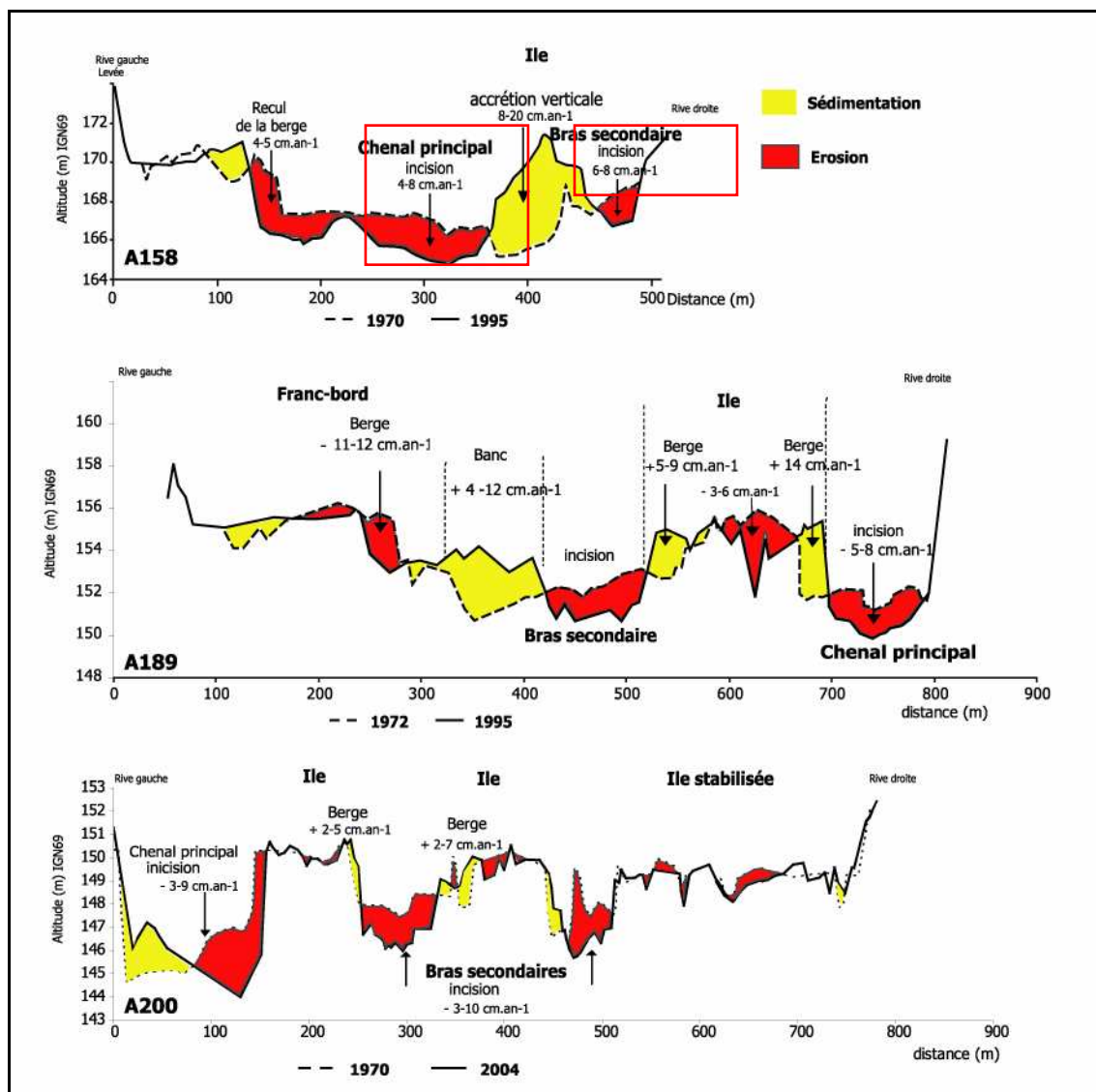


Figure 137 – Profils comparatifs de l'évolution du lit fluvial.

Ces profils apportent des informations extrêmement importantes sur les liens unissant les grandes unités fonctionnelles de type de style fluvial. La Loire des îles montre des degrés d'évolution différents suivant les formes fluviales, bancs, îlots, îlots, chenaux et francs-bords.

b). La bande active secondaire : la nécessité d'un suivi plus précis

- Cette approche montre de plus que les bras secondaires sont les zones les plus actives quant à leur rythme d'évolution, principalement latéral. Leur développement est lié en effet à la fois à l'installation d'îles ou de bancs végétalisés, et de l'extension de franc-bord. Au profil A189, par exemple, le chenal secondaire a migré latéralement de 140 m vers la rive droite entre 1972 et 1995, sans noter pour autant de modification nette de sa profondeur (relative stabilité). Cette translation latérale s'accompagne d'un exhaussement d'une partie du banc attenant au franc-bord de rive gauche (près de 12 cm par an de dépôts) (Figure 137).

- En parallèle aux modifications de la bande active par comblement de bras secondaires ou incision du chenal principal, les formes végétalisées réagissent, se développent ou progressent. On note ainsi la construction d'épais bourrelets de berge sur les bords du chenal principal et du bras secondaire, ce qui permet un accroissement net de l'île de ce même profil A189 : le taux de sédimentation atteint en rive droite 14 cm/an. L'île - qui était un banc en 1960 - s'est élargie de 100 m, mais elle ne montre pas d'exhaussement prononcé. Un petit chenal en a entaillé le centre. Cette île est au même niveau topographique que le franc-bord de rive gauche, les deux étant assez perchés par rapport au fond du bras principal (5 m environ).

Pour le franc-bord, l'évolution semble peu marquée ; la sédimentation y est réduite et concerne seulement les dépressions, traces d'anciens bras secondaires. On note une érosion active de la berge (12 cm/an de dépôts enlevés).

Cependant, il faut noter, tout comme nous l'avons relevé lors de l'approche à échelle moyenne sous SIG, que les francs-bords ont une forte capacité à croître latéralement au détriment de la bande active, secondaire le plus souvent. Ainsi, sur un profil A192b nous avons pu faire correspondre complètement l'analyse sous SIG avec la comparaison de deux profils topographiques (Figure 138). Sur ce profil, le franc-bord de rive droite se développe fortement (plus de 25 m par an) en fixant définitivement un îlot et par comblement successif de chenaux secondaires. Ce franc-bord correspond tout à fait à ce que nous avons déterminé comme étant une zone de prédisposition à la sédimentation et à la végétalisation colonisatrice, dès que le talweg principal divague.

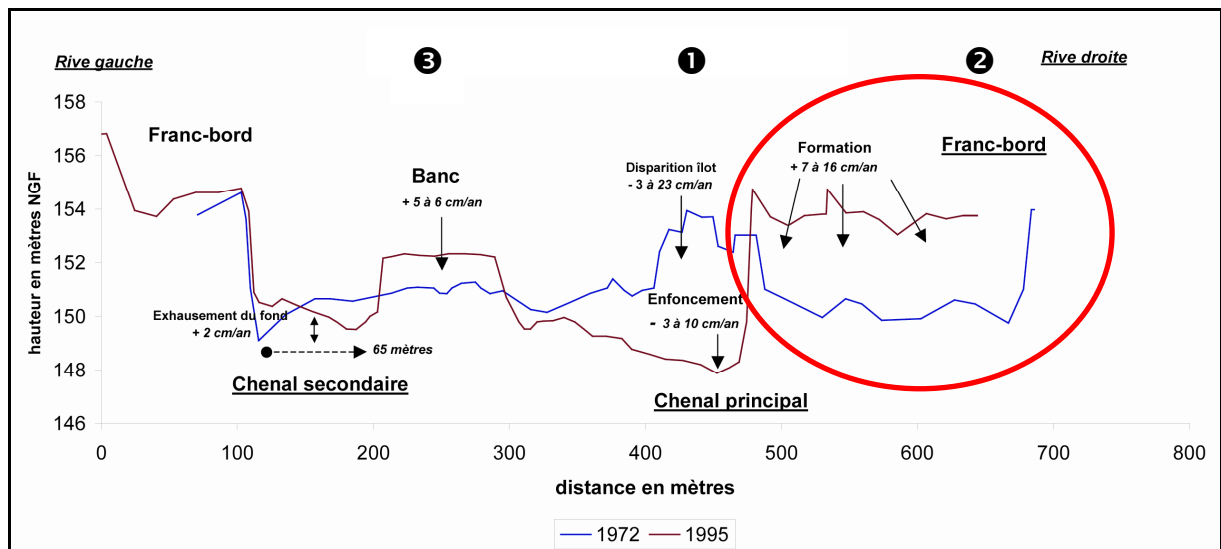


Figure 138 – Profil topographique A192b, secteur de Mesves-sur-Loire.

Il montre plusieurs phénomènes liés d'un point de vue chronologique et spatialement : ① migration latérale (+ de 200 m en 23 ans) et incision du talweg (de 3 à 10 cm par an) permettant ② le développement vertical (jusqu'à 16 cm par an) et latéral du franc-bord de rive droite ③ la formation d'un banc à caractère insulaire qui a abouti en 2005 à un îlot boisé. Ces trois phases illustrent l'interdépendance du triptyque de la Loire des îles

c). Synthèse de cette première phase d'analyse

- Retenons de ces divers cas d'évolution que la formation des îles est fortement liée à l'évolution de la bande active. Ce résultat corrobore donc notre hypothèse selon laquelle les secteurs fonctionnels à îles sont liés à la divagation du bras principal et tout particulièrement de son talweg. A travers trois coupes transversales du lit, on constate que lorsque le bras principal se réduit et par conséquent s'incise, une île ou des îles, et des amorces de bancs à caractère insulaire se développent. Ce développement peut alors être assez fort lorsque la bande active subit effectivement un enfoncement très important de son plancher alluvial (+ de 5 cm par an). Cette corroboration nous invite à nous pencher encore plus précisément sur ces rythmes d'évolution de la bande active et surtout des bras secondaires, que nous considérons à juste titre d'ailleurs comme les unités fonctionnelles à surveiller actuellement pour établir le degré d'insularité des îles (et aussi de leur durée d'insularité).

☞ Les îles de moins de 40 ans connaissent une forte accrétion verticale, constituant de ce fait des zones privilégiées de piégeage en sédiments

☞ Les îles de plus de 40 ans voient leur développement vertical se réduire et se stabiliser, l'érosion et leur croissance s'exerçant alors sur leur marge latérale (berge).

☞ Le chenal principal connaît une incision généralisée et des capacités à migrer latéralement, laissant la place à des secteurs à îles

☞ Les bras secondaires s'incisent ou s'exhaussent mais connaissent tous une réduction de leur largeur

La seconde phase de notre approche fine permet justement d'apporter des compléments d'analyse et d'information à notre thèse sur les systèmes anastomosés en milieu tempéré : les rythmes inter-annuels et saisonniers en fonction de débits caractéristiques.

B Suivi des conditions sédimentaires entre La Charité-sur-Loire et Tracy-sur-Loire (Site Atelier 3)

Nous prenons à nouveau, comme secteur représentatif, le Site Atelier 3. Il s'agit ici de montrer l'ampleur de la rétention sédimentaire par rapport à la question du déséquilibre sédimentaire, mal chronique des cours d'eau français et tout particulièrement de la Loire (Gautier et al., 2001 ; Bomer, 1972 ; Babonaux, 1970). Notre objectif dans ce chapitre est d'évaluer les processus sédimentaires régissant cet ensemble fonctionnel. Nous souhaitons ainsi insister sur le fait que la Loire des îles ne représente qu'un stade d'évolution dans le style anastomosé de la Loire moyenne, il constitue cependant une énorme réserve en sédiments fixée depuis de nombreuses décennies. Il s'agit donc de rattacher notre analyse multi-scalaire à la question actuelle du déficit sédimentaire dont souffre la Loire et qui se traduit par l'incision et la chenalisation de son lit fluvial.

1). Bilan sédimentaire à l'échelle spatio-temporelle moyenne

a). Sectorisation et quantification de l'érosion et de la sédimentation

L'érosion et la sédimentation ont été spatialisées à l'échelle moyenne et quantifiées à l'aide de notre base de données géoréférencées. Nous tenterons de comprendre le rôle des différentes formes fluviales dans le piégeage sédimentaire.

- Evaluation de l'érosion latérale

Les surfaces érodées et sédimentées ont été mesurées pour les périodes 1960 – 1995 (Tableau XIII) et 1995-2002 (Tableau XIV) à partir du SIG et de la base de données. Nous dressons un bilan à l'échelle du Site Atelier 3 par classe de valeurs des surfaces et à l'échelle des secteurs fonctionnels déterminés dans le chapitre 2. L'espace potentiellement érodable est également pris en compte.

Tableau XIII - Surfaces érodées et sédimentées entre 1960 et 1995 par secteur fonctionnel

	Surfaces érodées (m²)	Surfaces sédimentées (m²)
Secteur La Charité	101 000	296 700
Secteur de Mouron	170 000	1 868 000
Secteur du lac	157 800	524 500
Secteur des Barreaux	186 200	164 800
Secteur de Pouilly	77 400	243 400
Secteur des Loges	116 400	406 400
Total	808 800	3 503 800

Tableau XIV - Surfaces érodées et sédimentées entre 1995 et 2002 par secteur fonctionnel

	Surfaces érodées (m²)	Surfaces sédimentées (m²)
Secteur La Charité	58 990	121 640
Secteur de Mouron	13 100	23 570
Secteur du lac	101 490	179 020
Secteur des Barreaux	17 100	68 250
Secteur de Pouilly	45 360	70 700
Secteur des Loges	100 660	106 450
Total	336 700	569 630

- Localisation des secteurs érodés (Figures 139 et 140)

Les sites d'érosion maximale sur les 40 ans d'étude sont localisés sur 5 francs-bords présentés d'amont en aval :

- 1) La Pointe, rive droite, aval de la Charité-sur-Loire : l'érosion peut actuellement se poursuivre en particulier sur la partie aval de ce site ;
- 2) Mesves, rive droite, représente la partie la plus active du Site Atelier 3. Le potentiel érodable est ainsi important (recul de la berge de 7 m par an en moyenne) ;
- 3) entre les Barreaux et les Butteaux, rive gauche. L'érosion est actuellement bloquée par un enrochement : le potentiel érodable est donc très réduit. Cet enrochement est probablement responsable de l'érosion remarquée immédiatement en aval sur la berge opposée (site 4) ;
- 4) Charenton, rive droite, au débouché du chenal des Barreaux et du Mazou. Cette érosion qui mettait en péril la route, a rendu nécessaire la pose d'un enrochement (en 1999) ;
- 5) La Martinaterie, rive gauche. L'érosion du franc-bord s'est accompagnée de l'ouverture d'un nouveau chenal secondaire, bien actif actuellement. Notons qu'il s'agit d'un ancien site d'extraction de sédiments.

De cette analyse, ressort le fait qu'actuellement trois sites seulement sont en cours d'érosion rapide et disposent d'un espace suffisant pour permettre la poursuite du mécanisme.

A ces sites principaux d'érosion, doivent être ajoutées des zones moins étendues, mais non négligeables. Le sapement concerne en effet :

- 1) des têtes d'îles (en particulier, l'amont de l'île de la Pointe) ;
- 2) la queue d'île de l'île du Lac ;
- 3) des îlots de surface inférieure à 4000 m² ;
(correspond à notre analyse spatiale à échelle moyenne) ;
- 4) le long du bras secondaire de l'île du Lac ;
- 5) très localement sur des francs-bords.

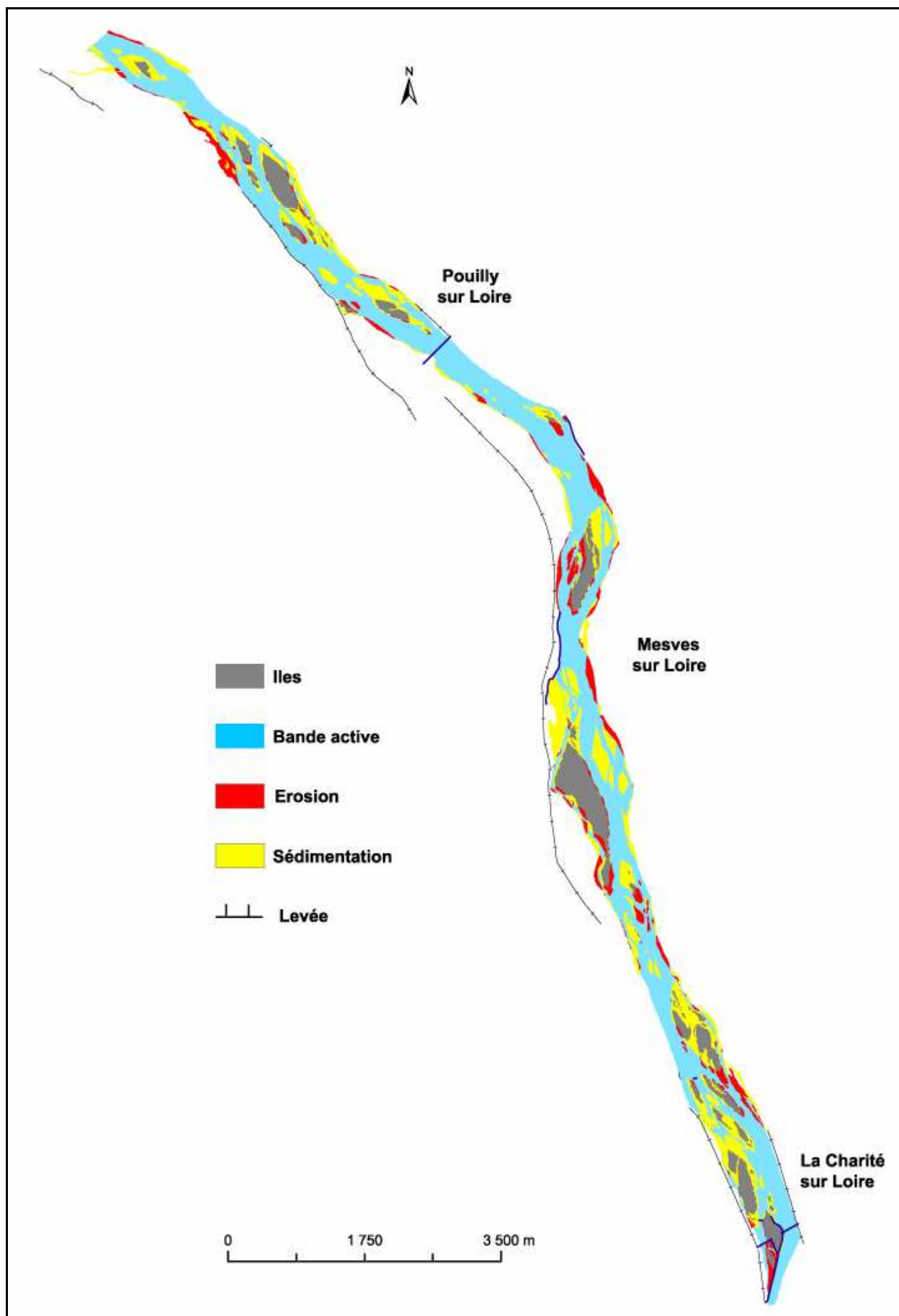


Figure 139 - Cartographie des surfaces érodées et sédimentées de 1960 à 1995 dans Site Atelier 3.

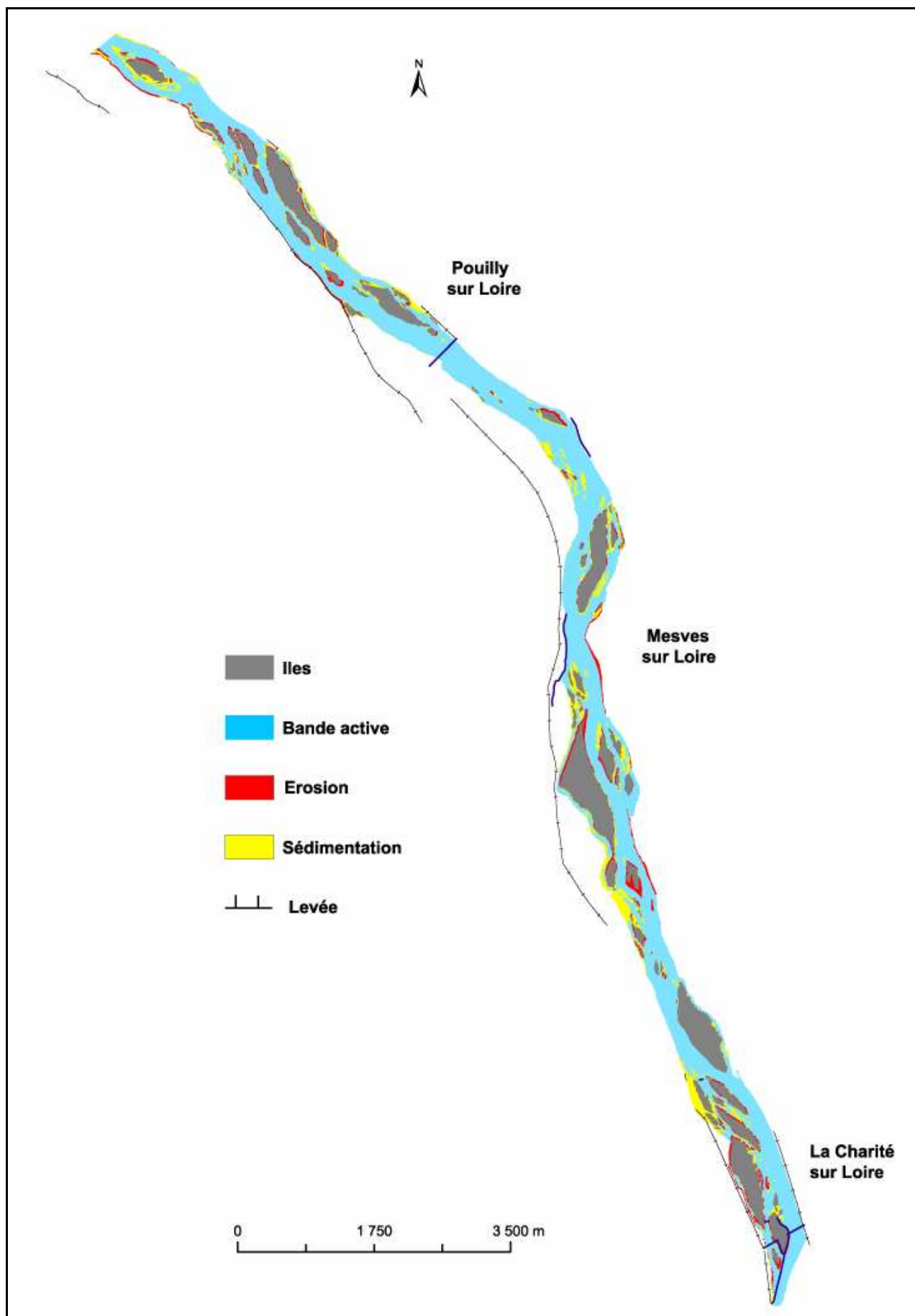


Figure 140 - Cartographie des surfaces érodées et sédimentées de 1995 à 2002 dans Site Atelier 3.

- Bilan 1960-1995 (Figure 141) et 1995-2002 (Figure 142) par secteur fonctionnel

Les surfaces érodées ont été analysées en fonction des secteurs fonctionnels. La totalité des surfaces érodées et sédimentées est alors rapportée à la longueur du secteur et exprimée en m^2 par m linéaire et par an (soit en $m^2.m^{-1}.an^{-1}$).

Pour les 40 ans d'étude, il apparaît clairement que les surfaces caractérisées par l'accumulation sédimentaire sont largement supérieures aux surfaces érodées. Seul le secteur des Barreaux a des surfaces érodées et sédimentées relativement équivalentes (1960-1995), et celui des Loges présente un certain équilibre entre érosion et sédimentation depuis 1995.

Le secteur de Mouron a subi la plus forte accumulation au rythme d'environ $20 m^2$ par an, vient ensuite le secteur du Lac avec environ $5 m^2$ annuels.

En terme d'érosion, les secteurs du Lac et des Barreaux sont les principaux pourvoyeurs en sédiments, essentiellement du fait du recul du franc-bord de Mesves et secondairement, par la remobilisation à l'intérieur du bras secondaire et du recul de la queue de l'île du Lac. Les zones de Mouron et de Pouilly ont été les moins affectées par l'érosion.

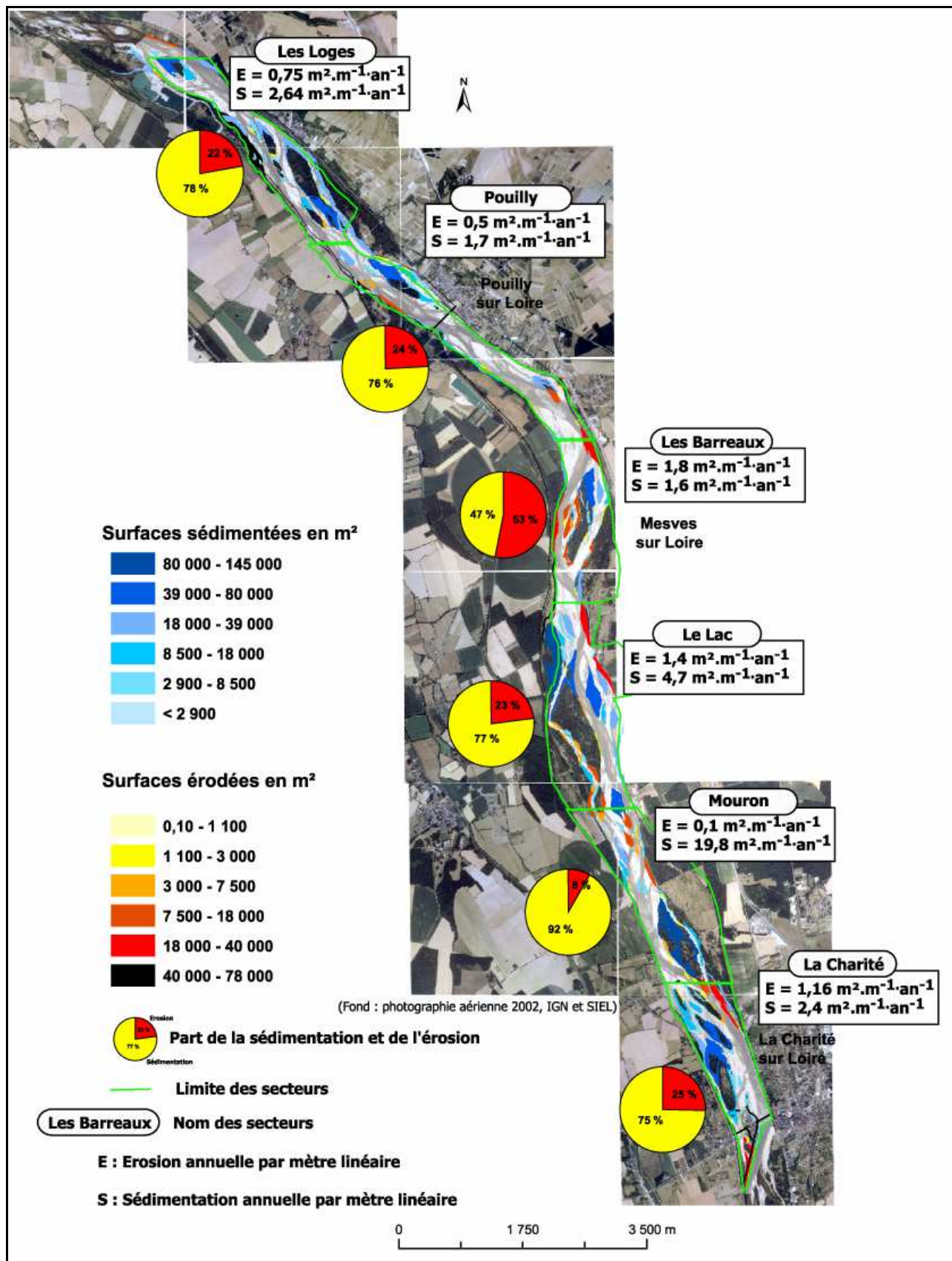


Figure 141 - Bilan des surfaces érodées et sédimentées de 1960 à 1995 dans la Réserve Naturelle du Val de Loire.

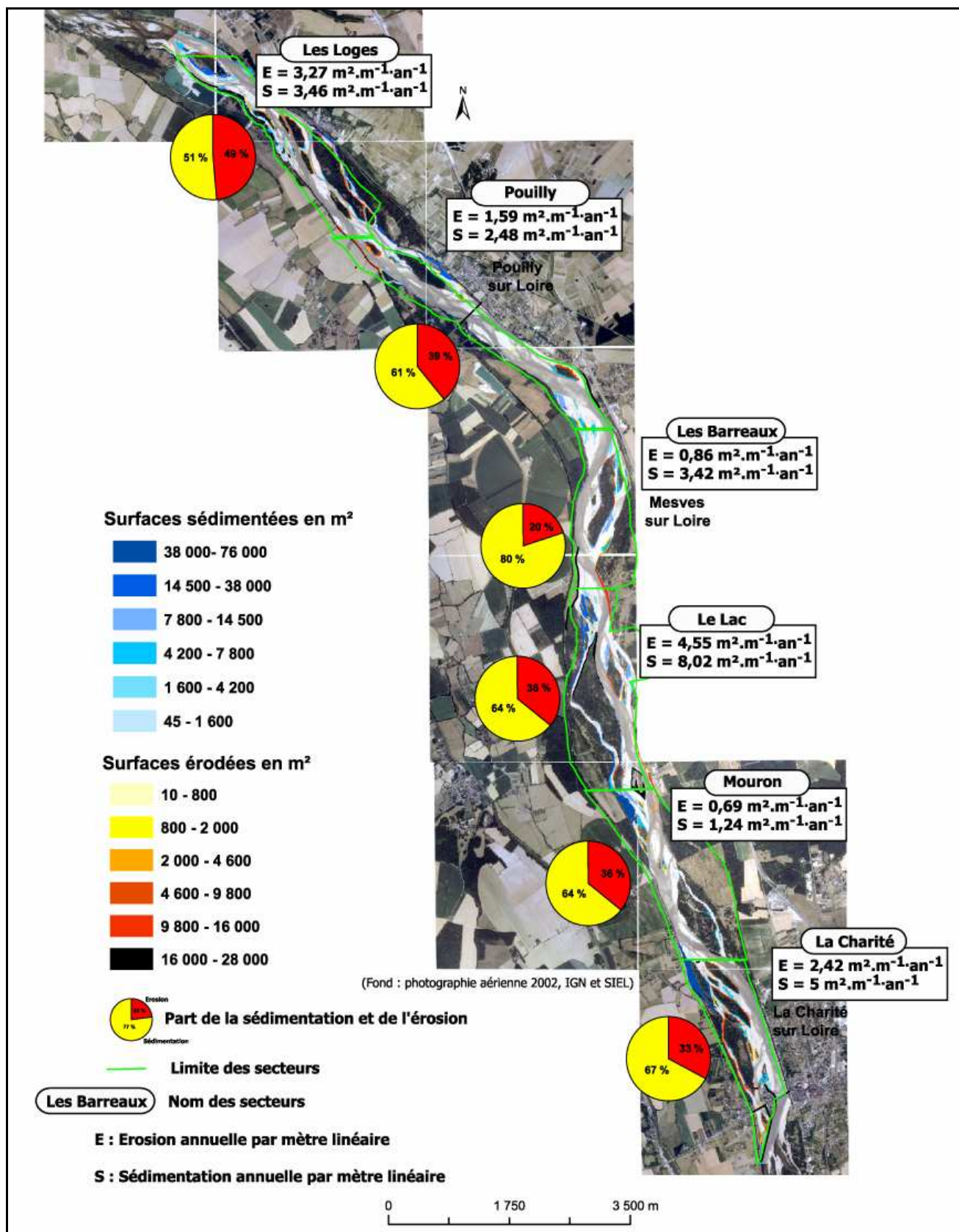


Figure 142 - Bilan des surfaces érodées et sédimentées de 1995 à 2002 dans la Réserve Naturelle du Val de Loire.

2). Budget sédimentaire annuel entre la Charité-sur-Loire et Tracy-sur-Loire

a). Les îles : des réservoirs de sédiments

A l'aide du logiciel Arc Gis et en s'aidant des points du MNT Laser de la DIREN Centre nous avons pu construire les MNT de toutes les îles du Site Atelier 3 (Figures 143 et 144). Cette méthode nous permet ainsi de calculer les volumes de sédiments retenus au sein de ces îles depuis leur pied de berge jusqu'à leur sommet. Nous obtenons non seulement une radiographie topographique des formes insulaires du SA 3, également les volumes de sédiments ainsi déposés depuis la formation de ces îles. Nous parlons dans notre approche de rétention sédimentaire dans le sens où effectivement ces îles ont retenu les sédiments. Ainsi, en fonction de l'âge de formation des îles, nous pouvons établir le rythme de sédimentation de chaque île et en déduire la quantité de sédiments retenus en leur sein. Ainsi, dans le Site Atelier 3, plus de 10 millions de m³ de sédiments ont été piégés sur les formes insulaires. Ce réservoir s'est constitué essentiellement au cours du 20^{ème} siècle comme l'a démontré notre analyse spatiale, à un rythme de près de 100 000 m³ retenus chaque année au cours de ce siècle de grandes modifications géomorphologiques de la Loire : la Loire des îles s'est développée en somme sur ces quantités impressionnantes de sédiments piégés.

Rapportée à une échelle linéaire, cette rétention insulaire peut être estimée à environ **5 000 m³/km/an.**

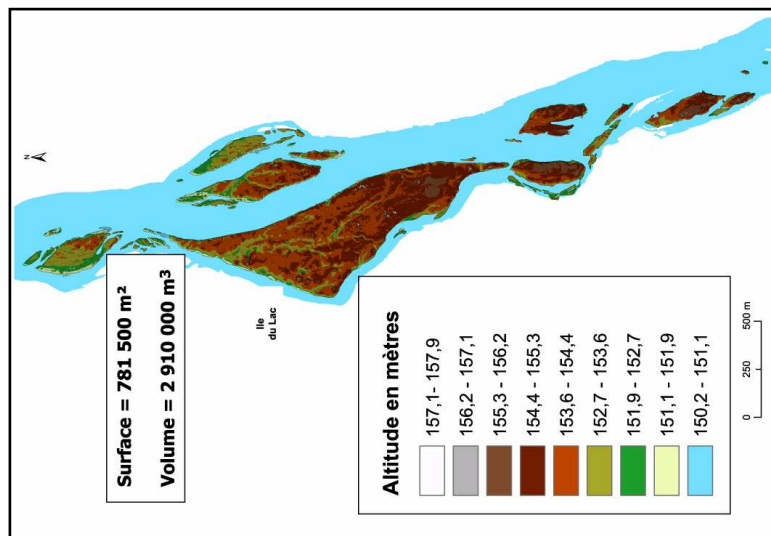
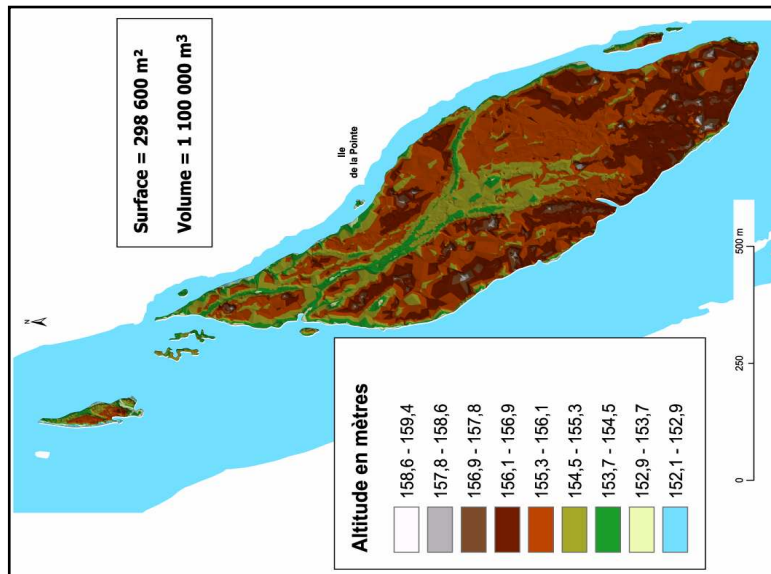
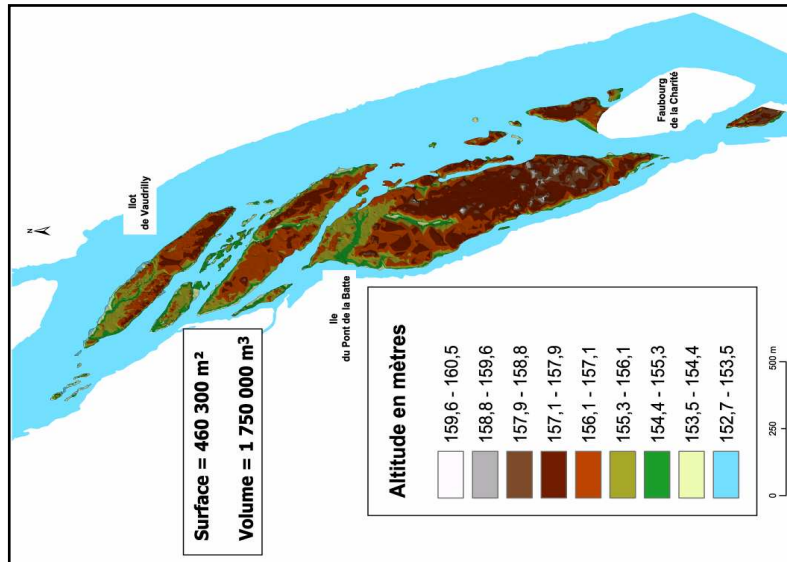


Figure 143 - Estimation des volumes de sédiments - Première partie du secteur SA 3. A l'aide du semis de points du LIDAR (Diren-Centre) exploité sous Arc Gis (MNT).

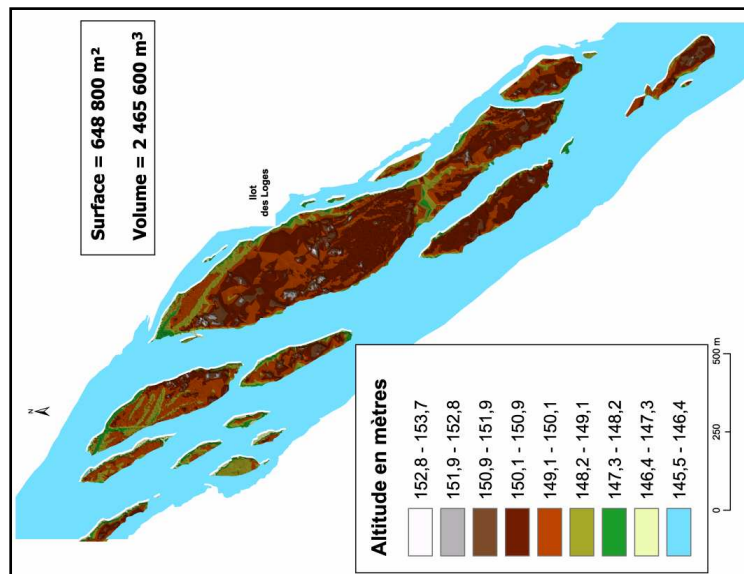
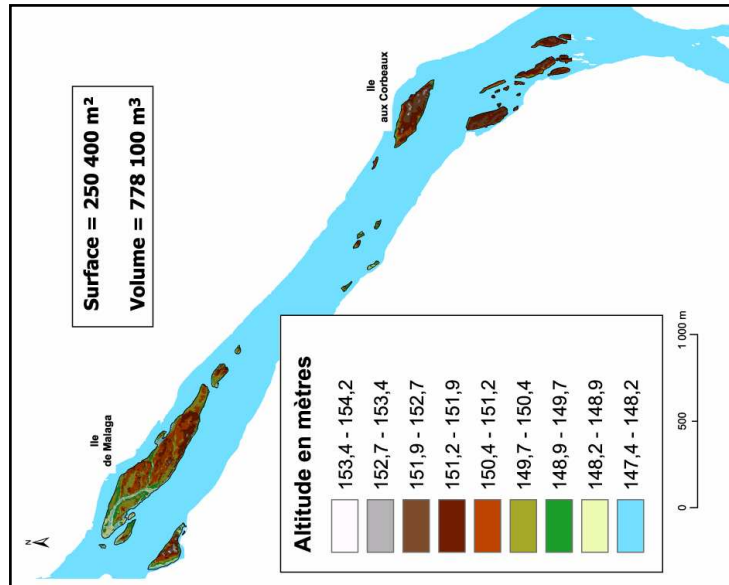
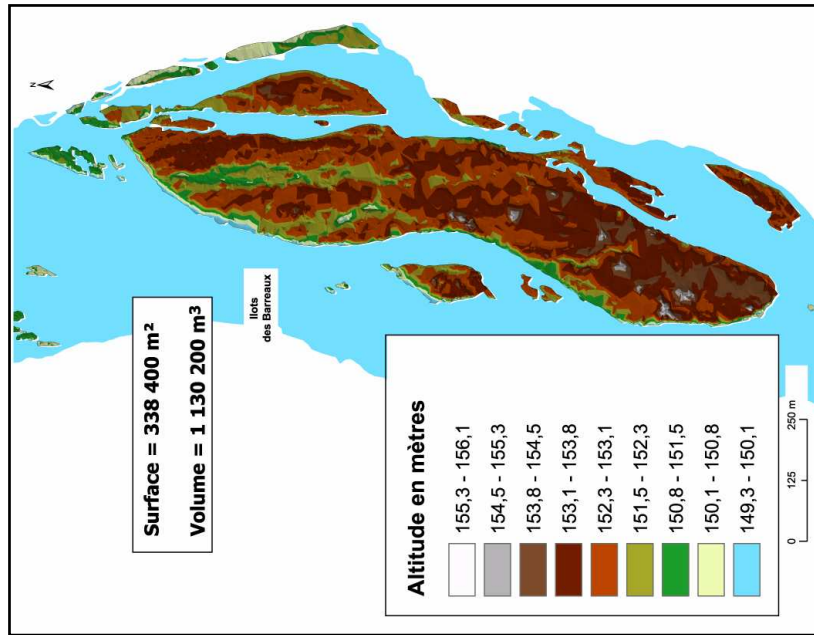


Figure 144 - Estimation des volumes de sédiments - Deuxième partie du secteur SA 3.

Il est donc évident que les volumes accumulés au fil des différentes générations d'îles de ce SA sont énormes. Ce qui constitue autant de sédiments en moins pour le chenal principal. Ces îles ont donc constitué un facteur aggravant du déséquilibre sédimentaire observé et confirmé par l'incision actuelle du lit ligérien.

Notre analyse spatiale à échelle fine a ainsi démontré que ce processus de piégeage par les îles, plus précisément des îles jeunes donc moins perchées et pourvues d'une végétation pionnière et semi-arborée, se poursuit. Ce rythme est encore plus soutenu pour des événements hydrologiques de fortes intensités (débits supérieurs à $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ou de longue durée (plus de 10 jours avec des débits au moins de $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Nous pouvons en conclure encore que la sédimentation l'emporte, mais que nous nous situons à une période charnière avec le développement d'une nouvelle génération d'îles (dont l'intervention humaine pourrait encore limiter l'expansion avant de rentrer dans un cycle irréversible et réclamant trop d'investissement financier pour enrayer le processus) et des secteurs fonctionnel réinjectant des volumes de sédiments du fait de l'érosion de certaines berges d'îles et de francs-bords (comme le franc-bord des Loges).

b). Les francs-bords : les réservoirs.

Les francs-bords du Site Atelier 3 ont fait l'objet de la même attention méthodologique pour évaluer les volumes de sédiments retenus au sein de ces formes végétalisées (Figures 145). Nous avons en effet montré la forte extension latérale de ces francs-bords depuis 1850, notamment grâce au rattachement aux marges fluviales de bon nombre d'îles. Si ces francs-bords ont contribué à la rétraction de la bande active, ils ont également participé au piégeage sédimentaire du fait de la végétation pionnière qui s'y est installée et développée. Nous donnons dans cette sous-partie une estimation des volumes retenus depuis 1850 jusqu'à aujourd'hui sur les plus grands francs-bords du Site Atelier 3. Ainsi, plus de 12 millions de m^3 de sédiments ont été retenus depuis la formation des francs-bords, soit après 1850. Ce type de forme a donc piégé et stocké plus de sédiments que les îles au cours du 20^{ème} siècle. Ce piégeage a permis aux francs-bords de se développer fortement. Et comme nous l'a montré l'analyse spatiale de ce Site Atelier, les francs-bords se sont constitués essentiellement à la fin du 19^{ème} siècle et durant la première moitié du 20^{ème} siècle.

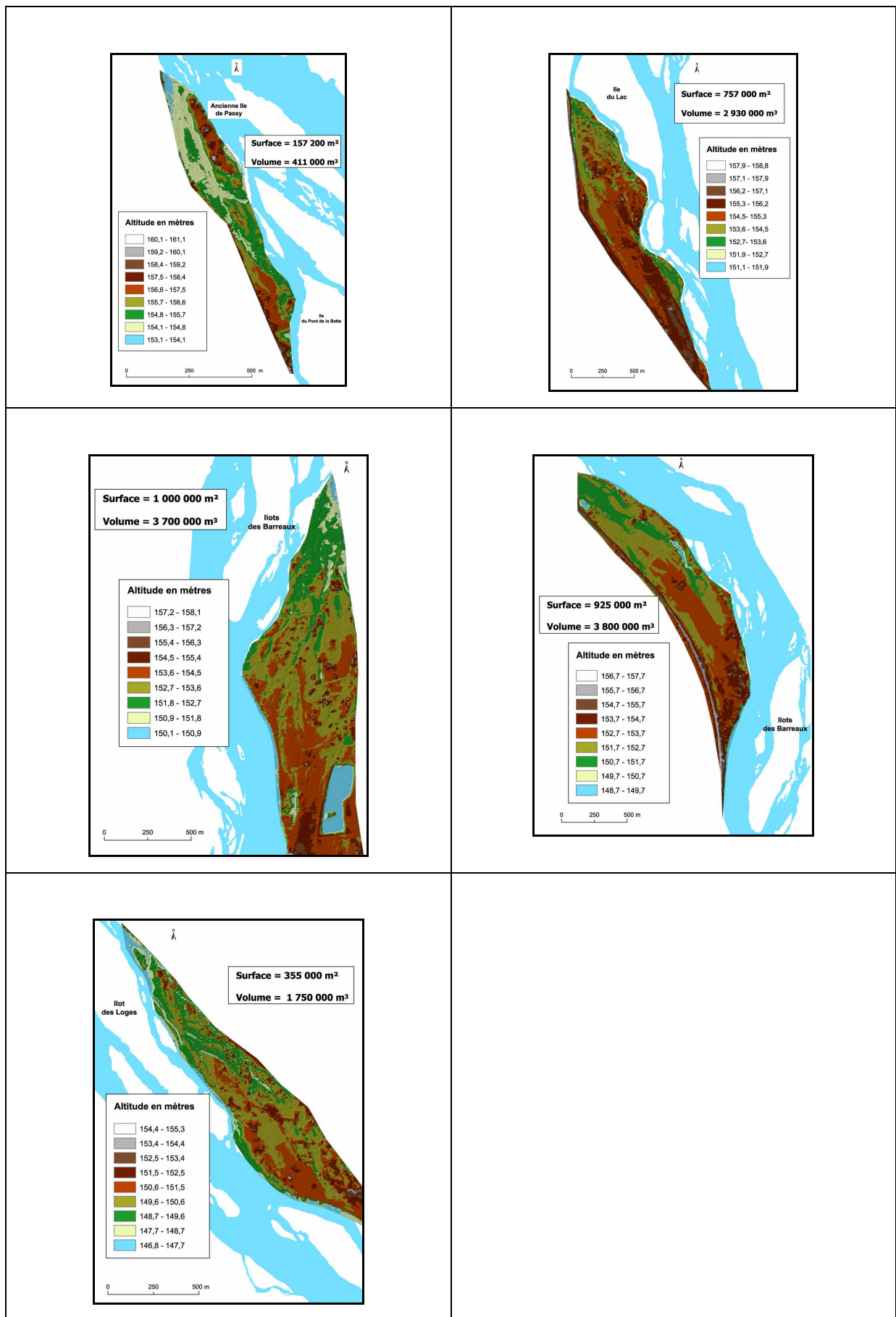


Figure 145 - Estimation des volumes de sédiments sur les grands francs-bords du Site Atelier 3, à l'aide du semis de points du LIDAR (Diren-Centre) exploité sous Arc Gis (MNT).

c). Les bras secondaires : les zones de transit sédimentaire

Si les îles et les francs-bords constituent les formes fluviales du piégeage sédimentaire par excellence, les bras secondaires sont en revanche des zones de transit pour la charge sédimentaire. Aussi, il est difficile de déterminer, à l'aide du LIDAR, le rythme de piégeage sédimentaire par les bras secondaires. Cette limite explique d'ailleurs le recours à l'échelle fine à l'aide du DGPS pour comprendre le fonctionnement hydro-sédimentaire des bras secondaires. Nous proposons simplement de montrer le stock sédimentaire disponible en 2002 dans les principaux bras secondaires du Site Atelier 3 et de spatialiser les zones de sédimentation privilégiée (bouchons alluviaux, bancs de progradation...).

- Site de La Charité-sur-Loire (Figure 146) : on note la présence d'une accumulation sédimentaire importante en arrière immédiat de la chevrette. Ce bras se caractérise par une alternance de bancs latéraux au sein même du long bras et par des bouchons alluviaux situés à des connexions importantes de bras secondaires. En effectuant un zoom sur le bras secondaire de Passy, à l'aval du bras de La Charité, on se rend mieux compte effectivement de l'importance de ces bancs exhausés qui créent des bouchons aux connexions. Un mince chenal arrive à se frayer un chemin dans ce secteur de comblement sédimentaire.

- Site de l'Île de la Pointe (Figure 146) : un bouchon alluvial s'est formé à la connexion amont du bras secondaire. Le bras est occupé, dans sa section moyenne, par une alternance de bancs latéraux.

- Le bras des Barreaux (Figure 147) représente le site le plus complexe. Une sédimentation affecte ce bras puisqu'il se retrouve très perché par rapport au chenal principal ; sa section est entièrement dominée par des bancs latéraux développés et des bouchons alluviaux marqués à la connexion aval. Un mince chenal divague entre les connexions amont et aval.

- Le bras au droit de l'Île aux Corbeaux présente un bouchon alluvial à sa connexion amont (Figure 148).

- Le site des Loges se caractérise par un bouchon alluvial marqué à sa première connexion amont (Figure 148). Des bancs latéraux semblent se développer à l'intérieur du bras secondaire.

Cette première description indique des zones de sédimentation privilégiée et la situation actuelle des bras secondaires, à savoir le développement d'importants bouchons alluviaux sur tous les bras et l'extension de bancs latéraux dans leur section moyenne. Le LIDAR constitue un premier outil très utile dans l'approche géomorphologique en spatialisant et quantifiant les dépôts sédimentaires sur les différentes formes fluviales. Pour les bras secondaires, il est nécessaire de recourir à l'approche fine pour faire ressortir des tendances d'évolution.

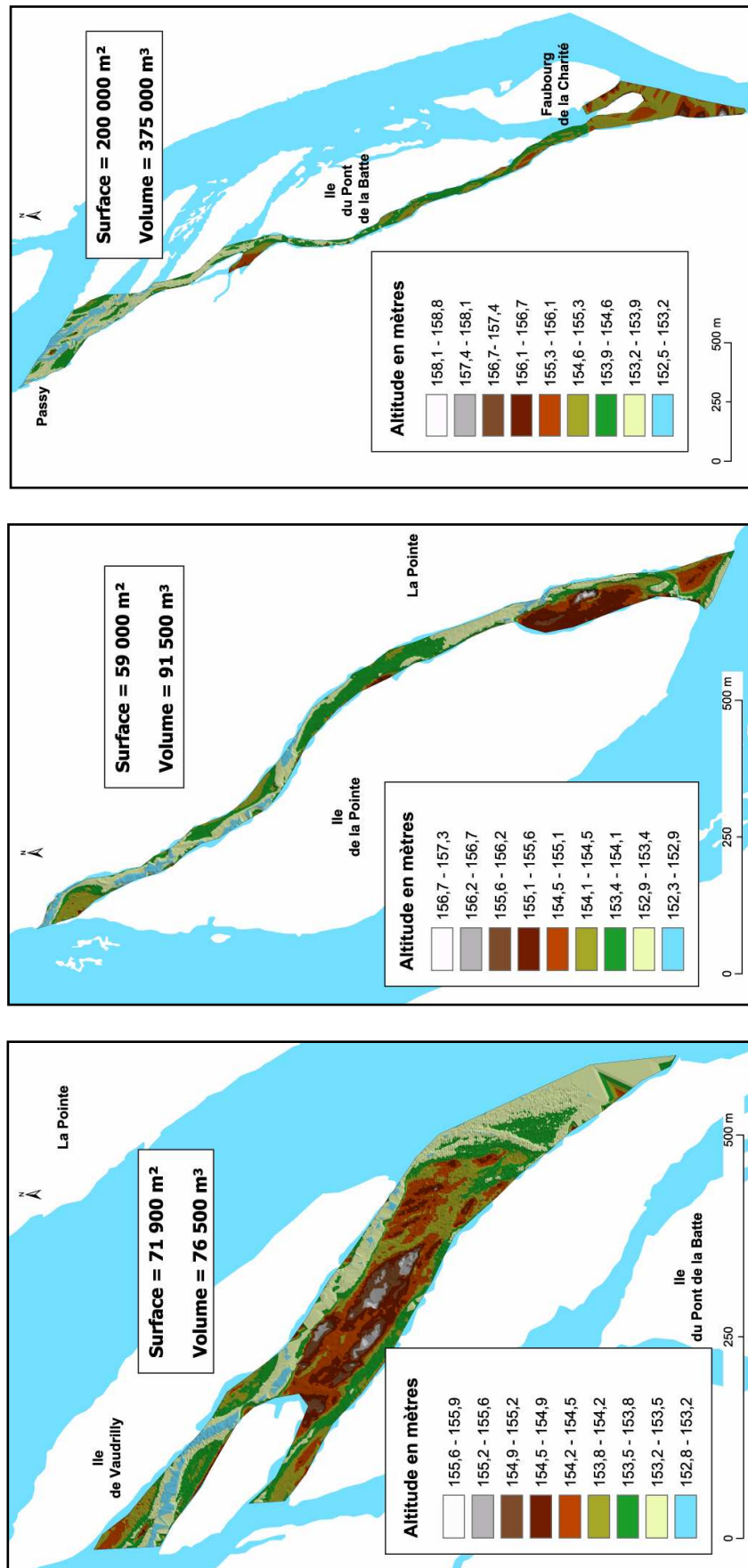


Figure 146 - Estimation 1 des volumes de sédiments au sein des bras secondaires majeurs du SA 3. - Première partie. A l'aide du semis de points du LIDAR (Diren-Centre) exploité sous Arc Gis (MNT).

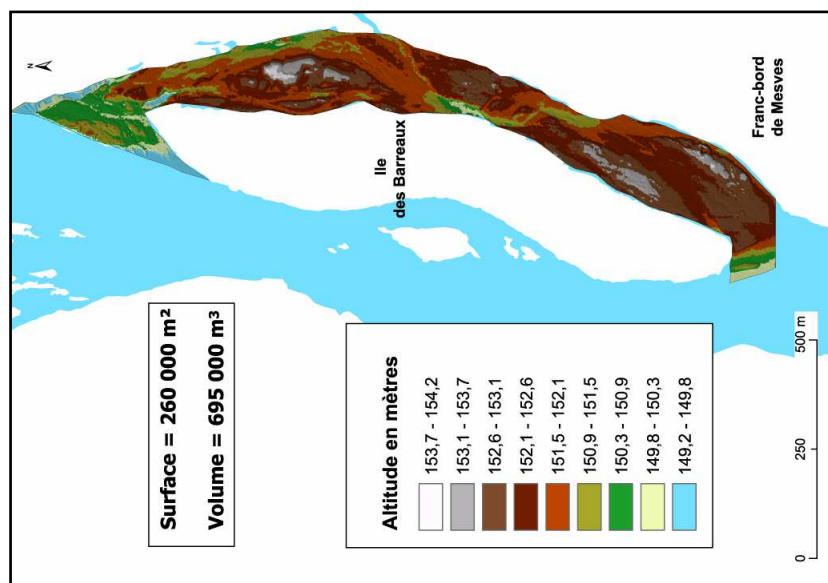
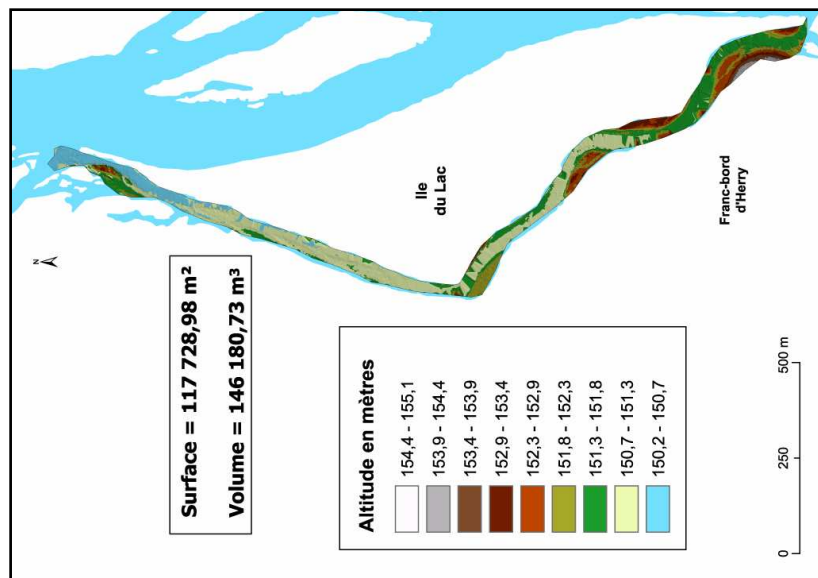
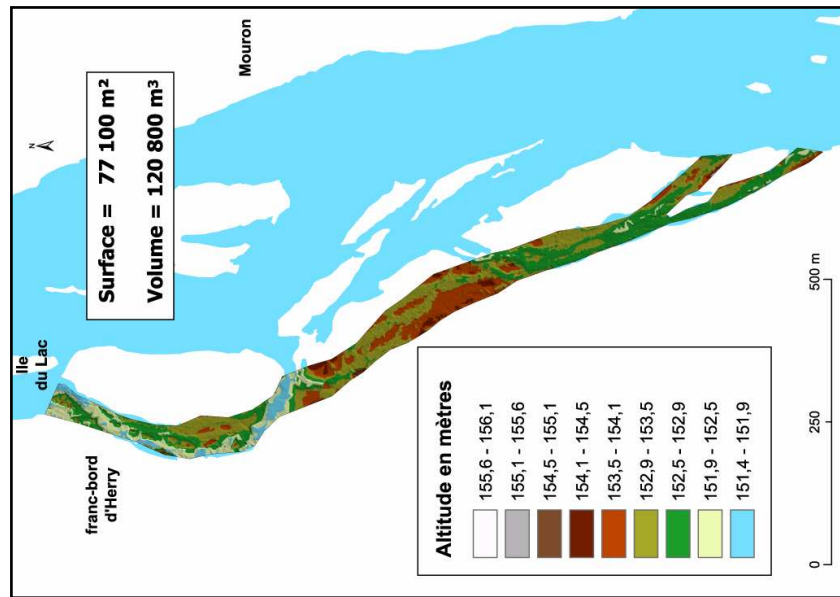


Figure 147 - Estimation 2 des volumes de sédiments au sein des bras secondaires majeurs du SA 3
- Deuxième partie

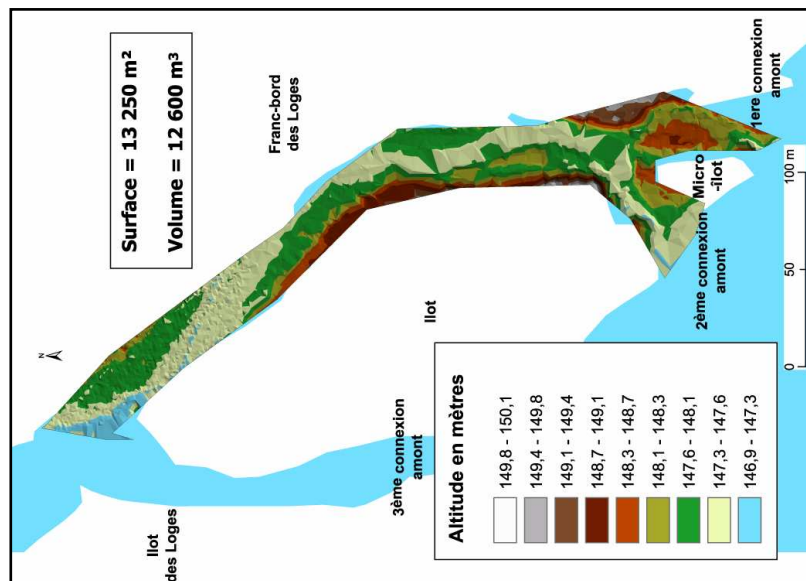
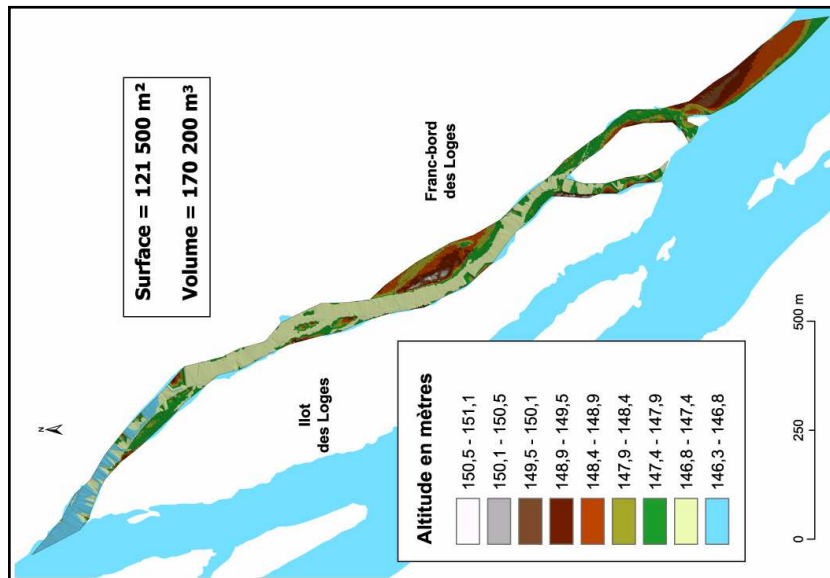
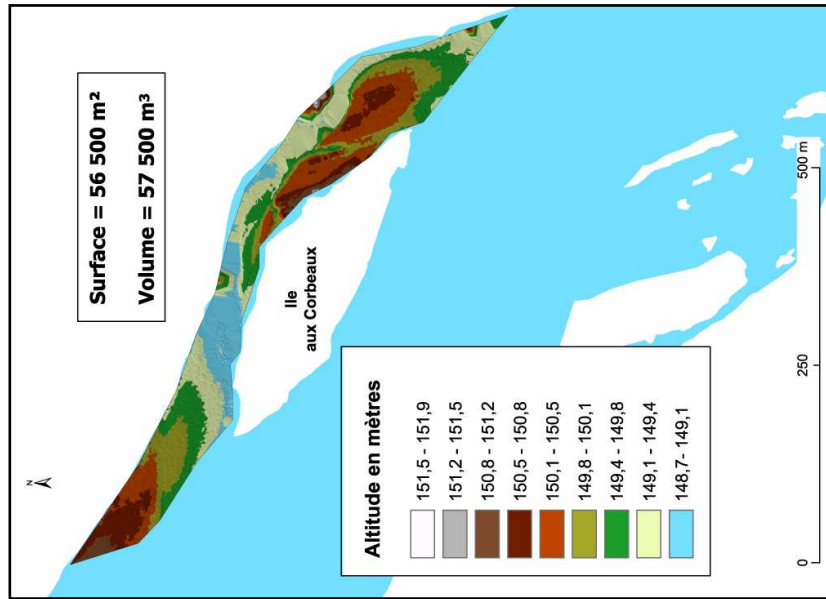


Figure 148 - Estimation 3 des volumes de sédiments au sein des bras secondaires majeurs du SA 3.
- Troisième partie.

d). Synthèse du piégeage sédimentaire

Les crues, seul facteur naturel ou physique encore possible, n'ont pas permis de renverser la situation du stockage excessif des sédiments dans les marges de la plaine d'inondation : les îles, les francs-bords et les chenaux secondaires. Les phases successives relevées au cours du 20^{ème} siècle montrent parfaitement le système de piégeage établi par les formes végétalisées dans le lit de la Loire. Le système îles-bras-franc-bords fonctionne comme une « machine » à rétention de sédiments. Les débits déterminent les seuils de sédimentation, la topographie des formes intervient dans la répartition de la sédimentation, et la végétation alluviale, essentiellement pionnière, piège les sédiments. Les crues morphogènes n'ont pas manqué au cours de l'histoire hydrologique de la Loire. Malgré le passage de crues morphogènes dans ce lit de plus en plus réduit, le rythme de rétraction ne s'est pas ralenti et les bras secondaires ont continué de se former et de se refermer. L'apparition des îles et par la même occasion du maillage de bras secondaires correspondait à une phase dans le réajustement fluvial. Le rattachement progressif des îles à la rive traduit une nouvelle étape du réajustement sur laquelle les crues n'ont finalement que peu de contrôle. Le maintien de la végétation pionnière contribue à la poursuite du processus. Seul le gestionnaire demeure à présent le facteur de contrôle de la végétation et, par voie de conséquence, de la dynamique fluviale. Une longue et intense crue pourrait demeurer le seul événement naturel capable de limiter une végétation pionnière. Malheureusement, cette crue attendue ne rétablirait certainement pas une situation quasi irréversible. Le nettoyage complet du lit ne se fera pas, même avec une crue historique. Les îles se perchent et exhausent le niveau de la plaine d'inondation. Le passage d'une crue ne la rendrait que plus violente. Les embâcles feraient obstacle à la bonne circulation des eaux courantes. La forêt alluviale reste trop bien installée et se déconnecte finalement de plus en plus de la dynamique fluviale. En somme, le passage d'une crue historique, du type de 1856, trouverait un lit bien différent, plus étroit et envahi par la forêt alluviale. Son travail morphogénique se révélerait alors d'une efficacité moindre du fait de l'exhaussement des formes fluviales comme les îles. L'érosion serait possible mais face au

stockage sédimentaire (près de 1,2 millions de m³ par km) établi depuis le début du 20^{ème} siècle le bilan serait à son désavantage (Figures 149 et 150).

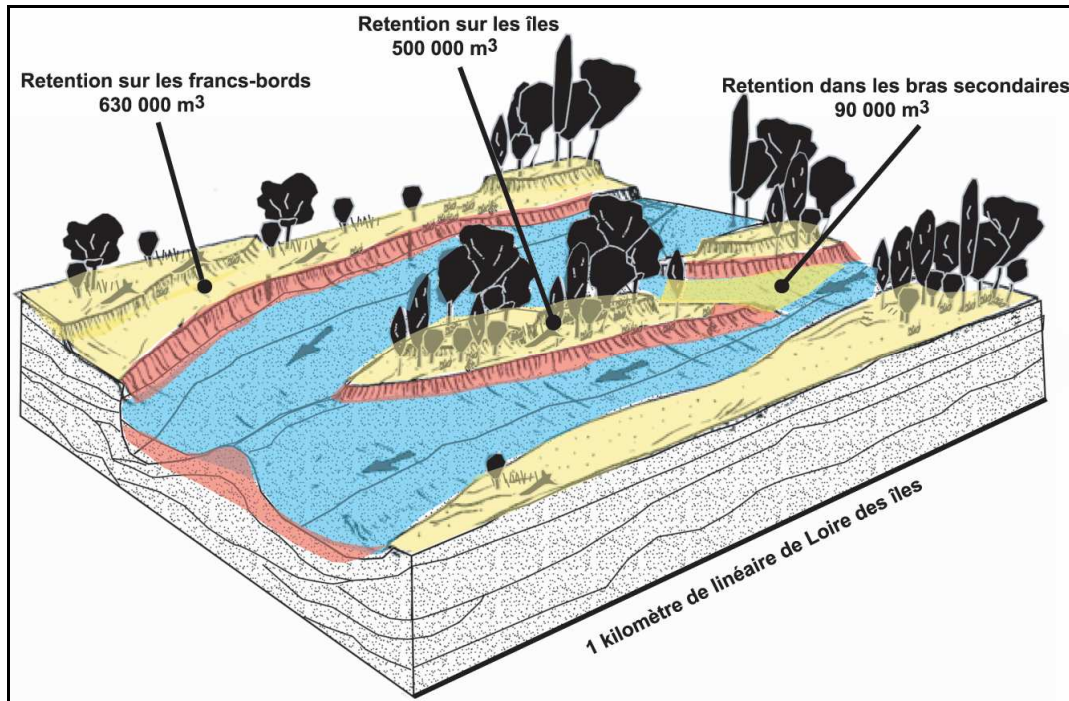


Figure 149 - Estimation des volumes de sédiments piégés, depuis le début du 20^{ème} siècle, en fonction des différents types de formes fluviales, sur un kilomètre de linéaire représentatif de la Loire des îles.

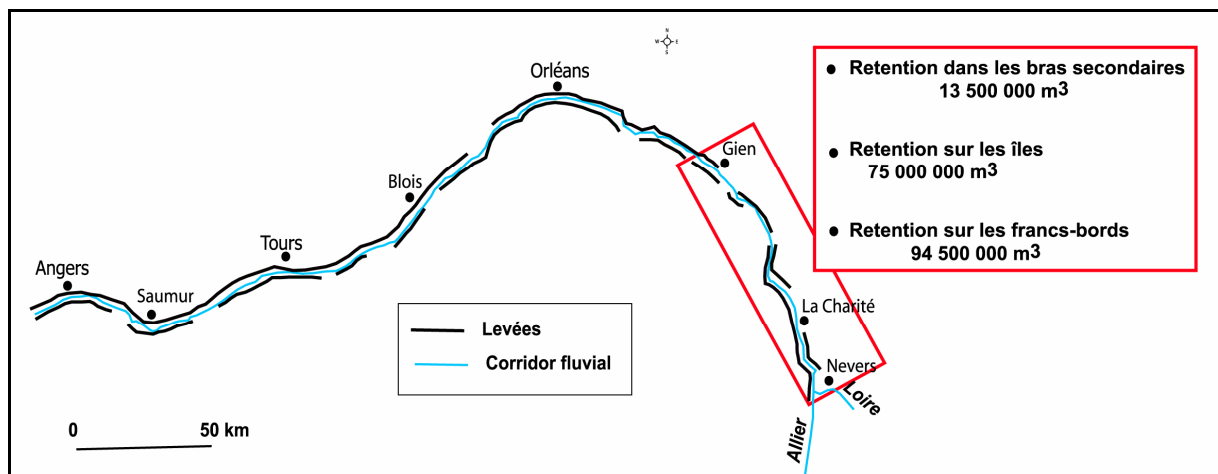


Figure 150 - Estimation des volumes de sédiments piégés, depuis le début du 20^{ème} siècle, dans le système anastomosé de la Loire moyenne, du Bec d'Allier jusqu'à Gien.

L'approche à échelle moyenne depuis 1970 a permis de mettre en valeur plusieurs points essentiels dans l'analyse spatiale. Non seulement les rythmes de sédimentation et d'érosion ont été mieux spatialisés grâce à l'apport des profils transversaux, mais les rythmes de rétention sédimentaires depuis le début du 20^{ème} siècle ont été définis.

● **Rythme d'évolution des formes fluviales depuis 1970**

- Les anciennes îles (de plus de 40 ans) montrent un contraste important entre leur partie médiane et sommitale d'un côté et leurs berges de l'autre. Ces îles connaissent une forte extension latérale par sédimentation au niveau des berges (jusqu'à 20 cm par an) alors que les parties centrales évoluent très lentement (pas plus de 2 cm par an)
- Les îles jeunes (de moins de 40 ans) connaissent une forte accrétion verticale de leur ensemble à un rythme pouvant atteindre les 20 cm par an
- L'incision du chenal principal s'enregistre entre 1970 et 1995 de 5 à 8 cm par an. Les migrations du chenal principal s'effectuent sur ce même pas de temps.
- Les bras secondaires s'incisent ou s'exhaussent mais connaissent tous une réduction de leur largeur

● **Le piégeage sédimentaire**

- Depuis 1970, les surfaces caractérisées par l'accumulation sédimentaire sont largement supérieures aux surfaces érodées. L'analyse spatiale fait apparaître la forte capacité de piégeage et de rétention sédimentaire des formes fluviales qui se sont toutes développées au cours du 20^{ème} siècle :

- Les îles sont d'importants réservoirs de sédiments avec plus de 75 millions de m³ retenus depuis le début du 20^{ème} siècle entre le Bec d'Allier et Gien.

☞ Rythme de rétention insulaire : **5 000 m³/km/an**

- Les francs-bords se sont formés sur d'importants stocks sédimentaires (plus de 94 millions de sédiments).

☞ Rythme de rétention des francs-bords : **6 300 m³/km/an**

- Les bras secondaires ne constituent pas les formes les plus « piégeuses » en sédiment depuis le début du 20^{ème} siècle, en sachant qu'une partie de leur charge est potentiellement mobilisable.

☞ Rythme de rétention des bras secondaires : **900 m³/km/an**

Chapitre 5- Rythme d'évolution à grande échelle

Les îles et les bras secondaires des secteurs fonctionnels définis sont ainsi étudiés très finement à travers leur rythme de sédimentation ou d'érosion interannuel, l'évolution de la végétation pionnière et en fonction de conditions hydrologiques variées. Cette partie regroupe les résultats issus de nos travaux de terrain effectués lors des périodes de basses eaux et immédiatement après le passage des crues hivernales d'importance.

A Suivi des rythmes de sédimentation en fonction de différentes conditions hydrologiques : 2002 - 2005

1). Différentes conditions hydrologiques et rappel de la méthodologie

a). Des évènements hydrologiques diversifiés

Il convient tout d'abord de placer le contexte hydrologique du suivi à grande échelle. Nous nous sommes intéressés aux évènements hydrologiques supérieurs à $850 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, ceux correspondant au débit de plein-bord. Ce seuil a été déterminé grâce aux observations de terrain réalisées tout au long des années de suivi dans le Site Atelier 3. Il est en cohérence avec les observations réalisées dans le cadre du PNRZH-Loire sur les Sites Ateliers 1 et 2 (Gautier et *al.*, 2001), plaçant ce débit de plein-bord à environ $900 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Nous avons ainsi pu suivre 11 épisodes hydrologiques dépassant le seuil de plein-bord (Figure 151).

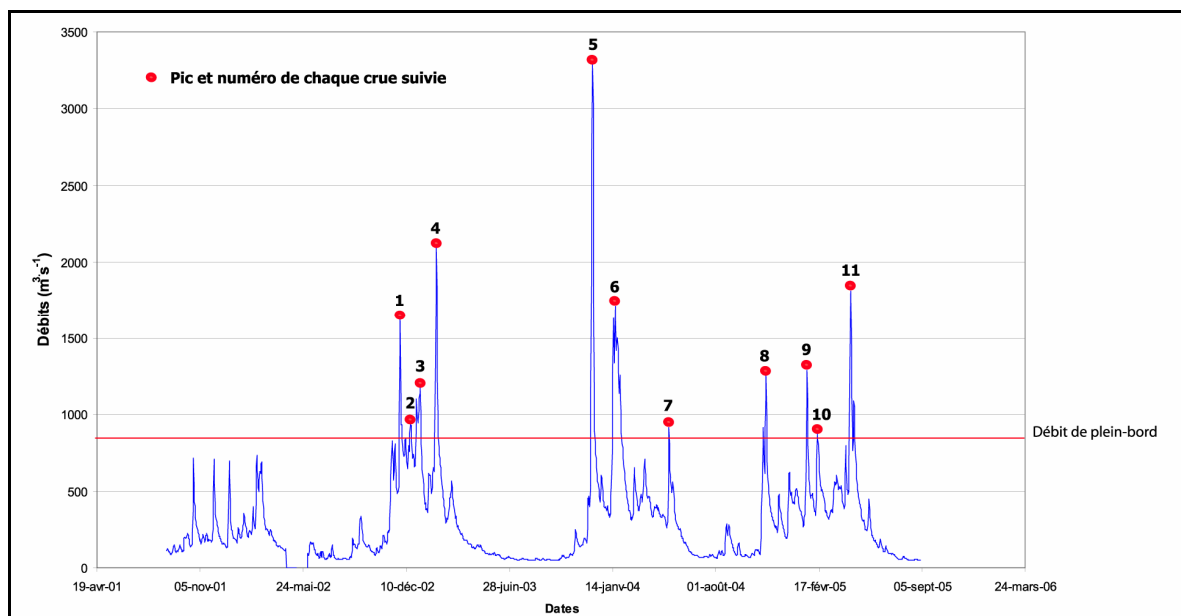


Figure 151 – Repérage des crues suivies entre 2002 et 2005 à partir du débit de plein-bord fixé à $850 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Ces 11 événements hydrologiques, que nous dénommons également crues (Gautier, 2006 ; Amoros et Petts, 1996), présentent des caractéristiques diversifiées (Figures 152 et 153 ; Tableau XV). Cette diversité concerne l'intensité et la durée des crues. 65 % de ces crues sont hivernales. Au regard de leur hydrogramme, les crues peuvent être classées ainsi :

- **Des crues annuelles** extrêmement courtes dans leur durée (moins de 4 jours au dessus du seuil de plein-bord) et leur intensité ($< 950 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$): Il s'agit des crues n°2 (décembre 2002), 7 (mai 2004) et 10 (février 2005).
- **Une crue annuelle** (avec un pic de crue à $1180 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), **lente et étalée** dans le temps (10 jours). Il s'agit de la crue de janvier 2003 (crue 3).
- **Des crues rapides** (6 jours en moyenne), au même profil asymétrique (pic rapidement atteint et décrue un peu plus lente). Cela correspond aux crues 1 (novembre 2002), 4 (février 2003) et 11 (avril 2005). Ces crues sont **de récurrence 2 ans** (en moyenne $1600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).
- **Une crue de récurrence 2 ans** (avec un pic de crue à $1710 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), **lente et très étalée** dans le temps (18 jours). Il s'agit de la crue de janvier 2004 (crue 6).
- **Une crue de récurrence 15-20 ans** (avec un pic de crue à $3290 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) **assez rapide** (8 jours). La crue 5 correspond au troisième événement hydrologique le plus important depuis 1907 (dernière grande crue du début du 20^{ème} siècle) (Figure 155) : crue de décembre 2003. C'est pourquoi elle occupe une place toute particulière dans l'analyse à grande échelle.

Entre 2002 et 2005, on note un net rapprochement chronologique des événements hydrologiques les plus forts entre les crues 4 (février 2003), 5 (décembre 2003) et 6 (janvier 2004) (Figure 153).

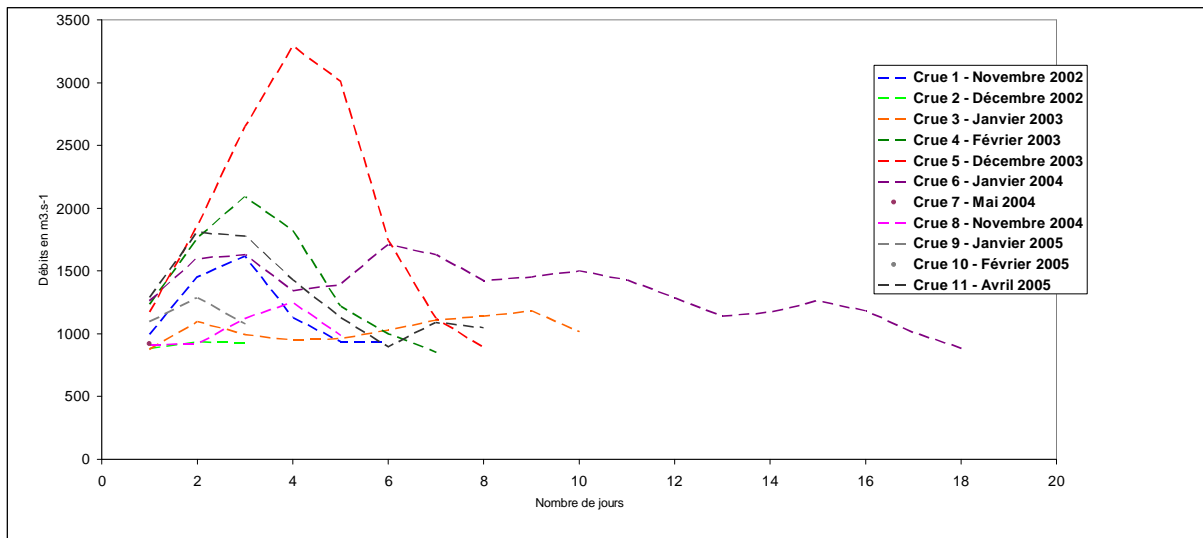


Figure 152 – Mise en rapport des différents évènements hydrologiques suivis avec leur durée (en jours).

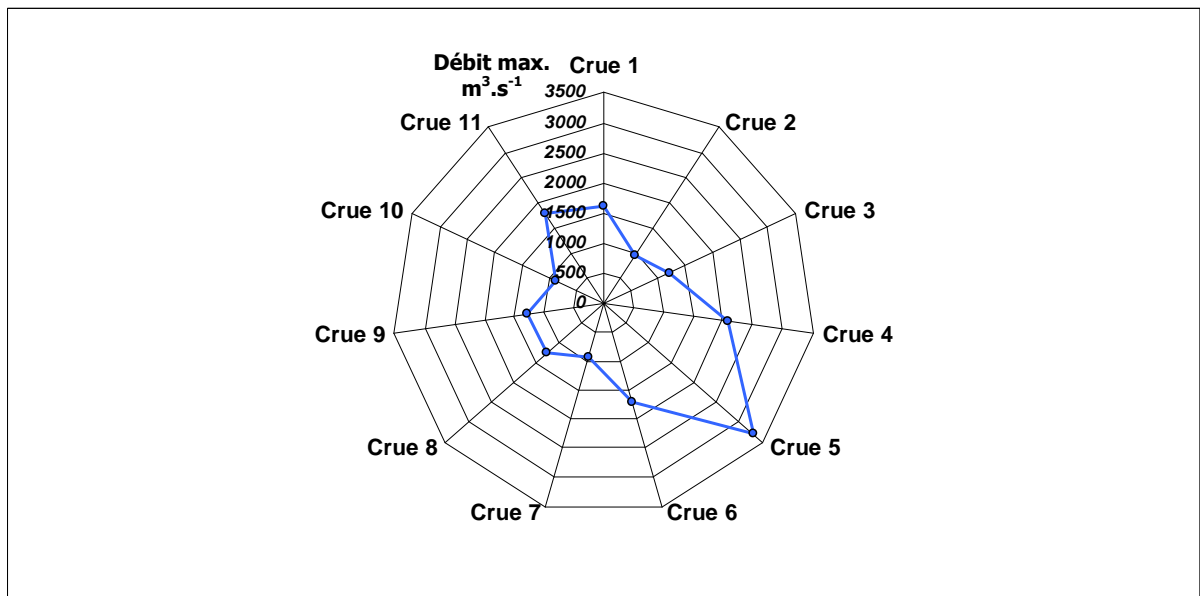


Figure 153 – Chronologie des crues suivies depuis 2002.

b). Rappel de la méthodologie de suivi

Pour rappel, le suivi à échelle fine se réalise dans le Site Atelier 3, celui de la Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire. Les rythmes de sédimentation dans les îles et les bras secondaires nous intéressent tout particulièrement. Après avoir réussi à quantifier les volumes de sédiments retenus dans les îles et les bras secondaires en Loire moyenne (Figure 149), il nous manquait les mesures précises sur les rythmes annuels de sédimentation.

Tableau XV – Caractéristiques des différents évènements hydrologiques suivis entre 2002 et 2005.

Crue	Dates	Pic de crue	Durée en jours
Crue 1	novembre 2002	1620 m ³ .s ⁻¹	6
Crue 2	décembre 2002	937 m ³ .s ⁻¹	3
Crue 3	décembre-janvier 2003	1180 m ³ .s ⁻¹	10
Crue 4	février 2003	2090 m ³ .s ⁻¹	7
Crue 5	décembre 2003	3290 m ³ .s ⁻¹	8
Crue 6	janvier 2004	1710 m ³ .s ⁻¹	18
Crue 7	mai 2004	917 m ³ .s ⁻¹	1
Crue 8	novembre 2004	1250 m ³ .s ⁻¹	5
Crue 9	janvier 2005	1290 m ³ .s ⁻¹	3
Crue 10	février 2005	871 m ³ .s ⁻¹	1
Crue 11	avril 2005	1810 m ³ .s ⁻¹	9

Aussi, entre 2002 et 2005, nous avons pu mettre en place le protocole de mesures défini dans le chapitre 2 et mis en pratique dans le SA 3 :

- Le suivi des conditions hydrologiques constitue la première phase. En étudiant les épisodes hydrologiques majeurs, ceux dépassant le débit de plein-bord (850 m³.s⁻¹), nous pouvons les corrélérer ensuite aux mesures de terrain.
- Pour les îles, nous avons utilisé les données du LIDAR pour construire des MNT. Ces MNT permettent de positionner les lignes d'eau, mesurées au DGPS *in situ* lors des différents événements hydrologiques (les 11 crues), et d'établir la dynamique de submersion des différentes îles du Site Atelier 3. Nous affinons ainsi la typologie morphologique et fonctionnelle des formes insulaires en établissant leur dynamique de submersion et par conséquent leur dynamique hydro-sédimentaire (c'est-à-dire leur capacité de sédimentation lors des diverses crues suivies).
- La sédimentation des différentes unités (îles, francs-bords) se mesure également à l'aide des pièges à sédiments placés sur le profil expérimental A200. Les trappes et les paillasons permettent de piéger les sédiments pendant les épisodes de

submersion. A nouveau, ce système de pièges se corrèle aux données hydrologiques (Figure 154). Enfin, les mesures directes sur le terrain, après les épisodes de submersion des îles, permettent de compléter notre analyse des dépôts sur les îles.

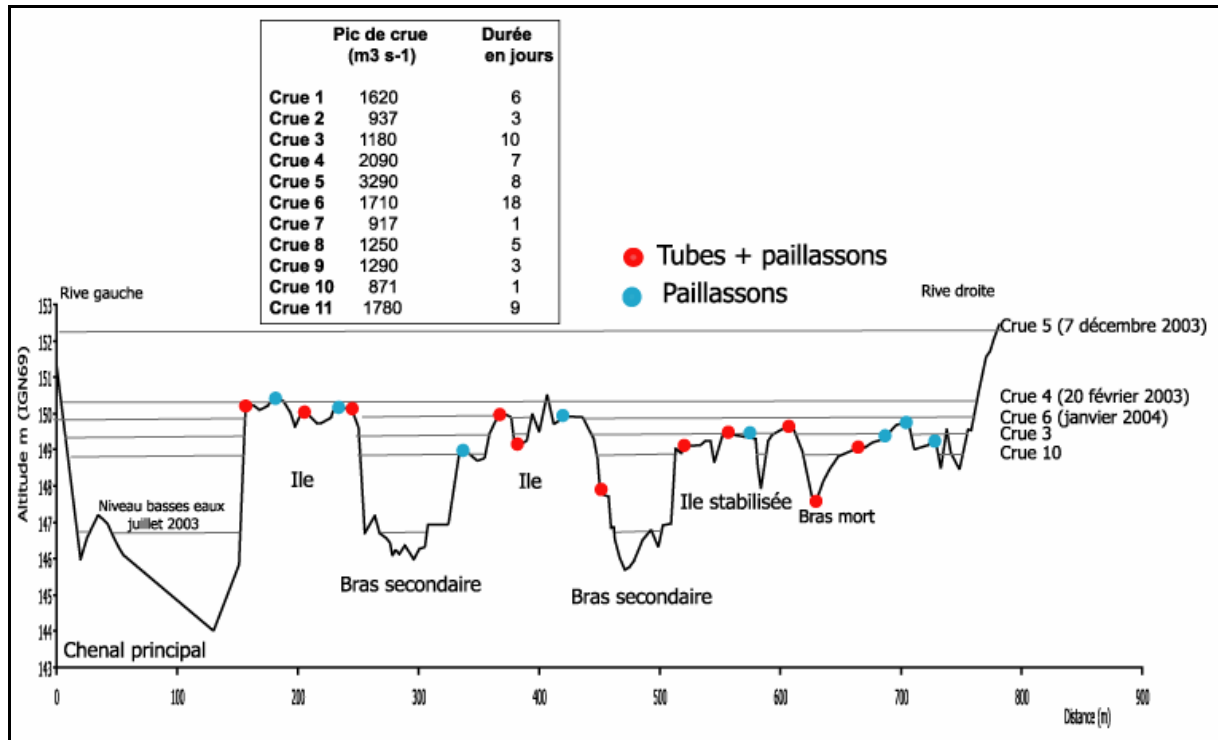


Figure 154 – Lignes d'eau des principales crues supérieures à $850 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ au profil expérimental A200, secteur des Loges, équipé de pièges à sédiments.

Seules les crues 4 et 5 ont totalement submergé ce profil et les îles les plus hautes. Les autres crues submergent le franc-bord de rive droite et les parties basses des îles les moins perchées.

2). Contexte de la crue de décembre 2003

Nous ne traitons de cet évènement que de l'influence et du comportement des formes fluviales dans le cadre de la crue. Lors de nos travaux sur cette crue, nous avons pu enregistrer de nombreuses mesures de terrain renseignant à la fois sur le fonctionnement hydrologique de la crue dans toute la plaine d'inondation, les impacts géomorphologiques et les problèmes de gestion du risque d'inondation. Il s'agit pour nous de comprendre le rôle de chaque type de forme du lit anastomosé et montrer dans quelle mesure une telle crue joue un rôle indéniable ou négligeable sur l'évolution de ces formes, notamment par le biais de la végétation. Une telle crue accélère-t-elle ou ne change-t-elle rien au processus de réajustement fluvial engagé depuis le début du 20^{ème} siècle ?

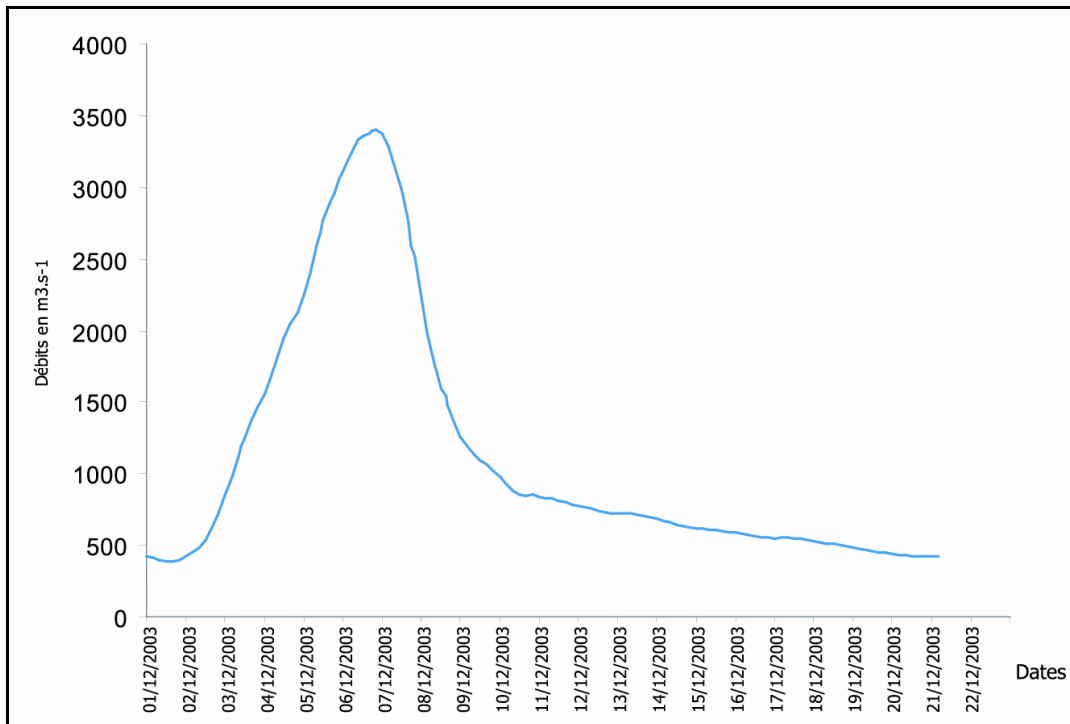
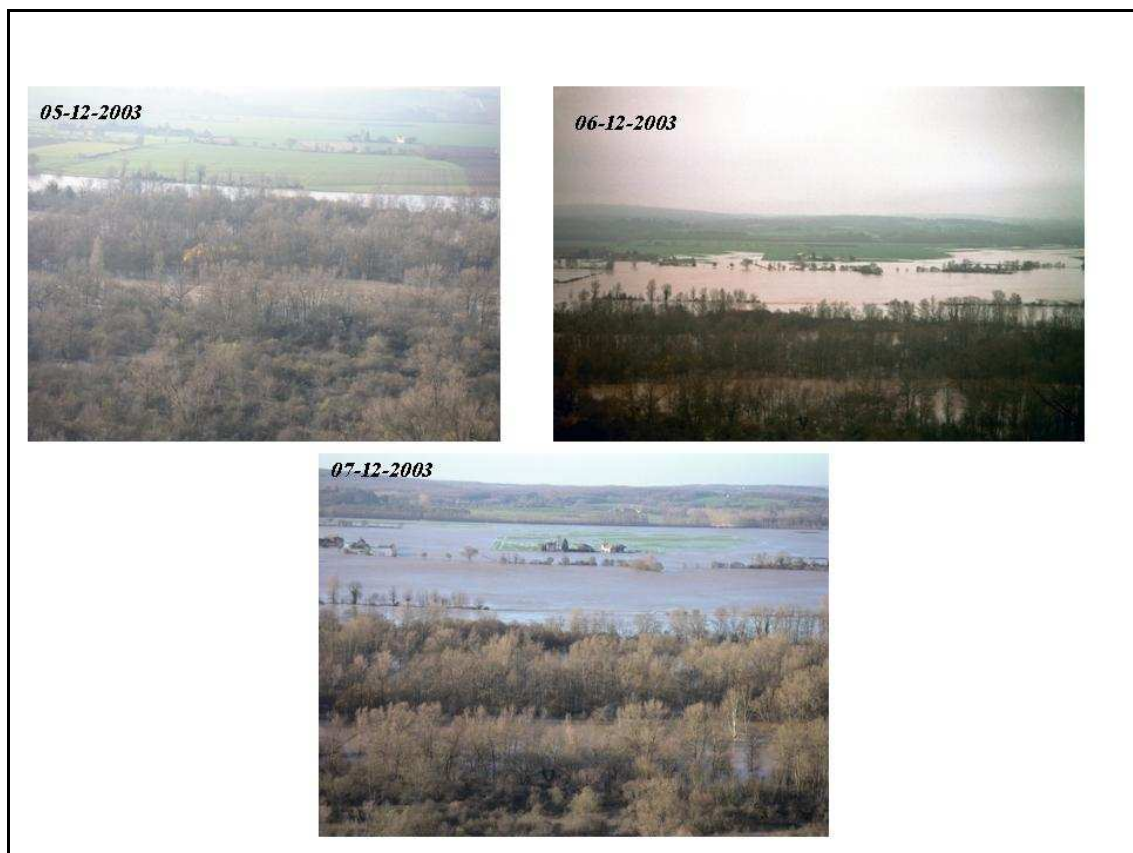


Figure 156 – L’hydrogramme de crue et les grandes phases de l’épisode hydrologique de décembre 2003 (Station de Givry-Fourchambault).



Photographie 24 – Chronologie de la crue entre le 5 et le 7 décembre 2003 au niveau de la ferme de la Martinaterie en rive gauche face au coteau des Loges : plein-bord le 05/12 (a), premier débordement dans la plaine d’inondation le 06/12 (b) et maximum de l’inondation le 07/12 (c).

b). Fonctionnement hydrologique de la plaine d'inondation

Le suivi de la crue 5 a permis de comprendre le fonctionnement hydrologique de la plaine d'inondation et le dynamisme des zones humides (Photographie 24). Ce point est très important car la plaine d'inondation, comme on l'a déjà montré, reste coupée du reste du lit ligérien par les levées de rive gauche. Les observations et les mesures sont donc de premier ordre dans la compréhension d'un lit fluvial déconnecté d'une grande partie de sa plaine d'inondation. Depuis le niveau de plein bord jusqu'à la décrue amorcée dès la nuit du 6 au 7 décembre, nous avons relevé la chronologie de cette crue dans le val inondable entre La Charité-sur-Loire et Tracy-sur-Loire (Figures 157 et 158) ; rappelons que la plaine s'étend essentiellement en rive gauche.

Nous avons dressé le tableau de synthèse de cette chronologie hydrologique et relevé les phases majeures de l'expansion de la tâche d'inondation dans ce secteur de la Loire des îles (Tableau XVI).

Que révèle finalement cette chronologie en terme de fonctionnement de la plaine d'inondation ? Tout d'abord, il faut retenir que la plaine a fonctionné en décalage par rapport au lit vif. Ceci n'a rien d'exceptionnel pour une plaine d'inondation. Ce qui est intéressant reste la manière dont cette plaine a été connectée au lit vif, et sur ce point, les observations sont intéressantes. Les levées constituent une véritable coupure entre cette plaine et le lit mineur. Le concept des 3 lits ligériens de la ZAL s'illustre parfaitement avec l'exemple de cet épisode hydrologique exceptionnel. Il existe bien trois lits dans ce corridor fluvial et chacun de ces lits a fonctionné à tour de rôle au fur et à mesure de l'augmentation des débits de la Loire et des niveaux de submersion.

Ainsi, le premier lit, celui de la bande active a été très vite totalement submergé et mis en activité par le biais du chenal principal et des chenaux secondaires. Les bras morts situés dans les parties basses des îles (îles moyennes à très grandes îles) se sont remis en eau pour des débits compris entre 400 et 800 m³.s⁻¹.

Tableau XVI – Chronique et principales phases hydro-dynamiques observées de la crue

Repères temporels	Phénomènes observés	Repères spatiaux	Débits à Givry
Lundi 1 ^{er} et mardi 2 décembre	Précipitations fortes (de 200 à 400 mm)	Hauts bassins de l'Allier et de la Loire	de 420 à 720 m ³ .s ⁻¹
Mercredi 3 décembre	Les ondes de crue de la Loire et de l'Allier se rejoignent : concomitance	Bec d'Allier - Marzy	de 848 à 1460 m ³ .s ⁻¹
Mercredi 3 décembre	Débit de plein-bord Les francs-bords de rives droite et gauche sont submergés en partie	Herry, Mesves et Pouilly	de 848 à 1460 m ³ .s ⁻¹
Jeudi 4 décembre à 16h00	Plein-bord au niveau du déversoir de Passy	La Charité-sur-Loire	de 1560 à 2030 m ³ .s ⁻¹
Vendredi 5 décembre à 09h00	Plein-bord au niveau du déversoir de Couargues	Couargues – Pouilly-sur-Loire	de 2400 à 2700 m ³ .s ⁻¹
Vendredi 5 décembre à 09h00	Pont de Pouilly infranchissable car route coupée en rive gauche	Couargues – Les Vallées	de 2400 à 2700 m ³ .s ⁻¹
Nuit du 5 au 6 décembre	Débordement par les déversoirs	Passy (La Charité) et Couargues	de 2900 à 3250 m ³ .s ⁻¹
Samedi 6 décembre de 08h00 à 20h00	Plaine d'inondation envahie et nombreuses routes coupées en rive gauche	Herry, Couargues, Mesves, Pouilly	de 3250 à 3350 m ³ .s ⁻¹
Samedi 6 décembre à 22h00	- Pic de crue atteint - Remplissage et remontée de la nappe alluviale dans la plaine	De La Charité-sur-Loire à Tracy-sur-Loire	3400 m ³ .s ⁻¹
Dimanche 7 décembre	- Décrue - Nombreux écoulements dans la plaine d'inondation via les paléo-chenaux	De La Charité-sur-Loire à Tracy-sur-Loire	de 3380 à 2520 m ³ .s ⁻¹
Lundi 8 décembre	- Vidange progressive de la nappe alluviale - Routes dégagées	De La Charité-sur-Loire à Tracy-sur-Loire	de 2250 à 1360 m ³ .s ⁻¹
Observations post-crue après le 8 décembre	- Maintien des zones humides en eau - Francs-bords dégagés dès 900 m ³ .s ⁻¹ , soit dès le mardi 9 décembre au soir	De La Charité-sur-Loire à Tracy-sur-Loire	< 1360 m ³ .s ⁻¹

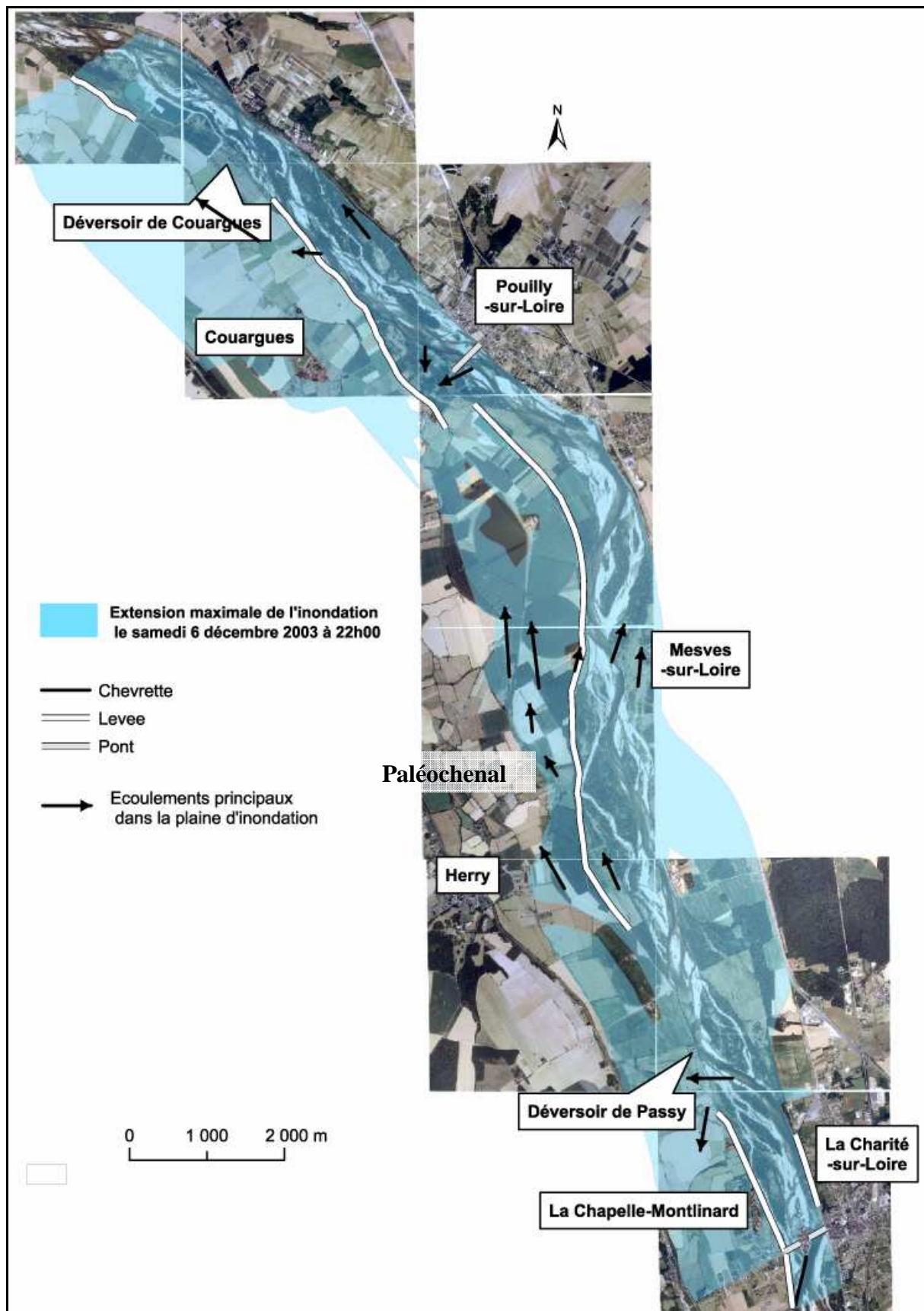


Figure 157 – Relevés cartographiques de l'épisode hydrologique au 6 décembre 2003.

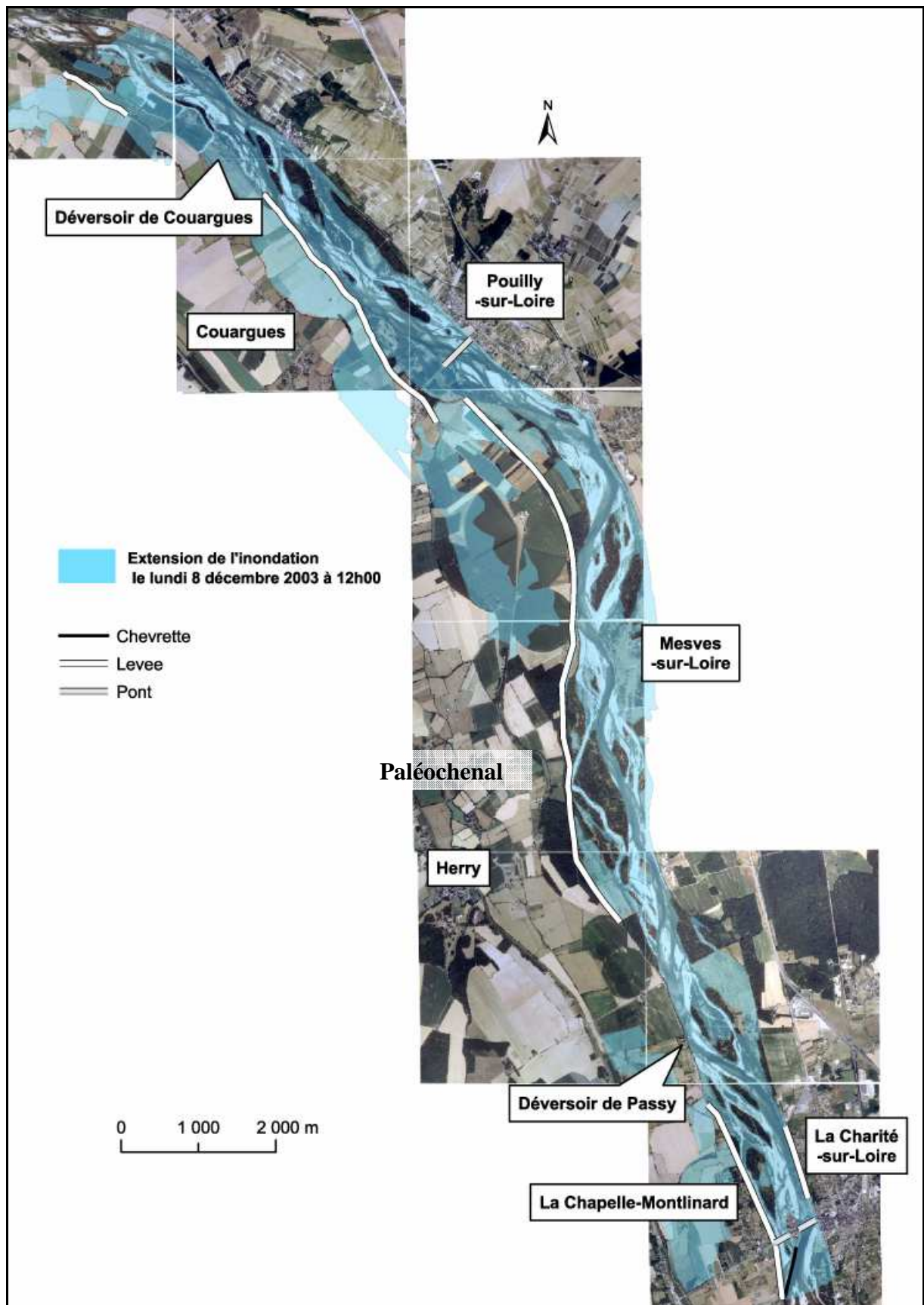
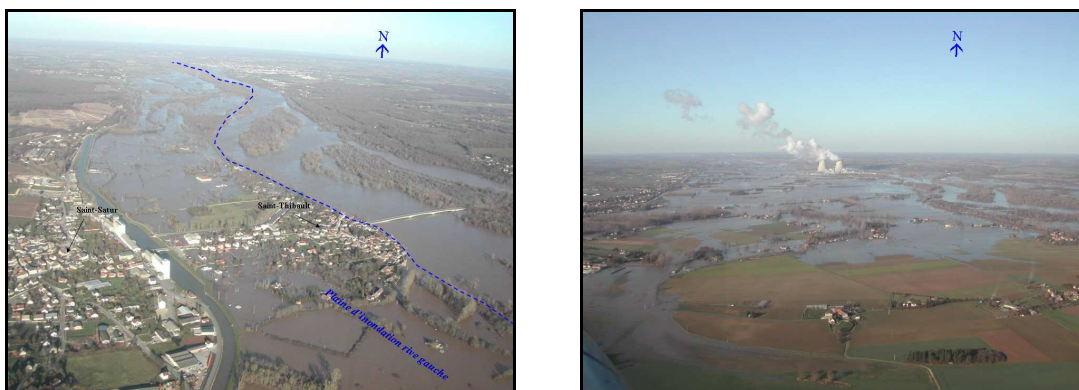


Figure 158 – Cartographie de la tâche d’inondation au 8 décembre 2003, (Digitalisation Grivel, 2007 ; d’après la campagne aérienne de la DIREN-Centre).

Ensuite, le deuxième lit, le lit majeur entre levées, rentre en action par la submersion des francs-bords. La détermination du débit plein-bord à $850 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ est ainsi justifiée et concerne donc bien le débit seuil d'inondabilité des francs-bords.

Enfin, la plaine d'inondation a pu rentrer en activité grâce, d'un côté, aux déversoirs qui favorisent la pénétration des eaux courantes, et de l'autre côté, au jeu de la nappe alluviale. Ainsi, on peut voir que le déversoir de Passy permet l'entrée de l'eau dans deux directions : vers l'amont et vers l'aval. Des écoulements aval dans la plaine d'inondation sont ainsi révélés par la remise en eau de paléo-chenaux (Photographie 25). Cette crue donc a été l'occasion de retrouver la localisation d'anciens chenaux qui avaient été repérés par télédétection. La remise en activité du paléo-chenal, au site du Lac et de Villate, s'est réalisée en l'espace de deux heures par les eaux amenées depuis le déversoir et grâce aussi en parallèle à la saturation de la nappe alluviale (le 6 décembre à 22h30, le bras était entièrement en eau, pour un débit de près de $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Ce paléo-chenal a canalisé l'essentiel des écoulements de cette plaine d'inondation et joué le rôle d'évacuateur du trop plein d'eau contenu dans la plaine pour rejoindre à nouveau la Loire. La remise en fonction de ce type d'annexe hydraulique est tout à fait intéressante en matière de risque hydrologique.



Photographie 25 – Panorama de la tache d'inondation.

On relève les problèmes socio-économiques induits par cette crue : isolement et inondation de Saint-Thibault (a), la centrale nucléaire de Belleville au milieu des eaux (b).

3). Analyse des flux solides en suspension

Le suivi des flux solides demeure une composante importante en hydro-géomorphologie. Nous avons donc pu effectuer un suivi assez fin des Matières En Suspension (M.E.S.) au

cours de cette crue de référence depuis les ponts de La Charité-sur-Loire et Pouilly-sur-Loire, ainsi qu'au niveau de formes plus spécifiques comme des bras morts de francs-bords. La carte des prélèvements de MES ne constitue qu'une simple radiographie des concentrations de matière fines suivant les heures et le type d'unité de la plaine d'inondation (voir annexes).

Avec les données de MES de la Centrale EDF de Belleville (2001-2005), nous disposons de moyennes de comparaison et pouvons montrer l'importance du transport de MES pendant la crue (Figures 159 et 160). A cela s'ajoutent d'autres prélèvements MES de février 2003 qui peuvent constituer des ordres de comparaison.

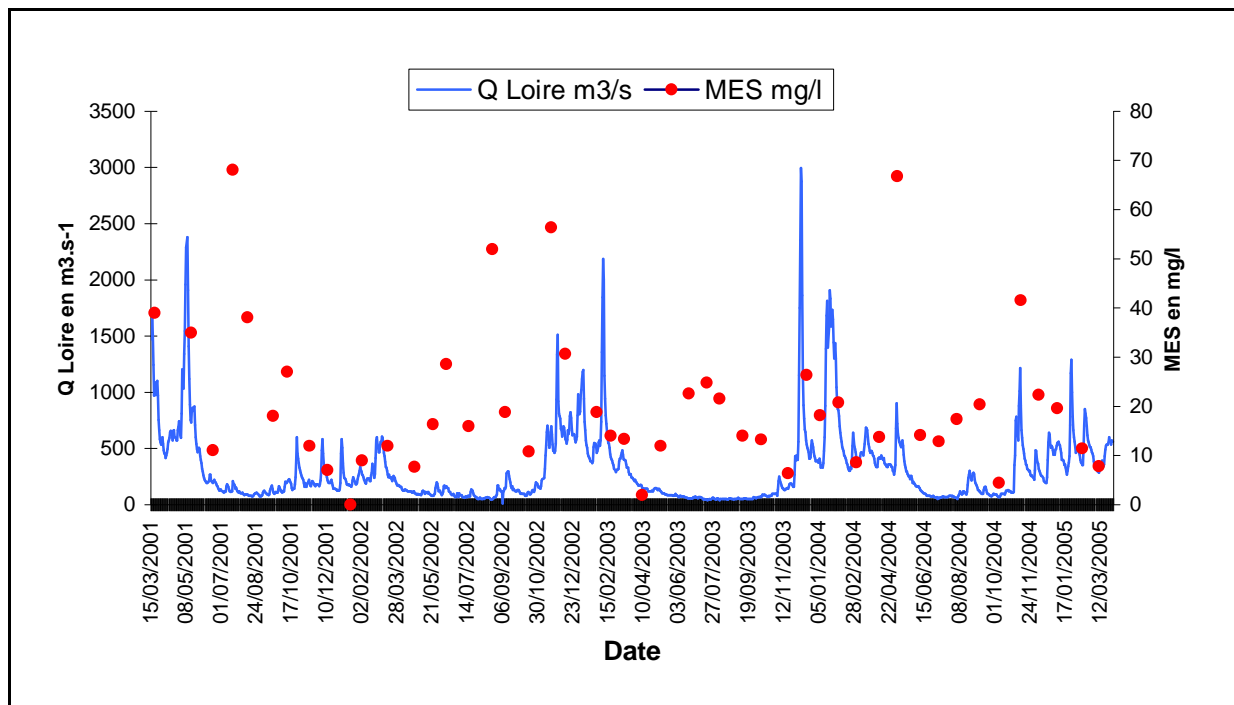


Figure 159 – MES et débits de la Loire de mars 2001 à mars 2005 (données EDF – Centrale de Belleville).

Ainsi, on note qu'en moyenne journalière la Loire concentre 20 mg/l de MES. Ces concentrations sont difficilement « classables » (Tableau XVII). Il apparaît que pour des débits inférieurs à $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, la disparité des concentrations en MES est importante, puisque pour des débits variant d'un gradient de 1 à 3, les mêmes concentrations sont enregistrées (par ex. 50 mg/l sont enregistrés pour des débits de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Même pour la crue 4 de février 2003, les concentrations n'excédaient pas les 50 mg/l dans le chenal principal).

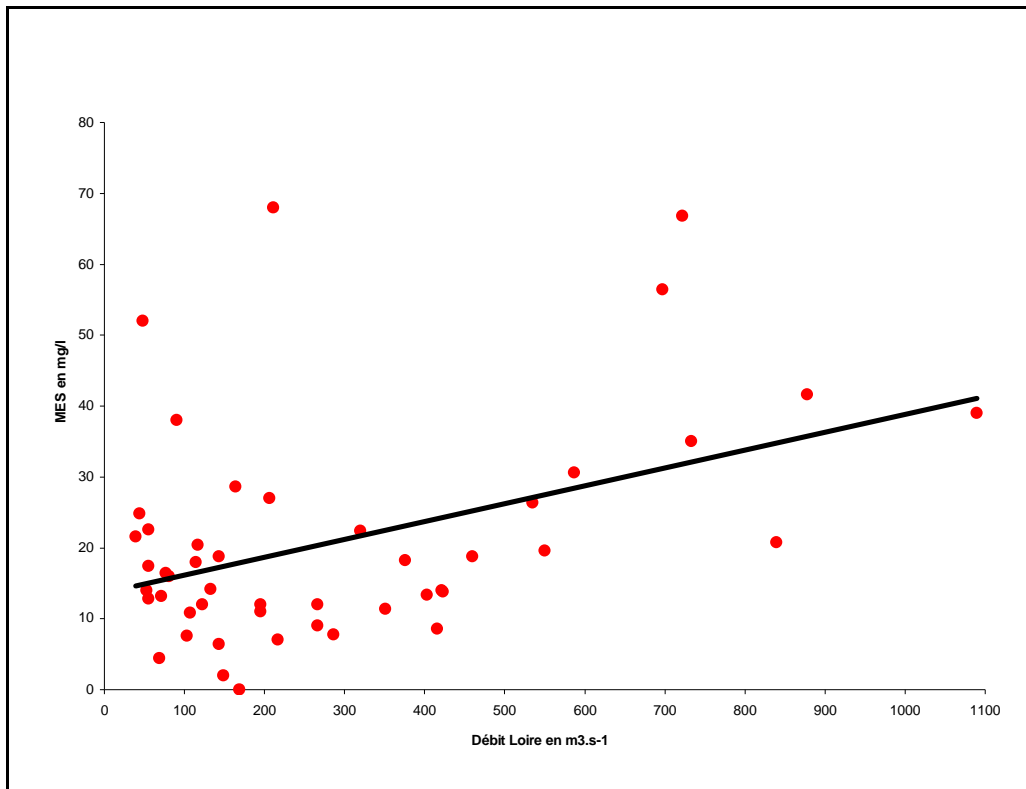


Figure 160 – MES en fonction des débits de la Loire de mars 2001 à mars 2005 (données EDF – Centrale de Belleville).

Tableau XVII – Synthèse des données MES de la Loire entre 2001 et 2005, à 30 kilomètres en aval du SA 3, site de Belleville (source : EDF)

Débits	Concentration de MES
de 40 m ³ .s ⁻¹ à 100 m ³ .s ⁻¹	de 4 à 52 mg/l
de 100 m ³ /s à 200 m ³ .s ⁻¹	de 7,6 à 28,6 mg/l
de 200 m ³ .s ⁻¹ à 300 m ³ .s ⁻¹	de 7 à 68 mg/l
de 300 m ³ .s ⁻¹ à 600 m ³ .s ⁻¹	de 8,6 à 30,6 mg/l
de 600 m ³ .s ⁻¹ à 1100 m ³ .s ⁻¹	de 20,8 à 66,8 mg/l

Ce n'est que pour des débits très forts, comme en décembre 2003, que nous avons relevé des concentrations nettement plus importantes (en moyenne de 200 mg/l, soit 10 fois plus que la moyenne journalière). Les concentrations les plus fortes ont été mesurées au moment du pic de crue (environ 240 mg/l). Ainsi, nous enregistrons une relation étroite

entre l'hydrogramme de crue et l'évolution de la concentration des MES. On enregistre un palier maximum à 240 mg/l pendant 30 heures (Figure 161).

Tout au long de l'épisode hydrologique de décembre 2003, de nombreuses mesures de MES permettent de montrer cette évolution des concentrations dans le lit vif et les marges du fleuve, notamment sur les francs-bords submergés. Il apparaît que la concentration est plus faible à mesure que l'on s'éloigne du chenal principal, tout en restant largement supérieur à la moyenne journalière. Par exemple, des prélèvements au sein de bras morts de franc-bord, indiquent des concentrations de l'ordre de 100 mg/l (Herry en rive gauche) soit 5 fois plus que la moyenne journalière, et même de 200 mg/l (Loges et Mesves en rive droite).

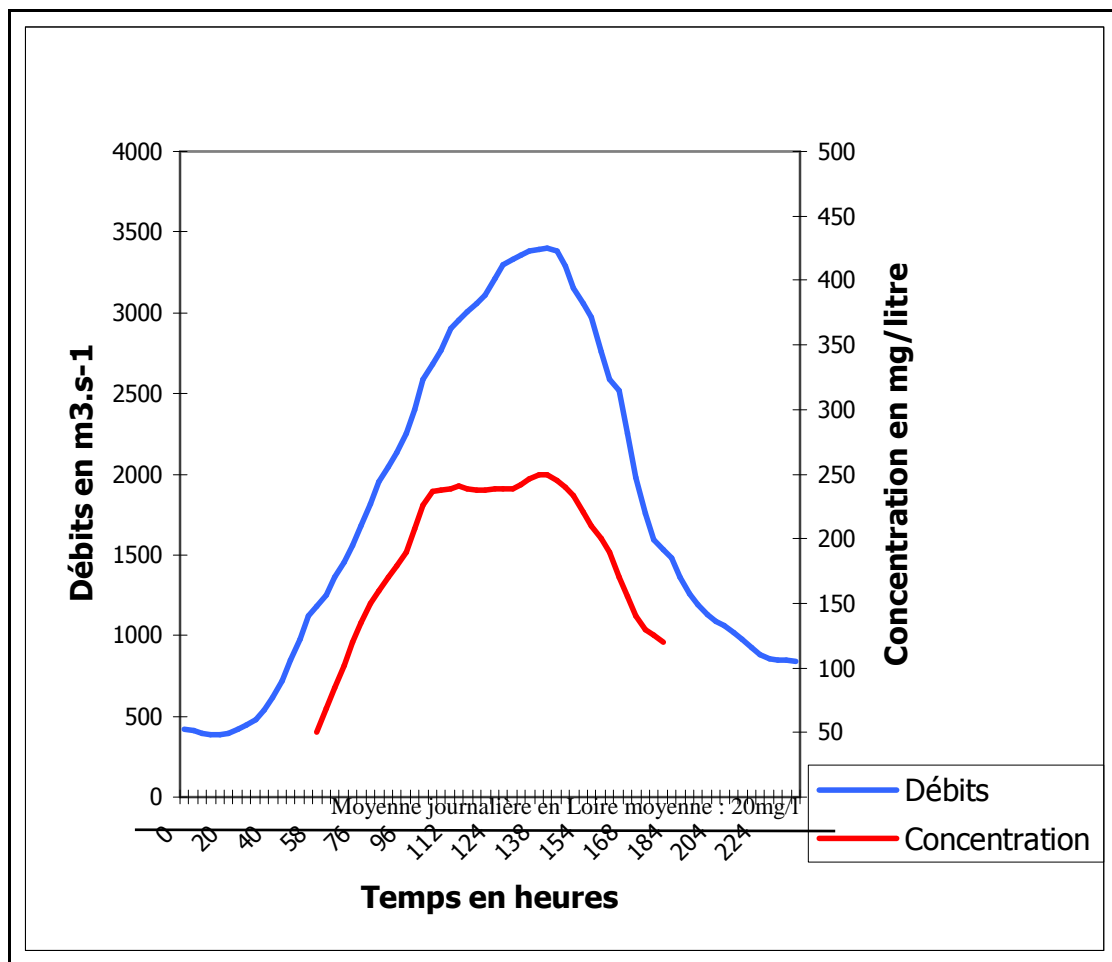


Figure 161 – Relation débit de la crue et concentration des Matières En Suspension. Mesures réalisées au Pont de Pouilly dans le bras principal sur les 50 premiers cm de la colonne d'eau.

Le transport des MES en Loire moyenne demeure faible (par rapport à des hydrosystèmes comme la Seine et le Rhône), mais est plus intense lors d'épisodes hydrologiques comme la crue de décembre 2003, en enregistrant des concentrations dix fois plus fortes qu'en moyenne. Ces concentrations sont constituées à 70 % de limons et argiles pour 30 % de sables très fins. Ces résultats hydro-sédimentaires seront repris lors de l'analyse des dépôts de crues.

B Variabilité inter-annuelle des rythmes de sédimentation des îles entre 2002 et 2005

1). Le fonctionnement hydro-sédimentaire des îles

Il s'agit ici de montrer la place des différentes unités fonctionnelles du corridor fluvial dans les divers événements hydrologiques suivis entre 2002 et 2005. Par rapport aux résultats issus de l'analyse à moyenne échelle, il semble que chaque unité joue un rôle dans les processus hydro-sédimentaires. Nous développons donc notre analyse de terrain à partir des données du LIDAR et des lignes d'eau levées au DGPS pendant toutes les crues. Nous décrivons dans un premier temps les différents seuils de submersion des formes fluviales. Nous analysons ensuite les fonctionnements hydro-sédimentaires des îles et des bras secondaires. Notre analyse des débits morphogènes et des chroniques hydrologiques nous apporte par la suite d'autres éléments de compréhension des systèmes anastomosés actuels et de leur perspective d'évolution. Pour plus de cohérence, nous reprenons les grands secteurs à îles du Site Atelier 3.

- Pour le secteur des Loges, les îles sont toutes submergées à partir de $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Figure 162). Les îlots sont sous l'eau dès 200 à $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La topographie diversifiée de l'île des Loges (une très grande île) fait que cette île connaît plusieurs étapes de submersion. Une première à partir de $800-900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, qui correspond à la mise en activité des bras morts et des parties les plus basses, ce qui donne à cette île, à environ $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, deux parties émergées distinctes séparées par un bras morts remis en fonctionnement hydrologique. Grâce à cette observation, on retrouve les deux parties insulaires qui se sont rejointes il y a 40 ans environ pour former cette très grande île.

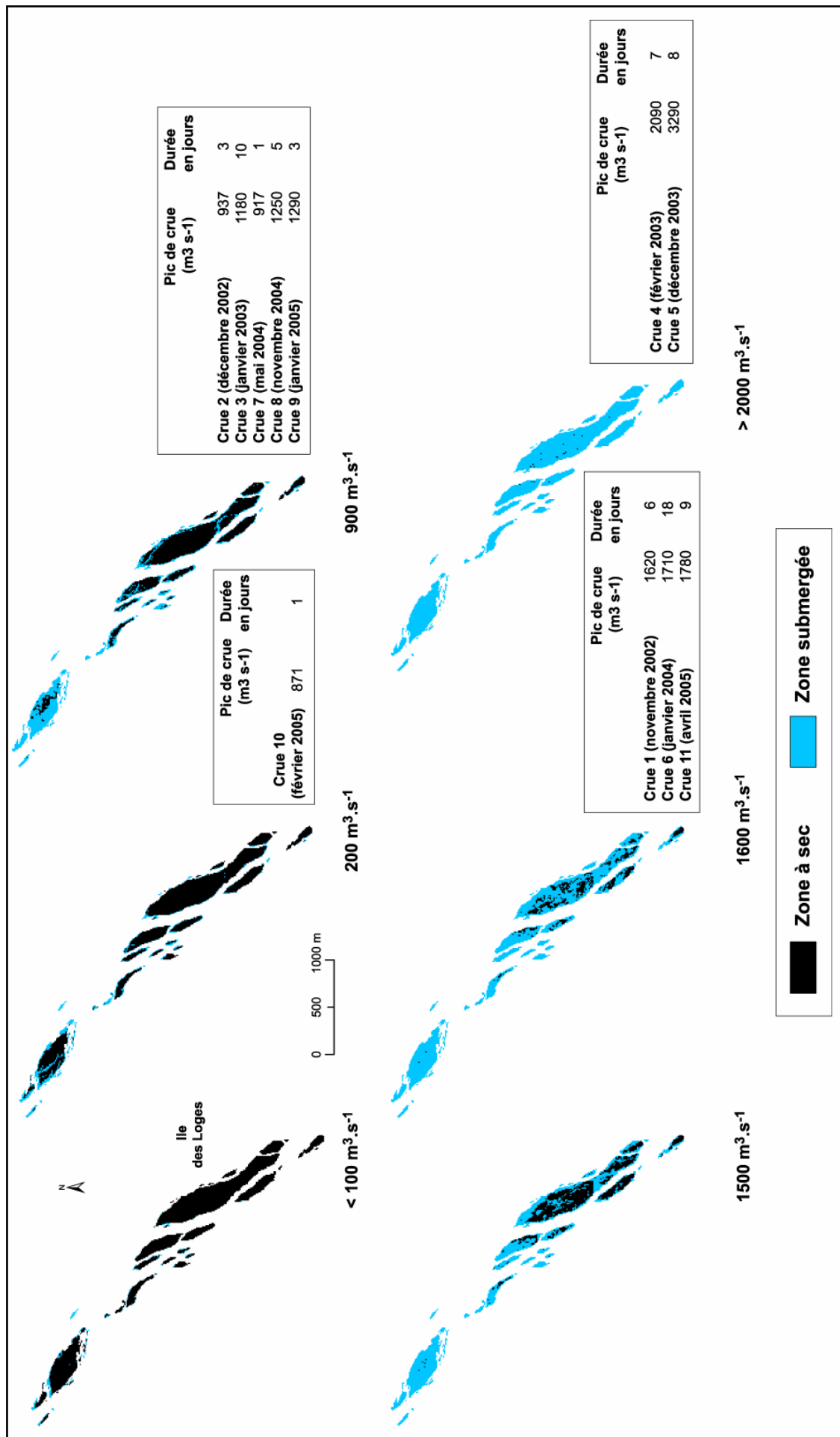


Figure 162 – Chronologie de la submersion des îles du secteur des Loges.

Les différents événements hydrologiques révèlent la possibilité à des bras morts d'îles de se reconnecter à la bande active à partir de 800-900 m³.s⁻¹. Cette très grande île n'a été entièrement submergée que pour les crues supérieures à 2000 m³.s⁻¹ (Crue 4 et 5). Mais, on a calculé que plus de 70 % de la surface de ce secteur des Loges ont été submergés entre 2002 et 2005.

- Le secteur de Pouilly se distingue par la présence de deux grandes îles (Ile de Malaga, face à la rive droite de Pouilly ; l'île aux Corbeaux). Le secteur est entièrement submergé à 2500 m³.s⁻¹ (Figure 163). L'île de Malaga est submergée également en plusieurs phases : à 900 m³.s⁻¹ les bras morts aval se mettent en activité, à environ 1500 m³.s⁻¹ plus de la moitié de l'île est sous l'eau. A 2000 m³.s⁻¹ elle est entièrement submergée, tandis que l'île aux Corbeaux demeure à 30 % hors de l'eau (partie amont apparemment la plus élevée).

- Le secteur des Barreaux est dominé par une très grande île dont les différences topographiques sont marquées. Il faut des débits supérieurs à 3000 m³.s⁻¹ pour que la submersion de l'île des Barreaux soit totale (Figure 164). Ainsi, les parties basses de cette île commencent à être submergées à 500 m³.s⁻¹ (bras morts). A 2000 m³.s⁻¹ seulement 50 % de l'île est sous l'eau. Mais les débits suivant accélèrent la submersion (à 2500 m³.s⁻¹ 75 % de la surface sont submergés). C'est l'aval de l'île qui connaît des durées de submersion régulières : à 1500 m³.s⁻¹ l'aval est presque totalement submergé. Les crues annuelles doivent donc jouer un rôle important sur une grande partie de l'île des Barreaux en raison de la régularité des submersions et, par conséquent, des probables dépôts.

La logique de submersion de l'île du Lac est proche de celle des Barreaux. En effet, il faut plus de 2800 m³.s⁻¹ pour qu'elle soit entièrement sous l'eau (Figure 165). Les étapes de submersion débutent par l'aval (dès 500 m³.s⁻¹) par le biais d'un ancien chenal (entièrement actif à 1000 m³.s⁻¹) qui permet l'inondation de plus de 60 % de l'île. A 2500 m³.s⁻¹, 85 % de l'île est recouvert. Ces différents stades d'inondation permettent à nouveau de localiser les parties sommitales des îles les plus grandes (situées à en amont de l'île du Lac).

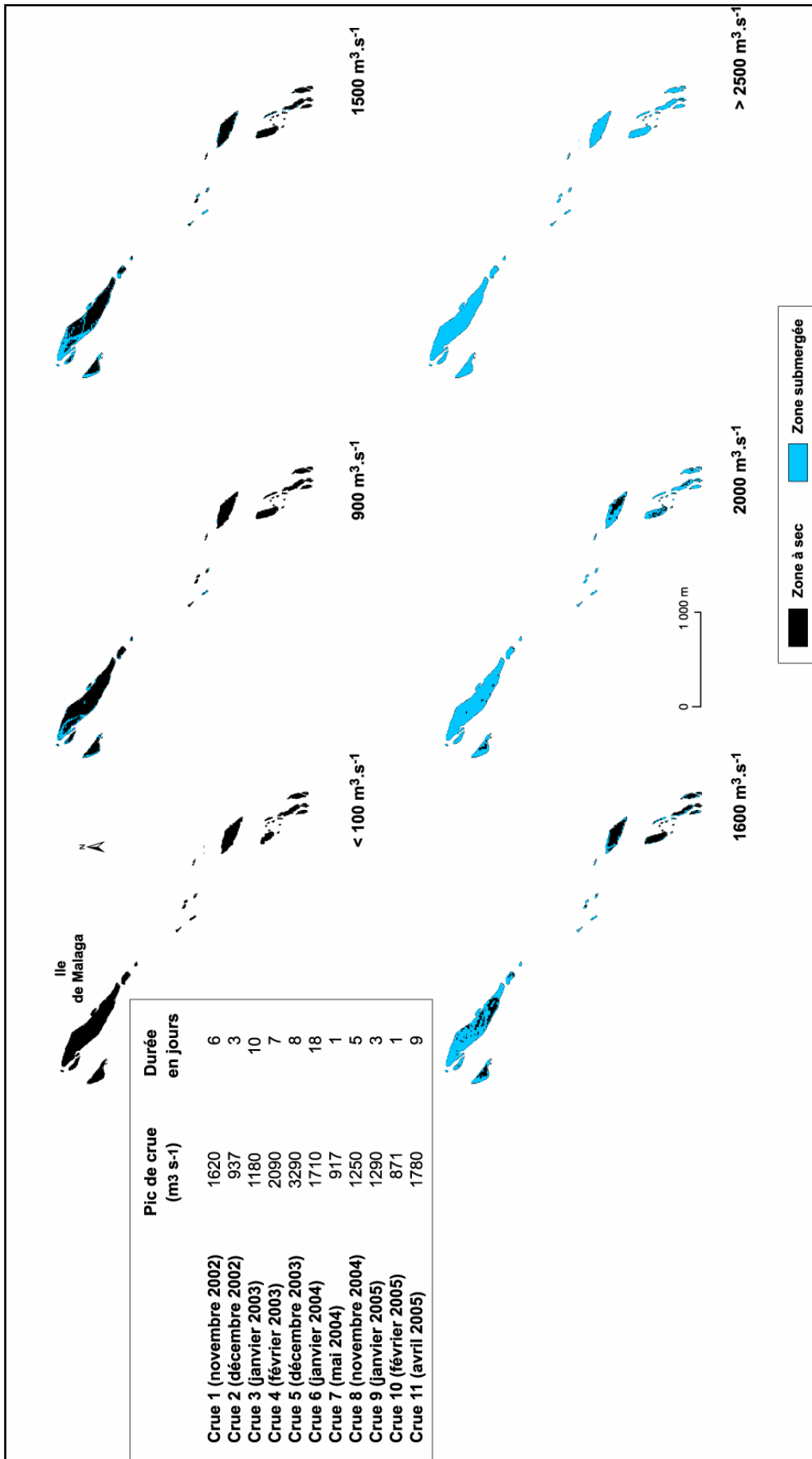


Figure 163 – Chronologie de la submersion des îles du secteur de Pouilly.

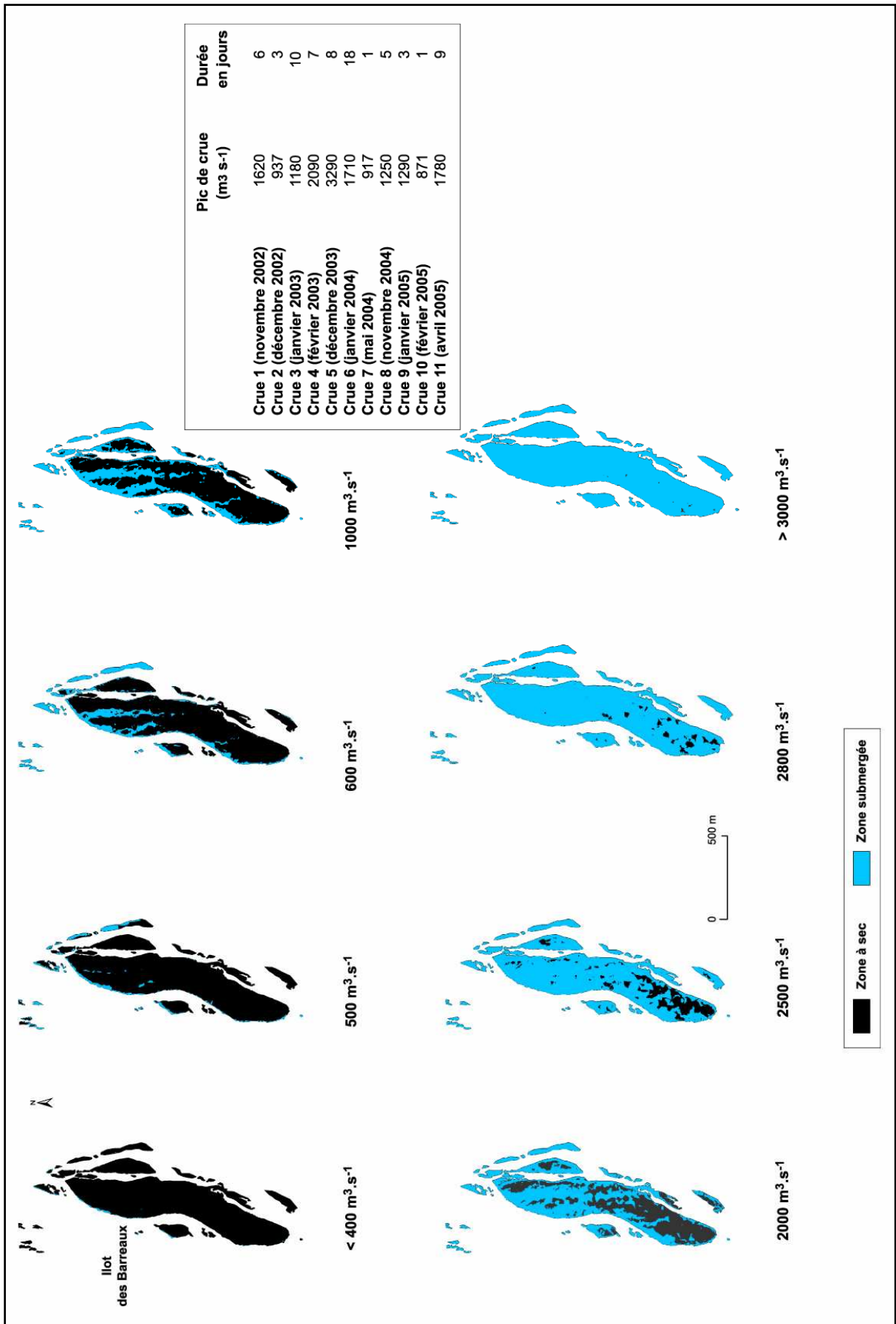


Figure 164 – Chronologie de la submersion des îles du secteur des Barreaux.

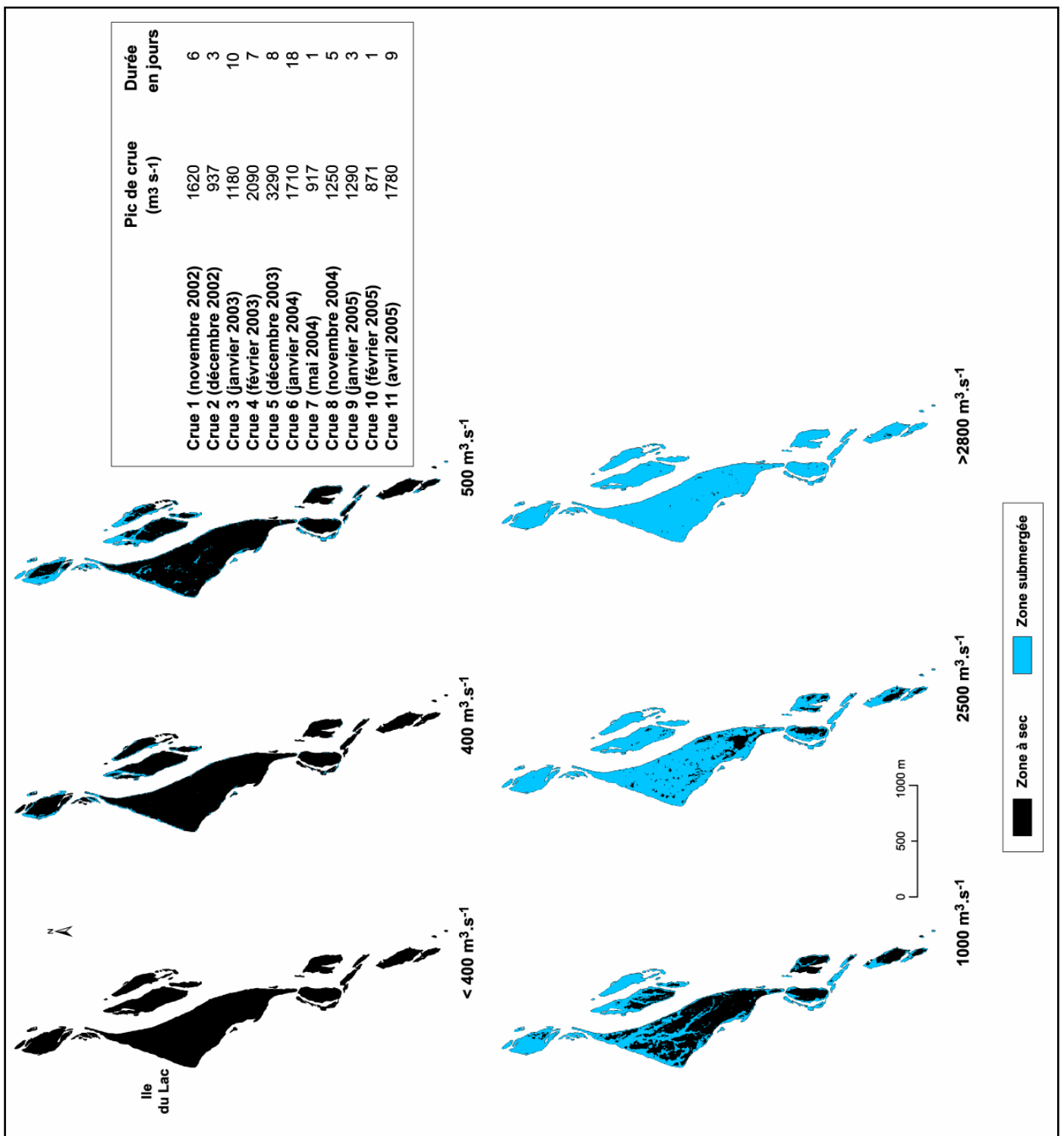


Figure 165 – Chronologie de la submersion des îles du secteur du Lac.

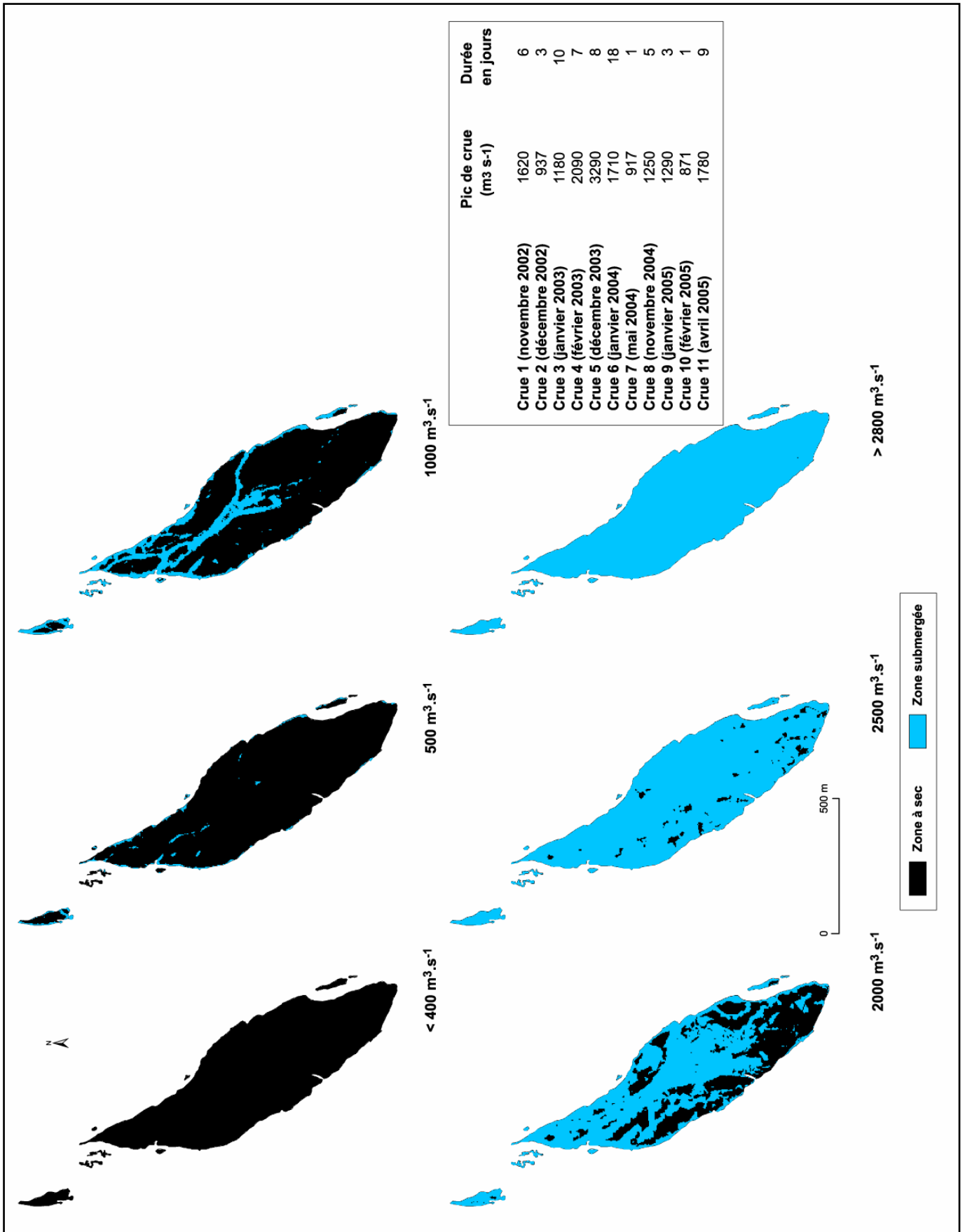


Figure 166 – Chronologie de la submersion des îles du secteur de La Pointe.

- Le secteur de La Pointe offre la particularité d'être une très grande île. Dans le chapitre 3, nous avons montré que cette île était issue de l'union d'une multitude d'îlots et de plusieurs îles moyennes. La chronologie de l'inondation, au cours des différents événements hydrologiques observés et mesurés, permet de montrer la bonne fonctionnalité des bras morts qui, il y a plus de 40 ans, séparaient les différentes formes insulaires présentes. A partir de $800 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, les bras morts fonctionnent entièrement (Figure 166). Les limites des anciens îlots sont ainsi révélées et leur différence topographique se remarque. En effet, à $2000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, 50 % de l'île sont submergés essentiellement dans la partie aval. L'amont correspond à l'île moyenne qui s'est rattachée il y a environ 40 ans et qui se présente aujourd'hui comme la partie la plus haute de cette Ile de la Pointe. A $2500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, 90 % de l'île sont submergés.

- Le secteur de La Charité-Passy est constitué d'un complexe d'îles très différentes, dans leur genèse (chapitre 3). Ce sont les bras morts qui permettent, à partir de $900 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, l'inondation des deux grandes îles (îles de l'aval de ce secteur) et de la très grande île, celle du Pont de la Batte (Figure 167). Ce n'est qu'à partir de $2000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ que la submersion de ce complexe d'îles devient effectif, avec environ 40 % des surfaces d'îles submergés. L'Ile du Pont de la Batte, la plus ancienne de tout ce complexe, se retrouve définitivement sous l'eau à partir de $3000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, alors que les deux grandes îles de l'aval le sont dès $2600 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Cette première analyse des différentes étapes de submersion des îles du Site Atelier 3 permet de dresser une synthèse de la dynamique hydrologique des îles au cours des crues suivies depuis 2002. Ainsi, nous pouvons déterminer des grands seuils de submersion, non seulement des îles mais également des grandes unités de la Loire des îles (Figure 168). Nous avons raccordé les observations de terrain et l'analyse issue de l'utilisation du LIDAR et des lignes d'eau au DGPS, à notre typologie des îles. Il apparaît de ce fait que les très grandes îles, les plus élevées dans le lit fluvial, présentent une complexité dans leur durée de submersion. Cette durée n'est pas la même en tous points de l'île et est surtout fonction des débits. La durée de submersion la plus régulière (crue annuelle en moyenne) et la plus longue (plus de 5 jours) concerne 50 % des très grandes îles et dans leur partie aval. Pour que la submersion totale des grandes et très grandes se réalise, il faut des débits forts,

supérieurs en moyenne à $2800 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Or, entre 2002 et 2005, il n'y a eu qu'une crue (crue 5 : décembre 2003) et le débit de $2800 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ n'a jamais duré plus de deux jours consécutifs. Entre 2002 et 2005, il y a eu 54 jours de débits compris entre 800 et $1500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, 14 jours compris entre 1500 et $2800 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, et 2 jours consécutifs supérieurs à $2800 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figure 169).

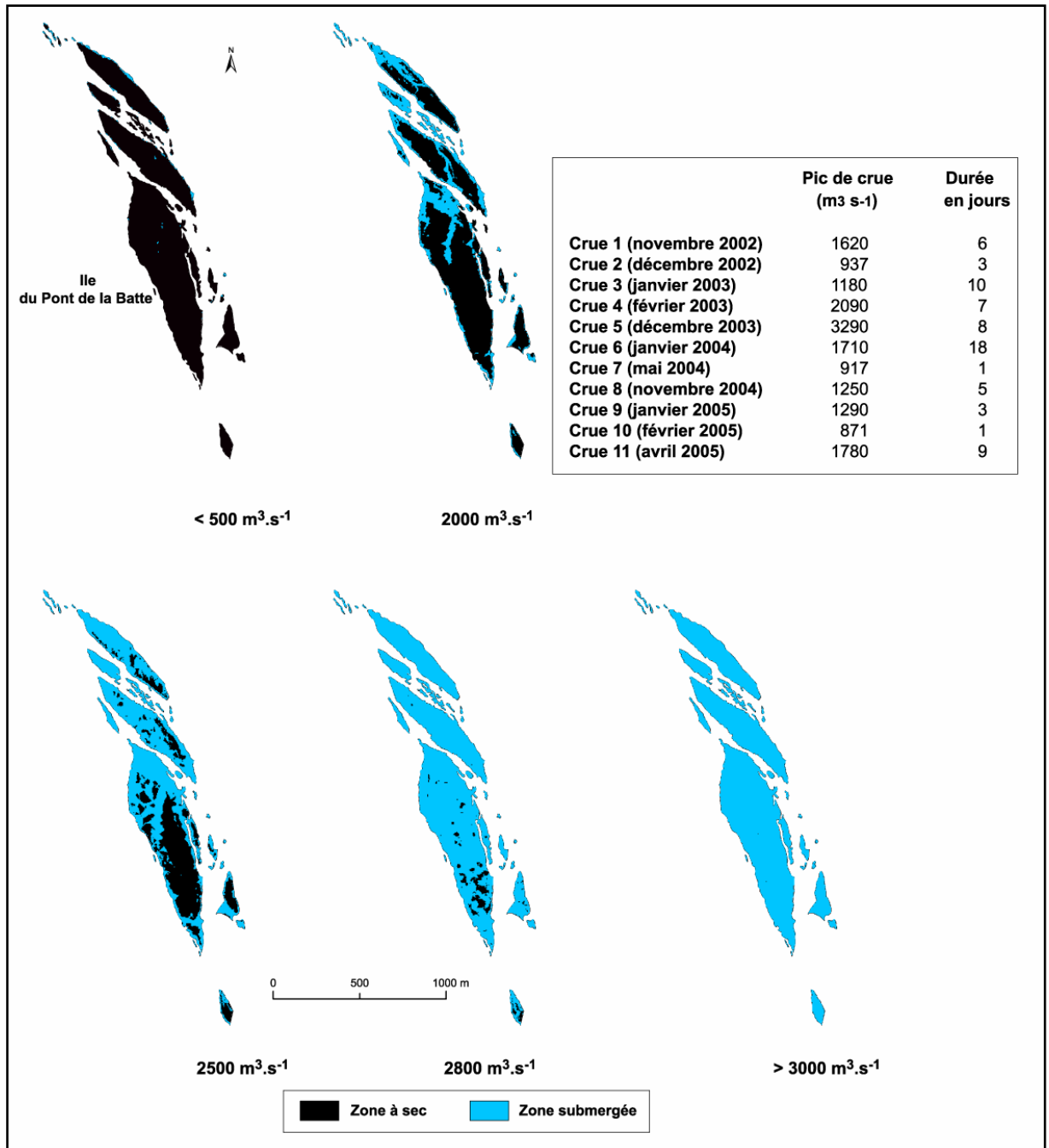


Figure 167 – Chronologie de la submersion des îles du secteur de La Charité-Passy.

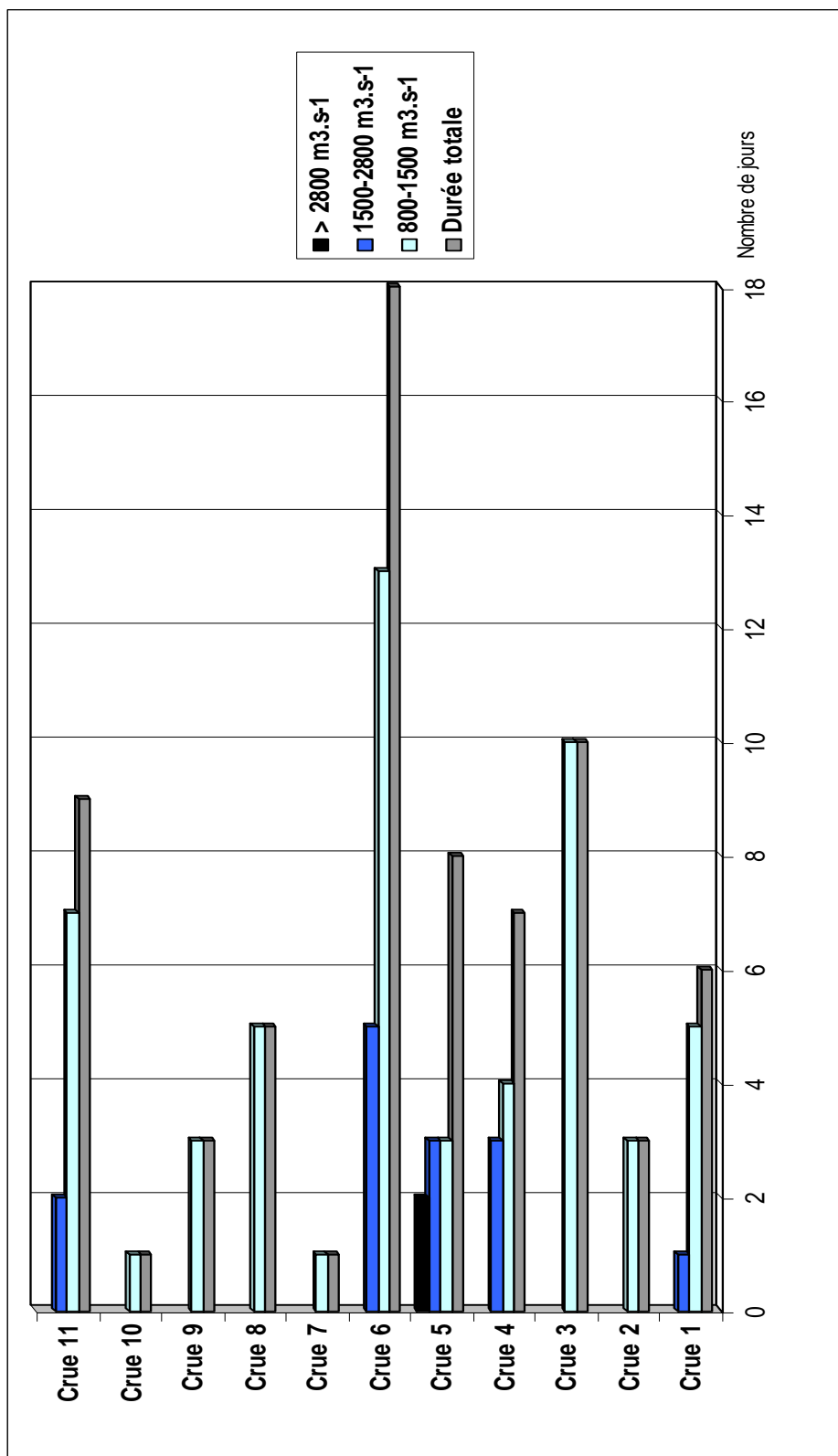


Figure 168 – Durée des seuils de débits déterminés pour la submersion des îles.

Cet aspect peut accentuer la dissymétrie morphologique des très grandes îles, dont les parties élevées se situent essentiellement en amont ou au milieu. Les dépôts, s'ils existent,

s'exerceraient alors préférentiellement en aval. Il est donc nécessaire d'éclairer ce point par notre analyse des rythmes de sédimentation des îles.

Débits seuils	Influences	Exemples	Nombre de jours 2002-2005
1 $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	- Tous les chenaux sont actifs - Submersion des micro-îlots		
2 $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	- Début de submersion des francs-bords - Submersion des îlots et des îles moyennes et des parties basses des grandes îles (îles anciennes)	☞ Francs-bords des Vallées, de Mesves et de Herry ☞ Bras morts des îles des Loges, du Lac, des Barreaux, de la Pointe.	54 jours
3 $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	- La plaine d'inondation commence à être envahie par les eaux du lit vif (grâce aux déversoirs) - Submersion totale des francs-bords topographiquement bas - Début de submersion des parties hautes, donc plus anciennes des francs-bords - Submersion des grandes îles anciennes et parties basses des très grandes îles	☞ Secteurs des déversoirs de Passy et de Couargues ☞ Franc-bord d'Herry ☞ Franc-bord des Vallées ☞ Ile du Lac, Ile des Barreaux, Ile de Malaga, Ile des Loges	14 jours
4 $2800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	- Submersion totale des francs-bords - Submersion des parties sommitales des grandes et très grandes îles	☞ Franc-bord de Mesves et des Loges ☞ Ile du Lac, Ile des Barreaux, Ile des Loges	2 jours

Figure 169 – Les grands seuils de submersion des unités fonctionnelles et des formes insulaires de la Loire des îles.

2). Le piégeage par les îles

Ces années de suivi hydro-sédimentaires ont permis d'établir les rythmes de sédimentation de différents types d'îles. En fonction de notre typologie à la fois de formation et d'évolution des formes insulaires (Chapitres 3 et 4), nous pouvons juxtaposer une interprétation propre à chacun de ces types, il ressort plusieurs éléments de compréhension des rythmes de sédimentation inter-annuels des îles.

a). La rétention insulaire

Les îles de la Loire, quelque soit leur morphologie, ont eu une forte capacité à piéger les sédiments entre 2002 et 2005 (de 2 cm à 70 cm de dépôts) (Figure 170). Ces épaisseurs, mesurées sur différentes îles représentatives, renseignent sur ce que chaque crue dépose. Les graphiques de la figure 170 laissent apparaître une nette importance des crues 4, 5 et 6. Les crues 4 et 5 sont celles qui permettent les dépôts les plus forts quelque soit la taille de l'île. Les micro-îlots et îlots captent des dépôts importants (20 cm) pour des crues de moindres importances (Crue 11), illustrant ainsi leur capacité d'effet peigne sur la sédimentation.

• **La durée et l'intensité des crues dictent le rythme de sédimentation des îles (Tableau VIII).**

2 points essentiels :

- Les grandes et très grandes îles enregistrent les dépôts les plus forts par rapport à leur durée de submersion (6 cm par jour de submersion). Mais leur rythme de croissance verticale à l'année est plus lent que les îles plus exposées aux crues $< 3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (10 cm par an pour les très grandes îles, soit 7 à 4 fois moins que les formes insulaires de surface inférieures : micro-îlots, îlots et îles moyennes).

- Les micro-îlots, les îlots et, dans une moindre mesure, les îles moyennes enregistrent les taux de sédimentation les plus forts par an (de 40 à 70 cm par an). Ceci s'explique par des durées de submersion plus longues, quelque soit l'intensité des crues, et par des écoulements plus rapides. Mais rapporté à la durée de submersion, le rythme de sédimentation est 3 fois moins rapide que pour les très grandes îles.

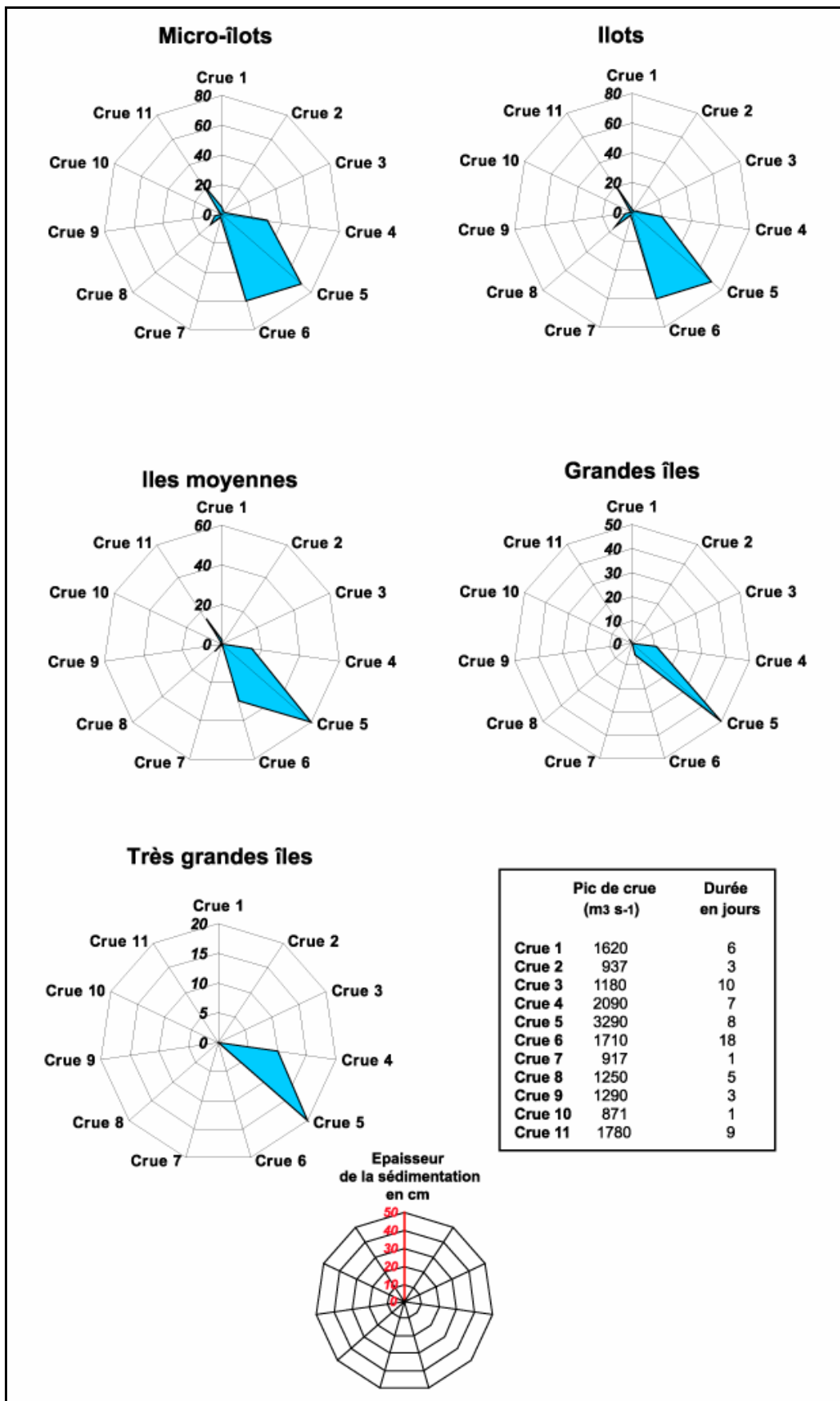












Figure 170 – Estimation des dépôts sédimentaires sur les différents types d'îles en fonction des différentes crues morphogènes suivies.

Tableau XVIII – Synthèse des dépôts enregistrés entre 2002 et 2005.

	Micro-îlots < 1 000 m²	Ilots de 1000 m² à 5000 m²	Iles moyennes de 5 000 m² à 20 000 m²	Grandes îles de 20 000 m² à 100 000 m²	Très grandes îles ≥100 000 m²
Total des dépôts 2002-2005 (cm)	213	198	129	67	30
Moyenne des dépôts en cm par crue	19	18	12	6	3
Rythme des dépôts en cm/an	71	66	43	22,3	10
Nombre de jours de submersion	70	70	58	12	5
Rythme en cm/jour de submersion	3	2,8	2,2	5,6 sur les berges 1 au centre	6 sur les berges 1 au centre
Pendant la submersion					
Observations post-submersion					

En conclusion, les îles de petite surface et de hauteur peu élevée bénéficient de l'apport des crues annuelles et de récurrence régulière (2 à 4 ans) avec des durées de submersion longues (70 jours de submersion pour les micro-îlots entre 2002 et 2005). Ceci permet un rythme de sédimentation soutenu. Les îles les plus perchées sont plus rarement submergées (5 jours pour les très grandes îles) et donc moins sujettes à la sédimentation. Toutefois, quand cette submersion se produit elle permet des dépôts très épais sur les berges et « rattrape » le faible rythme annuel de croissance verticale de ce type d'îles.

Il y a donc une forme d'équilibre dans la diversité des événements hydrologiques et de la capacité de dépôts des crues suivant le type d'île. Les crues $> 3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ « profitent » donc plus aux grandes et très grandes îles. Les crues moyennes, $< 2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, profitent *a contrario* aux îles moins perchées : du micro-îlot à l'île moyenne.

• La dynamique des îles en fonction de l'âge

Les îles les plus récentes (en l'occurrence < 40 ans) sont aussi les plus basses et par conséquent le plus souvent submergées (par les crues annuelles notamment) (Figure 171) ; la végétation buissonnante y jouant un rôle très important dans le piégeage. Les îles les plus anciennes et plus perchées ne sont submergées qu'irrégulièrement lors des crues exceptionnelles comme celle de décembre 2003. Les taux de sédimentation sont ainsi différents suivant l'âge de l'île et sa topographie (Tableau VIII). Au vu des graphiques mettant en relation la taille des îles, les événements hydrologiques majeurs et les dépôts, il apparaît clairement que

- les crues 4, 5 et 6 sont celles qui ont permis les dépôts les plus forts quelque soit la taille de l'île : jusqu'à 80 cm de dépôts.
- Les micro-îlots et îlots captent des dépôts importants pour des crues de moindre importance, illustrant ainsi leur capacité d'effet peigne sur la sédimentation : de 20 à 80 cm.
- Les grandes et très grandes îles n'ont enregistré des dépôts que pour les crues les plus fortes (supérieures à $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) : de 10 à 50 cm en moyenne.

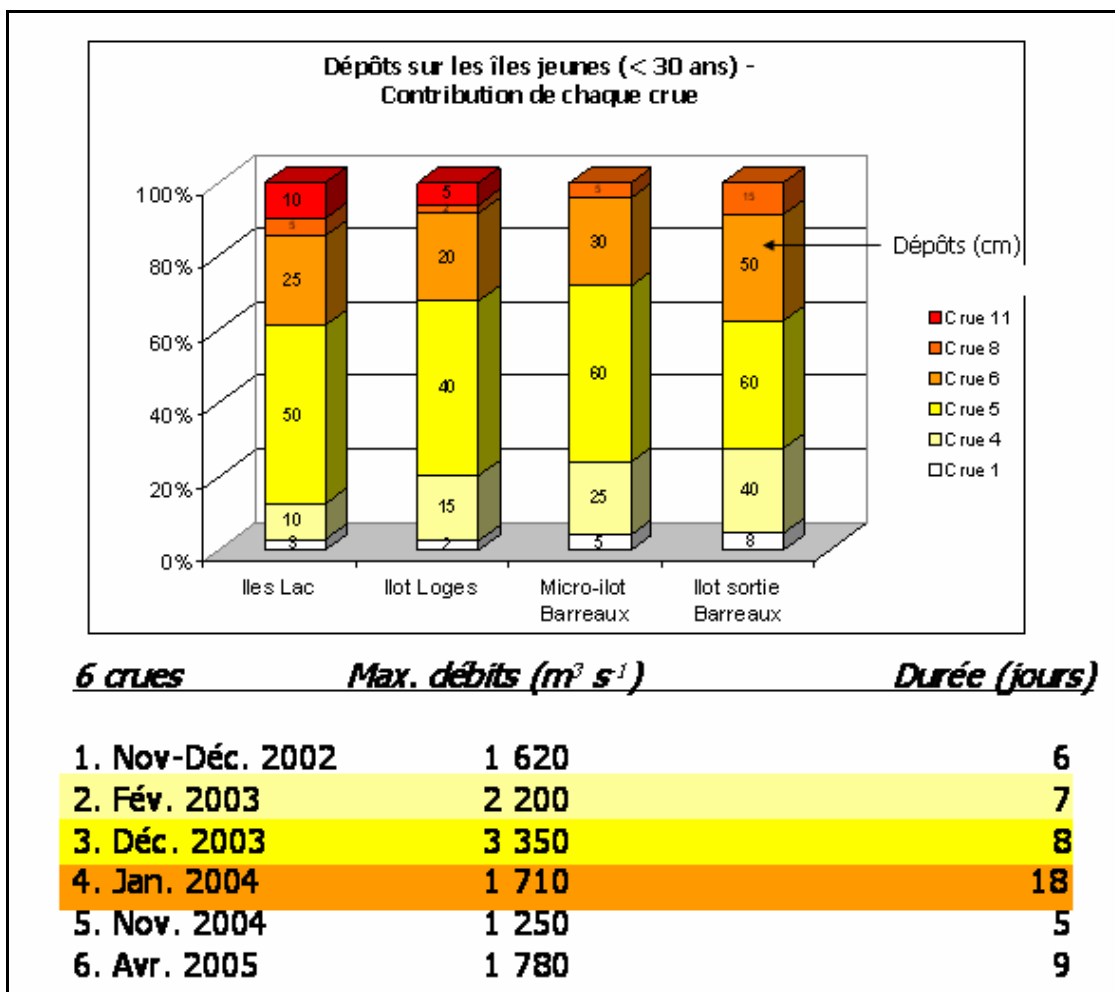


Figure 171 – Dépôts relevés sur différentes îles jeunes.

Il existe un seuil d'évolution altitudinale des îles dicté par la récurrence des crues et notamment celle des crues les plus fortes : 8 mètres à partir du fond du chenal. Ceci renforce notre constat de l'approche moyenne et fine, à savoir que les îles de moins de 40 ans connaissent une sédimentation verticale beaucoup plus forte que les îles anciennes. De plus, les grandes et très grandes îles ont des taux de sédimentation différents entre les berges (50 à 60 cm) et le centre (moins de 2 cm) (Photographies 26, 27 et 28).



Photographie 26 – Dépôts sur les îles de plus de 40 ans : secteur des Loges.
Dépôts sur berges (50-60 cm) (a et c) - Faibles dépôts au centre (b)



Photographie 27 – Dépôts sur les îles jeunes de moins de 40 ans (Impact de la crue de décembre 2003).

Dépôt en queue d'île jeune : 60-80 cm (a). Dépôt en section centrale: 40-60 cm (b).



Photographie 28 – Sédimentation forte sur la berge d'une grande île jeune comme celle du secteur des Loges (80 cm de dépôts).

- Comme nous l'avons déjà déterminé dans le chapitre 3, les bancs à caractère insulaire sont à un stade intermédiaire entre la bande active et les formes végétalisées (végétation pérenne).

Deux fonctionnements hydrologiques se sont exercés sur ces bancs en fonction de leur position dans la bande active. Les bancs à caractère insulaire, situés dans le chenal principal, se retrouvent submergés avant ceux localisés dans les chenaux secondaires. Ensuite, la différenciation de sédimentation va s'exercer entre les différences de submersion des chenaux secondaires puisque les bras ne se mettent pas tous en fonction aux mêmes débits. Les bancs des bras secondaires sont ceux qui enregistrent les plus forts taux de sédimentation.

Les bancs à caractère insulaire associés à des îles (comme ceux en queue d'îles) connaissent des exhaussements très forts (de l'ordre de 60 à 80 cm par an) grâce une végétation pionnière très récente.

b). L'érosion des îles

Au fil des épisodes hydrologiques, il apparaît que les îles subissent également l'érosion (Photographie 29).

- **Les pointes d'îles** par exemple constituent des zones d'érosion privilégiées car la minceur de ces parties d'îles (moins de 5 m de large) ne résistent que faiblement à la dynamique fluviale. Ainsi, la queue de l'île du Lac, parmi les très grandes îles a subi une forte érosion. La crue 4 (février 2003) avait ouvert de nombreuses brèches dans cette pointe, constituant de futurs points faibles à cette île. La crue 5 (décembre 2003), 10 mois après, a suffi à déstabiliser entièrement cette queue d'île.

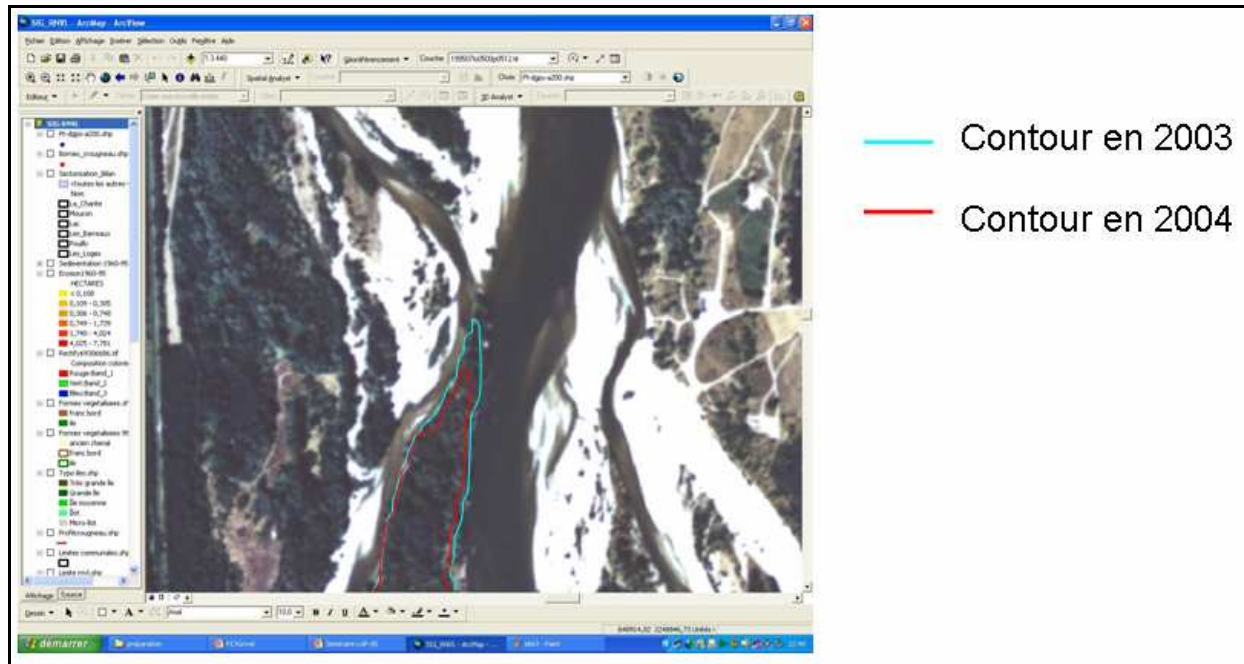


Photographie 29 – Erosion des îles.

Erosion forte des berges d'îles peu élevées par rapport au bras principal (a) et agrandissement de brèches dans les parties très étroites des grandes et très grandes îles (b).

Nous avons ainsi enregistré un recul de près de 100 m de la pointe aval de l'île du Lac. De micro-îlots, issus de la déstructuration de la pointe, ont été ainsi constitués en aval de l'île du Lac. Ce recul de l'île est dû à la pression exercée par le chenal principal. Le bras principal tend en effet à reprendre un nouveau tracé le long de la levée de rive gauche. Cet aspect illustre les résultats que nous avons montrés sur les divagations du fond du chenal principal dans son lit intra-levées. Ainsi, la queue de l'île du Lac n'est plus une

zone de sédimentation privilégiée (cette île avait pourtant connu une croissance accélérée entre 1960 et 1995) car la bande active reprend le dessus en érodant fortement cette partie de l'île (plus de 100 m de recul entre 2002 et 2004) (Photographie 30). Ce sont les débits supérieurs à $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ qui jouent un rôle majeur dans l'érosion des pointes d'îles.



Photographie 30 – Recul de près de 100 mètres de la queue d'une très grande île (Ile du Lac).

- **L'érosion latérale** concerne d'abord les formes insulaires supérieures à $20\,000 \text{ m}^2$, soit les grandes et très grandes îles. L'érosion des berges de ces îles atteint en moyenne 20 cm par an, avec des reculs s'approchant du mètre après les crues les plus fortes (Crue 4, 5 et 6).

Le suivi des conditions hydro-sédimentaires depuis 2002 a renforcé ainsi certains modèles d'évolution que nous avons pu identifier dans notre approche moyenne (chapitres 3 et 4) :

- Les îles migratrices enregistrent des érosions de leur tête et des dépôts aval favorables à leur déplacement. Les crues ont permis de développer de nouveaux dépôts sur les bancs situés en queue de ces îles qui migrent vers l'aval, jusqu'à 80 cm d'épaisseur de dépôts (Photographie 27).
- Des îles moyennes et des îlots subissent des processus d'érosion qui permettent pour les premières la formation de nouveaux îlots dans l'hydrosystème (par

l'agrandissement des petits bras secondaires qui séparent deux îles) et pour les seconds de réinjecter des sédiments dans la Loire.

- Des îlots ont fait obstacle aux écoulements et piégé des embâcles et des sédiments qui pourraient à terme permettre leur extension méridienne et verticale. Les îles les plus jeunes poursuivent leur rythme d'accrétion verticale (plus de 40 cm en moyenne) alors que les îles les plus anciennes sont très dépendantes des crues fortes.

c). La diversité des dépôts inter et intra-formes.

- A partir du profil expérimental A200 (Figure 172), dans le secteur fonctionnel des Loges, nous avons pu mesurer précisément la nature des dépôts lors des différents niveaux de submersion et par conséquent suivant les différents événements hydrologiques. Il apparaît que la nature et l'épaisseur des dépôts mesurés dans les trappes et sur les paillasons ne sont pas homogènes au sein d'une même unité fluviale et entre les différentes unités, et, comme nous l'avons déjà constaté d'un épisode hydrologique à l'autre. Ainsi, les îles du profil A200 n'ont piégé des sédiments que lors des 3 plus fortes crues (crue 4, 5 et 6). Les taux les plus forts sont mesurés suite à la crue de décembre 2003 et sur les berges d'îles (de + 20 à + 50 cm).

Ce sont en effet les berges d'îles qui captent le plus les sédiments lors des crues. Pour la crue de février 2003, les dépôts sur l'ensemble du profil ont été faibles et relativement homogènes d'une unité morphologique à l'autre (pas plus de 10 cm), et ce sont les berges d'îles (et même de franc-bord) qui ont piégé en proportion la plus forte (4 fois plus que les autres parties d'îles).

Nous mesurons que la nature des dépôts reste très homogène et cohérente d'un épisode hydrologique à l'autre. Les dépôts de sable fins sont mesurés sur les berges d'îles et de francs-bords, tandis que les dépôts les plus fins se localisent, presque logiquement, sur les unités morphologiques les plus éloignées du lit. Ainsi, les parties centrales des îles piègent essentiellement des sédiments de type limons alliés à du sable très fin. Ces dépôts ne dépassent pas en moyenne les 4 cm, quelque soit l'intensité et la durée de la crue (à partir de $1800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Sur le même profil, nous avons mesuré que les dépôts de limons, ne dépassant jamais les 5 cm, se localisent dans les bras morts d'îles anciennes et de francs-

bords. La crue de janvier 2004 a submergé le franc-bord de ce profil pendant plus de 10 jours, et permis ainsi des dépôts de 5 cm de limons en fond chenal mort.

En conclusion, plus on s'éloigne du lit vif et plus la granulométrie des dépôts diminue pour atteindre la taille des limons en fond de bras mort de franc-bord.

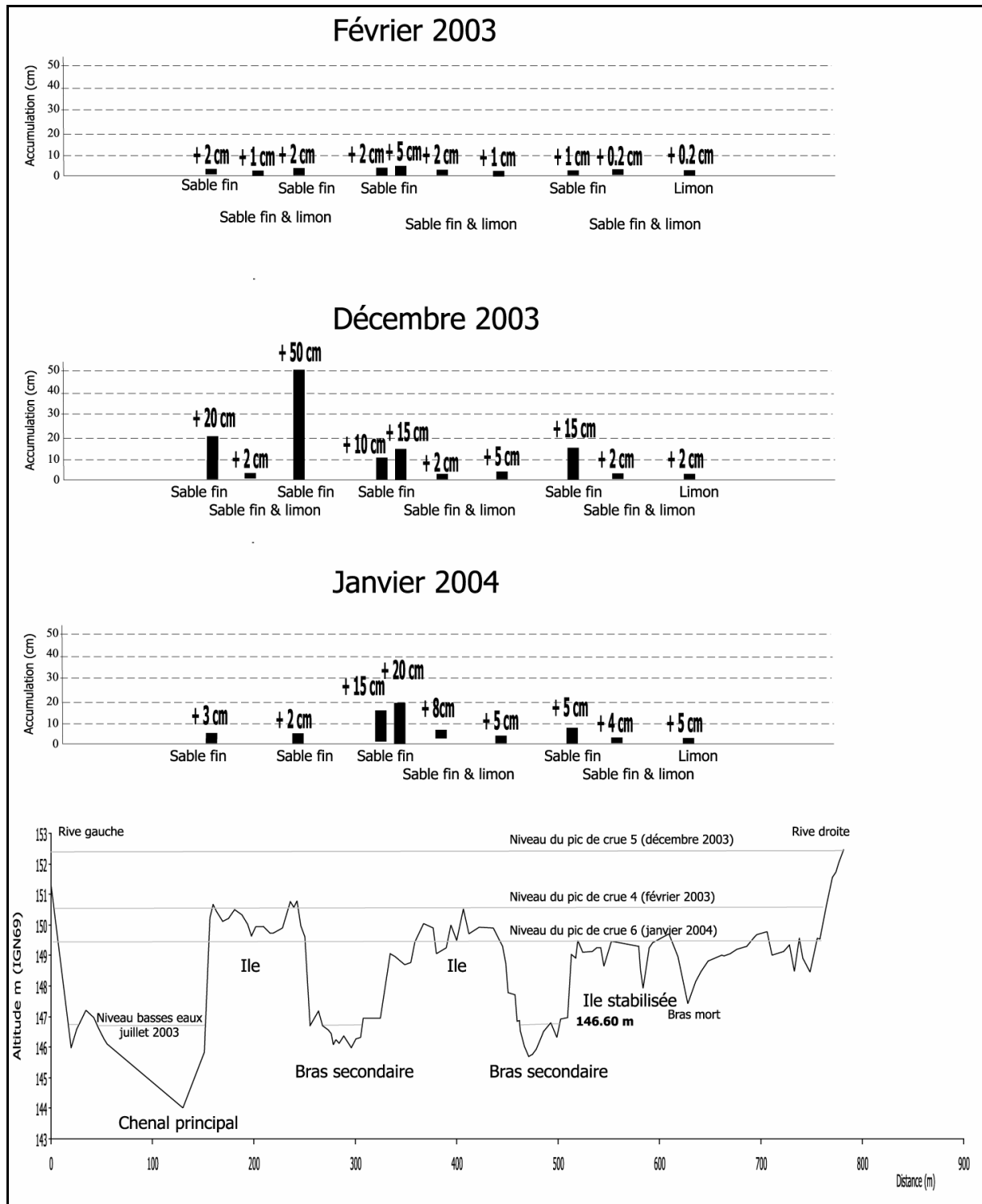


Figure 172 – Comparaison des dépôts suite à trois épisodes hydrologiques différents.

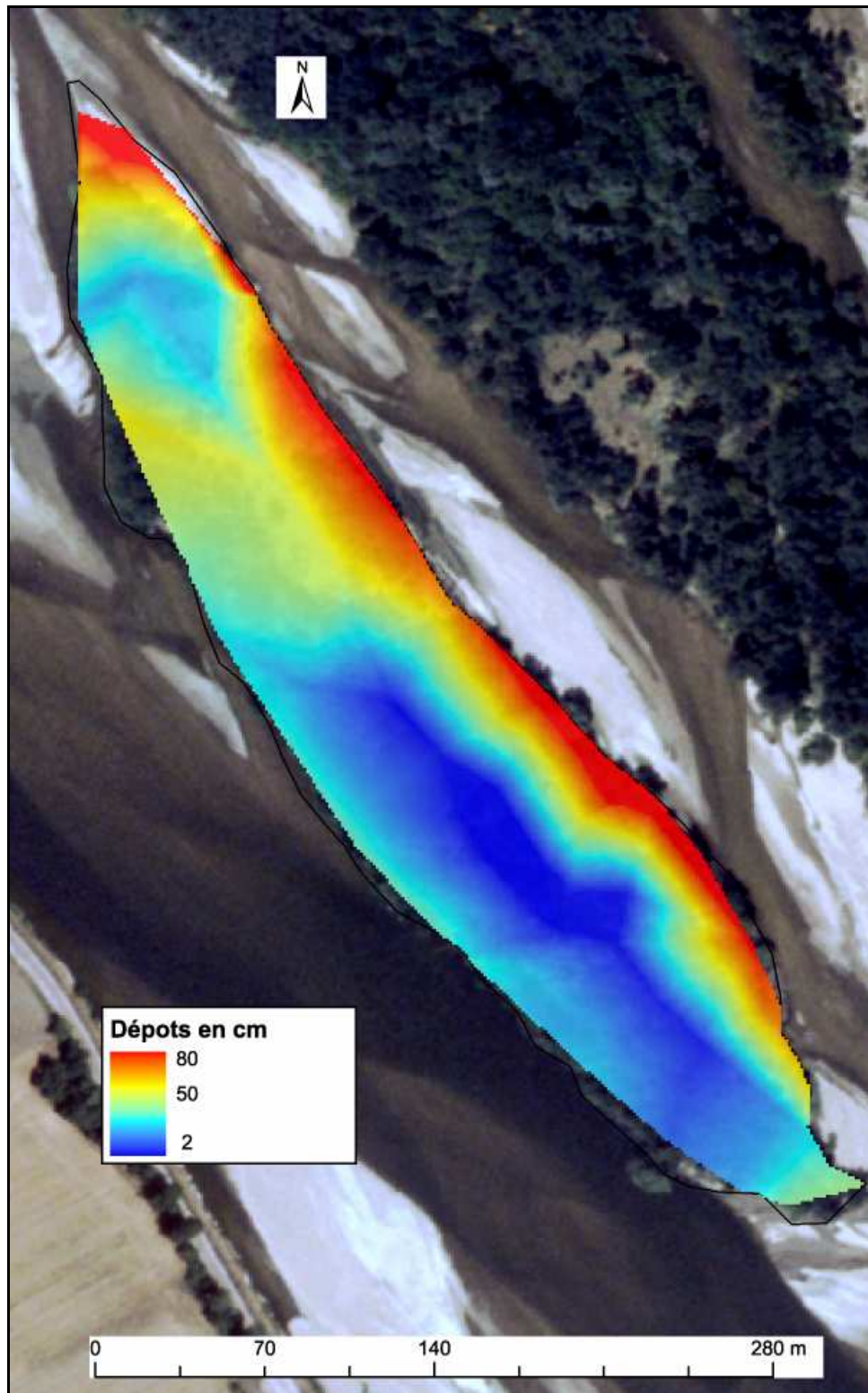


Figure 173 – Evaluation de la sédimentation sur une île jeune après la crue 5 (décembre 2003).
Secteur des Loges, à l'aide de la méthode krigeage des points mesurés in situ.

Il n'a pas toujours été aisé de mesurer systématiquement les dépôts sur toutes les îles et surtout sur l'ensemble des îles. Suite à la crue de décembre 2003, nous avons mesuré les

épaisseurs des dépôts sur une île jeune (Ile au droit de l'île des Loges, et présente sur le profil A200, entre le bras principal et un chenal secondaire) qui a été entièrement submergée. Une modélisation de ces dépôts sur l'ensemble de l'île a été réalisée pour spatialiser la sédimentation (Figure 173). Il apparaît ainsi que les dépôts les plus épais se localisent en berge droite, côté bras secondaire, et en queue d'île (de 50 à 80 cm de dépôts). Comme nous l'avons montré sur le profil A200, les dépôts les moins épais se situent au centre des îles. Les parties basses de cette île se trouvent à l'aval et enregistrent des dépôts moyens de 30 à 50 cm. Cette île correspond à un modèle d'évolution original que nous avons déjà souligné dans le chapitre 3 (Figure 113) : il s'agit d'une île « migratrice » (jusqu'à 5 m par an de progression vers l'aval). Les parties basses qui enregistrent des dépôts moyens correspondent en fait aux zones les plus récentes de cette île.

Les francs-bords

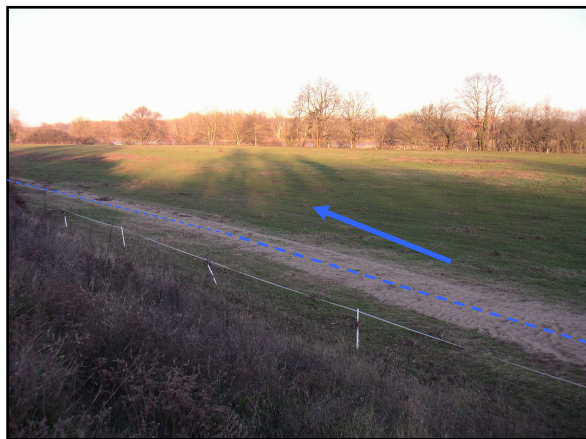
Il était intéressant de montrer la place des francs-bords lors des épisodes hydrologiques suivis depuis 2002. Nous avons montré leur chronologie de submersion (Tableau XVI) et constaté que les francs-bords sont submergés rapidement dans leur partie basse (dès 800 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) et à 1500 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$; 85 % des francs-bords du Site Atelier 3 sont submergés.

Les francs-bords ont joué leur rôle également dans les épisodes hydrologiques exceptionnels puisqu'ils ont servi de zones intermédiaires d'entrée des eaux de crue avant l'inondation du val. Au sein de ce Site Atelier 3, tous les francs-bords ont rempli ce rôle hydrologique : franc-bord des Loges (secteur de l'île des Loges), franc-bord de Mesves en rive droite (secteur de l'île des Barreaux), et le franc-bord d'Herry en rive gauche (secteur de l'île du Lac). Les dépôts sédimentaires sur les francs-bords, comme nous le montre le profil A200, se répartissent suivant une certaine logique. Non seulement ils sont de moins en moins importants à mesure que l'on s'éloigne de la bande active mais ils sont aussi de plus en plus fins (Figure 172). Des dépôts de crue s'enregistrent en haut de berge (20 cm d'épaisseur après les crues 4, 5 et 6). Des flèches sableuses sur les premiers 20 m de large de franc-bord sont localisées très facilement et enregistrent les sens des écoulements (Photographie 31).

Les dépôts sont ensuite bien plus épars et fins ; ils se retrouvent d'ailleurs dans le sillage des anciens bras actifs des francs-bords (2 à 5 cm de limon à sable très fin) (Photographie 32). Cette disparité des dépôts au sein des francs-bords selon un gradient latéral s'explique par la végétation buissonnante des francs-bords qui ralentit fortement, sur les premières dizaines de mètres de large, les courants.



Photographie 31 – Erosion et sédimentation sur les francs-bords.
Les francs-bords enregistrent érosion et fort recul (jusqu'à 8 m) avec des dépôts en haut de berge (près de 20 cm).



Photographie 32 – Ecoulements sur les francs-bords.
Les écoulements les plus forts dans les francs-bords se sont localisés dans les anciens chenaux, aujourd'hui les parties basses : la sédimentation y est de l'ordre de 5 cm.

Les berges de francs-bords, non aménagées d'anciens perrés, connaissent des érosions plus ou moins intenses : de 5 à 8 m par an de recul. Les 8 m de recul annuel concernent le plus long franc-bord du SA 3, celui de Mesves-sur-Loire. Notons que ces reculs ne sont pas réguliers d'une année à l'autre, en fonction des événements hydrologiques. La crue 5,

décembre 2003, a par exemple érodé sur 8 m de large les berges du franc-bord de Mesves (soit son rythme annuel d'érosion) (Figure 174). Cette érosion de berge a permis de réinjecter près de $7000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de sédiments dans l'hydrosystème. C'est donc au niveau des francs-bords que l'on enregistre les vitesses d'érosion de berges les plus fortes.

Dans ces systèmes anastomosé la Loire renouvelle donc une partie de sa charge sédimentaire par érosion des berges de francs-bords, et plus modérément par érosion des berges et tête d'îles.

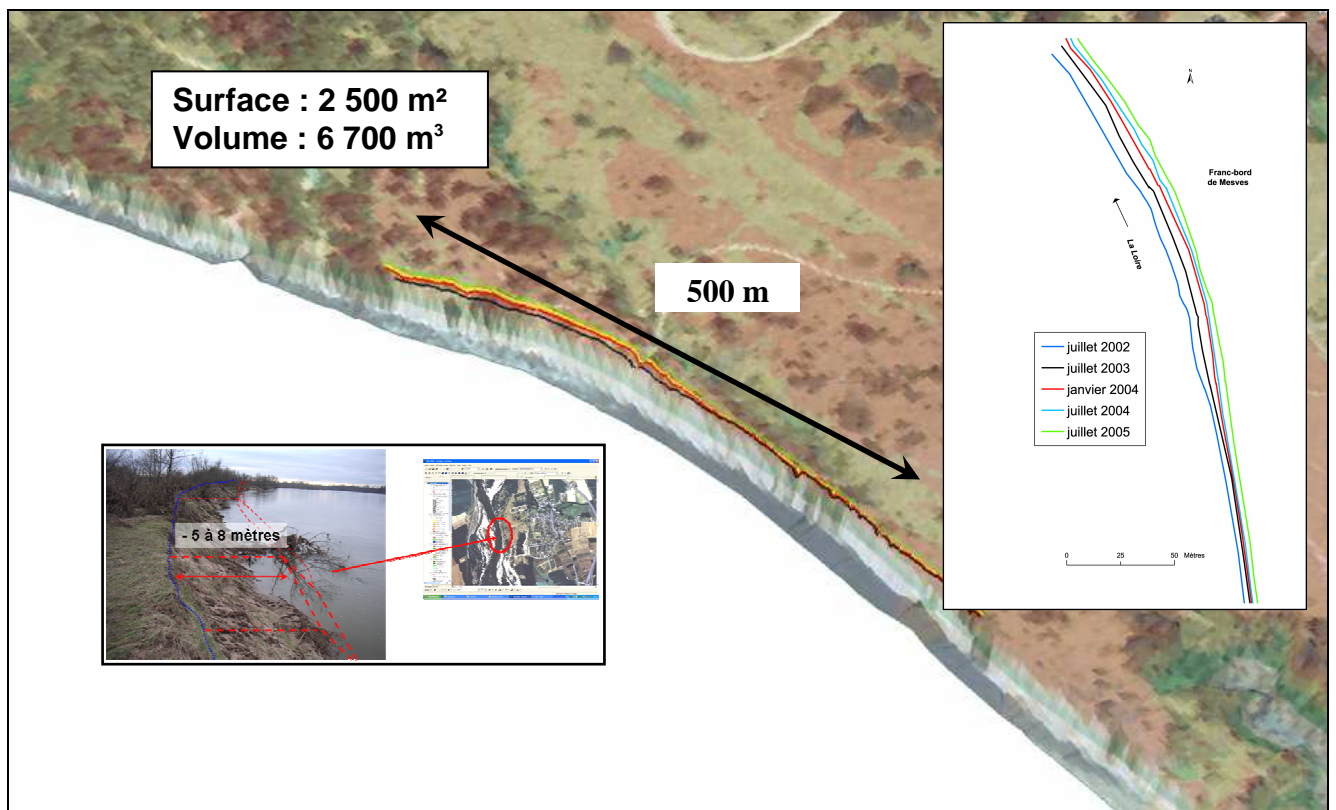


Figure 174 – Le rythme d'érosion du franc-bord de Mesves est de 8 m/an. L'érosion peut être plus forte suivant les débits, puisque la crue de décembre 2003 a fait subir un recul de près de 8 m à ce franc-bord.

C La variabilité spatio-temporelle des processus sédimentaires dans les bras secondaires entre 2002 et 2005

Pour comprendre le fonctionnement hydro-sédimentaire des bras secondaires, nous proposons, comme pour les îles, tout d'abord de montrer l'état et l'évolution morphologique de ces formes fluviales. Ensuite, grâce à nos relevés de terrain annuels (DGPS + profils topographiques + SIG), nous apprécions les rythmes de sédimentation et d'érosion afin d'établir un bilan global et les tendances d'évolution actuelles des chenaux secondaires de la Loire des îles.

1). Bilan morphologique des bras secondaires depuis 2002

a). Evolution en plan des bras secondaires étudiés

- Bras des Loges

L'évolution en plan des formes fluviales dans ce secteur des Loges, entre 2002 et 2005, est un important préalable au bilan sédimentaire établi à l'aide des mesures post-crue. Elle permet de mieux corréliser le fonctionnement inter-annuel du bras des Loges et le développement de la végétation dans son secteur fonctionnel (Figure 175).

Amont : Une relative stabilité se dégage dans ce grand secteur des Loges. Le bras conserve dans son ensemble une largeur homogène (pas plus de 100 m) avec des reculs de berges d'îles et de francs-bords très faibles (-1 m par an pour les berges en convexité de méandres).

La connexion amont principale a toujours été en eau et comme le montre la figure 176, il faut que les débits passent en dessous de $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour que cette connexion soit désactivée. Cette connexion n'est qu'une zone de transfert intermédiaire des sédiments : une entrée très active des sédiments sans dépôts importants ; les sédiments sont poussés vers l'intérieur du bras.

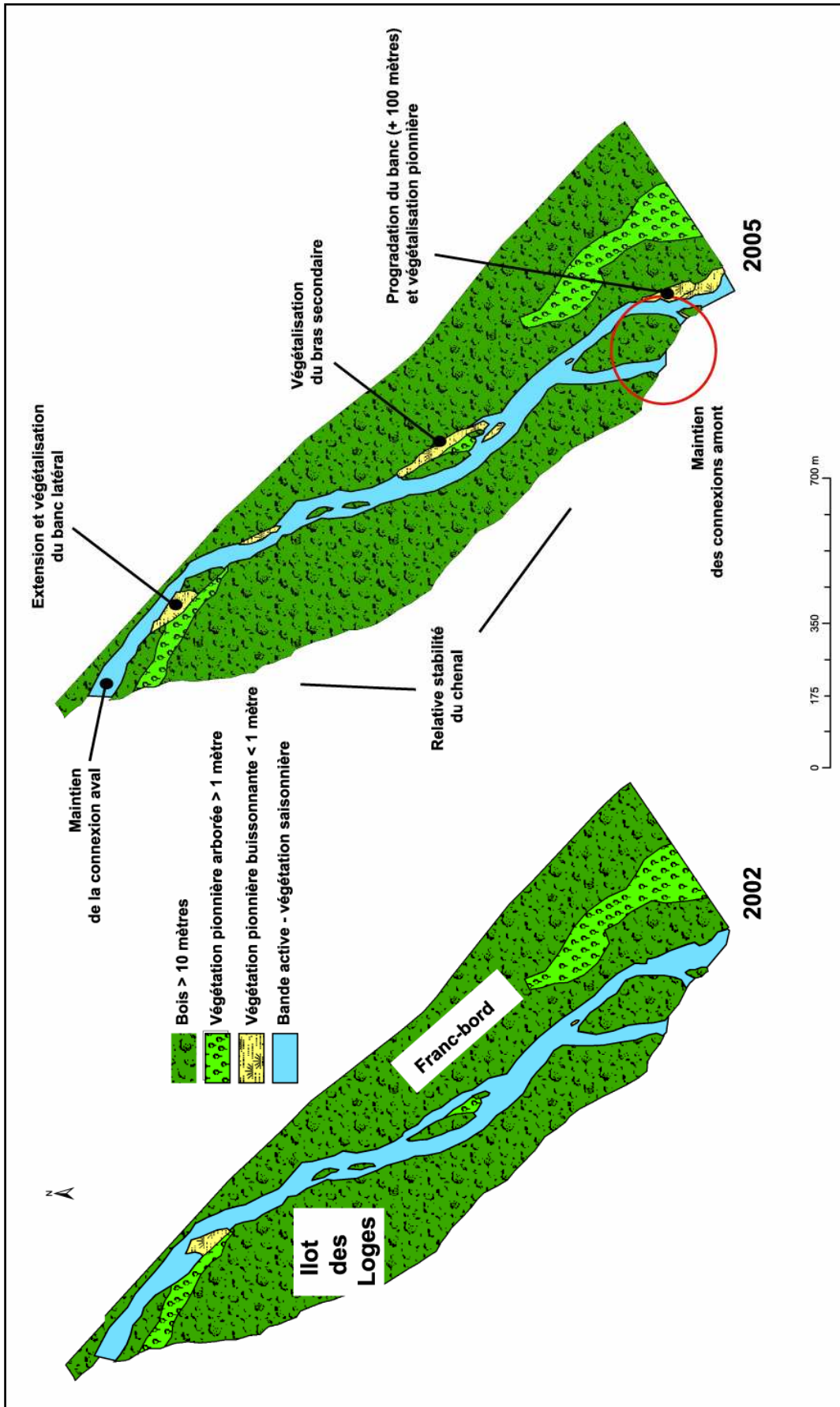


Figure 175 – Evolution du secteur des Loges entre 2002 et 2005.

Par contre, les autres connexions amont ne connaissent pas les mêmes conditions sédimentaires que la principale, en raison uniquement de la durée de submersion et de l'activité hydrologique. Les deux connexions secondaires sont activées à partir de $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.¹ Suivant les débits, les dépôts sédimentaires sont privilégiés et s'accumulent un temps avant qu'ils soient repris à la crue suivante. Ainsi, comme l'illustrent les MNT du suivi de ces connexions, on constate que les zones de dépôts sont importantes (plus de 50 cm par endroits) mais sont redistribuées dans le bras par la suite. On mesure une progradation des bancs de dépôts à l'amont immédiat de la première connexion, pouvant atteindre parfois plus de 100 m. Ce banc progresse vers la première connexion et se végétalise progressivement.

Aval : Cette connexion se caractérise par une bonne activité hydrologique, dynamique lors des crues annuelles, très peu de dépôts et donc une zone de transfert active vers le chenal principal.

Au regard des MNT, l'érosion prédomine illustrant la forte capacité de ce bras à drainer les sédiments vers le reste du fleuve.

Ensemble des Loges : Ce bras constitue un chenal très important d'évacuation et de soutien du chenal principal. Les sédiments passent par ce chenal sans y rester toutefois. La bonne activité hydrologique et le maintien d'une pente régulière, et un faible exhaussement du plancher du bras l'illustrent très bien. La végétalisation y est faible. La submersion annuelle de ce bras empêche tout développement de la végétation.

Le bilan 2002-2005 laisse apparaître des mesures de sédimentation révélatrices du rôle de ce bras dans l'hydrosystème : un rôle d'évacuation et non de rétention des sédiments. Ce bras supplée le chenal principal dans l'hydrosystème et la distribution des sédiments. Le bilan Erosion/Sédimentation ne souligne aucun signe de déséquilibre possible de ce bras et marque plutôt tout l'intérêt du maintien d'un tel bras, même sans intervention humaine, pour son rôle majeur dans l'hydrosystème.

- Bras des Barreaux

Le suivi en plan du secteur des Barreaux fait apparaître de profondes modifications (Figure 176). Il apparaît ainsi que la sédimentation et la végétalisation dominant non pas au niveau

des connexions mais au sein même du chenal. On note la multiplication de micro-îlots, l'extension des bancs latéraux végétalisés et la formation d'un véritable bouchon alluvial colonisé par la végétation juste avant la connexion aval.

Le suivi de la connexion amont fait apparaître une alternance de dépôts et de l'érosion en fonction des débits de submersion. Du fait de la végétalisation, ces sédiments sont ensuite piégés à des rythmes, par endroit, très importants (+ 80 cm sur les bancs de verdiaux de Saule et de Peuplier), tout particulièrement dans la première partie du bras (Transects T1 et T2) (Figure 177).

De très fortes modifications de la couverture végétale et des formes intra-bras sont à relever en l'espace de 3 ans. La partie amont se maintient convenablement avec l'apparition de verdiaux. La partie médiane se végétalise de plus en plus avec une croissance forte des cortèges de Saules et de Peupliers. L'érosion des surfaces boisées sur le banc aval, entre 2004 et 2005, s'explique par une intervention de la DDE chargée de l'entretien du lit de la Loire.

Il semble donc évident, au regard de cette évolution en plan du bras, que la partie médiane (sur près de 2 km) est marquée par un développement très fort de la végétation pionnière. Elle représente par conséquent un long secteur de piégeage en sédiments entre l'entrée et la sortie de ce chenal.

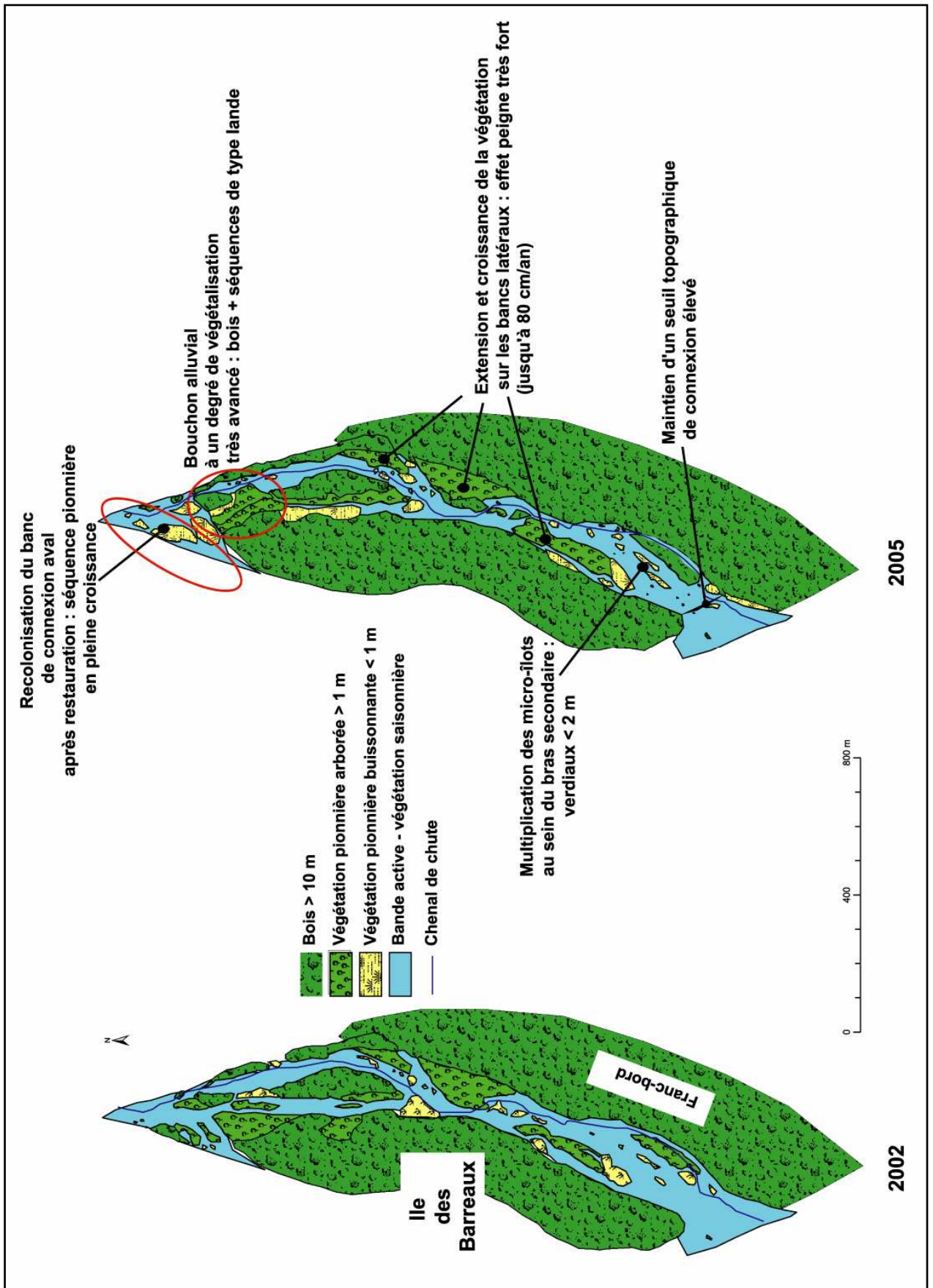


Figure 176 – Evolution du secteur des Barreaux entre 2002 et 2005.

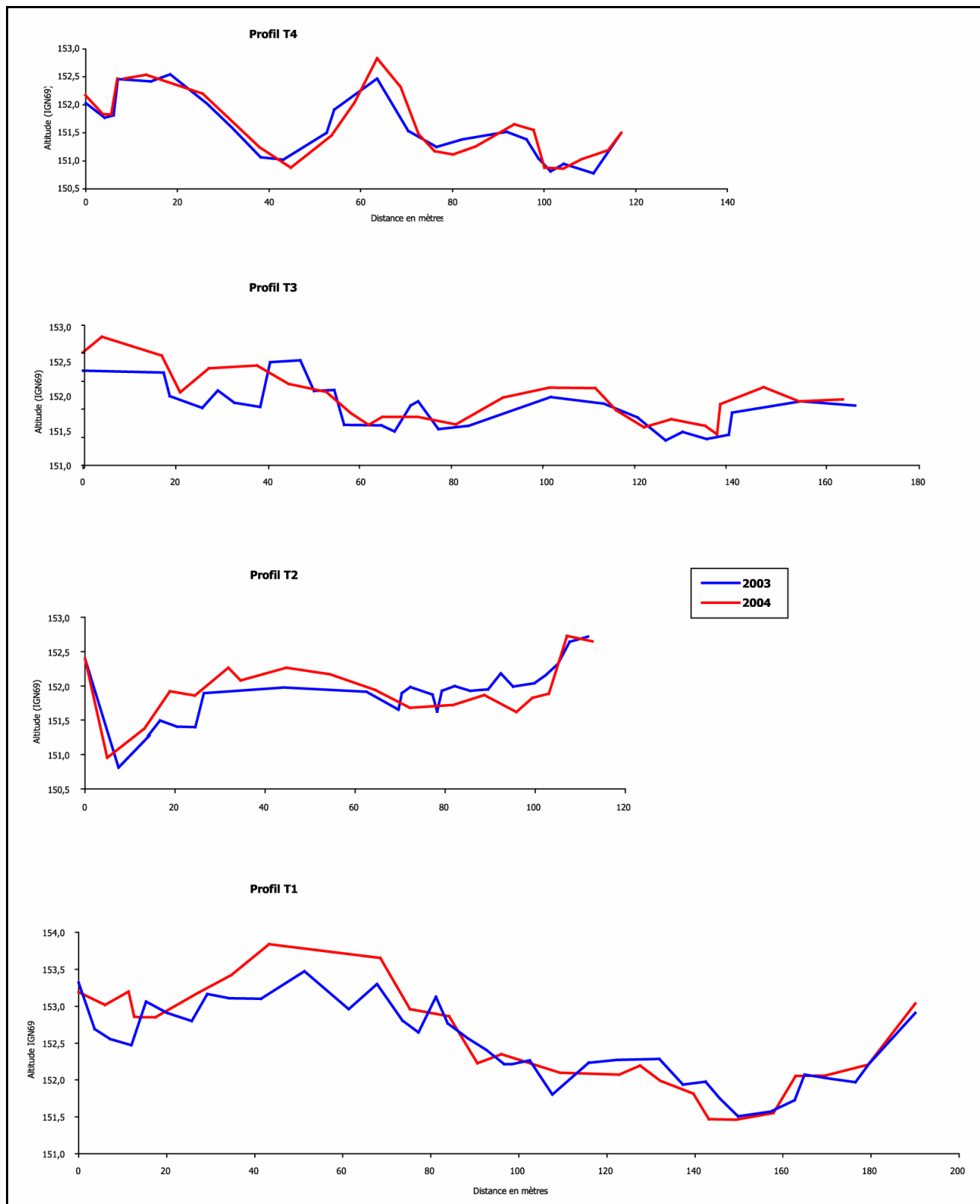


Figure 177 – Profils transversaux levés au sein du bras secondaire des Barreaux.

- Bras du Lac

On note une nette végétalisation de l'ancien bras de connexion amont au profit d'un léger élargissement (+ 3 m) de l'étroite connexion actuelle de ce chenal secondaire (Figure 178). Ce long chenal conserve une homogénéité de sa largeur, avec très peu de modification et très peu de végétalisation le long de son parcours. Les principales modifications s'exercent ainsi aux connexions amont et aval. La connexion aval a connu une double évolution. D'un côté, on note une réduction de la queue d'île (- 200 m) à cause du chenal principal semblant modifier son parcours à ce point précis en réajustant son profil le long de la levée de rive gauche, et grignotant par ce forçage la mince queue de l'île du Lac.

L'évolution en plan de ce bras laisse apparaître quelques modifications à l'intérieur du bras du Lac (Figure 179). Ainsi, ce chenal secondaire se caractérise par une érosion puisqu'on enregistre un enfoncement de l'ordre de 10 cm entre 2003 et 2005. Les profils A190 et A189 révèlent un léger exhaussement des bancs latéraux (+ 80 cm à 1m) et un recul des berges de l'île du Lac (près de 2 m). Ces résultats sont les signes d'une bonne activité hydrologique au sein même du bras : l'érosion et la sédimentation sont homogènes dans ce bras très long et étroit.

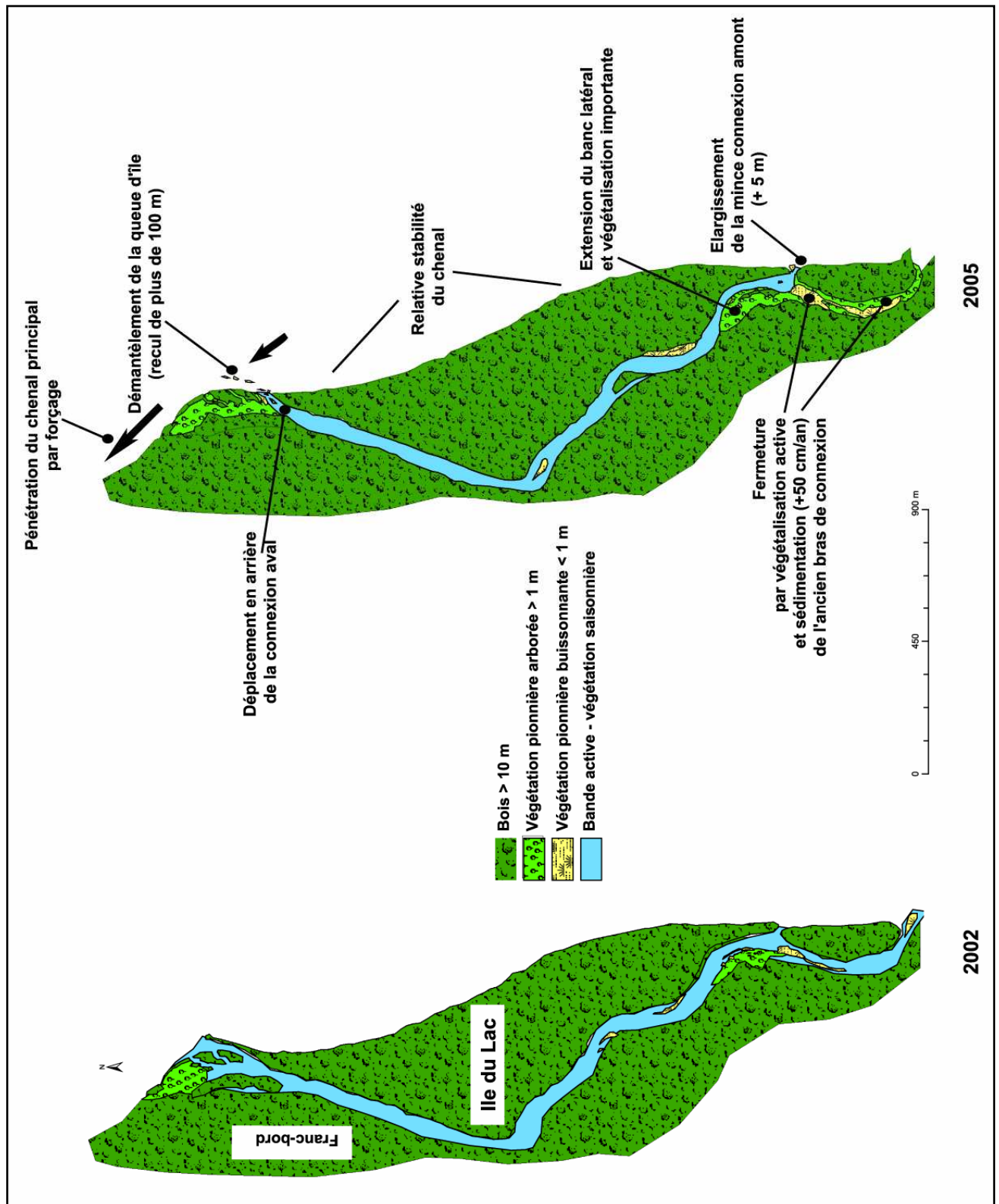


Figure 178 – Evolution du secteur de l'île du Lac entre 2002 et 2005.

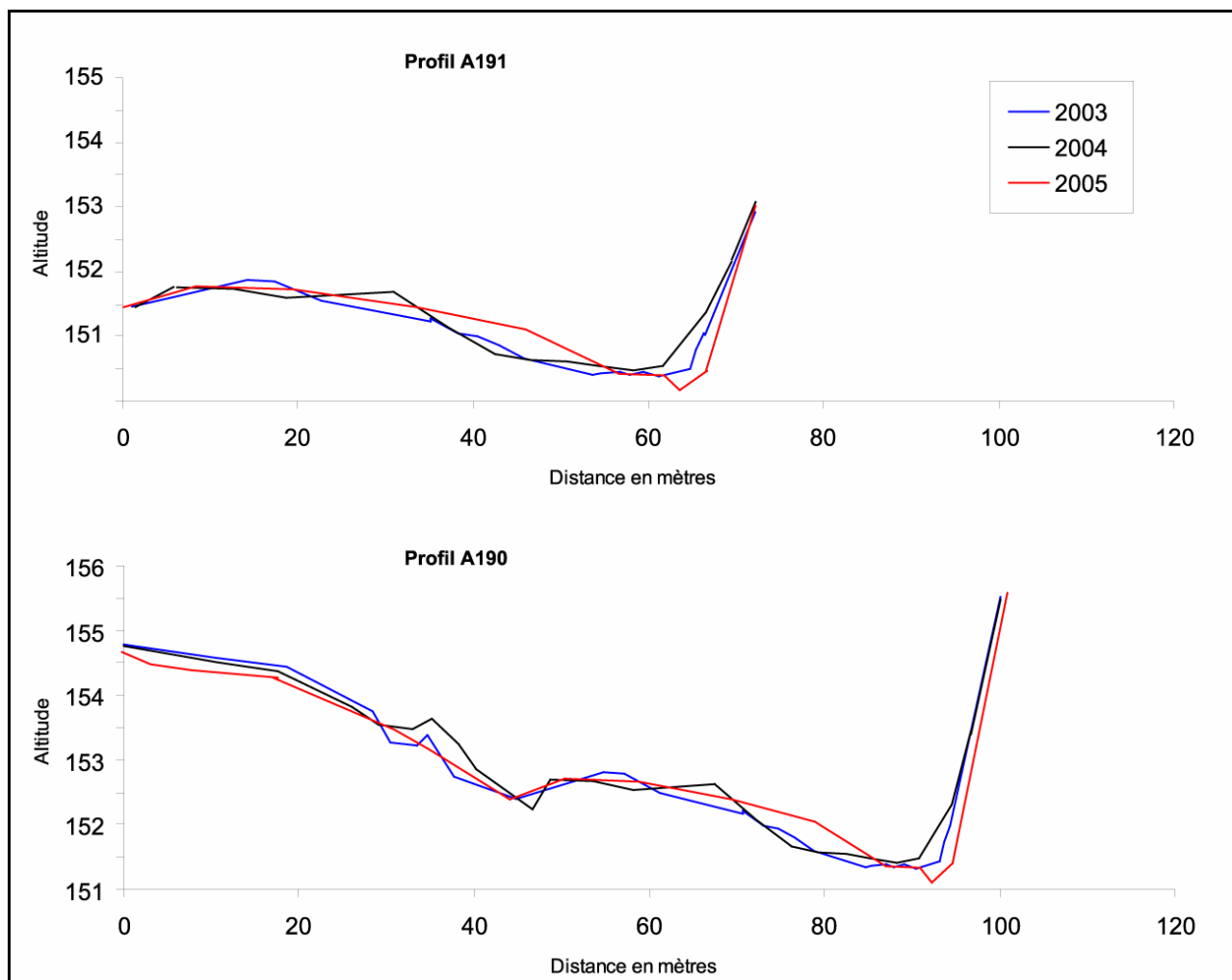


Figure 179 – Profils levés au sein du bras secondaire du Lac.

b). Morphologie des bras secondaires par l'approche 3D

- A partir du M.N.T. de l'ensemble du bras des Loges et des nombreux relevés de terrain effectués depuis 2002 (topographie et prélèvements sédimentaires), nous observons une complexité de la partie amont (présence de trois connexions, donc trois chenaux, dont le fonctionnement hydrologique varie suivant les débits), la présence de quelques îlots dans la partie médiane et une connexion aval mince (moins de 100 m) (Figures 180 et 181). Sur les trois chenaux amont, un seul est toujours en eau (Figure 186). La sédimentologie de ces chenaux montre du sable moyen à grossier aux deux premières connexions amont, du

sable grossier à galets sur les bancs de la partie médiane, et des dépôts relativement plus fins à la connexion aval (limon à sable moyen).

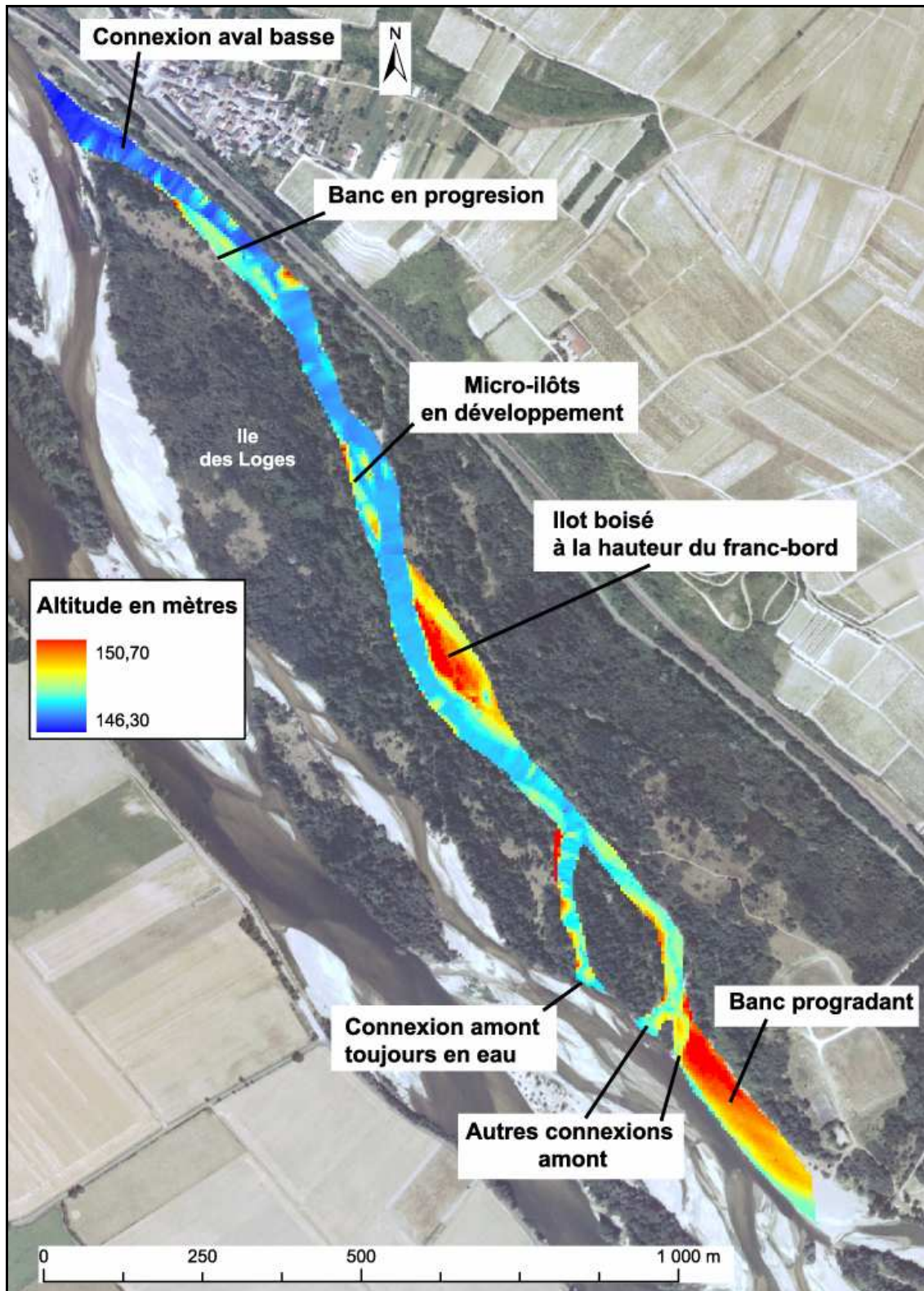


Figure 180 – Description géomorphologique de la modélisation du bras des Loges.

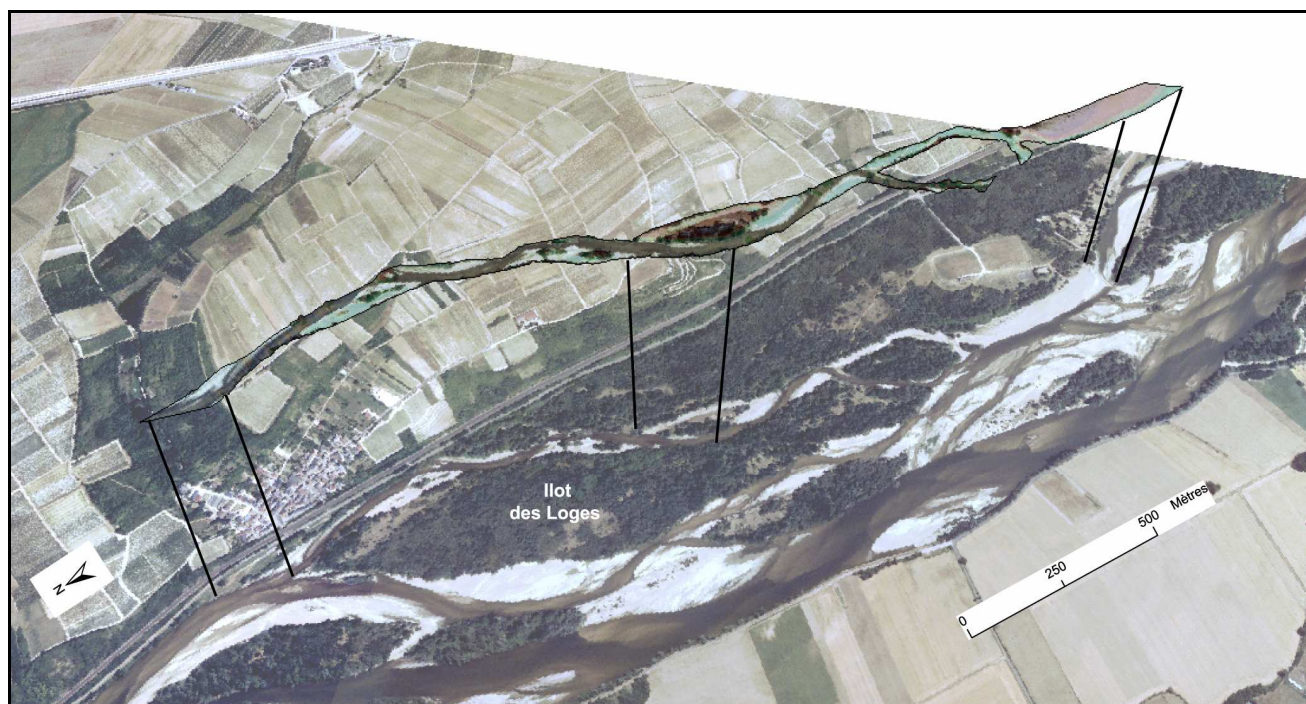


Figure 181 – Drapage de l'image aérienne sur le MNT du bras des Loges (à partir du LIDAR DIREN-Centre).

- Comme le montre le drapage de l'image aérienne sur le MNT, le bras des Barreaux possède une plus grande diversité géomorphologique (Figures 182 et 183).

Un chenal (moins de 50 m de large) se force un passage parmi les bancs latéraux végétalisés et les îlots de végétation qui se sont développés au sein du large bras secondaire (près de 200 m). On note qu'il existe un seuil de connexion élevé puisque la connexion amont se trouve très perchée (plus de 3 m) par rapport au chenal principal. On y retrouve dans la partie médiane une mouille assez profonde (près de 3 m de profondeur). Ce chenal débouche, au bout de plus de 2 km de cheminement et de divagation au sein du bras, sur une connexion aval basse (au niveau du chenal principal).

- Le drapage de l'image aérienne sur le MNT du bras du Lac illustre une homogénéité des micro-formes plus marquée que le bras des Barreaux (Figures 184 et 185). Si l'ensemble du bras, sur près de 2 km, a une largeur homogène (moins de 100 m), sa caractéristique principale réside en la présence d'une connexion amont très étroite (moins de 10 m de large). Entre cette étroite entrée et la connexion aval, le chenal présente une succession de bancs latéraux très peu végétalisés.

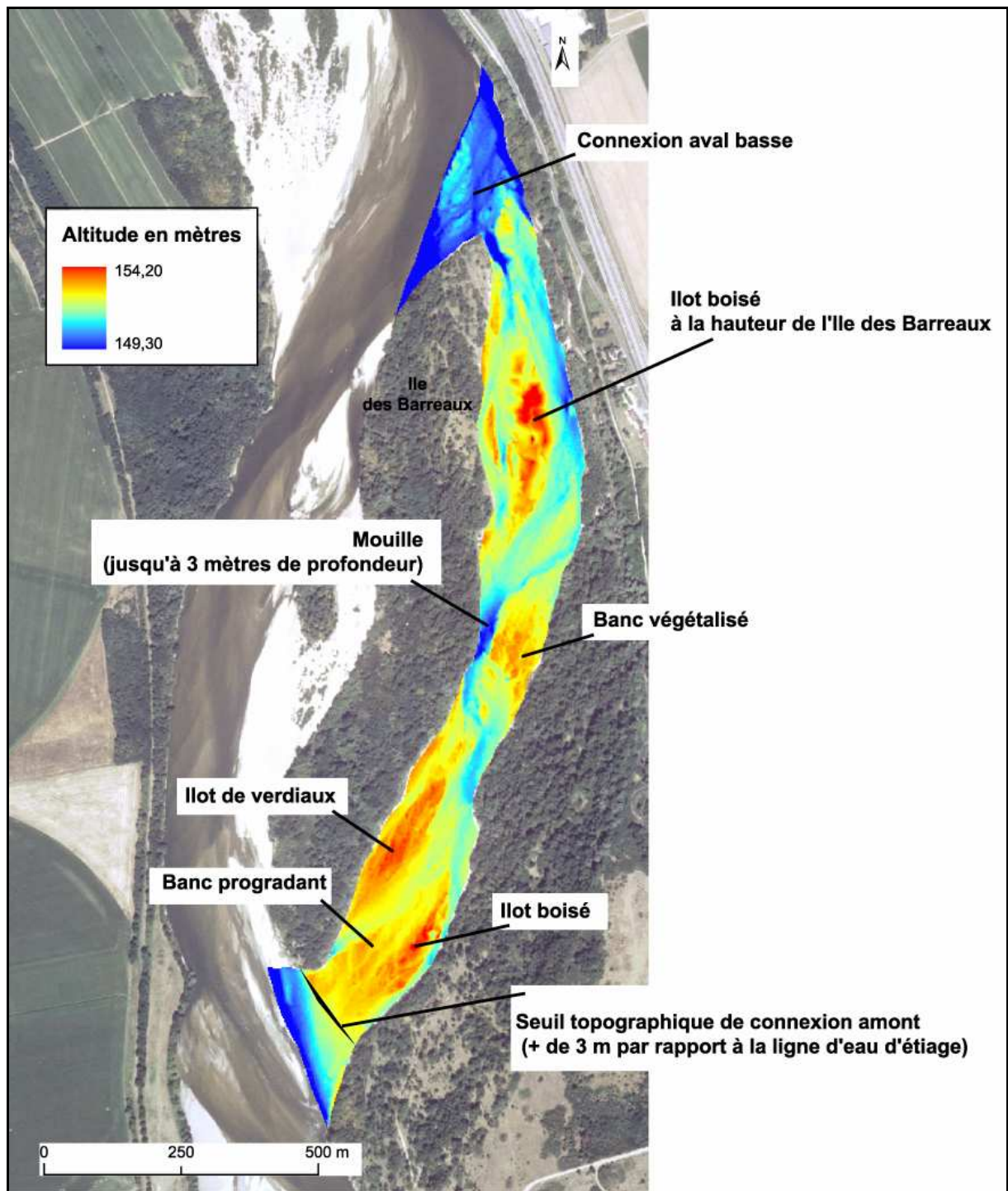


Figure 182 – Description géomorphologique de la modélisation du bras des Barreaux. Modélisation de la topographie à partir du LIDAR (DIREN-Centre).

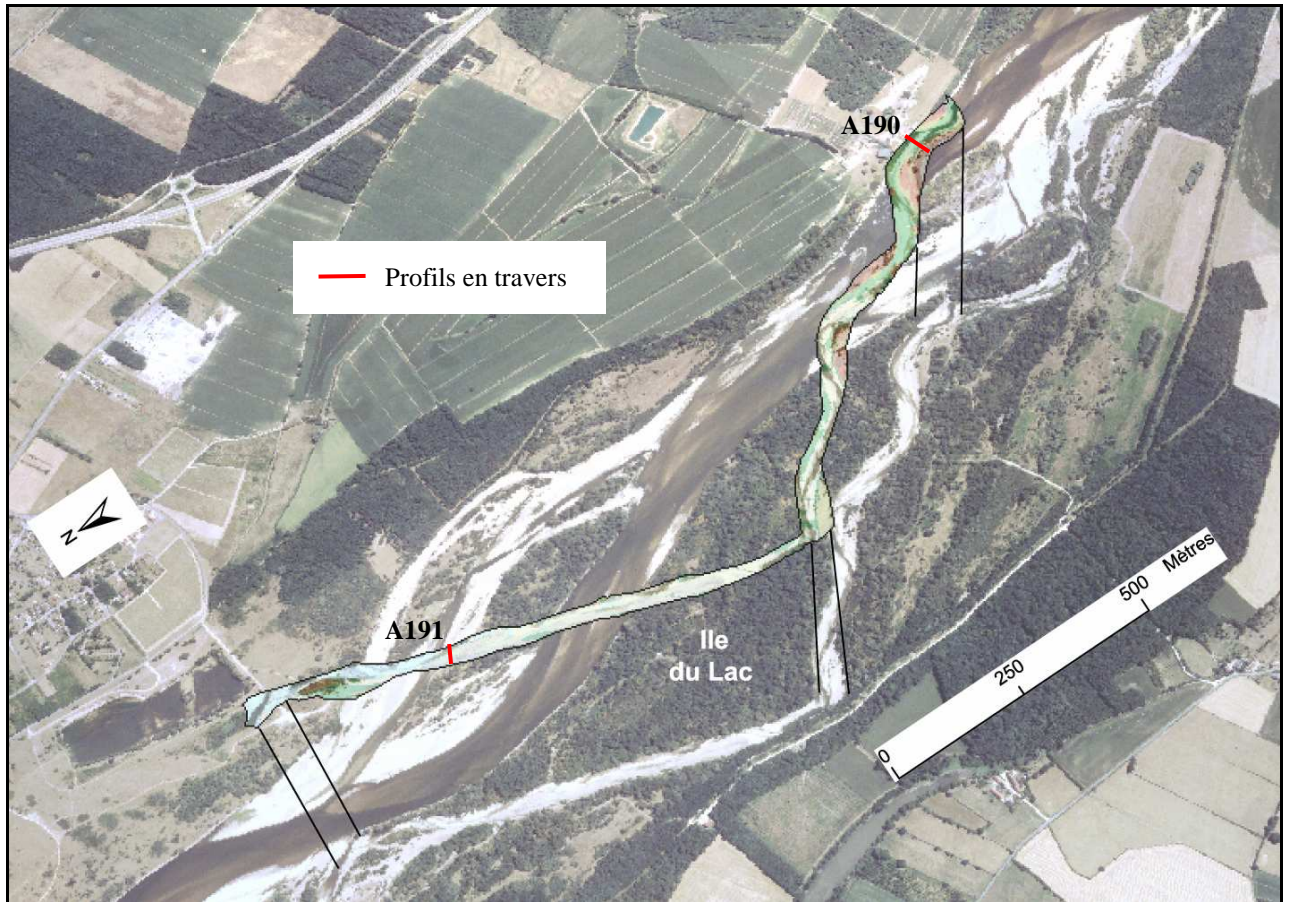


Figure 183 – Drapage de l’image aérienne sur le MNT du Lac (à partir du LIDAR DIREN-Centre). Localisation des profils en travers.

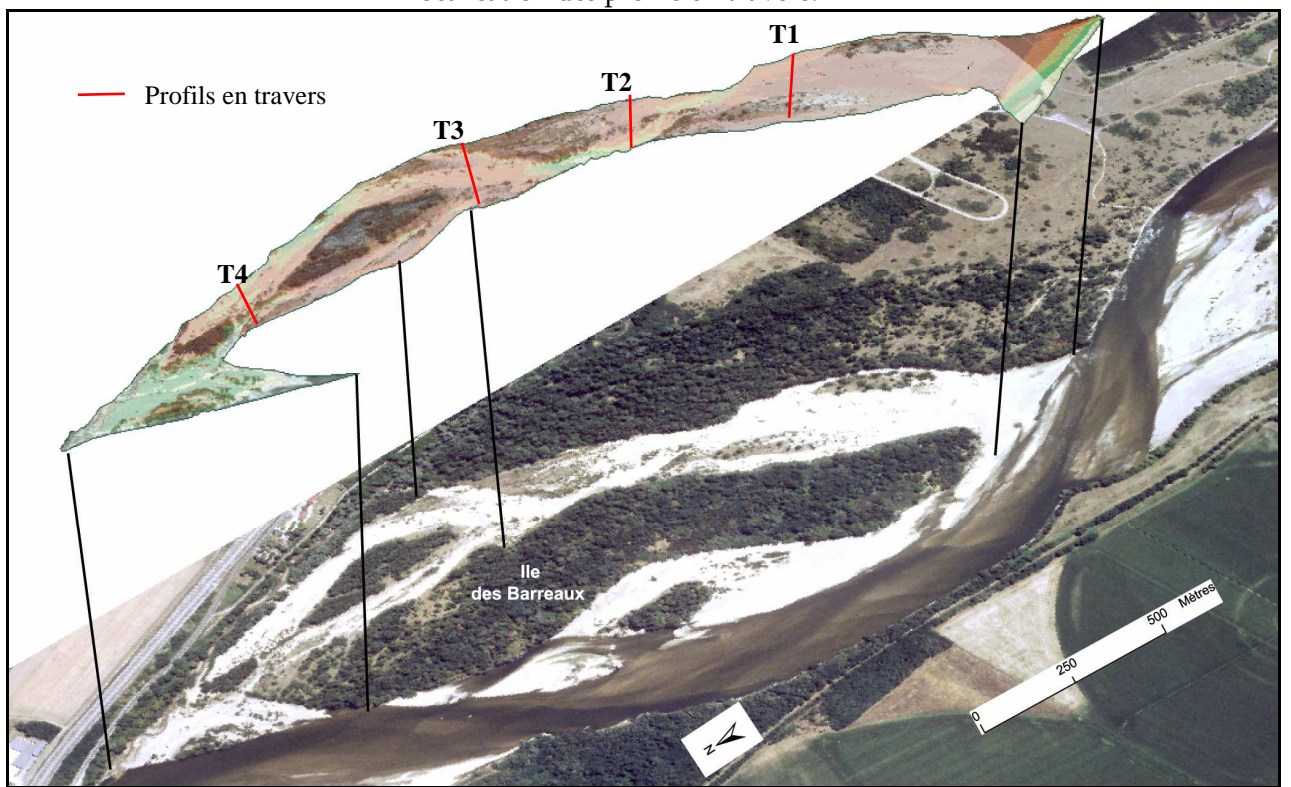


Figure 184 – Drapage de l’image aérienne sur le MNT du bras des Barreaux

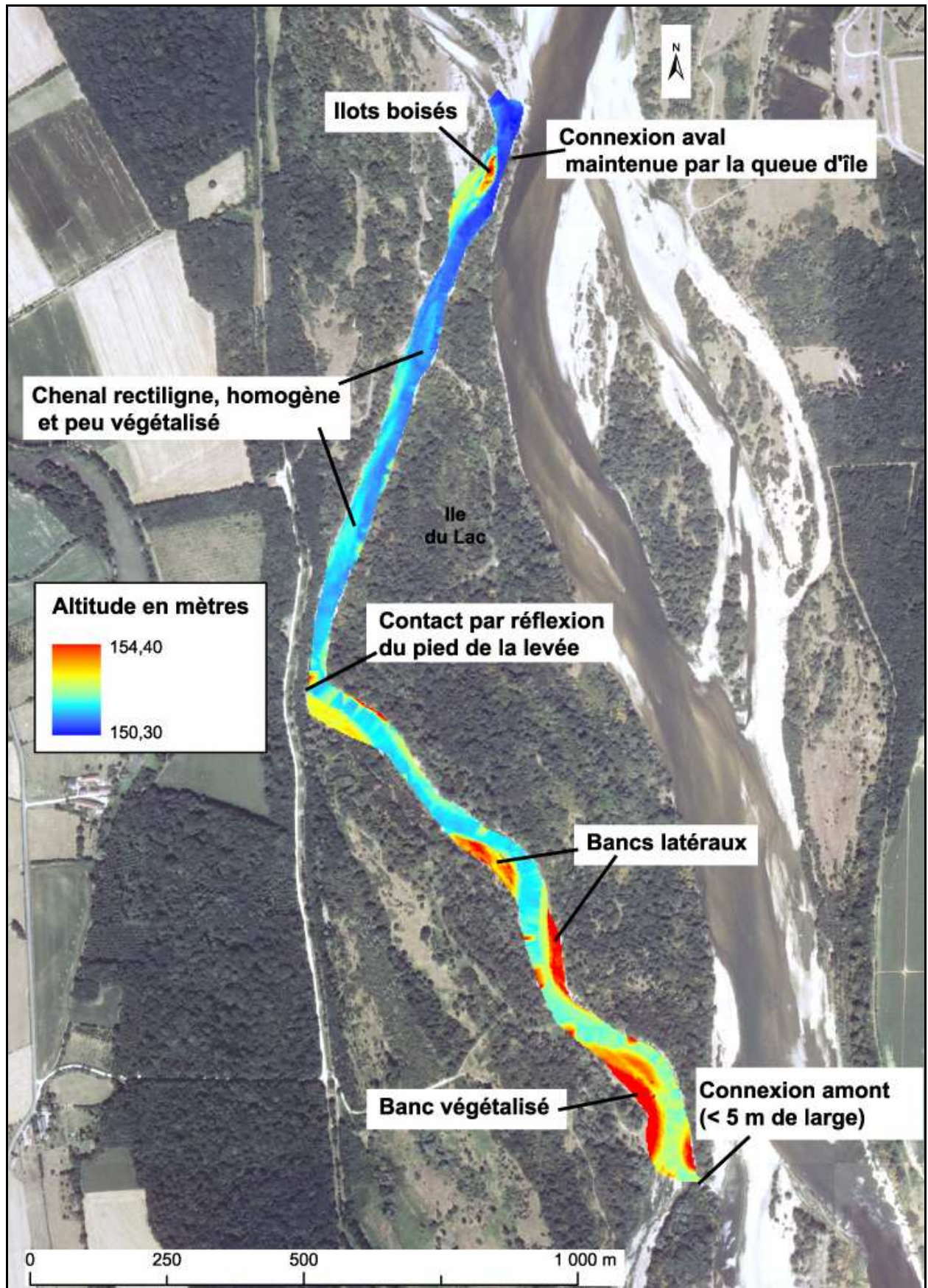


Figure 185 – Description géomorphologique de la modélisation du bras du Lac.
 Modélisation de la topographie à partir du LIDAR (DIREN-Centre).

Au regard de ces premières observations morphologiques et d'évolution, les bras secondaires présentent une variété de faciès sédimentaires et des conditions morphologiques diversifiées. Il convient donc d'analyser si cette diversité a une influence sur les conditions hydrologiques et sur les rythmes de sédimentation des bras secondaires.

2). Evaluation des rythmes de sédimentation et d'érosion dans les bras secondaires.

Les bras secondaires étudiés présentent dans un premier temps des fonctionnements hydrologiques variés : un bras toujours en eau, un bras exceptionnellement submergé et un dernier bras en activité lors des crues annuelles.

a). Une variété de fonctionnements hydrologiques

- Des bras continuellement en eau : exemple du bras des Loges

On note différents seuils de connexion hydrologique par l'amont en fonction des différentes entrées amont de ce bras (Figure 186). Une connexion principale est toujours réalisée dès $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; pour les autres bras la remise en eau se fait dès $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. L'ensemble des conditions hydrologiques depuis 2002 a permis le fonctionnement hydrologique du bras et de toutes les connexions amont et aval. On enregistre en effet, de 2002 à 2005, le bilan hydrologique suivant :

- plus de 1000 jours de fonctionnement hydrologique de la connexion aval,
- près de 240 jours d'activité hydrologique simultanée des trois connexions amont.

Les relevés de terrain ont permis la construction de MNT des connexions amont et aval. Entre 2002 et 2004, la topographie des connexions ne connaît pas de grandes modifications en alternant entre érosion et sédimentation. On note simplement l'exhaussement vertical (jusqu'à près de 1 m) et l'avancée de près de 50 m vers l'aval d'un banc progradant (sable grossier) à la première connexion amont (Figure 186). Des dépôts s'enregistrent à l'intérieur des deux petits bras amont.

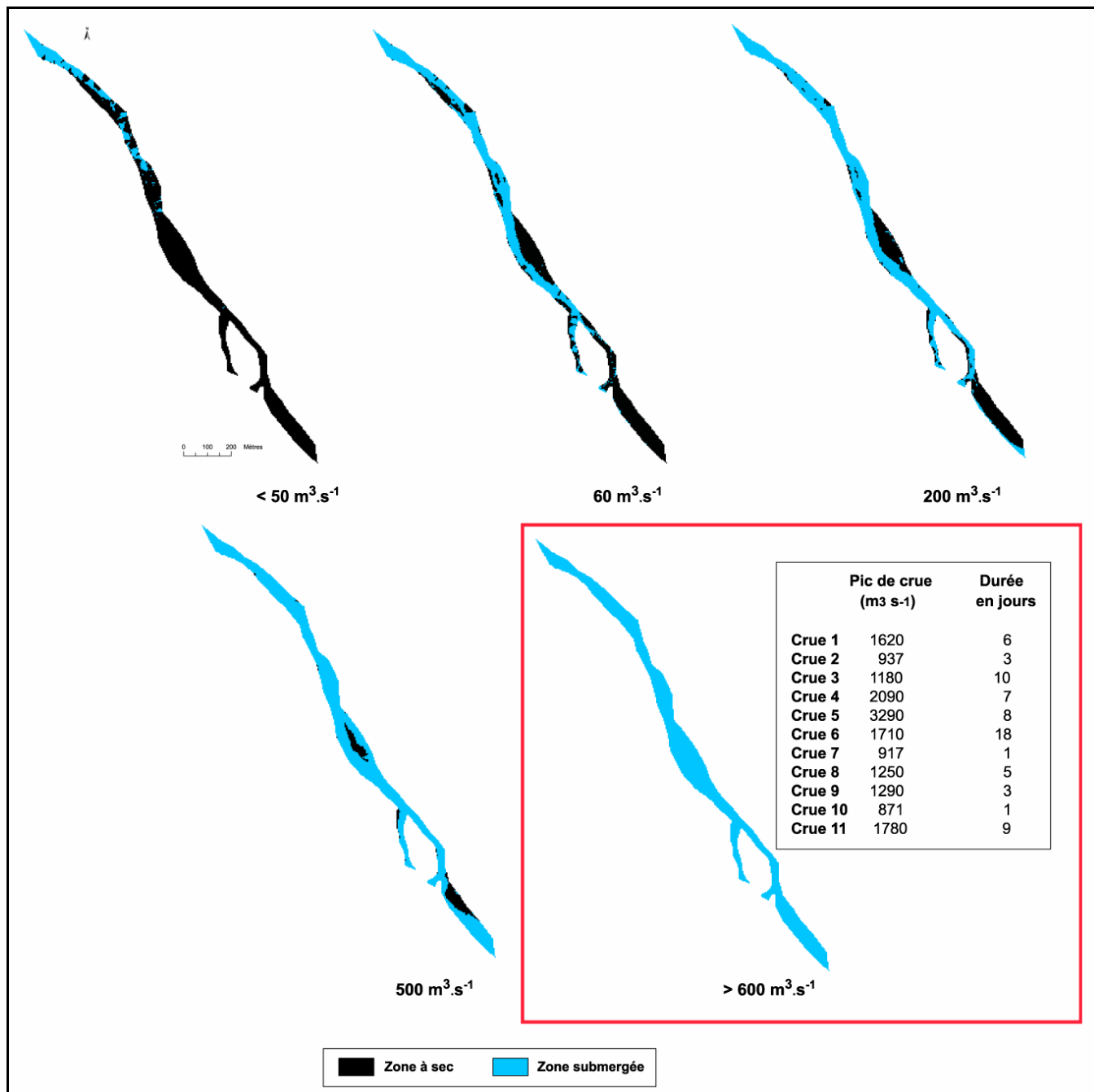


Figure 186 – Modélisation du fonctionnement hydrologique du bras des Loges en fonction de différents débits-clés.

- Des bras exceptionnellement en eau : exemple du bras des Barreaux

Le fonctionnement hydrologique du bras des Barreaux est bien différent (Figure 187). Il se trouve en effet que le bras, étant très perché par rapport à la bande active principale (plus de trois mètres), se connecte d'abord par l'aval. On note les caractéristiques hydrologiques suivantes entre 2002 et 2005 :

- 50 jours de fonctionnement hydrologique de la connexion amont

- 240 jours d'activité de la connexion aval
- près de 20 jours d'activité hydrologique de l'intégralité du bras des Barreaux

Ces premières données hydrologiques illustrent la complexité du fonctionnement de ce bras qui enregistre par conséquent un bilan sédimentaire tout aussi particulier. Aussi, seule l'analyse finale de notre approche à grande échelle peut déterminer le fonctionnement hydro-sédimentaire des bras secondaires de la Loire moyenne. Nous restons pour l'instant au stade de la description qualitative et quantitative des processus sédimentaires dans chaque bras suivi.

- Des bras en fonctionnement hydrologique intermédiaire : exemple du bras du Lac.

Ce bras se distingue également des deux bras précédents par son fonctionnement hydrologique. Si le bras des Loges fonctionne à l'année et le bras des Barreaux connaît un déséquilibre hydrologique entre l'amont et l'aval, le bras du Lac a un fonctionnement hydrologique régulier dans l'année : dès $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ le bras est en activité complète.

On note les caractéristiques hydrologiques suivantes entre 2002 et 2005 (Figure 188) :

- 166 jours de fonctionnement hydrologique de la connexion amont
- 568 jours d'activité de la connexion aval (le bras se connecte d'abord par l'aval)
- près de 160 jours d'activité hydrologique de l'intégralité du chenal

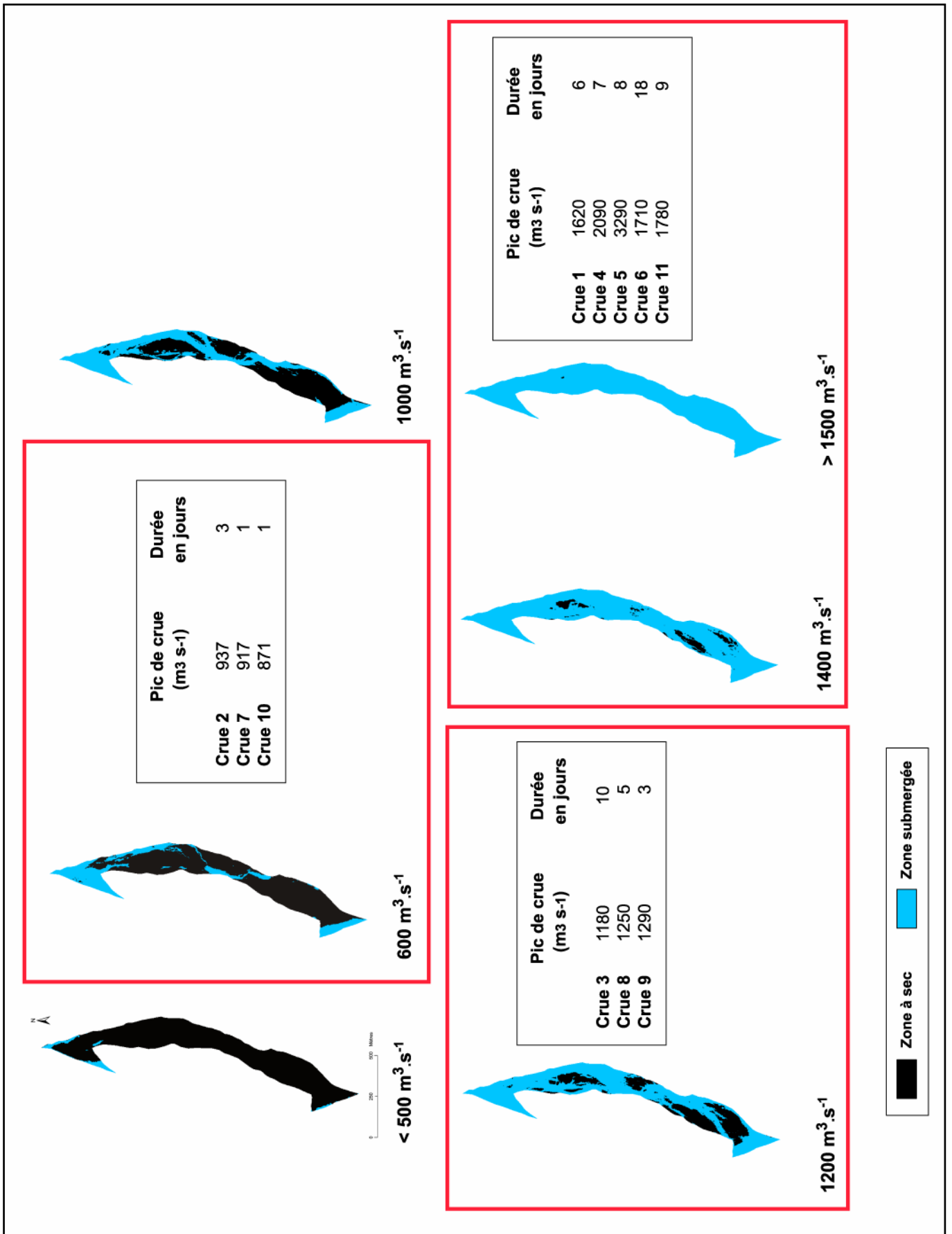


Figure 187 – Suivi hydrologique du bras des Barreaux.

On note que ce bras se connecte en premier lieu par l'aval (dès $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et finit par être submergé par l'amont dès $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

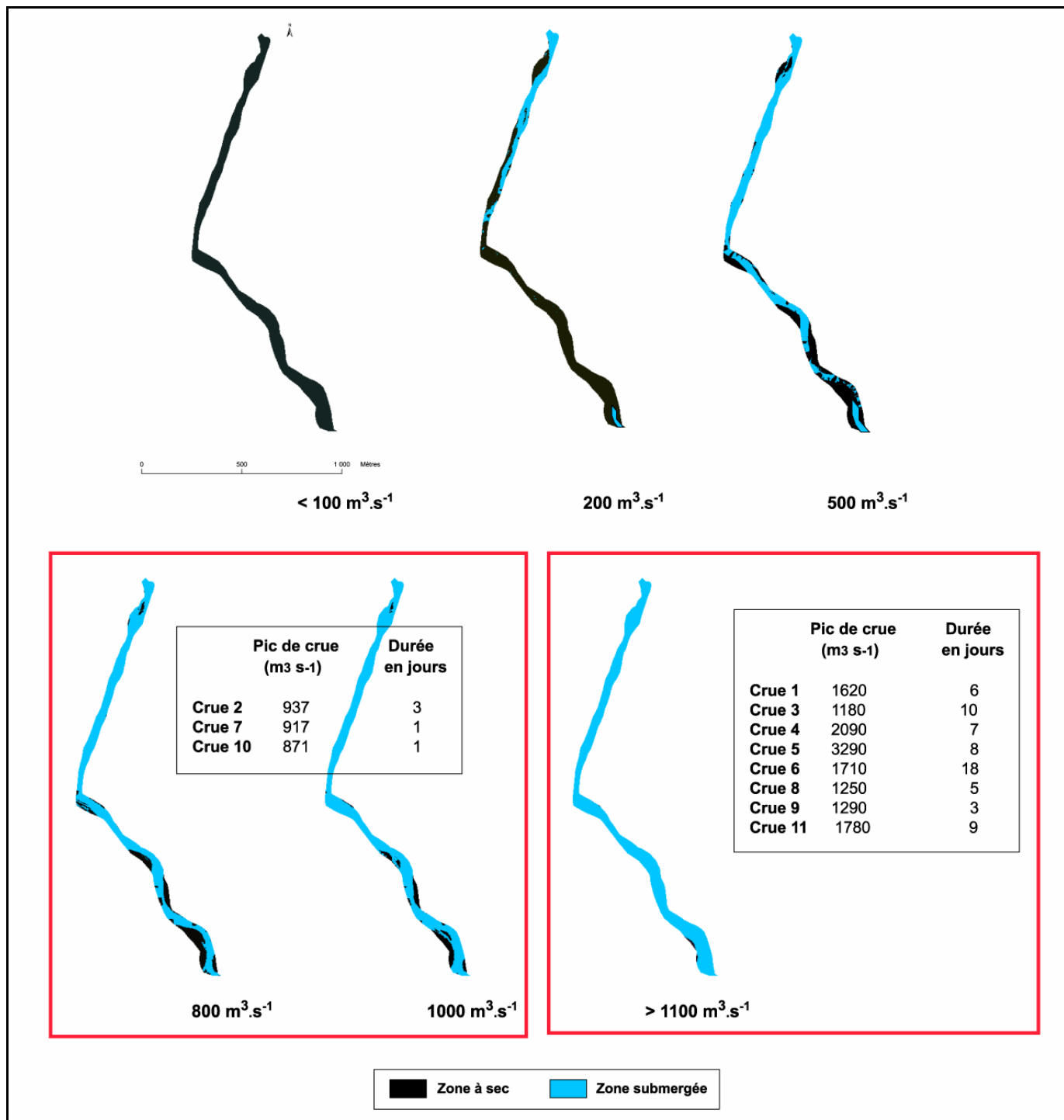


Figure 188 – Modélisation du fonctionnement hydrologique du bras du Lac en fonction de différents débits-clés.

On note que ce bras se connecte en premier lieu par l'aval (dès 100 m³.s⁻¹).

b). Des bilans sédimentaires contrastés

Les MNT permettent de dresser un bilan sédimentaire pour chaque connexion et pour chaque bras sur la période 2002-2005.

● Le bras des Loges enregistre les rythmes sédimentaires suivants (Figures 189, 190 et 191) :

- 2550 m³ de sédiments ont été déposés à l'amont du bras des Loges entre 2002 et 2004, alors que la connexion aval enregistre une érosion toute relative (- 570 m³).
- Les crues, entre 2002 et 2003, sont responsables de la majeure partie des dépôts. Les crues entre 2003 et 2004, tout particulièrement le passage des crues de décembre 2003 et janvier 2004, ont eu un rôle érosif très important (-230 m³ à l'amont et - 600 m³ à l'aval).
- Sur le bilan 2002-2005, le bras des Loges enregistre un contraste entre un amont qui sédimente (+2 550 m³) et un aval qui tend vers l'érosion (-570 m³)

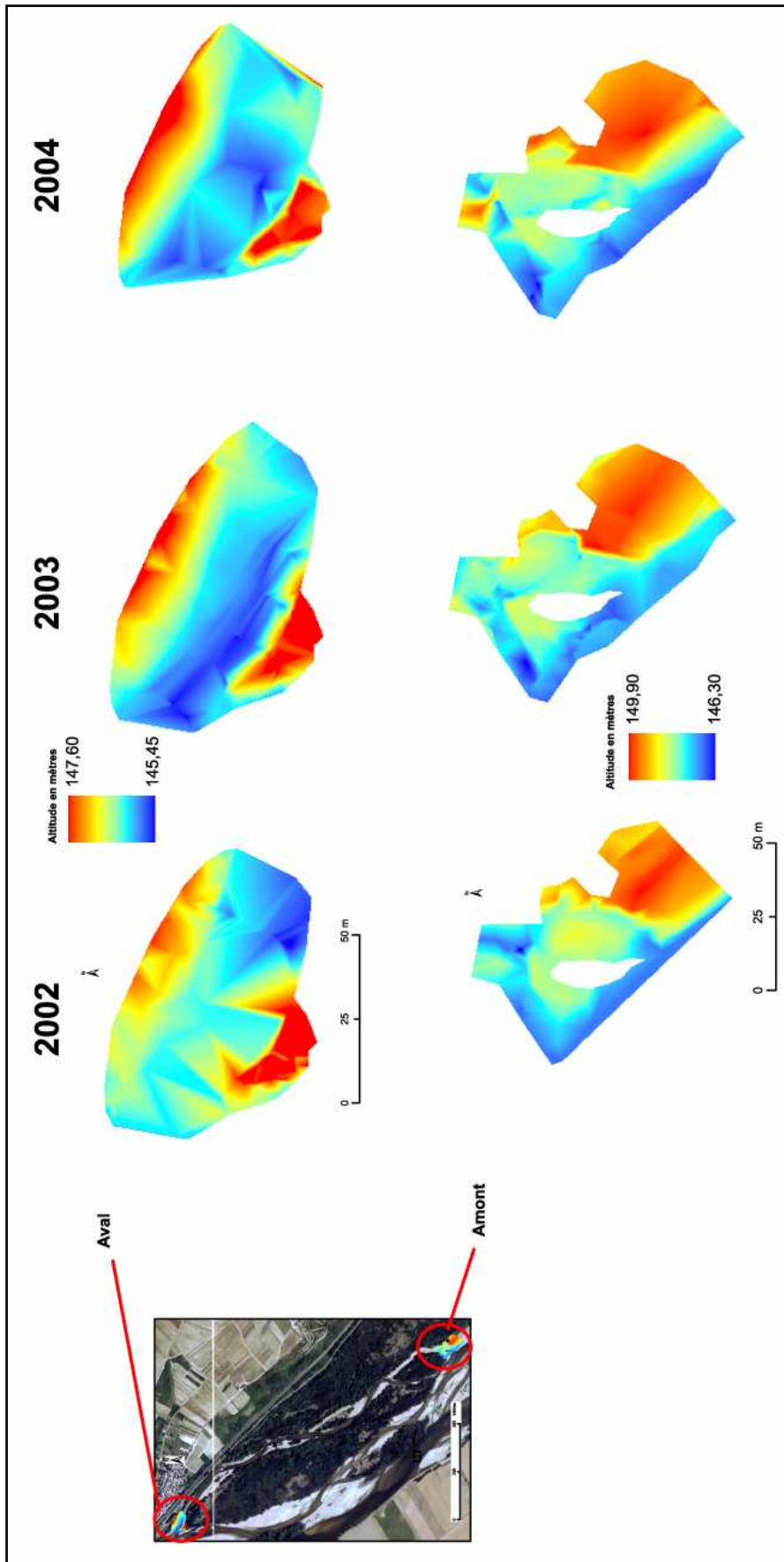


Figure 189 – Topographie mesurée à l’amont et l’aval du bras des Loges depuis 2002.

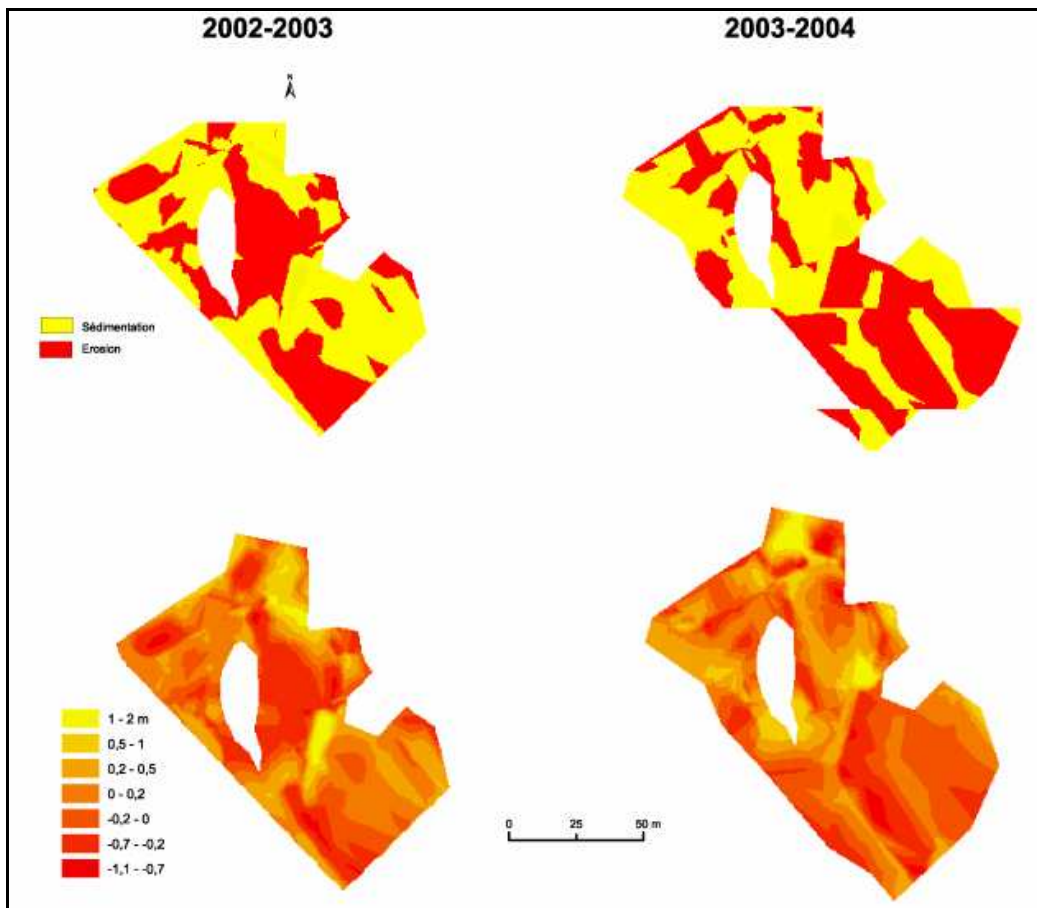


Figure 190 – Modélisation de la connexion amont du bras des Loges depuis les mesures topographiques réalisées au DGPS.

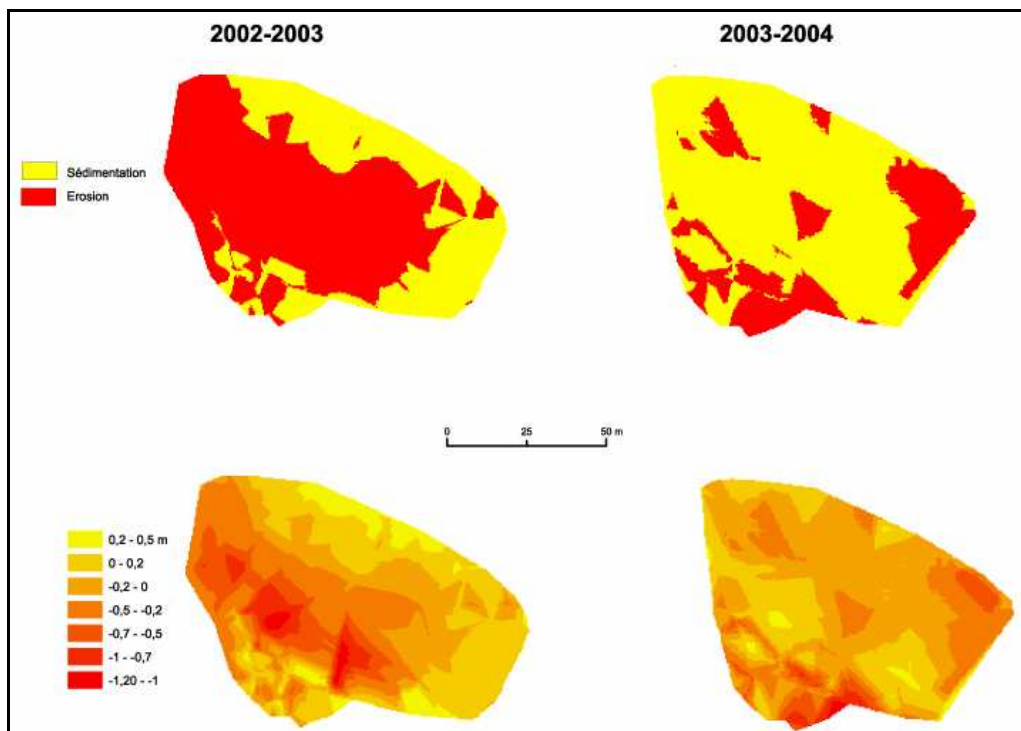


Figure 191 – Modélisation de la connexion aval du bras des Loges.

- Les MNT des Barreaux établissent le bilan sédimentaire suivant (Figures 192, 193 et 194) :
 - Entre 2002 et 2005, près de 17 000 m³ de sédiments ont été érodés à l'amont du bras des Barreaux et la connexion aval enregistre également une érosion de l'ordre de 16 900 m³. Ce bilan est par contre plus contrasté en fonction des années hydrologiques.
 - Entre 2002 et 2003, les périodes de submersion ont déposé 29 000 m³ de sédiments à l'amont et près de 800 à l'aval. A cette période de sédimentation correspond le comblement d'une mouille en connexion amont (plus de 1 m de dépôts) et l'extension du banc progradant amont (Figure 192).
 - Entre 2003 et 2004, le passage des crues de décembre 2003 et janvier 2004 établissent un net déséquilibre en déposant plus de 90 000 m³ de sédiments à l'amont et en retirant plus de 9 000 m³ à l'aval. Cette forte érosion à l'aval s'illustre par un aplanissement du banc progradant en amont (les sédiments déposés la saison hydrologique précédente ont été évacués vers l'aval au cours de cette saison 2003-2004).
 - Entre 2004 et 2005, l'érosion domine aussi bien à la connexion amont (plus de 110 000 m³ en moins) qu'à l'aval (près de 10 000 m³).

On note en définitive l'exhaussement de bancs végétalisés à l'aval du bras (plus de 1 m d'accrétion verticale), le creusement du talweg de la connexion aval et un aplanissement de la connexion amont. Ceci se traduit par le fort taux d'érosion enregistré sur la période 2002-2005 aux connexions du bras des Barreaux (-17 200 m³ à l'amont contre -16 930 m³ à l'aval).

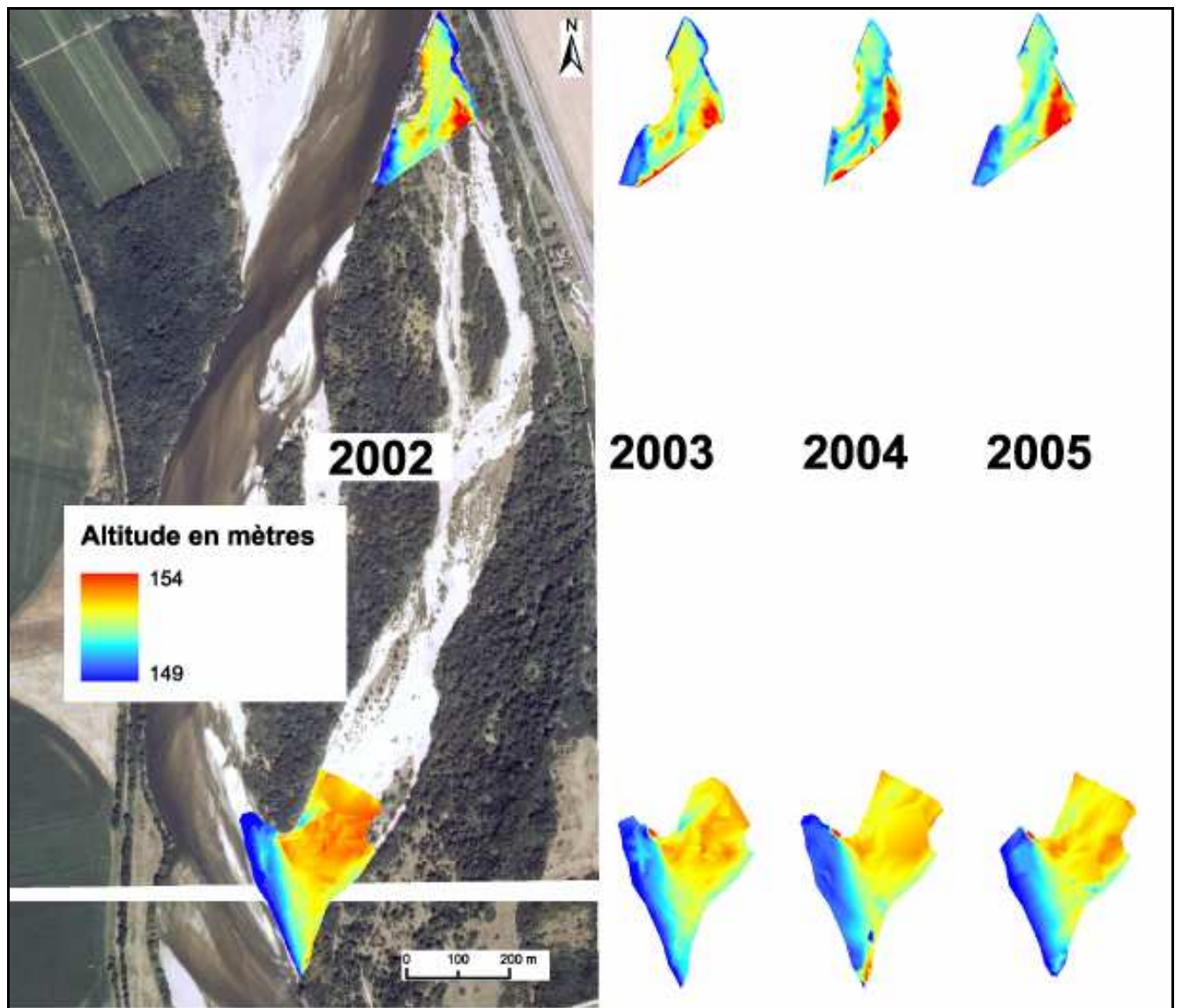


Figure 192 – Topographie mesurée à l’amont et l’aval du bras des Barreaux depuis 2002.

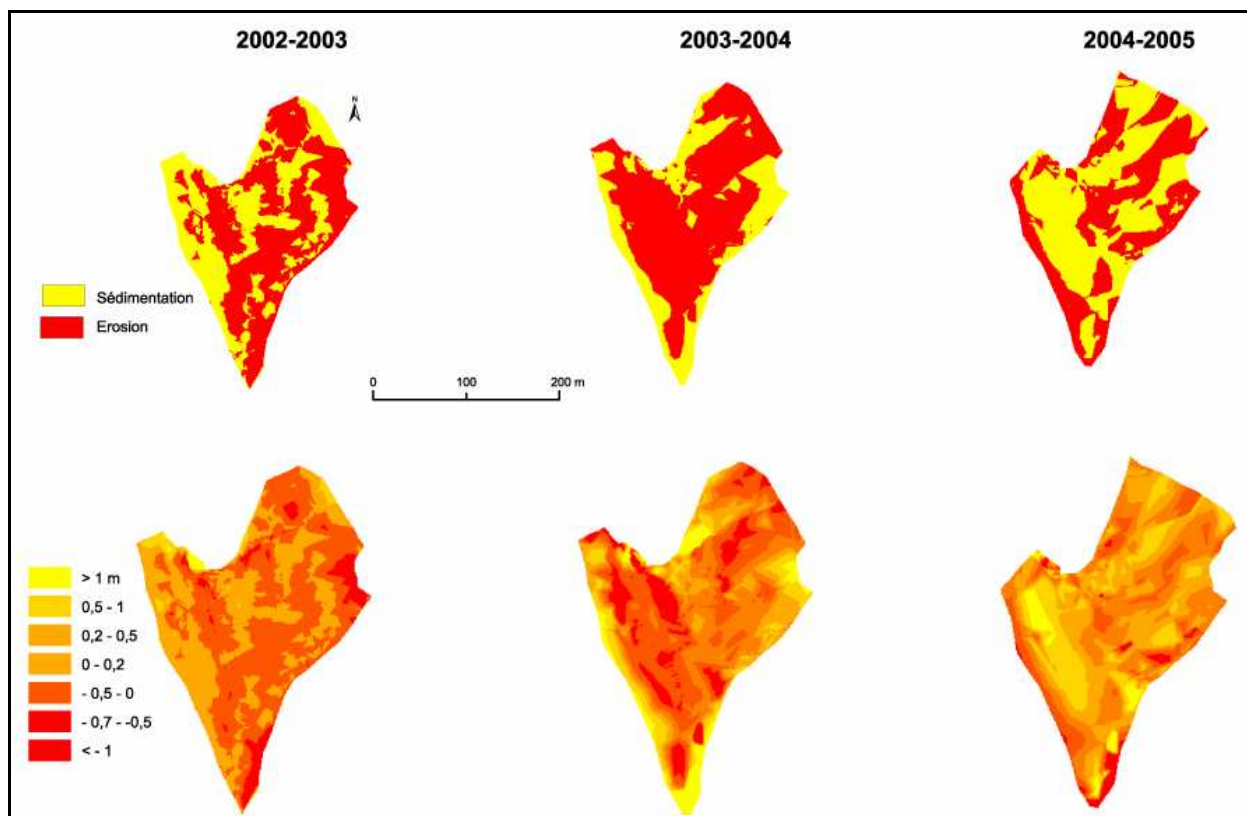


Figure 193 – Modélisation de la connexion amont du bras des Barreaux.

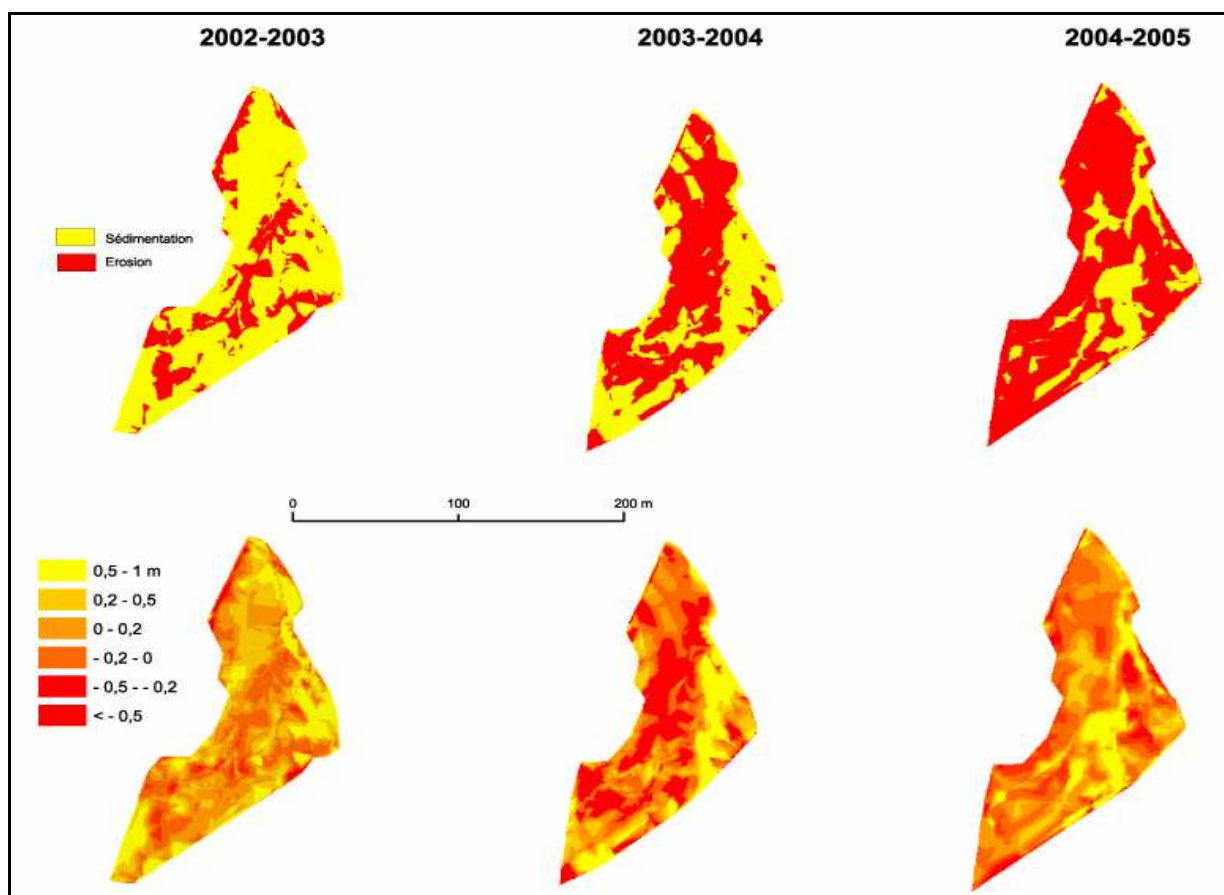


Figure 194 – Modélisation de la connexion aval du bras des Barreaux.

● L'analyse des MNT du Lac met en évidence le bilan sédimentaire suivant (Figures 195, 196, 197 et 198) :

- un déséquilibre fort existe entre l'amont et l'aval si on dresse le bilan total entre 2002 et 2005. Près de 13 500 m³ de sédiments ont été déposés à l'amont du bras du Lac alors que la connexion aval enregistre une érosion de l'ordre de 30 000 m³. Le bilan est très contrasté suivant les quelques saisons hydrologiques suivies.
- Entre 2002 et 2003, l'eau enlève plus de 15 000 m³ de sédiments à l'aval (l'amont n'avait pas pu être topographié en 2002).
- Entre 2003 et 2004, les passages des crues de décembre 2003 et janvier 2004 accentuent le déséquilibre. La connexion amont s'incise légèrement avec près de 1500 m³ de sédiments retirés. La connexion aval « recule » de plus de 100 m vers l'amont en raison d'une forte érosion de la queue de l'île du Lac, ce qui entraîne dans un premier temps un dépôt de sédiments de plus de 50 000 m³ à l'aval immédiat de cette connexion.
- Entre 2004 et 2005, l'érosion domine à nouveau à la connexion aval (plus de 30 000 m³). La connexion amont s'enrichit de près de 15 000 m³ de sédiments.
- L'aval subit une forte érosion à cause de la modification du tracé du chenal principal qui force son passage du côté de la rive gauche, en rognant au passage la queue de l'île du Lac et par la même occasion, la connexion aval du bras secondaire (Figure 195).
- La sédimentation enregistrée à la connexion amont profite essentiellement au banc latéral de l'île du Lac et au seuil topographique de l'étroite connexion (Figure 198). Le fond du chenal secondaire de cette connexion amont s'est incisé de près de 20 cm entre 2004 et 2005.
- En conclusion, sur l'ensemble 2002-2005, l'amont du Lac se caractérise par une forte sédimentation (+13 450 m³) tandis que l'aval tend largement vers l'érosion (-30 290 m³). Il s'agit d'ailleurs de la connexion aval la plus instable parmi les trois étudiées.

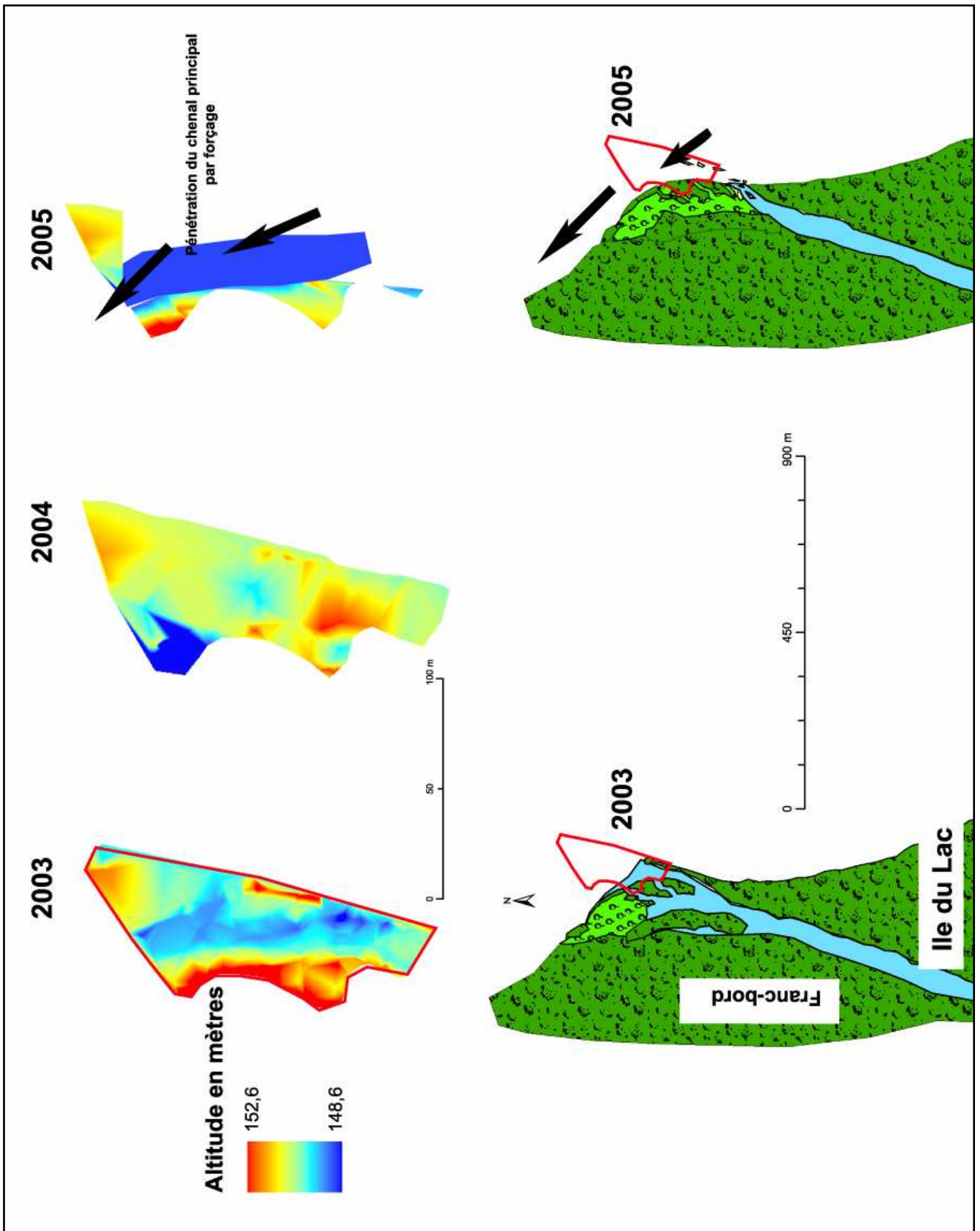


Figure 195 – Topographie mesurée à l’aval du bras du Lac depuis 2002.

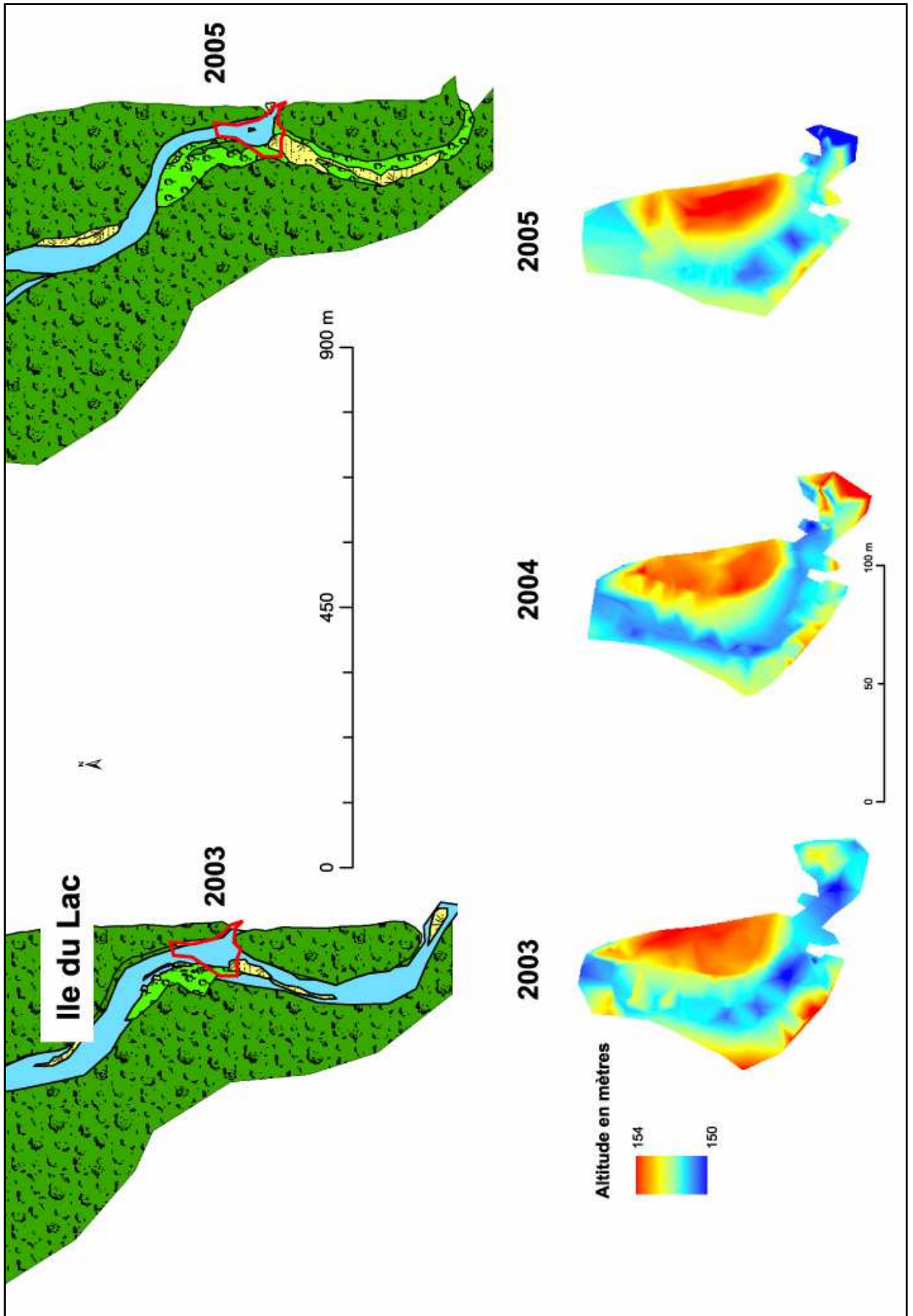


Figure 196 – Topographie mesurée à l’amont du bras du Lac depuis 2002.

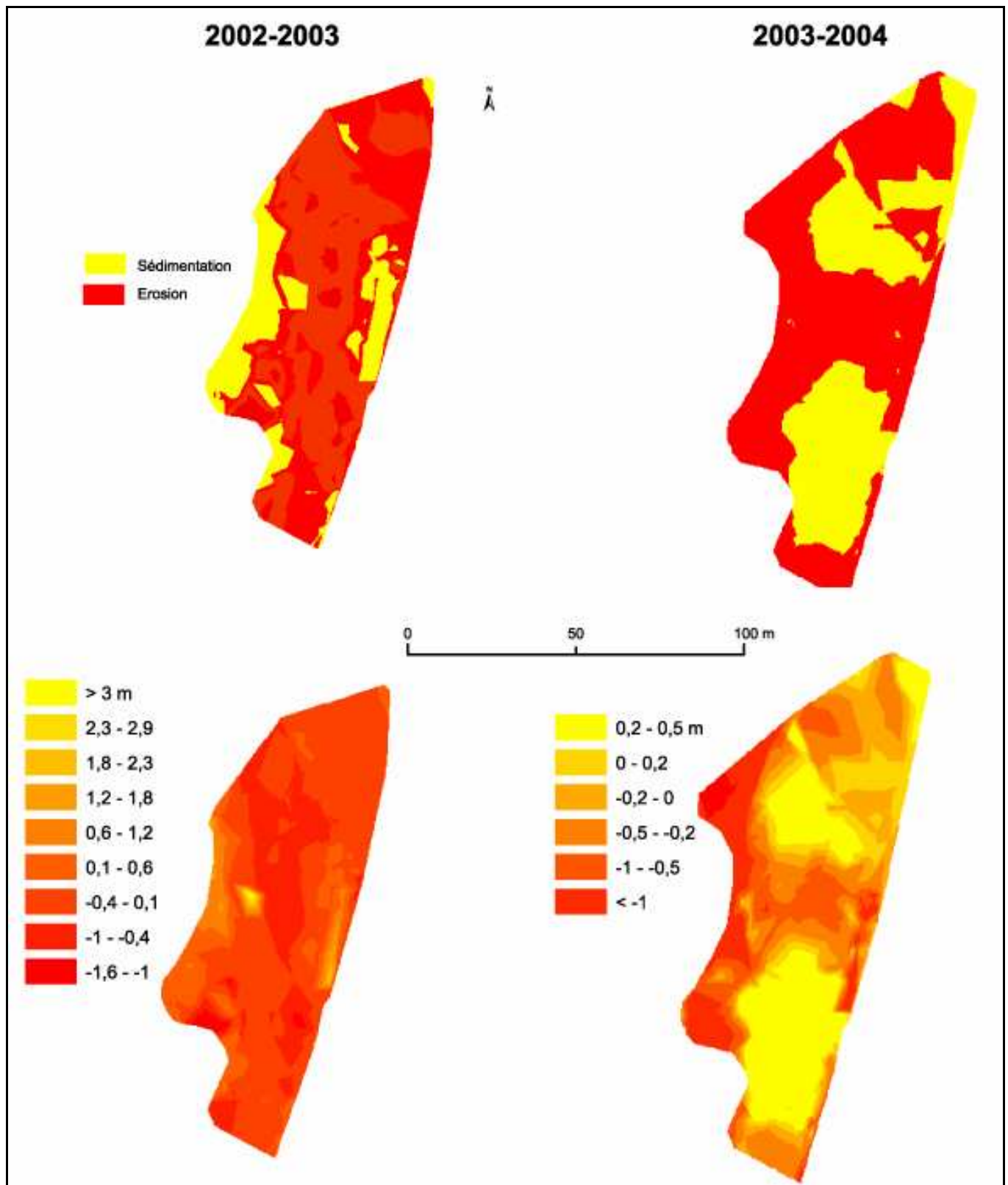


Figure 197 – Modélisation de la connexion aval du bras du Lac.

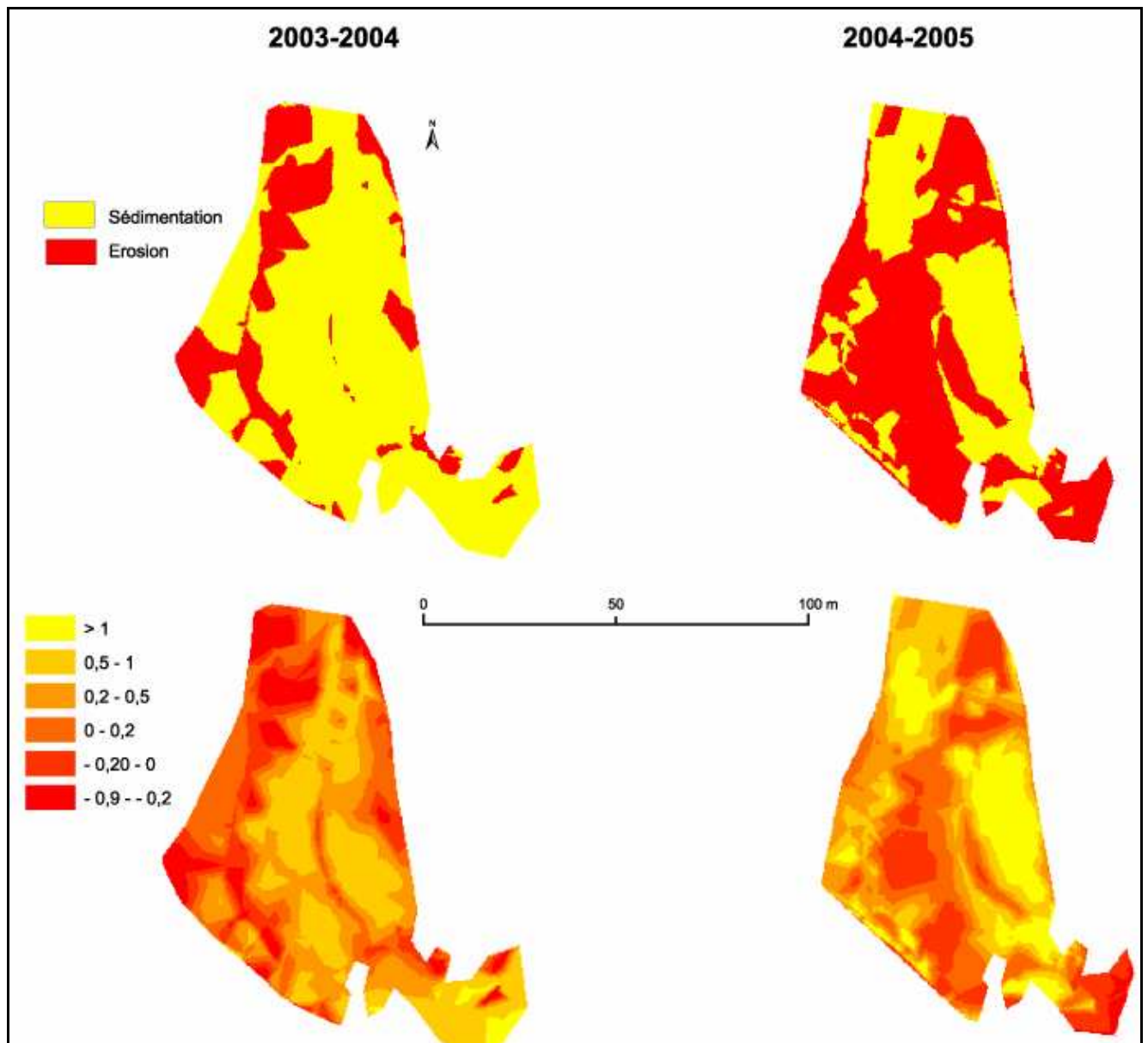


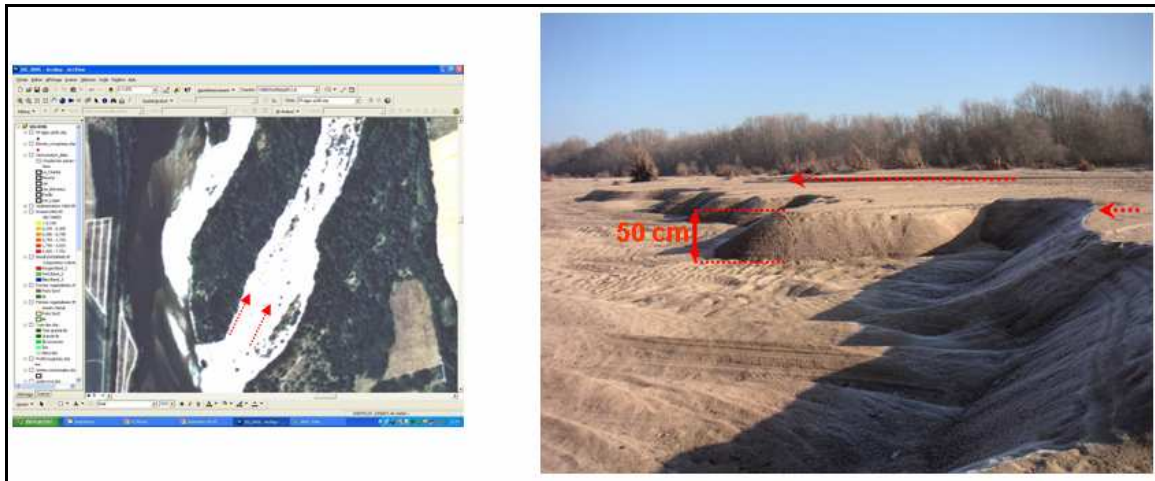
Figure 198 – Modélisation de la connexion amont du bras du Lac.

3). Le fonctionnement hydro-sédimentaire des bras secondaires

a). Les modèles sédimentaires post-submersion

Les bras secondaires de la Loire des îles ont été les zones de transit préférentiel de la charge solide durant les épisodes de submersion. La durée et la fréquence de submersion étant différente d'un bras à l'autre, ce transit s'est donc réalisé de manière discontinue dans le temps. La construction de nouvelles micro-formes au sein des divers bras secondaires a été relevée à de maintes reprises même sur les bras non suivis. Ces observations de terrain sont les signes de leur récente genèse : dunes, rides et même lissage

de certaines nappes sédimentaires (Tableau XIX). Les bras longeant de très grandes îles et assez perchés par rapport au bras principal (comme la connexion amont du bras des Barreaux) sont occupés par des dépôts sédimentaires et non fixés. Des événements hydrologiques exceptionnels, comme la crue de décembre 2003, ont notamment permis l'augmentation de l'épaisseur de ces nappes progradantes (Photographie 33). A noter que lors de la crue de janvier 2004, cette nappe s'est déplacée de plus de 20 m vers l'aval, signe que l'association d'une crue très forte avec une crue de moindre intensité, mais plus longue, accélère ces processus de développement sédimentaire dans les bras secondaires les plus longs; accélérant en l'espace d'un mois la sédimentation chronique des parties médianes et aval de ces longs bras secondaires. La sédimentation active au-delà du seuil de connexion amont de ces bras n'est donc pas enrayée.






Photographie 33 – Sédimentation active dans les bras secondaires les plus longs.



Photographie 34 – Curage d'un court et étroit bras (1^{ère} connexion amont du secteur des Loges).

Tableau XIX – Les grands modelés sédimentaires observés dans les bras secondaires après le passage de la crue de la crue de décembre.

Type de modelés sédimentaires	Photographies des modelés sédimentaires	Type géomorphologique
Rides ou ripples		- Fond de chenal
Dunes et lissage		- Nappe de sable progradante (Bras des Barreaux)
Vannage de galets		- Connexion amont du bras secondaire des Barreaux

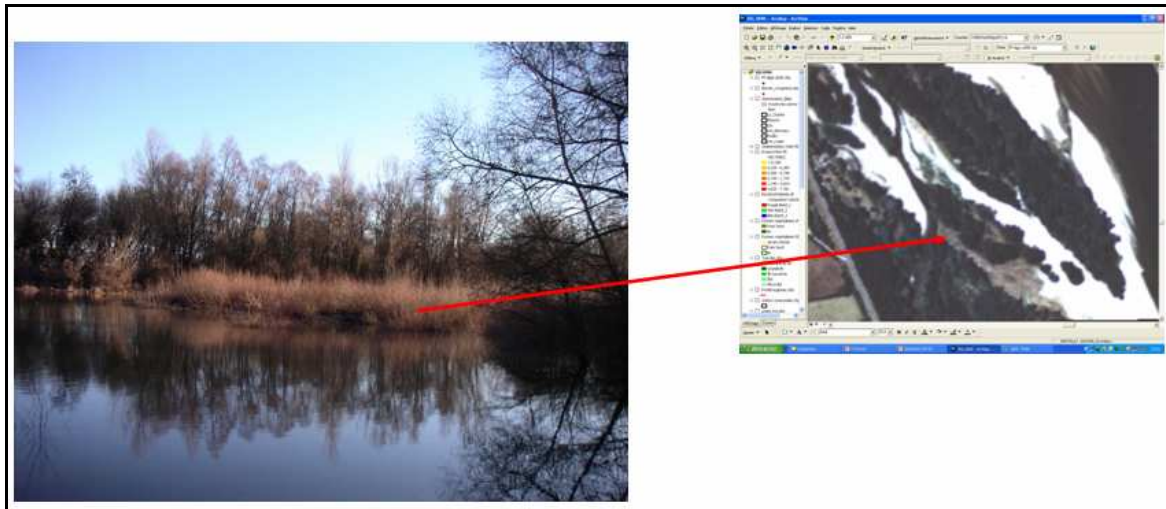


Photographie 35 – Elargissement de plus d'un mètre de large d'un bras secondaire (a) et dépôts d'embâcles sur les seuils topographiques des connexions des bras secondaires (b).

Les signes d'érosion ont été relevés et mesurés sur des bras secondaires très étroits et courts (moins de 150 m de long et environ 35 m de large). Ces modestes bras secondaires séparent le plus souvent deux pointes d'îles moyennes, ou alors un îlot et un franc-bord. Ils ont subi alors un curage naturel de leur plancher alluvial (20 à 50 cm, voire plus de 50 cm en amont de l'île du Lac à la petite connexion) (Photographie 34) et également un élargissement en moyenne de 5 m (par érosion des berges d'îles et des pointes d'îles) (Photographie 35).

Cela indique également que les bras secondaires les plus longs vont servir à la fois de zone de transit et de piégeage des sédiments alors que les bras secondaires les plus courts ne participent qu'au transit en subissant essentiellement des processus d'érosion. Le curage de certains petits bras secondaires reste très localisé au chenal de chute essentiellement (amont des Loges).

La forte sédimentation tout comme la végétalisation des bras secondaires restent de mise dans le Site Atelier 3. Les bras secondaires nous ont permis de relever un élément important : les crues, même les plus fortes, n'ont eu que des impacts modérés sur la végétation au sein des bras secondaires. L'érosion a été principalement efficace sur les berges d'îles et de francs-bords. Ces berges ont en effet été déstabilisées et ont subi de plein fouet l'érosion. Cette érosion a été extrêmement efficace sur les sites les plus sensibles comme le franc-bord de Mesves (Figure 174). Pour ce qui est des bras secondaires, les jeunes pousses de verdiaux, ceux là même qui piègent le plus les sédiments, sont restées ancrées à leur tapis sédimentaire (Photographie 36). Ces bras secondaires sont les unités fonctionnelles ayant subi le plus longtemps les effets des débits morphogènes. La végétation pionnière est restée et contribue pour une bonne part à la rétention des sédiments dans ces bras secondaires. Ainsi, dans certains bras secondaires, très colonisés par la végétation, on relève des épaisseurs de sédiments frais de près de 80 cm (Figure 199). La végétation basse et buissonnante des bras secondaires tout comme celle des micro-îlots et des francs-bords contribue largement au stockage sédimentaire.



Photographie 36 – Les jeunes pousses de saules et de peupliers n’ont pas été emportées lors du passage de la crue de décembre 2003. Ils vont donc pouvoir continuer à croître et entraîner par effet peigne la forte sédimentation de ces chenaux secondaires.

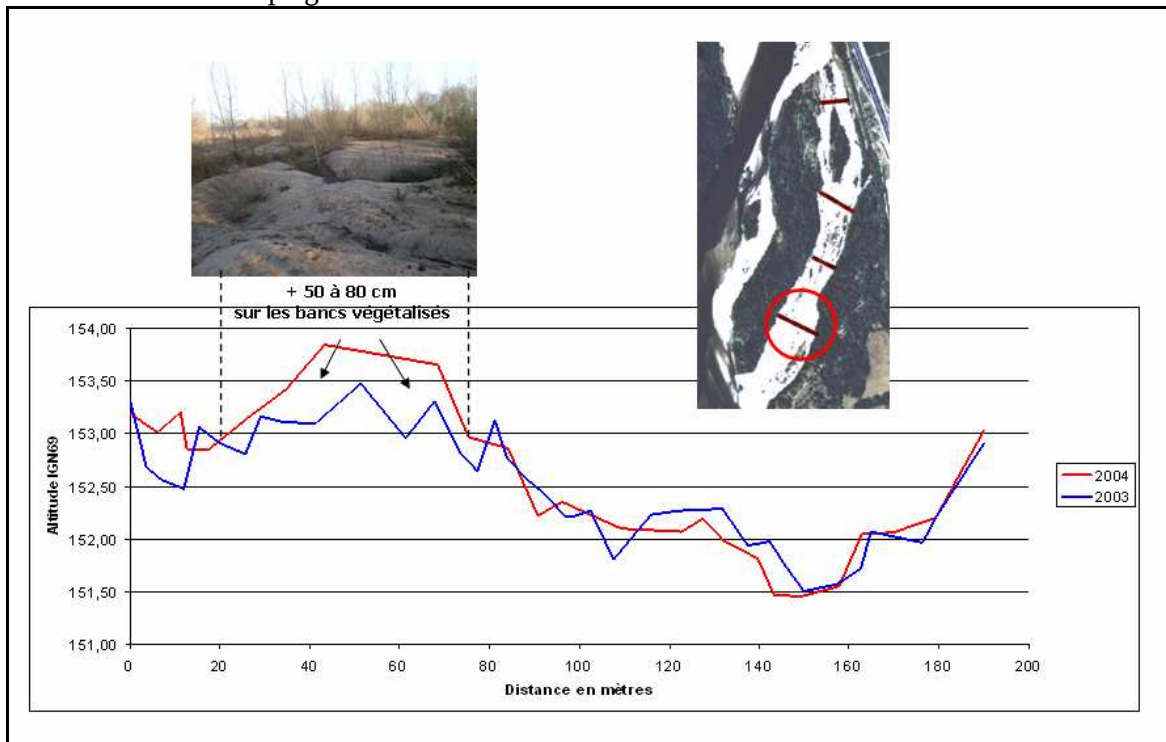


Figure 199 – Influence des bancs végétalisés au sein du bras secondaire du secteur des Barreaux : accentuation de la sédimentation active après le passage de la crue.

b). Un processus sédimentaire varié et complexe suivant les régimes hydrologiques

La synthèse du suivi hydro-sédimentaire des trois chenaux secondaires fait apparaître une diversité des dynamiques d'évolution et de fonctionnement des bras. La variété des épisodes hydrologiques de submersion des bras, les modifications enregistrées d'une année à l'autre aux connexions des bras et dans leur section médiane et les contrastes des

rythmes de sédimentation d'un même bras, et d'un bras à l'autre, rendent complexes la compréhension du fonctionnement de ce type de formes fluviales. Nous proposons la synthèse suivante comme réponse à nos interrogations de départ sur les chenaux des systèmes anastomosés.

- Au regard de la pente d'écoulement des trois bras suivis, nous notons une première différenciation (Figure 200). Le bras des Loges possède en 2002 une pente plus prononcée que les autres (0,12 % contre 0,08 et 0,09 % pour respectivement le bras du Lac et des Barreaux), ce qui explique notamment la régulière connexion hydrologique de ce bras, par l'aval, par rapport aux autres. La pente d'écoulement a été perturbée essentiellement pour le bras des Barreaux puisque l'on passe d'une pente de 0,09 % à 0,14 % (soit 35 % de taux de croissance entre 2002 et 2005). Cette pente plus forte correspond à l'érosion importante enregistrée aux connexions. Cependant, cette pente est perturbée par la sédimentation active à l'intérieur du bras : des mouilles se creusent (plus de 3 mètres) et des bancs s'exhaussent formant alors des barres et autant d'obstacles aux écoulements (1 m d'exhaussement à l'intérieur du bras).

Il est nécessaire pour le suivi du profil en long d'utiliser la méthode des profils transversaux tout au long du bras afin de bien marquer les ruptures et les déséquilibres.

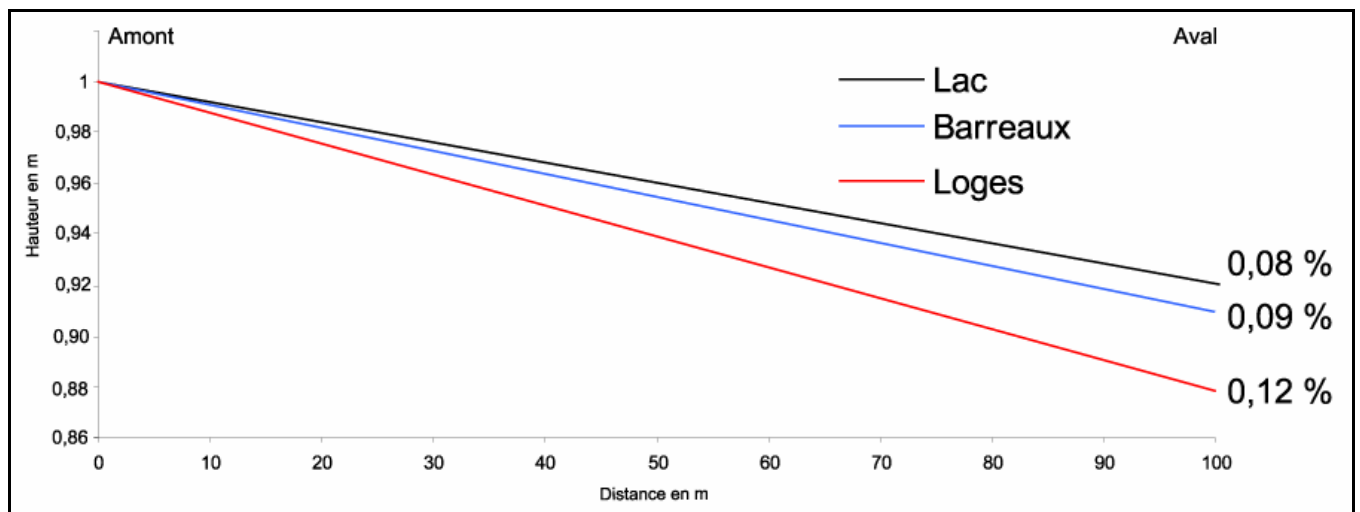


Figure 200 – Profil en long de chaque bras secondaire.

- Le suivi fin de trois grands secteurs du SA 3 nous a permis finalement de dresser une typologie significative de l'évolution des chenaux secondaires de la Loire des îles (Tableau

XX). Les connexions hydrologiques ne s'effectuent pas en même temps suivant la topographie des sites : à des bras toujours en eau (bras des Loges) s'opposent ceux exceptionnellement en activité (bras des Barreaux), en passant par des bras intermédiaires dont l'activité hydrologique permet de les maintenir face à une végétalisation imposante (Bras du Lac).

A ces différents niveaux de submersion et mise en connexion hydrologique correspond un bilan sédimentaire tout particulier. Les bras les plus souvent en eau font face à la forte végétalisation des bancs, contrairement aux bras comme celui des Barreaux qui enregistrent les plus forts taux de sédimentation et d'expansion végétale. La situation pourrait d'ailleurs être plus accélérée si ce bras ne bénéficiait pas de l'existence d'un seuil de connexion amont très perché. Ce dernier assure en effet dans une certaine mesure une protection contre les bouchons alluviaux qui pourraient alors se former en amont et générer un déséquilibre topographique entre l'amont et l'aval (conséquence sur le profil en long de ce chenal).

- Les bras moins souvent en eau (comme le bras des Barreaux) subissent de grandes modifications aux connexions et des taux de sédimentation très forts dans leur section médiane.

- Les chenaux le plus souvent en eau enregistrent des perturbations moindres et connaissent un certain équilibre des rythmes de sédimentation entre l'amont et l'aval (Bras des Loges).

- Les bras en position intermédiaire, comme le bras du Lac, enregistrent des contrastes importants entre connexion amont (sédimentation dominante) et aval (érosion privilégiée) et une faible évolution de la strate végétale de leur chenal.

- Si on s'intéresse aux durées de submersion de toutes les connexions suivies depuis 2002, on constate un contraste très fort entre les trois bras au niveau du rythme de sédimentation. Le rythme de sédimentation-érosion rapporté à la durée de submersion par jour permet d'établir les tendances dynamiques de chaque bras :

- Le bras des Loges connaît une situation équilibrée entre les deux connexions avec des rythmes d'évolution faibles (10,5 m³ et -0,5 m³). Cette faiblesse montre

également que le bras des Loges est une zone de transit ou de passage des sédiments. Seule la première connexion amont constitue une zone préférentielle de sédimentation. L'aval s'incise légèrement et accentue le transit vers le chenal principal.

- Le bras du Lac montre une différence marquée entre une connexion amont qui piège le sédiment (80 m^3 par jour de submersion) et une connexion aval qui s'érode (-50 m^3).

- Le bras des Barreaux s'illustre par un contraste marqué entre l'amont et l'aval, même si le bilan sédimentaire correspond à un relatif équilibre ($-17\,200 \text{ m}^3$ à l'amont contre $-16\,930 \text{ m}^3$ à l'aval). Ce bras enregistre un rythme d'érosion très fort de sa connexion amont (-340 m^3 par jour de submersion) alors que cette connexion ne s'est retrouvée entièrement submergée que 50 jours entre 2002 et 2005. Dans le bilan sédimentaire du bras, il apparaît que, entre l'été 2002 et janvier 2004, les épisodes hydrologiques les plus forts, et notamment la forte crue de décembre 2003 et celle plus longue de janvier 2004, ont déposé un grand volume de sédiments (au moins $90\,000 \text{ m}^3$) à la connexion amont des Barreaux. Ensuite, les crues suivantes se sont chargées de remanier ce stock sédimentaire frais en exerçant une érosion de la connexion amont (plus de $100\,000 \text{ m}^3$). Cet aspect montre bien le rôle de cette connexion. Si sa durée de submersion est faible par rapport aux autres bras étudiés, son rôle de stockage sédimentaire est fort et permet, par le biais de crues moyennes (moins de 1500 m^3) de redistribuer les stocks déposés par les crues plus fortes. Ces stocks transitent ensuite à l'intérieur du long bras parsemé de bancs latéraux végétalisés et de micro-îlots. Ces formes végétalisées jeunes piègent alors fortement les sédiments en transit depuis la connexion amont. Ces stocks ne transitent pas par la connexion aval puisqu'ils engraisent les bancs végétalisés et le bouchon alluvial formé à proximité de la connexion aval.

	2002-2003	2003-2004	2004-2005	Rythme par jour de submersion	Bilan 2002-2005																												
Loges																																	
Amont Loges	+ 2.780 m ³	- 230 m ³		10,5 m ³	2.550 m ³																												
Aval Loges	+ 30 m ³	- 600 m ³		-0,5 m ³	-570 m ³																												
Evolution pente	0,12 %	0,13 %	0,11 %																														
Barreaux																																	
Amont Barreaux	+ 2.900 m ³	+ 92.500 m ³	- 112.600 m ³	340 m ³	-17.200 m ³																												
Aval Barreaux	+ 770 m ³	- 9.100 m ³	- 8.600 m ³	70 m ³	-16.930 m ³																												
Evolution pente	0,09 %	0,13 %	0,14 %																														
Lac																																	
Amont Lac		- 1.350 m ³	+ 14.800 m ³	80 m ³	13.450 m ³																												
Aval Lac	- 15.290 m ³	+ 52.600 m ³	- 67.600 m ³	50 m ³	-30.290 m ³																												
Evolution pente	0,08 %	0,05 %	0,07 %																														
Durée de submersion des diverses connexions	<table border="1"> <caption>Nombre de jours de submersion par connexion</caption> <thead> <tr> <th>Année</th> <th>Loges Amont</th> <th>Loges Aval</th> <th>Barreaux Amont</th> <th>Barreaux Aval</th> <th>Lac Amont</th> <th>Lac Aval</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2002-2003</td> <td>388</td> <td>91</td> <td>14</td> <td>76</td> <td>162</td> <td>91</td> </tr> <tr> <td>2003-2004</td> <td>386</td> <td>76</td> <td>24</td> <td>48</td> <td>187</td> <td>88</td> </tr> <tr> <td>2004-2005</td> <td>366</td> <td>88</td> <td>9</td> <td>41</td> <td>226</td> <td>88</td> </tr> </tbody> </table>					Année	Loges Amont	Loges Aval	Barreaux Amont	Barreaux Aval	Lac Amont	Lac Aval	2002-2003	388	91	14	76	162	91	2003-2004	386	76	24	48	187	88	2004-2005	366	88	9	41	226	88
Année	Loges Amont	Loges Aval	Barreaux Amont	Barreaux Aval	Lac Amont	Lac Aval																											
2002-2003	388	91	14	76	162	91																											
2003-2004	386	76	24	48	187	88																											
2004-2005	366	88	9	41	226	88																											

Tableau XX – Bilan sédimentaire des secteurs fonctionnels suivis depuis 2002.

• Il semble donc que les bras secondaires, longs et étroits (moins de 100 m de large comme celui des Loges et du Lac), se maintiennent mieux que les bras secondaires larges (près de 200 mètres de large comme celui des Barreaux) exposés à la colonisation végétale, tout particulièrement dans les parties médianes. C'est dans ces bras que l'on enregistre en effet les plus forts taux de sédimentation et d'expansion végétale, alors que leur durée de submersion annuelle est inférieure aux autres bras. On peut donc en conclure que les bras longs et minces pouvant se retrouver en eau plus de 100 jours dans l'année bénéficient de conditions favorables pour durer, en opposition aux bras très végétalisés et peu submergés qui enregistrent les plus forts taux de sédimentation dans leur partie médiane.

A contrario les bras longs et larges, avec des sections médianes très végétalisées, connaissent des contrastes forts en dépit de durée de submersion plus courte.

Plusieurs points sont à nouveau à mettre en évidence à l'issue de cette approche à échelle fine. Le Site Atelier 3 de la Loire moyenne montre un fonctionnement et une évolution toute particulière à travers les îles et les bras secondaires.

- **Les épisodes hydrologiques, entre 2002 et 2005, sont très diversifiés.** Cette diversité permet de mieux analyser les rythmes de sédimentation des îles et des bras secondaires.
 - **Des crues annuelles** extrêmement courtes dans leur durée (moins de 4 jours au dessus du seuil de plein-bord) et intensité ($<950 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$): Il s'agit des crues 2 (décembre 2002), 7 (mai 2004) et 10 (février 2005).
 - **Une crue annuelle** (avec un pic de crue à $1180 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), lente et étalée dans le temps (10 jours). Il s'agit de la crue de janvier 2003 (crue 3).
 - **Des crues rapides** (6 jours en moyenne). Cela correspond aux crues 1 (novembre 2002), 4 (février 2003) et 11 (avril 2005). Ces crues sont de récurrence 2 ans (en moyenne $1600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).
 - **Une crue de récurrence 2 ans** (avec un pic de crue à $1710 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), lente et très étalée dans le temps (18 jours). Il s'agit de la crue de janvier 2004 (crue 6).

- **Une crue de récurrence 15-20 ans** (avec un pic de crue à $3290 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) assez rapide (8 jours). La crue 5 correspond au troisième événement hydrologique le plus important depuis 1907 (dernière grande crue du début du 20ème siècle).

• **L'équilibre des rythmes de sédimentation entre les différents types d'îles.**

- Les grandes et très grandes îles enregistrent les dépôts les plus forts par rapport à leur durée de submersion (6 cm par jour de submersion). Mais leur rythme de croissance verticale à l'année est plus lent que les îles plus exposées aux crues $< 3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (10 cm par an sur les berges pour les très grandes îles, soit 7 à 4 fois moins que les formes insulaires de surface inférieures : micro-îlots, îlots et îles moyennes).

- Les micro-îlots, les îlots et dans une moindre mesure les îles moyennes enregistrent les taux de sédimentation les plus forts par an (de 40 à 70 cm par an). Ceci s'explique par des durées de submersion plus longues, quelque soit l'intensité des crues. Cependant, rapporté à la durée de submersion, le rythme de sédimentation est 3 fois moins rapide que pour les très grandes îles.

Les rythmes de sédimentation des îles entre 2002 et 2005 peuvent être résumés ainsi :

<i>> 10 ha : Très grande île</i>	☞ 10 cm/an	☞ 3 cm/jour de submersion
<i>2 < x < 10 ha : Grande île</i>	☞ 22,3 cm/an	☞ 2,8 cm/jour de submersion
<i>0,5 < x < 2 ha : Île moyenne</i>	☞ 43 cm/an	☞ 2,2 cm/jour de submersion
<i>0,1 < x < 0,5 ha : Îlot</i>	☞ 66 cm/an	☞ 5,6 cm/jour de submersion
<i>< 0,1 ha : Micro-îlot</i>	☞ 71 cm/an	☞ 6 cm/jour de submersion

• **Les îles jeunes et les îles anciennes**

Elles ont constitué pendant les crues les unités de stockage sédimentaire les plus importantes. La sédimentation est en effet importante sur les berges d'îles avec des dépôts de 20 à 80 cm sur les îles les plus jeunes et donc les plus basses. En revanche, les dépôts sont moins épais et plus fins sur les îles plus anciennes.

• **Le développement croissant de la végétation pionnière dans les bras secondaires :**

multiplication des bancs à caractère insulaire et des micro-îlots, taux de sédimentation importants sur les bancs végétalisés (effet peigne très fort : jusqu'à 80 cm après submersion).

- **La diversité des bras secondaires : une complexité des rythmes d'évolution**

Les connexions rendent complexes les rythmes de sédimentation. Ce sont des zones à enjeux hydro-sédimentaires forts. Le déséquilibre entre la connexion amont et celle aval d'un même bras influe directement sur la pente d'écoulement.

- ☞ le site des Loges : équilibre entre amont et aval (mais forte sédimentation à l'amont) ;

- ☞ le site des Barreaux : un déséquilibre entre l'amont et l'aval, d'une année à l'autre. Les connexions alternent entre érosion et sédimentation. L'aval est plus bas mais connaît une forte végétalisation, alors que l'amont reste très perché et se végétalise beaucoup moins. Toute la partie médiane piège les sédiments qui perturbent la pente. **Le piégeage le plus actif s'effectue au sein même des bras.**

- ☞ Le site du Lac est plus équilibré avec une connexion aval qui s'incise fortement et une partie médiane peu végétalisée. La connexion amont sédimente plus rapidement.

- **Un constat principal est à souligner : les crues théoriquement morphogènes du type décembre 2003 n'inversent pas la tendance d'évolution actuelle du fleuve** au comblement des bras végétalisés. Bien au contraire elles constituent un phénomène hydrologique accélérateur, de premier ordre, du comblement des bras.

- ☞ Les secteurs en érosion comme les berges et queues d'îles (Ile du Lac), les berges de francs-bords (franc-bord de Mesves), les étroites connexions secondaires (amont de l'île du Lac ou court bras séparant deux îles) ou les mouilles de bras secondaires (1ere connexion du bras des Loges, ou bras coupant la queue de l'île du Lac) ont été érodés à un rythme plus fort que leur rythme annuel lors de la crue de décembre 2003.

- ☞ Les secteurs où le comblement est couplé à une végétation pionnière fortement implantée, enregistrent des taux de sédimentation très importants, supérieurs à leur rythme annuel : les parties médianes et aval des longs bras secondaires (bras des Barreaux, bras de la Pointe), les parties basses des grandes îles (queue essentiellement), les micro-îlots et les îlots.

☞ Notons enfin que l'association des crues, proches dans le temps, permet encore mieux d'apprécier le rôle de ces crues dites morphogènes. La crue de décembre 2003 et celle de janvier 2004 interviennent à un mois d'intervalle, en hiver, bien avant la période de développement de la végétation. Or, ce que la crue de décembre 2003 a déposé dans les bras secondaires, dans les parties non végétalisées a été systématiquement remanié par la crue de janvier 2004.

- Les bras suivis depuis 2002 offrent **une diversité de rythme d'évolution très complexe**. **L'adaptabilité des interventions** dans le lit de la Loire est de rigueur pour mettre en place une gestion cohérente avec les rythmes de sédimentation et d'érosion des bras. Trois sites de suivis ont déterminé trois évolutions différentes. Le systématisme des interventions doit être donc très adapté. Cet aspect renforce la nécessité d'une expertise complète et fine pour chaque bras secondaire avant d'entreprendre les travaux de restauration adéquats. Cependant, il apparaît que la longueur de submersion est un facteur limitant la végétalisation et le comblement des bras secondaires. Les connexions aval jouent sur ce point précis un rôle essentiel.

TROISIEME PARTIE

LES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX ET LES PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Chapitre 6 - Plus de deux siècles de changements environnementaux

- A. Rôle et abandon de la navigation depuis le 18ème siècle
- B. Rôle et déclin des activités agro-pastorales depuis la fin du 19ème siècle
- C. Les changements contemporains : les grandes modifications du 20ème siècle. Du statut de délaissé à celui de convoité

Chapitre 7 - Nouvelles gestion du lit et perspectives scientifiques

- A. Perspectives de gestion en Loire moyenne
- B. Perspectives de recherche fondamentale

Chapitre 6 - Plus de deux siècles de changements environnementaux

Après avoir mis en avant le fonctionnement hydro-géomorphologique de la Loire des îles, comme un exemple représentatif d'un hydrosystème anastomosé tempéré, et après avoir montré la part des facteurs naturels, nous présentons à présent un aspect essentiel de notre thèse : le rôle des facteurs humains dans l'évolution passée et actuelle du fleuve. La Loire des îles actuelle résulte en partie de la modification des facteurs socio-économiques intervenus dès le 19^{ème} siècle. C'est ce que la ZAL détermine d'ailleurs comme correspondant à un anthroposystème fluvial.

Nous hiérarchisons donc trois formes de modifications majeures, dans une logique chronologique et objective : le rôle et l'abandon de la navigation dans un premier temps, les changements agro-pastoraux dans un second temps et enfin les facteurs anthropiques contemporains.

A Rôle et abandon de la navigation depuis le 18^{ème} siècle

Si la Loire n'est plus le remarquable fleuve navigable d'antan, il serait dommage de ne pas développer le fonctionnement même de cette navigation ligérienne qui à nos yeux explique beaucoup la formation et l'évolution même de la Loire des îles.

Notre approche géographique s'est donc attachée en premier lieu à caractériser la fonction de la navigation en Loire moyenne, puis à cerner la responsabilité des travaux d'entretien et de leur arrêt dans l'évolution du fleuve, et enfin à démontrer les impacts actuels d'anciens ouvrages de navigation rendus obsolètes par le déclin de cette activité historique majeure.

1). La navigation en Loire moyenne : un entretien permanent

a). La navigation en Loire moyenne

La Loire fut bel et bien le grand fleuve royal dont on vante les mérites aujourd'hui. Ce savoir-faire fluvial réalisé sur la Loire sera d'ailleurs exporté dans les nouvelles colonies européennes (Saint-Laurent pour le Québec, Mississippi et Hudson pour les Etats-Unis).

La Loire a servi de modèle d'aménagements du territoire et de valorisation économique pour ces grands fleuves, aujourd'hui encore axes fluviaux économiques majeurs ; ce que la Loire a finalement perdu au profit du Rhône.

Au regard de la diversité des marchandises échangées dans son bassin versant, de son ouverture océanique vers les colonies européennes (Antilles, Québec) et de l'immensité de l'hinterland (arrière-pays de la façade atlantique), la Loire fut un axe vital pour l'économie française des 18^{ème} et 19^{ème} siècles, âge d'or de la navigation ligérienne (Figure 201). La Loire était le meilleur vecteur de transit, par exemple de marchandises des hauts-bassins, comme le bois et le charbon, vers le reste du pays et tout particulièrement vers Nantes, un des plus grands ports fluvio-maritimes. Nantes fut d'ailleurs une zone majeure d'échanges des grandes marchandises du Moyen-Âge (blé, vins, sel) et représenta une des plus grandes places du commerce négrier de l'Europe (trafic triangulaire). En bref, la Loire fut un fleuve hautement stratégique autant pour ses enjeux économiques que politiques.

La maîtrise du territoire français et de son unification nationale reposait, au cours de la Renaissance, sur le contrôle des axes de communication. La Loire en était un des plus importants et devenait ainsi un objet stratégique nécessaire, d'où la nécessité de le contrôler et de le valoriser. La « panoplie » d'aménagements que connaissent alors la Loire et son bassin versant symbolise cette volonté ancestrale de contrôler et gérer un bien national de grande valeur stratégique. La Loire moyenne constituait alors une zone très importante d'échanges et donc de contrôle du fleuve. Le nombre de ports en amont de la Loire moyenne et en son sein montre cette importance (Figure 202).

A cette importance des échanges commerciaux et de la position stratégique nationale du fleuve, répond un nombre important de formes d'aménagements fluviaux. Ces divers aménagements fluviaux reflètent ainsi le niveau d'intérêt porté au fleuve pour le rendre navigable et économiquement viable. Digue submersibles (chevrettes), digues insubmersibles (levées), protections des berges (enrochements et perrés), ports fluviaux, quais de déchargements jalonnent le cours de la Loire moyenne comme dans notre Site Atelier 3 dont nous trouvons encore leur présence (Figure 203).



Figure 201 – Diversité des marchandises échangées par le biais du bassin versant de la Loire (l’hinterland fluvial du 18^{ème} siècle). (Source : Musée de Châteauneuf-sur-loire).

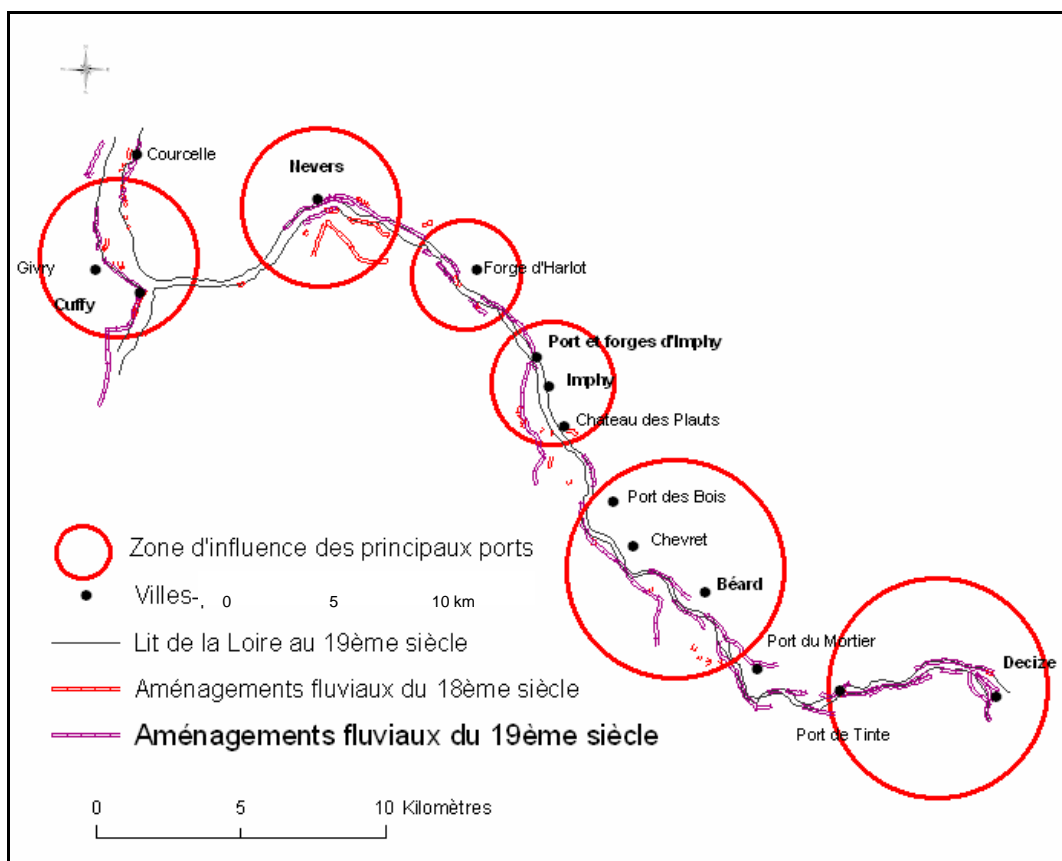


Figure 202 – La Loire : un axe économique majeur et facteur d’aménagement du territoire national. Les aménagements successifs des 18^{ème} et 19^{ème} siècle ont permis une maîtrise difficile mais efficace du fleuve et en ont fait un objet économique national d’une grande valeur : ports fluviaux, enrochements, levées.

Tous ces aménagements n’avaient pour fonction principale que la bonne navigabilité du fleuve et l’excellente logistique du transport fluvial entre les ports (Figure 204). Ne retenons à notre niveau disciplinaire et pour les besoins de notre recherche géographique que les effets de ces divers aménagements sur le fonctionnement de l’hydrosystème Loire.

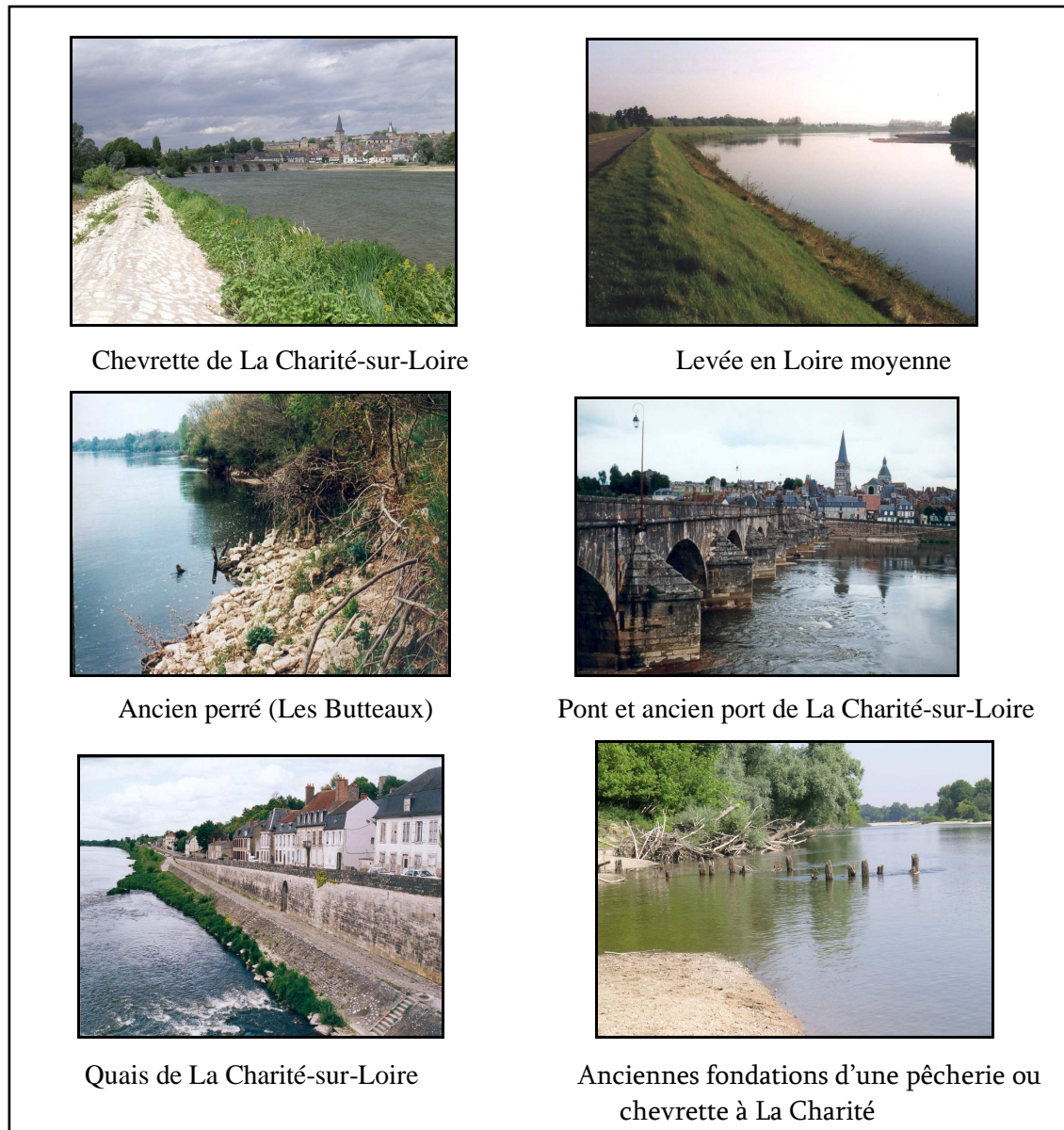


Figure 203 – Typologie des aménagements fluviaux dans le Site Atelier 3 en Loire moyenne.

Le panorama ainsi présenté de cette navigation ligérienne, à travers ses enjeux politico-économiques et ses formes d’aménagements nous amène à réfléchir plus profondément sur les relations entre les formes fluviales et les aspects de l’entretien de la Loire. Il nous paraît en effet essentiel de mettre en relation ces interactions physiques et humaines puisqu’il

semble que les modifications environnementales actuelles sont issues de modifications de comportements humains et d'activités économiques.

b). Historique de l'entretien du lit de la Loire

• Un aspect de cette étude s'est penché sur la question de l'entretien même du lit de la Loire sur plusieurs phases historiques. Ainsi, à partir de l'exploitation d'archives de la marine marchande de Loire et d'ouvrages généraux sur la question de la navigation en Loire, nous avons pu dégager différentes phases de cet entretien. Si beaucoup d'ouvrages et articles ont été rédigés sur la navigation ligérienne, sur la batellerie (Beaudoin, 1989 ; Billacois, 1964) et les mariniers (De Person, 1994 ; Michot, 1955 ; Mantellier, 1867), aucune étude ne s'est intéressée de près à l'entretien des formes fluviales. C'est pourquoi toute notre approche s'est penchée sur les unités fonctionnelles du fleuve. Nous avons tenté donc de faire ressortir les informations montrant le lien entre l'entretien du fleuve navigué et le lit fluvial. Au regard des chapitres précédents sur l'évolution du lit de la Loire des îles, il nous est ainsi apparu nécessaire de chercher les facteurs explicatifs.

Comment s'effectuait l'entretien du lit, à quel rythme et sur quel type de forme fluviale les hommes chargés de cet entretien intervenaient-ils ?

Cette étude ne se veut pas exhaustive mais très représentative de ce qui se réalisait au temps de la navigation ligérienne. Il convient tout d'abord de définir ce terme d'entretien du lit de la Loire et celui de balisage. Nous entendons par **entretien tous les moyens, humains et techniques, pour permettre le bon fonctionnement des différents usages, agricoles et socio-économiques, directement liés au fleuve**. Le balisage, terme plus spécialisé dans le domaine de l'entretien du lit, regroupe tous les moyens pour permettre la bonne navigabilité du fleuve par les activités fluviales. Il s'agissait avant tout de déterminer physiquement un chenal de navigation.

Nous nous sommes donc intéressé aux techniques et outils des personnes en charge de cet entretien. Il consistait en plusieurs choses :

- un entretien sous forme de nettoyage
- un balisage, très lié au précédent, et orienté sur la praticabilité du fleuve par les bateaux.

Nous observons ainsi que les formes d'entretien sont liées au type de formes fluviales présentes dans le lit. Les formes stabilisées (francs-bords), les formes mobiles (bancs, chenaux) et les formes intermédiaires (bancs à caractères insulaires et micro-îlots) faisaient ainsi toutes l'objet d'un entretien spécifique.

- Le balisage du chenal de navigation

Un arrêté officiel de 1773 montre toute l'importance donnée à l'entretien d'un chenal de navigation pour la Loire : « Arrest du Conseil d'Etat du Roi qui attribue aux Sieurs Intendants et Commissaires départis, la connaissance de tout ce qui intéresse le balisage et nettoisement des rivières de Loire et Allier et autres affluents » (24 avril 1773).

Ce « lobby » des marchands met en avant le fait que la Loire est utilisée, et que naviguer nécessite de s'acquitter de droits de péages et de partager la rivière avec d'autres activités : pêche, moulins...

Pour permettre le passage des bateaux il était nécessaire de pratiquer un balisage systématique des biefs fluviaux. Cette forme d'entretien consistait d'abord à distinguer les voies navigables, en remontée comme en descente (Figure 204), en les marquant physiquement par un système simple de balises (en fait des pieux de plusieurs mètres enfoncés dans le plancher alluvial). Cette technique de marquage reste classique de la navigation côtière et fluviale, comme on peut encore l'observer actuellement. Le chenal de navigation serpente alors d'une rive à l'autre selon la profondeur du fleuve. Il est délimité par des balises droites (dites de galerne) en rive droite, et à pointe cassée (dites de mer) en rive gauche.

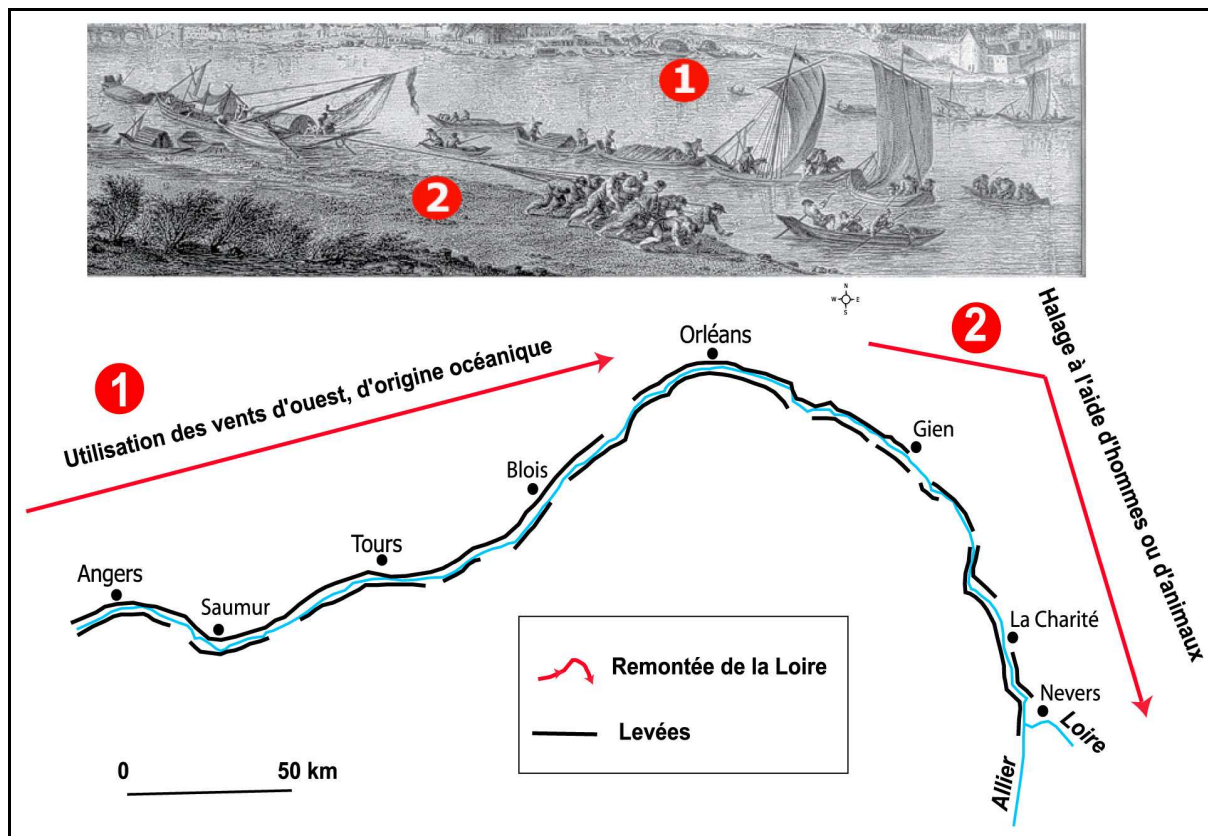


Figure 204 – Les méthodes de remontée de la Loire.

Si la descente du fleuve se faisait en fonction des débits, la remontée restait beaucoup plus problématique et nécessitait l'aide des populations riveraines. Cet aspect restait un facteur fort de cohésion sociale entre les marinières et les riverains du fleuve. Le halage de rive gauche impliquait un chemin de service accessible et pratique tout du long de cette pénible et longue remontée des bateaux.

Au temps de la Loire navigable, ce balisage faisait appel à des hommes expérimentés et habitués à leur bief d'attribution, ou encore à des usagers quotidiens du fleuve qui pratiquaient, de ce fait, des gestes spontanés propres aux sociétés riveraines des cours d'eau : planter une perche à un endroit délicat faisait partie de ces gestes spontanés, sans aucune demande administrative particulière. Le paysage de la Loire était alors ponctué de ces balises et repères, marquant le plus souvent la présence de hauts fonds et de bancs mobiles (Figure 205).



Figure 205 – Le balisage de la Loire pour la navigation.

Ces exemples (saladier de marinier et photographie du début du 20^{ème} siècle (Musée de Cosne-sur-Loire) illustrent l'importance du balisage.

- Les mariniers étaient exposés à la dureté de leur métier (Figure 206) : risque de naufrage, de noyade, pénibilité des conditions de travail sur le fleuve, conflit avec les autres usagers de la Loire (comme les meuniers). Aussi, pouvaient-ils compter sur les baliseurs du fleuve pour leur faciliter le passage de nombreux points en Loire moyenne jugés difficiles pour la navigation. C'est le cas par exemple en amont de Châtillon où les embarcations bénéficient de l'utilisation d'une mouille de plus de 4 km de long balisée en permanence (Rapport d'Ingénieur, 1856). Les bateaux se rangent « en galerne » (s'approcher de la rive droite) s'ils doivent franchir la passe, ou se rangent « en mer » (vers la rive gauche) s'ils doivent suivre le chenal. Ils bénéficient des conseils avisés des gardes-baliseurs comme celui de Briare (le cantonnier-baliseur Pouillotes) (Rapport d'Ingénieur, 1856) qui donne des avis aux mariniers traversant la passe de Châtillon. Du matin au soir, il y a des baliseurs dans les

chenaux entretenus et surveillés de la Loire moyenne (Rapport d'Ingénieur, 1856). Les ingénieurs recommandent d'ailleurs la présence permanente des cantonniers baliseurs ; ce qui montre l'extrême nécessité de cette pratique pour la Loire.

« La Loire, ce beau fleuve qui traverse la France et se décharge dans la mer, aurait dû procurer au royaume les plus grands avantages pour l'Exportation et l'Importation de toutes sortes de denrées et marchandises, pour faciliter les transports et les communications d'une province à l'autre, pour élever des mariniers et en faire ensuite des matelots pour la marine royale et marchande. »
« mais par une fatalité inconcevable, la navigation sur cette rivière a toujours été gênée, malgré la volonté de nos rois, le zèle de leurs ministres. »
« le balisage de la Loire sera fait par les entrepreneurs des turcies et levées chacun dans leur district .. »
Mais il y a des plaintes : « des clameurs s'élèvent pour cause de naufrages ou d'avaries »
Ceci à cause d'un manque d'entretien du lit : « des pierres, des troncs d'arbres, des pieux, des carcasses de bateaux qui se trouvent dans le lit de la rivière ; que les sables qu'y amoncellent forment bientôt des seuils dangereux » inconnus donc pas baliser pour les bateaux « au risque de se noyer » « de naufrage »
« mais c'est une nouvelle charge pour le commerce dont il serait affranchi, si le balisage était fait avec exactitude »
« une enquête pourrait justifier que depuis un an ou deux il y a eu 50 à 60 naufrages sur cette rivière »
« tous ces accidents n'arriveraient pas si le balisage se faisait régulièrement »
« les négociants de Nantes réclament l'exécution et la volonté du Roi... pour que le balisage soit fait le plus tôt possible afin de procurer au commerce et à la navigation toutes les sûretés et facilités dont ils ont besoin »
Mémoire de négociants de Nantes sur le balisage de la Loire 16 janvier 1787

Figure 206 – Citations de la marine marchande de la Loire.

- Les techniques d'entretien et de balisage du chenal navigable

Ce balisage reposait sur les compétences et la présence permanente de gardes-baliseurs ou cantonniers-baliseurs (en raison des 20 cantons de gestion du fleuve), par la mobilisation ponctuelle de baliseurs et par une campagne annuelle de surveillance et d'actions menée par plusieurs équipages dès le mois de juillet. Un équipage descendait de Roanne jusqu'au pont d'Orléans. On paye des baliseurs pendant trois jours pour qu'ils enlèvent et coupent les bois et arbres dans le fleuve et sur les chantiers.

Tout un vocabulaire du balisage et de l'entretien du fleuve s'est ainsi constitué au fil des siècles de pratiques et d'expérience (Mantellier, 1867).

- **des outils** : « un grand crochet de fer pour tirer les « paulx » et racines, deux mordants de fer pour tirer les « paulx » dans l'eau, un engin dormant à tirer les « gros boys », une grande corde bien usée servant à l'engin dormant ».

- **des actions** : « faire oster des grosses pierres estant en la rivière à Ingrande nuisibles et préjudiciables aux Marchans fréquentans » (mai 1507) ; « faire oster les moulins de la

voye ». Le nettoyage passe par une lutte perpétuelle contre l'installation de nouveaux moulins qui gênent et rendent dangereux la navigation (concurrence et donc conflit).

- **des engins du balisage** : « engin garni de 4 traverses et 13 planches de bois, 2 chevilles de fer, un mouffle de fer, 9 poulies de métal et de cuivre, 2 trousses avec grant quantité de cassées, 4 chapeaux de fer pour arracher les paulx, 4 gouyars pour couper les espines, 3 gouez et ung cassé, 2 pinces de fer à casser les pierres dans l'eau, 2 tranches et un pic à déferrer les bois, un gros maillet de fer, un ciseau de fer pour faire mortaizes, 2 gros ciseaux à couper les bois dans l'eau, un gerfault pour prendre les bois en l'eau, 20 balises. »

A l'aide de ces outils et méthodes de travail, les diverses formes fluviales faisaient l'objet d'un entretien particulier et adapté à leur spécificité (Figures 207 et 208).

- Les coupes rases des bancs à caractère insulaire et micro-îlots

Ces formes fluviales connaissaient une durée de développement très éphémère car la végétation pionnière n'avait pas sa place en ces temps de balisage intensif. Les bancs à caractère insulaire ne pouvaient se développer aisément du fait de leur position gênante dans le lit navigable. Seuls les bancs et îlots en position centrale et peu gênants pouvaient connaître une phase de développement importante. Cependant, la coupe systématique des verdiaux (donc des jeunes saules et peupliers) était de rigueur à cause de la politique du balisage et également de la technique des vanniers qui les utilisaient pour leur activité (coupe à trois ans). La végétation était dans son ensemble maintenue à une strate buissonnante et mi-arborée, dans tous les cas conditionnée par les exigences des activités prépondérantes dans le lit fluvial (hauteur limitée à un mètre environ).

- Le curage des bancs et du chenal

Il s'agit certainement de la partie la plus délicate mais nécessaire du balisage du fleuve. Intervenir sur des écueils sableux, retirer les pierres et les arbres tombés, dégager les bâtons de marine cassés et encore fichés au fond du chenal, « chevaler » (c'est-à-dire dégager les sables qui s'accumulent de part et d'autre), telles sont les multiples actions des baliseurs chargés de maintenir un chenal navigable et sécurisé.

- L'entretien des chantiers et hauserées : franc-bord et chemin de halage

Les hauserées, chemins aménagés sur les berges des marges du fleuve (francs-bords), doivent être entretenues constamment pour faciliter le halage des bateaux à la remontée essentiellement. Il s'agit donc de disposer d'un large chemin praticable sans obstacle, donc sans végétation, pour faire avancer les trains de bateaux tirés par des hommes de main ou des animaux. L'accès au fleuve demeurerait donc aisé du fait de cette nécessité de la remontée. Des normes bien spécifiques étaient exigées pour maintenir les voies de services : « (...) abattre les mazures et les arbres le long des bords de hauserées pour leur donner dix huit pieds de franc-chantier, et quatorze pieds au droit des murailles et maisons (...) » (Mantellier, 1867).

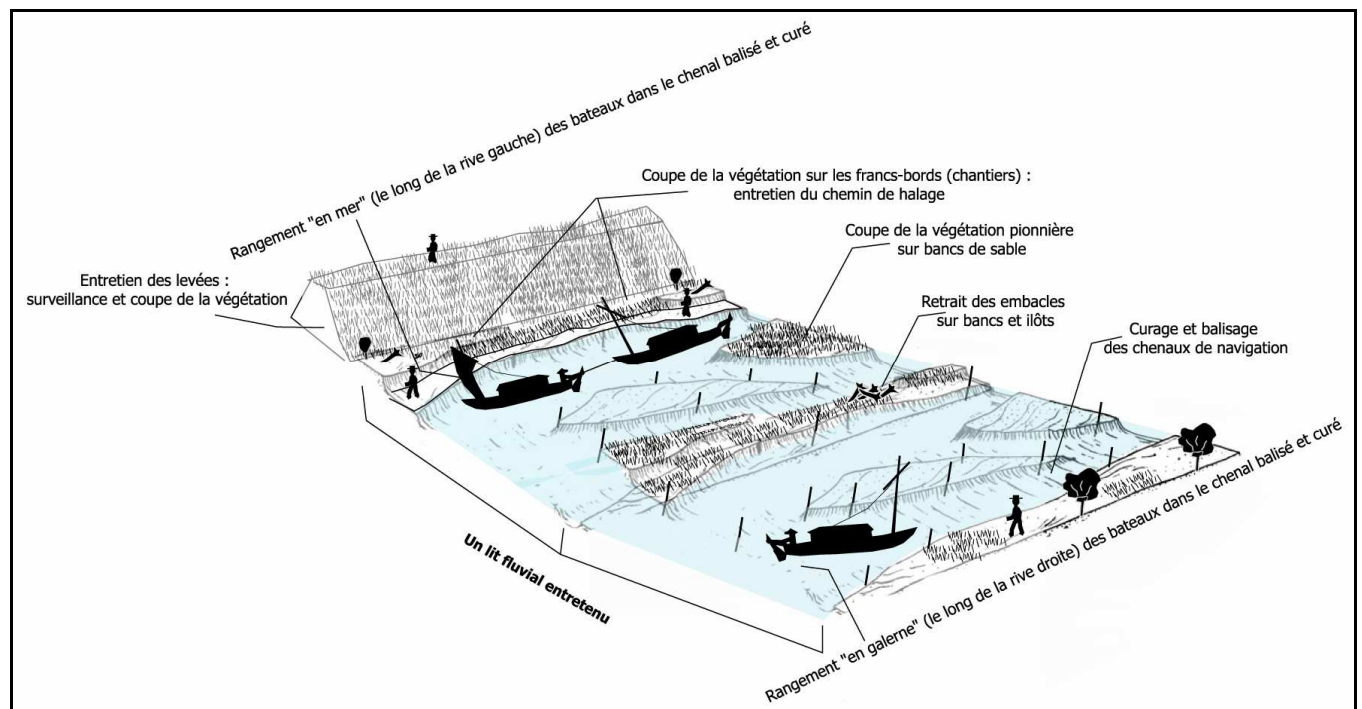
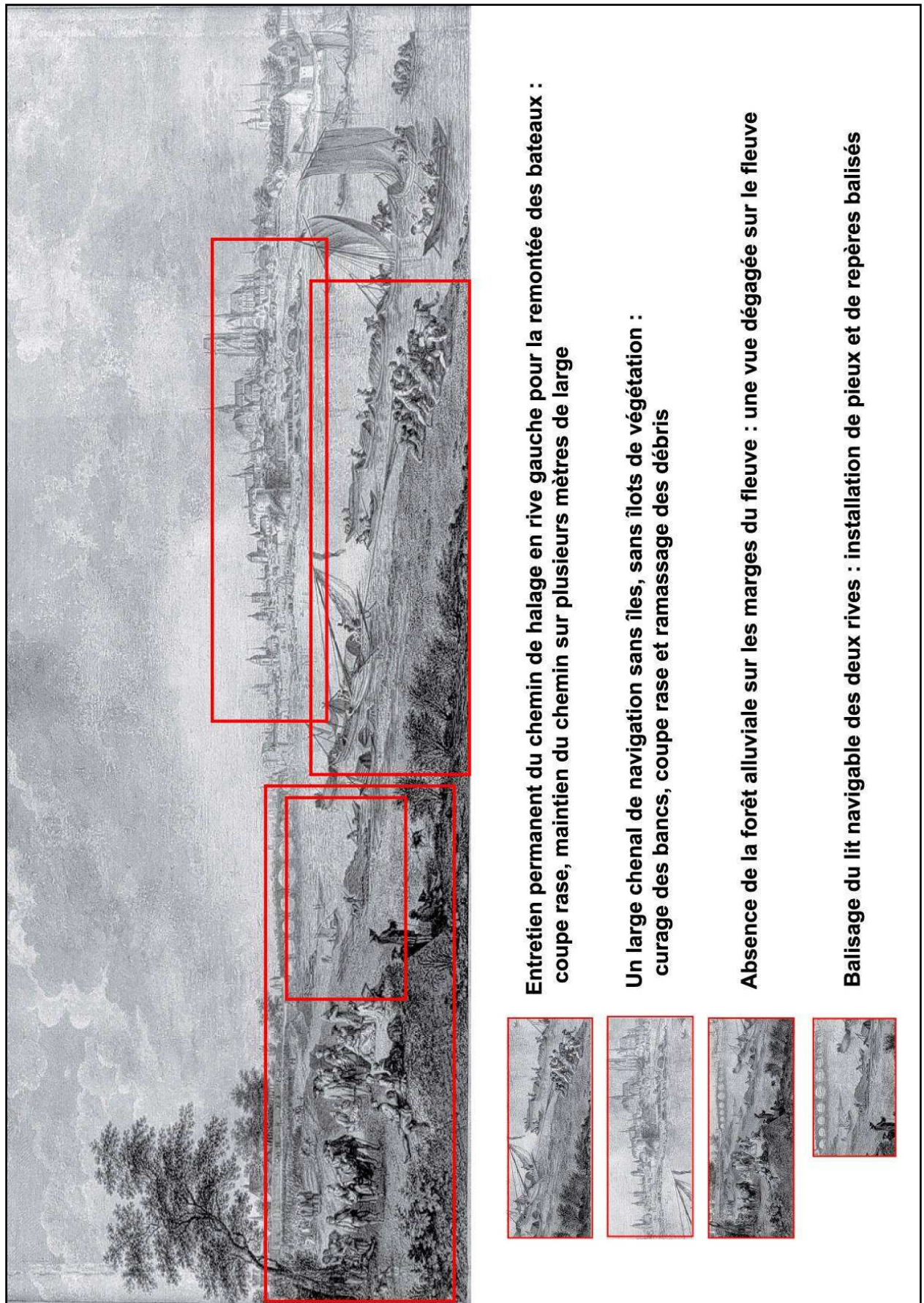


Figure 207 – Reconstitution du paysage fluvial aux 18^{ème} et 19^{ème} siècles.

Ce croquis montre les liens entre les activités de la navigation et les diverses formes fluviales.

Chaque forme faisait l'objet d'un entretien bien spécifique et particulier.



**Entretien permanent du chemin de halage en rive gauche pour la remontée des bateaux :
coupe rase, maintien du chemin sur plusieurs mètres de large**

**Un large chenal de navigation sans îles, sans îlots de végétation :
curage des bancs, coupe rase et ramassage des débris**

Absence de la forêt alluviale sur les marges du fleuve : une vue dégagée sur le fleuve

Balisage du lit navigable des deux rives : installation de pieux et de repères balisés

Figure 208 – Le paysage de la navigation ligérienne : une variété d’activités dynamiques. Le découpage analytique de ce tableau du 18^{ème} siècle (Desfriches, Musée de la Marine de Loire à Châteauneuf-sur-Loire) montre tous les aspects de l’entretien du lit fluvial pour cette fonction économique vitale et centrale.

Toute cette approche historique de l'entretien et du balisage de la Loire se complète d'une chronologie des responsabilités de ce balisage depuis le Moyen-Âge jusqu'au 20^{ème} siècle. Ce petit tour d'horizon des gestionnaires du lit fluvial en dit d'ailleurs très long sur l'évolution du fleuve que nous avons pu dégager lors des précédents chapitres. La corrélation est ainsi très forte entre cette évolution géomorphologique de la Loire moyenne et celle des phases successives d'intervention ou de non-intervention dans le lit fluvial.

Un entretien avec le dernier pêcheur professionnel du Bec d'Allier, Monsieur Jean-Marc Benoît de Cuffy, a permis d'ailleurs de confirmer le lien entre les sociétés riveraines et le fleuve. Le fleuve d'aujourd'hui n'est plus entretenu, et depuis plusieurs décennies, de la même manière que lors de la navigation. Le paysage fluvial actuel de la Loire des îles est totalement inadapté à la navigation commerciale d'antan. Les professionnels du fleuve qu'étaient les mariniers et les pêcheurs maintenaient le fleuve dans des conditions de praticabilité. Remettre la navigation aujourd'hui en Loire moyenne, comme le précise M. Benoît, nécessiterait un investissement pléthorique et un remodelage du paysage fluvial, totalement incompatible avec les enjeux écologiques et patrimoniaux actuels. Les îles n'avaient donc pas leur place dans la Loire naviguée (Figure 207). Replaçons d'ailleurs cette chronologie par rapport à notre évolution géodynamique du fleuve.

- De la communauté des marchands à l'abandon

Du Moyen-âge jusqu'en 1682, la communauté des marchands fréquentant de la Loire participait activement au balisage de la Loire et ses affluents en ayant créé 20 cantons d'exploitation et d'entretien (Mantellier, 1867).

Ce rôle est confié ensuite à la communauté des Turcies et Levées dans une volonté de l'Etat royal d'affaiblir cette communauté puissante. Cette première passation de pouvoir et gestion du fleuve marque un grand tournant car on observe une négligence marquée dans le balisage de la Loire. Puis en 1773 l'administration des turcies et levées et le bureau des marchands fréquentant la Loire sont supprimés par un édit royal et ce sont les Ponts et Chaussée qui assurent la fonction de baliser le fleuve.

Une nouvelle philosophie de gestion du fleuve s’amorce alors, vision purement mécanique et administrative, caractérisée par la rédaction de rapports d’ingénieurs.

La communauté oeuvrait véritablement dans le but d’entretenir ce capital fleuve. Ce n’est que plus tard face à cette communauté « dérangeante » que l’Etat royal voudra récupérer son bien public à travers les changements de pouvoir. Dans la gestion globale du fleuve, on voit ainsi qu’il y a toute une histoire alternant entre engagement et désengagement de l’Etat (ou de l’autorité nationale). Seule la communauté des marchands fréquentant la Loire semblait à juste titre, ou plutôt intérêt, entretenir le fleuve pour sa libre activité.

Donc il y a plusieurs grands tournants dans l’Histoire de la gestion de la Loire moyenne :

- **1682** : arrêt de l’entretien efficace et engagé par la **Communauté des marchands**
- **1773** : suppression des **communautés des turcies et levés et des marchands**. Gestion par les **Ponts et Chaussées**
- **Fin 19^{ème} siècle** : Arrêt complet de la navigation
- **1962** : La Loire est retirée des voies navigables. Désengagement de l’Etat
- **1994** : Retour de l’Etat avec le **Plan Loire**

L’abandon de la navigation, à la fin du 19^{ème} siècle, demeure la phase la plus forte et la plus traumatisante pour l’économie de régions jadis entièrement tournées vers le fleuve. Aujourd’hui les grands fleuves d’Europe s’inscrivent dans une logique communautaire très importante (Union Européenne). Il apparaît que la Loire est finalement exclue de cette logique géographique et économique. Le centre de l’Europe communautaire, au fil des adhésions nationales, s’est déplacé vers le centre géographique de l’Europe dans le grand axe rhénan. Or, comme le montre la carte de l’Europe, l’axe Rhin-Danube demeure l’axe majeur de cette Europe d’aujourd’hui et de demain. La Loire ne peut plus rentrer dans cette logique, malgré sa façade océanique (Figure 209). Cette façade ne profite qu’à un hinterland fluvial très réduit par rapport à celui du 19^{ème} siècle. C’est uniquement autour de Nantes que cette façade atlantique et l’hinterland brillent, contrairement au Rhône et à la Seine qui possèdent un hinterland plus stratégique et fonctionnel par rapport à la logique européenne. Pour notre étude, ces grandes phases de gestion du fleuve sont extrêmement importantes pour à la fois mieux cerner les étapes de formation des îles en Loire moyenne et aussi corrélérer nos résultats majeurs aux logiques de gestion actuelles. L’exemple du site de La Charité-sur-Loire en est une belle représentation dans le sens où il

met en relation tous les enjeux de gestion actuels et des formes de réajustements fluviaux très intéressants dans un contexte d'aménagements fluviaux très forts.

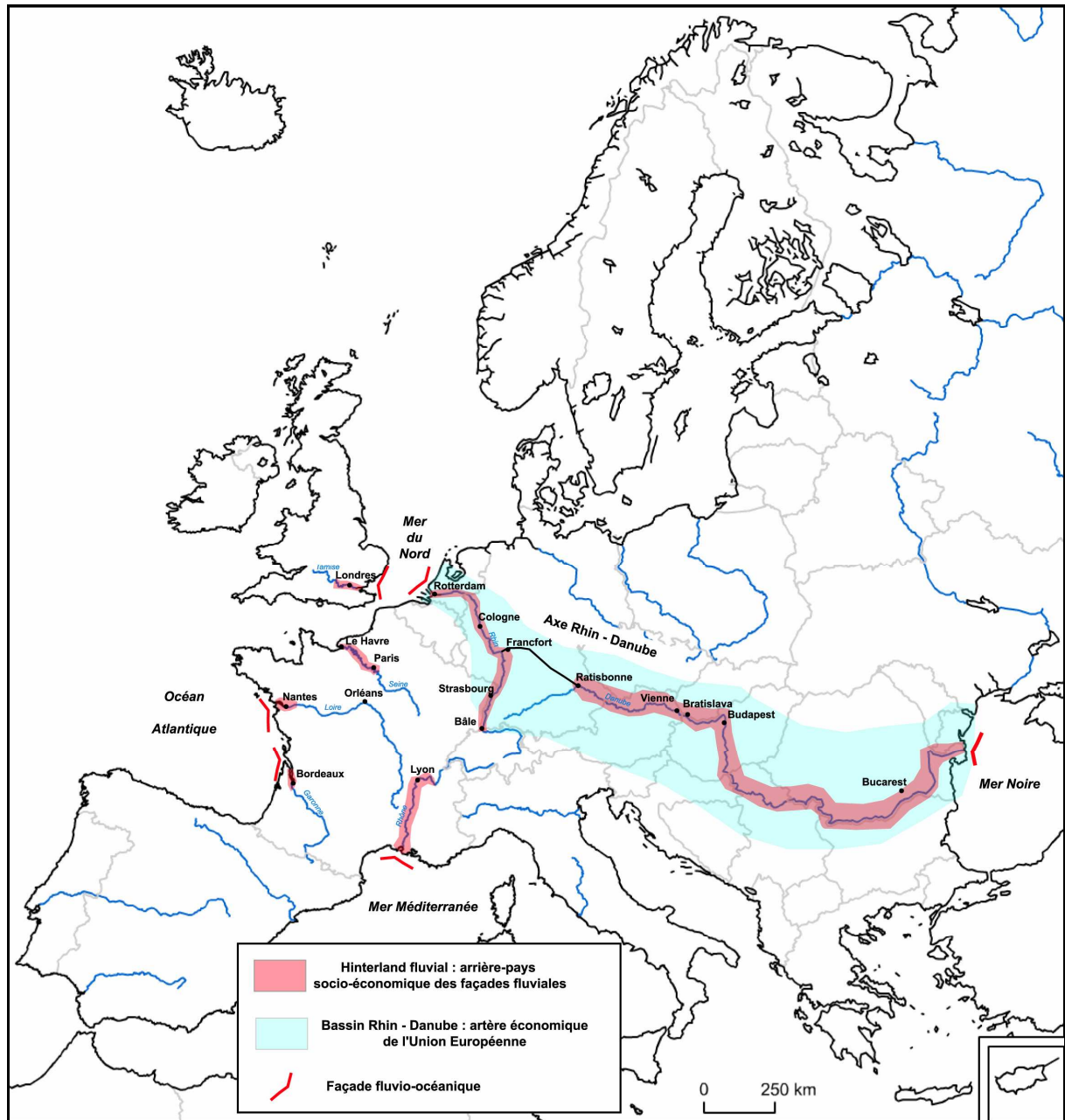


Figure 209 – Quelques fleuves dans la dimension européenne.

On comprend assez facilement la perte de vitesse rapide de l'axe ligérien qui n'a su conserver que son interface maritime avec le port de Nantes. Les hinterlands fluviaux du Rhône et de la Seine sont les plus importants et les plus étendus de l'Europe occidentale. L'axe Rhin-Danube représente la colonne vertébrale économique de l'Europe centrale et de l'Union Européenne, et marginalise définitivement la Loire de toutes perspectives économiques majeures.

2). Impact actuels des aménagements et des ouvrages de navigation

Parmi les quatre secteurs fonctionnels du Site Atelier 3, celui de La Charité-sur-Loire se distingue fortement par sa configuration anthropique très marquée. En effet, il présente tous les aspects d'un secteur fonctionnel perturbé par toute une série d'aménagements fluviaux qui avaient pour rôle principal de maintenir le pôle économique du port de La Charité-sur-Loire. Aussi, nous proposons de suivre de plus près l'impact d'un tel ensemble d'aménagements pour en comprendre à la fois la logique de fonctionnement et les enjeux que cela induit actuellement en Loire moyenne. Pour rappel, le secteur de La Charité-sur-Loire représente un site d'intervention majeur dans le cadre de la politique d'entretien et de restauration du lit de la Loire pilotée par le Plan Loire Grandeur Nature. Il constitue, pour nous, un site expérimental d'expertise hydro-géomorphologique et d'application d'une nouvelle méthode d'intervention en Loire moyenne. De plus, ce secteur fonctionnel permet de s'interroger sur un autre aspect de notre thèse de départ : quelle Loire souhaite-t-on développer, conserver et entretenir ? Le «on» reste pour nous au sens le plus neutre qu'il soit, nous proposons simplement notre analyse géographique de la situation actuelle en matière de gestion du fleuve.

a). Exemple d'un site aménagé pour la navigation : la Charité-sur-Loire

● **Présentation du site de La Charité-sur-Loire**

Le périmètre d'étude s'étend depuis la chevrette de La Charité-sur-Loire, située en tête d'un chenal secondaire jusqu'à la connexion aval au niveau de la commune de Passy. Il s'agit d'un grand complexe de formes fluviales formées en arrière d'une chevrette, datant du 19^{ème} siècle : îles, réseau de chenaux secondaires, chenal principal... (Figure 210). Il présente une mosaïque caractéristique de la Loire moyenne comportant de vastes grèves exondées, une forêt alluviale omniprésente et des zones colonisées par la végétation pionnière.

La spécificité de cette zone réside en la présence d'une chevrette au niveau de la connexion amont du bras, constituant une barrière qui contribue à la réduction du débit au sein du chenal, et protégeant les unités fluviales contre l'influence du bras principal.

L'île de Passy reste, avec le Faubourg de la Charité, l'île la plus ancienne Site Atelier 3, ce qui témoigne de la relative stabilité de cet ensemble géomorphologique. S'ajoute à cela la présence du pont juste derrière la digue, deux aménagements favorisant la sédimentation et l'extension du couvert végétal à l'intérieur de ce bras.

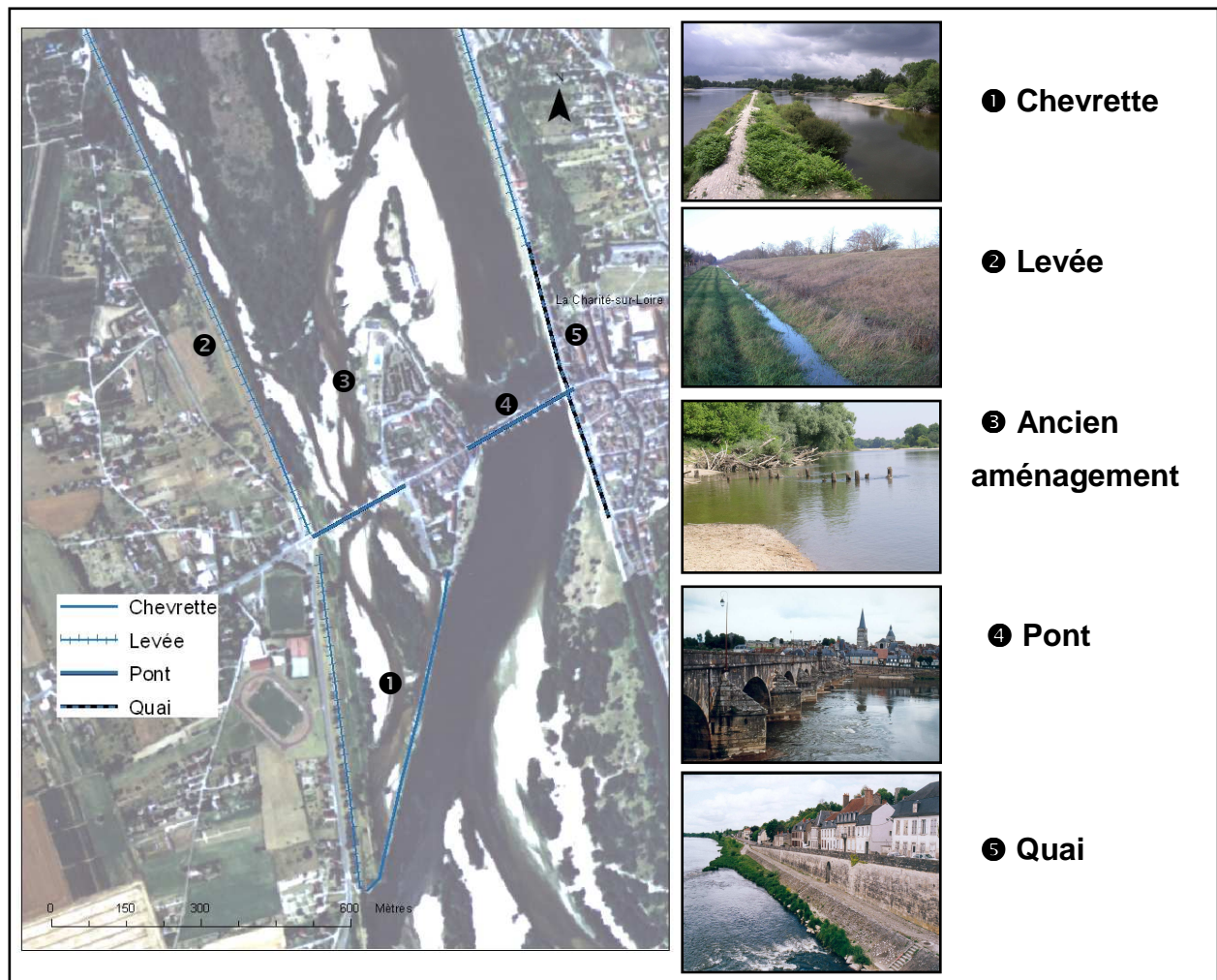


Figure 210 – Les aménagements fluviaux du secteur fonctionnel de La Charité-sur-Loire. Leur forte emprise dans cette partie de la Loire des îles atteste du rôle majeur que jouait le port de La Charité au temps de la Loire navigable.

Ce chenal secondaire ne fonctionne qu'en période des hautes eaux, il laisse de ce fait la voie libre à l'extension de la végétation et à la formation de dépôts susceptibles d'obstruer le cours d'eau.

Ce site présente donc aujourd'hui des enjeux hydrologiques et écologiques importants. Le débordement hors du lit mineur se produit assez rapidement pour des débits avoisinants $2000 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$. Ces événements sont d'une récurrence de 2 ans. La végétalisation des bras secondaires et la présence d'un seuil hydraulique (chevrette) favorisent encore aujourd'hui la concentration des eaux dans le chenal principal. Cela augmente d'ailleurs le risque d'inondation et menace les secteurs urbanisés installés dans le lit majeur.

● **La chevrette de La Charité-sur-Loire**

La chevrette de La Charité-sur-Loire est une digue submersible construite en 1838. Cet ouvrage avait pour but l'amélioration des conditions de navigation. La déviation des eaux vers le bras principal permettait de maintenir le niveau de l'eau pendant la période d'étiage. L'objectif des constructeurs était aussi de diminuer le débit au niveau du bras secondaire pour favoriser les dépôts de sable au sein de ce bras dit « bras de décharge », servant à empêcher des éventuels dépôts de sable sur les quais de La Charité (Figure 211).

La chevrette s'étend ainsi sur 612 m, depuis la pointe amont de l'île du Faubourg de la Charité jusqu'à la berge de la rive gauche, au niveau de la maison dite de la Blancherie sur le territoire de la commune de La Chapelle-Monlinard.

Les crues de 1846, 1856 et 1866 ont engendré plusieurs ruptures le long de la chevrette (entraînement des enrochements) (Photographie 37). Cet ouvrage a été, d'après le rapport de l'ingénieur ordinaire de 1887, passablement négligé (avis de l'ingénieur en chef, 1887).

Les premiers travaux de restauration furent ainsi effectués vers 1875 par les ingénieurs des Ponts et Chaussées, ce même organisme que nous avons évoqué précédemment et qui succède à la Communauté des Turcies et Levées. Les plus importantes réparations de cette époque ont consisté principalement en la mise en place d'enrochements sur les perrés.

La crue de 1977 a été à l'origine d'une ouverture dans la chevrette à proximité de la rive gauche. Cette brèche s'étend désormais sur une soixantaine de mètres.

Des réparations ponctuelles en béton réalisées au cours du 20^{ème} siècle peuvent être encore visibles sur l'ensemble de la chevrette.



Photographie 37- La brèche de la Chevrette (en période de basses eaux).

Loire
de l'Ingénieur en Chef.

La conservation de la digue basse dit Chevrette de La Charité est nécessaire pour maintenir les basses eaux dans le bras principal de la Loire vis-à-vis de la Ville de La Charité, non plus malheureusement en vue de la navigation mais en vue d'usages locaux, tels que conservation des fontaines, bords de bords, puisages pour les arrosages privés ou publics, entretien des réservoirs des eaux vannes & ménagères qui aboutissent au quai principal de la ville.

Les dépôts de sable se font principalement grâce à la chevrette, dans le bras de décharge ce qui n'a que peu d'inconvénients, et que dans tous les cas, on a bien moins que si ces dépôts se produisaient le long de quais.

Ces motifs nous paraissent devoir faire considérer le maintien de l'ouvrage en question comme essentiel, et cependant l'examen détaillé de l'état d'indication des travaux d'entretien des ouvrages de la Loire dans le 3^e arrondissement, ne permet pas d'accorder une place à ce travail.

C'est ce qui nous conduit à présenter projet ci-joint qui paraît bien étudié, à l'approbation de l'Administration Supérieure.

Névers, le 12 Avril 1887
Ingénieur en Chef.

« La conservation de la digue basse dit Chevrette de La Charité est nécessaire pour maintenir les basses eaux dans le bras principal de la Loire vis-à-vis de la Ville de La Charité, non plus malheureusement en vue de la navigation mais en vue d'usages locaux (...) »

« (...) Les dépôts de sable se font principalement grâce à la chevrette, dans le bras de décharge ce qui n'a que peu d'inconvénients (...) »

Figure 211 – Extrait d'un rapport d'ingénieur sur la chevrette de La Charité-sur-Loire (1887).

- L'état actuel de la digue

Le développement de la végétation au sein de cet ouvrage a provoqué la création de fissures (plantes à racines traçantes). Cela a conduit à la désolidarisation de la maçonnerie dans certains endroits. On distingue aussi des zones affaissées et sans joint entre les pavés.

Les travaux de nettoyage effectué par la DDE en 1994 avaient justement pour but l'élimination des arbres susceptibles de fragiliser la digue.

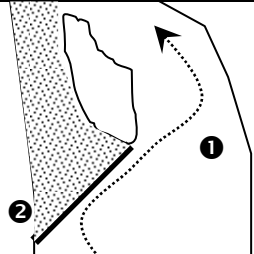
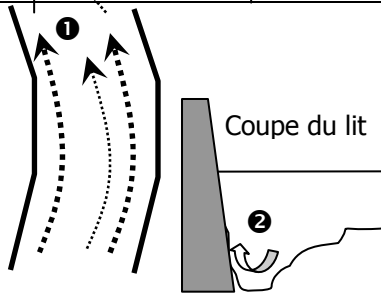
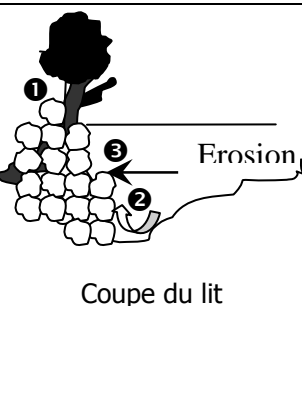
Cet ouvrage n'est plus utile de nos jours du fait de la disparition des activités liées à la navigation. Il prend une valeur patrimoniale justifiant des investissements pour l'entretenir. Par ailleurs, on constate que les interventions de restauration de la chevette ne concernent que la partie de la chevette visible à l'étiage (un débit avoisinant 60 m³/s), c'est-à-dire sur les 500 m linéaires d'ouvrage restant en aval de la brèche. Cette situation est hésite entre deux hypothèses d'aménagement possibles : soit procéder à l'élimination de toute la digue permettant une totale communication entre le chenal principal et le bras secondaire, soit reconstruire l'ouvrage et isoler de la dynamique fluviale le bras en arrière. Le choix a été de restaurer la majeure partie, tout en conservant la brèche en amont, essentiellement à la demande des kayakistes, nouveaux usagers et symboles de la fonction de loisirs du fleuve.

b). Rythmes d'évolution des formes en contexte de la Loire navigable

Nous évaluons l'impact de la chevette sur la vitesse de sédimentation ainsi que sa contribution à l'exhaussement du bras secondaire et la chenalisation du cours d'eau principal, pour prévoir les interventions les plus adaptées. En bref, nous réadaptons toute notre méthodologie d'analyse spatiale multi-scalaire à ce secteur d'étude : échelle moyenne sous SIG, échelle fine avec profils topographiques.

Cette méthodologie d'approche nous a permis de suivre avec précision l'évolution des formes fluviales au sein de ce secteur fonctionnel. Les résultats montrent que l'évolution de cette zone se caractérise par une rétraction de la bande active au profit des surfaces stabilisées (îles, francs-bords). Cette zone a connu au cours de la période, 1850 à 1960, une multiplication des îles au détriment des espaces représentés par la bande active et une individualisation des chenaux secondaires (Tableau XXII et Figure 212).

Tableau XXI – Exemples d'aménagements fluviaux et leurs contraintes sur l'hydrosystème Loire.

Type d'aménagements fluviaux	Schéma du fonctionnement mécanique	Contraintes sur la dynamique fluviale
Chevrette ou digue submersible		<ul style="list-style-type: none"> ❶ Chenalisation de l'écoulement ❷ Végétalisation et sédimentation actives en arrière de la chevrette
Levée ou digue insubmersible		<ul style="list-style-type: none"> ❶ Concentration des écoulements et accélération au droit des levées ❷ Formation de mouille en pieds de levée (déstabilisation de l'ouvrage)
Ancien perré		<ul style="list-style-type: none"> ❶ Protection de berges de francs-bords ❷ Accélération des écoulements et formation de mouille en pieds de berges ❸ Déstabilisation de la berge

La seconde période (1960-1995) se caractérise par une fusion des îles et une extension des surfaces boisées. On note pour la dernière période (1995 à 2002) un rattachement des îles au franc-bord au niveau de la partie médiane suite à la végétalisation d'un bras latéral en rive gauche. S'ajoute à cela l'apparition de séquences pionnières. Ces indices renforcent nos résultats majeurs enregistrés dans le chapitre 3 et nous permettent de montrer la fermeture progressive de ce bras, sans intervention humaine, à travers l'extension du couvert végétal.

Par ailleurs, on remarque que la présence de la chevrette en amont de cette zone constitue une protection pour les îles qui prennent de plus en plus d'espace. Cet ouvrage réduit aussi l'influence du bras principal sur la zone d'étude en diminuant la compétence des

eaux qui circulent au sein du bras secondaire. On constate en effet, pour la période 1850-1960, la formation d'un bouchon alluvial juste derrière la digue et d'autre île en aval dont la grande île du pont de la Batte.

En 1995, de nombreuses îles se sont encore formées en aval de l'île du Pont de la Batte dont l'emprise est de plus en plus importante. Par ailleurs, on remarque une concentration des îles au niveau de la rive gauche (en aval de la digue) et aussi la disparition des îles localisées en rive droite.

La période 1995-2002 est donc marquée par un renforcement de la sédimentation et une connexion des îles au franc-bord (en aval au niveau de Passy). Ce constat montre la tendance de fermeture et de stabilité vers laquelle tend ce bras secondaire.

Tableau XXII – Rythme d'évolution des formes fluviales en aval de la chevette de La Charité (Nabet, 2005).

	1850-1960		1960-1995		1995-2002	
	évolution	rythme ha/an	évolution	rythme ha/an	évolution	rythme ha/an
Bande active	- 35 ha	- 0,31	-19,24	-0,54	-1,7 ha	-0,24
Îles	32,41	0,29	14,84	0,42	-2,72	-0,38
Franc-bords	0,93	0,008	8,77	0,25	5,71	0,81

L'analyse de la carte de l'évolution de la végétation (Figures 213 et 214) montre que la surface occupée par la forêt à bois dur n'a jamais cessé d'augmenter depuis 1850 (+12% à +31%). Cela atteste aussi cette tendance de stabilité des îles et de fermeture du paysage.

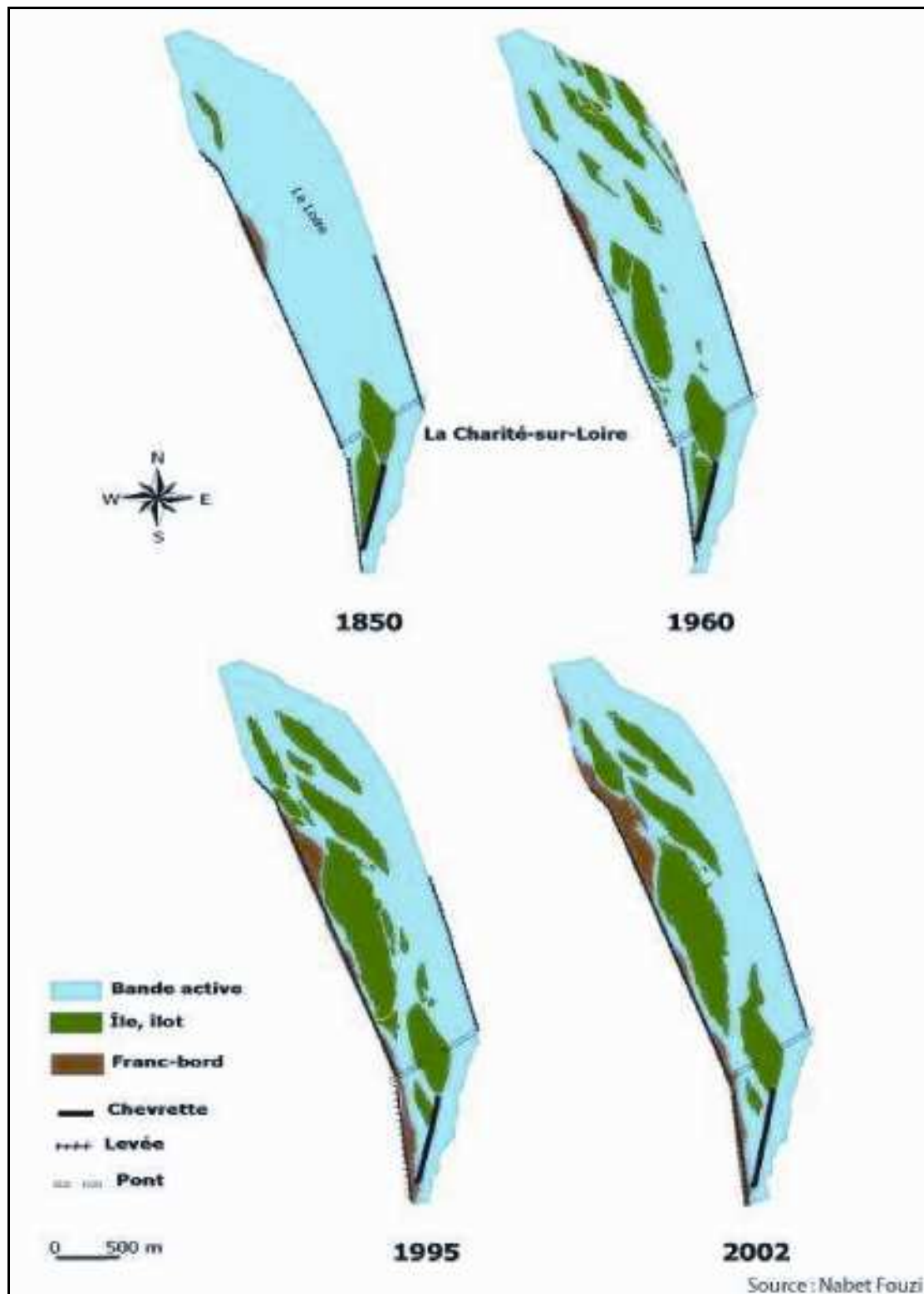


Figure 212 – Evolution géomorphologique du secteur de La Charité.
 On assiste à une rétraction de la bande active principale au profit essentiellement des îles qui voient leur nombre et surface fortement augmenter. Depuis 1995, une grande stabilité de l'ensemble fonctionnel s'observe avec une tendance récente à l'extension du franc-bord latéral.

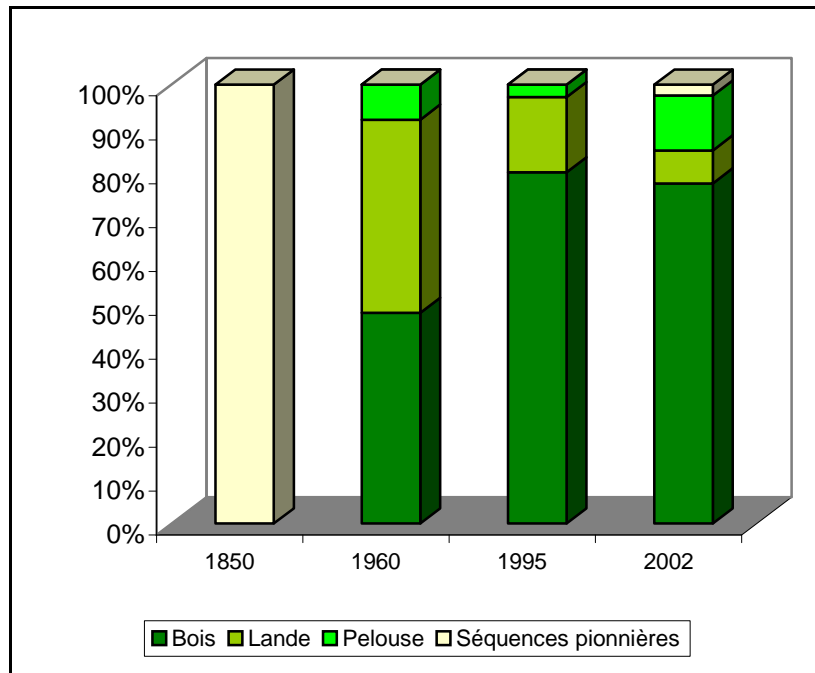


Figure 213 – La part des différents types de végétation et d’occupation du sol depuis 1850.

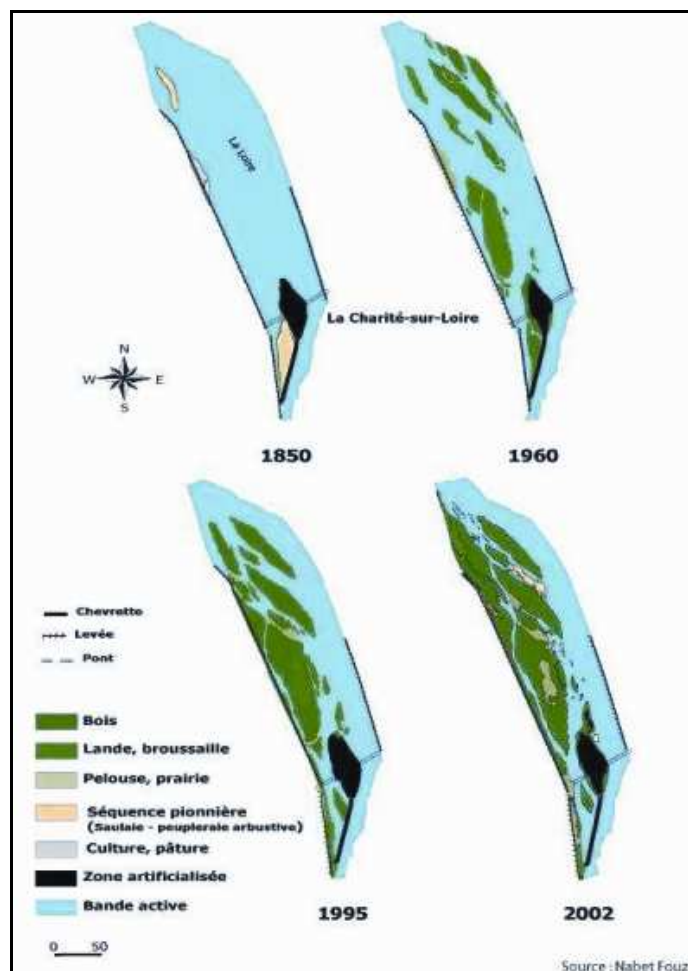


Figure 214 – Evolution de la végétation du secteur de La Charité.

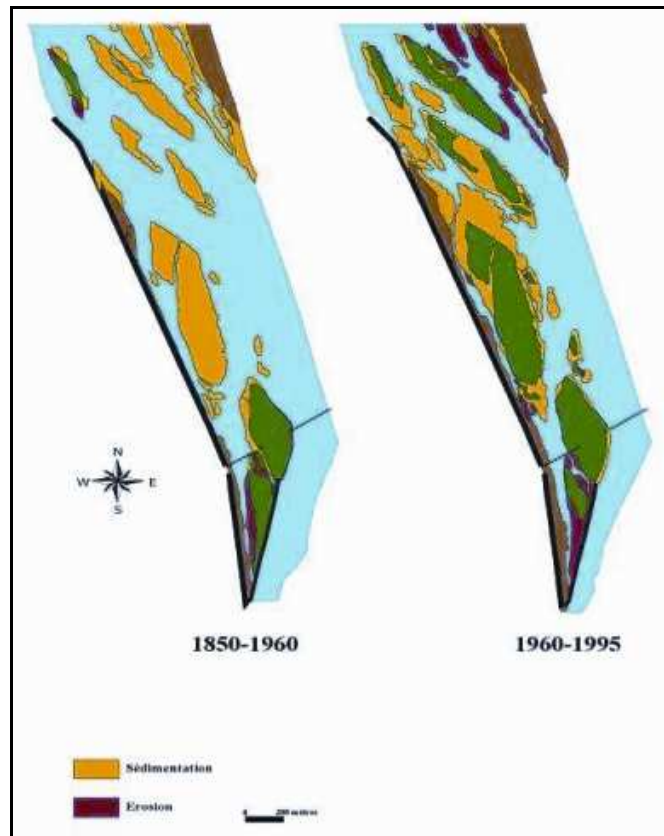


Figure 215 – Sectorisation de la sédimentation et de l'érosion dans le secteur fonctionnel de La Charité.

On constate d'après le croisement des différentes méthodes d'analyses (relevés topographique, sédimentaires et SIG) que ce chenal tend aussi vers un ensablement assez rapide. Les accumulations sableuses sont marquées surtout au niveau des piles du pont qui constituent un obstacle pour la circulation des eau et aussi en aval du bras, à défaut de compétence. Cela participe à la réduction de la pente et par conséquent la force de l'écoulement au sein du bras. L'extension rapide de la végétation favorise ainsi le piégeage des sédiments et le développement des sols. Ces processus concourent à des modèles d'évolution propres aux îles, comme la coalescence et le rattachement à des francs-bords.

Il est donc une évidence qu'un tel secteur enregistre des taux de sédimentation et de végétalisation très forte au regard de des autres secteurs fonctionnels moins aménagés : **il y a une accélération du processus de sédimentation et de végétalisation dans les secteurs situés en arrière d'une chevrette** (Figure 215). Le site de la Charité-sur-Loire montre tous les signes des conséquences d'un fort aménagement fluvial hérité de l'âge d'or de la

navigation. Si les usages ont bien changé, il reste que ces aménagements constituent des enjeux majeurs dans des sites urbanisés. C'est toute la difficulté et le paradoxe de la Loire.

B Rôle et déclin des activités agro-pastorales depuis la fin du 19^{ème} siècle

Nous nous sommes ici contenté de traiter la question des usages locaux de l'agriculture dans le lit de la Loire. Cet aspect demeure pour nous très important car il se place à une période charnière dans l'évolution du fleuve et des rythmes de formation de la Loire des îles. Aussi, nous ne dégageons, comme pour la navigation, que les influences sur les formes fluviales.

1). Historique des activités socio-économiques dans le lit

a). Typologie des activités agro-pastorales dans le lit de la Loire

- Les cultures

Des plantations d'arbres étaient mises en œuvre comme des peupleraies (sur les îles et les rives de Couargue par exemple), des robineraies, des chênaies et des oseraies. Quelques tentatives de plants de vignes ont aussi été réalisées sans grand succès sur l'île de Malaga (93.500 plants en 1911). L'osier était particulièrement exploité sur les îles pour servir principalement de ligatures aux vignes (spécificité de la région : Pouilly, Sancerre...) (Photographie 38). Les communes de Mesves, de La Chapelle-Montlinard et de Couargues possédaient notamment plusieurs plantations prospères (Boissel, 1997). Ces plantations étaient soumises à des obligations d'entretien régulier en procédant à des coupes à blanc annuelles. Les arbres étaient élagués tous les deux ans aux deux tiers de leur hauteur. Par exemple, le bois de l'Îlot des Loges à Pouilly-sur-Loire ou celui de l'île de Cosne étaient sujets à ces obligations de coupes régulières. La végétation arborée était donc surveillée et maintenue à un stade d'évolution jeune.

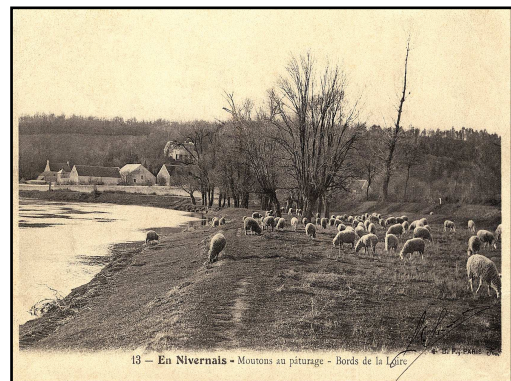
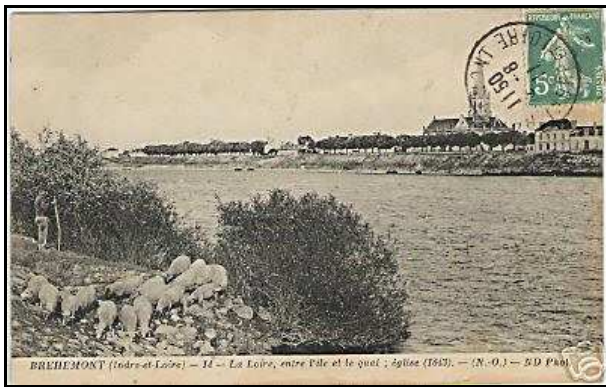


Photographie 38 – La culture de l'osier en Loire moyenne au début du 20^{ème} siècle. Cette iconographie typique de la culture de l'osier montre la relative jeunesse des pousses de Saule, dont on imposait une coupe régulière. L'ordonné des plantations ne laissait pas encore la place à une végétation pionnière, sauvage et dominante dans le lit de la Loire.

- Le pâturage

Cette pratique sera de plus en plus courante du 19^{ème} jusqu'au 20^{ème} siècle (Boissel, 1997). En effet, les agriculteurs qui ne peuvent plus agrandir leur exploitation se diversifient vers l'élevage et louent des terres du D.P.F. Les habitants des communes riveraines pouvaient également utiliser les terrains communaux pour faire pâturer leurs bêtes (vaches, chevaux, moutons, chèvres...) (Photographies 39 et 40).

Ainsi, les terrains de Mesves (comme sur le franc-bord des Aubrets) servaient au pacage sous la surveillance d'un employé. L'Ilot des Loges était par contre pâturé librement par les vaches (Photographie 41) et les chèvres jusqu'en dans les années 1970 (Boissel, 1997).



Photographies 39 et 40 – Le pastoralisme sur les francs-bords de la Loire moyenne. Ces troupeaux concourent à limiter, à certains points du fleuve, l'expansion de la végétation des francs-bords.



Photographie 41 – Le pastoralisme « libre » des troupeaux.

Les troupeaux sont soit laissés à eux-même sur les îles et francs-bords soit surveillés. Le berger s'occupe alors de l'entretien de ces formes en coupant tout ce que les animaux ne mangent pas.

- Les herbages

Les îles et les francs-bords servaient de zone d'herbages que les habitants et les paysans fauchaient pour en faire du fourrage jusqu'en dans les années 1960 (Boissel, 1997).



Figure 216 – Panorama des usages locaux et quotidiens en Loire moyenne dans la première moitié du 20^{ème} siècle.

Cet aspect montre des liens encore très forts entre les riverains et leur fleuve.

Ces trois types d'usages entraînaient une forme d'entretien régulier des unités fluviales donnant un paysage ligérien très particulier dans sa fonction agricole. Ces unités étaient en effet entretenues par les actions de couper, de pâturer et de faucher (Figures 216 et 217). Cependant, ces pratiques agricoles dans le lit mineur n'auront suffi qu'à limiter faiblement l'expansion de la végétation, et de manière très ponctuelle et ciblée. Un cycle de végétalisation et d'expansion des formes fluviales était déjà amorcé, comme l'a relevé notre analyse spatiale du lit sur un plus d'un siècle.

b). Fonction socio-économique des îles

Il serait erroné d'affirmer que les îles ne sont apparues que lorsque la navigation a été abandonnée. Loin de nous cette idée puisque nous mettons en évidence que les formes fluviales ont joué, à des degrés divers, des rôles dans les activités économiques et sociales des populations riveraines. Il se trouve en effet que des îles très anciennes, encore présentes aujourd'hui, ont fait l'objet de beaucoup d'attention, non pas dans un esprit de sensibilité écologique de protéger un milieu insulaire, mais tout simplement parce que ces formes insulaires présentaient des intérêts importants.

Ainsi, il apparaît que les îles plus anciennes sont en fait celles qui correspondaient aux critères d'installation des populations humaines, et cela dès le Moyen-Age (Billacois,

2002 ; Dion, 1934). Ainsi une typologie des îles anthropisées peut être mise en place à partir des îles localisables en 1850 (sur les cartes de Coumes).

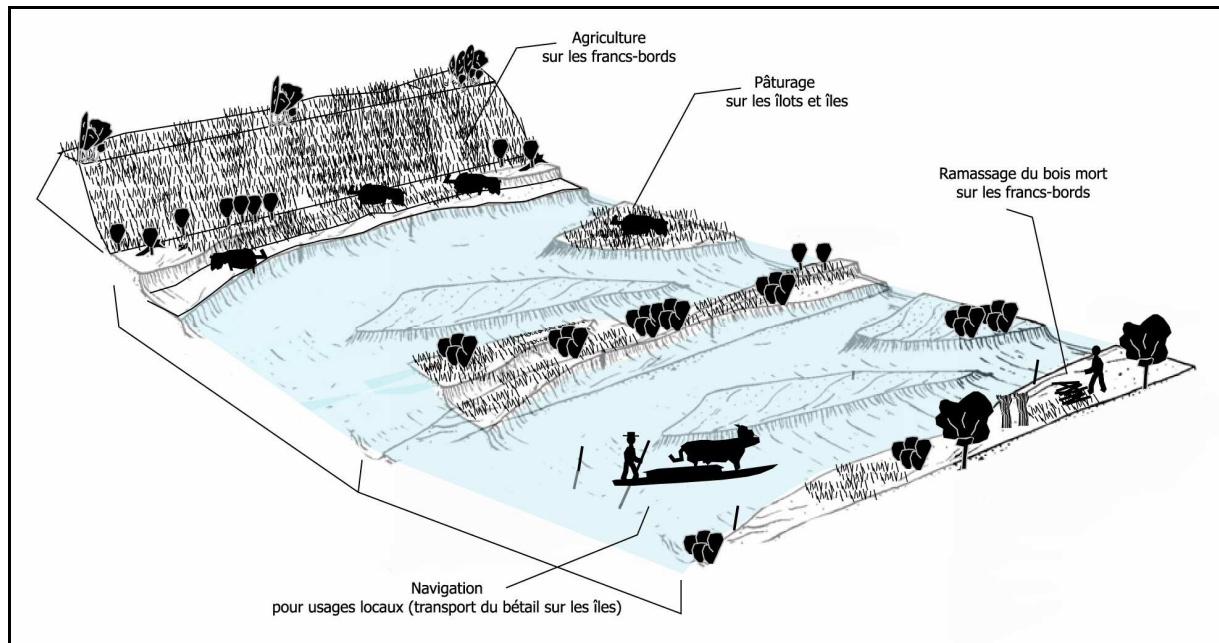


Figure 217 – Reconstitution du paysage fluvial au début du 20^{ème} siècle, après l’abandon la navigation.

- Des îles urbanisées : les faubourgs des villes portuaires

Le Moyen-Age est une période de grandes transformations des sociétés européennes (France, Saint-Empire). Cela se manifeste dans les campagnes avec ces grands défrichements que nous avons évoqués, et également dans les villes. Dès le XI^{ème} siècle, les villes françaises s’étendent comme celles situées le long de la Loire et tout particulièrement celles qui jouissent de leur commerce fluvial. A l’image des villes commerciales d’Europe (Venise, Bruges, Troyes), les villes se développent, obligeant bon nombre de nouveaux habitants attirés de s’installer dans des quartiers récents en dehors des remparts, les faubourgs. Or, il se trouve que certains faubourgs des villes portuaires de la Loire se sont développés dans le lit mineur, sur des îles. Ces îles étaient déjà utilisées pour leur position stratégique car centrale. Elles servaient de point de jonction aux ponts et aux systèmes de bac. C’est le cas ainsi des sites de Decize, de La Charité-sur-Loire (Faubourg de La Charité), d’Amboise (l’Entrepoint), de Tours ou encore de Saumur, qui ont toutes une île urbanisée équipée d’un pont.

- Des îles « pratiques »

Ce que nous appelons les îles pratiques sont tout simplement ces îles utilisées pour les besoins de la traversée du fleuve en y joignant un pont ou le passage d'un bac (Miejeac, 1994). On peut citer les sites de Cosne, de Chalonnes, de Gennes ou encore d'Ancenis.

Le site de Nantes est un excellent exemple d'îles assemblées, urbanisées et même pâturées pour les besoins de ce site portuaire historiquement important. Ce grand port négrier nécessitera de rassembler les îles et les utiliser pour les besoins fonctionnels du site commercial (Ile Beaulieu, Ile Héron ou encore Ile Gloriette).

- Des îles à vocation agricoles

Ce type d'île demeure très important dans le paysage fluvial et il se trouve aussi qu'il correspond à une évolution bien particulière dans les modes d'occupation de la vallée de la Loire. La dynamique économique est en effet importante. Dans notre secteur d'étude de la Loire moyenne, les îles ont été utilisées pour les besoins agricoles de manière très ponctuelle pour les plus anciennes, et assez tardivement pour l'ensemble : essentiellement à la fin du 19^{ème} et au cours du 20^{ème} siècles. Les îles du Bec d'Allier (Site 1), quelques unes du Site 3 et la grande île de Cosne ont été très tôt utilisées pour ces besoins agricoles (Billacois, 2002). Or, les îles situées en Loire inférieure, en se rapprochant de Nantes, sont encore cultivées et habitées (Gallard et Le Nevez, 2001). La dynamique économique est ainsi totalement différente entre les îles de la Loire moyenne que nous utilisons comme traceur géomorphologique des mutations du fleuve depuis le 19^{ème} siècle, et ces îles de la Loire aval où l'empreinte humaine est encore fortement présente (voir annexes). Les îles de la Loire (comme celles de Chalonnes et Ingrandes) ne sont pas les mêmes anthroposystèmes marginaux que celles de la Loire moyenne (Figure 218). C'est d'ailleurs dans ce même secteur que la Loire est encore naviguée ; ce qui en soit est tout un symbole du maintien dans cette partie du caractère économique et fédérateur de la Loire. On pourrait presque retirer l'adjectif « marginaux » pour les qualifier et parler alors d'anthroposystèmes intégrés, intégrés au système économique régional. Ceci permet d'affirmer que l'on ne peut pas se servir de ces îles de la Loire inférieure pour déterminer les rythmes de réajustement fluviaux de la Loire.

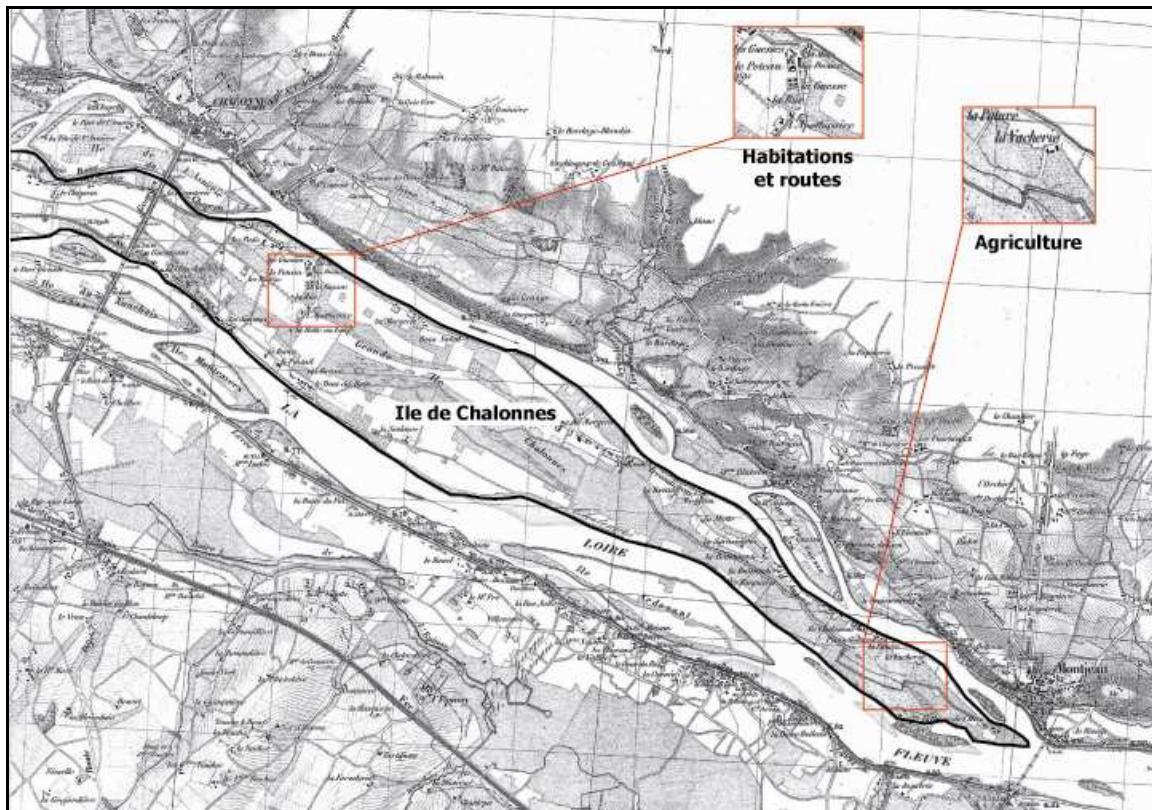


Figure 218 – Occupation de l’Ile de Chalonnais, à partir de la carte de Coumes (1850).
Ces cartes illustrent le niveau d’occupation des îles et montrent à quel point ces formes insulaires étaient utiles pour les activités humaines : île habitée et aménagée à vocation agricole.

2). Rôle des communautés riveraines

a). Evolution des pratiques agro-pastorales dans le Val de Loire

Le « jardinage paysager » de la Loire a connu « son âge d’or » durant le 19^{ème} siècle jusqu’au début du 20^{ème}, puis s’est progressivement ralenti au cours du 20^{ème} siècle pour amorcer une déprise relative à partir des années 1950. Dans le SA3, des adjudications ne sont plus renouvelées (comme sur l’Ile de Malaga à partir de la fin des années 1960), les pacages sont abandonnés progressivement (Mesves en 1954, Pouilly en 1970) et les plantations sont très peu conservées (Couargues les abandonne en 1950). De plus, la création d’une réserve de chasse fluviale en 1968 accélère la déprise agricole et sonne le glas de tous ces usages (Boissel, 1997).

Avec l’abandon de l’exploitation du Domaine Public Fluvial (D.P.F.), c’est tout l’entretien régulier des formes fluviales qui s’arrête. Cela a considérablement modifié le paysage ligérien de ce secteur dont la fonction agricole devient marginale (Figure 219).

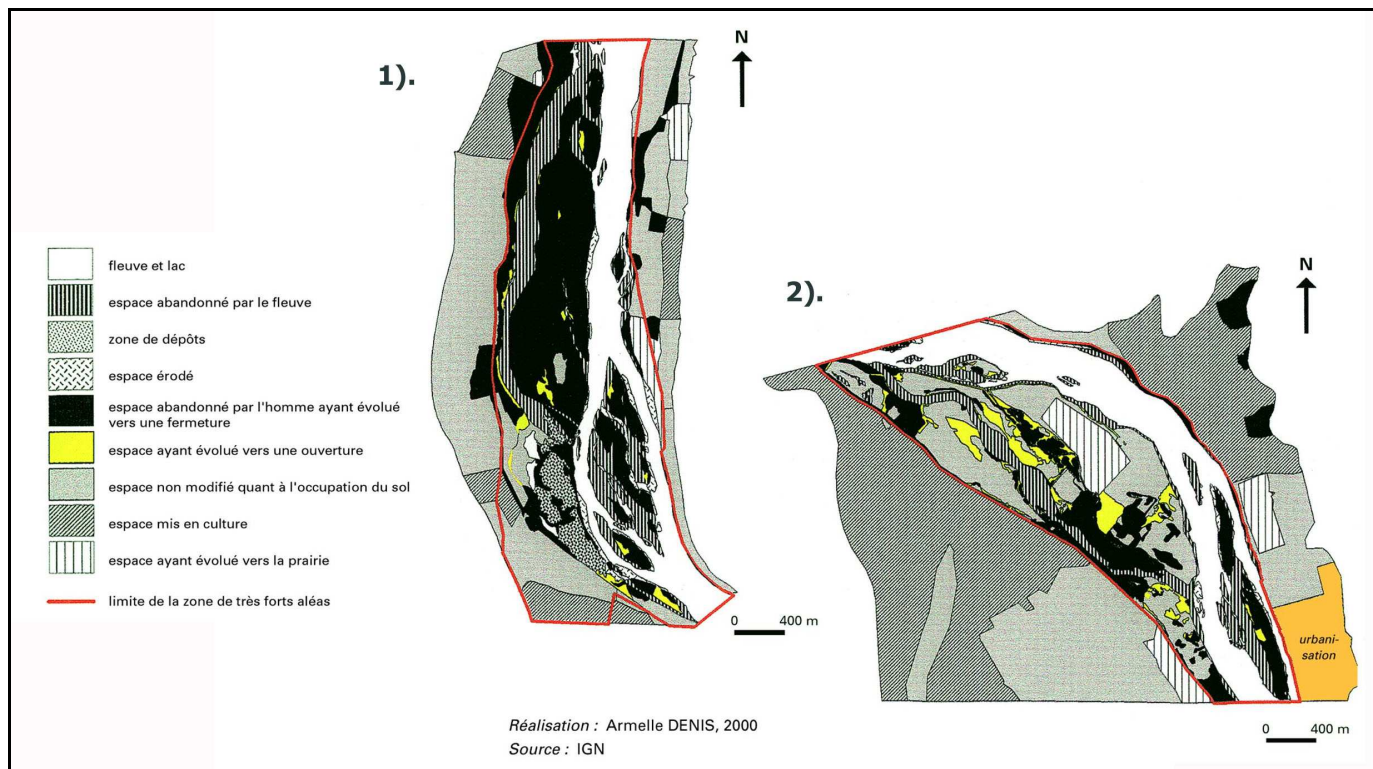


Figure 219 – Extraits cartographiques du PNRZH (Gautier et *al.*, 2001).

Ils illustrent en premier lieu la part importante des espaces délaissés par les activités humaines durant la seconde moitié du 20^{ème} siècle aux Sites Ateliers 1 et 2 : le départ de l'agriculture du lit mineur, couplé à l'action de l'industrie de granulats, contribuera à former la seconde génération d'îles.

La végétation s'est donc développée en passant par tous les stades d'évolution : landes, strates arbustives, strates arborescentes (forêt alluviale). Ces mutations paysagères et végétales ont impliqué des conséquences sur la morphologie des îles et des francs-bords jadis entretenus : augmentation de la sédimentation, fermeture des milieux, uniformisation du paysage (tous ces points seront détaillés par la suite lorsqu'il sera question des enjeux).

b). Depuis 1996, le retour d'un pastoralisme peu rentable

Le pastoralisme connaît un regain d'intérêt depuis ces 15 dernières années, non pas pour des intérêts économiques mais pour répondre à des exigences de développement durable et « écologique ». Cette activité agricole reste en effet très marginale, en France c'est un secteur très dépendant des aides européennes, et peu rentable. Le pastoralisme a été fortement valorisé et développé par les conservatoires régionaux d'espaces naturels (CREN) et les parcs naturels régionaux pour maintenir des milieux ouverts et une biodiversité. Les impératifs de Natura 2000 ont incité un peu plus à recourir au pastoralisme pour maintenir ces milieux ouverts (pelouses et prairies et semi-ouverts (landes). Le pastoralisme demeurerait la solution la plus souple en matière de gestion des

milieux naturels (Photographie 42). Cette politique a été développée en Loire moyenne de façon très ponctuelle, comme sur le large franc-bord de Guilly en amont d'Orléans (Loiret). Dans notre Site Atelier 3, la Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire, par le biais du Conservatoire des Sites Naturels Bourguignons, a mis en place ce maintien de milieux semi-ouverts sur le franc-bord de Mesves, celui qui a connu la plus importante extension et qui représente un des secteurs les plus diversifiés de la réserve naturelle.



Photographie 42 – Le néo-pastoralisme en Loire moyenne (Herry).
c). Rapport Loire - Société riveraine

Les usages liés à la Loire reflètent finalement l'évolution de la société française à travers les siècles. D'une vallée riche et tournée entièrement vers le fleuve depuis le Moyen-Age (Figure 220), nous sommes passés à une vallée désertée dans son ensemble au profit des grandes villes que nous ne trouvons qu'à partir d'Orléans. C'est dire que la Loire supérieure et moyenne a subi de plein fouet l'exode rural amorcé dès le début du 20^{ème} siècle et qui ne cessera jamais au cours de ce même siècle.

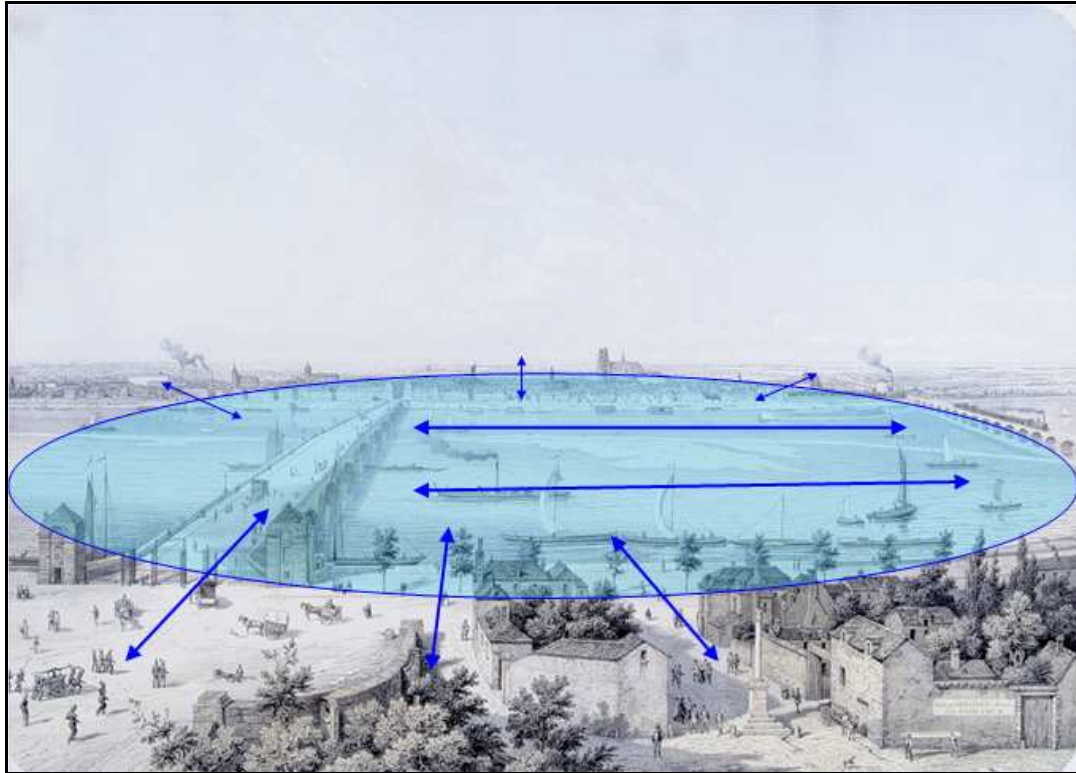


Figure 220 – La Loire, la colonne vertébrale des régions françaises.

La large ouverture du paysage environnant autour du fleuve montre ainsi que tout devait converger vers elle, non seulement les regards mais aussi les voies de communication, les rues, les villes... (Asselineau, 19^{ème} siècle, Musée de la Marine de Loire à Chateauneuf-sur-Loire)

Les sociétés riveraines sont « allées se réfugier » derrière les levées, là où l'agriculture bénéficie de grandes surfaces utilisables (Figure 221). Le lit intra-levées est alors laissé à lui-même et à la dynamique fluviale en plein réajustement. Les rapports si étroits avec le fleuve et même les formes fluviales disparaissent : les chenaux ne sont plus curés, les bancs laissés à leur libre fonctionnement, les îles peuvent se développer, les embâcles s'accumuler et la végétation pionnière trouve de grands champs d'expansion.

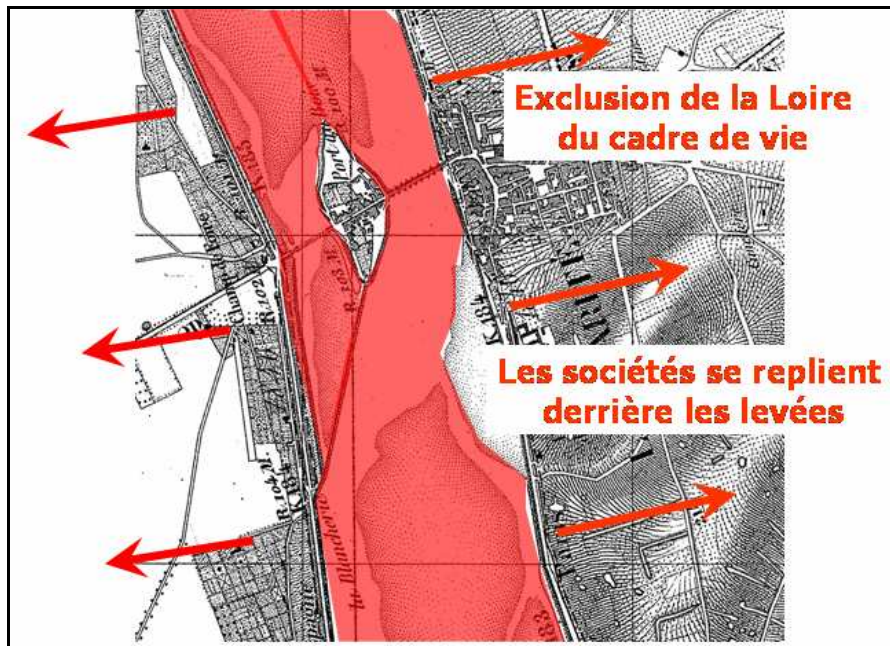


Figure 221 – Dès la fin du 19^{ème} siècle, et tout le long de la première moitié du 20^{ème} siècle, la Loire ne cessera de s'éloigner des riverains.

C Les changements contemporains : les grandes modifications du 20^{ème} siècle. Du statut de délaissé à celui de convoité

1). La place de l'industrie de granulat en Loire moyenne

a). Les extractions massives dans le lit mineur

A autre époque, autre mal. Il est difficile aujourd'hui d'ignorer que le déficit sédimentaire de la Loire est un mal chronique, auquel les gestionnaires essaient de faire face. Nous sommes toujours étonnés d'entendre, et on n'a pas fini de l'entendre, que la Loire est un fleuve de sable. Le fleuve actuel n'a jamais autant souffert d'une pénurie en sédiments, ces matériaux précieux pour tout hydrosystème fluvial. « ...Et ce fleuve de sable et ce fleuve de gloire... » (Peguy, 1913). Les populations riveraines détournées du fleuve et le déclin des activités agro-pastorales peu rentables dans la vallée de la Loire moyenne vont favoriser l'installation de l'industrie de granulat. L'hydrosystème Loire, comme de nombreux autres cours d'eau, fut considéré comme un formidable pourvoyeur en matières premières, eau et énergie (Figure 222). La reconstruction intensive et nécessaire d'après-guerre a nécessité des besoins énormes en sables pour le béton destiné à construire les villes nouvelles, les barres et tours, que l'on détruit aujourd'hui petit à petit. L'excès de ces

besoins a entraîné une pénurie en sédiments pourtant indispensables à l'équilibre hydro-sédimentaire.

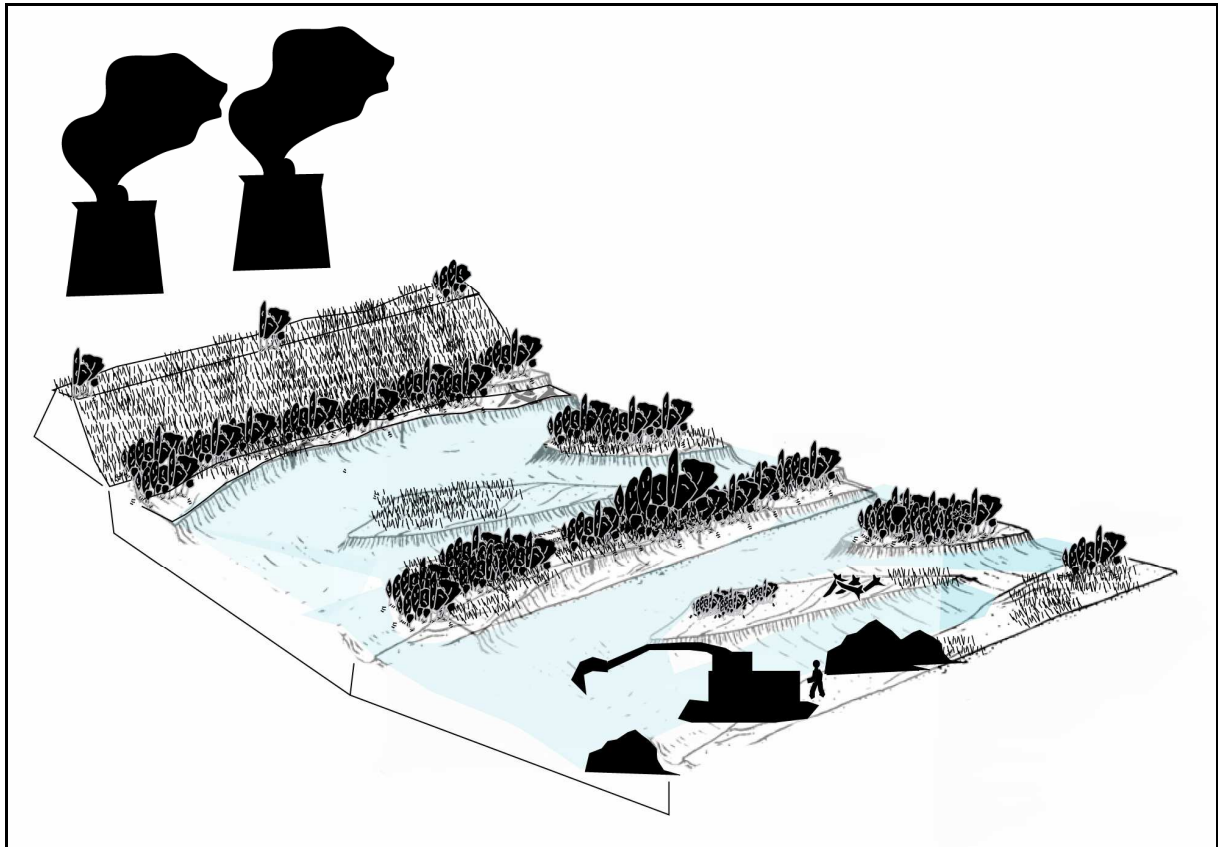


Figure 222 – Reconstitution du paysage fluvial d'après guerre (1945-1975).

Une nouvelle activité industrielle s'installe dans un paysage déjà en cours de mutation : l'extraction de granulats permettra d'alimenter les besoins énormes de la construction. Un déséquilibre sédimentaire et environnemental va alors s'engager dans les décennies suivantes. La végétalisation du lit était déjà bien avancée.

b). Impacts en Loire moyenne

- Ainsi, « on a puisé abusivement dans les ressources alluvionnaires du fleuve Loire en négligeant la valeur économique du sable » (Gasowski, 1994). En effet pour simple exemple, en Loire moyenne rien que pour la région Centre, on est passé de 0,5 million de tonnes par an de matériaux enlevés en 1960 à 6,4 millions de tonnes par an en 1979 (Gasowski, 1994). Y. Babonaux (1970) estimait une charge de fond à 250 000 tonnes par an ; on imagine alors le déficit sédimentaire exceptionnel créé en Loire.

Dans le Site Atelier 3, on estime qu'entre 1981 et 1993, six compagnies ont extrait dans le lit mineur 1,241 million de tonnes (Calard et Karlsson, 1994). L'exploitation du secteur a

été modeste par rapport à d'autres régions en aval mais elle a apporté sa contribution au déficit.

- Le schéma des conséquences est très connu, inutile de s'y attarder, et concerne l'incision et l'enfoncement du plancher alluvial. L'intérêt porté aux alluvions de la Loire a égrainé de nombreuses études consacrées aux disponibilités alluvionnaires (Berthois, 1972 ; Maillard, 1972 ; Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois, 1971). Ces études spécifiques ont été relayées par des rapports évaluant l'impact des extractions dans le lit mineur et l'intensité de l'enfoncement (Gasowski, 1994 ; Calard et Karlsson, 1994 ; Dambre et Malaval, 1993). Une thèse s'est intéressée à ces disponibilités alluvionnaires et aux transferts de sédiments dans la Loire dans ce contexte nouveau à l'aube des années 1980, celui de l'impact des extractions de granulats (Brossé, 1982).

L'enfoncement du lit est estimé à 3 cm en moyenne par an (Hydratec, 1996). Pour le secteur de la RN, cet enfoncement est évalué à 5 cm par an entre 1981 et 1993 (Calard et Karlsson, 1994). Le secteur de la Loire des îles enregistre un des enfoncements les plus importants, supérieur à ce qui a été mesuré jusqu'à présent, de l'ordre de 8 cm par an (Gautier et al., 2001) (Figures 4 et 125).

Les conséquences de l'enfoncement du lit sont nombreuses :

- érosion des berges
- abaissement de la nappe d'eau : dessèchement des zones humides connectées aux fleuves
- baisse de la ligne d'eau d'étiage
- accélération de la végétalisation des unités fluviales

Toute une réaction en chaîne s'opère au sein de l'hydrosystème ligérien. Ainsi, l'enfoncement du lit entraîne un abaissement du niveau d'étiage. Cela laisse à sec plus longtemps des secteurs du lit qui dans des conditions normales ne l'auraient pas été. Les formes fluviales à sec, comme des bras secondaires ou des îles, sont alors colonisées par la végétation qui peut se développer aisément ; ce qui concourt à donner une nouvelle morphologie aux unités fluviales et par voie de fait un nouveau paysage ligérien...

- Il semble pourtant important de souligner que, même si l'industrie de granulat a apporté sa pierre aux perturbations environnementales actuelles de la Loire, elle n'est en rien la seule responsable de la formation de cette Loire des îles que nous étudions.

Nous l'avons déjà montré dans le chapitre 3, l'enfoncement de la Loire moyenne était déjà amorcé dans la première moitié du 20^{ème} siècle, bien avant l'installation de l'industrie de granulat. En reconstruisant le profil en long du Site Atelier 3 depuis 1933, malgré une marge d'erreur certaine entre deux systèmes altimétriques différents, qui ne doit pas excéder les 10 cm, l'enfoncement du plancher alluvial était déjà amorcé dès la première moitié du 20^{ème} siècle (Figure 126). Cet enfoncement du fleuve correspond à tous ces siècles de contraintes du lit mineur imposées par la navigation et ses rigueurs d'entretien, de balisage et de chenalisation.

Il fallait replacer la bonne chronologie des perturbations sur l'hydrosystème pour démontrer que l'extraction industrielle reste un facteur très aggravant, et non déclencheur, de l'enfoncement du plancher alluvial de la Loire moyenne. Nous pouvons dénoncer que les sablières, en curant par alternance d'une rive à l'autre les chenaux, principal comme secondaires, ont déséquilibré la morphologie du lit mineur. Cette pratique a provoqué en effet le développement de zones de sédimentation et de végétalisation active ainsi que le perchement plus rapide de certains bras secondaires. Cela correspond ainsi à la deuxième génération d'îles analysée dans le chapitre 3.

2). La Loire : un espace convoité et les perturbations actuelles

a). Les grands barrages et les centrales nucléaires

- «La Loire, dernier fleuve sauvage d'Europe », voilà bien un slogan révélateur des montées écologiques de la fin des années 1970 et début des années 1980 (Courtet et *al.*, 1990). Face à l'EPALA (Etablissement Public d'Aménagement de la Loire et ses Affluents, devenu depuis Etablissement Public Loire), et à sa volonté de dompter le fleuve (EPALA, 1988 ; EPALA, 1987), les revendications écologiques sont montées en puissance à l'aube des années 1980, et ont inscrit le fleuve comme un atout majeur en matière de biodiversité paysagère, floristique et faunistique (Lunais, 1983). Nous ne rappelons pas ici le long débat, parfois virulent, et les mouvements d'opposition au tout aménagement de la Loire

de la fin des années 1980 ; la question des grands barrages est également très connue (Graf, 2005). Le contexte et l'issue du conflit ont porté à création du Plan Loire Grandeur Nature et à l'implication des conservatoires d'espace naturels dans la gestion du fleuve. Les grands aménagements du bassin versant de la Loire illustre en fait toute la considération économique du fleuve pour les besoins nationaux. L'aménagement du fleuve reflète la politique énergétique et les politiques d'aménagement du territoire français issues de la période gaullienne : développement du nucléaire, indépendance énergétique, création de la DATAR (Figure 2).

- Ce qui pourrait apparaître caché derrière l'aménagement actuel de la Loire n'est en fait que le fruit de plusieurs décennies d'intense politique d'aménagement du territoire d'après-guerre. L'abandon de la navigation et le déclin progressif de l'agriculture dans le lit mineur ont permis de marginaliser le fleuve par rapport à des sociétés humaines qui liaient leur existence à la Loire. Cette marginalisation de la Loire a entraîné un véritable manque d'intérêt local et l'a laissé tomber dans l'oubli, si bien que de nouveaux acteurs ont pu s'implanter et agir. Nous avons vu l'installation de l'industrie de granulats dans le lit délaissé de la Loire. Insistons aussi sur la volonté de se servir du fleuve pour répondre aux besoins grandissants d'une population, non plus locale, mais nationale. La politique des grands aménagements actuels du fleuve répond aux besoins en eau et électricité de la France d'après-guerre, celle des « Trente Glorieuses » (reconstruction, développement des villes nouvelles, essor économique) et des « Trente Piteuses » (crise économique, crise pétrolière et nouvelle politique énergétique de la France au profit du nucléaire). Les grands barrages des hauts bassins cévenoles et les centrales nucléaires en sont les dignes représentations.

La Loire est ainsi devenue un objet majeur d'aménagement du territoire. Cette fonctionnalité n'a fait que renforcer l'éloignement des sociétés vis-à-vis du fleuve. Il n'en fallait pas moins pour accentuer ce désintérêt en installant des aménagements dont la fonction est de servir des populations éloignées, aussi bien géographiquement que sentimentalement, du fleuve. Cet aspect a aggravé l'évolution du fleuve : les îles ont ainsi

pu continuer à se développer de manière accélérée au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle.

- Les grands barrages, sans compter les projets avortés ou en moratoire s'insèrent dans un grand système d'aménagement à l'échelle de tout le bassin versant, voire national, en permettant le fonctionnement continu des cinq centrales nucléaires de la vallée ligérienne et cela même en période de basses eaux. Le maintien d'un débit seuil tout le long de l'année, en particulier en période de basses eaux donc l'été, favorise également l'agriculture. Il ne s'agit plus des activités agro-pastorales jadis présentes dans le lit mineur, mais d'une agriculture intensive, celle des grandes cultures (dont le maïs très demandeur en ressource en eau), celle là même qui s'est installée largement après la seconde guerre mondiale derrière les levées ligériennes. Cette réalité de l'aménagement du territoire montre très bien que le rapport Sociétés-Loire a été entièrement déstructuré.

- De plus, la Loire constitue un enjeu primordial en matière de risque d'inondation. Aussi, lorsque le fleuve a été marginalisé au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle, son entretien a été également mis de côté du fait, bien entendu, des changements d'usages au sein de son lit mineur. Les institutions chargées aujourd'hui de l'entretien du lit de la Loire ont hérité de ces longues décennies d'abandon. Les industries de granulat ne nettoyaient pas le lit de la Loire comme cela était effectué au temps de la navigation. Leurs prélèvements ponctuels et alternatifs dans le temps (changement de rive) n'ont fait que renforcer un déséquilibre sédimentaire et accélérer le développement des formes végétalisées fluviales que l'on souhaite actuellement contrôler par un entretien. Ainsi, certains prétendent que, au temps des sablières dans le lit mineur, le lit était nettoyé, cela est on ne peut plus faux. En effet, ces sablières sont arrivées massivement à une période charnière de la formation des îles, c'est-à-dire avant ou pendant la seconde génération d'îles que nous avons révélée précédemment dans notre analyse spatiale. Or, s'il est vrai que, localement, l'expansion végétale était limitée à cause des diverses manœuvres de cette industrie, on ne peut pas en dire autant à l'échelle du corridor fluvial. L'enfoncement généralisé de la bande active est incontestable et imputable à cette industrie.

b).La sollicitation de la nappe alluviale

- L'eau est source d'enjeux géopolitiques et économiques, c'est bien connu, et cela à tous les niveaux d'échelles. La Loire n'échappe pas non plus à ces enjeux très actuels dans un contexte de sécheresses répétées depuis 2002 et de dérèglement climatique mondial.

- Pour la Loire, la sollicitation de la nappe alluviale est très forte depuis le développement des grandes cultures dans la plaine d'inondation, l'installation des centrales nucléaires et bien entendu l'augmentation de la population urbaine en France (besoins en eau plus forts). Des points de captage et des stations de pompage parsèment la plaine d'inondation en Loire moyenne. Dans notre Site Atelier 3, il se trouve qu'une station de pompage dernier cri fonctionne depuis 2002 et puise directement dans la nappe alluviale de la Loire. Cette station a été mise en place par la ville de Bourges pour les raisons que nous citons juste après (Martinhac, 2004).

- C'est un facteur également déterminant dans l'assèchement des bras mais aussi sur l'implantation des espèces pionnières adaptées. En effet, l'évolution que nous avons mise en avant est en relative accélération du fait d'une durée de basses eaux plus longue pour les bras secondaires qui subissent ce fait une colonisation accélérée de la végétation pionnière. Cela correspond à cette nouvelle génération de micro-îlots de bancs à caractère insulaire au sein même des bras secondaires, comme nous l'avons relevé dans notre approche à échelle fine. Il s'agit donc bien d'un facteur aggravant et accélérateur d'un processus engagé depuis plusieurs années.

Or nous avons mesuré que les chenaux secondaires longs et étroits (moins de 50 m de large) sont ceux qui se maintiennent le mieux face à l'expansion végétale alluviale. Or, si ces bras et notamment celui du secteur de l'île du Lac (site d'implantation des puits de captage) sont déséquilibrés dans leurs échanges avec la nappe alluviale, ce maintien sera compromis.

De plus, à la sollicitation humaine (agriculture et captage pour alimentation en eau) s'ajoute la sollicitation naturelle (augmentation du couvert végétal dans le lit et la plaine d'inondation). Les besoins hydriques de la végétation du lit mineur ont augmenté en même temps que se formait la Loire des îles : augmentation de la forêt alluviale. Il serait d'ailleurs intéressant de calculer la part de sollicitation biologique sur la nappe alluviale en

fonction de l'augmentation des surfaces boisées depuis le début du 20^{ème} siècle. Il s'agirait de tenir compte des besoins naturels en eau de plusieurs espèces majeures du lit ligérien et d'en évaluer leur impact hydrique sur la nappe alluviale.

- Les différentes formes de pollution

- Les puits de captage destinés à l'alimentation en eau potable de la ville de Bourges sont soumis à des pollutions aux nitrates importantes (Martinhac, 2004). C'est pourquoi cette ville a choisi de diluer son eau avec l'eau de la nappe alluviale de la Loire, captée à partir de l'Ile du Lac, située dans la Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire, le Site Atelier 3 (Figure 223).

Depuis 1986, la teneur moyenne en nitrates des stations de pompage de Bourges dépassait la norme européenne de 50 mg/l. C'est pourquoi depuis 2002, 20 000 m³ d'eau sont captés chaque jour dans la nappe alluviale de la Loire, afin de diluer celle des stations de captage de Bourges et obtenir ainsi un taux de nitrates moins élevé.

- Les conséquences de telles actions sont aujourd'hui bien connues notamment sur les zones humides (Fouque, 2006 ; Cosandey et Robinson, 2004 ; Gautier et *al.*, 2001) : abaissement du toit de la nappe alluviale, disparition de certaines zones humides, perte des effets filtres et tampons (notamment vis-à-vis des nitrates), diminution de la fonction épuratrice et par conséquent baisse de la qualité de l'eau, perte de leur rôle de recharge des nappes phréatiques et de soutien des débits d'étiage, dépérissement des boisements alluviaux, disparition de l'habitat de nombreuses espèces animales et végétales remarquables, disparition de frayères, assèchement des bras secondaires.

Les risques indirects sont le recours à la stabilisation artificielle des berges afin de garantir la pérennité de l'approvisionnement en eau potable : accélération des courants, perturbations des échanges nappe-fleuve.

Selon L. Martinhac (2004), en l'absence de mesures pour lutter contre la pollution de ses nappes phréatiques, la ville de Bourges va devenir de plus en plus « dépendante » de la Loire. Sans un suivi scientifique de l'impact de ces captages, les intérêts écologiques de la réserve ne pourront être préservés. Une demande d'autorisation récente de nouveaux captages dans la Loire par la ville de Bourges confirme d'ailleurs cette tendance.

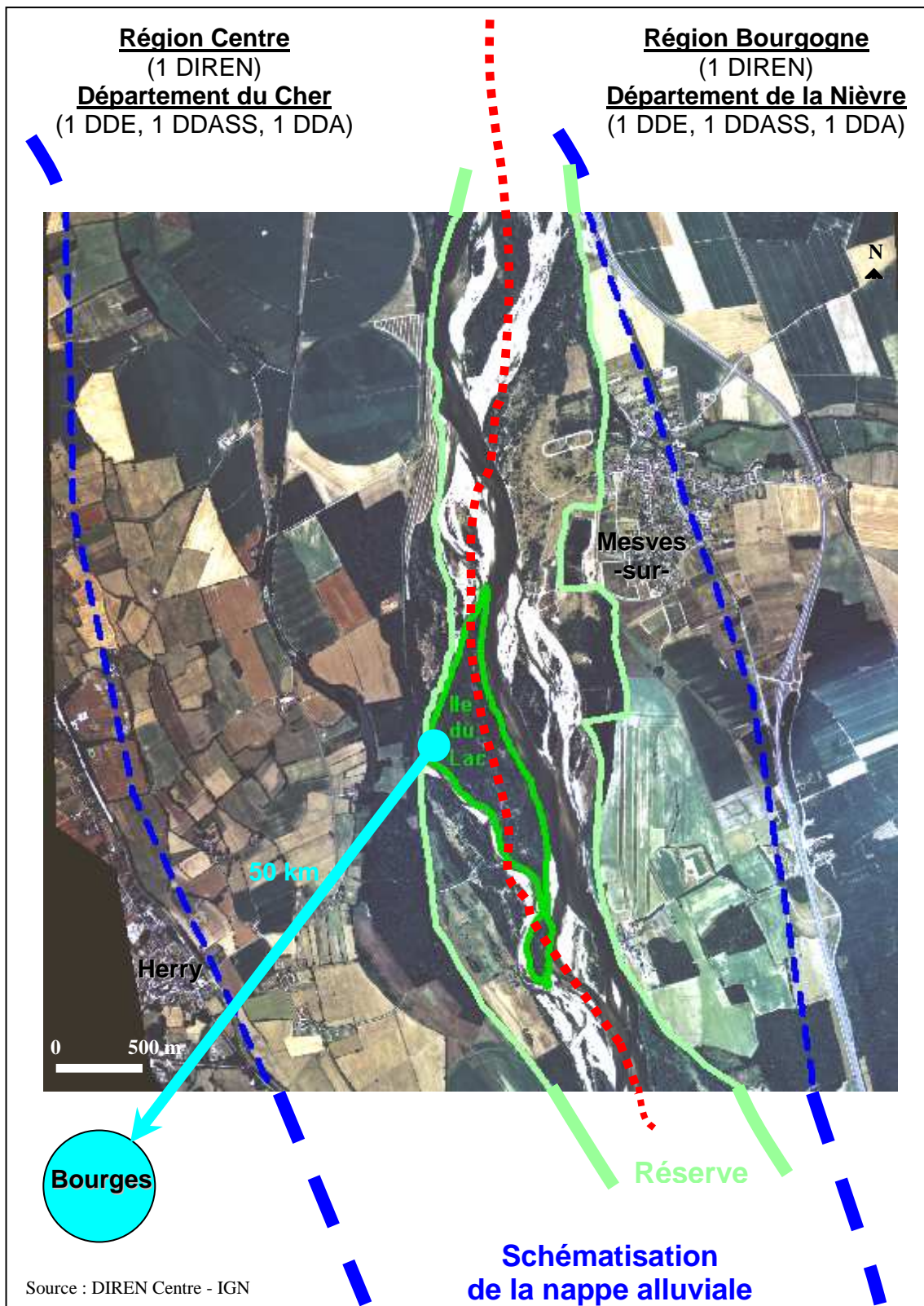


Figure 223 – Les puits de captage sur l’Ile du Lac.

3). L'entretien du lit aujourd'hui : les nouvelles relations avec les formes fluviales

Au déclin des rapports sociétés-fleuve correspond un retour de l'intervention de l'Etat au cours du 20^{ème} siècle dans le lit du fleuve. Cet élan illustre les nouvelles préoccupations de la gestion des cours d'eau en France : la lutte contre le risque d'inondation, les enjeux écologiques issus des années 1980, l'entretien et la restauration des hydrosystèmes fluviaux.

a). La gestion des hydrosystèmes fluviaux français

- Les hydrosystèmes français ont fait l'objet de bon nombre d'études et de guides méthodologiques pour leur entretien et leur restauration, généralement édités par les Agences de l'eau françaises, comme pour le bassin versant du Rhin (Agences de l'eau, 1999) et bien entendu de la Loire (Plan Loire Grandeur Nature, 2002) (Figure 224). L'entretien du lit de la Loire consiste ainsi en l'introduction de modifications dans un hydrosystème complexe et en l'accompagnement dans son évolution spatio-temporelle. La moindre rupture entre les composantes de ce milieu peut induire des conséquences inattendues. L'intervention de l'homme doit être fondée sur une bonne connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes fluviaux. Une étude détaillée est donc nécessaire pour préciser les travaux de restauration ou d'entretien du lit, comme celle que nous préconisons dans le dernier chapitre.



Figure 224 – Entretien actuel du lit de la Loire guide et méthode de terrain sont les outils ciblés.

Dans une perspective d'efficacité opérationnelle, les interventions doivent être en fonction :

- de la nature et l'ampleur du dysfonctionnement,
- des caractéristiques physiques et biologiques du site,
- de la fiabilité des données utilisables,
- des contraintes socio-économiques et paysagères,

b). L'entretien des formes fluviales

Nous nous sommes donc intéressé à nouveau à la relation avec les formes fluviales. Quelles sont les recommandations et instructions officielles d'intervention sur la bande active, les berges de francs-bords, les îles, les bras morts et les boires ? Nous ne faisons que reprendre les points essentiels du guide méthodologique d'intervention des gestionnaires du fleuve (Plan Loire Grandeur Nature, 2002), il ne s'agit en aucun cas de nos propres recommandations. Ces recommandations ont été appliquées dans le Site Atelier 3 tout particulièrement à La Charité-sur-Loire (Nabet, 2005 ; Bourreau, 2000 ; GHN, 1997 ; Ricou, 1995 ; Calard et Karlsson, 1994). Nous montrons, dans le chapitre 7, nos propositions d'intervention dans le lit de la Loire par l'approche géomorphologique.

Type d'entretien souhaitable dans la bande active :

- Les berges :
 - Recépage en haut de berge et au niveau du talus des arbres avec système racinaire traçant,
 - Coupe des arbres morts susceptibles de tomber,
 - Traitement de la berge par les techniques du génie végétal,
 - Conservation de certains arbres fixés à la berge.
- Le lit mineur :
 - Elimination des encombres en milieu de chenal.
 - Dévégétalisation des îlots formés en milieu du chenal.
 - fixer l'encombre (dans certains cas)

Type d'entretien souhaitable sur une île :

- recépage de tous les gros arbres en rives
- enlèvement ou fixation des encombres selon l'état de la berge.
- Suppression des arbres morts
- Le pâturage extensif pour l'entretien régulier de la végétation basse.

Type d'entretien souhaitable en bras mort :

- intervention sur la berge selon le principe de la diversité des tailles, des âges et des espèces,
- coupe d'arbres à système racinaire traçant (entretien de quelques arbustes, équilibre des berges)
- fixation de certains encombres en rive
- dévégétalisation en milieu du bras.

Type d'entretien souhaitable en boire :

- coupe d'arbres morts susceptibles de tomber dans la boire,
- Recépage en haut de berge des peupliers et frênes
- Recépage de rajeunissement des plus gros sujets
- Recépage de la végétation buissonnante des berges
- Fixation de certains encombres au niveau des berges

Conclusion

Les sociétés humaines ont toujours influencé l'évolution de la Loire, dès qu'elles y ont inscrit des enjeux économiques, vitaux et maintenant patrimoniaux. En fait, dès les grands défrichements du Moyen-Age, la Loire n'a eu de cesse de subir les actions les plus marquantes des sociétés humaines. Depuis le Moyen-Age, « le fleuve n'a plus rien de naturel » (Burnouf, 2002) certes, mais il est devenu un formidable indicateur physique de toutes les modifications de la société française des siècles écoulés. La Loire s'ajuste en fonction des modifications anthropiques et des conditions climatiques (Figures 225 et 226). L'absence de grandes crues susceptibles de régénérer le lit fluvial a favorisé le développement de la végétation au sein du cours d'eau, cela à travers l'extension des îles et

franc-bords. Cette évolution a provoqué la rétraction de la bande active et la création de bras morts.

Par ailleurs, les extractions massives qu'a connues la Loire entre 1950 et 1990 (au niveau du

Bec d'Allier) a accéléré l'enfoncement du plancher alluvial qui s'est accompagné d'un abaissement de la ligne des basses eaux (PNRZH, 2001) et d'un exhaussement progressif des chenaux secondaires. S'ajoute à cela la conception de différents aménagements (digue, chevrette) favorisant la chenalisation du fleuve et par conséquent l'incision du bras principal (concentration des eaux). Ces milieux ont été aussi abandonnés suite au déclin des pratiques agricoles et à la disparition de la navigation. Les ligériens cessent d'entretenir le lit de la Loire, ce qui a accru les surfaces boisées et l'encombrement du lit par la végétation (îles, atterrissements). En cas de crue, le débordement se produit plus rapidement dans ces chenaux étroits ou encombrés menaçant ainsi de nombreuses agglomérations installées dans le lit majeur.

Les travaux de restauration et d'entretien effectué par la DDE dans le cadre du PLGN s'articulent dans la perspective de réduire le risque d'inondation au sein des zones présentant des enjeux économiques et/ou écologique important. Cette tâche est assez difficile vu :

- la complexité du fonctionnement des hydrosystèmes fluviaux,
- la méconnaissance relative du fonctionnement de l'hydrosystème ligérien,
- la jeune expérience des intervenants dans ce domaine,
- la difficulté de prévoir les résultats, voire la réponse du cours d'eau après une modification,

L'intervention doit s'appuyer sur une fine analyse scientifique permettant de tester les méthodes et de localiser les secteurs d'intervention.

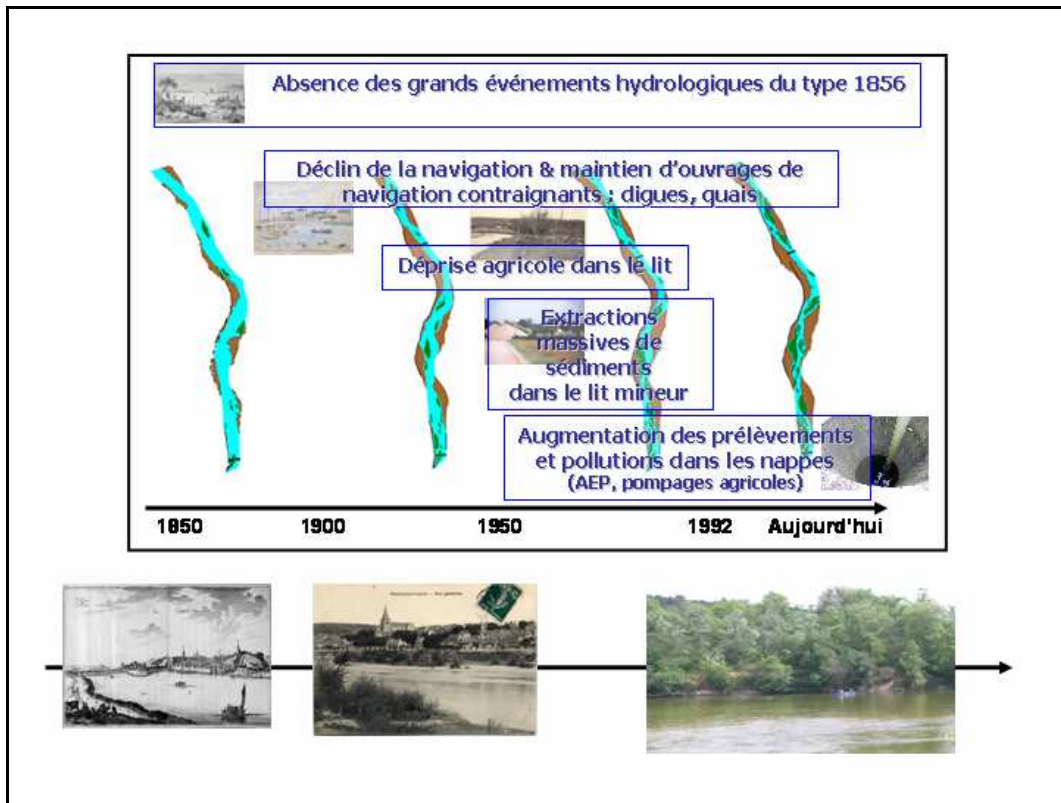


Figure 225 - Mise en corrélation des modifications du Site Atelier 3 et les facteurs déclenchants et aggravants.

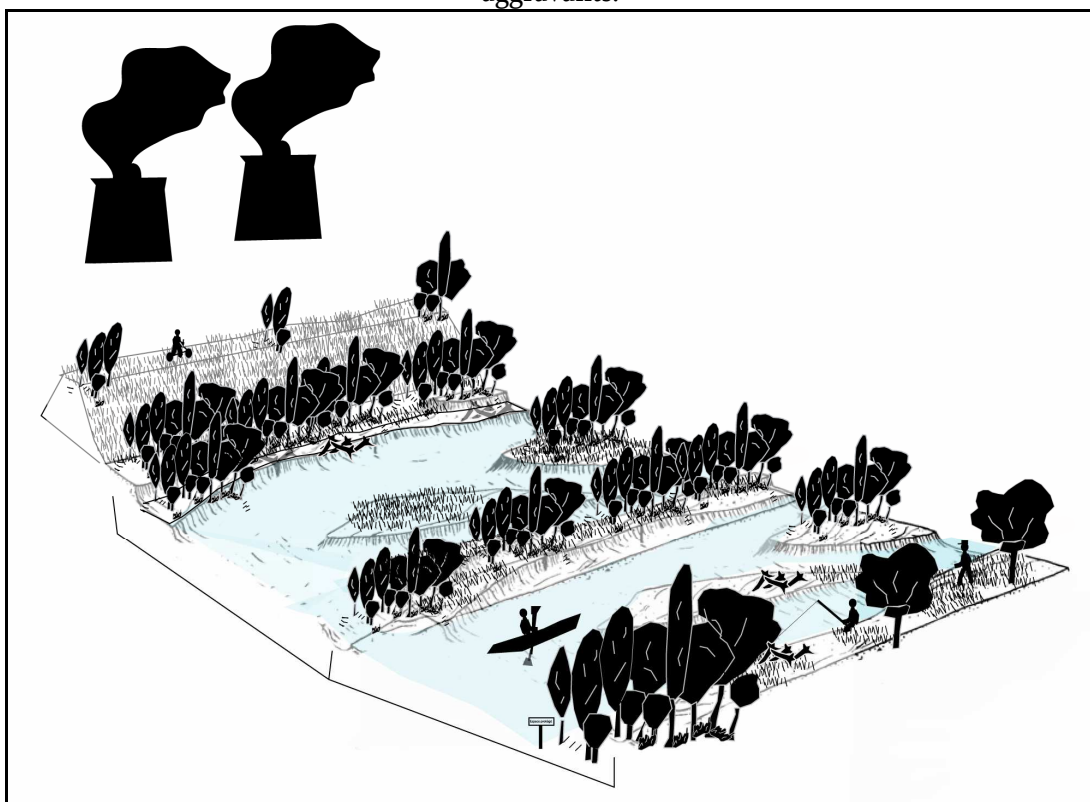


Figure 226 – Reconstitution du paysage fluvial actuel. Les formes fluviales jadis entretenues pour les besoins de la navigation se sont profondément modifiées.

D Analyse des chroniques hydrologiques depuis le 19^{ème} siècle

1). Evolution des données depuis le Moyen-Age

- Des sources différentes

Depuis l'œuvre de Maurice Champion sur les inondations du 6^{ème} au 19^{ème} siècles (Champion, 1863), il est un domaine bien cerné sur la Loire, celui de son hydrologie. Cela va de soi dans le sens où les gestionnaires du fleuve s'y sont d'abord intéressés dans le cadre du risque d'inondation. L'hydrologie française a été longtemps une discipline majeure et réputée (Cosandey et Robinson, 2000 ; Dacharry, 1974 ; Pardé, 1968 ; Roche, 1963 ; Pardé, 1923). Les organismes chargés de ces questions d'hydrologie ont ainsi établi des rapports et des études sur le fonctionnement hydrologique de la Loire. Le Service Hydrologique Centralisateur du Bassin Loire Bretagne (SHCBL devenu entre temps DIREN de Bassin) a engrangé un certain nombre d'études faisant encore aujourd'hui cas d'école. Pour ne citer que les plus importantes retenons surtout les travaux de reconstitution des débits des grandes crues anciennes (SHCBL, 1988). Des bureaux d'étude, sous-traitants du SHCBL, de la DIREN Centre et du Plan Loire Grandeur Nature, ont mis en œuvre des modélisations hydrauliques complexes (GHN, 1997 ; GHN, 1995 ; Sogreah, 1997). Une thèse majeure en hydrologie de la Loire, celle de Monique Dacharry (Dacharry, 1974) reste encore une référence, cela même trente ans après et malgré les progrès des outils d'analyse en hydrologie. Au cours de ces dix dernières années, les études liées de près aux flux d'eau et aux transferts hydrologiques se sont intéressées à des échelles un peu plus grandes comme celle de la composition géochimique des eaux et du transfert isotopique dans les flux du fleuve (Moatar et Meybeck, 2003 ; Négrel et *al.*, 2003 ; Grosbois et *al.*, 2000 ; Grosbois, 1998 ; Négrel et Grosbois, 1999).

Etrangement, plus de trente ans après la thèse de Dacharry (Dacharry, 1974), aucune thèse en hydrologie n'a vu le jour jusqu'à présent.

Nous disposons ainsi de deux types de sources pour exploiter les données et dresser les conditions hydrologiques des décennies et centuries passées (Dacharry, 1996 ; Dacharry, 1969). D'un côté les sources manuscrites, largement exploitées et retranscrites par M. Champion (1863), ainsi que les gravures des grands événements catastrophiques (Figure

227). Pour ce premier il va de soi que nous ne faisons que reprendre ce qui a déjà été analysé (Gautier, 1999) et nous nous en servons pour pointer les différentes grandes séries de crues intervenues au cours des siècles passés et bien entendu en parallèle à nos années de suivi (depuis 1850).



Figure 227 – Une scène de sauvetage en Loire moyenne suite à la crue de 1856 et à la rupture de certaines levées de rive gauche (Musée de Châteauneuf-sur-Loire).

L'autre type concerne les données hydrologiques mesurées par les stations dont la plus ancienne, celle de Blois, permet de dresser des chroniques hydrologiques indicatrices et pertinentes sur les débits de hautes eaux et basses eaux depuis 1863 (Figure 228). Pouvoir remonter aussi loin nous permet ainsi de faire correspondre ces débits mesurés avec les rythmes d'évolution de la Loire des îles.

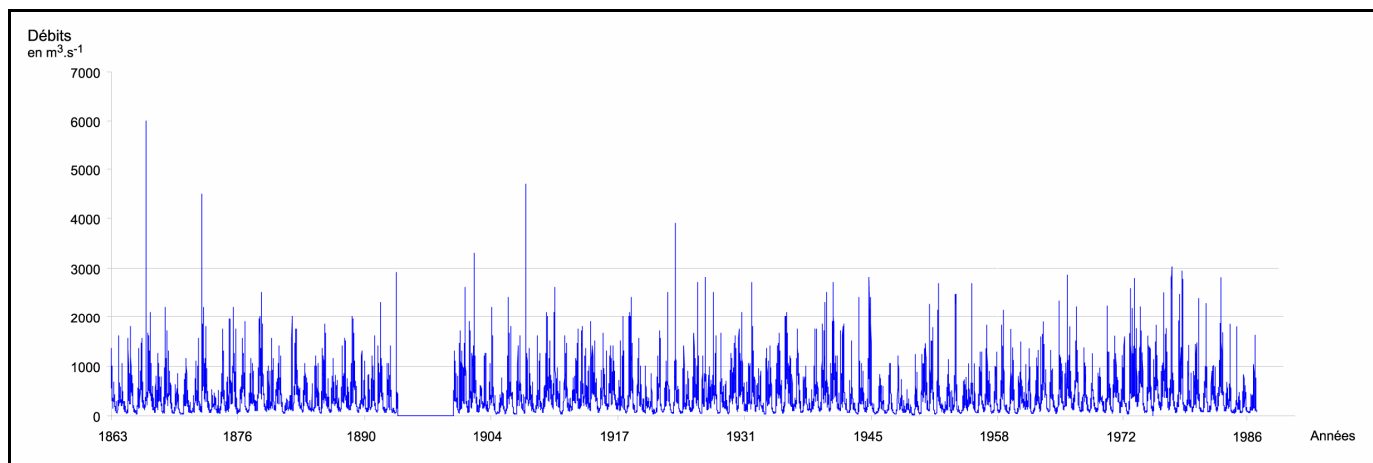


Figure 228 – Chronique des débits mesurés depuis 1863, à la station de Blois (Loire moyenne).

- L'hydrologie ligérienne depuis le Petit Age Glaciaire

L'hydrologie ligérienne au cours du Petit Age Glaciaire est un exemple des conditions hydrologiques existantes en Europe de l'Ouest. Les grandes crues de la Loire (1846, 1856 et 1866) ont marqué la fin de cette période. Il apparaît ainsi que l'irrégularité saisonnière des événements hydrologiques majeurs avant le 20^{ème} siècle laisse la place à une plus forte irrégularité interannuelle (Figures 229 et 230). En effet, les événements supérieurs à 3000 m³.s⁻¹ se font plus rares et ne dépassent pas le nombre de six depuis 1907. Nous notons en résumé une forte hydraulité au cours du 15^{ème} avec une nette importance des crues d'hiver. Cependant, sur l'ensemble des périodes étudiées, on ne peut pas déterminer une tendance dans l'évolution de la saison des crues.

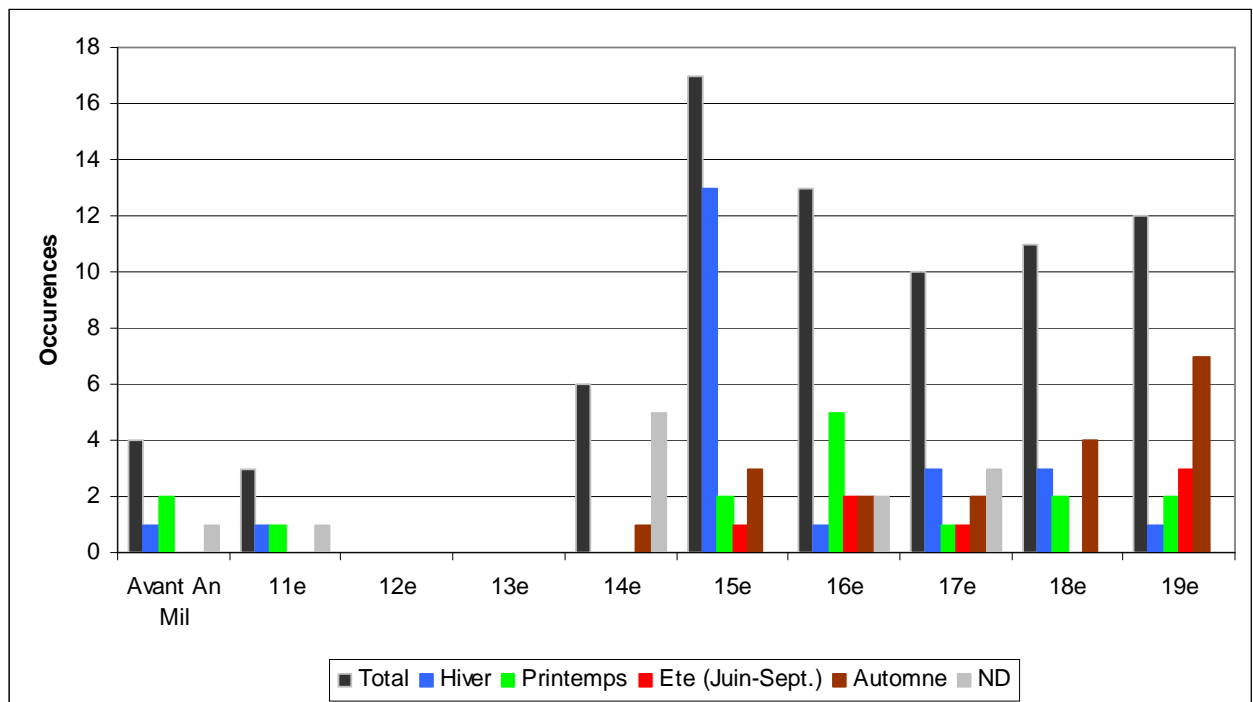


Figure 229 – Répartition saisonnière des crues de la Loire depuis l'an Mil.

(C. Castanet & E. Gautier, 2008 d'après : Dion, 1961; Dacharry, 1974 & 1996 ; SHC Loire, 1975; Diren BLB, 1988; Burnouf et Carcaud, 1999; Bouquet, 2000; Champion, 2001, Miejac, 2002).

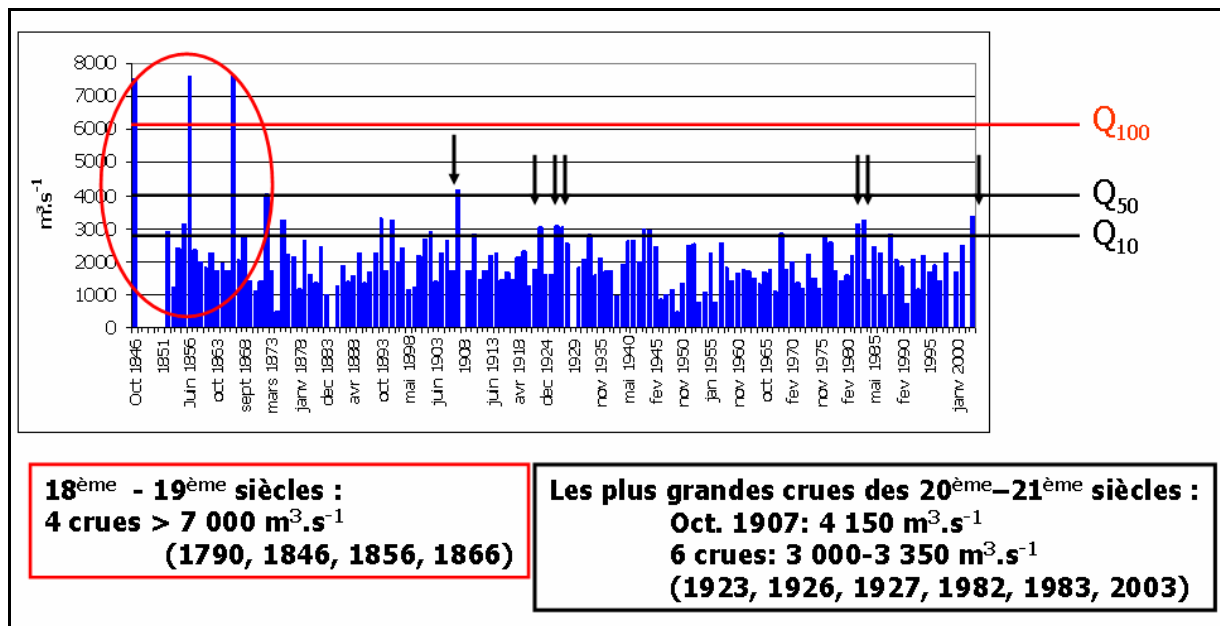


Figure 230 – Mise en évidence des événements hydrologiques majeurs en Loire moyenne depuis 1846. Il s’agit ici de montrer la rareté, au cours du 20^{ème} siècle, des débits supérieurs à 3000 m³.s⁻¹.

2). L’assouplissement hydrologique depuis la fin du 19^{ème} siècle

- Analyse des durées de basses eaux depuis 1860

Nous nous sommes donc penchés sur l’étude fine des débits de basses eaux que nous estimons déterminants pour l’installation de la végétation pionnière. En effet, non seulement la végétation pionnière alluviale (peuplier et saule) est dépendante des conditions climatiques, pour la germination des graines et la croissance des plants (dès le printemps) mais également de la durée des basses eaux qui vont déterminer l’implantation des jeunes plants (Schnitzler-Lenoble et Carbiener, 2007 ; Hupp et Osterkamp, 1996).

Ainsi, nous partons de la définition de basses eaux, à savoir tous les débits inférieurs au débit moyen (350 m³.s⁻¹), en prenant comme référence la station de Blois en Loire moyenne, située certes bien en aval des Sites Ateliers mais possédant l’avantage de données hydrologiques anciennes plus faciles à corrélérer à notre approche moyenne (depuis 1863). Nous sommes donc partis de tous les débits inférieurs à 350 m³.s⁻¹ et n’avons retenu que les durées de basses eaux durant la période propice à l’expansion végétale, à savoir entre avril et octobre de chaque année (Photographies 43 et 44). C’est donc la durée des basses eaux dans une même année qui nous a intéressé et nous avons ainsi pu construire des graphiques statistiques de ces durées en continu, et en dresser l’interprétation

adéquate. Nous cherchions à montrer que la durée de basses eaux dans une même année, et surtout si elle se poursuit d'une année à l'autre, depuis la fin du 19^{ème} siècle, a en fait créé les conditions nécessaires à l'installation de la végétation pionnière sur les formes mobiles. Les variables hydrologiques sont extrêmement importantes dans ces milieux alluviaux (Cornier, 2002, Amoros, 1996). Il était dans notre intérêt de montrer ce degré d'importance avant de passer aux relations milieux-sociétés humaines.

- La synthèse de ces données se retrouve dans le tableau XXIV et montre toute l'importance des débits de basses eaux qui représentent plus de 40 % des débits enregistrés

Tableau XXIII – Répartition des débits classés sur la période 1863-2005
(source Banque hydro et DIREN-Centre)

Débits	Nombre de jours	Part de chaque classe
> 800 m ³ .s ⁻¹	4 851	10 %
350 <x< 800 m ³ .s ⁻¹	13 501	28 %
100 <x< 350 m ³ .s ⁻¹	21 341	44 %
< 100 m ³ .s ⁻¹	8 760	18 %



Photographie 43 – La Loire à Gien au cours d'un étiage sévère à l'été 1949.



Photographie 44 – La Loire en période de basses eaux

Nous constatons aussi que la durée des basses eaux, dans la période propice à la végétation pionnière (avril-octobre), dépasse les 100 jours (la moyenne étant de 160 jours ; pour un maximum enregistré de plus de 300 jours en 1905) (Figure 231). Il n’y a aucun changement significatif de ces périodes de basses eaux depuis 1905. De très courtes périodes apparaissent (1923, 1927, 1935, 1936, 1937), avec moins de 50 jours consécutifs de basses eaux. Aucun seuil temporel majeur ne peut être véritablement relevé sur ce pas de temps, ce qui indique que l’hydrologie ligérienne ne s’est que peu modifiée au cours du 20^{ème} siècle. Même la présence de grands barrages en amont à partir des années 1970 n’apporte pas de grandes modifications ; ils participent essentiellement au soutien d’étiage.

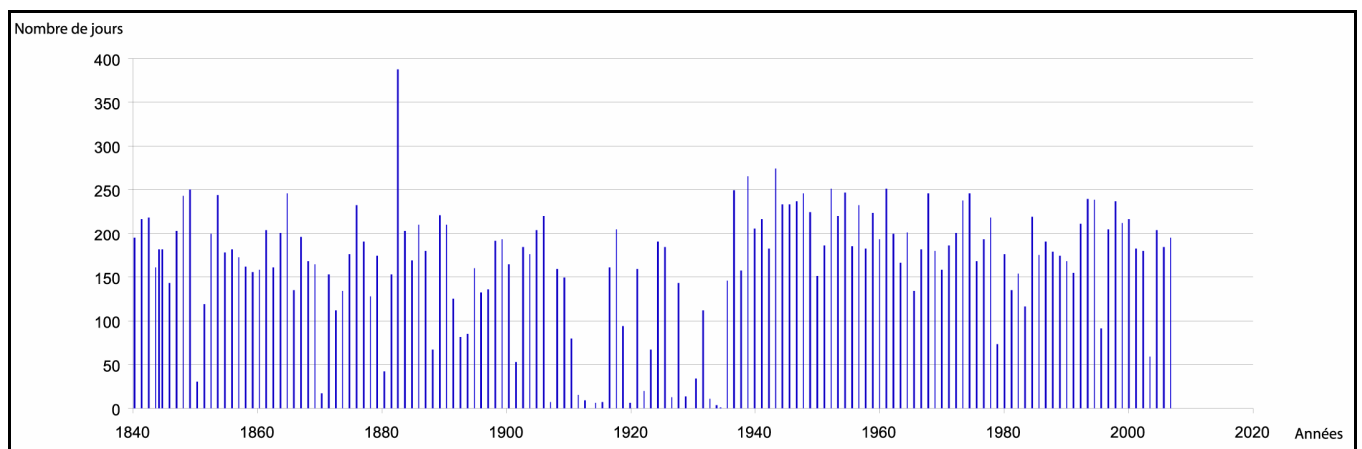


Figure 231 – Durée des basses eaux en continu par année de 1863 à 2005.

On constate la relative régularité des basses eaux à la fois dans leur rythme inter-annuel et dans leur longue durée (en moyenne 160 jours continus).

Au regard de ces divers résultats en hydrologie, très peu de changement apparaissent. On sait que lorsque plus aucun facteur humain ne vient contrarier l'installation de la végétation pionnière dans le lit de la Loire, seuls les facteurs naturels peuvent encore limiter cette colonisation biologique (Amoros et *al.*, 1996). Or, le facteur naturel encore susceptible de contrôler et limiter l'expansion végétale sur les formes mobiles comme les bancs et les grèves demeure les hautes eaux et la durée de submersion saisonnière. Si les bancs et les bras secondaires sont suffisamment submergés dans l'année, la végétation ne pourra s'y installer que très difficilement empêchant les graines de se développer et donner de nouveaux plants (Dufour, 2005 ; Pautou, 2003). Cependant, notre analyse des chroniques de basses eaux fait ressortir une très forte régularité inter-annuelle et une durée intra-annuelle étendue (Figure 231), deux phénomènes favorables à la végétation pionnière puisque se déroulant lors de la période de germination des graines et de croissance des plants. Les courtes périodes concernées par une durée plus courte et répétée des basses eaux, ne correspondent pas une modification ou à un ralentissement de la végétalisation du lit ; bien au contraire puisque nous notons une accélération de ce processus après 1930.

Cependant, nous ne notons aucune évolution significative de l'hydrologie de la Loire aussi bien dans son rythme saisonnier, qu'au niveau des périodes de basses eaux. L'hydrologie de la Loire ne se caractérise pas par des seuils marquants.

- Analyse des hautes eaux depuis 1825 (Figure 232).

Nous nous sommes intéressés au rôle des crues et de ces débits dits morphogènes (Amoros et *al.*, 1996). Quels sont leurs impacts sur la végétation ligérienne et les modelés géomorphologiques ? Il y a bien eu des crues au cours du 20^{ème} siècle, des débits dits morphogène à répétition, mais elles n'ont pas limité la végétalisation du lit de la Loire.

Au regard de la figure 233, nous notons que depuis la fin du 19^{ème} siècle le régime des hautes eaux s'est modifié. Si le 19^{ème} siècle est encore marqué par des périodes de hautes eaux très réparties dans l'année (20 % de ces périodes se déroulent même en été), le 20^{ème} siècle est marqué par des changements nets de ces périodes de hautes eaux dans l'année.

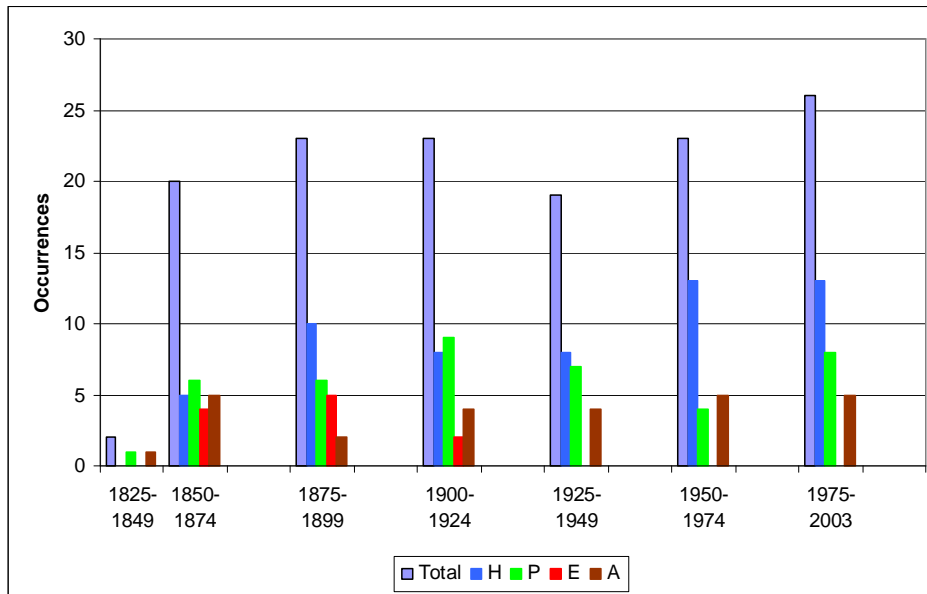


Figure 232 – Maxima journaliers supérieurs au plein bord ($Q_1 > 1\ 000\ m^3.s^{-1}$).
(E. Gautier, d'après données Diren SHC et Réseau Cristal)

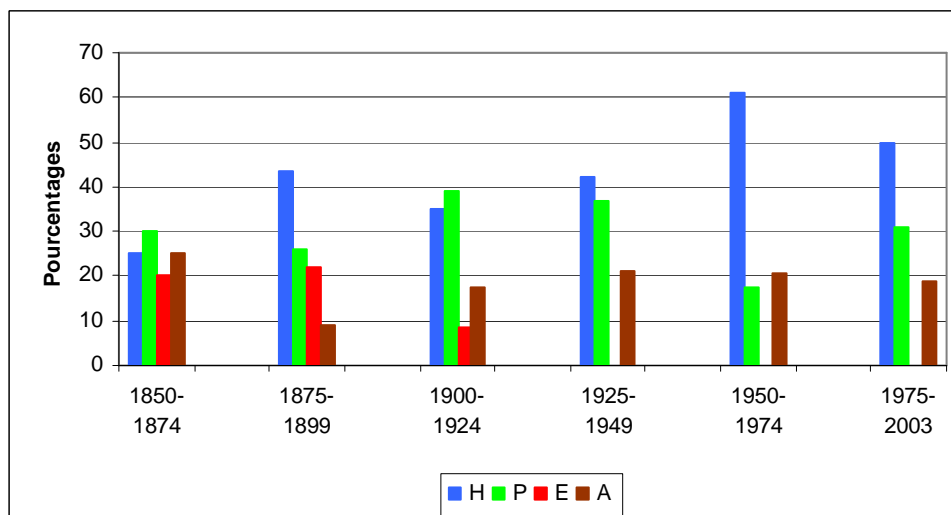


Figure 233 – Evolution saisonnière depuis 1825 à la station de Givry - Fourchambault
(E. Gautier, d'après données Diren SHC et Réseau Cristal)

Ainsi, les périodes de hautes eaux estivales disparaissent radicalement dès 1925 avec une nette importance pour les hivers et dans une moindre mesure les printemps. La Loire étant connue pour son caractère capricieux, les crues sont essentiellement concentrées sur les hivers et les printemps (situation actuelle). Ce changement de régime intra-annuel montre les conditions qui ont été offertes à la végétation pionnière pour se développer durant les périodes de basses eaux.

Cependant, les basses eaux ont toujours existé, les crues estivales, lorsqu'elles étaient effectives avant 1925, n'ont jamais empêché le fleuve de se modifier. Les rythmes d'évolution mis en évidence dans l'analyse spatiale ne correspondent donc à aucun changement de l'hydrologie du fleuve. L'hydrologie ne peut pas être considérée comme un facteur explicatif des changements observés dans la morphologie de la Loire moyenne depuis le 19^{ème} siècle.

Cette analyse des facteurs socio-économiques et l'étude des chroniques hydrologiques tout du long de ces plus d'un siècle et demi de suivi permet de souligner les points suivants :

- Les extractions ont aggravé le réajustement fluvial dès les années 1960 et concouru ainsi à la formation de la seconde génération d'îles observées grâce à l'analyse spatiale.
- Elles n'ont fait que renforcer ce processus enclenché dès la fin de la navigation et de tous les travaux d'entretien inhérents à cette activité.
- La navigation a joué un rôle primordial et moteur dans le fonctionnement du lit fluvial. Ce lit était alors entièrement entretenu et « choyé » pour les besoins vitaux et techniques de la navigation. Durant plusieurs siècles, la navigation ligérienne a entretenu un large lit vierge de tous obstacles biologiques et géomorphologiques. Les îles, lorsqu'elles ne servaient pas de faubourg, de points d'appui aux ponts ou encore à l'agriculture, étaient systématiquement limitées dans leur développement, voire détruites car jugées trop encombrantes.
- L'arrêt de la navigation est le facteur déclenchant de la végétalisation active du lit entamé dès la fin du 19^{ème} siècle. La première génération d'îles enregistrées dans le chapitre 3 est issue directement de cette mutation profonde historique importante. Tout ce qui pouvait empêcher la végétation de se développer et croître prenait ici fin. En même temps qu'un pan de l'histoire du fleuve, l'arrêt de la navigation sonnait le glas à toute une forme d'entretien du fleuve et par là même faisait entrer le fleuve dans une nouvelle ère dont nous observons aujourd'hui les conséquences.

- Les maux chroniques du 20^{ème} siècle, comme le déficit sédimentaire et l'incision du lit, sont des facteurs aggravants qui n'ont rien arrangé au problème de végétalisation ainsi engagée.
- Les chroniques hydrologiques depuis 1850 révèlent peu de modifications du régime hydrologique :
 - ☞ Augmentation de la part des crues hivernales et absence, depuis 1925, de crues estivales
 - ☞ Régularité de la durée des basses eaux
 - ☞ L'hydrologie n'est ni un facteur déclenchant, ni un facteur aggravant des réajustements fluviaux observés en Loire moyenne depuis le 19^{ème} siècle.

Chapitre 7- Nouvelles gestions du lit et perspectives scientifiques

L'approche géomorphologique demeure une composante indissociable de tout travail de restauration ou d'entretien des hydrosystèmes fluviaux (Malavoi et BIOTEC, 2007 ; Malavoi et *al.*, 1998; Agences de l'eau, 1999 ; Bravard et *al.*, 1999). La compréhension du fonctionnement de la Loire des îles apporte de nouveaux éléments de gestion adaptée, en adéquation avec l'hydrosystème. Nous proposons de présenter des perspectives de gestion et de recherche au regard des résultats majeurs de la thèse. Ces derniers intègrent notamment l'intervention dans le lit de la Loire.

A. Perspectives de gestion en Loire moyenne

1). Les nouvelles relations avec les formes fluviales

a). L'expertise géomorphologique

Comme nous l'avons présenté dans le premier chapitre, la thèse s'intègre dans une logique de recherche qui remonte à plus de 10 ans, depuis les collaborations scientifiques dans le cadre du Life Loire Nature jusqu'à la ZAL. A la lumière des résultats de cette thèse et des travaux précédents, nous sommes en mesure de bénéficier d'un certain recul et d'un retour d'expérience (plus de 10 ans) pour interpréter l'évolution des travaux de restauration sur les bras secondaires et les îles de la Loire moyenne.

- L'expertise géomorphologique nous permet de proposer une restauration de l'hydrodynamisme du fleuve en tenant compte de son évolution. Ainsi, entre 1995 et 2007, nous pouvons dresser le bilan des travaux en géomorphologie fluviale sur les sites ateliers de la Loire moyenne (Figure 234).

Ce bilan répond à 5 grands objectifs :

- ☞ Effectuer une typologie des différents travaux de restauration et d'entretien ;
- ☞ Analyser la réponse de l'hydrosystème aux interventions antérieurement réalisées : impacts des travaux ;
- ☞ Evaluer l'efficacité des opérations de restauration du lit mineur ;
- ☞ Préconiser des recommandations de restauration ;
- ☞ Cibler les sites définis par l'approche hydro-géomorphologique : suivi des formes fluviales de la Loire (îles et bras secondaires)

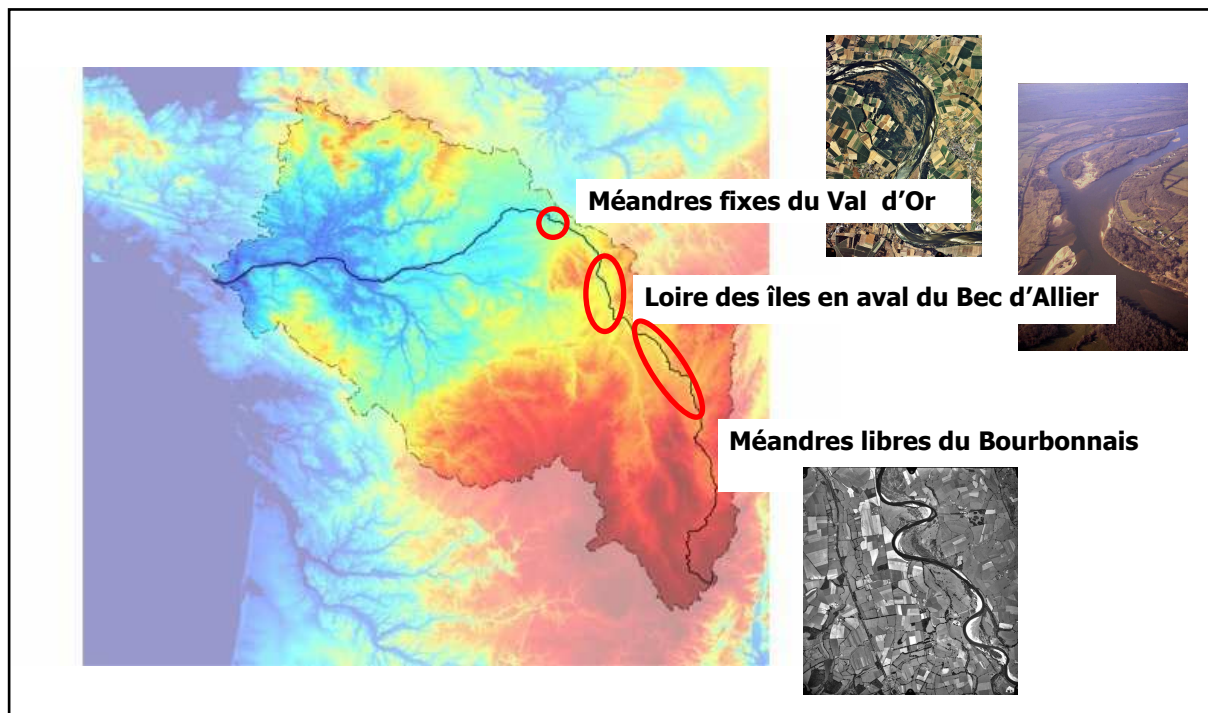


Figure 234 – Les sites étudiés en Loire moyenne depuis 1996.

Ainsi, nous prenons comme exemple le site de Fourchambault, site atelier de la Loire des îles en aval du Bec d'Allier (Nabet, 2006). Il apparaît que différentes phases de travaux ont été entreprises sur ce site dans le cadre de la restauration du lit de la Loire (BIOTOPE, 2005 ; Plan Loire Grandeur Nature, 2002). Ces travaux, de 2002 à 2004, se sont articulés à la fois sur la restauration d'ouvrages de navigation (2 chevrettes) et sur la dévégétalisation des formations encombrant le lit (pour améliorer les conditions d'écoulement) : dévégétalisation, scarification des bras secondaires et prolongement des ouvrages ont ainsi été exécutés par les maîtres d'ouvrage (Figure 235).

Plus de deux ans après, l'évaluation de l'évolution du même site a été réalisée afin de comprendre les effets à court terme de ce type d'intervention dans le lit. Les résultats sont très significatifs puisqu'ils se traduisent par un retour de la végétation pionnière dans les zones dévégétalisées et scarifiées, par une érosion des berges opposées la chevette restaurée et prolongée, et enfin par une accélération de la sédimentation en arrière des dites chevrettes (Figure 236). En conséquence, les travaux de restauration ont certes rétabli des conditions d'écoulement favorables, mais l'évolution du fleuve demeure inchangée : à savoir une végétalisation et une accrétion forte dans les bras secondaires,

encore plus dans les bras situés en arrière de chevette (comme Fourchambault, et aussi La Charité-sur-Loire). Les résultats de cette thèse montrent parfaitement cette tendance d'évolution des bras secondaires à la végétalisation. Il semble donc que toutes les expériences d'intervention n'ont pas été aussi concluantes puisque les bras secondaires, tout comme les îles jeunes, restent les unités fluviales privilégiées actuelles du stockage sédimentaire. Il est donc nécessaire de tenir compte de cette évolution et, comme nous l'avons étudié avec les différents bras du Site Atelier 3, de la spécificité hydro-dynamique de chaque bras secondaire. L'analyse géomorphologique, celle que nous avons développée dans cette thèse, reste donc la voie privilégiée pour mettre en œuvre les travaux de restauration adéquats (Gilvear, 1999). Des formes d'aménagements peuvent alors être proposées en fonction de chaque site d'intervention (Figure 237).



Figure 235 – Typologie et fréquence des travaux de restauration du lit (Site de Fourchambault).

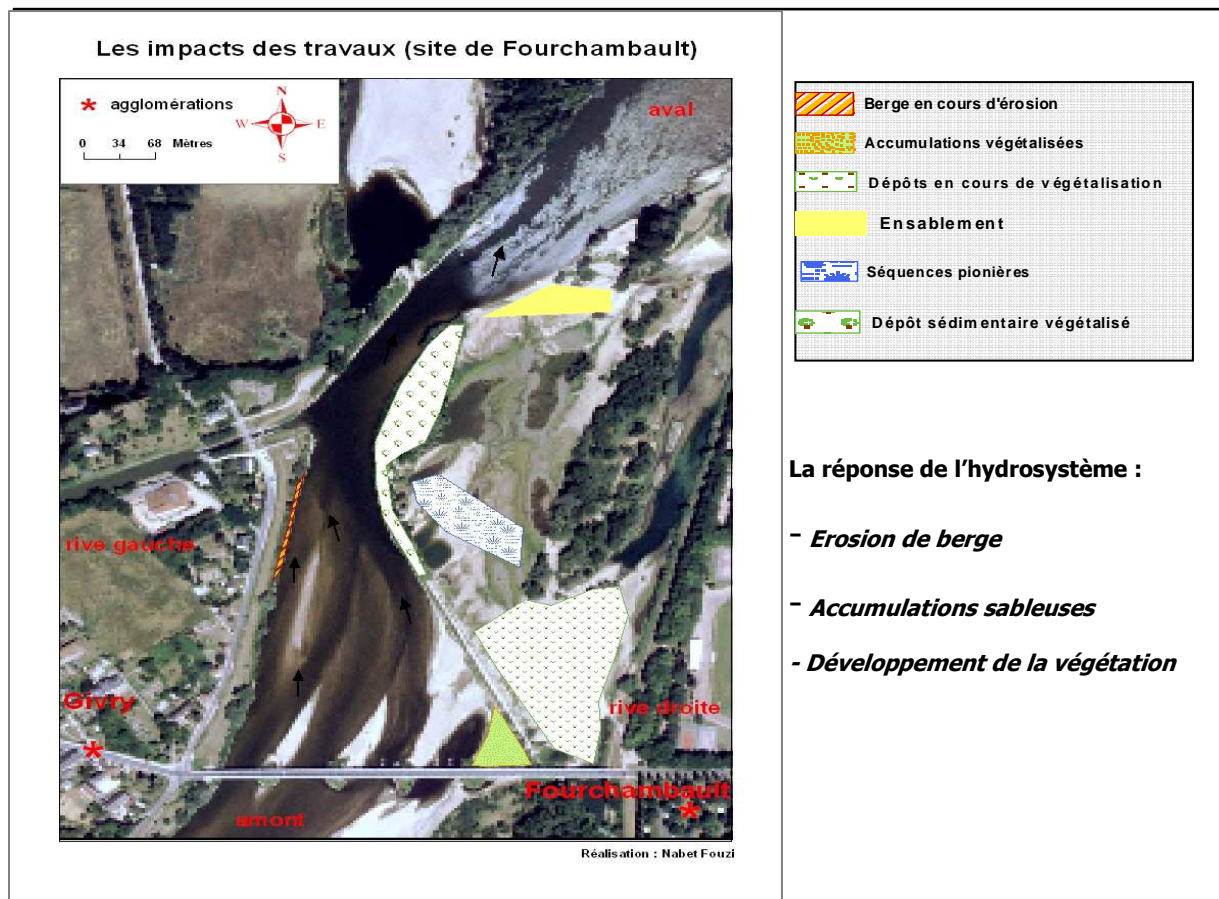


Figure 236 – Impacts des travaux de restauration (Site de Fourchambault).

- Nous considérons ainsi que l'expertise géomorphologique est une clé essentielle de compréhension de l'hydrosystème fluvial. La restauration du lit doit donc se faire en connaissant parfaitement la dynamique de l'hydrosystème fluvial et des sites d'intervention. Un protocole méthodologique peut être proposé et il correspond à l'approche à différentes échelles spatiales et temporelles.

- ☞ L'échelle moyenne permet de déterminer la genèse des formes fluviales et les seuils des changements morphologiques.
- ☞ L'échelle fine permet de définir les processus et les rythmes hydro-sédimentaires des différentes unités fluviales, dont les bras secondaires.

Ainsi, en adaptant les résultats de cette approche multi-scalaire, nous pouvons mieux cibler les formes d'intervention.

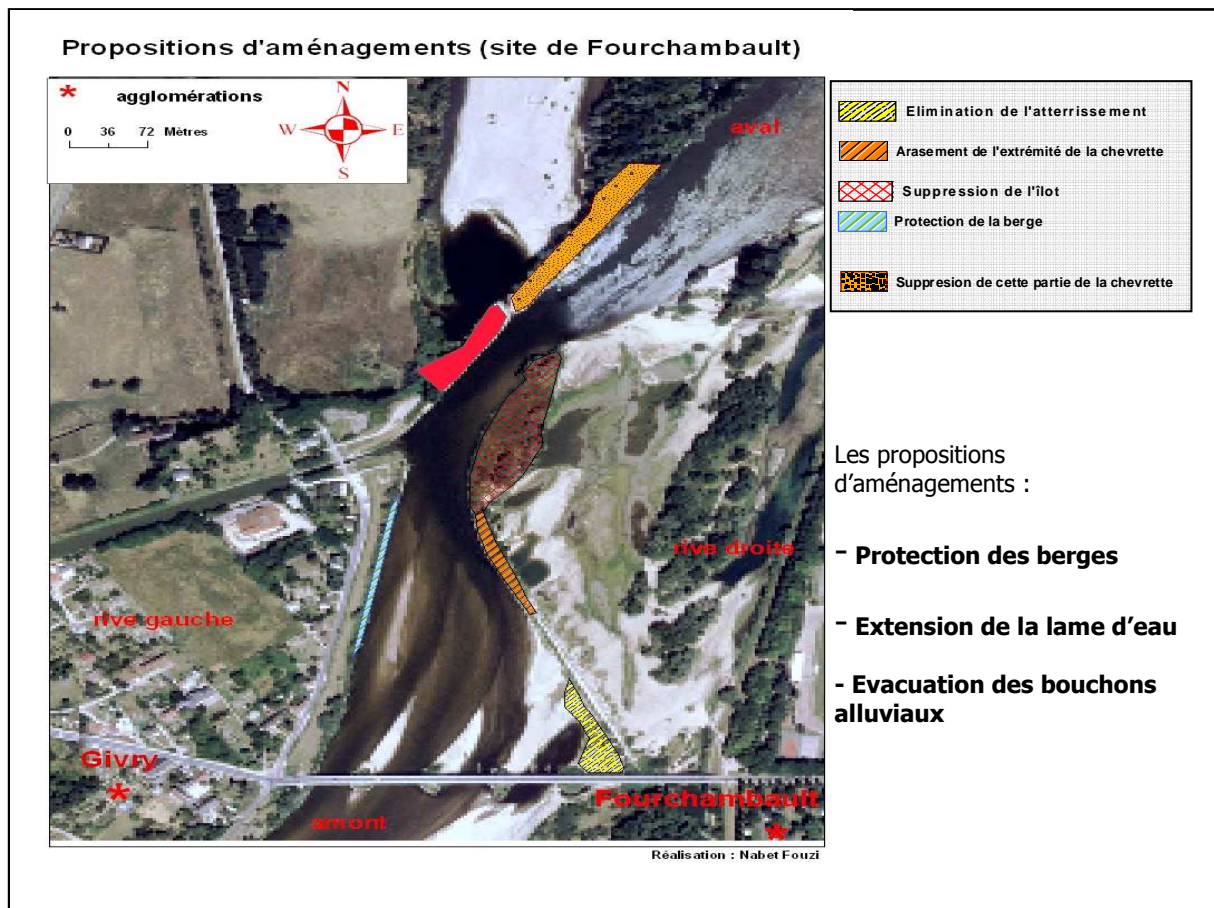


Figure 237 – Propositions d'aménagements après expertise du site (Site de Fourchambault).

b). L'entretien du lit aujourd'hui

Nous proposons de retenir les résultats majeurs de la thèse et les applications possibles en matière de restauration.

L'approche moyenne a montré que les formes fluviales les plus instables demeureraient les micro-îlots (îles < 4000 m²) et que leur érosion active permettait de réinjecter les sédiments dans l'hydrosystème. Ce type d'îles est aussi celui qui capte et stocke le plus les sédiments de manière régulière, et donc pour des débits annuels, grâce à la végétation pionnière et aux jeunes pousses de saules et peupliers qui s'y installent (effet peigne) (Figure 238). Ces îlots peuvent donc croître très rapidement s'ils ne subissent pas l'érosion. Ces îlots ont donc une capacité de croissance très forte et à partir de 3 années, sans érosion, ils sont déjà durablement installés. Or, une nouvelle génération d'îles est en cours de développement au sein même des bras secondaires. Si aucune action n'est réalisée ces trois prochaines années, la situation sera alors quasi irréversible (Bras des Barreaux par

exemple dans la section moyenne). Les seuils du réajustement fluvial nous montrent effectivement que cette nouvelle étape dans le genèse des îles est primordiale dans la compréhension actuelle de la gestion « adaptative » que nous proposons. Il faut s'adapter à ces contraintes évolutives pour mettre en place un entretien efficace et durable dans le temps. C'est la clé de la réussite.

Notre travail a montré également que ce ne sont pas les bras secondaires finalement qui posent problème dans la rétention sédimentaire mais plutôt les îles très jeunes qui retiennent fortement les sédiments, quels que soient les niveaux et la durée des crues. Il conviendrait donc d'intervenir prioritairement sur ces micro-formes insulaires.

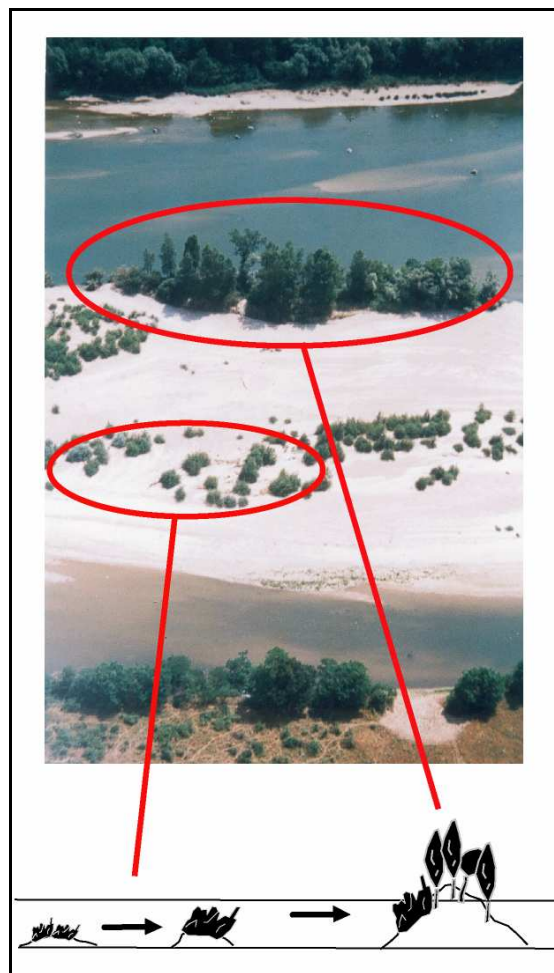


Figure 238 – Identification des micro-îlots sur lesquels intervenir.

L'analyse spatiale a montré également que les îles mobiles fonctionnent essentiellement par érosion amont et accrétion aval, l'érosion latérale n'étant que secondaire. Tout comme l'érosion des micro-îlots, cette érosion des têtes d'îles apporte des quantités importantes de

sédiment au cours d'eau, tout en assurant une régénération du tapis végétal. Il est donc important d'éviter toute intervention visant à limiter l'érosion de ces têtes d'îles, voire de l'encourager par une coupe sélective d'arbres en bordure d'île.

Le suivi de la végétalisation et du comblement des bras secondaires a permis de cibler au sein même des bras les zones les plus sujettes à ce phénomène : ce sont essentiellement les sections moyennes des bras les plus larges qui piègent les sédiments ; les connexions sont des zones de contraste suivant les débits en alternant sédimentation et érosion, ce qui laisse penser qu'elles sont avant tout des zones de transit sédimentaire.

• Nous proposons donc un certain nombre d'éléments pouvant aider à la gestion du lit de la Loire moyenne :

Dans l'idéal, les points suivants seraient à analyser avant toute intervention :

- ☞ Compréhension du fonctionnement hydro-sédimentaire des formes fluviales suivant les débits ;
- ☞ Connaissance de la spécificité hydro-dynamique de chaque bras : topographie fine, vitesse de sédimentation, évolution de la pente... ;
- ☞ Localisation des bouchons alluviaux ;
- ☞ Repérage des jeunes pousses de saules et peupliers pour lutter contre l'effet peigne par la végétation.

Nous sommes cependant conscients de la lourdeur d'acquisition de ces données pour l'ensemble de la Loire moyenne. Nous proposons donc quelques éléments très précis dans le but de guider spatialement certaines interventions qui amélioreraient possiblement l'écoulement des eaux et de la charge solide.

Un repérage précis de ces îlots de taille inférieure à 4 000 m² pourrait être fait relativement rapidement pour l'ensemble de la Loire moyenne, sur la base des photographies récentes du SIEL, guidant ainsi les travaux d'entretien. On a aussi remarqué la multiplication récente des micro-îlots dans les bras secondaires : ils devraient être une « cible » privilégiée.

Plus précisément encore, quelques facteurs favorables au maintien du fonctionnement hydrologique des bras secondaires ont été identifiés. La pente de ces bras est un élément-clé : très logiquement, plus la différence de niveau entre entrée et sortie de chenal est forte, plus l'activité du bras est « bonne » (exemple du bras des Loges). Cependant l'acquisition de données fines sur les pentes est longue. On peut de façon plus pratique remarquer que :

- la connexion amont permanente n'est pas à rétablir systématiquement : on a vu que la réouverture et la ré-incision des bras par l'amont (bras en rive gauche de la Charité-sur-Loire en arrière de la chevrette, bras des Barreaux...) entraînait fréquemment un comblement très rapide ;
- une connexion amont très perchée et végétalisée peut permettre l'entrée des eaux, tout en ne permettant que l'apport des sédiments et plus fins et donc, les plus facilement remobilisables ;
- une connexion amont en angle fort par rapport à l'axe d'écoulement du fleuve semble favorable au fonctionnement du bras secondaire ; on a vu sur les îles des Loges et du Lac que les connexions sont à un angle proche de 90° par rapport au chenal principal ;
- un bras étroit semble plus pérenne et souffrir moins rapidement de la colonisation végétale ;
- une connexion par l'aval assure une plus grande durée de submersion du bras, facteur limitant la croissance des jeunes saules et peupliers;
- un bras étroit est moins rapidement colonisé par la végétation qu'un bras large.

Sur ces bases, des propositions d'intervention ont été réalisées en 2004 à l'issue d'une expertise géomorphologique précise d'un site expérimental, celui de La Charité-sur-Loire (Figure 239) (Nabet, 2006 ; Nabet, 2005). L'aval et une section proche en amont (zone rouge de la figure 240) ont été ciblés pour l'intervention en partant du principe qu'une érosion régressive aurait une meilleure influence qu'une intervention en amont. L'intervention à l'amont ne serait efficace qu'à très court terme et le processus d'accrétion

et de végétalisation du bras reprendrait rapidement. Or, il se trouve qu'actuellement cette expérience sur l'aval semble fonctionner (fonctionnement hydro-dynamique et transit des sédiments, avec toutefois reprise de la végétation pionnière) mais il nous faudra encore quelques années de recul pour le confirmer.

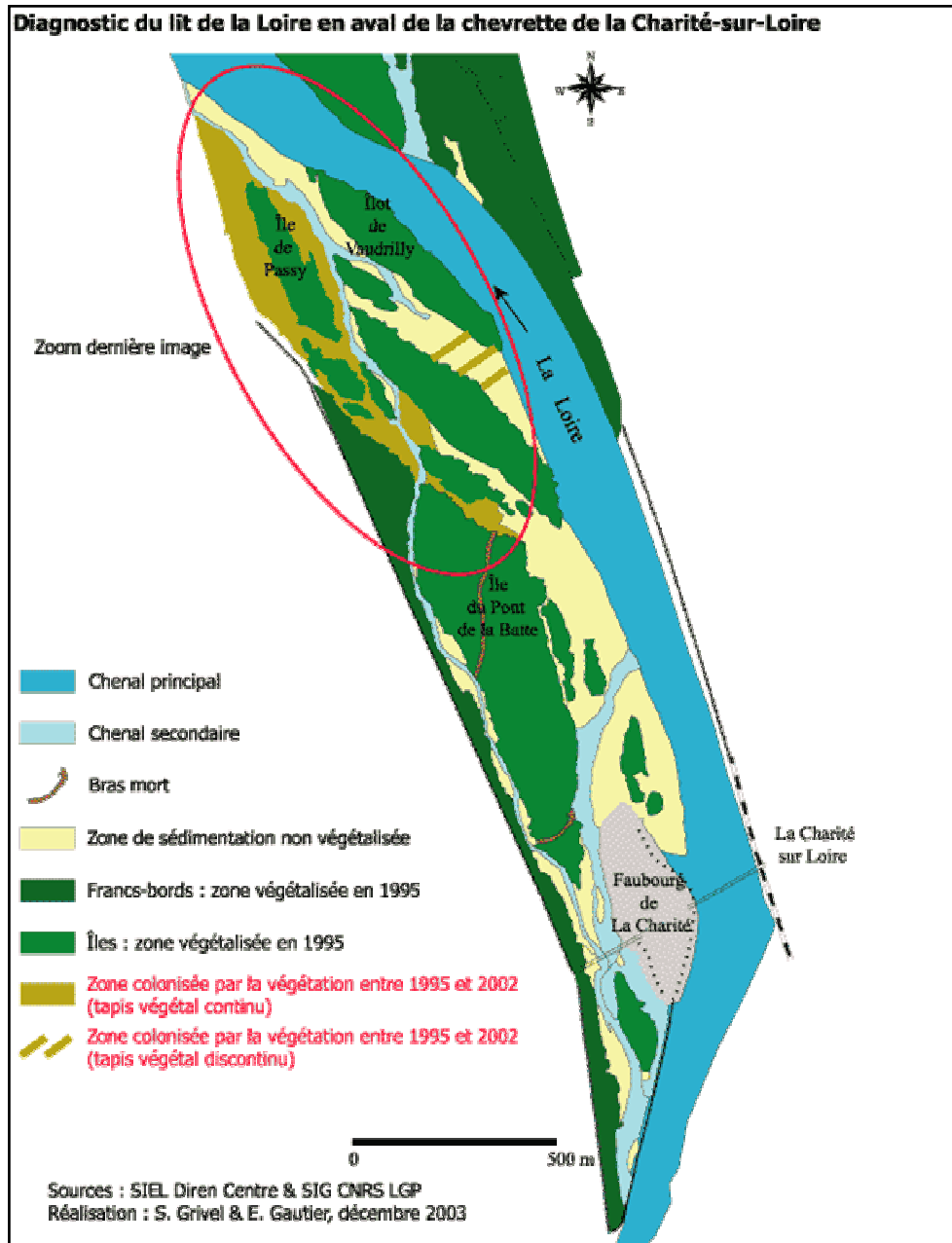


Figure 239 – Diagnostic du lit de la Loire en aval d'une chevette (Site de La Charité).

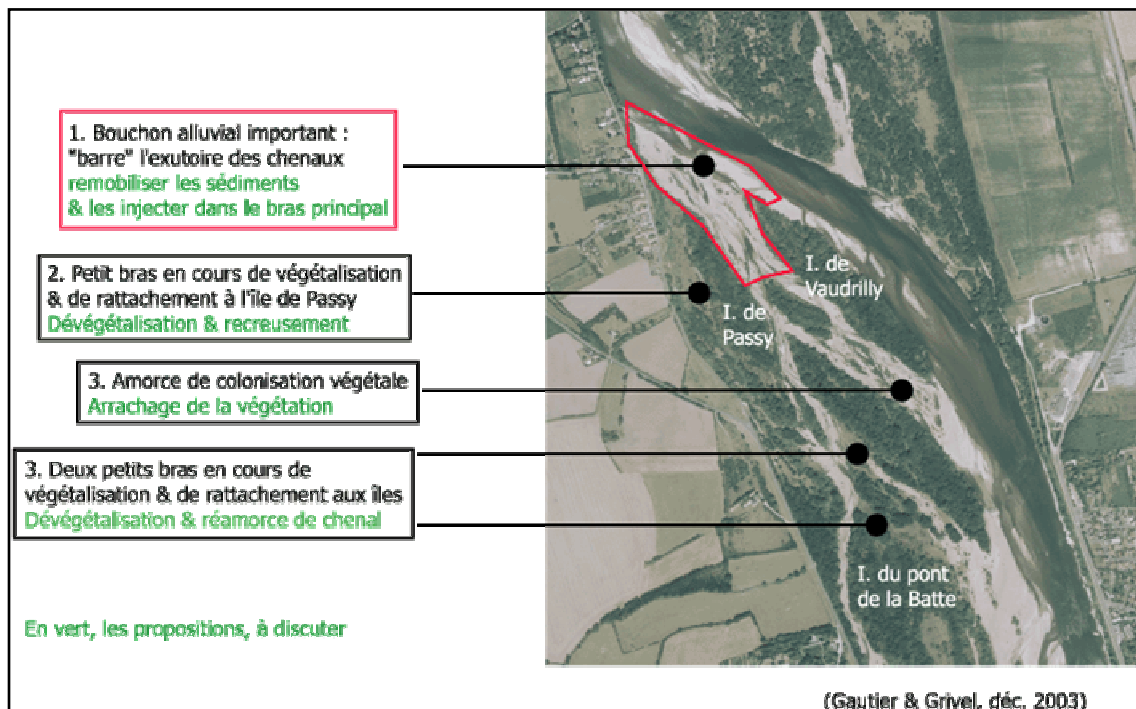


Figure 240 – Propositions d'intervention sur site.

- L'exemple du site des Barreaux est également intéressant (Figure 241). Intervenir à l'amont de ce bras s'est avéré et s'avérerait une erreur. En effet, en dégageant la connexion amont et en abaissant le seuil de connexion amont c'est tout le fonctionnement hydro-sédimentaire qui s'en trouverait contrarié. La pente du chenal en serait modifiée. se placeraient alors en bouchons alluviaux. Il faudrait alors des crues importantes pour espérer déplacer les dépôts sédimentaires de la première moitié du bras.

Ce seuil de connexion amont est certes perché et il faut des débits importants pour le faire fonctionner, mais il permet aujourd'hui de ralentir le phénomène de sédimentation active qui s'enregistre tout le long de ce bras, dans sa section moyenne sur plus d'1 km. Ouvrir le bras par l'amont serait ainsi l'occasion de faire rentrer des débits plus faibles et d'accélérer le processus d'accrétion et de végétalisation. Cette opération ne trouverait ainsi pas de réponse au problème de végétalisation du chenal.

Les actions préconisées ne peuvent s'effectuer qu'à l'aval et sur la deuxième partie de ce bras (Figure 241).

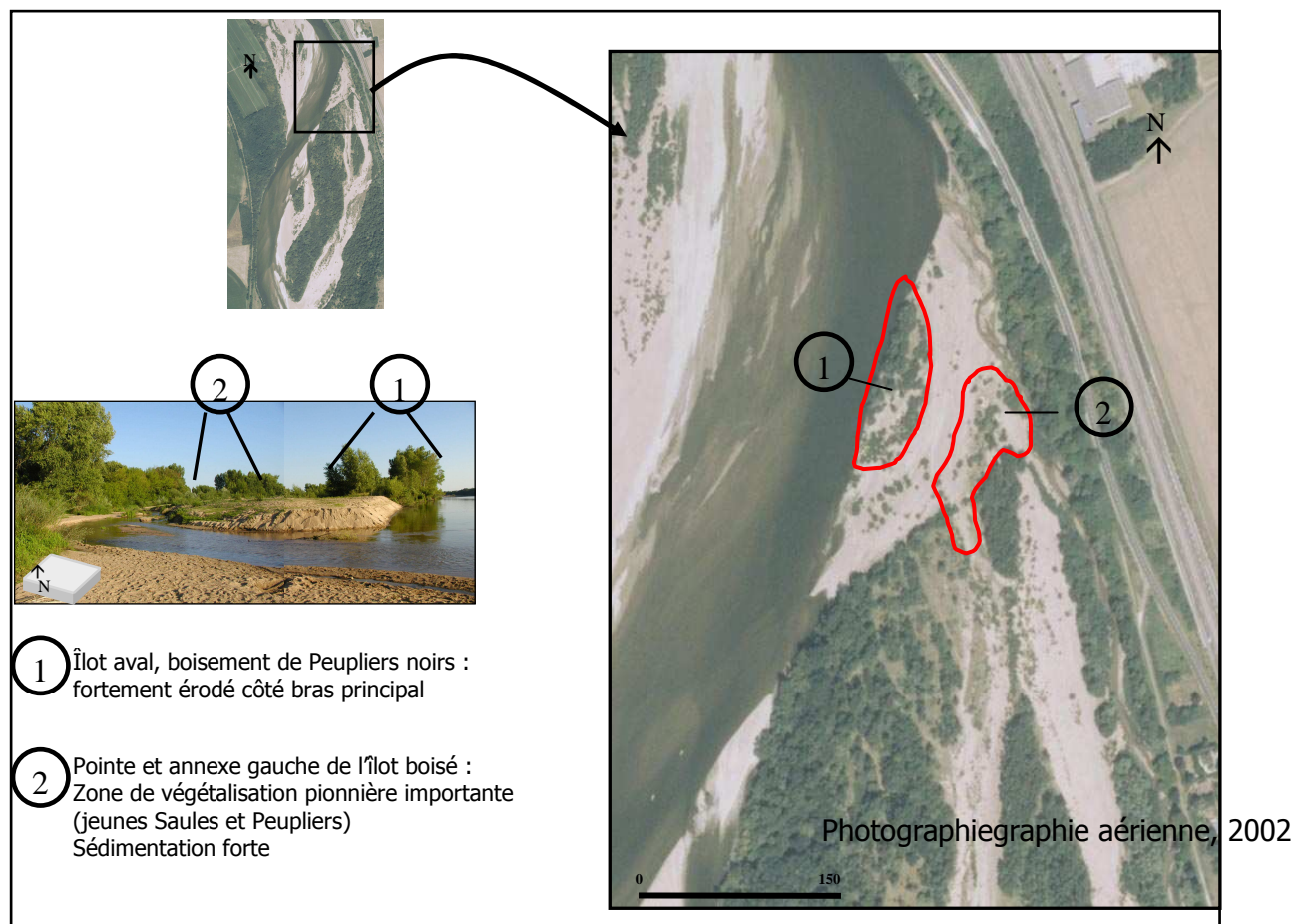


Figure 241 – Proposition de restauration de la connexion aval du bras secondaire annexe à l'îlot des Barreaux (SA 3).

Ainsi, les résultats de ces travaux de recherche sont au service des gestionnaires (DIREN, Conservatoires, DDE – Service de navigation...) et montrent la nécessité de poursuivre les collaborations entre scientifiques et gestionnaires, puisque chaque partie joue un rôle déterminant dans l'amélioration des connaissances du fleuve et des possibilités d'intervention dans le lit.

2). Maintien de la collaboration entre scientifiques et gestionnaires

Les travaux issus de la thèse permettent en effet de renforcer la collaboration entre les scientifiques et les gestionnaires de la Loire. Cela est le cas entre le CNRS (LGP), l'Université (Université Paris 1 et Paris 8) et les différentes instances gestionnaires de la Loire (DIREN, Conservatoires), dans le cadre de la ZAL. La nouvelle phase du Plan Loire Grandeur Nature s'est d'ailleurs renforcée de ce maintien (création d'un conseil

scientifique 2007-2013, animation d'une plate-forme Recherche/Données/Information). Nous proposons ici quelques formes d'application pratique de notre méthodologie

a). Développement du SIG comme outil de gestion multi-thématique

L'ensemble des données iconographiques, vectorielles, dynamiques et statistiques est, à ce stade, compilé autour du système Arc Gis dont le maître d'ouvrage et d'œuvre (nous) est bien le seul à pouvoir le gérer aisément. Or, il a été convenu que ce travail doctoral doit être un exemple de ce qu'il est possible d'appliquer en terme de recherche fondamentale. Il convient alors de créer un Système de Gestion de Base de Données (SGBD) sous le logiciel ACCESS spécialement dédié à l'utilisation pratique des données du SIG (Figure 242). Ce système pourrait être utilisé par les gestionnaires du fleuve, notamment les conservateurs de la Réserve Naturelle, afin d'en faire un véritable outil d'interprétation et de décision pour gérer un tel espace. En lui attribuant un caractère pédagogique par le biais de schémas, de photographies et de vidéos, les intéressés pourraient en faire un outil d'information et de vulgarisation. Une formation préalable alliée à une solide motivation suffirait à donner une dimension concrète au SIG.

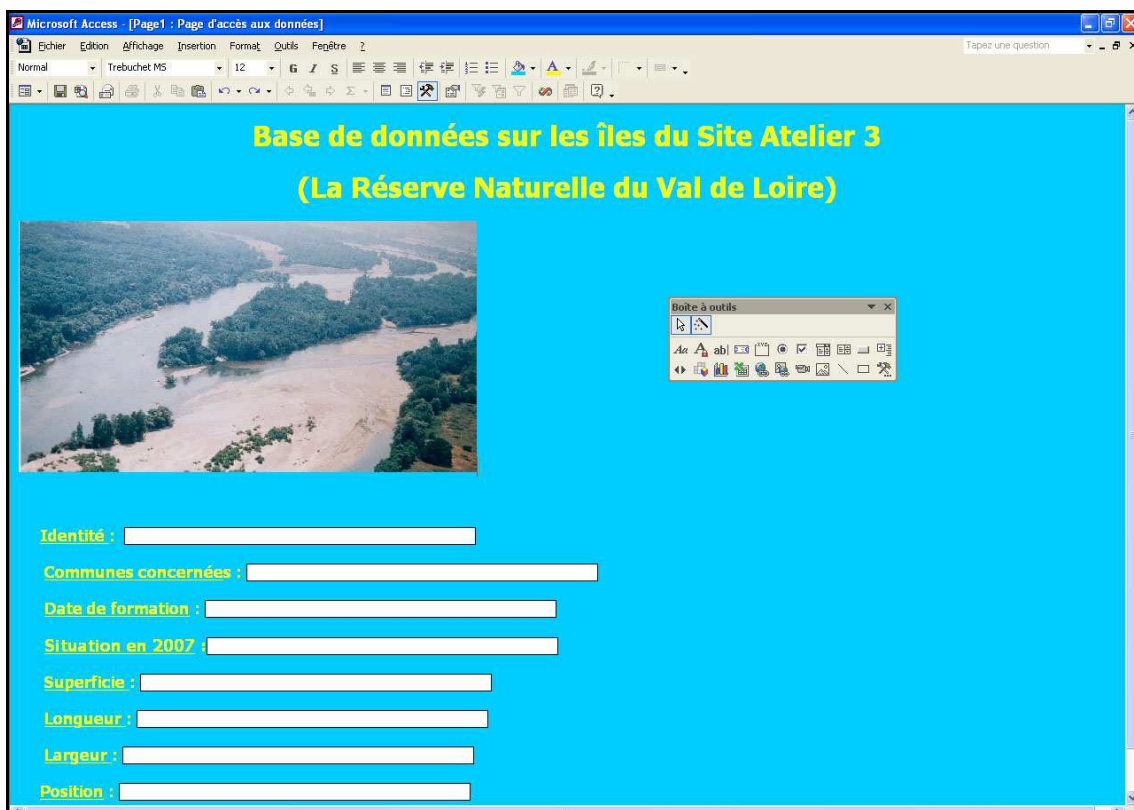


Figure 242 – Création d'une base de données « îles ».

Cet outil permettrait ainsi de :

- réactualiser la méthode d'analyse spatiale chaque année ;
- rentrer de nouveaux paramètres (écologiques, touristiques) et ainsi constituer une base de données sur la faune et la flore avec localisation précise des zones d'habitats ;
- aider à la réflexion et à la décision sur les sites d'intervention en matière de restauration du lit ;
- créer une banque de photographies géoréférencées ;
- réaliser une cartographie assistée par ordinateur (C.A.O.) et produire des cartes thématiques ;

En somme, les possibilités d'exploitation d'un tel outil sont multiples et ouvrent des perspectives à l'application concrète de notre méthodologie de recherche.

b). Pour une gestion réfléchie

Il nous apparaît essentiel de concilier recherche et impératif de gestion. La collaboration menée entre la Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire et le CNRS a permis de mettre en pratique toute notre méthode d'analyse et trouver ainsi les réponses à nos questionnements en géomorphologie fluviale et trouver des applications adaptées au système anastomosé actuel de la Loire moyenne (Gautier et Grivel, 2004). Il est donc primordial de poursuivre ce type de collaboration dans le sens où toutes les parties y trouvent intérêt et surtout matière à réflexion concertée.

Nous proposons le développement d'un outil de gestion opérationnel pour la RNNVL à partir de notre base de données géoréférencées.

La création d'un SGBD interrogeable et réactualisable depuis le logiciel *Access*, à l'aide du SIG-Loire peut devenir un outil de gestion à part entière. Le développement des systèmes dits « nomades » permettrait l'intégration de données en temps réel dans le SGBD depuis le terrain pour n'importe quel travail de gestion (Figure 243). La réserve naturelle nationale y trouverait des possibilités infinies, fonction des objectifs des gestionnaires : étude des habitats géomorphologiques, suivi des populations de Castor, de Sternes...

Cette forme de collaboration pourrait se développer également avec d'autres réserves naturelles fluviales comme la RNN du Val d'Allier (pour éditer des comparaisons avec RNNVL), la RNN de la Drôme. Des orientations de recherche pourraient alors être développé entre les opérateurs, les plan de gestion des réserves naturelles fluviales et la commission hydrosystèmes fluviaux de la Fédération des Réserves Naturelles (Dupieux, 2004a).

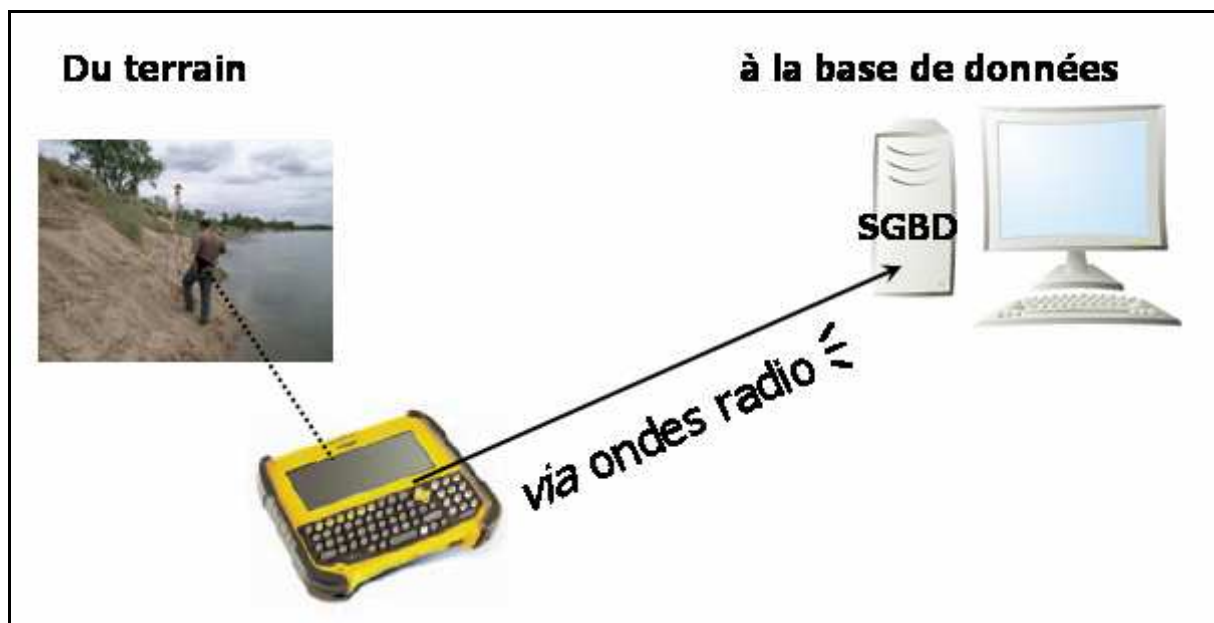


Figure 243 – Adaptation de la base de données aux exigences de travail des opérateurs en Loire moyenne.

Les clés de compréhension de la Loire des îles peuvent s'appliquer également aux problématiques actuelles en matière d'écologie et de protection de l'environnement. La Loire des îles constitue un ensemble de formes fluviales qui sont autant d'habitats pour la biodiversité. Cette donnée est prise en compte d'ailleurs dans le plan de gestion de la RNNVL. Aussi, nos résultats s'inscrivent dans cette perspective écologique de donner des éléments de compréhension et même d'action aux opérateurs de la Loire intéressés par l'évolution des milieux aquatiques. On a vu d'ailleurs le paradoxe entre les directives européennes (Natura 2000) et la réalité d'un système aussi dynamique que la Loire des îles. Les milieux ouverts comme les pelouses sur sable sec correspondent par exemple à des milieux de transition. Leur maintien n'est possible que par une intervention humaine

(pastoralisme, débroussaillage). L'évolution constatée du système anastomosé de la Loire moyenne laisse en effet peu de place à ces milieux de transition, que des directives européennes imposent de maintenir.

B Perspectives de recherche fondamentale

Nous pensons qu'il est à présent indispensable d'ouvrir de plus larges fenêtres de perspectives à notre recherche. Nous proposons donc de continuer le travail entrepris sur le système anastomosé de la Loire des îles en proposant plusieurs formes de travail et d'application. Dans un premier temps nous optons pour des travaux propres à aider les gestionnaires. Dans un second temps, nous mettons en place un futur protocole de suivi hydro-géomorphologique de l'hydrosystème Loire. Ces diverses possibilités forment en quelque sorte une amélioration du protocole mis en place dans le cadre de la présente thèse.

1). Suivi hydro-dynamique des formes fluviales en Loire moyenne

L'approche morphologique (Eaton et Lapointe, 2001) a apporté des résultats concluants sur la compréhension du fonctionnement hydro-sédimentaire de la Loire des îles. Cependant, la méthodologie présente des points à améliorer pour gagner encore en précision.

- Dans un premier temps, l'utilisation des profils transversaux, Crougneau et Collin, a apporté des éléments très importants sur les rythmes de formation et d'évolution des formes fluviales. Si pour les îles, les francs-bords et les chenaux secondaires, peu de doute subsiste, la question du chenal principal est un peu plus problématique. En effet, il serait nécessaire de compléter l'analyse de l'enfoncement du lit principal et de l'évolution du talweg par une recherche approfondie des données d'archives disponibles à la DIREN de Bassin, à Orléans. Dans l'état actuel de nos connaissances, nous ne sommes pas en mesure de caractériser l'état du plancher alluvial à différentes dates : était-il plus perché, et aurait-il subi alors une très intense incision comme le laisserait supposer l'étude de certains profils ?

- Si le suivi des îles et des francs-bords est aisé quels que soient les épisodes hydrologiques étudiés, il apparaît que les bras secondaires présentent encore des interrogations. Nous disposons de mesures précises mais dans un volume net ou global, sans tenir compte des quantités érodées ou sédimentées lors d'un même événement hydrologique. Cette question peut être résolue par la méthode des chaînes qui a révélé d'excellents résultats en Loire bourbonnaise (Gautier et *al.*, 2001). Cependant, selon Rodrigues (2004), cette technique apporte aussi son lot d'interrogations. Il reste encore difficile de mesurer en instantané les flux sédimentaires lors d'une même phase de submersion d'un bras.
- Les modèles numériques de terrain, aussi précis que ceux que nous avons construits dans cette thèse, mériteraient d'être encore mieux exploités sous le S.I.G., si nous disposions d'images recalées, géoréférencées et superposables de bonne définition. Les images aériennes utilisées jusqu'à présent se superposent parfaitement à ces M.N.T. mais n'offrent aucune lisibilité pertinente car la pixellisation n'est pas assez fine pour des précisions centimétriques (Figure 244).

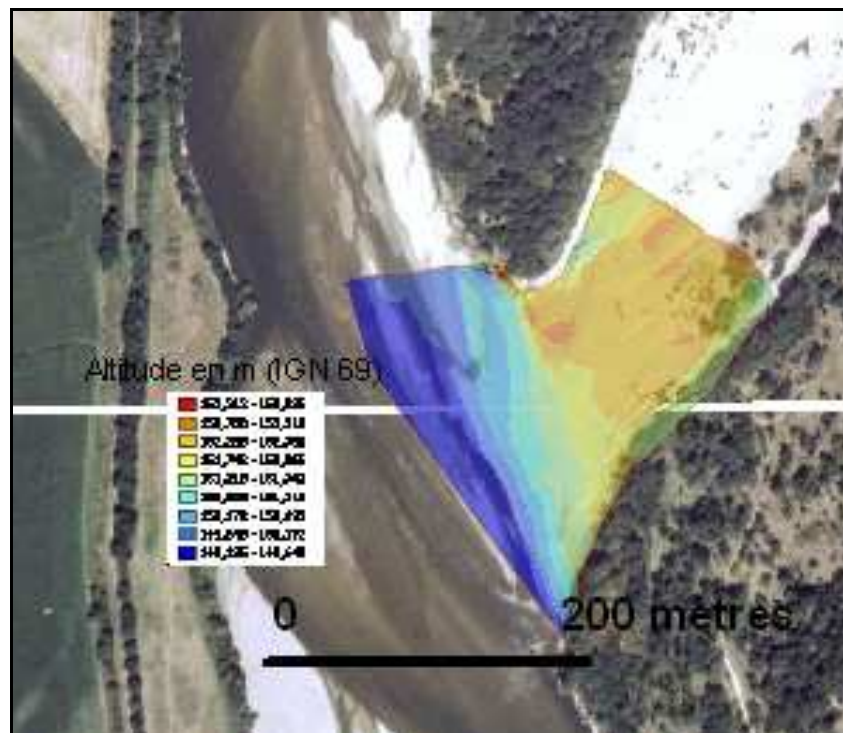


Figure 244 – Drapage MNT sur image aérienne.

- Nous avons donc imaginé la création d'un ballon captif comme outil complémentaire à notre méthodologie fine de terrain. Face au problème de définition numérique, nous est

venue l'idée d'une campagne aérienne parallèle aux campagnes annuelles de relevés au DGPS. Nous proposons donc de mettre en application une technique développée au sein du département de Géographie de l'Université Paris 8 en collaboration avec deux autres doctorants (Luc Barruel et Saïda Temam). Cette technique repose sur l'utilisation d'un ballon captif inhabité permettant l'embarquement dans un premier temps d'un appareil photographie et s'élevant à moins de 50 m d'altitude (Figure 245). Cette basse altitude est suffisante pour réaliser des clichés, recalables par la suite, à l'échelle des bras secondaires suivis. La technique offre ainsi l'opportunité de réaliser des images numériques en adéquation avec la précision demandée pour les M.N.T. Les prises de vues apportent plusieurs possibilités pour le programme de suivi hydro-géomorphologique des bras secondaires de la Loire moyenne.

Un protocole de suivi peut être ainsi proposé pour les années futures :

- Réaliser des campagnes de prises de vues chaque année en même temps que les campagnes de terrain au DGPS. Les campagnes aériennes de l'IGN ou de la DIREN Centre ne sont pas aussi régulières (tous les 4-5 ans).
- Recaler des images de bonne définition numérique sur des M.N.T. de précision centimétrique
- Suivre la distribution sédimentaire sur les sites étudiés : répartition en surface des différents types de sédiments (par traitement de l'image). Etudier au préalable la faisabilité d'une telle approche suivant la taille des sédiments (cela fonctionnera très bien pour les classes au-delà du sable grossier mais en deçà ?).
- Suivre annuellement l'expansion végétale dans les bras secondaires, dans un contexte actuel de végétalisation forte du lit de la Loire. Etablir ainsi des rythmes annuels et des typologies de colonisation par les différentes espèces pionnières.
- Utiliser le ballon captif lors de la remise en activité des bras secondaires et des bras morts situés dans les îles et francs-bords lors des crues pour observer le comportement hydrologique de ces formes fluviales (Photographie et vidéo).
- Réaliser un inventaire Photographie-géographique des îles pour compléter et affiner la typologie des îles réalisée lors de la thèse. Il s'agira d'enrichir la base de

données géomorphologiques du SIG et d'apporter des données complémentaires telles que la distribution des cortèges floristiques, principalement ripicoles, des îles. Une nouvelle analyse statistique pourrait alors être mise en place pour étudier la relation taille des îles et état de la couverture végétale.

D'ores et déjà un ballon est en cours de construction et bientôt de test. A l'été 2009, cette technique sera mise en application en Loire moyenne dans le cadre d'une étude sur le risque d'inondation et pour compléter les travaux menés par F. Nabet dans le cadre de sa thèse. Le ballon servira dans un premier temps à un travail d'inventaire photographique et également à la prospection d'anciens ouvrages de navigation et de protection disséminés dans une plaine d'inondation.

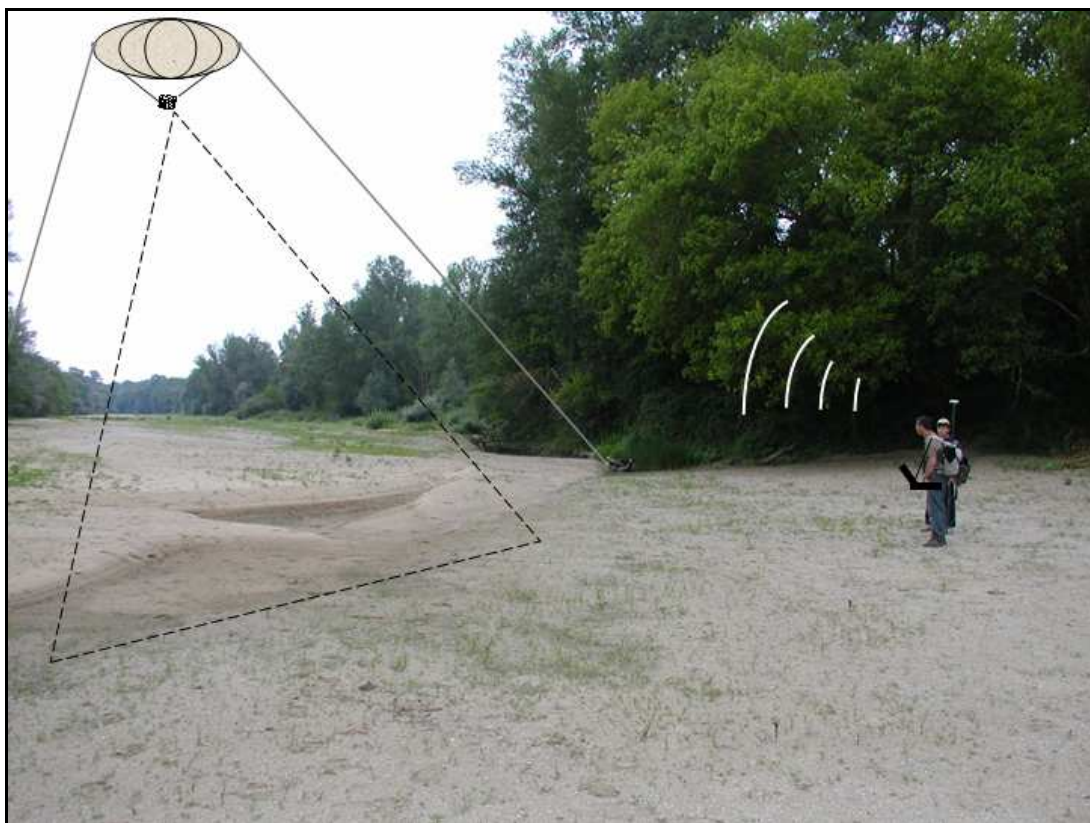


Figure 245 – Création d'un ballon captif dédié à l'affinage des images destinées aux MNT - Loire.

- Nous proposons la nécessité de monter un protocole quinquennal pour le suivi hydrodynamique des sites ateliers. Il s'agit de poursuivre la méthodologie employée dans la présente thèse et de la compléter par l'utilisation d'outils modernes (ballon, sondes granulométriques, bathymétrie). A un rythme régulier, de 5 ans par exemple, nous pourrions affiner les tendances d'évolution du fleuve. Le travail de F. Nabet (en cours) illustre la poursuite de ces travaux à l'aide de ces outils performants et indispensables lorsque l'on étudie notamment les flux sédimentaires au sein des bras secondaires. La continuité de la logique de recherche de la ZAL permet d'inscrire durablement ces perspectives de recherche et de collaboration.

2). La question des îles dans les systèmes anastomosés

Nous proposons enfin de développer des réflexions sur la question des îles dans les systèmes anastomosés à partir de nos résultats que nous confrontons ainsi à d'autres études.

- Les îles fluviales de la Loire constituaient, au début de la thèse, des objets de recherche neufs. Y. Babonaux (1970) remarquait déjà que la Loire présentait une alternance de secteurs à îles et sans îles, occupant une rive à l'autre. A ce constat, nous répondons, au regard de notre travail, que les secteurs de forte sédimentation, et donc propices à la formation d'îles, correspondent à des zones de basculement de la bande active, ce qui explique aussi leur position préférentiellement latérale dans le lit de la Loire. A l'affirmation que « l'évolution des îles est très controversée » (Babonaux, 1970), nous avons pu dégager la dynamique d'évolution des îles et surtout distinguer les grandes phases de leur développement depuis le 19^{ème} siècle. B. Bomer (1972), dans la lignée d'Yves Babonaux, s'était intéressé également à la question des îles sans toutefois pouvoir quantifier ni analyser entièrement le fonctionnement de la Loire des îles. Nous avons mis en évidence des conditions de formation et d'évolution de ces mésoformes insulaires bien plus complexes que Bomer le laissait entrevoir. Pour B. Bomer (1972), le facteur hydrologique est le facteur déclenchant du développement du style anastomosé et donc des îles au cours du 20^{ème} siècle. Nous avons démontré que finalement les conditions hydrologiques ne suffisent pas expliquer la formation de la Loire des îles : la présence et le

maintien des ouvrages (levées, chevrettes) et l'abandon de la navigation sont des variables bien plus importantes pour expliquer le réajustement fluvial à cette échelle de temps. L'arrêt des travaux d'entretien du lit fluvial a entraîné une reprise de la colonisation végétale, sans précédent à l'échelle historique, colonisation qui a profondément modifié les conditions de transfert de la charge solide. Les îles subissent des processus particuliers en fonction de leur taille, de leur hauteur et leur couverture végétale. On ne peut plus traiter la sédimentation et l'érosion des îles de manière globale, puisque ces processus sont différents d'un type d'île à l'autre. En ce sens, la détermination d'une typologie morphologique des îles a éclairé de nombreux points. Enfin, au début des années 1970, Y. Babonaux (1970) et B. Bomer (1972) étudiaient un fleuve en transition. B. Bomer démontrait le passage d'un style tressé à un chenal rectiligne entre 1863 et 1969, alors que la seconde génération d'îles était en train de se développer. L'anastomose de la Loire des îles était donc encore en formation à la date de ces écrits. Ce n'est qu'à l'issue de nos travaux que nous pouvons déterminer une tendance d'évolution vers la fin supposée de l'anastomose.

Les travaux du PNRZH (Gautier et al., 2001) sont évidemment plus proches de nos résultats puisqu'ils en sont les précurseurs fondamentaux. Les Sites Ateliers 1 et 2 présentent une diversité d'évolution des îles plus réduite que celle du Site Atelier 3 où nous trouvons une large gamme d'îles. Les taux d'accrétion verticale des îles sont très identiques dans l'ensemble de la Loire des îles. L'incision du lit est par contre plus forte au niveau du Bec d'Allier. Les sites de Marzy et de Soulangy ont été surtout concernés par le rattachement d'îles par comblement de bras secondaires : du fait de l'enfoncement important du chenal principal, ces derniers ont subi au cours des 25 dernières années, une réduction de leur fréquence de submersion, ce qui a entraîné leur végétalisation et par suite, leur comblement. Dans l'ensemble, les résultats de la thèse sont venus confirmer les pistes ouvertes par le PNRZH et tout particulièrement le fait que les îles soient les principaux indicateurs des réajustements fluviaux et leur rôle déterminant sur le piégeage sédimentaire ; ils ont de plus, apporté des données précises sur les modes et rythmes morphodynamiques. Des travaux plus récents encore, menés en Loire moyenne, dans le

secteur de Guilly, reprennent la même méthodologie que la thèse (Dupret, 2006). Les modes de formation et les rythmes d'évolution y sont similaires alors qu'il s'agit d'un corridor fluvial à méandres confinés, ce qui valide notre méthode d'approche et les résultats majeurs de la thèse. On observe à Guilly, la même multiplication récente des îlots en cours de boisement.

L'approche fine, centrée sur les bras secondaires et des conditions hydrologiques variées, trouve son pendant en Loire moyenne, du côté de Bréhémont. S. Rodrigues (2004) s'est intéressé à la sédimentation dans un bras secondaire expérimental, à l'aide d'une multitude d'outils d'analyse intégrant de nombreux paramètres physiques (hydrologie, granulométrie, géomorphologie, biogéographie, dendrochronologie...). Si l'approche de S. Rodrigues cherche à modéliser le fonctionnement d'un bras et de ses processus de sédimentation, la nôtre s'en approche par la perspective de trouver des clés de compréhension des bras secondaires en Loire moyenne et de l'influence des débits de submersion. Il apparaît que la durée et la fréquence des crues sont déterminantes dans la distribution et le transit des sédiments dans les bras secondaires. Cependant, comme nous l'avons montré, le fonctionnement des bras secondaires est rendu complexe par leur diversité. L'expertise géomorphologique reste la meilleure voie de compréhension du fonctionnement d'un bras avant d'envisager des actions et des interventions.

Nos travaux montrent que la dynamique d'un bras est étroitement dépendante de ses caractères propres (pente, largeur, répartition spatiale de la végétation, angle de la connexion amont...) et de relations avec son entourage proche : île et chenal principal ; on ne peut donc pas isoler un bras secondaire de son secteur fonctionnel. Les îles qu'il borde, la proximité du chenal principal ou la dynamique du franc-bord adjacent sont des variables indissociables du fonctionnement d'un bras secondaire. En ce sens, si les approches sont différentes entre Bréhémont et les Sites Ateliers de la Loire moyenne, la nécessité de pratiquer une expertise pré-travaux s'avère déterminante.

- Cette dernière remarque sur les études ligériennes nous amène à comparer le système d'îles de la Loire à d'autres hydrosystèmes fluviaux. F. Vautier (2000) nomme un

ensemble géomorphologique fonctionnel, « complexe » d'îles. Ses travaux aboutissent à la compréhension de la place des îles fluviales dans la rivière Isère. Il est difficile de comparer la Loire avec un système montagnard, du point de vue de la charge solide et des conditions d'écoulement. Cependant, en centrant ses recherches sur les îles de l'Isère, F. Vautier met en évidence les conditions de formation et d'évolution des formes insulaires. Contrairement à la Loire, ces îles sont très stables et la dynamique d'évolution moins complexe. Les îles sont issues du développement de la végétation sur un pavage de matériaux grossiers accumulés sur des bancs de galets latéraux. Elles indiquent toutefois le réajustement fluvial de l'Isère à un ensemble de facteurs précis : barrages, endiguement du lit et extractions massives de granulats. F. Vautier observe une érosion sur les îles situées dans des secteurs fournissant une charge de fond importante. La végétation colonise ces formes d'accumulation lorsque la charge de fond n'est plus suffisante pour rajeunir les bancs latéraux. L'auteur définit une différence entre les îles jeunes (moins de 12 ans) qui subissent l'essentiel de l'érosion et les plus anciennes qui captent les sédiments. Après le passage d'une crue décennale, il note que le bilan global est en faveur de l'exhaussement des îles (+ 20 cm en moyenne de dépôts très fins). Les îles qui enregistrent les plus forts taux de sédimentation (+ 30 cm) sont les îles les plus perchées ; ce que nous avons nous mêmes calculé sur la Loire. F. Vautier (2000) enregistre que près de 25 % des sédiments fins transportés par la crue ont été déposés dans les îles. Ses résultats peuvent être comparés à ceux de Marron (1992) qui calcule que « 29 à 40 % des apports sédimentaires de la Fourche Creek ont été stockés dans la plaine d'inondation entre 1876 et 1978 », sans spécifier la part retenue par les îles. Ces résultats ont des similitudes avec nos travaux puisque nous avons mis en évidence le potentiel de piégeage des îles de la Loire moyenne. Or, il se trouve que la charge sédimentaire des deux cents dernières années, en Loire moyenne, n'a pu être retenue que dans le lit entre levées, et par conséquent sur les formes végétalisées du lit. Les îles sont encore une fois, avec l'exemple de l'Isère, des indices d'un réajustement en cours. Les recherches sur l'Isère apportent également des clés de compréhension aux gestionnaires ; on y préconise l'augmentation de la charge de fond par

apports artificiels, l'amélioration des conditions d'écoulements et surtout la suppression des digues, afin de contrôler la végétation par une dynamique fluviale en partie rétablie.

S. Dufour (2005) s'est intéressé à la fois à la couverture sédimentaire et à la forêt alluviale de quatre îles de la Drôme, système plus proche de l'Isère que de la Loire. Il opte pour une comparaison entre des îles de secteurs endigués et des îles en secteur en tresse. Des différences apparaissent au niveau du nombre d'espèces végétales présentes sur ces îles et des dépôts sédimentaires : de 10 à 20 cm d'épaisseur sur des îles en secteur endigué, et jusqu'à 94 cm, en zone de tressage. A nouveau on trouve des îles plus développées dans ce secteur en tresse et donc plus hautes. Les îles les plus développées et les plus perchées semblent donc bien constituer les unités les plus « piégeuses » en sédiments. Cette recherche montre tout l'intérêt de poursuivre les études sur ce type de forme, puisqu'elles semblent tenir une place spécifique dans la rétention sédimentaire et le développement de la végétation dans un tel système en tresses.

Au final, il existe très peu d'études des systèmes anastomosés français plaçant les îles au cœur de l'analyse. La littérature géomorphologique internationale sur les îles fluviales est tout aussi pauvre, alors que l'exemple des îles de la Loire révèle une dynamique complexe et riche. Knighton (1998) montre que la largeur du chenal est le paramètre qui s'ajuste le plus rapidement aux variations des débits liquide et solide. Ceci a été le cas avec la Loire puisque nous avons mesuré une rétraction de plus de 300 m du chenal principal au cours du 20^{ème} siècle au profit du développement des îles.

- W.R. Osterkamp (1998) est l'auteur qui s'est intéressé le plus précisément à la formation et à l'évolution des îles fluviales. Il montre le potentiel des îles à enregistrer l'histoire récente de l'évolution du fleuve. Elles sont pour lui, les meilleurs indicateurs de la santé et de l'énergie du système fluvial auquel elles sont associées. Il a ainsi déterminé à la fois une classification en 8 catégories des îles, en fonction de leur mode de formation, et une typologie en 6 classes des processus d'évolution. Ces catégories ont l'avantage de pouvoir trouver une large gamme d'illustrations à travers le monde, en se fondant sur les questions d'hydrologie (fortes crues), de morphologie (évolution des chenaux) et des mouvements de

masse (rôle des avalanches, débris-flows). La Loire des îles correspondrait aux catégories 4 (*stabilisation de bancs de sable par forte accrétion et installation durable de la végétation*) et 6 (*incision rapide des chenaux, dans une période de diminution des fortes crues, laissant ainsi la place à des surfaces de sédimentation*). Cependant, il apparaît que la Loire des îles s'est développée tout d'abord dans un lit rétréci par des levées et surtout, laissé à l'abandon de toute activité humaine. La notion d'anthroposystème fluvial trouve difficilement sa place dans la classification génétique des îles de W.R. Osterkamp. La typologie des modes d'évolution des îles décrites par cet auteur ressemble à la nôtre puisque l'on y retrouve la même gamme de schémas d'évolution de ces formes fluviales : migration, union d'îles, disparition, développement des micro-îlots...

L'étude des îles de deux rivières nord-américaines, la Plum Creek (Colorado) et la Snake River (Idaho), présente deux contextes de formation et des rythmes d'évolution des îles variés. La Plum Creek se caractérise par des îles de moins de 100 m de longueur et relativement jeunes (formées depuis 1965). La Snake River se distingue par des îles très grandes (1000 m de longueur en moyenne) formées il y a 15 000 ans (îles « reliques »). Si la Plum Creek montre des formes très dynamiques (accrétion généralisée des îles depuis 30 ans ; avec doublement de surface pour certaines), la Snake River s'oppose par une stabilité importante des très grandes îles liée à une faible migration latérale du chenal principal. Or, ce que nous avons observé pour la Loire ne rentre pas dans la même logique de classification d'Osterkamp qui a différencié les îles de deux rivières en fonction de leur mode de formation et d'évolution. La Loire présente une plus grande diversité d'îles que la Plum Creek et la Snake River réunies. W.R. Osterkamp souligne des processus essentiels en matière d'édification et d'évolution des îles : durée des événements hydrologiques, rôle de la végétation alluviale, migration du chenal. L'étude de la Loire a montré que si on retrouve les mêmes processus analysés par Osterkamp sur deux rivières, les îles restent uniquement des indicateurs de la santé et de l'énergie de l'hydrosystème. Tout comme la Loire, les îles de la Snake River sont devenues des unités fluviales écologiques d'une grande valeur puisqu'une partie de cette rivière a été classée « refuge national de la faune sauvage » (en quelque sorte l'équivalent d'une réserve naturelle française). Les secteurs à

îles sont des réservoirs de biodiversité, des zones de piégeage sédimentaire et des aires d'enjeux écologiques actuels très forts.

Les résultats d'Osterkamp et les nôtres nous invitent à nous interroger plus largement sur les classifications actuelles des systèmes anastomosés. Comment placer les îles dans ces classifications en sachant que leur présence, leur rôle et leur évolution indiquent des tendances d'évolution de l'anastomose ?

- Les îles enregistrent les modifications de l'hydrosystème sous des latitudes aussi bien tempérées (Gautier, 2006 ; Osterkamp, 1998) que froides (Gautier et Costard, 2000) et tropicales (comme l'Amazone, Mertes et *al.*, 1996). Sur la Léna en Sibérie centrale qui développe un style anastomosé, les îles sont également mobiles et trois types d'îles ont été identifiés en fonction de leur vitesse de migration. La variable climatique ne semble donc pas un facteur déterminant dans la formation des îles, cependant il apparaît bien que les îles sont « les premières » à réagir à une perturbation. Ainsi, dans le cas de la Léna, l'augmentation des températures de l'eau couplée à une aggravation de la fréquence des débits intenses depuis la fin des années 1980 a entraîné un accroissement de 21 à 27 % de l'érosion de la tête des îles. Cette érosion « accélérée » ne semble pas s'accompagner d'une réduction de la taille de l'île, le retrait de l'île étant compensé par une sédimentation à l'aval (Costard et *al.*, 2007 ; Gautier et *al.*, 2008).

L'anastomose répond à des critères précis (Knighton & Nanson, 1993 ; Nanson & Knighton, 1996). Nous suggérons de réorienter les recherches sur les systèmes anastomosés en ne privilégiant plus seulement les chenaux, mais aussi les îles et les formes marginales (du type franc-bord). Le style pourrait sans doute être mieux décrit à partir de paramètres morphométriques portant sur les îles. Selon Nanson et Knighton (1996), le style anastomosé, dominé par la présence d'îles boisées, correspond à une faible énergie du système et à une relative stabilité des formes fluviales. Il est certain que les îles traduisent une stabilisation de la charge solide, par rapport à une période précédente marquée par une plus forte instabilité. Cependant, les îles ne sont pas des formes stabilisées, comme on pourrait le croire. On pense d'ailleurs que ce parti pris a limité les études sur ce type de

forme fluviale (Gautier, 2006). Sarma et Phukan (2005) ont étudié la formation et le développement d'une très grande île entre 1901 et 2001. Cette île très étendue est située à la confluence du Brahmapoutre et de la rivière Subansiri. Les zones de confluences sont, comme pour la Loire, des zones privilégiées de sédimentation et d'îles. Cependant, cette île subit une forte érosion, de la part du Brahmapoutre et de l'élargissement des chenaux secondaires, et entre dans le schéma d'évolution que nous avons défini, à savoir l'éclatement d'une île en plusieurs autres. Ceci s'explique par l'agrandissement d'anabranches lors d'événements hydrologiques forts. Sur la rivière Tagliamento, Edwards *et al.* (1999) distinguent deux stades de formation des espèces pionnières en fonction de leur hauteur. Cette distinction biologique s'apparente à nos stades de formation des bancs à tendance insulaire et les micro-îlots. En effet, nous avons réalisé une première distinction entre les bancs à caractère insulaire et les micro-îlots en fonction de la hauteur de la strate végétale. A partir de 3 m les micro-îlots sont formés et la végétation pionnière est alors établie.

Nous pouvons suggérer donc de compléter les classifications de Knighton & Nanson (1993) et de Nanson et Knighton (1996), en mettant en avant la place des îles, non plus comme des unités stabilisées mais comme des formes importantes dans la dynamique morpho-sédimentaire. D'ailleurs ces classifications se sont fondées sur quelques rivières en anastomose. Ce style fluvial est présent sous toutes les latitudes, dans des travaux sur les systèmes fluviaux froids (D.G. Smith, 1976), tropicaux humides (D.G. Smith 1986), tropicaux secs (Sarma, 2005 ; Hassan, 1999), arides (Gibling *et al.*, 1998 ; Knighton et Nanson, 1994a et 1994b; Schumann, 1989 ; Rust, 1981), et tempérés (Nguyen *et al.*, 2002 ; Edwards *et al.*, 1999 ; Miller, 1991). Au regard de tous ces travaux, nous disposons d'une gamme élargie de systèmes fluviaux anastomosés aptes à être étudiés avec en premier plan ces formes qui structurent tous ces paysages : les îles fluviales.

Mais, notre proposition s'applique à tous les systèmes fluviaux. Nous prenons les îles non pas comme paramètre supplémentaire des classifications actuelles (on les conserve), mais nous utilisons les paramètres des îles (taille, modèle d'évolution, position dans le chenal verticalement et en plan, degré d'anthropisation du système) pour définir une situation ou

une tendance d'évolution d'un système fluvial, qu'il soit anastomosé, tressé, rectiligne ou endigué...

L'approche est nouvelle et voici les paramètres que nous retenons :

- la taille des îles : part des différents types morphologiques, localisation des secteurs à îles...
- la position dans le chenal : part des îles perchées par rapport au chenal principal, part des îles basses, position latérale ou médiane, rythmes de submersion, degré d'insularité...
- les modèles d'évolution : rythme d'accrétion vertical, rythme de croissance par rapport au lit, érosion active, stabilisation des îles, rattachement à la rive, extension des marges latérales au détriment des îles, évolution du nombre d'îles...
- leur contexte de formation : présence des ouvrages longitudinaux (levées, enrochement), impacts des ouvrages perpendiculaires (chevrettes, barrages), largeur du lit actif, largeur de la plaine d'inondation...

● Les perspectives d'application de gestion peuvent se résumer ainsi :

☞ L'approche géomorphologique a permis de mieux appréhender le réajustement fluvial en cours et l'évolution des bras secondaires du fleuve. La Loire est encore en transition.

☞ Les résultats des travaux de recherche sont au service des gestionnaires (DIREN, Conservatoires, DDE – Service de navigation...). Des actions précises sont proposées sur la base de nos observations.

☞ Il est nécessaire de poursuivre ces collaborations scientifiques-gestionnaires.

La géomorphologie environnementale est outil d'analyse, d'interprétation et d'adaptation à la gestion des milieux « naturels ».

● Les perspectives de recherche sont larges puisque les résultats majeurs de la thèse ouvrent d'autres interrogations sur les systèmes anastomosés. La Loire des îles constitue un objet d'étude de premier ordre ; la Zone Atelier Loire représente un cadre scientifique privilégié pour développer de nouvelles recherches sur ce type d'hydrosystème fluvial.

● La confrontation des résultats de la thèse apporte de nouveaux éléments de réponse aux complexes systèmes anastomosés. Il apparaît ainsi que les îles, jusqu'alors peu étudiées, jouent un rôle essentiel dans l'évolution de ce style fluvial, du fait à la fois de leur dynamique diversifiée et de leur influence importante dans le piégeage sédimentaire. Nous proposons de replacer les îles au centre des recherches sur les hydrosystèmes fluviaux, anastomosés ou non. Les îles seraient alors utilisées, à travers leurs paramètres propres, comme des indicateurs de l'état et de la tendance d'évolution des systèmes fluviaux. Ces conclusions fondamentales ouvrent donc la voie à des travaux de recherche encore plus approfondis sur les îles fluviales et élargie à d'autres hydrosystèmes fluviaux tempérés (Mississippi, Saint-Laurent, Danube), tropicaux (Amazone, Brahmapoutre, Mékong), voire froids (Léna, Ienisseï)...

CONCLUSION GENERALE

Nous avons défini au commencement de la thèse quatre grands objectifs de recherche :

- comprendre le fonctionnement hydrologique et sédimentaire du patron fluvial anastomosé d'un cours d'eau de milieu tempéré, soumis à une forte emprise anthropique ;
- analyser à différentes échelles de temps et d'espace les formes fluviales et plus particulièrement, les îles et les chenaux secondaires, pour lesquels on cherche à établir des budgets sédimentaires, en fonction des différents paramètres de contrôle de la dynamique fluviale (durée et intensité des événements hydrologiques, topographie, caractéristiques de la végétation alluviale, essentiellement) ;
- déterminer les temps et les rythmes de réajustement d'un système anastomosé et en rechercher les origines, qu'elles soient physiques, biologiques et socio-économiques ;
- apporter des clés de gestion de l'hydrosystème aux gestionnaires du fleuve.

Revenons donc sur les résultats majeurs correspondant à chacune de ces problématiques de recherche sur la Loire des îles, entre le Bec d'Allier et Gien.

LA CONCRETISATION D'UNE APPROCHE GEOGRAPHIQUE AU PROFIT DE LA COMPREHENSION DU FONCTIONNEMENT ET DE L'EVOLUTION DE LA LOIRE DES ILES.

- La première approche à échelle moyenne montre que la Loire des îles a développé récemment un style fluvial anastomosé. La Loire moyenne du 19^{ème} siècle était « le fleuve royal par excellence », avec très peu d'îles et de chenaux secondaires (< 10 % du lit fluvial de 1850). La végétation du lit mineur était quant à elle limitée par des usages stricts locaux : la culture d'osier (jeunes saules), des plantations éparses de peupliers (40 % de la végétation du lit de 1850). Les francs-bords étaient peu développés avec une présence faible de la forêt alluviale. L'agriculture empiétait fortement sur l'ensemble de la plaine d'inondation jusqu'à atteindre le lit vif. L'occupation du sol a fortement évolué vers

l'omniprésence actuelle de la forêt alluviale (35 % du corridor fluvial et 90 % des îles sont aujourd'hui boisés).

- Notre approche moyenne a déterminé des rythmes d'évolution de la Loire et de ses unités fonctionnelles de 1850 à aujourd'hui. Elle laisse apparaître les grands stades de formation des îles et des chenaux secondaires. Les îles se développent d'abord lentement entre 1850 et 1930 (en conquérant 0,04 % par an du lit) pour véritablement conquérir le lit fluvial à un rythme quatre fois plus important (+0,15 % du lit par an entre 1930 et 1960 ; +0,17 % entre 1960 et 1995). Deux générations d'îles ont ainsi été distinguées sur nos pas de temps d'étude. Le paysage actuel de la Loire des îles s'est donc mis en place en plusieurs phases, l'accélération de son évolution s'est d'ailleurs réalisée au cours de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle.

- La détermination d'une typologie des îles est une clef importante dans l'analyse de la dynamique hydro-géomorphologique. Cette typologie pourrait par ailleurs constituer la base d'une nouvelle approche géomorphologique des systèmes anastomosés à l'adaptant à d'autres hydrosystèmes fluviaux.

- Parallèlement, l'approche a également montré que les îles possèdent une dynamique de formation et d'évolution complexe et variée. La majorité des îles (72 %) s'est constituée sur le schéma classique de la formation d'un micro-îlot (< 0,1 ha) se développant et s'agrandissant pour devenir une île moyenne (0,5 < x < 2 ha). Nous avons pu en évaluer le rythme d'évolution : il faut compter 30 ans pour qu'un micro-îlot devienne une île moyenne ; sans tenir compte des rattachements de plusieurs îlots (12 % des îles actuelles) qui pourraient les agrandir plus rapidement. 95 % des très grandes îles actuelles (> 10 ha) sont issues de la coalescence de plusieurs îles. La typologie des modèles d'évolution démontre que les îles ne sont pas des unités stabilisées, mais qu'elles jouent un rôle fondamental dans les processus d'érosion et de stockage sédimentaire. Ont ainsi été mis en évidence différents mécanismes d'évolution : démantèlement des grandes îles (3 % des îles), rattachement à des francs-bords (2 %), migration des îles (11 %), apparition (72 %), regroupement d'îles (12 %). Ce résultat a un double intérêt pour les gestionnaires. En premier lieu, en montrant qu'il existe un seuil surfacique des îles au-dessous duquel les

écoulements ont la capacité de reprendre en charge le stock sédimentaire, on permet aux gestionnaires de cibler leurs actions d'entretien du lit. En second lieu, la diversité d'évolution des îles est un facteur très fort de la biodiversité du lit fluvial. C'est en effet sur ces formes de dépôt que l'on observe la plus grande diversité d'habitats exprimée, dans l'état actuel des connaissances, par le tapis végétal (Cornier, 2002). La mise en évidence de l'instabilité des formes insulaires (îles migratrices, en particulier) apporte une « note d'espoir » : c'est par la mobilité des formes insulaires que s'opère la régénération du lit fluvial, et donc, la création des milieux ouverts, tant recherchés par certaines espèces animales ou végétales, protégées à l'échelle nationale et européenne.

Cette analyse montre aussi que la Loire des îles est actuellement encore en mutation.

Ainsi, une première étape dans l'évolution de la Loire moyenne, 1850-1930, montre que 90 % des îles se rattachent à la rive droite en permettant l'extension des francs-bords. Puis, au cours du 20^{ème} siècle, les îles se développent fortement (+0,15 % du lit fluvial par an). De nouvelles îles apparaissent, des îles se rattachent entre elles pour former des îles plus grandes, des îles migrent vers l'aval par le jeu de l'érosion amont et de la sédimentation aval. Ces modes d'évolution des îles constituent l'essentiel de cette seconde période et révèle la forte dynamique de ces îles. Et, depuis 1995, une nouvelle tendance se dessine, même si notre recul n'est pas suffisant pour le confirmer : des îles se rattachent à la rive gauche (-0,02 % par du lit) et permettent une forte extension de franc-bord (+0,46 % du lit). Ce constat nous permet de supposer que l'influence des levées, construites aux 18^e et 19^e siècles, sur ce secteur, est déterminante. Cela signifierait donc, que plus deux siècles après la construction de ces ouvrages, le réajustement du fleuve n'est pas achevé.

On note aussi que depuis une dizaine d'années, des micro-ilots se multiplient dans de nombreux bras secondaires. Là aussi, on montre du doigt aux gestionnaires, une « cible » d'intervention prioritaire. Seule l'approche moyenne, à l'aide de l'analyse spatiale sous SIG, pouvait mettre en valeur ces résultats sur les seuils de formation de la Loire des îles et la dynamique des formes fluviales. Elle ouvre la voie à une approche plus fine qui elle met

en relation ces données essentielles et le fonctionnement des processus hydro-sédimentaires.

- Il faut rappeler que l'étude de la bande active principale a mis en lumière une nouvelle clé d'explication des grandes zones de sédimentation, et par conséquent des secteurs à îles. Il apparaît en effet que **les zones de plus fort enfoncement du chenal principal correspondent aux zones de plus fort déplacement de celui-ci**. Depuis 1850, le talweg de la bande active principale n'a eu cesse de basculer d'une rive à l'autre, ce qui est fort probablement l'une des expressions du forçage par les levées. Nous avons ainsi relevé qu'à chaque déplacement latéral du talweg correspond le développement de zones de sédimentation et de végétalisation. Les secteurs actuels de grandes îles sont donc tous issus de ces zones de sédimentation. Ce sont les secteurs les plus larges, là même où la ligne de talweg s'est éloignée le plus (migration latérale de plus de 100 m). Ces nouveaux résultats se rattachent à un des enjeux majeurs actuels du fleuve : l'incision du plancher alluvial enregistrée depuis la première moitié du 20^{ème} siècle.

- L'incision (à l'échelle historique) s'est d'ailleurs amorcée plus tôt que ce que l'on avait jusqu'alors écrit, au cours de la première moitié du 20^{ème} siècle et certainement à la fin du 19^{ème} siècle. Nous notons ainsi que l'enfoncement était déjà amorcé et donc bien antérieur à l'industrie de granulats : en moyenne 1,5 à 2 m d'enfoncement entre 1933 et 1970 (0,04 à 0,05 m par an en moyenne). Cet enfoncement identifié localement est sans doute lié aux aménagements récents du secteur (levée du 19^{ème} et surtout la chevrette de 1838 de La Charité). Les extractions sont un facteur très aggravant de l'enfoncement du lit. Il est pourtant difficile, en l'état actuel de nos connaissances, de supposer que l'ensemble de la Loire moyenne a subi un tel enfoncement avant les années 1970. Seule l'analyse approfondie des archives de la DIREN (« recalage » des lignes d'eau des campagnes de jaugeage) permettrait de définir l'étendue spatiale d'une première phase d'incision, à l'échelle historique.

- A cette question du déficit sédimentaire actuel de la Loire moyenne, l'analyse à échelle moyenne, à l'aide des profils transversaux et des MNT issus du LIDAR, permet de modéliser les rythmes de rétention sédimentaires depuis le début du 20^{ème} siècle. Il

apparaît ainsi que les surfaces caractérisées par l'accumulation sédimentaire sont largement supérieures aux surfaces érodées. L'analyse spatiale fait apparaître la forte capacité de piégeage et de rétention sédimentaire des formes fluviales qui se sont toutes développées au cours du 20^{ème} siècle. Les îles sont d'importants réservoirs de sédiments avec plus de 75 millions de m³ retenus depuis le début du 20^{ème} siècle entre le Bec d'Allier et Gien (soit un rythme de rétention de 5 000 m³/km/an. Les francs-bords représentent également d'importants stocks sédimentaires (plus de 94 millions de m³ de sédiments, soit 6 300 m³/km/an). Là aussi, cela permet de relativiser l'idée selon laquelle les chenaux secondaires sont les premiers responsables de l'accumulation. En effet, les bras secondaires ne constituent pas les formes les plus « piégeuses » en sédiment depuis le début du 20^{ème} siècle, en sachant qu'une partie de leur charge est potentiellement mobilisable (900 m³/km/an) : ce sont des zones de transit sédimentaire.

- Ce constat nous a amenés à étudier plus finement le fonctionnement des processus hydro-sédimentaires sur les îles et les bras secondaires. A travers des épisodes hydrologiques très diversifiés, entre 2002 et 2005, nous avons analysé les rythmes de sédimentation des îles et des bras secondaires.

- Les grandes et très grandes îles enregistrent les dépôts les plus forts par rapport à leur durée de submersion (6 cm par jour de submersion). Mais leur rythme de croissance verticale à l'année est plus lent que les îles plus exposées aux crues <3000 m³.s⁻¹ (10 cm par an sur les berges pour les très grandes îles, soit 7 à 4 fois moins que les formes insulaires de surfaces inférieures : micro-îlots, îlots et îles moyennes). Les micro-îlots, les îlots et, dans une moindre mesure, les îles moyennes enregistrent les taux de sédimentation les plus forts par an (de 40 à 70 cm par an). Ceci s'explique par des durées de submersion plus longues, quelque soit l'intensité des crues. La sédimentation est en effet importante sur les berges d'îles avec des dépôts de 20 à 80 cm sur les îles les plus jeunes et donc les plus basses. En revanche, les dépôts sont moins épais et plus fins sur les îles plus anciennes. Cependant, rapporté à la durée de submersion, le rythme de sédimentation est trois fois moins rapide que pour les très grandes îles.

- Notre analyse fine s'est ensuite focalisée sur le suivi de trois bras secondaires, présentant tous une particularité fonctionnelle. Les connexions hydrologiques ne s'effectuent pas en même temps suivant la topographie des sites : à des bras toujours en eau (bras des Loges) s'opposent ceux exceptionnellement en activité (bras des Barreaux), en passant par des bras intermédiaires dont l'activité hydrologique permet de les maintenir face à une végétalisation imposante (Bras du Lac). A ces différents niveaux de submersion et mise en connexion hydrologique correspond un bilan sédimentaire tout particulier. Les bras moins souvent en eau subissent de grandes modifications aux connexions et des taux de sédimentation très forts dans leur section médiane. Les chenaux le plus souvent en eau enregistrent des perturbations moindres et connaissent un certain équilibre des rythmes de sédimentation entre l'amont et l'aval. Enfin, les bras en position intermédiaire enregistrent des contrastes importants entre connexion amont (sédimentation dominante) et aval (érosion privilégiée) et une faible évolution de la strate végétale de leur chenal. De plus, la permanence de la connexion aval est apparue comme un facteur très important de contrôle du comblement du bras.

- L'association des crues, proches dans le temps, permet encore mieux d'apprécier le rôle de ces crues dites morphogènes. La crue de décembre 2003 et celle de janvier 2004 interviennent à un mois d'intervalle, en hiver, bien avant la période de développement de la végétation. Ce que la crue de décembre 2003 a déposé dans les bras secondaires, dans les parties non végétalisées a été systématiquement remanié par la crue de janvier 2004. Cette observation montre probablement, le rôle de la fréquence des crues dans la remise en mouvement des sédiments. Cette hypothèse devra être validée par des observations continues des relations débits – érosion-sédimentation. Cependant, ces crues théoriquement morphogènes n'inversent pas la tendance d'évolution actuelle du fleuve, à savoir le comblement des bras végétalisés. Le développement croissant de la végétation pionnière s'observe dans les bras secondaires : multiplication des bancs à caractère insulaire et des micro-îlots, taux de sédimentation importants sur les bancs végétalisés (effet peigne très fort : jusqu'à 80 cm après submersion).

L'analyse de l'approche multi-scalaire met à jour de nouveaux résultats sur le fonctionnement des systèmes anastomosés en milieu tempéré, comme celui de la Loire des îles. La détermination des seuils de réajustement a invité à s'intéresser aux facteurs explicatifs, et plus particulièrement à montrer l'influence de chaque facteur physique, biologique (végétation) et anthropique depuis le 19^{ème} siècle.

L'ANALYSE DES INTERACTIONS SOCIÉTÉS – LOIRE DES ÎLES DEPUIS LE 19^{ème} SIÈCLE

L'analyse des facteurs socio-économiques et l'étude des chroniques hydrologiques sur plus d'un siècle et demi de suivi permettent de distinguer différentes phases de réajustement du fleuve.

- L'arrêt de la navigation est le facteur déclenchant de la végétalisation active du lit entamé dès la fin du 19^{ème} siècle. La première génération d'îles enregistrée est issue directement de cette mutation profonde historique importante. Tout ce qui pouvait empêcher et limiter la croissance de la végétation prenait ici fin. En même temps qu'un pan de l'histoire du fleuve, l'arrêt de la navigation sonnait le glas à toute une forme d'entretien du fleuve et par là même faisait entrer le fleuve dans une « nouvelle ère » dont nous observons aujourd'hui les manifestations.
- Les maux chroniques du 20^{ème} siècle, comme le déficit sédimentaire et l'incision du lit, sont des facteurs aggravants de la végétalisation. Ils ont, en effet, aggravé le réajustement fluvial dès les années 1960 et concouru ainsi à la formation de la seconde génération d'îles observée grâce à l'analyse spatiale.
- Selon B. Bomer (1972), le style anastomosé de la Loire est une réponse à l'assouplissement hydrologique et à l'absence des grandes crues depuis la fin du 19^{ème} siècle. Or, les chroniques hydrologiques depuis 1850 révèlent peu de modifications du régime hydrologique, hormis l'absence de crue majeure. On analyse en effet une augmentation de la part des crues hivernales et une absence, depuis 1925, des crues estivales. On observe une régularité de la durée des basses eaux. Au regard des impacts des débits de plein-bords et des crues, analysés entre 2002 et 2005, la morphogénèse n'est pas très efficace dans les bras secondaires et encore moins sur les îles. Ceci nous laisse supposer que l'hydrologie

n'est pas le facteur principal des réajustements fluviaux observés en Loire moyenne depuis le 19^{ème} siècle.

LA DETERMINATION DES GRANDES PHASES DE REAJUSTEMENT DE LA LOIRE DES ILES, DU BEC D'ALLIER A GIEN.

Il reste toujours difficile à définir le degré de naturalité d'un fleuve. Même si les études consacrées à cet aspect laissent entrevoir que la Loire avait certainement un style tressé et que les îles ont toujours fait partie du paysage fluvial ligérien (Gautier, 2006 ; Carcaud, 1999). D'autre part, le site du Bec d'Allier correspond sans aucun doute au site d'îles les plus anciennes de la Loire moyenne. Nous pensons que les îles sont aussi des formes fluviales indicatrices d'apports sédimentaires substantiels, comme c'est le cas dans une grande confluence comme le Bec d'Allier : des îles se sont toujours formées dans ces confluences en prenant une position centrale dans le lit mineur, ce qui n'aurait pas gêné la navigation ligérienne et aurait assuré alors, en plus d'être utilisé pour l'agriculture, leur pérennité. On peut donc supposer qu'avant le 20^{ème} siècle que l'absence d'îles dans certains secteurs de la Loire moyenne est liée en grande partie aux divers usages du fleuve, « interdisant » la croissance de la ripisylve.

- Au regard de nos résultats, l'anastomose ne serait en fait qu'un stade transitoire vers ce à quoi la Loire des îles tend : une chenalisation unique. Cette chenalisation est la réponse à de multiples facteurs en jeu depuis la fin du 19^{ème} siècle. Cette chenalisation ne correspond pas véritablement à ce que la Loire fût bien avant le 19^{ème} siècle et c'est pourquoi il est difficile d'affirmer qu'à présent la Loire retrouve son style fluvial « originel ». Rien n'est possible dans ce sens car ces deux siècles passés n'ont été le lot, comme nous l'avons longuement évoqué, que de perturbations environnementales rapprochées à la fois physiques, biologiques et anthropiques.

- Il est une évidence, au regard des résultats de l'approche multi-scalaire, que la Loire est encore en phase de transition. On enregistre tout d'abord une longue phase d'ajustement fluvial avec des contraintes anthropiques très fortes (Figure 246) :

- avant le 20^{ème} siècle, on remarque des crues très fortes avec les débits les plus intenses enregistrés en Loire moyenne. Le lit fluvial est adapté à ces forts écoulements et donc, très large. Des contraintes humaines associées aux usages du lit et aux ouvrages de navigation participent fortement à l'instabilité des formes en bloquant leur fixation par la végétation.
- Une seconde phase voit le retrait de la navigation et des usages contraignant pour le fleuve Les ouvrages lourds restent et contraignent la dynamique fluviale comme les levées et les chevrettes.
- Au cours du 20^e siècle, apparaissent trois facteurs concomitants : l'abandon de l'entretien du lit et de ses marges, les extractions de sédiments, et les nouvelles conditions hydrologiques de l'après Petit Age Glaciaire.
- Cet ensemble s'opère dès le début du 20^{ème} siècle et correspond à la première grande vague de formation des îles et à la forte extension latérale des francs-bords. Ces francs-bords montrent le rétrécissement du lit fluvial et montrent à quel point l'entretien systématique, par les sociétés humaines, des « chantiers » et de la voie de halage, donc des marges, empêchait toute progression latérale des francs-bords.
- Les facteurs physiques (sédimentation par les crues dès les débits morphogènes ; périodes de basses eaux favorables à l'installation de la végétation pionnière alluviale) et les facteurs anthropiques (modifications des usages, entretien trop local et ponctuel, extractions industrielles, patrimonialisation écologique et culturelle, et plus récemment pompages de la nappe alluviale) n'ont fait qu'aggraver et accélérer le réajustement fluvial. A travers l'historique de formation de la Loire des îles c'est tout un pan d'histoire régionale et nationale qui défile et explique les différents rythmes d'évolution de la Loire anastomosée. La notion d'anthroposystème fluvial prend ainsi toute sa teneur et rentre dans la logique fédératrice de la ZAl.

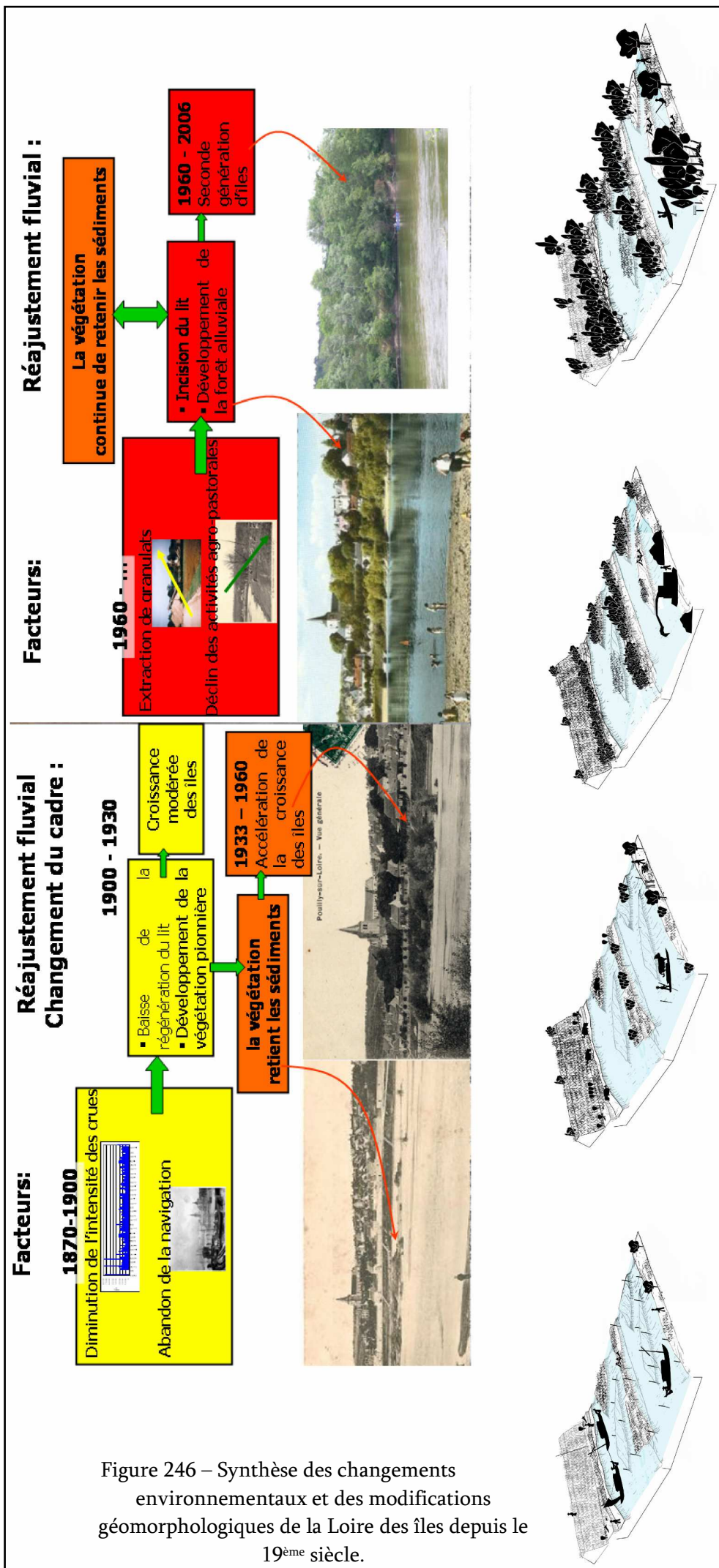


Figure 246 – Synthèse des changements environnementaux et des modifications géomorphologiques de la Loire des îles depuis le 19^{ème} siècle.

L'INTERPRETATION A TIRER DE CES RESULTATS MAJEURS PAR RAPPORT AUX DIFFERENTS ENJEUX LIES A LA LOIRE.

Les rythmes de réajustement fluvial de la Loire moyenne permettent de modéliser une morphologie future du système anastomosé de la Loire des îles. Les îles présentent de nombreux modes d'évolution, mais on assiste un rattachement progressif des îles à la rive : ce qui entraîne leur stabilisation définitive et l'extension des francs-bords. Ces francs-bords connaissent une croissance de leur développement depuis 1995. Si ce rythme se maintient, une nouvelle morphologie de la Loire moyenne se dessine entre le Bec d'Allier et Gien. D'un système anastomosé, la Loire, dans cette section moyenne, pourrait tendre vers la formation d'un chenal unique enchâssé dans une forêt-galerie, avec quelques grandes îles migratrices. Les îles ne seraient alors qu'actuellement des formes fluviales de transition à ce stade d'évolution. Le style anastomosé actuel de la Loire des îles semble donc annoncer une nouvelle phase de réajustement du fleuve.

- Nous pouvons ajouter que la situation actuelle du paysage de la Loire est historiquement nouvelle depuis le Néolithique (Figure 247). En effet, si la révolution néolithique (- 8000 av. J.C. environ) a ouvert la voie aux premiers défrichements, il faut attendre le Moyen-Age (entre 900 et 1300 environ) pour que les grands défrichements de la France se réalisent. La vallée de la Loire n'y échappe pas. La navigation et l'agriculture proche du fleuve ont maintenu donc un paysage ouvert autour de la Loire. On assiste donc bien, depuis le 19^{ème} siècle, à un retour de la forêt alluviale dans le lit de la Loire. Le paysage actuel est donc bien nouveau et amorce d'autres interrogations. Comment vieillira cette forêt alluviale qui tend vers une forêt à bois dur du fait à la fois de l'accrétion verticale des îles et de l'abaissement du plancher alluvial ? Il semble également important de se pencher sur la question du contrôle de la dynamique fluviale par le biais de la végétation (Schnitzler, 1996). Les relations sont très fortes entre la dynamique fluviale et la végétation (Dufour, 2005 ; Rodrigues, 2004 ; Pautou et *al.*, 2003). La forêt à bois dur possède t-elle des capacités à se régénérer naturellement ? Il semble que l'action anthropique soit le seul facteur actuel qui puisse perturber un changement irréversible

afin de contrôler la végétation et indirectement la dynamique fluviale. Ou alors des crues plus fréquentes et plus longues pourraient encore remettre en cause cette situation...

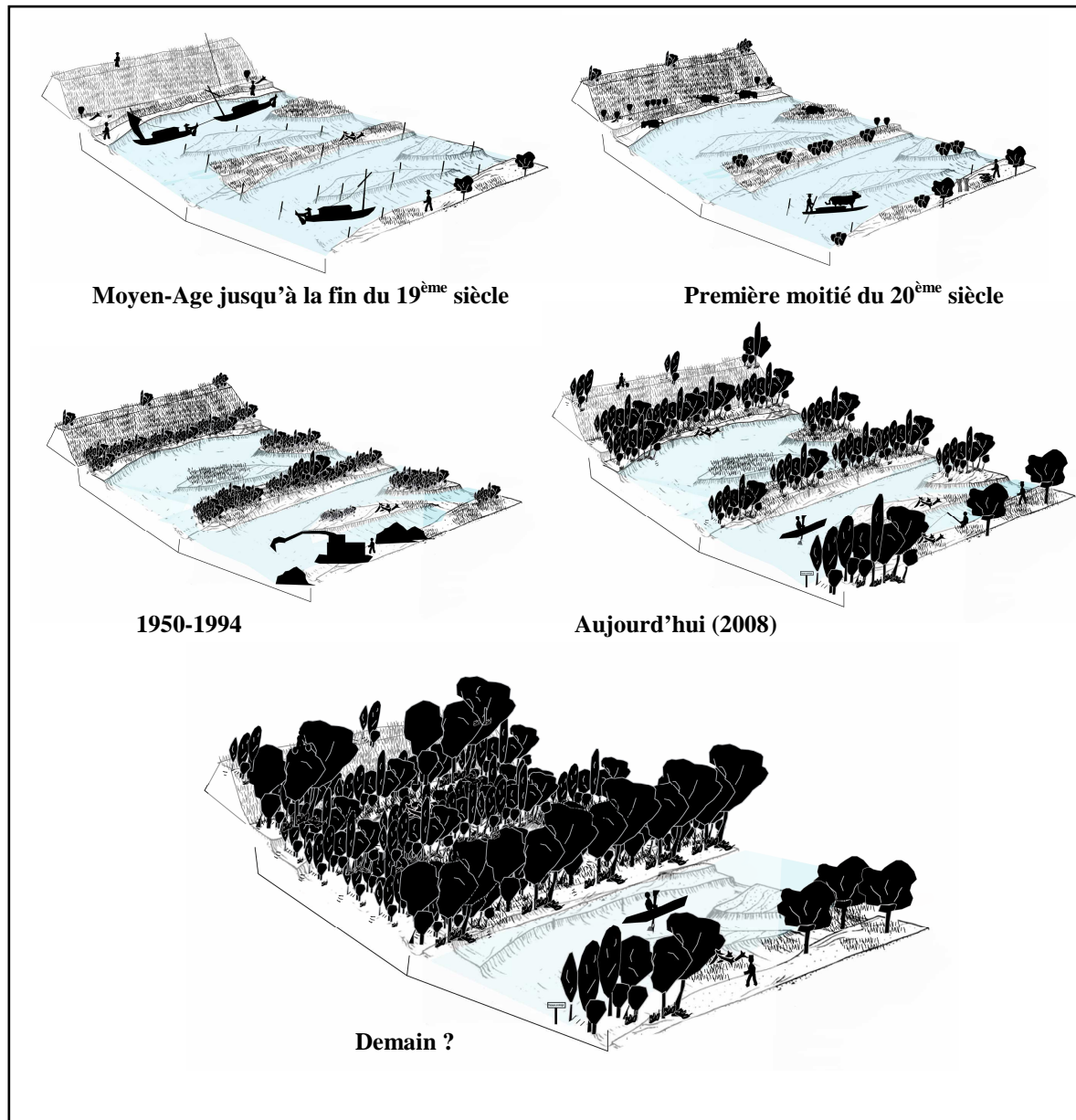


Figure 247 – Evolution du style anastomosé en Loire moyenne depuis 1850 et perspectives.

- Nous proposons donc des pistes de gestion et de perception pour l'hydrosystème Loire. Le développement durable de cet hydrosystème Loire doit passer par une vraie prise en charge du fleuve et de son fonctionnement actuel. Le lancement de nouvelles perspectives de recherche souligne la nécessité de poursuivre de tels travaux en se consacrant à de nouveaux aspects de l'hydrosystème ligérien, comme les impacts possibles du

réchauffement climatique. Malgré un changement climatique reconnu à l'échelle mondiale, il reste encore à en estimer le véritable impact à l'échelle du corridor fluvial ligérien, et cela même si une augmentation des températures de l'eau est incontestable depuis le début du 20^{ème} siècle (Moatar et Gailhard, 2006). C'est dans cette perspective que les résultats de la présente thèse trouveront des débouchés et d'autres extensions dans les travaux de recherche déjà amorcés en Loire moyenne (Nabet, en cours) et proposés par le Plan Loire Grandeur Nature.

- Notre approche fine des bras secondaires a permis d'ailleurs de montrer que les bras offrent une diversité de rythme d'évolution très complexe. Les gestionnaires doivent donc s'adapter à cette diversité en préconisant l'expertise géomorphologique comme préalable à toute intervention. L'adaptabilité des interventions dans le lit de la Loire est de donc rigueur pour mettre en place une gestion cohérente avec les rythmes de sédimentation et d'érosion des bras.

- La géomorphologie fluviale et environnementale a trouvé dans ses lignes de recherche un terrain d'application très enrichissant. L'étude, l'analyse et l'interprétation actuelles d'un système anastomosé en milieu tempéré comme celui de la Loire des îles ont abouti à de nouvelles clés de compréhension. Ces clés ouvrent la voie à de nouvelles perspectives de recherche en géomorphologie fluviale à la fois sur les systèmes anastomosés, dont la complexité nécessite d'y consacrer encore de nouvelles recherches et pas seulement sur la Loire, et les formes fluviales, les îles en première ligne. Cette thèse amorce donc déjà de nouvelles pistes d'exploration scientifique ; la ZAL et les extensions scientifiques du Plan Loire permettront de les concrétiser à très court terme dans le bassin de la Loire. Ces clés annoncent enfin de nouvelles approches d'action dans le lit de la Loire moyenne, et enrichissent surtout les perspectives de collaboration entre les scientifiques et les gestionnaires du fleuve...

BIBLIOGRAPHIE

- Abam T.K.S., 1997.** Genesis of channel bank overhangs in the Niger analysis of mechanisms of failure. *Geomorphology*, 18 : 151–169.
- Agences de l'eau, 1999.** La gestion intégrée des rivières. Guide collectif et pluridisciplinaire, 3 vol.
- Amoros C., Petts G.E., 1993.** Hydrosystèmes fluviaux. Masson (coll. d'Ecologie), 300 p.
- Amoros C., A.L. Roux, J.L. Reygrobellet, J.P. Bravard et G. Pautou, 1987.** A method for applied ecological studies of fluvial hydrosystems. *Regulated Rivers*, 1 : 17–36.
- Andriamahefa H., 1999.** Les hydro-écorégions du bassin de la Loire. Morphologie, hydrologie, pressions anthropiques sur les cours d'eau et les bassins versants. Université J. Monnet, St Etienne, 272 p.
- Anselin A., 1998.** Influence de la dynamique fluviale sur la dynamique des communautés végétales dans le Val de Loire - Mise en place d'un protocole d'étude phytoécologique. INA. PG, stage CAE, Université de Bourgogne.
- Arnaud-Fassetta G. 1998.** Dynamiques fluviales holocènes dans le delta du Rhône. Thèse, Université d'Aix-Marseille 1, Presses Universitaires de Septentrion, Lille, 329 p.
- Babonaux Y., 1970.** Le lit de la Loire - Etude d'hydrodynamique fluviale. Paris, Bibliothèque Nationale, 2 vol.
- Bacchi M. et Berton J.-P., 1997.** Guide méthodologique d'entretien du lit de la Loire. DIREN Centre - ADESVV, Chinon, 95 p.
- Baldeck M., 2006.** Impact de la faune sauvage sur la forêt alluviale. Mémoire de 2^{ème} année de master de Géographie, Université Paris 8.
- Bazin P. et Gautier E., 1996.** Un espace de liberté pour la Loire et l'Allier : de la détermination géomorphologique à la gestion. *Revue de Géographie de Lyon*, 71/4 : 377-386.
- Beaudoin F., 1989.** La marine de Loire et son chaland. *Les cahiers du musée de la batellerie*, 12, 39 p.
- Beck T. et Corbonnois J., 2003.** Les différents états du lit mineur de la Moselle entre Epinal et Méréville, étapes de la reconstruction d'un nouvel équilibre. *Actes du colloque le fil de l'eau*, Nancy, 10-12 mars 2003.
- Beck T. et Corbonnois J., 2004.** Conditions du transit de la charge solide grossière dans le lit de la Moselle amont - Protocole de mesures et détermination des processus. *Actes du colloque Spatialisation et cartographie en hydrologie, Mosella*, XXIX/3-4 : 341-352.
- Berthois L., 1972.** Les transports sédimentaires et l'érosion dans le bassin de la Loire. *Etudes Ligériennes*, 11 : 50-69.
- Billacois F., 1964.** La batellerie de la Loire au XVII^{ème} siècle. *Revue d'Histoire moderne et contemporaine* : 163-190.
- Billacois F., 2002.** L'île de Cosne : évolution et aménagement (XVII^{ème}-XX^{ème} siècles), *Études ligériennes*, colloque *Approche archéologique de l'environnement et de l'aménagement du territoire ligérien*, Orléans, 14-16 novembre 2002 : 263-267.
- Binard R., 2003.** Caractérisation de l'habitat de trois espèces d'oiseaux des grèves de la Loire. Mémoire de DESS, 41 p. + Annexes.

- BIOTOPE, 2004.** Documents d'Objectifs de la proposition de Site d'Intérêt Communautaire FR2400522 « Vallées de la Loire et de l'Allier ». 148 p.
- BIOTOPE, 2005.** Etude d'incidence des travaux de restauration du lit de la Loire, NATURA 2000, Départements de la Saone-et-Loire (71), de la Nièvre (58) et du Cher (18), 61 p.
- Boissel A., 1997.** Historique des activités humaines sur la Réserve Naturelle du Val de Loire. Conservatoire des Sites Naturels Bourguignons, 29 p. + carte
- Bomer B., 1972.** Les îles de la Loire, évolution ou stabilité ? *Etudes Ligériennes*, 11 :70-80.
- Bouchardy, C., 2002.** La Loire. Vallées et vals du grand fleuve sauvage. La Bibliothèque du naturaliste. Delachaux et Niestlé, Paris, 290 p.
- Bouquet, C., 2000.** La communauté urbaine de Tours et la Loire à la fin du Moyen Age. Géoarchéologie de la Loire moyenne et de ses marges. Synthèse des résultats du PCR 1996-1999 : 37- 46.
- Bourreau L., 2000.** Restauration du lit de la Loire au droit de la chevette de la Charité-sur-Loire. 50 p.
- Brague R. et Loiseau J.-E., 1980.** Les forêts alluviales intéressantes du cours moyen méridien de la Loire et de l'Allier. *Colloques phytosociologiques*, IX, Strasbourg : 601-605.
- Bravard J.-P., 1980.** Le Rhône du Léman à Lyon. La Manufacture (Coll. L'homme et la Nature), 452 p.
- Bravard J.-P., Amoros C., Pautou G., Bornette G., Bournaud M., Creuze des Chatelliers M., Gibert J., Peiry J.-L., Perrin J.-F., Tachet H. 1997.** River incision in Southeastern France : morphological phenomena and ecological impacts. *Regulated Rivers, Research and Management*, 13: 75-90.
- Bravard J.-P. et Magny M., 2002** (éd.). Les Fleuves ont une histoire. Les paléoenvironnements des rivières et des lacs français depuis 15 000 ans. Paris, Errance, coll. Archéologie aujourd'hui, 312 p.
- Bravard J.P., Landon N., Peiry J.L. et Piégay H., 1999.** Principles of engineering geomorphology for managing channel erosion and bedload transport, examples from French rivers. *Geomorphology*, 31: 291-311.
- Bravard J.P. et Petit F., 1997.** Les cours d'eau - dynamique du système fluvial. Colin, 222p.
- Brice J.C., 1984.** Planform properties of meandering rivers, *in* Elliot, Proceeding of the Conference – Rivers '83, American Society of Civil Engineers, New-Orleans, Canada : 1-15.
- Brossé R., 1982.** Les processus sédimentaires dans le fleuve Loire. Université d'Angers, Angers, 350 p.
- Bugnon F., Pages J., Clavier J.-L., Loiseau J.-E. et Ducerf G., 1983.** Etude et cartographie des biocénoses dans la vallée de la Loire nivernaise en aval de Decize. GREMINAT, Univ. de Dijon, 70 p.
- Burnouf J., Carcaud N., 1999.** Le Val de Loire en Anjou Touraine : un cours forcé par les sociétés riveraines. *Médiévales*, 36 : 17-29.
- Burnouf J., Leveau Ph., 2004.** Présentation. *In* Burnouf J., Leveau Ph. (Eds), Fleuves et marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture. CTHS (Archéologie et histoire de l'art, 19) : 9-14.

- Burnouf J., Muxart T., Villalba B., Vivien F.-D., 2003.** Le passé a de l'avenir : premier bilan de l'appel d'offre «Histoire des interactions sociétés-milieux» et perspectives de recherches. *In* Muxart T., Vivien F.-D., Villalba B., Burnouf J. (Eds.), *Des milieux et des hommes : fragments d'histoires croisées*. Elsevier : 15-28.
- Calard R., Karlsson P., 1994.** L'effet de travaux d'entretien du lit sur l'écoulement des crues : mise au point d'une méthodologie et application au projet de nettoyage du lit de la Loire entre La Charité-sur-Loire et Saint-Satur, 25 p. + Cartes + Ann.
- Carcaud N., 2004.** D'espace et de temps : un itinéraire de recherche et d'enseignement sur les anthroposystèmes fluviaux. Mémoire de thèse d'Habilitation à Diriger des Recherches. Université d'Angers, 216 p.
- Carcaud, N., Cyprien, A.-L. et Visset, L., 2000.** Marais et vallée de la Loire, mémoire des paysages depuis dix mille ans : étude comparative des marais de Distré et Champtocé et de la vallée de la Loire à Montjean-sur-Loire. *Archives d'Anjou*, 4 : 187-215.
- Carcaud N., Garcin M., Visset L., Musch J., Burnouf J., 2002,** Nouvelle lecture de l'évolution des paysages fluviaux à l'Holocène dans le bassin de la Loire moyenne. *In* Bravard J.P., Magny M., (eds) *Les fleuves ont une histoire – Paléoenvironnements des rivières et des lacs français depuis 15000 ans*, Errance: 71-84.
- Carson M.A., 1984.** The mending-braided river threshold : a reappraisal. *Journal of Hydrology*, 73: 315-334.
- Chambaud F., Lemaire E. & Oberti D., 1996.** Opération Locale Val de Loire Val d'Allier. Suivi écologique et évaluation des Mesures Agri-Environnementales. Pré-étude écologique et typologie fonctionnelle des prairies, landes et pelouses inondables. Rapport Cellule d'Application en Écologie, Université de Bourgogne pour le compte de la Chambre d'Agriculture de la Nièvre et de la DIREN Bourgogne : 100 p. + annexes.
- Champion M., 1863.** Les inondations en France depuis le VI^{ème} siècle jusqu'à nos jours, Recherches et documents, Paris, 6 vol.
- Chorley R.J. et Kennedy B.A., 1971.** Physical geography, a systems approach. Prentice Hall, London, 370 p.
- Collectif, 2006.** Recueil d'expériences du programme Loire Nature 2002-2006. Fédération des Conservatoires d'espaces naturels régionaux en collaboration avec la LPO et le WWF, 212 p.
- Comoy G., 1861.** Renseignements sur les crues de la Loire et de ses grands affluents, Paris, in-4°, 32p.
- Comoy G., 1868.** Mémoires sur les ouvrages de défense contre les inondations, Archives de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- Conservatoire des Sites Naturels Bourguignons, 1996.** Diagnostic écologique de la Réserve Naturelle du Val de Loire. 50 p. + Cartes + Ann. (CSNB, 1996).
- Coque R., 1993.** Géomorphologie. Paris, Armand Collin.
- Corillion R., 1982-1983.** Flore et végétation de la vallée de la Loire (cours occidental : de l'Orléanais à l'estuaire). Jouve, Paris - Texte : 736 p., Illustrations : 355 p.

- Cornier T., 1996.** Etude de la dynamique de la végétation de la plaine alluviale de la Loire. Equipe Pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature Orléans et IMACOF C.U. Chinon - 3 rapports.
- Cornier, T. 1999.** La biodiversité dans l'hydrosystème ligérien étudiée à partir de la végétation alluviale. *J. Bot. Soc. bot. France.*, 12: 45-50.
- Cornier T., 2002.** La végétation alluviale de la Loire entre le Charolais et l'Anjou : essai de modélisation de l'hydrosystème. Thèse Doctorat ès Sciences, Université de Tours.
- Cosandey C. et Robinson M., 2000.** Hydrologie continentale, Colin, 360 p.
- Cosandey C., 2004.** Les eaux courantes, Belin, 240 p.
- Couderchet L., 2000.** Mise au point, par télédétection spatiale et SIG, d'une méthode d'inventaire normalisé des milieux naturels selon CORINE Biotopes. *Photo-interprétation*, n°1999/3-4, éditions ESKA, Paris.
- Courtet L., Pateaud P. et Stephan B., 1990.** La Loire en sursis. Ed. La Manufacture, 305 p.
- Crutzen, P. J. et Stoermer E. F., 2000.** L'"Anthropocene". *Bulletin Global De Changement*, 41 : 12-13.
- Cyprien A.-L., 2001.** Chronologie de l'Interaction de l'homme et du milieu dans l'espace central et aval de la Loire. Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2 tomes.
- Cyprien A.-L., Carcaud N., Visset L., 2001.** Etude paléoenvironnementale du marais de Distré (Maine-et-Loire) : géoarchéologie d'une zone humide depuis le Préboréal. *Quaternaire*, 12/ 1-2 : 89-101.
- Dacharry M., 1974.** Hydrologie de la Loire en amont de Gien, Paris, N.A.L., 2 vol., 619 p.
- Dacharry M., 1969.** Quelques remarques sur les parts respectives de la Loire et de l'Allier dans les débits de crues à Gien de 1955 à 1967. *Bulletin de la Section de Géographie*, Comité des Travaux Historiques et Scientifiques, Paris, tome LXXX : 383-396.
- Dacharry M., 1996.** Les grandes crues historiques de la Loire, *La Houille blanche* 6-7 : 47-53
- Dambre J.L. et Malaval P., 1994.** Evaluation des conditions de poursuite de la politique de limitation des extractions de matériaux dans le lit de la Loire du Bec d'Allier à Nantes. Rapport + annexes.
- De Person F., 1994.** Bateliers sur la Loire, CLD.
- Denis, A., 2000.** Étude de la perception et de la gestion des zones humides ligériennes par les acteurs locaux. Univ. Orléans, Mémoire maîtrise géogr., 200 p. + annexes.
- Depret T., 2006.** Le réajustement fluvial des méandres de Guilly (Loiret). Zone Atelier du Bassin de la Loire. Mémoire de 1^{ère} année de master de Géographie, Université Paris 1.
- Desloges J.R. et Church M., 1992.** Geomorphic implications of glacier outburst flooding: Noeick River valley. *British Columbia. Can. J. Earth Sci.*, 29, 551-564.
- Desmedt C., 1999.** L'utilisation d'un SIG dans le cadre du PNRZH. Maîtrise de Géographie. Université de Franche-Comté, 108 p.
- Dion R., 1934.** Le Val de Loire. Etude de géographie régionale, Thèse de Doctorat, Université de Tours, 752 p.
- Dion R., 1961.** Etude des levées de la Loire. Paris, 316 p.
- DIREN Centre, 1991.** Atlas des zones inondables dans la vallée de la Loire, Orléans, Service du Bassin Loire-Bretagne, 17 vol.

- DIREN Centre, 2005.** Orientations régionales de gestion et de conservation de la faune sauvage et de ses habitats (O.R.G.F.H.). Région Centre, 91 p.
- Dufour S., 2005.** Contrôles naturels et anthropiques de la structure et de la dynamique des forêts riveraines - Exemples de différents hydrosystèmes rhodaniens. Thèse de Doctorat, Université Jean Moulin – Lyon 3, 243 p.
- Dupieux N., 2004a.** Une proposition de protocole commun pour la description et le suivi des forêts alluviales du bassin de la Loire. Programme Loire nature, mission scientifique, 41 p.
- Dupieux N., 2004b.** Une proposition de protocole commun pour la description et le suivi des annexes hydrauliques du bassin de la Loire. Programme Loire nature, mission scientifique, 51 p.
- Eaton B.C., Lapointe M.F., 2001.** Effects of large floods on sediment transport and reach morphology in the cobble-bed Sainte Marguerite River. *Geomorphology*, 40 : 291-309.
- Edwards P.J., Kollmann J., Gurnell A.M., Petts G.E., Tockner K. et Ward J.V., 1999.** A conceptual model of vegetation dynamics on gravel bars of a large Alpine river. *Wetlands Ecology and Management*, 7 : 141-153.
- EPALA, 1987.** Barrage de Serre de la Fare sur la Loire - Etude d'impact. Orléans, 736 p.
- EPALA, 1988.** Le programme d'aménagement de la Loire et de ses affluents - L'impact des barrages sur le milieu naturel. Orléans, 19 p.
- Equipe Pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature, 1999.** Synthèse des propositions pour une stratégie globale de réduction des risques d'inondation par les crues fortes en Loire moyenne. 62 p.
- Fergusson R.I., 1984.** The threshold between meandering and braiding, *In* Smith, Proceeding of the 1st International Conference on Hydraulic Design, Springer : 615-629.
- Finlayson D.P. et Montgomery D.R., 2003.** Modeling large-scale fluvial erosion in geographic information systems. *Geomorphology*, 53 : 147-164.
- Fouque C., 2006.** Le suivi patrimonial comme outil de connaissance des zones humides. *In* Séminaire ORGFH, les milieux humides. CDRom.
- Galinié, H. et Rodier X., 2000.** Les modifications du trait de la rive gauche de la Loire dans l'ouest de Tours. Géoarchéologie de la Loire moyenne et de ses marges. Synthèse des résultats du PCR 1996-1999 : 29-36.
- Gallard B. et Le Nevez N., 2001.** Iles de Loire. Conservatoire régional des Rives de Loire et DIREN Orléans, 93 p.
- Garcin M., Carcaud N., Gautier E., Burnouf J., Castanet C., Fouillet N., 2006.** Impact des héritages sur un hydrosystème : l'exemple des levées en Loire moyenne et océanique. *In* Allée Ph., Lespez L. (eds) *L'érosion entre société, climat et paléoenvironnement*, PU Blaise Pascal : 223-236.
- Gasowski Z., 1994.** L'enfoncement du lit de la Loire. *Revue de Géographie de Lyon*, 69/1 : 41-45.
- Gautier S., 2000.** Etude de l'évolution géomorphologique dynamique de la Loire à Bréhemont. Maîtrise de géographie, Orléans, 125 p. + Ann.

- Gautier E., 1992.** Recherches sur la morphologie et la dynamique fluviales dans le bassin du Buech (Alpes du Sud). Thèse de Doctorat, Paris X Nanterre, 439 p.
- Gautier E., 2001.** Rythmes d'évolution des zones humides - Approche méthodologique et résultats préliminaires des études morphodynamiques entreprises dans le cadre du Programme National de Recherche sur les Zones Humides de La Loire moyenne. *Études Ligériennes*, nouvelle série 3 : 7-26.
- Gautier E., 2006.** Recherches géomorphologiques sur le fonctionnement des plaines d'inondation. Approches croisées de trois grandes plaines. Thèse HDR, Université Paris 1, 3 vol., 208 p. + annexes.
- Gautier E., Bacchi M., Barbier J., Berton J.-P., Chambaud F., Couderchet L., Denis A., Dieu N., Grosbois C., Josselin D., Kunesch S., Lewis N., Moine A., Négrel, P., Oberti D., Petelet-Giraud E., Rousseau O. et De Sède M.-H., 2001.** La détermination d'un espace de liberté pour le système fluvial ligérien : identification et spatialisation des unités morphodynamiques et écologiques fonctionnelles dans les vals libres et endigués de la Loire, enjeux et acteurs sociaux, PNRZH Loire, 211 p.
- Gautier E., Burnouf J., Carcaud N., Chambaud F. et Garcin M., 2007.** 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., Chambaud F. et Couderchet L., 2002.** Approche méthodologique des paysages fluviaux de la Loire - l'application à la Loire bourbonnaise. *In* Actes du colloque *Les paysages ligériens*, Tours mars 2001 : 195 – 203.
- 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. et Grivel S., 2004.** Étude de la dynamique fluviale de la Réserve Naturelle du Val de Loire. Rapport 2003, CNRS, CSNB.
- Gautier E., Piégay H. et Bertaina P., 2000.** A methodological approach of fluvial dynamics oriented towards hydrosystem management: the Loire and Allier rivers case study. *Geodyn. Acta*, 13 (1) : 29-43.
- Gibling M.R., Nanson G.C. et Maroulis J.C., 1998.** Anastomosing river sedimentation in the Channel County of Central Australia. *Sedimentology*, 45 : 595-619.
- Gilvear D.J., 1999.** Fluvial geomorphology and river engineering: future roles utilizing a fluvial hydrosystems framework. *Geomorphology*, 31 : 229-245.
- Gilvear D. et Bryant R., 2003.** Analysis of aerial photography and other remotely sensed data. *In* Kondolf G.M., Piégay H. (Ed.): *Tools in fluvial geomorphology* Wiley : 135 - 170.
- Ginestet P. et Gautier J.-N., 1999.** Sectorisation géomorphologique de la Loire entre le Bec d'Allier et Montjean-sur-Loire, 50 p.
- Girel J., Vautier F., Peiry J.L., 2003.** Biodiversity and land use history of the alpine riparian landscapes (the examples of the Isère river valley, France). *In* Mander U. & M. Antrop [eds.], *Multifunctional landscapes: continuity and changes in landscapes*, Volume 3, WIT PRESS, Southampton, UK : 167-200.

- Graf W. L., 2005.** Geomorphology and American dams: The scientific, social, and economic context. *Geomorphology*, 71 : 3-26.
- Grangeret N., 2005.** Compréhension de la construction de la plaine alluviale de la Loire bourbonnaise et enjeux de gestion. Zone Atelier du Bassin de la Loire. Mémoire de 2^{ème} année de master de Géographie, Université Paris 4.
- Grosbois C., 1998.** Géochimie des eaux de la Loire : contributions naturelles et anthropiques, quantification de l'érosion. Thèse Science de la Terre, Tours, 232p. + Ann.
- Grosbois C., Négrel P., Fouillac C., Grimaud D., 2000.** Chemical and isotopic characterization of the dissolved load of the Loire river. *Chem. Geol.*, 170 : 179-201.
- Groupe d'Hydraulique Numérique (GHN), 1995.** Etude hydraulique bidimensionnelle à la Charité-sur-Loire, analyse des données hydrauliques. Etude réalisée pour le compte de la D.D.E. Nièvre, 15 p.
- Groupe d'Hydraulique Numérique (GHN), 1997.** Etude de solutions d'aménagement à proximité de la chevrette de la Charité-sur-Loire. Etude réalisée pour le compte de la D.D.E. Nièvre, 81 p.+ Ann.
- Guérin L., 1996.** Etude morphodynamique de la Loire dans les méandres de Guilly (Loiret) - Programme Life Loire Nature. Mémoire maîtrise géogr., Univ. Orléans, 229 p.
- Gupta A., Hock L., Xiaojing H. et Ping C., 2002.** Evaluation of part of the Mekong River using satellite imagery. *Geomorphology*, 44 : 221-239.
- Gurnell A.M., Montgomery, D.R., 1999.** *Hydrological Applications of GIS*. Wiley, New York, NY, p. 176.
- Gurnell A.M., Peiry J.-L. et Petts G.E., 2003.** Using historical data in fluvial Geomorphology. In Kondolf G.M., Piégay H. (Ed.): *Tools in fluvial geomorphology* Wiley : 77 -101.
- Gustavsson M., Kolstrup E. et Seijmonsbergen A.C., 2006.** A new symbol-and-GIS based detailed geomorphological mapping system: Renewal of a scientific discipline for understanding landscape development. *Geomorphology*, 22 p.
- Halbecq W., 1996.** Approche géomorphologique des brèches dans les levées de la Loire entre le Bec d'Allier et Mont-Jean. Mémoire de D.E.A., Orléans, 80 p. + Ann.
- Hassan A., Martin T.C., Mosselman E., 1999.** Island topography mapping for the Brahmaputra-Jamuna River using remote sensing and GIS. In Marriott S.B. et Alexander J. (eds) 1999, Floodplain : Interdisciplinary Approaches, Geological Society, London, Special Publications, 163 : 153-161.
- Heuzé P., Schnitzler A., 2006.** Restauration du système pulsé et libre évolution: deux stratégies complémentaires de préservation de la biodiversité pour les forêts alluviales. Communication, Colloque *Le Réveil du Dodo II*, Paris, 7-9 mars 2006.
- Hupp C.R., Bornett G., 2003.** Vegetation as a tool in the interpretation of fluvial geomorphic processes and landforms in humid temperate areas. In Kondolf G.M. et Piégay H., *Tools in fluvial geomorphology*, Wiley : 269-288.
- Hupp C.R., Morris E.E., 1990.** A dendrogeomorphic approach to measurement of sedimentation in a forested wetland, Black swamp, Arkansas. *Wetlands*, 10 :107-123.
- Hupp C.R., Osterkamp W.R. 1996.** Riparian vegetation and fluvial geomorphic processes. *Geomorphology*, 14 : 277-295.

- HYDRATEC, 1989, Faisabilité d'un plan d'eau sur la Loire à la Charité-sur-Loire. Rapport d'étude pour la D.D.E. Nièvre, 100 p.
- Joyeux E., 2004. Vers une nouvelle approche de la vulnérabilité face au risque d'inondation. Le cas de l'agriculture dans le Val de la Divatte en basse vallée de la Loire. Zone Atelier du Bassin de la Loire. Mémoire de 2^{ème} année de master de Géographie, Université Paris 8.
- Junk W.J., Bailey P.B., Sparks R.E., 1989. The flood-pulse concept in river-floodplain systems. *Can. Journ. Fish. Aquat. Sci.*, 106 : 100-127.
- Kesel R.H., 2003. Human modifications to the sediment regime of the Lower Mississippi River flood plain. *Geomorphology*, 56 : 325-334.
- Knighton A.D., 1998. Fluvial forms and processes. London : Arnold. 383 p.
- Knighton A.D., Nanson G.C., 1993. Anastomosis and the continuum of channel pattern. *Earth Surf. Processes and Landforms*, 18 : 613-625.
- Knighton A.D., Nanson G.C., 1994a. Flow transmission along an arid zone anastomosing river, Cooper Creek, Australia. *Hydrological Processes*, 8 : 137-154.
- Knighton, A.D. et Nanson, G.C., 1994b. Waterholes and their significance in the anastomosing channel system of Cooper Creek, Australia. *Geomorphology*, 9 : 311-324.
- Kondolf G.M., 1997. Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*, 21(4) : 533-551.
- Kondolf M.G., Piegay H., 2003. Tools in fluvial geomorphology, J. Wiley and Sons, Chichester, Royaume Uni.
- Laboratoire Régional Des Ponts et Chaussées de Blois, 1971. Les alluvions de la Loire dans la région Centre. *Bull. de Liaison des Ponts et Chaussées*, 56 : 48-68.
- Le Cœur C., 1996. Eléments de géographie physique. Bréal éd., Paris.
- Leopold L.B., Wolman M.G., 1957. Rivers channel patterns - braided, meandering and straight. *US Geological Survey Professional Paper*, 282-B : 35-85.
- Lewis, N., 2001. La gestion intégrée de l'eau en France : critique sociologique à partir d'une étude de terrain (bassin Loire-Bretagne). Thèse, Université d'Orléans.
- Lewis N. et Gautier E., 2004. Le Domaine public fluvial, un héritage du passé qui module aujourd'hui la réflexion sur la gestion de la biodiversité – Les zones humides de la Loire sous observation. In Burnouf J., Leveau P. (ed.) *Fleuves et marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture*. CTHS : 343-354.
- Lewis N., Gautier E. et Denis A., 2004. Les zones humides au croisement des enjeux sociaux et naturels – regard ligérien. In Barnaud G. et al., *Programme National de Recherche sur les Zones Humides, Actes du colloque de Toulouse* : 254-265.
- Lohr U., 1998. Digital elevation models by laser scanning, *Photogrammetric Record*, 16 (91) : 105-109.
- Loiseau J-E. et Felzines J-C., 1992. Variation du peuplement végétal alluvial constatée dans la partie moyenne du bassin ligérien en 1990 et 1991. *Le Monde des Plantes*, 445 : 14-16.
- Lunais B., 1983. Inventaire des Sites d'Intérêts Ecologiques dans la Vallée de la Loire (lit majeur et coteaux). Fédération Régionale des Associations de Protection de l'Environnement du Centre.

- Maillard P., 1972.** Inventaire des disponibilités alluvionnaires de la Loire entre le Bec d'Allier et Candes-Saint-Martin. *Etudes Ligériennes* : 34-49.
- Malavoi J.R. et BIOTEC, 2007.** Manuel de restauration hydrogéomorphologique des cours d'eau. Agence de l'eau Seine-Normandie, 2 vol.
- Malavoi J.R., Bravard J.P., Piegay H., Heroin H. et Ramez P., 1998.** Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau, Agence de bassin Rhône-Méditerranée-Corse, guide technique n°2, 38 p.
- Mamam L., 1998.** Témoin du fonctionnement écologique de la Loire : la végétation alluviale. *La Loire et ses terroirs*, 27 : 29-32.
- Maman, L. 1999.** La végétation des annexes fluviales, un indicateur pertinent pour leur restauration, Equipe Pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature, 5 p.
- Mantellier P., 1867,** Histoire de la communauté des marchands fréquentant la rivière de Loire et Fleuves descendant en icelle par, Orléans, 3 vol.
- Marron D.C., 1992.** Flooding storage of mine tailing in the Belle Fourche river system : a sediment budget approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17: 675-687.
- Marston R.A., Girel J, Pautou G., Piegay H., Bravard J.P. et Arneson C., 1995.** Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France. *Geomorphology*, 13 : 121-131.
- Martinhac L., 2003.** La Loire, espace délaissé ou convoité ? Le paradoxe de la mise en place des champs captant dans une Réserve Naturelle. Zone Atelier du Bassin de la Loire. Mémoire de 2^{ème} année de master de Géographie, Université Paris 8.
- Michot A., 1955.** La Loire et ses mariniers. Ed. Delayance, 65 p.
- Miéjac E., 1999.** Passer la Loire, ponts, bacs et gués au fil du fleuve autour de la Boucle d'Orléans : les lieux de franchissement de la Loire de Cosne-sur-Loire à Chaumont-sur-Loire aux époques médiévale et moderne, Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle, Lille.
- Miliaresis G. C., 2001.** Extraction of bajadas from digital elevation models and satellite imagery. *Computers & Geosciences*, 27 : 157-1167.
- Miller, J.R., 1991.** Development of anastomosing channels in south-central Indiana. *Geomorphology*, 4 : 221-229.
- Moatar F. et Gailhard., 2006.** Water temperature behaviour in the Loire river since 1881 and 1976. *C.R. Géoscience*, vol.338, 5 : 319-328.
- Moatar F. et Meybeck M., 2003.** Compared performances of different algorithms for estimating annual nutrient loads discharged by the eutrophic river Loire. *Hydrological Processes*.
- Mollard J.D., 1973.** Airphoto interpretation of fluvial features, *Proceeding of the 9th Canadian Hydrology Symposium*, Edmonton, National Research Council of Canada : 341-380.
- Nabet F., 2005.** Impact hydrologique et sédimentaire de la chevette de La Charité-sur-Loire. (Programme Friches hydrauliques), Mémoire de 1^{ère} année de master de Géographie, Université Paris 8.
- Nabet F., 2006.** Evaluation de l'efficacité géomorphologique des travaux d'entretien du lit de la Loire. Mémoire de 2^{ème} année de master de Géographie, Université Paris 1.
- Nanson G.C. et Knighton A.D., 1996.** Anabranching rivers : their cause, character and classification, *Earth Surface Processes and Landforms*, 21 : 217-239.

- Négre P. et Grosbois C., 1999.** Changes in chemical and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ signature distribution patterns of suspended matter and bed sediments in the upper Loire river basin (France). *Chem. Geol.*, 156 : 231-249.
- Négre P., Petelet-Giraud E., Barbier J. et Gautier E., 2003.** Surface water groundwater interactions in a alluvial plain: chemical and isotopic systematics. *Journal of Hydrology*, 277 : 248-267.
- Nguyen T.D., Belleudy P., Peiry J.L., Girel J. et Sauvaget P., 2002.** Hydrodynamique et végétation d'une île de l'Isère. *La Houille Blanche*, 2 : 24-31.
- Noizet H., Carcaud N. et Garcin M., 2004.** Rive droite rive gauche : la Loire et Tours (12ème -15ème siècles). In Burnouf J., Leveau Ph. (Eds), *Fleuves et marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture*. CTHS (Archéologie et histoire de l'art, 19) : 137-155.
- Oberti D., Chambaud F. et Simonnot J.-L., 2000.** Inventaire des zones humides de Bourgogne. Volume 1 : concepts, méthodes et typologie. CAE université de Bourgogne, DIREN Bourgogne.
- Okabe, A. Boots et B., Sugihara, K., 1992.** Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams. New York. Wiley.
- Osterkamp W.R., 1998.** Processes of fluvial island formation, with examples from Plum Creek, Colorado and Snake River, Idaho. *Wetlands* 18/4 : 530-545.
- Pardé M., 1934.** Fleuves et rivières. Ed. A. Colin, Paris, 241 p.
- Pardé, M., 1960.** Etude potamologique sur la Loire et ses affluents. *Norois*, 44bis, 183 p.
- Passega, R., 1957.** Textures as characteristic of clastic deposition. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 9 : 1952-1984.
- Pautou G., 1984.** L'organisation des forêts alluviales dans l'axe rhodanien entre Genève et Lyon ; comparaison avec d'autres systèmes fluviaux. *Document de Cartographie Ecologique*, 27 : 43-64.
- Pautou G., Girel J. et Borel J.-L., 1989.** Les changements de végétation dans les systèmes fluviaux : L'exemple de la vallée du Rhône entre Genève et Lyon. In *La ville et le fleuve*, 112ème Congrès national des sociétés savantes, CTHS : 61-71.
- Pautou G., J. Girel et L. Maman, 1985.** Le rôle des processus allogéniques dans le déroulement des successions végétales : l'exemple de la plaine alluviale du Rhône entre Lyon et Genève. In *Colloques phytosociologiques, XIII, Végétation et géomorphologie*, Bailleul 1985, J. Cramer, Berlin- Stuttgart, 656-667.
- Pautou G. et Wuillot J., 1989.** La diversité spatiale des forêts alluviales dans les îles du haut Rhône français. *Bulletin d'Ecologie*, 20 : 211-230.
- Peguy C., 1913.** Présentation de la Beauce à Notre Dame de Chartres.
- Peiry J.-L., 1988.** Approche géographique de la dynamique spatio-temporelle des sédiments : l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve (Haute-Savoie). Thèse Géographie et Aménagement, Lyon, 378 p.
- Peiry J.L., 1997.** Recherches en géomorphologie fluviale dans les hydrosystèmes fluviaux des Alpes du Nord. Diplôme d'Habilitation à Diriger les Recherches, Université Joseph Fourier, 308 p.
- Petts G.E., Möller H., Roux A.L. (eds), 1989.** Historical change of large alluvial rivers : Western Europe. Wiley, 355 p.

- Piégay H., 1995.** Dynamique et gestion de la ripisylve de cinq cours d'eau à charge grossière du bassin du Rhône. Thèse de Doctorat, Université Paris IV - Sorbonne, 455 p.
- PIREN Rhône, 1982.** Cartographie polythématique appliquée à la gestion écologique des eaux. Étude d'un hydrosystème fluvial : le Haut Rhône français. Ouvrage collectif, Ed. du CNRS-Lyon, 113 p.
- Plan Loire Grandeur Nature, 2002.** Restauration et entretien du lit de la Loire et de ses affluents - Guide méthodologique, 2 vol.
- Pyle C.J., Chandler J.H. et Richards K.S. 1997.** Digital photogrammetric monitoring of river bank erosion. *Photogrammetric Record*, 15 : 753-764.
- Ramond S., 2006.** Diagnostic géomorphologique et propositions de réaménagement d'une zone humide : le Gour des Fontaines (Nièvre). Mémoire de 1^{ère} année de master de Géographie, Université Paris 8.
- Rapeau A., 1997,** La dynamique fluviale de la Réserve Naturelle du Val de Loire. Conservatoire des Sites Naturels Bourguignons, 46 p. + Annexes
- Rapport d'Ingénieur, 1856,** Rapport d'un Ingénieur ordinaire de la Navigation des Ponts et Chaussées sur le Passage en amont de Châtillon, 20 janvier 1856. Musée de Châteauneuf-sur-Loire, Réf M2318D2.
- Rapport ZAL, 2002,** Rapport d'activité 2002-2003 de la Zone Atelier Bassin Versant de la Loire, 73 p.
- Rice S., Church M. 1996,** Bed material texture in low order streams on the Queen Charlotte Islands - British Columbia. *Earth Surf Process Landforms*, 21: 1-18
- Ricou G., 1995.** Restauration du lit de la Loire entre la Charité-sur-Loire et Mesves-sur-Loire. M.S.T. IMACOF, Tours, 67 p. + Ann. + Cartes
- Rodrigues S., 2004.** Dynamique sédimentaire et végétation : évolution de chenaux fluviaux en Loire moyenne (France). Thèse de Doctorat, Université François Rabelais Tours, 426 p.
- Rousseau O., 1999.** Etude de la dynamique des chenaux secondaires en Loire Moyenne. Maîtrise Géogr., Univ. Orléans, 125 p.
- Ruffinoni C., Trémoillère M. et Sanchez-Peréz J.M., 2003.** Végétation alluviale et flux de nutriments. In : Piégay H., G. Pautou & C. Ruffinoni, *Les forêts riveraines des cours d'eau*, IDF, 134-154.
- Rust B.R., 1978.** A classification of alluvial channel systems, p. 187-198. *Fluvial Sedimentology. Canadian Society of Petroleum Geology Memoir* 5.
- Rust B.R., 1981.** Sedimentation in a arid-zone anastomosing fluvial system : Cooper Creek, central Australia. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51 : 745-755.
- Salvador P.-G., 1991.** Le thème de la métamorphose dans les plaines alluviales du Rhône et de l'Isère -bassin de Malville et ombilic de Moirans (Bas-Dauphiné). Thèse doct. géographie Univ. Lyon III : 496 p.
- Sarma J.N., 2005.** Fluvial process and morphology of the Brahmaputra River in Assam, India, *Geomorphology*, 70 : 226-256.
- Sarma J.N. et Phukan M.K., 2004.** Origin and some geomorphological changes of Majuli island of the Brahmaputra River in Assam, India. *Geomorphology*, 60 : 1-19.

- Schnitzler A., 1995.** Les forêts alluviales des lits majeurs de l'Allier et de la Loire moyenne entre Villeneuve/Allier et La Charité/Loire - Etude phytosociologique, diagnostic de naturalité et propositions de renaturation. Laboratoire de phytoécologie, Université de Metz - 30 p. + planches + annexes.
- Schnitzler A., 1996.** Comparison of landscape diversity in forests of the upper Rhine and the middle Loire floodplains (France). *Biodiversity and Conservation*, 5 : 743-758.
- Schnitzler-Lenoble A. et Carbiener R., 2007.** Forêts alluviales d'Europe ; écologie, biogéographie, valeur intrinsèque. Editions TEC et DOC.
- Schumann, R.R., 1989.** Morphology of Red Creek, Wyoming, an arid-region anastomosing channel system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14 : 277-288.
- Schumm S.A., 1968.** River adjustment to altered hydrologic regimen – Murrumbidgee River and paleochannels, sedimentologic implications, *USGS Professional Paper*, 598 : 65 p.
- Schumm, S. A. 1969.** River metamorphosis. *J. Hydraul. Div. ASCE*, 95 : 255–273.
- Schumm, S.A. 1977.** The fluvial system. John Wiley and Sons, New York, 338 p.
- Schumm S.A., 1981.** Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications, *Society of Economic Paleontologist and Mineralogists Special Publication*, 31 : 19-29
- Service Hydrologique Centralisateur Bassin Loire-Bretagne, 1988.** Reconstitution des débits des crues anciennes à Givry-Fourchambault, Nevers, Le Veudre – Etablissement de la loi de fréquences rares pour les crues, 35 p. + annexes.
- Smith D.G., 1976.** Effect of vegetation on lateral migration of anastomosed channels in a glacier meltwater river. *Geological Society of America Bulletin*, 87 : 857-860.
- Smith, D.G., 1983.** Anastomosed fluvial deposits : Modern examples from Western Canada, p.155-168. *In* Modern and ancient fluvial systems. International Association of Sedimentologists, Special Publication, 6.
- Smith D.G., 1986.** Anastomosing river deposits sedimentation rates and basin subsidence, Magdalena river, Northwestern Columbia, South America. *Sedimentary Geology*, 46 : 177-196.
- Smith D.G. et Putnam P.E., 1980.** Anastomosed river deposits: modern and ancient examples in Alberta, Canada. *Canadian Journal of Earth Science*, 17 : 1396-1406.
- Smith D.G. et Smith N.D., 1980.** Sedimentation in anastomosed river systems : examples from alluvial valleys near Banff, Alberta. *Journal of Sedimentary Petrology*, 50 : 157-164.
- SOGREAH, 1997.** Etude de l'aménagement de la Loire au droit de Pouilly-sur-Loire. Rapport d'étude, 23 p.
- Steiger J., Corenblit D. et Vervier P., 2000.** Les ajustements morphologiques contemporains du lit mineur de la Garonne, France et leurs effets sur l'hydrosystème fluvial. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., Suppl.bd 122 : 227–246.
- Steiger J. et Gurnell A.M., 2003.** Spatial hydrogeomorphological influences on sediment and nutrient deposition in riparian zones : observations from the Garonne River, France. *Geomorphology*, 49 : 1-23.
- Steiger J., Gurnell A.M., Ergenzinger P. et Snelder D., 2001.** Sedimentation in the riparian zone of an incising river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26 : 91– 108.

- Temam S., 2005.** Perception et gestion du risque d'inondation par les ingénieurs de la Loire, à travers l'étude des aménagements fluviaux réalisés entre Nevers et Cosne-sur-Loire au 18^{ème} et 19^{ème} siècle. Mémoire de D.E.A., Université Paris VIII.
- Tockner K., Baumgartner C., Schiemer F. et Ward J.V. 2000.** Biodiversity of a Danubian floodplain : structural, functional and compositional aspects. *In Biodiversity in wetlands : assessment, function and conservation.* (Eds B. Gopal, W.J. Junk et J.A. Davis), 1, pp 141-159. Backhuys Publishers, Leiden.
- Tricart J., 1977.** Précis de géomorphologie. Sedes, Paris.
- Van der Nat D., Tockner K., Edwards P.J., Ward J.V. et Gurnell A.M., 2002.** Habitat change in braided floodplains (Tagliamento, NE Italy). *Freshwater Biology*, 48: 1799-1812.
- Vannote R.L., Minshall G.W., Cummins K.W., Sedell J.R. et Cushing C.E., 1980.** The river continuum concept. *Can. Journ. Fish. Aquat. Sci.*, 37 : 130-137.
- 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 Fourier Grenoble, 376 p.
- Viers G., 1967,** Eléments de géomorphologie. Nathan, Paris.
- Wasson JG, Bèthemont J., Degorce JN., Dupuis B., Joliveau T., 1993.** Approche écosystémique du bassin de la Loire : éléments pour l'élaboration des orientations fondamentales de gestion. Phase 1 : État Initial. Problématique / Rapport d'étape, CEMAGREF : 102 et 81 p.
- Wasson J.G., Malavoi J.R., Maridet L., Souchon Y. et Paulin L., 1995.** Impacts écologiques de la chenalisation des rivières. Rapport EPTEAU et Cemagref, 168 p.
- Wolski P. et Savenije H.H.G., 2006.** Dynamics of floodplain-island groundwater flow in the Okavango Delta, Botswana. *Journal of Hydrology*, 320 : 283-301.
- Woudstra A., 2005.** La gestion de la crue de décembre 2003 dans la moyenne vallée de la Loire. Mémoire de 1^{ère} année de master de Géographie, Université Paris 1.

Publications personnelles et communications à des colloques

Rapports de travaux

- Grivel S., Gautier E., 2005, Étude de la dynamique fluviale de la Réserve Naturelle du Val de Loire, rapport intermédiaire, CNRS, CSNB
- Grivel S., Gautier E., 2004, Étude de la dynamique fluviale de la Réserve Naturelle du Val de Loire, rapport 2003, CNRS, CSNB
- Grivel S., 2002, Synthèse documentaire spécifique à la Réserve Naturelle du Val de Loire, document de travail pour le compte du Conservatoire des Sites Naturels Bourguignons, 29 p.
- Grivel S., 2001, Approche spatiale et géomorphologique des unités fluviales de la Réserve Naturelle du Val de Loire : compréhension de l'évolution d'un espace et des risques associés, DEA de Géographie, Paris VIII, 105 p.

Articles

- Gautier E., Corbonnois J., Petit F., Arnaud-Fassetta G., Brunstein D., Grivel S., Houbrechts G., soumis. Methodological approaches of sediment dynamics in active floodplains, *in* Géomorphologie : relief, processus, environnement, 20 p.
- Grivel S., 2007, Pour une gestion cohérente du fleuve Loire, in Espaces naturels, numéro de juillet 2007
- Grivel S., Gautier E., 2007, Le S.I.G. - aide à la connaissance et à la gestion des crues en Val de Loire, éd. Le Manuscrit, colloque Le risque hydrologique du concept à sa gestion
- Gautier E., Grivel S. et Chambaud F., 2007, Les îles de la Loire : des témoins de l'histoire du fleuve et des sociétés, in La Loire et ses terroirs, N° 59, p.14-18
- Gautier E., Grivel S., 2006, Multi-scale analysis of island formation and development in the Middle Loire River - France, International Symposium on Sediment dynamics and the hydromorphology of fluvial systems, IAHS, publ. 306, juillet 2006, p.179-187
- Grivel S., Brunstein D., Gautier E., Georget M., Goupille F., Kunesh S., 2004, Approche multi-scalaire d'un corridor fluvial expérimental en Loire moyenne, in Mosella, Tome XXIX, n°3-4, p.383-394
- Pointecouteau N., Gautier E., Grivel S., 2005, Restauration de l'hydrosystème de la RN du Val de Loire, in La Lettre des Réserves Naturelles, spécial n°82, p.10-11
- Burnouf J., Carcaud N., Castanet C., Cubizolle H., Garcin M., Gautier E., Grivel S., Larrue C., Macaire J.-J., Marinval M.-C., Borvon N., Thibaud S., Tremont F., Visset L., 2005.- Une autre Loire: dynamiques socio-environnementales sur 15000 ans., in Covalences, N° 56: 4-8.
- Grivel S. et al., 2003, Séminaire ZAL « Jeunes chercheurs » -Volume des résumés, Goutelas, 4-6 novembre 2003, 31 p.
- Grivel S., Gautier E., 2003, Les anthroposystèmes marginaux du programme Zone Atelier Bassin Versant de la Loire, colloque Gestions de fleuves, Nantes, 20-21 février 2003, CD-Rom
- Grivel S., Gautier E., Brunstein D., Goupille F., Kunesh S., 2002, La Loire des îles, la Loire des Hommes, les apports de la géographie et de la géomorphologie fluviale, in Études ligériennes, colloque Approche archéologique de l'environnement et de l'aménagement du territoire ligérien, Orléans, 14-16 novembre 2002 , p.153-160

Posters

- Grivel S., Gautier E. et Woudstra A., 2006, Retour d'expériences géomorphologiques et sociales d'une crue de référence en Loire moyenne : décembre 2003, colloque 150ème anniversaire des grandes crues de 1856, Paris, du 31 mai au 1er juin 2006
- Grivel S., Gautier E., 2006, Quelle Loire voulons-nous ? Contribution de l'analyse spatio-environnementale à la gestion actuelle et à long terme des milieux fluviaux en Loire moyenne, colloque international Interactions Sociétés-Nature, La Baule, du 3 au 6 mai 2006
- Grivel S., Gautier E. et Brunstein D., 2005, A fluvial Geomorphologic Information System for the Loire river (France) – a scientific tool dedicated to river managers, 6ème conférence internationale sur la Géomorphologie, Saragosse (Espagne), du 7 au 11 septembre 2005

- Grivel S., Brunstein D., Gautier E., Georget M., Goupille F., Kunesh S., 2004, Approche multi-scalaire d'un corridor fluvial expérimental en Loire moyenne, colloque Spatialisation et cartographie en hydrologie à Metz du 8 au 10 septembre 2004
- Grivel S., Brunstein D., Gautier E., 2003, La Loire des îles -évolution d'un espace fluvial original 2^{ème} prix du poster scientifique au Festival International de Géographie 2003 à Saint-Dié-des-Vosges,
- Martinac L., Grivel S., Gautier E., 2003, La Loire : espace délaissé ou convoité ? Poster exposé lors du Festival International de Géographie 2003 à Saint-Dié-des-Vosges
- Grivel S., Gautier E., Brunstein D., 2002, Les îles de la Loire moyenne, colloque Foodplain à Strasbourg du 4 au 7 juillet 2002

Communications

- 2007 : - *Club des gestionnaires*, Orléans, Nabet F., Gautier E., Grivel S., Temam S., juin 2007, "Synthèse des conséquences morphologiques des travaux d'entretien du lit de la Loire moyenne".
- *Séminaire "restauration environnementale et reconquête de l'estuaire de Seine "*, Le Havre, Grivel S., Nabet F., Gautier E., juin 2007, "Travaux de restauration dans le lit de la Loire et apports de la géomorphologie fluviale".
 - *Journée de l'Ecole doctorale en Sciences Sociales de l'Université Paris 8 "Cadres de vie et modes de vie dans les recherches en sciences sociales"*, Saint-Denis, Grivel S., Temam S., mars 2007, "Lorsque 150 ans de changements des modes de vie participent aux perturbations de la dynamique fluviale : l'exemple de la Loire".
 - *Journée des Jeunes Géomorphologues 2007*, Paris, Grivel S., janvier 2007, "Analyse multi-scalaire de la formation et de l'évolution des îles fluviales en Loire moyenne (France)".
- 2006 : - *8th IAHS Scientific Assembly*, Dundee, Ecosse, Gautier E., Grivel S., juillet 2007, "Multi-scale analysis of island formation and development in the Middle Loire River, France".
- *Journées francophones des Sciences et de la Conservation de la biodiversité, Le réveil du Dodo II*, Paris, Grivel S., Gautier E., Chambaud F., RNNVL, CSNB, mars 2006, "Rapprocher les échelles temporelles d'analyse entre gestionnaires et scientifiques : le cas de la gestion écologique en Loire moyenne".
- 2005 : - *Journées Loire Nature -Séminaire méthodologique en hydro-géomorphologie*, Moulins, Gautier E., Grivel S., novembre 2005, "Suivi morphodynamique de la Loire : méthodes, outils et résultats".
- *Colloque Les rencontres de Géo.13 : le risque hydrologique du concept à sa gestion*, Villetaneuse, Grivel S., octobre 2005, "Le S.I.G. - aide à la connaissance et à la gestion des crues en Val de Loire".
 - *Séminaire méthodologique sur les paysages ligériens actuels - Outils et méthodes d'analyse du paysage*, Tours, Grivel S., mai 2005, "L'évolution du paysage de la Loire des îles".
 - *European Geoscience Union*, Vienne, Gautier E., Grivel S. et Brunstein D., avril 2005, "The Loire River islands: the fluvial response to the coupled effects of hydrologic and socio-economic change".

- 2004 : - *Journée de restitution du rapport 2003 auprès des gestionnaires et des élus*, Mesves-sur-Loire, Grivel S., Gautier E., avril 2004, “Étude de la dynamique fluviale de la Réserve Naturelle du Val de Loire”.
- *Université Inter-Âges*, Chelles, Grivel S., avril 2004, “La Loire : dynamique fluviale, évolution et enjeux de gestion”.
- 2003 : - *Conférence en collaboration avec le Plan Loire Grandeur Nature et la DIREN-Bourgogne*, La Charité-sur-Loire, Grivel S., novembre 2003, “La recherche appliquée à la gestion concertée de la Loire”.
- *Colloque Ecologie des zones humides et des milieux aquatiques dulcaquicoles*, Le Bourget du Lac, Grivel S., Gautier E., Chambaud F., mai 2003, “La Loire des îles : sites d'application d'une approche pluridisciplinaire pour la gestion écologique de l'hydrosystème Loire”.
 - *Colloque Gestions de fleuves*, Nantes, Grivel S., Gautier E., février 2003, “ Les anthroposystèmes marginaux du programme Zone Atelier Bassin Versant de la Loire ”.
- 2002 : - *International Symposium Floodplain*, Strasbourg, juillet 2002, conférence invitée “Les enjeux de la revalorisation de la Loire”.
- *Colloque Approche archéologique de l'environnement et de l'aménagement du territoire ligérien*, Orléans, Grivel S., Gautier E., Brunstein D., Goupille F., Kunesh S., novembre 2002, “La Loire des îles, la Loire des Hommes, les apports de la géographie et de la géomorphologie fluviale”.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Le système anastomosé de la Loire des îles.	15
Figure 2 – Les grands aménagements du bassin versant de la Loire.	19
Figure 3 – Un aménagement fluvial marquant dans le paysage de la Loire.	19
Figure 4 – L'évolution du profil en long du Bec d'Allier à Saumur.	20
Figure 5 – Etendue des zones inondables en Loire moyenne.	22
Figure 6 – Association des formes fluviales et de leur rôle écologique en Loire moyenne.	24
Figure 7 – L'ajustement spatio-temporel des formes fluviales selon A.D. Knighton.	28
Figure 8 – Part de l'érosion et de la sédimentation à l'échelle de la Loire des îles.	38
Figure 9 – Le concept de continuum fluvial selon R.L. Vannote (1980).	39
Figure 10 – Le concept d'hydrosystème fluvial.	40
Figure 11 – Application du concept de système pulsé à la rivière italienne Tagliamento.	42
Figure 12 – Programmes pluridisciplinaires majeurs pour le bassin versant de la Loire.	45
Figure 13 – Les grandes phases de métamorphose de la plaine d'inondation de la Loire.	52
Figure 14 – Régionalisation du bassin versant de la Loire.	57
Figure 15 – Géologie du secteur d'étude.	58
Figure 16 – Les grands styles fluviaux de la Loire.	60
Figure 17 – La place de la Loire des îles dans les grandes classifications des styles fluviaux. ...	62
Figure 18 – Les controverses peuvent naître quant à la classification des systèmes en anastomoses.	63
Figure 19 – Essai de positionnement de la Loire moyenne en aval du Bec d'Allier.	64
Figure 20 – La Loire des îles selon la classification de Nanson et Knighton (1996).	66
Figure 21 – La place déterminante des bancs dans le système fluvial pour la formation des unités fonctionnelles îles.	68
Figure 22 – Le triptyque de formes fluviales selon Y. Babonaux (1970).	69
Figure 23 – Cartes de la Loire en 1760 (Archives nationales).	69
Figure 24 – Evolution du site du Bec d'Allier selon B. Bomer (1972).	71
Figure 25 – Etude géomorphologique de la Loire moyenne, entre Nevers et La Charité.	71
Figure 26 – Relation formes fluviales – végétation dans la vallée du Rhône.	72
Figure 27 – Etude des îles de la vallée de l'Isère.	73
Figure 28 – Les îles représentent les unités fonctionnelles caractéristiques du paysage fluvial indien du Brahmapoutre.	74
Figure 29 – Coupe transversale de la plaine de la Léna.	75
Figure 30 – Bloc diagramme de la Loire des îles.	77
Figure 31 – Régime hydrologique de la Loire à la station de Givry (Cher).	81
Figure 32 – Variabilité inter-annuelle du régime hydrologique de la Loire.	81
Figure 33 – Chronologie des grandes crues en Loire moyenne depuis 1846.	82
Figure 34 – Sites de la Loire moyenne ayant fait l'objet de recherche dans le cadre de Master.	84
Figure 35 – Les trois Sites Ateliers de la Loire moyenne représentatifs de la Loire des îles.	86
Figure 36 – Typologie des aménagements fluviaux dans le Site Atelier 3.	88
Figure 37 – Les quatre sites fonctionnels du Site Atelier 3.	94
Figure 38 – Le site fonctionnel de la Charité-sur-Loire.	96
Figure 39 – Le site fonctionnel du Lac.	98
Figure 40 – Le site fonctionnel des Barreaux.	99
Figure 41 – Le site fonctionnel des Loges.	102
Figure 42 – Méthodes et outils en fonction des échelles de temps et d'espace.	105
Figure 43 – Les différents fonds iconographiques de l'analyse diachronique à moyenne échelle.	110

Figure 44 – Evolution du paysage fluvial à Pouilly-sur-Loire, depuis la rive gauche.	112
Figure 45 – Limites de la zone d'étude à grande échelle.	113
Figure 46 – Différents types d'aménagements fluviaux et leur légende dans le SIG.	114
Figure 47 – Mosaïque de polygones issue de la digitalisation.	117
Figure 48 – Identification des types d'unités fonctionnelles.	118
Figure 49 – Indices de reconnaissance et zonage des unités fonctionnelles <i>îles</i> sur les différents documents.	118
Figure 50 – Exemples d'identification des types de végétation sur différents documents.	120
Figure 51 – Organisation du S.I.G. de l'analyse à l'échelle moyenne.	124
Figure 52 – Les calculs de base sur les polygones à l'aide du logiciel SIG.	126
Figure 53 – Interface du S.I.G. sous Arc Gis.	127
Figure 54 – Exemple de profils topographiques issus du PNRZH (Gautier et <i>al.</i> , 2001).	132
Figure 55 – Localisation des profils en travers aux sites de la Loire moyenne.	134
Figure 56 – Exemple de calage de deux profils 1970 et 1995 : les zones d'érosion et de sédimentation ressorte parfaitement.	137
Figure 57 – Les grandes étapes des mesures topographiques depuis les levés de terrain jusqu'à la création des MNT.	142
Figure 58 – Le système de pièges à sédiments sur un profil expérimental A200.	146
Figure 59 – Localisation des sites de prélèvements des MES dans le Site Atelier 3 lors de deux crues importantes.	149
Figure 60 – Localisation des stations hydrologiques de référence pour la Loire moyenne.	151
Figure 61 – Evolution des débits entre 2002 et 2005.	152
Figure 62 – Bilan des jours passés dans le Bassin versant de la Loire entre 2002 et 2006.	157
Figure 63 – Perte progressive du degré d'insularité de cette île.	163
Figure 64 – Une même île, selon la période de l'année, peut perdre son degré d'insularité en fonction du niveau de submersion du bras secondaire qui la sépare de la rive.	163
Figure 65 – Sectorisation du degré d'insularité des îles du Site Atelier 3.	165
Figure 66 – Echantillons de près de 100 îles, du Site Atelier 3, de 1995 sur le rapport longueur-largeur.	166
Figure 67 – Corrélation entre la longueur et la largeur des îles.	167
Figure 68 – Corrélation entre la largeur des îles et la largeur du lit fluvial.	168
Figure 69 – Classification des formes insulaires de la Loire moyenne à partir de variables morphométriques clés.	169
Figure 70 – Identification de la typologie morphologique des îles de la Loire.	170
Figure 71 – Construction d'un Modèle Numérique de Terrain (M.N.T.) à partir des données X, Y et Z du LIDAR de la DIREN Centre.	171
Figure 72 – M.N.T. d'une très grande île (Ile des Loges en aval de Pouilly).	173
Figure 73 – M.N.T. d'une grande île (au droit de l'Île des Loges en aval de Pouilly).	174
Figure 74 – M.N.T. d'une île moyenne.	176
Figure 75 – M.N.T. d'un îlot.	177
Figure 76 – M.N.T. d'un micro-ilôt.	178
Figure 77 – M.N.T. d'un banc à caractère insulaire.	180
Figure 78 – Répartition spatiale des différents types d'îles en 2002.	183
Figure 79 – Les grands secteurs à îles du Site Atelier 3.	184
Figure 80 – Rapport Longueur-largeur des 9 francs-bords du Site Atelier 3.	186
Figure 81 – Typologie des zones humides en Loire moyenne dans un secteur du Site Atelier 3.	187

Figure 82 – Occupation du sol de la plaine d'inondation, à partir d'une Image SPOT et d'une enquête de terrain, en juin 2004, après la période de hautes eaux.	190
Figure 83 – Image de Passega des modes transports des dépôts sédimentaires.	193
Figure 84 – Caractérisation des dépôts sédimentaires de surface.	194
Figure 85 – Caractérisation des dépôts sédimentaires, sur un mètre, en fonction du type d'île (île moyenne, grande île et très grande île).	196
Figure 86 – Synthèse théorique de la composition sédimentaire des différents types d'îles.	197
Figure 87 – Caractérisation de la végétation dans le Site Atelier 3 d'après la typologie Cornier.	199
Figure 88 – Relation végétation-topographie.	200
Figure 89 – Relation végétation-sédimentation.	200
Figure 90 – Evolution sur plus de 150 ans des formes fluviales majeures de la Loire des îles. ..	202
Figure 91 – Cartographie diachronique du Site Atelier 3.	203
Figure 92 – Cartographie diachronique du Site Atelier 1.	204
Figure 93 – Cartographie diachronique du Site Atelier 2.	205
Figure 94 – Rythme d'évolution des formes fluviales de la Loire moyenne sur des pas de temps clés.	206
Figure 95 – Extension d'un franc-bord par colmatage de bras secondaire et stabilisation d'îles.	210
Figure 96 – Extension d'un franc-bord par appui sur une levée.	211
Figure 97 – Formation d'un franc-bord en rive droite au pied des coteaux calcaires.	211
Figure 98 – Evolution de la répartition de la bande active entre le chenal principal et les bras secondaires.	213
Figure 99 – Evolution des francs-bords du Site Atelier 3.	214
Figure 100 – Cartographie diachronique de la couverture végétale du Site Atelier 1 depuis 1850.	216
Figure 101 – Cartographie diachronique de la couverture végétale du Site Atelier 2 depuis 1850.	216
Figure 102 – Cartographie diachronique de la couverture végétale du Site Atelier 3 depuis 1850.	217
Figure 103 – Progression de la couverture végétale de 1850 à 2002.	219
Figure 104 – Dynamique végétale sur une île subissant érosion en tête et sédimentation en aval.	221
Figure 105 – Dynamique végétale autour des bras morts d'une même île.	221
Figure 106 – Dynamique végétale sur un franc-bord. (Mesves-sur-Loire).	222
Figure 107 – Evolution du nombre d'îles depuis 1850 et mise en valeur des grands seuils temporels.	223
Figure 108 – Evolution de la part de chaque type d'île depuis 1960.	225
Figure 109 – Schéma-type de formation et de développement d'une île.	226
Figure 110 – Schéma-type de formation et de développement d'une île à partir du démantèlement d'un franc-bord.	227
Figure 111 – Spatialisation des différents modèles d'évolution des îles sur la période 1960-2002.	230
Figure 112 – Les îlots inférieurs à 0,4 ha sont les plus sensibles à l'érosion fluviale.	231
Figure 113 – Schéma de déplacement des îles migratrices.	233
Figure 114 – Exemple de coalescence de d'îlots.	236
Figure 115 – Le rattachement d'une île à un franc-bord représente le stade définitif de la stabilisation.	236

Figure 116 – Spatialisation des différents modèles d'évolution des îles sur la période 1960-2002, au sein du Site Atelier 1.	237
Figure 117 – Spatialisation des différents modèles d'évolution des îles sur la période 1960-2002, au sein du Site Atelier 2.	237
Figure 118 – Processus de sédimentation et d'érosion suivant les types d'îles et leur modèle d'évolution.	239
Figure 119 – La taille des îles et des îles moyennes est très liée à la végétation et à la capacité de cette dernière à piéger les sédiments.	240
Figure 120 – Synthèse des modèles d'évolution des îles analysées en Loire moyenne depuis 1850.	241
Figure 121 – De 1850 à 2002, le talweg n'a cessé de basculer de rive droite à rive gauche, entre les levées et les pieds de coteau.	243
Figure 122 – Relation entre l'éloignement de la bande active et la formation des secteurs à grandes îles.	245
Figure 123 – Zones de basculement latéral de la bande active principale entre 1850 et 1933.	246
Figure 124 – Zones de basculement de la bande active principale entre 1960 et 2002.	247
Figure 125 – Reconstruction du profil en long de Mesves à Tracy-sur-Loire à partir des talwegs.	249
Figure 126 – Reconstruction du profil en long du Site Atelier 3 depuis 1933.	250
Figure 127 – Le profil transversal A 189.	256
Figure 128 – Le profil transversal A 190.	256
Figure 129 – Le profil transversal A 191.	256
Figure 130 – Le profil transversal A 192b.	257
Figure 131 – Le profil transversal A 195.	257
Figure 132 – Le profil transversal A 197.	258
Figure 133 – Le profil transversal A 199.	258
Figure 134 – Profils comparatifs des Sites Ateliers 1 et 3.	262
Figure 135 – Rythme d'accrétion des îles.	263
Figure 136 – Profils comparatifs du Site Atelier 1.	264
Figure 137 – Profils comparatifs de l'évolution du lit fluvial.	265
Figure 138 – Profil topographique A192b, secteur de Mesves-sur-Loire.	267
Figure 139 – Cartographie des surfaces érodées et sédimentées de 1960 à 1995.	271
Figure 140 – Cartographie des surfaces érodées et sédimentées de 1995 à 2002.	272
Figure 141 – Bilan des surfaces érodées et sédimentées de 1960 à 1995 dans la Réserve Naturelle du Val de Loire.	274
Figure 142 – Bilan des surfaces érodées et sédimentées de 1995 à 2002 dans la Réserve Naturelle du Val de Loire.	275
Figure 143 – Estimation des volumes de sédiments - Première partie du secteur SA 3.	277
Figure 144 – Estimation des volumes de sédiments – Deuxième partie du secteur SA 3.	278
Figure 145 – Estimation des volumes de sédiments sur les grands francs-bords du Site Atelier 3.	280
Figure 146 – Estimation 1 des volumes de sédiments au sein des bras secondaires majeurs du SA 3.	283
Figure 147 – Estimation 2 des volumes de sédiments au sein des bras secondaires majeurs du SA 3.	284
Figure 148 – Estimation 3 des volumes de sédiments au sein des bras secondaires majeurs du SA 3.	285
Figure 149 – Estimation des volumes de sédiments piégés, depuis le début du 20 ^{ème} siècle.	287

Figure 150 – Estimation des volumes de sédiments piégés, depuis le début du 20 ^{ème} siècle, dans le système anastomosé de la Loire moyenne, du Bec d'Allier jusqu'à Gien.	287
Figure 151 – Repérage des crues suivies entre 2002 et 2005 à partir du débit de plein-bord fixé à 850 m ³ .s ⁻¹ .	289
Figure 152 – Mise en rapport des différents événements hydrologiques suivis avec leur durée (en jours).	291
Figure 153 – Chronologie des crues suivies depuis 2002.	291
Figure 154 – Lignes d'eau des principales crues supérieures à 850 m ³ .s ⁻¹ au profil expérimental A200, secteur des Loges, équipé de pièges à sédiments.	293
Figure 155 – Position de la crue de décembre 2003 dans la chronologie des crues les plus fortes enregistrées en Loire moyenne depuis 1846.	294
Figure 156 – L'hydrogramme de crue et les grandes phases de l'épisode hydrologique de décembre 2003.	295
Figure 157 – Relevés cartographiques de l'épisode hydrologique au 6 décembre 2003.	298
Figure 158 – Cartographie de la tâche d'inondation au 8 décembre 2003.	299
Figure 159 – MES et débits de la Loire de mars 2001 à mars 2005.	301
Figure 160 – MES en fonction des débits de la Loire de mars 2001 à mars 2005.	302
Figure 161 – Relation débits de la crue et concentration des Matières En Suspension.	303
Figure 162 – Chronologie de la submersion des îles du secteur des Loges.	305
Figure 163 – Chronologie de la submersion des îles du secteur de Pouilly.	307
Figure 164 – Chronologie de la submersion des îles du secteur des Barreaux.	308
Figure 165 – Chronologie de la submersion des îles du secteur du Lac.	309
Figure 166 – Chronologie de la submersion des îles du secteur de La Pointe.	310
Figure 167 – Chronologie de la submersion des îles du secteur de La Charité-Passy.	312
Figure 168 – Durée des seuils de débits déterminés pour la submersion des îles.	313
Figure 169 – Les grands seuils de submersion des unités fonctionnelles et des formes insulaires de la Loire des îles.	314
Figure 170 – Estimation des dépôts sédimentaires sur les différents types d'îles en fonction des différentes crues morphogènes suivies.	316
Figure 171 – Dépôts relevés sur différentes îles jeunes.	319
Figure 172 – Comparaison des dépôts suite à trois épisodes hydrologiques différents.	324
Figure 173 – Evaluation de la sédimentation sur une île jeune après la crue 5 (décembre 2003).	325
Figure 174 – Le rythme d'érosion du franc-bord de Mesves est de 8 m/an.	328
Figure 175 – Evolution du secteur des Loges entre 2002 et 2005.	330
Figure 176 – Evolution du secteur des Barreaux entre 2002 et 2005.	333
Figure 177 – Profils transversaux levés au sein du bras secondaire des Barreaux.	334
Figure 178 – Evolution du secteur de l'île du Lac entre 2002 et 2005.	336
Figure 179 – Profils levés au sein du bras secondaire du Lac.	337
Figure 180 – Description géomorphologique de la modélisation du bras des Loges.	338
Figure 181 – Drapage de l'image aérienne sur le MNT du bras des Loges.	339
Figure 182 – Description géomorphologique de la modélisation du bras des Barreaux.	340
Figure 183 – Drapage de l'image aérienne sur le MNT du Lac.	341
Figure 184 – Drapage de l'image aérienne sur le MNT du bras des Barreaux.	341
Figure 185 – Description géomorphologique de la modélisation du bras du Lac.	342
Figure 186 – Modélisation du fonctionnement hydrologique du bras des Loges en fonction de différents débits-clés.	344

Figure 187 – Suivi hydrologique du bras des Barreaux.	346
Figure 188 – Modélisation du fonctionnement hydrologique du bras du Lac en fonction de différents débits-clés.	347
Figure 189 – Topographie mesurée à l’amont et l’aval du bras des Loges depuis 2002.	349
Figure 190 – Modélisation de la connexion amont du bras des Loges depuis les mesures topographiques réalisées au DGPS.	350
Figure 191 – Modélisation de la connexion aval du bras des Loges.	350
Figure 192 – Topographie mesurée à l’amont et l’aval du bras des Barreaux depuis 2002.	352
Figure 193 – Modélisation de la connexion amont du bras des Barreaux.	353
Figure 194 – Modélisation de la connexion aval du bras des Barreaux.	353
Figure 195 – Topographie mesurée à l’aval du bras du Lac depuis 2002.	355
Figure 196 – Topographie mesurée à l’amont du bras du Lac depuis 2002.	356
Figure 197 – Modélisation de la connexion aval du bras du Lac.	357
Figure 198 – Modélisation de la connexion amont du bras du Lac.	358
Figure 199 – Influence des bancs végétalisés.....	362
Figure 200 – Profil en long de chaque bras secondaire.	363
Figure 201 – Diversité des marchandises échangées par le biais du bassin versant de la Loire (l’hinterland fluvial du 18 ^{ème} siècle).	375
Figure 202 – La Loire : un axe économique majeur et facteur d’aménagement du territoire national.	375
Figure 203 – Typologie des aménagements fluviaux dans le Site Atelier 3 en Loire moyenne..	376
Figure 204 – Les méthodes de remontée de la Loire.	379
Figure 205 – Le balisage de la Loire pour la navigation.	380
Figure 206 – Citations de la marine marchande de la Loire.	381
Figure 207 – Reconstitution du paysage fluvial aux 18 ^{ème} et 19 ^{ème} siècles.	383
Figure 208 – Le paysage de la navigation ligérienne : une variété d’activités dynamiques.	384
Figure 209 – Quelques fleuves dans la dimension européenne.	387
Figure 210 – Les aménagements fluviaux du secteur fonctionnel de La Charité-sur-Loire.	389
Figure 211 – Extrait d’un rapport d’ingénieur sur la chevette de La Charité-sur-Loire (1881).	391
Figure 212 – Evolution géomorphologique du secteur de La Charité.	395
Figure 213 – La part des différents types de végétation et d’occupation du sol depuis 1850. ...	396
Figure 214 – Evolution de la végétation du secteur de La Charité.	396
Figure 215 – Sectorisation de la sédimentation et de l’érosion dans le secteur fonctionnel de La Charité.	397
Figure 216 – Panorama des usages locaux et quotidiens en Loire moyenne dans la première moitié du 20 ^{ème} siècle.	400
Figure 217 – Reconstitution du paysage fluvial au début du 20 ^{ème} siècle, après l’abandon la navigation.	401
Figure 218 – Occupation de l’île de Chalonnnes, à partir de la carte de Coumes (1850).	403
Figure 219 – Extraits cartographiques du PNRZH (Gautier et <i>al.</i> , 2001).	404
Figure 220 – La Loire, la colonne vertébrale des régions françaises.	406
Figure 221 – Dès la fin du 19 ^{ème} siècle, et tout le long de la première moitié du 20 ^{ème} siècle, la Loire ne cessera de s’éloigner des riverains.	407
Figure 222 – Reconstitution du paysage fluvial d’après guerre (1945-1975).	408
Figure 223 – Les puits de captage sur l’île du Lac.	415
Figure 224 – Entretien actuel du lit de la Loire guide et méthode de terrain sont les outils ciblés.	416

Figure 225 – Mise en corrélation des modifications du Site Atelier 3 et les facteurs déclenchants et aggravants.	420
Figure 226 – Reconstitution du paysage fluvial actuel.	420
Figure 227 – Une scène de sauvetage en Loire moyenne suite à la crue de 1856 et à la rupture de certaines levées de rive gauche (Musée de Châteauneuf-sur-Loire).	422
Figure 228 – Chronique des débits mesurés depuis 1863, à la station de Blois (Loire moyenne).	422
Figure 229 – Chronique des grandes crues de la Loire depuis l’an Mil.	423
Figure 230 – Mise en évidence des événements hydrologiques majeurs en Loire moyenne depuis 1846.	424
Figure 231 – Durée des basses eaux en continu par année de 1863 à 2005.	426
Figure 232 – Maxima journaliers supérieurs au plein bord ($Q_l > 1\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$).	428
Figure 233 – Evolution saisonnière depuis 1825 à la station de Givry – Fourchambault.	428
Figure 234 – Les sites étudiés en Loire moyenne depuis 1996.	432
Figure 235 – Typologie et fréquence des travaux de restauration du lit (Site de Fourchambault).	433
Figure 236 – Impacts des travaux de restauration (Site de Fourchambault).	434
Figure 237 – Propositions d’aménagements après expertise du site (Site de Fourchambault). ..	435
Figure 238 – Identification des micro-îlots sur lesquels intervenir.	436
Figure 239 – Diagnostic du lit de la Loire en aval d’une chevrette (Site de La Charité).	439
Figure 240 – Propositions d’intervention sur site.	440
Figure 241 – Proposition de restauration de la connexion aval du bras secondaire annexe à l’Îlot des Barreaux (SA 3).	441
Figure 242 – Création d’une base de données « îles ».	442
Figure 243 – Adaptation de la base de données aux exigences de travail des opérateurs en Loire moyenne.	444
Figure 244 – Drapage MNT sur image aérienne.	446
Figure 245 – Création d’un ballon captif dédié à l’affinage des images destinées aux MNT - Loire.	448
Figure 246 – Synthèse des changements environnementaux et des modifications géomorphologiques de la Loire des îles depuis le 19 ^{ème} siècle.	468
Figure 247 – Evolution du style anastomosé en Loire moyenne depuis 1850 et perspectives. ..	471

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I – Les références majeures par disciplines issues du P.N.R.Z.H.	49
Tableau II – Les références récentes de Master et de thèse de la Zone Atelier Bassin versant de la Loire.	54
Tableau III – Données hydrologiques de la Loire moyenne (Source : Banque Hydro).	81
Tableau IV – Les Sites Ateliers et leurs caractéristiques physiques.	91
Tableau V – Les Sites Ateliers et leurs caractéristiques socio-géographiques.	92
Tableau VI – Les caractéristiques des sites fonctionnels du Site Atelier 3.	103
Tableau VII – Les données de l’analyse spatio-temporelle.	111
Tableau VIII – Synthèse de la caractérisation des formes fluviales pour l’analyse spatiale.	121
Tableau IX – Exemple de tableau d’attribution d’une couche thématique : identification de formes fluviales, mesures quantitatives.	122
Tableau X – Les différents profils en travers utilisés.	133
Tableau XI – Les profils en travers de l’analyse spatiale.	136
Tableau XII – Evolution du plancher alluvial entre Mesves et Tracy-sur-Loire.	249
Tableau XIII – Surfaces érodées et sédimentées entre 1960 et 1995 par secteur fonctionnel. ..	269
Tableau XIV - Surfaces érodées et sédimentées entre 1995 et 2002 par secteur fonctionnel. ...	269
Tableau XV – Caractéristiques des différents évènements hydrologiques suivis entre 2002 et 2005.	295
Tableau XVI – Chronique et principales phases hydro-dynamiques observées de la crue.	300
Tableau XVII – Synthèse des données MES de la Loire entre 2001 et 2005, à 30 kilomètres en aval du SA 3.	305
Tableau XVIII – Synthèse des dépôts enregistrés entre 2002 et 2005.	320
Tableau XIX – Les grands modelés sédimentaires observés dans les bras secondaires après le passage de la crue.	360
Tableau XX – Bilan sédimentaire des secteurs fonctionnels suivis depuis 2002.	366
Tableau XXI– Exemples d’aménagements fluviaux et leurs contraintes sur l’hydrosystème Loire.	393
Tableau XXII – Rythme d’évolution des formes fluviales en aval de la chevrette de La Charité (Nabet, 2005).	394
Tableau XXIII – Répartition des débits classés sur la période 1863-2005.	425

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

Photographie 1 – L’effondrement du Pont Wilson à Tours en 1978.	20
Photographie 2 – Un exemple d’affluent de la Loire en rive gauche.	90
Photographie 3 – Borne type et clou d’arpentage type marquant les extrémités des profils topographiques.	133
Photographie 4 – Méthodologie de levé au DGPS.	141
Photographie 5 – Point de mesure de la sédimentation sur un franc-bord.	147
Photographie 6 – Contrairement à la toponymie cartographique actuelle, « l’Ilot des Loges » n’est pas un îlot mais une très grande île.	172
Photographie 7 – Une grande d’île demeure moins imposante, à l’échelle du corridor fluvial, qu’une très grande île (a.).	174
Photographie 8 – Ces îles moyennes semblent avoir une couverture végétale homogène (a.).	175
Photographie 9 – Un îlot se retrouve peu élevé par rapport au niveau d’étiage et participe ainsi au piégeage des sédiments circulant dans ce bras secondaire.	177
Photographie 10 – Un micro-îlot peut séparer deux connexions amont d’un bras secondaire.	178
Photographie 11 – Ces bancs végétalisés peuvent être qualifiés de futurs micro-îlots.	179
Photographie 12 – Une dépression à deux périodes hydrologiques différentes : les niveaux d’eau sont alors bien différents et attestent du niveau de la nappe.	189
Photographie 13 – Ce bras mort est très végétalisé mais conserve sa forme de chenal.	189
Photographie 14 – La nappe alluviale contribue à l’alimentation de ces petites dépressions situées au centre des îles.	189
Photographie 15 – Des bras morts situés au sein même d’île canalisent les écoulements de crue.	190
Photographie 16 – Des dépressions parsèment la plaine d’inondation.	191
Photographie 17 – Une boire dans la plaine d’inondation entretenue sur son pourtour par certains usagers.	191
Photographie 18 – Ce bras mort, dit le bras du Lac, demeure le plus long de la plaine d’inondation de la rive gauche.	192
Photographie 19 – La pointe aval de la très grande île du Lac subit un processus d’érosion bien avancé.	228
Photographie 20 – Ces îlots inférieurs à 0,4 ha ne sont pas encore suffisamment homogènes et stables pour être renforcés par rapport à la dynamique fluviale.	231
Photographie 21 – Migration d’une île.	233
Photographie 22 – Ces îles sont issues de la réunion de plusieurs îlots.	235
Photographie 23 – La sédimentation est active sur ce type de micro-ilot recouvert d’une végétation pionnière jouant le rôle parfait dans le piégeage des sédiments. ...	240
Photographie 24 – Chronologie de la crue entre le 5 et le 7 décembre 2003 au niveau de la ferme de la Martinaterie en rive gauche face au coteau des Loges.	295
Photographie 25 – Panorama de la tâche d’inondation.	300
Photographie 26 – Dépôts sur les îles de plus de 40 ans : secteur des Loges.	319
Photographie 27 – Dépôts sur les îles jeunes de moins de 40 ans (Impact de la crue de décembre 2003).	320
Photographie 28 – Sédimentation forte sur la berge d’une grande île jeune comme celle	

du secteur des Loges (80 cm de dépôts).	320
Photographie 29 – Erosion des îles.	321
Photographie 30 – Recul de près de 100 mètres de la queue d'une très grande île (Ile du Lac).	322
Photographie 31 – Erosion et sédimentation sur les francs-bords.	327
Photographie 32 – Ecoulements sur les francs-bords.	327
Photographie 33 – Sédimentation active dans les bras secondaires les plus longs.	359
Photographie 34 – Curage d'un court et étroit bras (1 ^{ère} connexion amont du secteur des Loges).	359
Photographie 35 – Elargissement de plus d'un mètre de large d'un bras secondaire	360
Photographie 36 – Les jeunes pousses de saules et de peupliers n'ont pas été emportées lors du passage de la crue.	362
Photographie 37 – La brèche de la Chevrette (en période de basses eaux).	391
Photographie 38 – La culture de l'osier en Loire moyenne au début du 20 ^{ème} siècle.	399
Photographies 39 et 40 – Le pastoralisme sur les francs-bords de la Loire moyenne.	399
Photographie 41 – Le pastoralisme « libre » des troupeaux.	400
Photographie 42 – Le néo-pastoralisme en Loire moyenne (Herry).	405
Photographie 43 – La Loire à Gien au cours d'un étiage sévère à l'été 1949.	425
Photographie 44 – La Loire en période de basses eaux.	426

ANNEXES

ANNEXE 1 : SIG

Les couches thématiques du SIG et leur intérêt pour l'étude sont résumés ainsi :

☞ *Analyse synchronique* :

L'analyse s'est effectuée à l'échelle de chaque année (1850, 1930, 1960, 1995 et 2002). Nous avons ainsi un état des lieux de la Loire et de ses formes pour ces différentes références temporelles.

- Couche « **formes végétalisées** » : identification des formes stabilisées uniquement et suivant la nomenclature précédente.

Fichiers : [formes_vegetalisees1850] - [formes_vegetalisees1930] -
[formes_vegetalisees1960] - [formes_vegetalisees1995] - [formes_vegetalisees2002]

- Couche « **bande active** » : identification de la bande active uniquement et suivant la nomenclature précédente

Fichiers : [bande_active1850] - [bande_active1930] - [bande_active1960] -
[bande_active1995] - [bande_active2002]

- Couche « **végétation** » : pour les formes stabilisées identifiées, le « niveau » de végétation est renseigné ainsi que sa surface en m² et ha au sein de la forme, ce qui permet d'évaluer finement l'évolution spatiale de la couverture végétale.

Fichiers : [vegetation1850] - [vegetation1930] - [vegetation1960] - [vegetation1995] -
[vegetation2002]

- Typologie des îles : l'analyse de la couche « formes végétalisées » aboutit à une typologie morphologique des îles en fonction, pour cette vue en 2D, de la taille.

Cette approche est mieux détaillée par la suite mais on peut déjà retenir la classification :

Très grande île

Grande île

Ile moyenne

Ilot

Micro-îlot

Fichier : [Typo_iles]

☞ *Analyse diachronique :*

L'analyse s'effectue en comparant les différents pas de temps à savoir 1850-1930, 1930-1960, 1960-1995 et 1995-2002.

- Couche « **érosion-sédimentation** » : sectorisation et quantification des zones d'érosion et de sédimentation. Par exemple pour 1995, on pourra savoir quels sont les secteurs et les surfaces en érosion ou ceux en accrétion par rapport à 1960.

Différents paramètres rentrent en jeu :

Type d'évolution : érosion ou sédimentation

Contexte d'évolution : amont, aval ou latéral (pour les îles)

Surface : en m² et ha

Fichiers : [Evolution_formes_1850-1930] - [Evolution_formes_1930-1960] -
[Evolution_formes_1960-1995] - [Evolution_formes_1995-2002]

- Couche « **évolution formes stabilisées** » : on se focalise sur les îles et les francs-bords pour connaître leur évolution propre en la qualifiant et quantifiant. En d'autre terme, l'interprétation de cette couche permet d'établir une typologie d'évolution des formes.

On trouve dans la table attributaire de nombreux paramètres essentiels dans notre analyse :

Erosion/Sédimentation : surface et rythme en m²/an

Etat des berges : longueur et rythme d'évolution en m/an

Migration : amont, latéral ou latérale (en mètres et en m/an)

Contexte d'évolution : apparition, disparition, regroupement d'îles

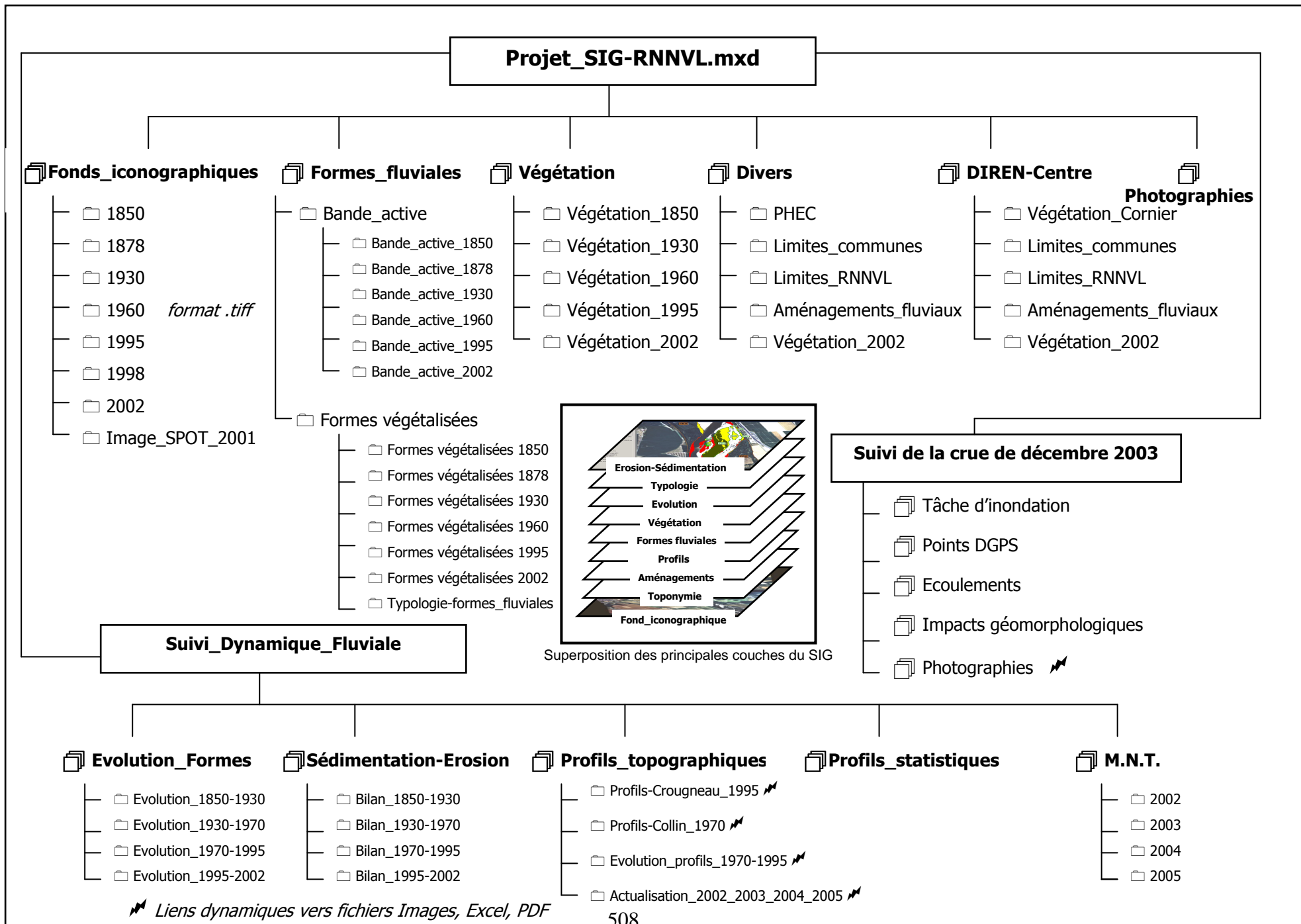
Etat général : extension ou réduction

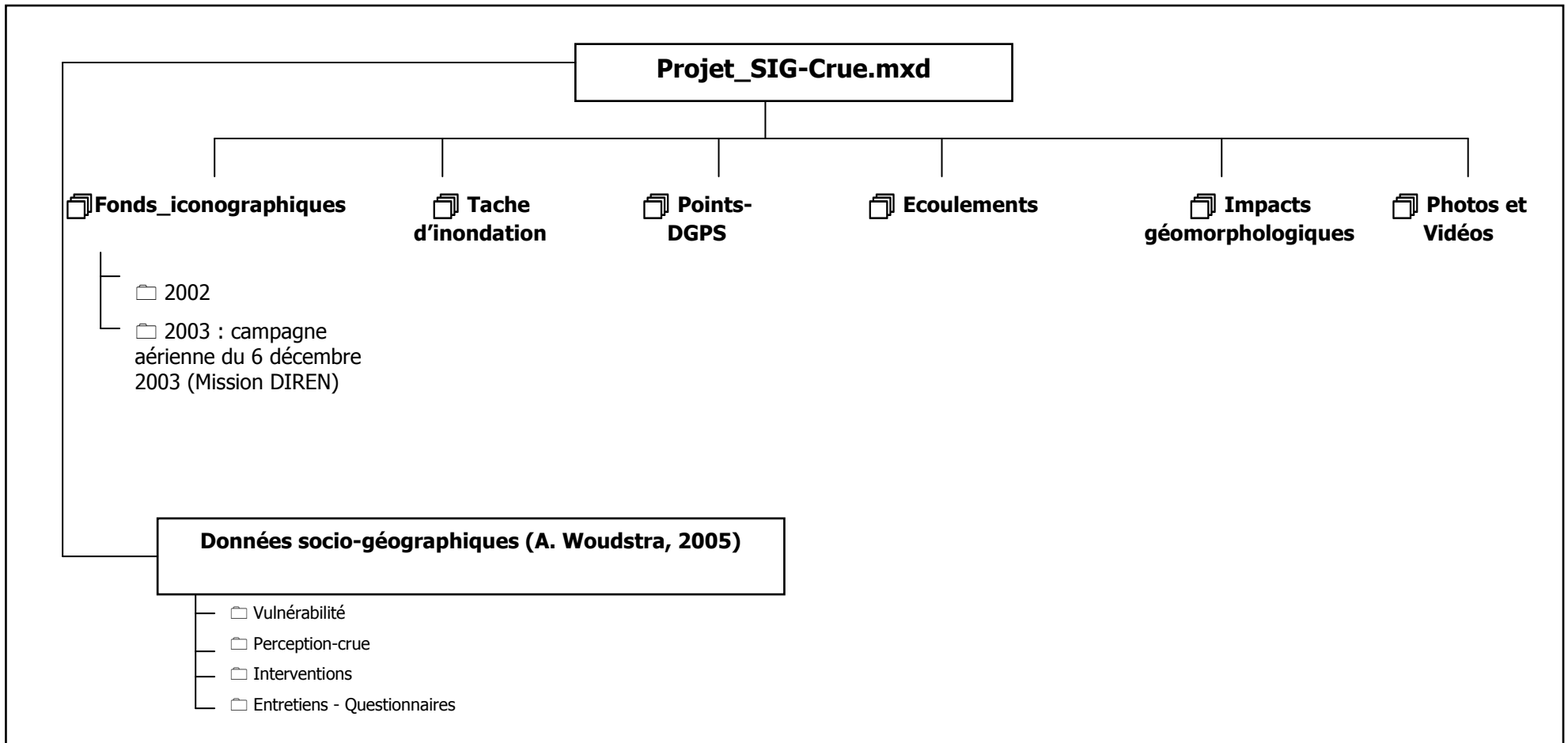
Croissance générale de la forme : taux de croissance en % et rythme en m²/an

Fichiers : [Erosion-sedimentation_1850-1930] - [Erosion-sedimentation_1930-1960] -
[Erosion-sedimentation_1960-1995] - [Erosion-sedimentation_1995-2002]

■	Bois
■	Lande - Broussaille
■	Pelouse - Prairie
■	Séquences pionnières
□	Banc à nu
■	Cultures - Pâtures
■	Zone urbanisée

Charte graphique de la légende *végétation*





Organisation des fichiers informatiques du projet SIG consacré à la crue de décembre 2003 dans le Site Atelier 3



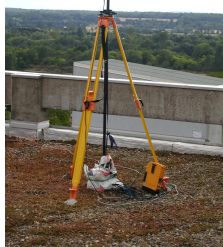
Identité d'île	1850	1878	1933	1949	1960	1973	1982	1988	1995	2002
IL1	Grande île	Grande île	Grande île	Grande île	Grande île	Grande île	Grande île	Grande île	Grande île	Très grande île
IL2	Grande île	île moyenne	île moyenne	île moyenne	Grande île	Grande île	île moyenne <i>(1982)</i>	île moyenne	île moyenne	île moyenne
IL3	île moyenne	île moyenne	Grande île	île moyenne	île moyenne	Grande île	Grande île	Grande île	Grande île	Grande bord EB1
IL4	Grande île	Grande bord								
IL5	île moyenne	Disparition								
IL6	île moyenne	Disparition								
IL7	îlot	Disparition								
IL8	île moyenne	Disparition								
IL9	Très grande île	Grande bord								
IL10	Grande île	Grande bord								
IL11	Très grande île	Très grande île	Grande bord							
IL12				îlot	îlot	Très grande île <i>(IL 10)</i>				
IL13				îlot	îlot	Très grande île <i>(IL 10)</i>				
IL14				îlot	îlot	Très grande île				
IL15				îlot	îlot	Très grande île				
IL16				îlot	îlot	îlot				
IL17				îlot	îlot	île moyenne <i>(IL 10)</i>	île moyenne	île moyenne	île moyenne	
IL18	Banc à caractère insulaire	Banc à caractère insulaire	Très grande île	Très grande île	Très grande île	Très grande île <i>(IL 10)</i>	Très grande île	Très grande île	Très grande île	Très grande île
IL19	Banc à caractère insulaire	Banc à caractère insulaire	Grande île	Grande île	Grande île	Très grande île <i>(IL 10)</i>				

Extrait du tableur de suivi de chaque île du Site Atelier 3 depuis 1850 : la période de formation et les différents stades d'évolution de chaque île sont ainsi mis en valeur. Nous pouvons connaître le passage d'un type d'île à l'autre et leur rythme d'évolution.

ANNEXE 2 : DGPS

● Création de stations de référence

- Les conditions requises pour choisir le site idéal reposent sur trois facteurs : un lieu dégagé pour capter les signaux GPS, surélevé pour que les ondes UHF puissent rayonner le plus loin possible, et sécurisé pour laisser la station travailler toute seule sans mobiliser une personne. A cela s'ajoutent les limites de portée de la précision centimétrique jusqu'au mobile de 12 km autour de la station. Il faut donc choisir l'emplacement d'une station en fonction de ce critère limitatif, et ne pas travailler avec le mobile à une distance supérieure à 12 km, surtout si l'on souhaite conserver le mode centimétrique. Pour le secteur de la réserve, une seule station n'était pas suffisante pour le couvrir entièrement. Les coteaux calcaires de Pouilly-sur-Loire constituent une zone perturbatrice et la canopée et les houppiers de la forêt alluviale ligérienne forme de véritables voiles naturels au bon fonctionnement du système DGPS. Il a fallu conjuguer avec ces contraintes topographiques et biologiques. Pour cela trois stations locales DGPS ont été créées dans et autour de la réserve naturelle.

Station	1	2	3
Lieu	Toit du belvédère du Pavillon du Milieu de Loire (Pouilly-sur-Loire)	Franc-bord en face de la connexion amont de l'Ile du Lac (Herry)	Toit de la maison de retraite (La Charité-sur-Loire)
Coordonnées	Latitude : 47°17'10.0901"N Longitude : 002°56'59.2652"E Altitude : 213,625 mètres	Latitude : 47°13'14.9118"N Longitude : 002°58'56.0645"E Altitude : 202,282 mètres	Latitude : 47°11'06.5453"N Longitude : 003°00'55.8460"E Altitude : 248,356 mètres
Hauteur antenne	Verticale à 1,160 mètres	Oblique à 1,154 mètres	Oblique à 1,829 mètres
Périmètre de travail	8 km de portée avec des décrochages ponctuels. 90 % des relevés topographiques réalisés avec cette station	Amont de l'Ile du Lac Travail local	Secteur de La Charité-sur-Loire Très longue portée sur la plaine d'inondation (jusqu'à 20 km)
Photo de la station			

ANNEXE 3 : Sédimentologie

Les échantillons sédimentaires ont été tous analysés dans le laboratoire de sédimentologie du LGP. Le protocole d'analyse comporte plusieurs phases importantes suivant l'état des divers échantillons.

- Préparation des échantillons

On procède dans un premier temps au classement des échantillons en fonction de leur type de sédiment apparent : des échantillons les plus fins aux plus grossiers. La pesée des échantillons est systématique et répétée suivant les phases de préparation. Le tamisage, la destruction de matière organique, l'agitation et le quartage sont autant d'étapes de préparation des échantillons.

- Les échantillons mouillés sont mis à l'air libre ou en étuve pour être séchés avant de passer au tamisage. Les prélèvements qui ne contiennent pas de matière organique sont pesés et passent directement au tamisage.

- Destruction de la matière organique

Pour les échantillons comportant de la matière organique, susceptible de fausser les résultats granulométriques, 10 grammes de l'échantillon sont prélevés et mis dans un bécher. En rajoutant à la pipette du Peroxyde d'Hydrogène (H_2O_2), sur une plaque chauffée à $80^\circ C$, il y a précipitation. Une fois la décantation et la matière organique éliminée, on rajoute de l'Héxamétaphosphate de Sodium et de l'eau distillée : pendant deux heures l'agitateur disperse les argiles. La solution représentative de l'échantillon est passée enfin à l'analyse granulométrique sous balayage électronique.

- Le Quartage

Cette technique permet un prélèvement représentatif de chaque échantillon destiné au granulomètre laser. Cela consiste à verser sur un papier les particules de l'échantillon en forme de pyramide. Cette dernière est divisée en quatre parties de même proportion. On garde deux parties opposées et on élimine les deux autres. Les deux parties gardées sont rassemblées à nouveau en forme de pyramide ; un prélèvement se fait alors de la base au sommet de la pyramide et peut être déposé directement dans le système d'analyse laser.

- Le tamisage et la granulométrie

Trois tamis de diamètres différents ont été utilisés : 1.6mm, 2mm et 5 mm. Le tamisage par vibration électrique dure de 10 à 15 minutes pour chaque échantillon. Une fois cette opération terminée, on sépare les échantillons en deux catégories :

- les grains supérieurs à 1,6 mm de diamètre sont classés en trois sous catégories : de 1.6 à 2mm, de 2 à 5mm, et > 5mm.
- les grains inférieurs à 1,6 mm passent au tamisage électronique (après quartage)

- Le tamisage électronique par granulomètre Laser (de marque Coulter LS 230)

Cette analyse concerne donc les échantillons de moins de 1.6 mm de diamètre. Ce granulomètre Laser est basé sur la réfraction de la lumière sur la matière et permet ainsi une analyse en suspension ou en émulsion. Il effectue une mesure rapide sur la totalité de la plage analytique (de 0.4µm à 2mm) en une seule analyse, garantissant une grande résolution de mesure et une très bonne précision de la taille des sédiments pour chaque échantillon.

- **Analyse des MES**

54 flacons de MES ont subi les phases d'exploitation inhérente à ce type de données. Le principe repose sur la filtration et la pesée des matières fines prélevées dans chaque flacon. A l'aide d'un appareil à filtration, les particules fines sont recueillies sur un filtre et pesées sous vide. Les résultats s'expriment ainsi en taux de MES sous la forme mg/l.

Ces longs processus d'analyse en laboratoire apportent des données brutes ; l'interprétation statistique des résultats est nécessaire.

- **Analyse statistique des sédiments**

- Face au poids des prélèvements sédimentaires et à leur longue analyse, un traitement statistique est nécessaire. Il s'agit d'une part d'obtenir une représentation statistique des types de sédiments, d'autre part de calculer des indices granulométriques permettant de définir les modes de transport et de dépôt et d'évaluer le bon tri des éléments de chaque échantillon.

Dans le cadre du PNRZH, des échantillons représentatifs de différentes formes fluviales ont été traités en image CM (Passega, 1957) afin de mettre en valeur les conditions de transport et de dépôts des sédiments (Gautier et *al.*, 2001). La médiane, notée M, représente le mieux l'ensemble du dépôt. Le percentile, noté C, représente lui la fraction la plus grossière et permet d'estimer la compétence maximum des courants. La représentation sous forme graphique permet de mieux visualiser l'intérêt de cette méthode avec la médiane sur l'axe des abscisses et le percentile sur celui des ordonnées. Il est vrai que les références à cette méthode Passega sont légions, aussi nous n'avons pas multipliés les images CM en nous contentant essentiellement de caractériser la taille des sédiments représentatifs.

- Par le biais du granulomètre Coulter et du logiciel Gradistat, la méthode de Folk (Folk, 1974) a été notamment choisie pour calculer l'indice granulométrique Sk (coefficient de dissymétrie Skewness) :

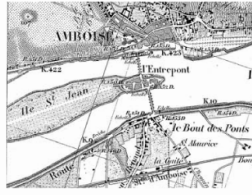
$$SK = (Q16 + Q50 + Q84) / 2$$

Quand $Sk > 1$, alors dissymétrie tendant vers les matières les plus fines

Quand $Sk < 0$, alors dissymétrie tendant vers les matières les plus grossières

Quand $0 < Sk < 1$, alors échantillonnage symétrique

ANNEXE 4 : les autres îles de la Loire



Amboise : île centrale urbanisée (pont)



Tours: île latérale urbanisée (pont)



Île Charlemagne à Orléans : agriculture



Île de Cosne : culture, pâturage et plantation



**Faubourg de la Charité :
île centrale urbanisée (pont)**

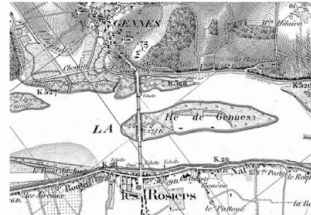


**Île de Decize :
île centrale urbanisée (pont)**

Panel des îles de la Loire moyenne déjà présentes en 1850. Îles urbanisées, îles pâturées, îles cultivées ou encore îles pratiques. Ces îles participaient au dynamisme des villes portuaires et permettaient de traverser le fleuve.



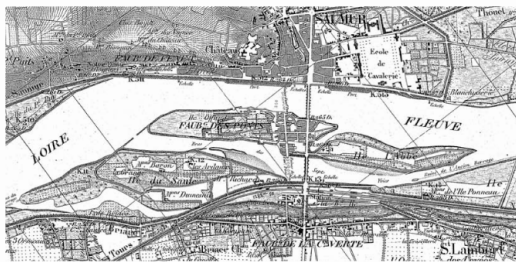
Îles d'Ancenis : îles cultivées et pâturées



Île de Genes : île centrale cultivée et pâturée



Île de Chalonnais : île habitée, aménagée (pont), cultivée et pâturée



Îles de Saumur : assemblage de deux îles, une urbanisée, l'autre cultivée

0 500 mètres

Autre panel d'îles de la Loire présentes en 1850. Au-delà de Tours, les îles sont plus intégrées dans les fonctions socio-économiques des régions traversées. L'île de Chalonnais de par sa longueur unique dans la vallée de la Loire, une très grande île, a offert des possibilités d'extension agricole très importantes et pour les sociétés riveraines.

