



Sectorisation de la Loire moyenne



Rapport de stage en vue de l'obtention du grade de Master Professionnel Géo-hydrosystème Continentaux en Europe à l'université des sciences de Tours

Stage réalisé au sein de la DIREN Centre sous la direction de Fabien Pasquet

Remerciements

A l'occasion de ces 5 mois passé à la DIREN Centre, je voudrai tout d'abord remercier Fabien Pasquet de m'avoir fait confiance pour la réalisation de ce stage.

Je souhaiterai également remercier toutes les équipes de la MOG et de la DESI qui m'ont accompagné durant ces mois et tout particulièrement Philippe Miché, Jean-Claude Gazeau et Stéphane Braud pour leur aide et leur sympathie. Je les remercie également de m'avoir prêté leur poste lorsque j'en avais besoin.

J'ajouterai une pensée amicale à Mandy et Alice pour m'avoir supporté, et à Audrey Latapie pour son aide bienvenue concernant les données utilisées.

Et enfin, un énorme merci à celle qui me soutient depuis toujours, Aurélie.

Sommaire

Résumé	2
Abstract	3
Introduction	4
Contexte de l'étude	5
La Loire : un hydrosystème dégradé	5
Les moyens mis en place	8
Le contexte de la sectorisation	10
Méthodologie	11
Le travail de P.Ginestet	11
Les données disponibles	11
Adaptation et complément de la méthode de P.Ginestet	12
Sectorisation	24
Résultats des différents traitements	24
Paramètres de la sectorisation	25
Résultats	26
Synthèse de la sectorisation	37
Evolution du lit entre 1993 et 2002	39
Rapport d'aspect et épaisseur d'alluvions	42
Conclusion	44
Bibliographie	45
Liste des figures	46
Annexes	47
Table des matières détaillée	49

Résumé

La Loire est un fleuve dont la restauration est au cœur d'un projet d'envergure. Modifié par l'homme, son lit présente néanmoins une dynamique morphologique rare en Europe pour un fleuve d'une telle dimension. La sectorisation de son lit est un outil essentiel pour la gestion de ce milieu fragile. A l'aide de données récentes, nous avons remis à jour un précédent travail de sectorisation réalisé par P.Ginestet. L'automatisation de ce travail va permettre de remettre à jour les mesures du lit très rapidement dès que de nouvelles données seront disponibles. En 1999, date du rapport de P.Ginestet, celui-ci a fait des estimations sur les tendances d'évolution du lit à court terme. Il semblerait que depuis les dernières données utilisées (1993) le lit ait tendance à fortement se végétaliser en plus de se chenaliser. Les travaux actuels sur la végétalisation du lit semblent primordiaux si l'on considère le risque inondation.

Mots clés : Loire moyenne, sectorisation, Ginestet, végétalisation, morphologie, lit actif, bande de remaniement, chenalisation

Abstract

Restoration and preservation of Loire river is a big project. Because of human pressure on all rivers, Loire's bed's morphology is uncommon in Europe and need to be protected. Bed's segmentation is useful to have a good management of this weak ecosystem. This study is based on a previous work by P.Ginestet who has done the first detail segmentation. Here, we automate the process to improve the methodology and to work faster with future data. In 1999, P.Ginestet has estimate the global change of the bed for the few years after. It seems that the prevision wasn't exact. Actually, bed's vegetation is developing in the same time as channelization. To prevent floods, some work is occurring on the vegetation.

Key words: Loire river, segmentation, Ginestet, vegetalisation, morphology, active bed, channelization

Introduction

Plus long fleuve de France, la Loire est souvent considérée comme le dernier fleuve sauvage d'Europe. Le caractère sauvage que l'on lui prête semble fragile. Au cours des siècles, les populations ligérienne ont domestiqué ce fleuve à leur besoin. Dès le Moyen Age, la première action fut de se défendre et de protéger les terres contre les crues. Inondation après inondation, l'endiguement s'est généralisé pour atteindre près de 700km.

Parallèlement, la Loire a servi de voie de communication et des aménagements pour faciliter la navigation ont été construits, ces ouvrages ont façonnés le lit. Contrainte, la Loire commence à se chenaliser.

Si l'extraction de matériau du lit de la Loire est pratiquée depuis longtemps (par les « tireurs de sable » en particulier), après la seconde guerre mondiale cette exploitation augmente considérablement. En 50 ans, soit de 1945 à 1995, le lit a été dépossédé d'une partie non négligeable de son sédiment, représentant plusieurs siècles d'apport naturel et entraînant un enfoncement massif du lit et un déséquilibre de l'hydrodynamique.

La volonté de traiter de façon globale et partenariale la problématique de la protection contre les inondations, la restauration et la préservation du patrimoine naturel, paysager et culturel ainsi que l'amélioration de la gestion de la ressource en eau, a donné naissance en 1994 au Plan Loire Grandeur Nature (PLGN), programme interrégional pluriannuel, établi entre l'Etat et les collectivités.

A travers 3 Plan Loire depuis 1994 (1994-2000, 2000-2006, 2007-2013), la politique de restauration de la dynamique fluviale du fleuve vise à la fois à l'amélioration de l'écoulement en crue mais également une restauration des milieux en terme hydraulique, écologique et paysager.

Pour intervenir le plus efficacement possible là où cela est le plus nécessaire, la connaissance du lit du fleuve et son évolution est impérative. Ainsi un système d'information sur l'évolution du lit de la Loire et de ses affluents a été mis en place depuis 1995 à la DIREN Centre, qui collecte, valorise et diffuse des données sur la morphologie du fleuve : lignes d'eau, profils bathymétriques, prises de vue aérienne, cartes de végétation et de morphologie.

Parallèlement depuis 1997, plusieurs travaux de sectorisation morphologique ont été entamés ([Malavoi, 1997], [Ginestet, 1999]) pour la définition de tronçons sur lesquels l'évolution est homogène.

Depuis les travaux de P.Ginestet, d'autres données ont été acquises dans le cadre du SIEL, en particulier la délimitation numérique des formes alluviales qui laissent envisager, en plus d'une actualisation, une automatisation des traitements, absente dans les précédents travaux.

Après une présentation du contexte général de l'étude, des phénomènes en jeu et des précédents travaux, ce mémoire présentera la méthodologie employée pour le traitement des données disponibles et les résultats obtenus en terme de sectorisation et de prévision des tendances d'évolution.

Contexte de l'étude

La Loire : un hydrosystème dégradé

La Loire prend sa source dans le Massif Central, en Ardèche, au Mont Gerbier de Jonc. C'est le plus long fleuve de France avec un linéaire de près de 1020km et son bassin versant, le plus vaste également, recouvre près d'un cinquième du territoire français soit approximativement 117 000 km².

Ce travail porte uniquement sur la Loire moyenne. Cette section s'étend du bec d'Allier à l'aval du bec du Maine pour une longueur totale de 440km. La Loire borde dans ce secteur les départements de la Nièvre et du Cher puis traverse le Loiret, le Loir-et-Cher, l'Indre-et-Loire et le Maine-et-Loire. La Loire s'y écoule sur les couches sédimentaires du Bassin parisien avec une pente de 0.043%.

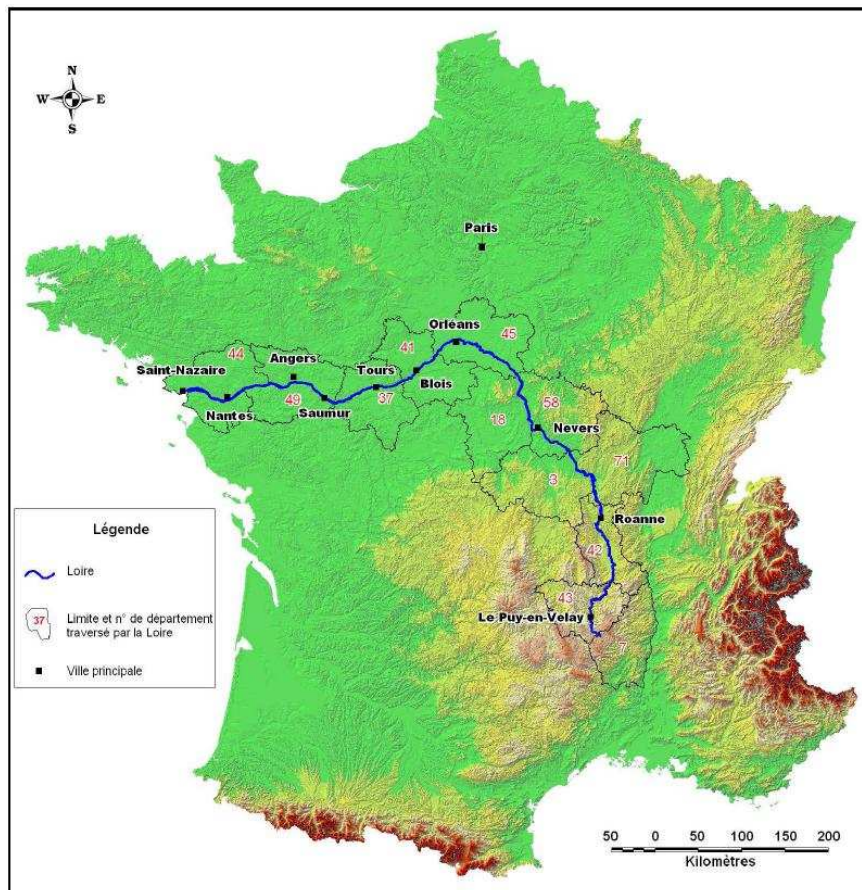


Figure 1 : Cadre géomorphologique de la Loire (données MNT de l'IGN, d'après BRGM)

Le régime hydraulique de la Loire est très varié. Crues importantes voire extrêmes et étiages sévères se succèdent. Peu influencée par la fonte des neiges, la Loire est par contre soumise aux précipitations océaniques et méditerranéennes (ou cévenoles).

L'association des deux peut provoquer ces crues extrêmes. Ces crues « mixtes » ont lieu en mai/juin et en octobre/novembre. A Gien, le débit lors des trois grandes crues majeures du XIX^{ème} siècle, 1846, 1856, 1866, a dépassé les 7000m³/s alors qu'à l'étiage de 1949, le débit fût de seulement 11m³/s.

Ce régime météorologique variable et la présence notable d'enjeux importants (les vals de Blois, Tours, Orléans et les centrales nucléaires en particulier) ont conduit à la création d'un barrage sur la Loire amont et d'une retenue d'eau sur l'Allier pour atténuer ces variations. Construit en 1985 le barrage de Villerest, aidé de la retenue de Naussac, a pour objectif de soutenir le débit d'étiage à 60m³/s à Gien afin de permettre le refroidissement des 4 centrales nucléaires présentes sur la Loire. Le barrage de Villerest a comme autre objectif d'écarter, dans la mesure du possible, les crues importantes. Dont le dernier exemple fut la crue de 2003 (3310m³/s à Gien). L'effet sur la hauteur d'eau fut de l'ordre de 40cm à l'échelle de Jargeau (dans le Loiret, en amont d'Orléans).

Mais bien avant la mise en place de ces retenues d'eau, la Loire a été contrainte et a subi l'anthropisation de son lit. Dès le Moyen-Age, l'augmentation des enjeux agricoles et humains le long des vals s'est accompagnée d'un besoin de protection contre le risque inondation. Ce besoin s'est traduit par l'édification de digues de plus en plus hautes et de plus en plus longues au fil des siècles et des crues qui les dépassaient.

Les premières digues datent du Moyen-Age et dès le XII^{ème} siècle, avec la charte d'Henry II Plantagenêt, comte d'Anjou et roi d'Angleterre, des « hôtes » sont installées sur les digues chargés de leur entretien. Le pouvoir intervient dans la gestion du système d'endiguement. Aujourd'hui encore, particularité de la France, les digues de la Loire sont gérées par l'Etat.

De nos jours, l'endiguement de la Loire moyenne est de l'ordre de 600km pour un linéaire de 440km, l'endiguement pouvant être sur les deux rives. La hauteur de ces digues n'a fait que s'accroître. En effet, à chaque crue qui débordait des levées, celles-ci ont été surélevées de quelques dizaines de centimètre dans l'espoir de contenir la suivante. Cette élévation successive a eu l'effet escompté inverse. Chaque kilomètre endigué supplémentaire et chaque centimètre en hauteur ajouté ont permis une aggravation des dégâts en crue. L'eau n'ayant plus de zone où se déverser en amont, fut accélérée en aval. Sans écrêtement de crue, le pic fut de plus en plus haut et continua de se déverser par-dessus les digues.

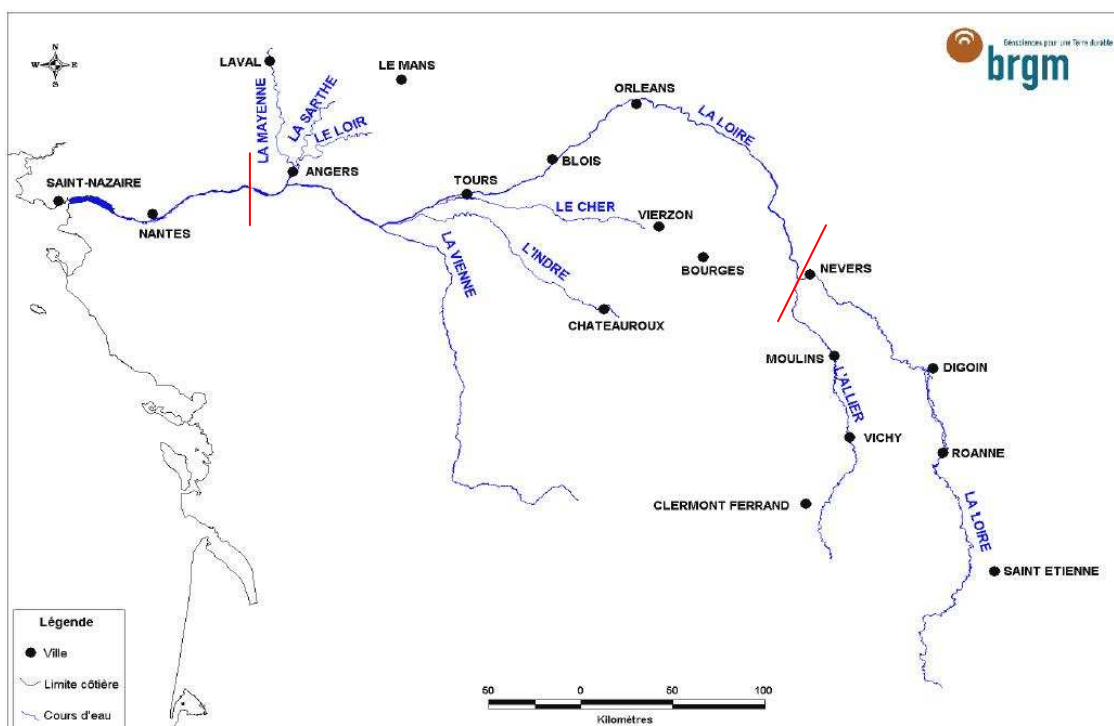


Figure 2 : La Loire et ses principaux affluents. Loire moyenne entre les deux traits rouges (BRGM)

Pour remédier à ce problème, des déversoirs sont créés afin d'écarter les crues par inondation contrôlée de vals peu habités. Leur rôle est nécessaire mais l'hydrologie modérée du XXème siècle, en comparaison aux grandes crues du siècle précédent, n'a pas permis de vérifier leur efficacité et la mémoire collective du risque inondation se perd.

Dans le même temps, des ouvrages de navigation (chevrettes, épis, duits) ont été construits. Leur but était de permettre la navigation en étiage et l'auto-curage du chenal navigable. La contre-partie de ces ouvrages est la déconnexion de certains bras pour les faibles débits. Le sédiment de ces chenaux secondaires n'étant plus assez souvent mobilisé, une végétation pérenne a pu se développer comme par exemple derrière les atterrissements d'Orléans ou de Givry. Autre exemple frappant, le cas de l'île Meslet en aval d'Ingrandes où la construction d'épis a inversé l'écoulement naturel de la Loire autour de l'île. Cette modification du régime hydraulique a eu pour conséquence un ensablement du bras initialement principal. Pour des débits inférieurs à 500m³/s, ce bras n'était plus en eau (avant la mise en place expérimentale de seuils) et le nouveau chenal principal se creusait (cf. annexe 1).

En effet, suite aux modifications du lit (réduction de la largeur d'écoulement et chenalisation), de l'hydrologie modérée (peu de grandes crues) et des habitudes des riverains au fleuve (arrêts des pâturages et de la coupe de bois pour le chauffage), la végétation installée s'est fortement développée et pérennisée. La végétalisation des îles par des arbres fortement ancrés dans le sédiment ne fait que retenir celui-ci, et limite la dynamique hydro-sédimentaire, mais surtout représente un obstacle à l'écoulement de l'eau en crue. La présence de végétation bloque l'eau, la ralentit, et provoque par conséquent une élévation du niveau d'eau qui se traduit par un risque accru de débordement.

Si le niveau d'eau augmente en crue, à l'étiage, le contraire se passe. La ligne d'eau d'étiage a considérablement baissé au cours de la seconde partie du XXème siècle. Les ouvrages de navigation ne sont pas responsables de l'enfoncement généralisé de la Loire. Leur effet est purement local. La principale cause de la diminution de la ligne d'eau est l'extraction du sédiment comme matériel de construction.

L'extraction de granulats dès la fin de la seconde guerre mondiale est la dernière catastrophe pour le lit de la Loire. Extraction modeste jusqu'en 1968, les tonnages vont doubler entre 1968 et 1972 pour atteindre un pic de 12 millions de tonnes de sédiment extrait en une année, soit plusieurs siècles d'apport naturel. Les conséquences sont importantes sur le lit qui s'enfonce notablement au point de provoquer la destruction du Pont Wilson à Tours en 1978 par sapement des fondations. Les dernières concessions accordées aux carriers se sont achevées en 1995 en Indre et Loire, mais la présence de barrages en amont limite l'apport de sédiment qui serait nécessaire à rehausser la ligne d'eau d'étiage. La tendance actuelle montre plutôt une stabilisation de celle-ci.

A grande échelle, l'endiguement de la Loire a contraint son écoulement sur une faible largeur, aggravant les risques en cas de crues. De la même manière, à l'échelle du lit, les ouvrages de navigation, cumulés aux extractions de granulats et à la végétalisation du lit, ont fortement perturbé la morphologie et l'écoulement du lit.

Pour essayer de rétablir une dynamique hydro-sédimentaire plus équilibrée, des actions de préservation et de restauration sont mises en place (cf. annexe 2).



Figure 3 : Effondrement du Pont Wilson

Les moyens mis en place

- le Plan Loire Grandeur Nature (PLGN)

Face aux bouleversements que subissent les milieux naturels de la Loire, il était nécessaire d'initier des actions de sauvegarde et de préservation du lit, de la ressource en eau et des espèces naturelles qui la composent. Ces actions s'inscrivent dans un programme plus vaste, le Plan Loire Grandeur Nature.

Le premier Plan Loire Grandeur Nature date de 1994, pour une durée initiale de 10 ans, et fut financé par l'Etat, l'Agence de l'eau et l'Epala (Etablissement Public d'Aménagement de la Loire et de ses Affluents aujourd'hui Etablissement Public Loire, EPL). Après un bilan à mi-parcours, des fonds seront débloqués pour mettre en place un programme pour la période 2000-2006. Actuellement nous sommes dans la troisième phase du Plan Loire 2007-2013.

L'objectif de ce Plan Loire est multiple :

- la sécurité des personnes face au risque inondation
- l'amélioration de la gestion de la ressource en eau et des espaces naturels et ruraux des vallées
- la mise en valeur du patrimoine naturel, paysager et culturel des vallées ligériennes
- assurer une excellence scientifique

Le volet « sécurité des personnes face au risque inondation » repose sur l'identification et l'aménagement des zones inondables (Atlas et Plan d'Intérêt Général), sur l'entretien du lit, sur les moyens d'alertes et d'annonces des crues, sur le renforcement et la sécurisation des digues.

Le volet « amélioration de la gestion de la ressource en eau » passe par le rehaussement de la ligne d'eau d'étiage afin de garantir l'alimentation des puits de captage.

La restauration « des espaces naturels et ruraux des vallées » nécessite la reconquête de l'espace de mobilité du lit de la Loire et de l'Allier et la restauration des annexes hydrauliques. Cette restauration hydraulique permet la préservation de la biodiversité de la faune et de la flore ligériennes qui sont menacées. Ce volet passe aussi par la gestion des milieux naturels des plaines alluviales.

Concernant la « mise en valeur du patrimoine naturel, paysager et culturel des vallées ligériennes », il s'agit de promouvoir le patrimoine historique (navigable) et les paysages du fleuve au sein du tourisme ligérien.

Le Plan Loire s'organise autour de six plate-formes, dont une transversale (estuaire), visant à répondre à ces objectifs :

- prévention des inondations
- ouvrages domaniaux de l'Etat et sécurité
- eau, espaces, espèces
- valorisation du patrimoine et développement durable
- recherche, données, information
- estuaire

- le SIEL

Afin de disposer d'éléments objectifs pour la programmation et le suivi des travaux de restauration, la DIREN Centre, en 1995, a mis en place un outil pour faire le suivi du lit de la Loire : le Système d'Information sur les Evolutions du Lit (SIEL).

Initialement développé pour la Loire moyenne, il a été étendu à des secteurs de la Loire amont, de l'Allier, du Cher, de la Vienne et de la Creuse.

L'objectif est multiple :

- favoriser l'observation de l'évolution du lit dans son corridor
- mesurer ses transformations
- définir et suivre les travaux de restauration du lit et leurs effets

Pour y parvenir, le SIEL acquiert, collecte, valorise et diffuse données et produits. Les données disponibles sont :

- les lignes d'eau (profils en long du fil d'eau)
- les bathymétries et les topographies du lit et des levées
- les prises de vues aériennes

La SIEL produit également deux types de cartes réalisées à partir des prises de vues aériennes :

- les cartes de végétation
- les cartes de morphologie

Le SIEL est initialement un outil principalement destiné aux gestionnaires du lit de la Loire mais dont l'accès est libre et qui constitue une référence solide utilisé dans différents domaines (recherche, gestion du territoire, étude du risque, tourisme, ...).

Le contexte de la sectorisation

La sectorisation d'un cours d'eau facilite le suivi en cherchant à établir objectivement une référence en terme de secteurs d'évolution homogène en prévision des travaux de son lit. Un premier découpage simple de la Loire est le suivant :

- la Loire amont : de la source au barrage de Villers, la « Loire des gorges » en amont et aval de la plaine du Forez
- la Loire bourguignonne : du barrage à la confluence avec l'Allier, fleuve de plaine peu endigué
- la Loire moyenne : de l'Allier à Ancenis environ (limite de l'effet de la marée), fleuve de plaine fortement endigué
- la Loire estuarienne

Notre étude se concentre sur la Loire moyenne depuis la confluence de l'Allier à la confluence avec la Maine.

La première sectorisation de la Loire moyenne émane du travail de J-R Malavoi et J-N Gautier, en 1997, dans le cadre de l'équipe pluridisciplinaire du Plan Loire Grandeur Nature. Leur travail s'appuie uniquement des informations générales du lit (géologie, pente, morphologie,...). Il en résulte une première sectorisation très descriptive servant d'approche et ouvrant des perspectives à des développements futurs.

Le travail fut repris, et la méthode complétée, par P. Ginestet sous la direction de J-N Gautier en 1999. Il a développé une méthode s'appuyant sur les mesures des géométries du lit, et les statistiques associées (largeur du lit, largeur des îles,...). Ce travail s'est conclu sur une tentative de prévision de l'évolution du lit de la Loire sur chacun des tronçons homogènes définis.

Sur les 150 années étudiées (1848-1993), des évolutions notables apparaissent. La bande de remaniement se réduit de 77cm/an en moyenne entre 1848 et 1955 et de 97cm/an entre 1955 et 1993. Cette accélération de la réduction de la bande active résulte de l'extraction des granulats et de l'affaissement, résultante, de la ligne d'eau. La largeur des îles tend à s'accroître sur la première période puis à décroître. La diminution, moyenne, de la largeur des îles doit être mise en relation avec le rattachement de certaines îles aux berges.

Notre travail consiste à reprendre et actualiser cette sectorisation à l'aide de données plus récentes (prise de vue aérienne de 2002), d'automatiser la prise de mesure et de comparer les prévisions de l'époque aux résultats actuels afin de conclure quant à la pertinence de la méthodologie développée par P. Ginestet et la concrétisation de ses prévisions.

Par ailleurs, ce stage s'inscrit dans le cadre du travail de thèse d'A. Latapie développé par le Cemagref en collaboration avec l'université de Tours et EDF portant sur la modélisation de l'évolution morphologique de la Loire. La sectorisation en tronçon homogène est un point clé de ce travail pour la définition de paramètres semi-globaux utilisés dans le modèle.

Méthodologie

Le travail de P.Ginestet

L'étude s'est appuyée sur la mesure des formes géométriques du lit (bande de remaniement, largeur des îles), de la pente, sur les lignes d'eau et la géologie. Pour chaque année étudiée (1848, 1955, 1969, 1984, 1993), il a digitalisé les contours du fleuve et échantillonné tous les 500m pour obtenir les dimensions du lit. Ce travail lui a permis de définir des secteurs homogènes qui a abouti à une sectorisation. De là, il a été en mesure de découper la Loire moyenne en 4 unités et 12 tronçons divisés eux-mêmes en sous-tronçons.

Les données disponibles

Grâce aux campagnes de prises de vues aériennes, la DESI réalise des cartes de végétations qui, elles-mêmes, servent de base aux cartes de morphologie. Ces atlas vont servir de base de travail aux mesures sur les transects et sont directement importables sous ArcGis.

La réalisation de ces cartes se fait en deux temps. Dans un premier temps, il s'agit de réaliser les cartes de végétations à partir des photos aériennes (réalisées de préférence à l'étiage) selon la typologie Cornier. Cette typologie est issue d'un travail de thèse de 1998 et s'appuie sur la végétation caractéristique de la flore ligérienne. Suite à la photo-interprétation, les cartes sont vérifiées et corrigées lors d'une phase terrain afin de limiter au maximum le risque d'erreur sur les typologies. Les cartes de végétation couvrent toute la Loire moyenne à l'exception du secteur de Blois. Du bec d'Allier à la centrale de Saint Laurent Nouan, les cartes reposent sur la prise de vue aérienne de 2002, de Muides à Mosnes sur celle de 2000 et pour le reste du linéaire sur celle de 1999.

Dans un second temps, les prises de vues aériennes sont retravaillées à l'aide des cartes de végétations pour produire les cartes de morphologies qui, de la même manière, sont associées à une campagne terrain. Ces cartes en sont à leur première réalisation et devraient, à terme, être mise à jour régulièrement suivant les campagnes de prise de vue aérienne (le premier secteur couvert par deux cartographies sera disponible en 2009). Pour le moment, les cartes de

morphologie couvrent le secteur du bec d'Allier à la centrale de Saint Laurent Nouan sur la base de la prise de vue aérienne de 2002.

Par ailleurs, nous avons aussi travaillé directement sur le traitement des photos à l'aide d'ERDAS sur un tronçon dépourvu de cartes. En effet, la zone comprise autour de Blois, sur une dizaine de kilomètre, n'a pas été traduite sous forme de cartes. Cette absence semble due à une erreur lors de la définition des photos à traiter.

Les autres sources de données sont la carte de l'épaisseur d'alluvions du BRGM issu d'une étude sur les karsts de la Loire et les profils Crougneau du lit de la Loire qui sont des profils en travers sur toute la Loire moyenne réalisés en 1995.

Adaptation et complément de la méthode de P.Ginestet

L'ensemble de ces données a été analysé principalement grâce à l'utilisation d'un logiciel de SIG, ArcGis 9, pour automatiser la prise de mesures. Ces mesures ont par la suite étaient traités sous Excel. Par ailleurs, nous avons été dans la nécessité d'utiliser en amont d'ArcGis, un logiciel de traitement de photographies aériennes, ERDAS, pour obtenir une couche SIG de morphologie de la zone non cartographiée de Blois.

1°) Les transects

Afin de pouvoir comparer les données issues du travail de P.Ginestet avec notre travail, il était nécessaire de reprendre la même base d'étude.

Le travail ayant été réalisé sur le logiciel Autocad, les fichiers ont été importés sous ArcGis et retraités. La base de la méthode repose sur les mesures des géométries tous les 500m, et il n'existait pas de fichier unique localisant exactement les transects sur tout le linéaire. Ce fichier a dû être recréé et retravaillé pour résoudre les problèmes de géoréférencement ou de digitalisation.

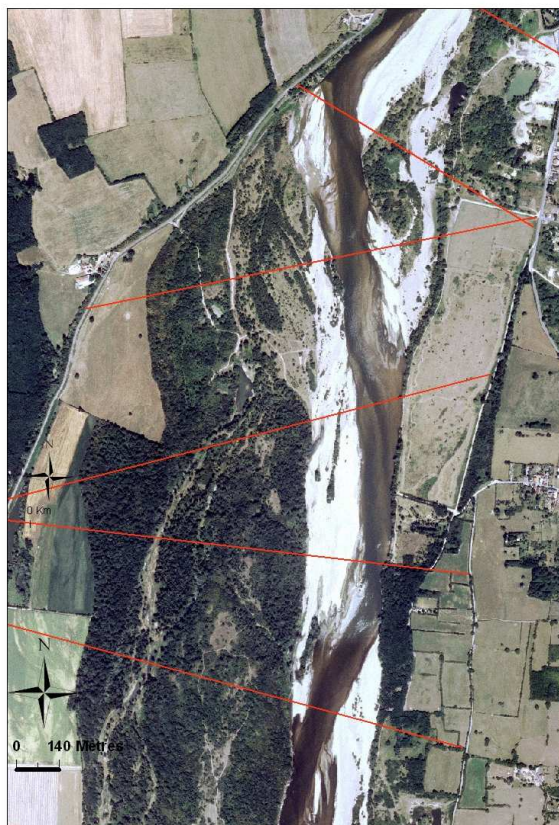


Figure 4 : Zoom sur les transects (en rouge)

Le fichier obtenu a été confronté aux mesures réalisées par P.Ginestet qui ont permis de valider la position des transects. Sur les tests réalisés sur différents secteurs, la différence de mesure reste inférieure à 5m par transect, ce qui est tout à fait acceptable au regard des dimensions du lit généralement supérieur à 200m.

Ce travail a été complété par la localisation exacte des transects sur le linéaire de la Loire selon les PK Carthage. Le PK (point kilométrique) carthage est la norme actuelle du linéaire des cours d'eau. Il se base sur l'écoulement dans le lit principal du cours d'eau et non pas la médiane du lit majeur comme c'est le cas avec d'autres références. (voir graph)

Tout cela a permis de recréer un fichier localisant l'ensemble des sections sur le linéaire étudié afin de permettre l'automatisation des mesures.

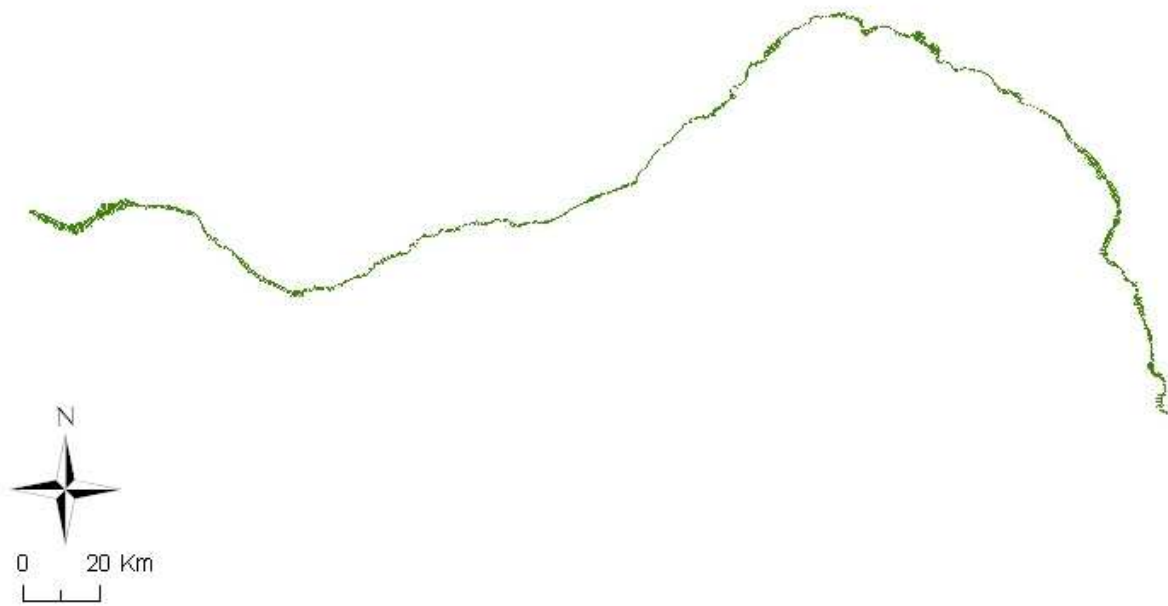
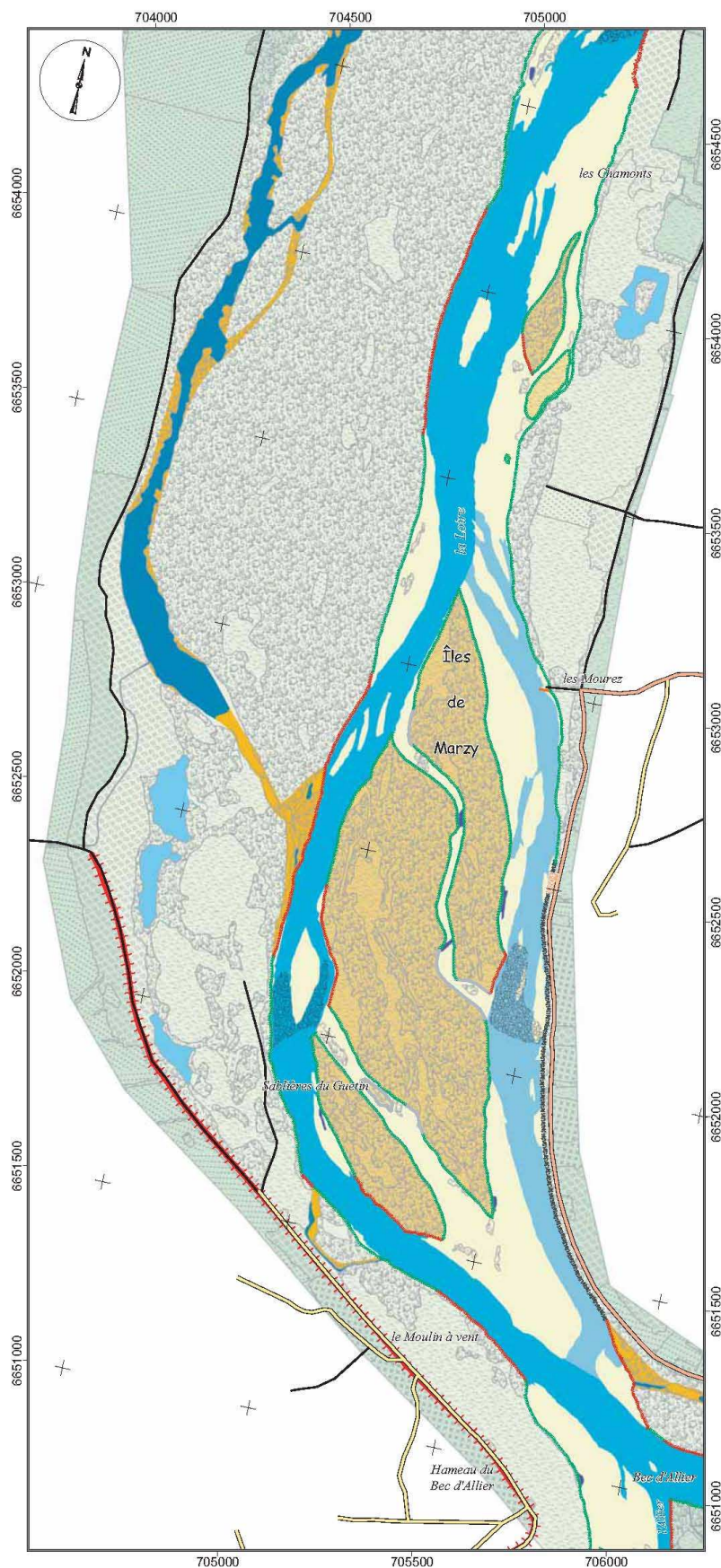


Figure 5 : Les transects de la Loire

2°) Les cartes de morphologie

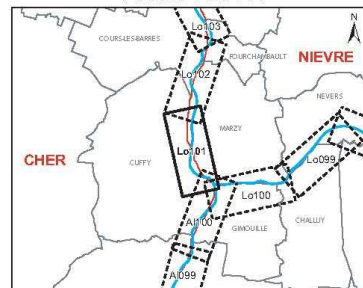
La méthode développée par P.Ginestet repose sur deux mesures du lit : la bande de remaniement (le lit actif c'est à dire, l'eau et les bancs de sables) et les îles. Ces deux typologies correspondent à l'enveloppe hydraulique.

Pour réaliser ces mesures, nous nous sommes appuyés sur les cartes de morphologies du SIEL existantes entre le bec d'Allier et la centrale de Saint Laurent.



Îles de Marzy

Le lit de la Loire en 2002
Feuille : Lo101



Echelle 1/10 000

0 50 100 200 300 400 500 m

Données extraites de la carte de végétation et de la mosaïque aérienne de juillet 2002 et complétée sur le terrain d'octobre 2004 à mars 2005 par le groupement SCOT / RIVE. Cartographie effectuée par la DIREN Centre selon la typologie de morphologie fluviale.

Projection française Lambert 93 (RGF93)

Source : Service de Bassin Loire-Bretagne - DIREN Centre
5 av Buffon B.P. 6407 45064 ORLEANS CEDEX 2



©DIREN Centre-2005. Toute reproduction ou adaptation interdite
ISBN : 2-11-095675-5

Unités Hydromorphologiques	Voies de communication
canal d'étiage du bras principal	autoroute
canal d'étiage du bras secondaire	nationale
canal déconnecté	départementale
boire	route secondaire
rivière et canal	chemin
gravière	chemin de fer
grève ou banc de sable	pont canal
bras mort	route en construction
île en formation	
île ancienne	
terrasse alluviale récente	
terrasse alluviale ancienne	

Seuils

seuil alluvionnaire

Ouvrages

épi de protection

levée

Berges

berge naturelle érodée

berge naturelle

berge protégée érodée

berge protégée

berge peu marquée

Couverture végétale

végétations aquatiques et semi-aquatiques

végétations herbacées pionnières typiques du lit mineur

végétations herbacées, landes et friches à l'écart du lit mineur

forêt alluviale

autres forêts et boisements

cultures

espaces anthropiques

Ce secteur se situe en aval de la confluence avec l'Allier.

Ce secteur est encore très actif avec la présence d'îles très importantes (îles de Marzy) quant à leur taille et à la surface occupée dans l'ensemble du lit. Ces îles sont aujourd'hui presque entièrement boisées. On ne rencontre sur ce site peu ou pas d'activités anthropiques hormis les anciens sites d'extraction (sablères du Guétin). Un grand bras mort est présent en rive gauche à plus de 400 mètres du bras principal.

Figure 6 : Carte de morphologie, secteur du bec d'Allier (DIREN Centre)

A partir de ces cartes, nous avons identifié les typologies correspondantes au lit de la Loire. Ces typologies correspondent exactement au lit morphogène et aux îles qui le composent. Les typologies retenues, pour la bande de remaniement, des cartes de morphologie sont les suivantes :

- chenal d'étéage du bras principal
- chenal d'étéage du bras secondaire
- chenal déconnecté
- grève ou banc de sable
- banc mobile
- atterrissement derrière ouvrage

Et pour les îles :

- île en formation
- île ancienne

Après choix des typologies retenues, un travail de nettoyage de la couche obtenue a été réalisé afin de supprimer les quelques zones à l'écart du lit actif. Concernant les atterrissements, il a été nécessaire de redessiner les contours afin de bien séparer les zones sableuses des zones végétalisées. Ce travail nous a permis d'obtenir une couche parfaitement propre sur laquelle nous avons pu extraire de manière automatique les longueurs des géométries du lit.

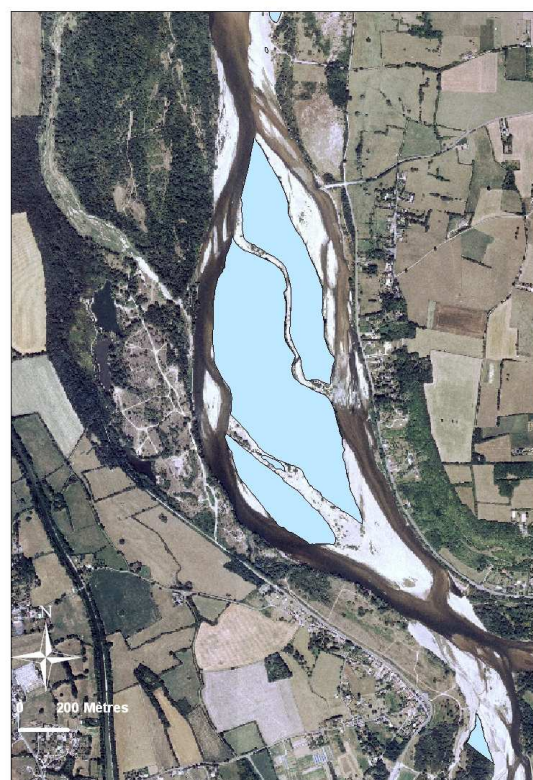
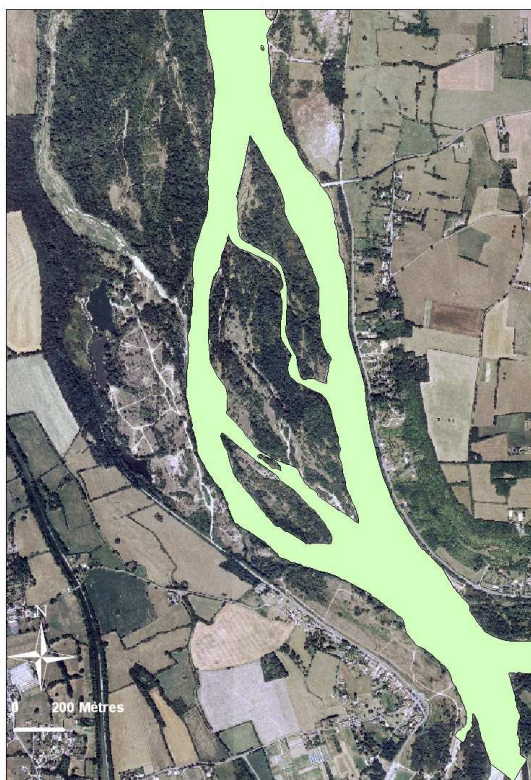
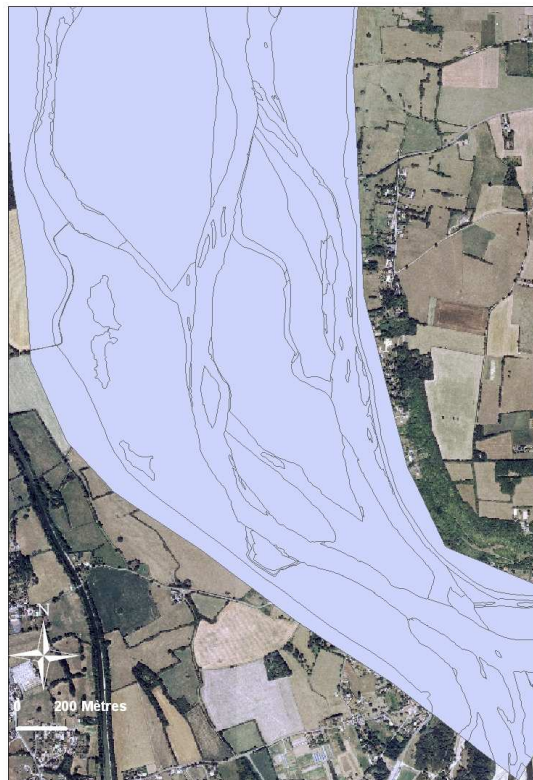
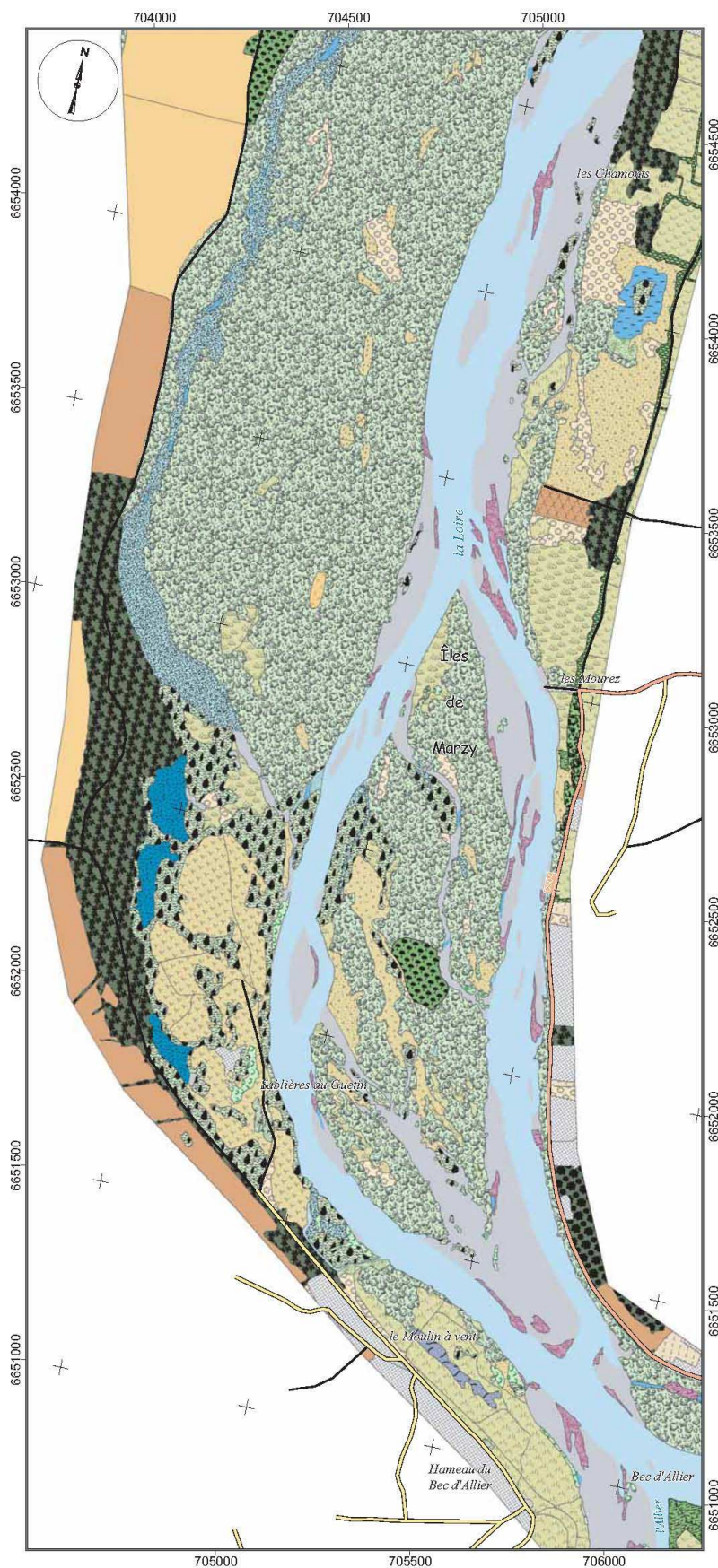


Figure 7 : Détail sur l'extraction à partir des cartes de morphologies - en haut à gauche, prise de vue aérienne du bec d'Allier - en haut à droite, la couche morphologie des cartes du SIEL - en bas à gauche, extraction du lit - en bas à droite, extraction des îles

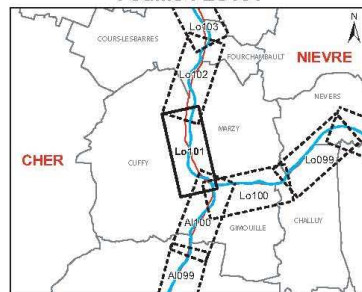
3°) Les cartes de végétations

Il n'existe pas encore de carte de morphologies pour le reste du linéaire de la Loire, nous avons donc cherché à travailler à partir des cartes de végétations. De la même manière que pour les cartes de morphologies nous avons tâché d'identifier les typologies correspondantes au lit actif.

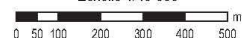


Îles de Marzy

Le lit de la Loire en 2002 Feuille : Lo101



Echelle 1/10 000



Données extraites de la mosaïque aérienne de juillet 2002 par photo-interprétation et complétée sur le terrain d'août à octobre 2003 par l'Inventaire Forestier National. Cartographie effectuée par la DIREN Centre selon la typologie simplifiée de la végétation (T.Comier 1998). Projection française Lambert 93 (RGF93). Source : Service de Bassin Loire-Bretagne - DIREN Centre 5 av Buffon B.P. 6407 45064 ORLEANS CEDEX 2



©DIREN Centre-2005. Toute reproduction ou adaptation interdite
ISBN : 2-11-095675-5

Hydrographie		Voies de communication	
sable		autoroute	
eau courante		nationale	
eau stagnante		départementale	
plans d'eau naturels		route secondaire	
plans d'eau artificiels		chemin	
gravières		chemin de fer	
		pont canal	
		route en construction	
Végétations aquatiques et semi-aquatiques			
communautés d'hélophytes, mégaphorbiaies hygrophiles			
phalaridies			
Végétations herbacées pionnières typiques du lit mineur			
communauté pionnière des sables humides (Chenopodium rubi)			
communautés de basses vaseuses du lit mineur (Bidenton tripartite)			
végétations pionnières alluviales des sables secs du lit mineur			
Végétations herbacées à l'écart du lit mineur			
communautés hygrophiles du lit majeur			
prairies mésophiles et mésoxérophiles du lit majeur			
prairies mésophiles pâturées du lit majeur			
prairies à chiendents dominants			
pelouses et autres communautés xérophiles à mésophiles du lit majeur			
pelouses à Sedum sp. plur. dominants			
pelouses à Corynephorus caescens P.Beauv.			
autres friches herbacées			
fuitées			
Forêts alluviales			
saules arbustives			
saules peupliers arbustives			
saules à Salix alba			
saules peupliers arborescentes			
saules peupliers à Populus nigra L.			
forêts de bois tendres colonisés par les bois durs			
peuplements de substitution à grandes renouées exotiques			
forêts de bois durs			
frênaies, ormaies à Fraxinus et Ulmus			
haies bocagères mixtes			
chênaies alluviales à Quercus robur			
Autres forêts et boisements			
forêts naturelles			
robineraies			
Cultures		Espaces rudéraux	
jardins		espaces anthropisés	
grandes cultures			
autres cultures			
surfaces agricoles non cultivées			
jachères			

Figure 8 : Carte de végétation, secteur du bec d'Allier (DIREN Centre)

Pour aboutir à une première sélection des typologies, nous avons travaillé en plusieurs étapes :

- application du masque bande de remaniement, issu du travail sur les cartes de morphologie, sur la partie commune (bec d'Allier - central de Saint Laurent Nouan) afin d'extraire les typologies de végétations intersectant la bande de remaniement
- étude des surfaces totales des typologies (sur la couche initiale complète et sur la zone obtenue correspondante à la bande de remaniement) ➔ suppression des typologies ne correspondant pas au lit mais qui intersectaient les bords du masque: par exemple « prairies » ou « forêts de bois dur »
- analyse des caractéristiques propres aux typologies dont la surface des polygones dans la bande de remaniement est proche de 50% de leur surface totale afin de supprimer celles qui ne correspondaient pas au lit morphogène
- après nettoyage de la couche obtenue, comparaison des largeurs du lit obtenues à celles issues de la carte de morphologie. ➔ Le résultat indique une marge d'erreur de l'ordre de 5%. Cette marge d'erreur est tout à fait convenable pour notre étude.

Les typologies des cartes de végétation retenues, pour le lit, sont les suivantes :

Tableau 1: Typologies retenues pour la couche végétation - Le nombre total de polygones est celui contenue dans la couche végétation - Le nombre final de polygones dans la bande de remaniement (BR) représente ceux qui intersectent le masque lit issu de la couche morphologie

Code typologique	Nom	Nombre total de polygones	Nombre final de polygones dans la BR	Ecart	% de la surface total dans le lit
0100	Sable	1615	1551	64	98
0210	Eau courante	89	57	32	98
0220	Eau stagnante	225	208	17	94
1110	Peuplement algaux	3	2	1	43
1140	Autres communautés aquatiques	5	3	2	56
1200	Hélophytes, mégaphorbiaies, hygrophiles	331	242	89	44
1230	Magnocaricaies	195	158	37	70
1241	Herbiers de jussie	3	2	1	95
2000	Herbacés pionnières typiques lit mineur	91	71	20	76
2100	Communautés pionnières des vases humides	18	16	2	88
2200	Communautés pionnières des sables humides	391	387	4	98
2300	Communautés de basses vaseuses du lit	69	50	19	63
2500	Comm. pionnières alluviales des sables secs du lit mineur	128	108	20	82
4110	Saulaies arbustives	249	199	50	55
4112	Saulaies arbustives à salix purpurea	5	5	0	100
4120	Saulaies peupleraies arbustives	670	574	96	55

Ce tableau permet de comprendre le travail sur les surfaces. La colonne « écart » indique le nombre de polygone exclu du masque bande de remaniement. Il est intéressant de constater l'absence de linéarité entre le nombre de polygones et la surface qu'il représente. Par exemple, 27% des polygones hélophytes (ceux qui ne sont pas dans le lit), représente 56% de la surface totale. Ce type de végétation doit être inclus dans le choix de typologie car il représente une surface non négligeable du lit, mais la plus grande partie de ce type de

végétation se situe en dehors du lit. Il faut donc supprimer manuellement ces polygones, c'est le nettoyage de la couche dont je parle ci-dessus.



Figure 9 : Détail sur l'extraction à partir des cartes de végétations - à gauche, la couche végétation des cartes du SIEL, à droite, le résultat de la sélection (en vert la couche définitive, en rouge, les polygones supprimés manuellement)

Pour obtenir les dimensions des îles, le problème fut résolu différemment. Les îles étant toutes végétalisées différemment et à différents stades (forêt de bois tendre, forêt de bois dur, ...), il n'existe pas de typologie commune et unique pour les îles au regard de la végétation des berges. Leur largeur a donc été obtenue indirectement par mesure des lacunes laissées par les typologies formant le lit mineur actif. Les espaces vides représentant les îles, nous avons utilisé un outil gratuit ETGeoTools pour les combler et en extraire leur dimension.

4°) La photo-interprétation

Comme nous l'avons dit précédemment, il existe une zone autour de Blois pour laquelle il n'existe ni carte de végétation ni carte de morphologie. Pour palier cette absence, nous avons réalisé une interprétation semi-automatique des photos aériennes.

Le traitement photo a été réalisé à partir d'Erdas. Le protocole pour extraire les zones sableuses et les zones homogènes (l'eau dans notre cas) avait déjà été réalisé dans le cadre de l'équipe pluridisciplinaire d'assistance aux maîtres d'ouvrage (Lauriol, 1998).

Les images couleurs sont utilisées ici. Elles sont composées de trois canaux de couleur (rouge, vert, bleu). Les traitements réalisés reposent sur la recherche d'homogénéité ou

d'hétérogénéité entre les valeurs de couleur décrivant les entités spatiales (banc de sable, eau, végétation)

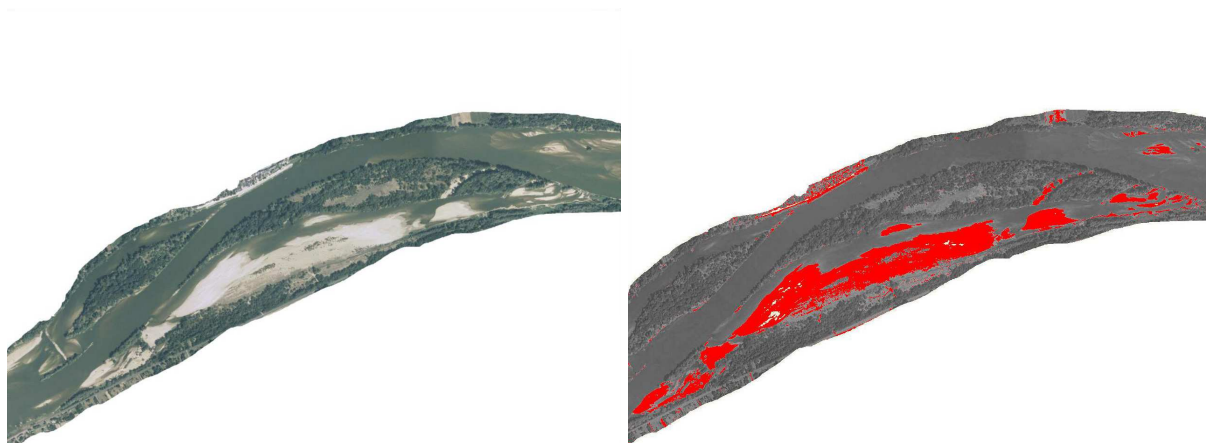


Figure 10 : Détail sur la photo-interprétation - à gauche, la vue initiale, à droite, le résultat du travail sur les zones sableuses

5°) Le rapport d'aspect

Afin d'essayer de caractériser la forme du lit et avoir une idée de la chenalisation ou du tressage de la Loire, nous avons essayé de travailler à partir de profils en travers. Sur ces profils apparaît la hauteur d'eau. Il est donc possible de calculer le rapport d'aspect (Ra). Le rapport d'aspect est défini par le rapport entre la largeur (W) de l'écoulement sur sa hauteur (D).

$$Ra = \frac{W}{D}$$

Ce paramètre est implicitement relié au régime de la rivière. Une rivière en tresse est une rivière fortement dynamique. L'écoulement est multiple et variable sur une faible échelle de temps. La hauteur de l'écoulement est faible et la largeur est importante. La valeur Ra va donc être très grande. A l'inverse, une rivière chenalisée est dynamiquement lente. La hauteur de l'écoulement est grande au regard de sa largeur (la Seine par exemple). Ce type d'écoulement va se caractériser par un faible Ra.

Dans le cas de notre étude, et en considérant des profils dont la ligne d'eau n'est pas influencée par des ouvrages, il est envisageable de caractériser le degré de chenalisation de la Loire et d'utiliser ce critère pour la sectorisation. Seulement, pour pouvoir exploiter ce critère, il est nécessaire que le débit de la Loire soit constant, or ce n'est malheureusement pas le cas sur les données utilisées.

En effet, la dernière campagne bathymétrie de grande ampleur sur la Loire moyenne est celle réalisée par le cabinet Crougneau pour le compte de la DIREN Centre en 1995. Cette campagne a débuté à la fin du mois d'août 1995 et dès le 12 septembre, le débit a augmenté de façon non négligeable. Cette variation du niveau d'eau empêche le travail sur ce critère qui nécessite un état d'équilibre hydraulique.

Pour contourner le problème, nous avons travaillé sur le modèle numérique de la Loire moyenne. Il s'agit du modèle Loire moyenne développé par Hydratec pour l'étude de la

propagation des crues fortes à très fortes en Loire moyenne... Nous avons considéré des débits de 1500 et 2000 m³/s, proche du débit de plein bord. En sortie du modèle, nous récupérons la largeur au miroir (L) et la section mouillée (S). Nous en déduisons donc le rapport d'aspect.

$$Ra = \frac{L^2}{S}$$

6°) Les flèches d'érosion

La méthode dite des flèches d'érosion permet de classer le dynamisme d'une rivière au regard de sa capacité d'érosion dans les zones actives. Il s'agit de regarder l'évolution d'un méandre et de mesurer la variabilité de celui-ci. Le taux d'érosion va donc être le paramètre discriminant de l'activité morphogène du cours d'eau.

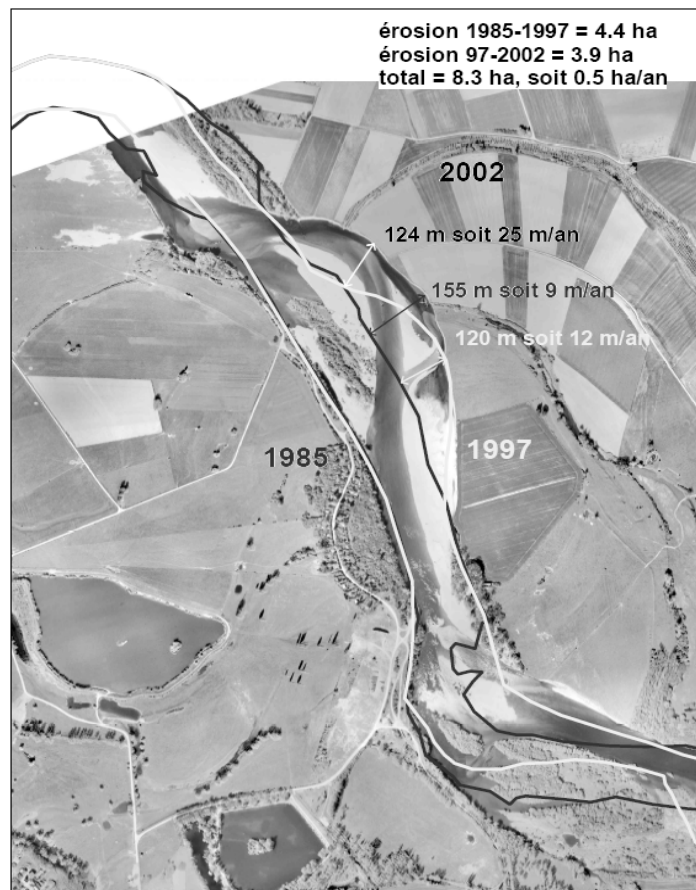


Figure 11 : Exemple du travail sur les flèches d'érosion (d'après Malavoi, 2002, non publié)

7°) Le potentiel érodable

Dernière hypothèse de travail, la capacité d'érodabilité de la Loire. Le lit de la Loire a subi les fortes extractions de granulat et le lit s'est enfoncé par érosion pour atteindre parfois le substratum.

Lors d'une campagne sur les karsts de la Loire, le BRGM a réalisé une carte de l'épaisseur d'alluvions. L'épaisseur d'alluvions du lit nous donne une indication concernant les zones où

la Loire ne pourra plus s'inciser et les zones pour lesquelles le lit peut encore puiser dans son stock alluvionnaire. Ces secteurs vont contraindre les tendances d'évolutions.

Sectorisation

Résultats des différents traitements

- La photo-interprétation

Afin de valider la méthode, nous avons comparé les résultats obtenus à partir des atlas de morphologie et à partir de la photo-interprétation. Le résultat s'est avéré mitigé. Pour les zones ne présentant pas de banc de sable le traitement offre un très bon résultat. La méthode de photo-interprétation employée ici est très efficace lorsque l'image offre un fort contraste (eau de couleur homogène offrant un fort contraste avec les terres agricoles ou les villes bordant le fleuve). L'erreur moyenne est de 4m pour une largeur du lit variant de 235 à 320m sur un secteur situé en amont de Meung sur Loire.

Pour les zones sableuses le résultat n'est pas probant. En effet, le traitement appliqué ne permet pas de faire ressortir les zones sableuses recouvertes d'une faible hauteur d'eau. Le travail se basant sur les contrastes de couleurs, il a été impossible d'extraire ces zones en utilisant le protocole fourni. La différence de largeur du lit morphogène, au bec d'Allier, est de l'ordre de 85m pour un lit variant de 240 à 450m! Cette erreur est bien trop grande pour valider la méthode.

L'extraction de l'eau par une méthode permettant d'extraire les zones homogènes est parfaite. L'extraction des zones sableuses émergées l'est aussi grâce au fort contraste avec l'eau (zone très claire sur fond opaque). Par contre, ces zones mixtes de sédiment sous faible hauteur d'eau, ni homogène, ni contrasté posent problème. Il est fort probable qu'il soit possible de faire ressortir ces zones à l'aide du logiciel en appliquant un traitement différent mais cela n'a pu être fait faute de temps. Cette absence de traitement ne pose pas de problème car cette zone devrait être couverte par une carte de morphologie à court terme.

En conclusion sur ce secteur, les mesures furent prises manuellement.

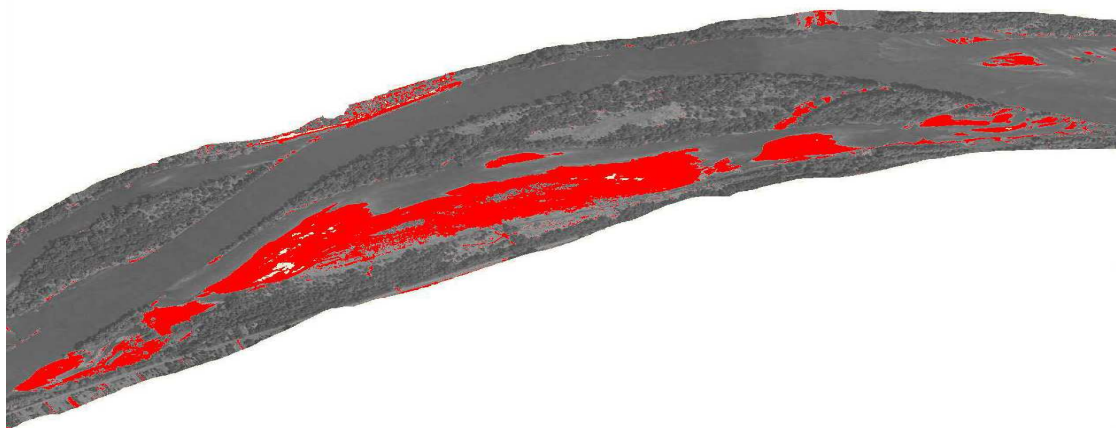


Figure 12 : Résultats du travail sur les zones sableuses, les tâches blanches représentent des zones sableuses non prises en compte

- Les flèches d'érosion

Nous avons comparé le lit de 2002 aux photos de 1955 et dans le cas de la Loire moyenne, cette méthode ne peut s'appliquer. En effet, les variations du lit sont de l'ordre du rétrécissement et non pas de la méandricité. Le lit semble stabilisé depuis longtemps et le tracé en plan n'évolue pas.

Paramètres de la sectorisation

La sectorisation se fait à plusieurs échelles, du général (géologie) au particulier (faciès d'écoulement). Dans le cas d'un grand fleuve tel que la Loire, le travail se limite à des secteurs de quelques kilomètres.

Par ordre décroissant, voici les différentes entités présentes dans notre travail :

Secteur
Unité
Tronçon
Sous-tronçon

Les paramètres discriminants entre chaque entité sont décrits dans le tableau suivant (Ginestet, 1999)

Entité Paramètre	SECTEUR	UNITE	TRONCON	SOUS-TRONCON
Géologie	X	X		
Confluence vallée		X	X	
Pente vallée		X	X	
Largeur vallée		X	X	
Hydrologie		X	X	X
Orientation vallée			X	X
Largeur lit majeur endigué			X	X
Bande de remaniement			X	X
Nombre de chenaux			X	X
Largeur totale des îles			X	X
Largeur enveloppe hydraulique			X	X
Anthropisation				X
Sinuosité				X
Pente lit mineur				X

Comme nous l'avons dit précédemment, la Loire se décompose en 4 secteurs (Loire amont, Loire bourguignonne, Loire moyenne, Loire estuarienne). Notre étude se porte uniquement sur la Loire moyenne du bec d'Allier au bec du Maine (qui n'est pas la limite exacte aval de ce secteur).

Résultats

Le résultat de la sectorisation est globalement la même que celle définie par P.Ginestet. S'appuyant à la fois sur l'hydrologie, la géologie et la pente du lit, les tronçons et sous tronçons seront peu modifiés. Les quelques redécoupages seront issus du travail sur les grandeurs du lit et ne sont valables que pour la période étudiée. Pour chaque secteur, nous en décrirons les caractéristiques propres et nous comparerons avec les prévisions, à court terme, de P.Ginestet. Ces prévisions concernent à la fois les paramètres morphologiques mais aussi la ligne d'eau.

Nous ne comparerons ici que les tendances d'évolution du lit du point de vue géomorphologique sur les secteurs définis par P.Ginestet, et non pas sur la sectorisation de cette année. Les conclusions sur les tendances concernent bien la sectorisation initiale même si elles prennent place dans des secteurs corrigés pour 2002.

La définition des 4 unités par P.Ginestet et J-R.Malavoi n'est pas remise en question. Elle s'appuie sur la géologie du bassin et sur les apports hydrauliques. Chaque description d'unité est reprise du rapport précédent (Ginestet, 1999) :

- **Unité 1 : Bec d'Allier – Bonny-sur-Loire**

L'unité 1 est constituée par la première traversée des tables calcaires du sud de la LOIRE.

A Nevers, la LOIRE abandonne son tracé sud-est/nord ouest adopté sensiblement depuis son arrivée dans le grand bassin tectonique en aval d'Iguerande. Elle s'aligne ensuite globalement sud/nord jusqu'à Cosne, puis de nouveau sud-est/nord -ouest jusqu'à Bonny/Loire, sur les lignes de faille de la tectonique méridienne qui prolongent vers le bassin parisien les Limagnes auvergnates et bourbonnaises.

Le val de Loire se déroule dans un graben (fossé tectonique) traversant par deux fois les séries calcaires du bassin parisien méridional (jurassique et crétacé).

Ce graben se poursuit vers le nord au droit de Briare, drainé notamment par le Loing (il a sans doute guidé une pré-Loire éocène qui rejoignait la Seine par le Loing).

La limite amont se situe au droit de la confluence de la Loire avec l'Allier. Les débits venus de l'Allier sont du même ordre de grandeur que ceux de la Loire amont (notons que les surfaces des bassins versants sont du même ordre de grandeur). [...]

Tronçon 1 : Bec d'Allier – Tracy-sur-Loire/Bois Gibault

Sur ce tronçon, la Loire s'écoule entre le coteau et une levée. L'espace de divagation de la Loire est importante. La limite aval de ce tronçon est relocalisée en amont de la limite définie par Ginestet (initialement à Saint-Satur) au regard des paramètres morphologiques.

Sous tronçon 1 : Bec d'Allier – Cours-les-barres Les Grevées

Ce secteur correspond à la confluence entre l'Allier et la Loire. Le régime hydrologique de la Loire double et l'apport de sédiment est important. La pente de la vallée est forte (0.58/°°).

Résultante de ce double apport, la Loire progresse en moyenne sur 2.3 chenaux et la bande active est de 305m pour une largeur d'îles de 105m.

P.Ginestet termine ce sous-tronçon à Marseilles-les-Aubigny *Soulangy* à 2km en aval. Les prévisions sont à la chenalisation et au rattachement des îles Marzy à la rive droite.

→ Effectivement, le lit se rétrécit. Entre 1993 et 2002, la bande de remaniement perd 30m et dans le même temps, les îles s'élargissent (+10m) traduisant la végétalisation des bancs de sables. Concernant le rattachement des îles en rive droite, la tendance actuelle évoque la réunification des trois îles. L'écoulement se fait davantage en rive gauche mais la déconnexion du bras droit ne sera pas effective à court terme.

Sous tronçon 2 : Cours-les-barres *Les Grevées* – La Charité-sur-Loire *Voluray*

Ce tronçon correspond au passage autour du verrou du relief de Marseille-les-Aubigny et à l'arrivée de la Loire dans la plaine de la Charité-sur-Loire. La pente y est plus faible que précédemment ($0.46^{\circ}/^{\circ}$). La dynamique morphologique est la même à l'exception de la largeur des îles qui tendent à se rétrécir (70m).

La limite aval du secteur était initialement 3km plus loin, à la Charité centre. Les prévisions concernent juste une faible évolution des paramètres.

→ Cette prévision était compréhensible au regard de l'évolution entre 1984 et 1993 de toute les largeurs du lit puisque la variation était inférieure à 5m. Entre 1993 et 2002, la bande de remaniement a diminué de 45m. La raison semble provenir de l'apparition de nombreux bras morts en rive gauche.

Sous tronçon 3 : La Charité-sur-Loire *Voluray* – Pouilly-sur-Loire *Charenton*

Sur ce tronçon relativement rectiligne, la pente continue de décroître ($0.36^{\circ}/^{\circ}$). La morphologie du lit change fortement. La bande de remaniement augmente, passant en moyenne de 310m à 355m. Le nombre moyen de chenaux augmentent également, 2.7, tout comme la largeur des îles qui fait plus que doubler, 180m en moyenne. L'enveloppe hydraulique passe de 375m à 530m en moyenne.

La limite aval est identique à la sectorisation de P.Ginestet. Il prévoit ici la même tendance que dans le secteur précédant, à savoir une faible évolution des paramètres.

→ Pareillement au secteur précédent, la bande de remaniement s'est rétrécit (-30m en 9ans). Il est intéressant ici de constater l'évolution de la largeur des îles depuis le XIXème siècle. 30m en 1848, 145m en 1955, 150m en 1969, 175m en 1984, 183 en 1993 et 181 en 2002. Sur ce secteur, le lit s'est fortement végétalisé parvenant à l'apparition d'îles pérennes. Cette végétalisation semble stabilisé pour le moment mais le lit semble se chenaliser de manière importante (-100m en 50ans).

Sous tronçon 4 : Pouilly-sur-Loire *Charenton* – Tracy-sur-Loire *Bois Gibault*

Dernier tronçon de ce secteur, la vallée se réduit régulièrement, 4000m à Pouilly pour 1000m à Tracy. La pente augmente fortement ($0.68^{\circ}/^{\circ}$). La bande de remaniement reste stable tout comme le nombre de chenaux mais la largeur des îles se réduit (115m.)

La limite aval est avancée de 5km. Initialement, le secteur s'arrêtait à St Satur.

La tendance prévue est la même après une faible évolution en 1969 et 1993 (-30m de lit actif, +10m de largeur d'îles sur la période).

→ Entre 1993 et 2002, le phénomène de chenalisation s'est accru. La bande active s'est réduite de 25m en 9ans et la largeur des îles s'est également réduite (-10m). L'explication est la même, l'apparition de bras morts, ici en rive droite.

Tronçon 2 : Tracy-sur-Loire/Bois Gibault – Bonny-sur-Loire

Ce tronçon se caractérise par le passage autour du verrou sancerrois. La vallée conserve des paramètres proches du secteur précédent.

Sous tronçon 1 : Tracy-sur-Loire Bois Gibault – Villechaud Les Courlus

Ce premier tronçon correspond au passage autour du verrou sancerrois. Le cours de la Loire passe d'une orientation sud-est/nord-ouest à une orientation sud-ouest/nord-est. L'enveloppe hydraulique reste à peu près constante par rapport au tronçon précédent mais la bande active se réduit fortement (350m → 300m) tandis que les îles s'élargissent (140m). Le nombre de chenaux diminue légèrement (2.6 → 2.3).

Par rapport à P.Ginestet, la limite est située 7km en amont. Entre St Satur et Cosne-sur-Loire, les prévisions sont identiques aux secteurs amonts.

→ Entre 1993 et 2002, la réduction de la bande de remaniement s'est réduite à la même vitesse (environ -10m en 10 ans). Par contre, les îles se sont largement pérennisées puisque la largeur moyenne passe de 205 à 235m de largeur moyenne. Pour la première fois depuis le bec d'Allier, la largeur de l'enveloppe hydraulique s'est accrue, pour se situer entre les valeurs de 1984 et de 1993.

Sous tronçon 2 : Villechaud Les Courlus – La Celle sur Loire Le Grand Sauloy

Ce secteur correspond à l'orientation sud-ouest/nord-est de la Loire et se termine par la réorientation sud-est/nord-ouest. On observe la présence de nombreuses grandes îles (largeur moyenne de 315m) fortement végétalisées qui tendent à se rattacher à la berge en rive gauche. La Loire divague peu et semble se chenaliser en rive droite. La bande de remaniement diminue encore (260m) alors que le nombre de chenaux redevient identique à ce qu'il était avant le passage du verrou sancerrois (2.7).

Le secteur initial s'étend de Cosne-sur-Loire à Neuvy-sur-Loire. La prévision fait état d'une diminution du nombre de chenaux.

→ Notre résultat est inverse puisque le nombre de chenaux moyen a légèrement augmenté passant de 2 à 2.1 en moyenne. Cette légère augmentation est à mettre en relation avec la largeur des îles qui augmentent une nouvelle fois alors que la bande de remaniement continue de se rétrécir. La balance des deux est ici équivalente puisque la largeur de l'enveloppe hydraulique est stable.

Sous tronçon 3 : La Celle sur Loire Le Grand Sauloy – Bonny-sur-Loire

Ce secteur se caractérise par la présence du seuil de la centrale de Belleville. Celui-ci influence le régime hydro-sédimentaire mais le secteur reste relativement homogène. Hormis cette influence anthropique sur l'écoulement, le lit actif s'élargit légèrement en opposition avec la largeur des îles qui se réduit fortement (70m en moyenne) qui s'accompagne d'une

réduction du nombre de chenaux (1.8). L'enveloppe hydraulique se réduit de l'ordre de 200m par rapport au tronçon précédent.

Dernier secteur de l'unité 1, les prévisions sont : dynamique stable et augmentation du nombre de chenaux en aval du seuil de la centrale.

→ Sur ce secteur, la largeur moyenne des îles est stable mais la réduction de la bande active s'accompagne aussi d'une réduction du nombre de bras.

- **Unité 2 : Bonny-sur-Loire – Bec de Beuvron**

De Bonny/Loire à Blois-confluence du Beuvron, la LOIRE traverse une seconde unité géologique et géomorphologique constituée des épandages sablo-argileux apportés du Massif Central par un réseau hydrographique existant au miocène inférieur (burdigalien). Ces épandages viennent fossiliser la partie sud de la surface post aquitanienne des calcaires de Beauce.

On notera qu'au droit de la Sologne actuelle, une tendance à la subsidence semble avoir facilité une plus grande accumulation de ces dépôts. Cette subsidence plus accentuée à l'ouest serait aussi à l'origine de la rupture des communications hydrographiques vers le Bassin parisien et de la réorientation vers l'ouest, voire le sud-ouest, de l'ensemble du réseau hydrographique de la Sologne, Loire comprise (Mottet, 1993).

C'est aussi dans cette unité que s'observent les terrasses quaternaires étagées, mises en place du Mindel au Würm et dominant de plusieurs dizaines de mètres le val holocène et qui s'achèvent sensiblement au droit de la confluence du Beuvron.

La limite d'unité a donc été placée par commodité à cette confluence du Beuvron, drain principal de la Sologne, même si son rôle hydrologique est relativement négligeable, notamment vis à vis des débits de crue.

Cette unité (de 166 km.) se caractérise par la construction de levées sur les 2 rives de la Loire dans les vallées alluviales d'Orléans et de Blois, ce qui est nouveau par rapport à l'unité précédente. Autre phénomène propre : la Loire s'inscrit localement dans une dynamique de méandre marqué (cf. les boucles de Guilly) et quasi non-évolutive depuis au moins un siècle.

Sur l'ensemble de l'unité, le val de Loire conserve une pente encore forte ($0.48^{\circ}/^{\circ}$), dégressive de l'amont vers l'aval. La largeur de la vallée est en moyenne importante (2510m.). La Loire évolue dans un lit majeur endigué étroit (880 m.), sous la contrainte d'une levée en moyenne. [...]

Tronçon 1 : Bonny-sur-Loire – Lions en Sullias

La Loire arrive dans la plaine de Bonny-sur-Loire. D'une forte dynamique, la Loire va tendre vers un chenal unique, sans îles ni banc de sable, à la sinuosité quasi nulle. Il s'agit du tronçon pour lequel le lit actif est le plus étroit.

Sous tronçon 1 : Bonny-sur-Loire – Briare

Ce secteur est un secteur de transition entre un régime morpho-dynamique fort en amont à plusieurs chenaux et bancs de sable et un secteur rectiligne, homogène et chenalisé en aval. La pente de ce sous-tronçon est forte ($0.52^{\circ}/^{\circ}$). Sur ce secteur, toutes les géométries du lit diminuent (bande de remaniement, largeur des îles, nombre de chenaux), l'enveloppe

hydraulique diminue de 100m en moyenne et les îles deviennent peu nombreuses. La Loire se chenalise aidée en cela par la présence de chevrettes au droit de Chatillon-sur-Loire.

D'après les résultats de P.Ginestet, il semblerait que le lit n'évolue guère sur la période.

→ Ce secteur s'est fortement chenalisé en 10ans puisque la largeur de la bande active s'est réduite de presque 30m sur la période. La largeur des îles aussi s'est réduite. Si l'on regarde en détail le secteur, cette réduction, moyenne, de l'écoulement s'explique uniquement par l'apparition d'un bras mort, par végétalisation, en rive droite à Bonny-sur-Loire. En dehors de cette déconnexion d'un bras relativement large (la moitié de la bande active environ), le lit est effectivement stable sur la période.

Sous tronçon 2 : Briare – Lions en Sullias *seuil de la centrale de Dampierre*

La Loire devient ici quasiment rectiligne et uniforme. Il n'existe plus une seule île, le chenal est unique. L'enveloppe hydraulique se réduit encore (225m). La pente est légèrement plus faible ($0.48^{\circ}/^{\circ}$). Sur près de 18km, la Loire n'évolue plus jusqu'au seuil de la centrale qui marque le retour à une Loire plus dynamique. Cette zone calme n'est pas provoquée par le seuil de la centrale car cette absence d'île et ce chenal rectiligne est antérieur à la construction de cet ouvrage. Sur nos plus anciennes photos (1848), le chenal adoptait déjà cette morphologie.

Ce secteur est dynamiquement faible depuis longtemps et la prévision d'une faible évolution des paramètres est entièrement vérifiée.

Tronçon 2 : Lions en Sullias – Ouvrouer-les-champs

Ce tronçon marque le retour à une Loire plus sinueuse. Elle entre dans la plaine alluviale d'Orléans où elle est endiguée sur les deux rives.

Sous tronçon 1 : Lions en Sullias *seuil de la centrale de Dampierre* – Sully-sur-Loire

Cette zone marque le retour de quelques petites îles (20m en moyenne) et un élargissement du lit (320m en moyenne soit 90m de plus que le secteur précédent). Les bancs de sable réapparaissent.

Prévision d'une augmentation du nombre de chenaux sur ce secteur.

→ La bande active se réduit (-30m depuis 1993), les îles se pérennisent et le nombre de chenaux est parfaitement identique à celui de 1993 (1,47 en moyenne).

Sous tronçon 2 : Sully-sur-Loire – Ouvrouer-les-champs

Sur ce sous-tronçon, la Loire présente ses plus beaux méandres (sinuosité de 0.36 et amplitude de 3km). Au delà de cette sinuosité marquée, la dynamique reste identique. Les îles sont légèrement plus larges (45m) à l'inverse de la bande de remaniement (-10m).

Ce secteur fait état de la même prévision : augmentation du nombre de chenaux...

→ ... et du même résultat. Une bande active qui se réduit quelque peu (-20m), et un nombre moyen de chenaux identique.

Tronçon 3 : Ouvrouer-les-champs – Confluence du Loiret

Dernière partie du val orléanais, la Loire est marquée par la présence de zone karstique qui draine une partie des écoulements vers le Loiret. La Loire longe le coteau en rive droite à l'exception du méandre de Sandillon.

Sous tronçon 1 : Ouvrouer-les-champs – Chateauneuf-sur-Loire

Ce sous-tronçon possède la même enveloppe hydraulique que le tronçon précédent. Les îles sont un peu moins large et la bande de remaniement plus grande. La pente de la vallée est marquée (0.6°/°) et la sinuosité du lit est importante avec le dernier méandre de la Loire.

La sectorisation de P.Ginestet arrête le secteur à Combleux. Nous l'avons coupé en amont. Il prévoit peu d'évolutions des paramètres.

→ Une nouvelle fois, ce secteur marque une accélération de la réduction de la bande active (-30m) et une augmentation de la largeur moyenne des îles (+15m).

Sous tronçon 2 : Chateauneuf-sur-Loire – Confluence du Loiret

La Loire traverse ici l'agglomération d'Orléans où l'anthropisation des berges et du lit est forte. La présence des chevrettes pérennise les îles et la bande de remaniement diminue dans cette traversée. La largeur des îles est supérieure à 50m par la présence de l'île Charlemagne. Autour de cette île, il existe toujours un chenal déconnecté, mis en eau pour des débits de plein bord, mais il est fort probable qu'à terme cette île soit rattachée à la berge. Dans ce cas, la largeur moyenne des îles sera plus proche de 10m.

Même prévision que précédemment

→ Globalement le secteur est stable, car bien contraint par les ouvrages de navigation. Les variations de la largeur du lit actif, des îles et de l'enveloppe hydraulique restent inférieures à 10m. Le lit s'élargit au détriment des îles.

Tronçon 4 : Confluence du Loiret – Bec de Beuvron

Après la traversée d'Orléans, la Loire se réoriente vers le sud-ouest. Elle entre dans les plaines alluviales de Beaugency et de Blois. La Loire est endiguée sur les deux rives.

Sous tronçon 1 : Confluence du Loiret – Meung-sur-Loire

La Loire récupère une partie de ses eaux à la confluence du Loiret, celle-ci n'influence pas outre-mesure le lit. L'écoulement est ici relativement rectiligne et présente peu d'îles. La largeur du lit actif se réduit de l'ordre d'une vingtaine de mètre par rapport au secteur précédent (275m en moyenne).

Peu d'évolution à priori

→ C'est exact, les îles sont légèrement plus larges, passant de 3m à 10m en moyenne. La bande active est identique tout comme le nombre de chenaux moyen.

Sous tronçon 2 : Meung-sur-Loire – Muides

Morphologiquement, ce secteur ne se distingue par du tronçon précédent. La limite établie par P.Ginestet est motivée par la rupture de la pente de la vallée et la rupture de la ligne d'eau de crue modélisée par le modèle numérique Hydratec.

La présence de la centrale de Saint Laurent Nouan ne semble pas avoir d'impact sur la morphologie du fleuve.

Peu d'évolution des paramètres, et érosion latérale des îles

→ Lit actif légèrement plus réduit (-15m) et îles un peu plus large.

Note : A partir d'ici, les mesures sont réalisées à partir des cartes de végétation de 1999 et 2000.

Sous tronçon 3 : Muides – Blois Ménars

La bande de remaniement s'élargit pour atteindre 300m. Peu d'îles et de même largeur que dans le tronçon précédent (environ 20m). La Loire est ici dans un secteur de transition caractérisant le passage de la plaine alluviale de Beaugency à celle de Blois. L'espace de divagation de la Loire est réduite de moitié par rapport au sous-tronçon précédent.

Augmentation du nombre de chenaux

→ La largeur des îles est stable mais le lit actif se réduit et le nombre moyen de chenaux aussi.

Sous tronçon 4 : Blois Ménars – Bec de Beuvron

Ce tronçon se caractérise par rapport au précédent par une disparition presque complète des îles. Le chenal est rectiligne et uniforme. L'enveloppe hydraulique perd ici 35m de largeur bien que le lit actif ne soit réduit que d'une dizaine de mètre.

Secteur sans île en 1991 et peu de variation des paramètres

→ Quelques îles sont apparues au droit de Ménars, pour le reste, la bande active se réduit de 20m en moyenne

• **Unité 3 : Bec de Beuvron – Les Ponts-de-Cé**

Cette unité se caractérise par la traversée des plateaux calcaires du crétacé au faible relief. C'est aussi aux environs de Blois que se situe l'extrême avancée orientale de la « mer des Faluns », transgression marine d'obédience atlantique ayant emprunté la basse vallée de la Loire au miocène moyen (helvétien, -15 MA).

L'influence structurale de la tectonique armoricaine Nord-Ouest/Sud-Est, se fait sentir à partir de la confluence de la Vienne.

La limite d'unité a été placée aux Ponts-de-Cé, au droit de la diffluence du LOUET, et des premiers affleurements importants du socle armoricain.

Cette unité est marquée par une succession de vals : val de Cisse (petit affluent en rive droite de la Loire), val de confluence du Cher et de la Loire, val d'Authion (correspondant à la confluence de la Vienne et de la Loire). La pente du fond de vallée diminue de l'amont vers l'aval de l'unité, et connaît notamment une rupture importante à la confluence avec la Vienne

(passage de $0.4^{\circ}/^{\circ}$ à $0.2^{\circ}/^{\circ}$). Contenu dans un lit majeur endigué étroit (790 m.), la Loire entre à présent dans une activité morphodynamique plus intense. [...]

Le changement de la dynamique fluviale est repérable à partir du pont de Chaumont, situé un peu en aval du Bec de Beuvron. Le choix du Bec de Beuvron comme limite d'unité se justifie par des considérations géologiques citées supra et le repérage aisé de la confluence du Beuvron.

Tronçon 1 : Bec de Beuvron – Vouvray

La Loire s'oriente ici vers une direction ouest et l'enveloppe hydraulique a tendance à s'élargir à partir d'ici.

Sous tronçon 1 : Bec de Beuvron – Mosnes

La pente de la vallée augmente $0.45^{\circ}/^{\circ}$ contre $0.38^{\circ}/^{\circ}$ depuis Muides. La morphologie du lit est identique au secteur précédent. La seule différence est l'élargissement de l'espace de divagation de la Loire qui double à partir de la confluence du Beuvron.

Faible évolution des paramètres

→ La bande active est relativement stable, par contre, les quelques îles présentes sont érodées. La largeur moyenne des îles était de 18m en 1993, elle n'est plus que de 6m.

Sous tronçon 2 : Mosnes – Montlouis la Barre

La pente de la vallée de la Cisse s'adoucit ($0.36^{\circ}/^{\circ}$). La largeur de l'enveloppe hydraulique augmente fortement +75m (355m) par l'apparition d'îles (50m de largeur en moyenne). Le lit se divise en deux chenaux et s'élargit.

Tendance à l'augmentation du nombre de chenaux

→ Le nombre de chenaux moyen est stable. A noter que la bande active et l'enveloppe hydraulique augmentent d'une dizaine de mètre.

Sous tronçon 3 : Montlouis la Barre – Vouvray pont

Sur ce court sous-tronçon, la morphologie du lit évolue très nettement bien que l'enveloppe hydraulique reste relativement stable (+10m). Le nombre d'îles se réduit de nouveau (largeur moyenne proche de 10m). Cet espace est récupéré par le lit actif (+45m). La Loire passe d'une direction sud-ouest à une direction ouest.

Faible évolution des paramètres

→ Ici aussi la bande active augmente (environ 15m). Le nombre moyen de chenaux diminue un peu, mais rien de significatif.

Tronçon 2 : Vouvray pont – Confluence du Cher

La Loire entre dans la vallée du Cher et reprendre une orientation sud-ouest. La proximité du Cher oblige à prendre en compte celui-ci dans la gestion de la Loire. Ce tronçon marque le retour des îles et le nombre de chenaux moyen est supérieur à 2 de nouveau.

Sous tronçon 1 : Vouvray pont – Tours pont Wilson

La pente de la vallée est s'accroît ($0.71^{\circ}/^{\circ}$). Si l'enveloppe hydraulique augmente peu, la Loire voit le retour de nombreuses et larges îles dans son lit (80m en moyenne), le nombre de chenaux moyen est de 2.5. La bande de remaniement diminue en contrepartie pour atteindre sa largeur moyenne de 305m. L'influence du pont Wilson en tant que point dur, joue probablement un rôle dans le dépôt de sédiment.

Tendance à la réduction de la bande active et à l'augmentation du nombre de chenaux

→ Entre 1993 et 1999, la bande active augmente (+25m) ainsi que le nombre de chenaux.

Sous tronçon 2 : Tours *pont Wilson* – Luynes

La largeur du lit se réduit. La bande de remaniement passe à 270m en moyenne. Le lit se divise en deux chenaux séparant des îles d'une largeur moyenne de 60m. La largeur totale du lit est de 330m. Cette diminution de la dynamique s'explique notamment par la diminution de la pente de la vallée ($0.26^{\circ}/^{\circ}$). Le lit divague un peu plus autour des îles.

Même prévision

→ Effectivement, le nombre de chenaux augmente et la largeur de la bande active se réduit d'une dizaine de mètre.

Sous tronçon 3 : Luynes – Confluence du Cher

Ce secteur présente moins d'îles et de plus faibles dimensions que le secteur précédent. La bande de remaniement s'élargit un peu (300m).

Nombre de chenaux en baisse non négligeable

→ La bande active est stable mais la largeur des îles augmentent tout comme le nombre moyen de chenaux.

Tronçon 3 : Confluence du Cher – Confluence de la Vienne

Premier affluent notable depuis le bec d'Allier, le Cher apporte sa contribution à la dynamique de la Loire. La largeur de l'enveloppe hydraulique dépasse les 400m.

Sous tronçon 1 : Confluence du Cher – Rigny-Ussé *Rupuanne*

En aval de la confluence, le lit de Loire subit l'apport brutal de sédiment. Le Loire ne peut tout transporter, et la morphologie du lit s'en ressent. De nombreuses îles et bancs de sable prennent place dans le lit qui s'élargit. Le nombre de chenaux augmente donc tout comme l'enveloppe hydraulique est plus large de 70m (405m) conséquence de l'apparition des îles (70m en moyenne).

Rétrécissement de l'enveloppe hydraulique et diminution du nombre de chenaux

→ Augmentation du nombre de chenaux de 1.4 à 2.3 en moyenne et agrandissement de l'enveloppe hydraulique (+15m en 6ans).

Sous tronçon 2 : Rigny-Ussé *Rupuanne* – Confluence de l'Indre

Dans ce secteur, l'enveloppe hydraulique reste stable mais le lit actif s'élargit (+30m), pour atteindre une largeur de 360m en moyenne, au détriment des îles (-20m). L'influence de la

confluence se fait moins ressentir. Le lit présente de nombreux bancs de sable non végétalisés notamment en amont du seuil de la centrale de Chinon qui contraint l'écoulement en rive gauche au droit de la confluence avec l'Indre.

Diminution du nombre de chenaux

→ Légère augmentation du nombre de chenaux moyen, la bande active s'élargit au détriment des îles. L'enveloppe hydraulique reste stable sur la période.

Sous tronçon 3 : Confluence de l'Indre – Confluence de la Vienne

Secteur transitoire entre deux confluences. La largeur du lit actif ne change pas et est toujours autant parsemé de bancs de sable. Comme pour la confluence avec le Cher, l'aval de la confluence avec l'Indre permet à des îles de se pérenniser. Plus de chenaux (2.4) encadrant des îles de largeur moyenne 80m.

Faible évolution des paramètres

→ Elargissement de la bande active (+30m) et du nombre de chenaux (+1 en moyenne), alors que la largeur des îles diminue d'une dizaine de mètre.

Tronçon 4 : Confluence de la Vienne – Les Ponts-de-Cé

Ce secteur marque l'influence notable de la confluence avec la Vienne par une réduction brutale de la pente ($0.42^{\circ}/\text{°°}$ → $0.18^{\circ}/\text{°°}$). La Loire se réoriente sud-est/nord-ouest dans l'axe de la tectonique armoricaine. A partir de cette confluence, la bande de remaniement sera toujours supérieur à 400m. Les îles sont moins nombreuses mais plus large que dans le tronçon précédent. La largeur de l'enveloppe hydraulique dépasse les 500m.

Sous tronçon 1 : Confluence de la Vienne – Chênehutte

Sur ce secteur, la pente de la vallée est douce ($0.22^{\circ}/\text{°°}$). L'enveloppe hydraulique atteint 640m dont l'accroissement est dû aussi bien à la bande de remaniement (490m) que la largeur des îles (150m). Elles sont peu nombreuses (nombre de chenaux moyen de 2) mais très larges et pérennes. Ce secteur est marqué par la confluence du Thouet perpendiculairement à l'écoulement de la Loire, mais son faible apport est lissé par la Loire.

Faible évolution des paramètres

→ La bande active s'élargit encore (+20m) alors que les îles sont moins large (-10m). Le nombre de chenaux moyen est stable.

Sous tronçon 2 : Chênehutte – Gennes Bessé

Secteur de transition, les îles se réduisent (115m) tout comme l'enveloppe hydraulique (-30m) mais la bande active reste équivalente (+10m). Le nombre de chenaux est identique.

Faible évolution des paramètres

→ Secteur stable sur la période

Sous tronçon 3 : Gennes Bessé – St Mathurin

La fin de ce sous-tronçon marque la réorientation du lit vers l'ouest. Le lit ne présente plus d'île à une exception près faisant place à une large bande active avec bancs de sable. L'enveloppe hydraulique se réduit d'une centaine de mètre tandis que la bande active est stable.

Faible évolution des paramètres

→ Secteur stable également

Sous tronçon 4 : St Mathurin – Les Ponts-de-Cé *pont déviation*

La Loire est orientée plein ouest. Le tronçon se termine sur la diffluence du Louet. Point remarquable la pente de la vallée est nulle. La Loire bute sur le Massif Armoricaïn et en amont se serait formé un bouchon alluvial (Epteau, 1996).

Ce secteur marque le retour de larges îles provoquant une large enveloppe hydraulique. La bande de remaniement augmente également pour atteindre 560m (+60m). La Loire présente ici de nombreuses barres alternées caractéristiques d'un lit chenalisé.

Faible évolution des paramètres

→ Secteur également très stable.

• **Unité 4 : Les Ponts-de-Cé – Montjean-sur-Loire**

La Loire traverse à présent le socle hercynien constituant l'essentiel du Massif Armoricaïn. Elle va s'enrichir des apports de la Maine. Cette unité se caractérise la présence d'îles de grande amplitude (les îles du Louet et l'île de Chalonnnes). Nous rappelons que nous n'avons pris en compte ces îles dans l'analyse de la dynamique fluviale. Le bras secondaire de la Loire, appelé le Louet, poursuit à partir des Ponts-de-Cé jusqu'à Chalonnnes/Loire, une dynamique qui lui est propre (c'est-à-dire qui n'est pas en relation avec celle de la Loire, sauf peut-être lors de fortes crues).

La pente du fond de vallée est identique en moyenne à celle du tronçon Confluence de la Vienne - les Ponts-de-Cé ($0.20^{\circ}/^{\circ}$). La largeur du val diminue de 1000 mètres par rapport à l'unité précédente (2330 m.). Toujours endiguée par une levée, la Loire évolue dans un espace de divagation immense (2200 m. en moyenne). [...]

Note concernant les données de l'unité 4 : Les dimensions du lit ne concernent que le bras principal de la Loire sans prendre en compte le Louet (et donc l'espace entre eux). Les prises de vue aérienne (et donc les cartes qui en découlent) ne permettent pas d'obtenir toutes les informations du lit alors que P.Ginestet en disposait. Par conséquent, aucune comparaison ne sera effectuée entre les deux études. Nous reprenons ici exactement la même sectorisation.

Tronçon 1 : Les Ponts-de-Cé *pont déviation* – Confluence de la Maine

Ce tronçon se caractérise par l'apparition d'un bras de la Loire, le Louet, qui s'éloigne du lit principal. Il se termine par la confluence avec la Maine dont les apports hydrauliques et sédimentaires sont importants. A partir d'ici, les vastes îles sont généralement habités.

Le nombre de chenaux augmentent (2.6) alors que la bande de remaniement se rétrécit (400m ; même en prenant en compte le Louet, le constat est le même). Le lit contourne ici de vastes îles telles que l'île des Ponts-de-Cé mais aussi de plus petites (largeur moyenne de 245 m). Le nombre moyen de chenaux double (2.6) par rapport au secteur précédent.

Tronçon 2 : Confluence de la Maine – Montjean-sur-Loire

La Maine draine un grand bassin en rive droite de la Loire et récupère les apports du Loir, de la Sarthe et de la Mayenne.

Sous tronçon 1 : Confluence de la Maine – Chalonnnes-sur-Loire *viaduc de l'Alleud*

La Loire se réoriente une nouvelle fois en direction du sud-ouest. La pente est ici plus forte que précédemment ($0.30^{\circ}/^{\circ}$). L'absence de levée dans ce secteur propose un vaste espace de liberté à la Loire. Contrairement au secteur précédemment, le nombre de chenaux diminue pour être de 1.6 et la largeur des îles également (150m correspondant globalement à la largeur de l'île de Behuard). Il faut noter ici l'apparition des épis sur tout le tronçon, jusqu'à la diffuence de la Loire en deux bras. Ces ouvrages bloquent complètement l'écoulement de la Loire qui ne possède plus suffisamment d'espace pour divaguer, la largeur moyenne du lit actif est de 385m.

Sous tronçon 2 : Chalonnnes-sur-Loire *viaduc de l'Alleud* – Montjean-sur-Loire

Nous sommes ici dans le dernier secteur de l'étude se caractérisant par deux bras bien distincts dépourvus d'épis. Le bras en rive gauche est étroit, présentant peu de bancs de sable. L'écoulement est préférentiel dans ce bras par la présence d'un seuil. C'est également dans ce bras que le Louet rejoint le cours principal du fleuve.

Le bras droit présente une morphologie plus proche du reste du lit de la Loire. Un lit relativement large avec une sédimentation très marqué, probablement par l'absence régulière d'écoulement et la présence d'un sol relativement meuble. Il présente également des grandes îles. Sur ce dernier secteur, la largeur moyenne des îles est de 1000m. La bande de remaniement s'élargit également (450m).

Synthèse de la sectorisation

Unité	Tronçon	Sous-tronçon	Localités	Longueur (km)
U1			Bec d'Allier - Bonny/Loire	82,6
	U1T1		Bec d'Allier - Tracy/Loire Bois Gibault	53,3
		S1	<i>Bec d'Allier – Cours-les-barres Les Grevées</i>	12,5
		S2	<i>Cours-les-barres Les Grevées – La Charité/Loire Voluray</i>	16,8
		S3	<i>La Charité/Loire Voluray – Pouilly/Loire Charenton</i>	11,7
		S4	<i>Pouilly/Loire Charenton – Tracy/Loire Bois Gibault</i>	12,2
	U1T2		Tracy/Loire Bois Gibault – Bonny/Loire	29,3
		S1	<i>Tracy/Loire Bois Gibault – Villechaud Les Courlus</i>	9,5
		S2	<i>Villechaud Les Courlus – La Celle/Loire Le Grand Sauloy</i>	14,1
		S3	<i>La Celle/Loire Le Grand Sauloy – Bonny/Loire</i>	5,7
U2			Bonny/Loire - Bec de Beuvron	168,5
	U2T1		Bonny/Loire – Lions en Sullias	30,1
		S1	<i>Bonny/Loire – Briare</i>	12,2
		S2	<i>Briare – Lions en Sullias seuil de la centrale de Dampierre</i>	18,0
	U2T2		Lions en Sullias – Ouvrouer-les-champs	39,1
		S1	<i>Lions en Sullias seuil de la centrale de Dampierre – Sully/Loire</i>	15,2
		S2	<i>Sully/Loire – Ouvrouer-les-champs</i>	23,8
	U2T3		Ouvrouer-les-champs – Confluence du Loiret	35,5
		S1	<i>Ouvrouer-les-champs – Chateaufort/Loire</i>	19,7
		S2	<i>Chateaufort/Loire – Confluence du Loiret</i>	15,8
	U2T4		Confluence du Loiret – Bec de Beuvron	63,8
		S1	<i>Confluence du Loiret – Meung/Loire</i>	9,5
		S2	<i>Meung/Loire – Muides</i>	23,3
		S3	<i>Muides – Blois Ménars</i>	10,0
		S4	<i>Blois Ménars – Bec de Beuvron</i>	21,0
U3			Confluence Beuvron - Ponts-de-Cé	155,2
	U3T1		Bec de Beuvron – Vouvray	37,7
		S1	<i>Bec de Beuvron – Mosnes</i>	11,9
		S2	<i>Mosnes – Montlouis la Barre</i>	20,2
		S3	<i>Montlouis la Barre – Vouvray pont</i>	5,6
	U3T2		Vouvray pont – Confluence du Cher	26,9
		S1	<i>Vouvray pont – Tours pont Wilson</i>	8,8
		S2	<i>Tours pont Wilson – Luynes</i>	10,4
		S3	<i>Luynes – Confluence du Cher</i>	7,8
	U3T3		Confluence du Cher – Confluence de la Vienne	36,2
		S1	<i>Confluence du Cher – Rigny-Ussé Rupanne</i>	15,3
		S2	<i>Rigny-Ussé Rupanne – Confluence de l'Indre</i>	10,5
		S3	<i>Confluence de l'Indre – Confluence de la Vienne</i>	10,5
	U3T4		Confluence de la Vienne – Les Ponts-de-Cé	54,4
		S1	<i>Confluence de la Vienne – Chênehutte</i>	16,9
		S2	<i>Chênehutte – Gennes Bessé</i>	14,4
		S3	<i>Gennes Bessé – St Mathurin</i>	8,1
		S4	<i>St Mathurin – Les Ponts-de-Cé pont déviation</i>	15,0
U4			Ponts-de-Cé - Montjean/Loire	31,0
	U4T1		Les Ponts-de-Cé pont déviation – Confluence de la Maine	9,2
	U4T2		Confluence de la Maine – Montjean/Loire	21,8
		S1	<i>Confluence de la Maine – Chalonnes/Loire viaduc de l'Alleud</i>	10,6
		S2	<i>Chalonnes/Loire viaduc de l'Alleud – Montjean/Loire</i>	11,2

Evolution du lit entre 1993 et 2002

Comme nous l'avons vu dans le détail, le lit de la Loire adopte une tendance générale à la réduction du lit actif.

La bande de remaniement mesurait en moyenne, sur l'ensemble du linéaire étudié, 470m en 1848 et 300m en 2002. La réduction de la largeur du lit actif est relativement homogène car elle est d'environ 1m/an quelque soit la période considérée.

Du bec d'Allier au bec de Beuvron, la tendance générale est à la réduction de la bande active alors que du bec de Beuvron aux Ponts-de-Cé la tendance est à l'élargissement. Le constat est globalement le même pour l'enveloppe hydraulique.

Il est intéressant de remarquer que sur l'ensemble du linéaire, le nombre moyen de chenaux tend à augmenter du fait de la pérennisation d'îles. Du fait des aménagements du lit, et probablement des conditions hydrologiques, les bancs de sable se sont fortement végétalisés conduisant à la formation de jeunes îles. Il serait intéressant de voir l'effet de la crue de 2003 sur ce constat à l'aide des prises de vues aériennes de 2005.

Néanmoins, ce constat concerne les unités 1 et 2, alors que pour l'unité 3, la largeur moyenne des îles se réduit. Cette unité comprend la majorité des affluents de la Loire moyenne et il est probable que l'apport hydrologique moins contrôlée de ces cours d'eau permet une mobilisation du sédiment plus efficace et limite la végétalisation des îles.

Tableau 4 : Récapitulatif des mesures du lit entre 1993 et 2002

	Bande de remaniement	Nombre moyen de chenaux	Largeur des îles	Largeur de l'enveloppe hydraulique
Unité 1	310	2,4	141	452
T1ST1	304	2,3	103	407
T1ST2	308	2,3	67	375
T1ST3	353	2,7	178	531
T1ST4	353	2,6	114	467
T2ST1	296	2,3	137	433
T2ST2	260	2,7	316	576
T2ST3	304	1,8	69	373
Unité 2	279	1,3	21	300
T1ST1	250	1,4	27	277
T1ST2	223	1	0	223
T2ST1	303	1,5	19	322
T2ST2	292	1,5	43	335
T3ST1	316	1,3	19	335
T3ST2	292	1,5	54	346
T4ST1	274	1,2	10	284
T4ST2	262	1,3	17	279
T4ST3	298	1,4	20	318
T4ST4	279	1,2	3	282
Unité 3	384	1,8	67	451
T1ST1	274	1,4	6	280
T1ST2	306	1,9	48	354
T1ST3	351	1,6	13	364
T2ST1	305	2,5	81	386
T2ST2	269	2	60	329
T2ST3	297	1,9	38	335
T3ST1	333	2,3	72	405
T3ST2	362	1,6	49	411
T3ST3	359	2,4	81	440
T4ST1	499	1,7	150	649
T4ST2	492	1,9	122	614
T4ST3	501	1,1	7	508
T4ST4	562	1,4	65	630
Unité 4	413	2,5	480	893
T1	401	2,6	246	655
T2ST1	386	1,6	148	535
T2ST2	448	3,1	982	1430

Tableau 5 : Récapitulatif de l'évolution entre 1993 et 2002 (+ : augmentation, - : diminution, = : stagnation, ? : aucune donnée disponible)

	Bande de remaniement	Nombre moyen de chenaux	Largeur des îles	Largeur de l'enveloppe hydraulique
Unité 1	-	+	+	-
T1ST1	-	+	+	-
T1ST2	-	+	+	-
T1ST3	-	-	=	-
T1ST4	-	=	-	-
T2ST1	-	+	+	+
T2ST2	-	+	+	=
T2ST3	-	-	=	-
Unité 2	-	=	+	-
T1ST1	-	-	-	-
T1ST2	-	=	=	-
T2ST1	-	=	+	-
T2ST2	-	=	=	-
T3ST1	-	+	+	-
T3ST2	+	-	-	+
T4ST1	=	+	+	=
T4ST2	-	+	+	-
T4ST3	-	=	=	-
T4ST4	-	+	+	-
Unité 3	+	+	-	-
T1ST1	-	+	-	-
T1ST2	+	+	=	+
T1ST3	+	+	-	+
T2ST1	+	=	-	+
T2ST2	-	+	=	-
T2ST3	=	+	+	+
T3ST1	+	+	=	+
T3ST2	+	+	-	=
T3ST3	+	+	-	+
T4ST1	+	+	-	+
T4ST2	=	=	=	=
T4ST3	-	=	=	-
T4ST4	=	-	?	?
Unité 4	?	?	?	?
T1	?	?	?	?
T2ST1	?	?	?	?
T2ST2	?	?	?	?

Rapport d'aspect et épaisseur d'alluvion

Comme nous l'avons dit précédemment, nous avons travaillé également sur le rapport d'aspect. Issu du modèle hydrologique Hydratec de la Loire moyenne, nous avons pu nous affranchir des conditions hydrologiques dans lesquelles les profils furent réalisés.

Nous nous sommes placés dans le cas d'un débit proche de celui de plein bord. Il s'agit du débit pour lequel l'écoulement est le plus rapide. Sur le secteur Bec d'Allier – confluence du Cher, nous avons considéré des débits de l'ordre de 1500 et 2000 m³/s.

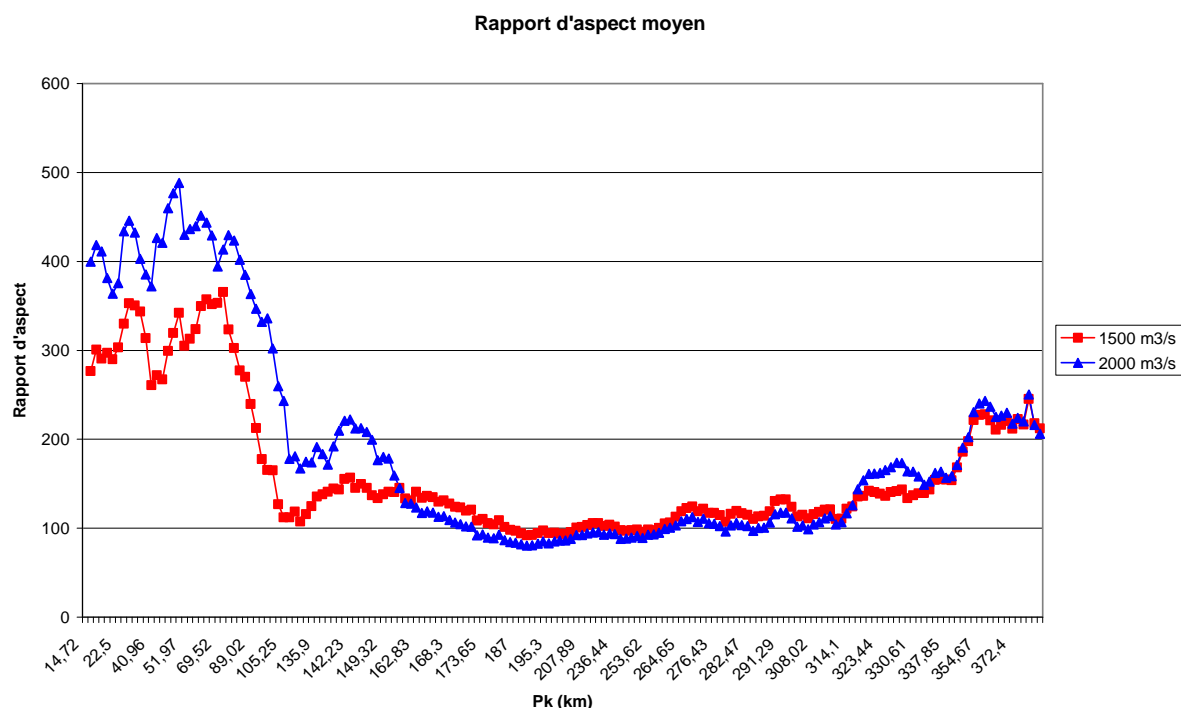


Figure 13 : Rapport d'aspect moyen

Le résultat montre clairement une chute de rapport d'aspect moyen après Cosne-sur-Loire. De Gien à Saumur, le ratio est le plus faible. Cette chute correspond à l'entrée de la Loire dans le val orléanais où l'épaisseur d'alluvion est plus faible. Jusqu'à Saumur, cette épaisseur est minimum et correspond au plus faible rapport d'aspect. Ce secteur parcourt notamment le tronçon Beaugency – Blois fortement chenalisé. Le pavage est probablement atteint sur ce secteur.

Après la confluence avec la Vienne, l'épaisseur d'alluvion augmente de nouveau tout comme le rapport d'aspect.

Il est évident qu'il existe une corrélation entre les deux types de données et le suivi de ce rapport pourrait, peut-être, fournir une indication de l'épaisseur de sédiment et du degré de chenalisation.

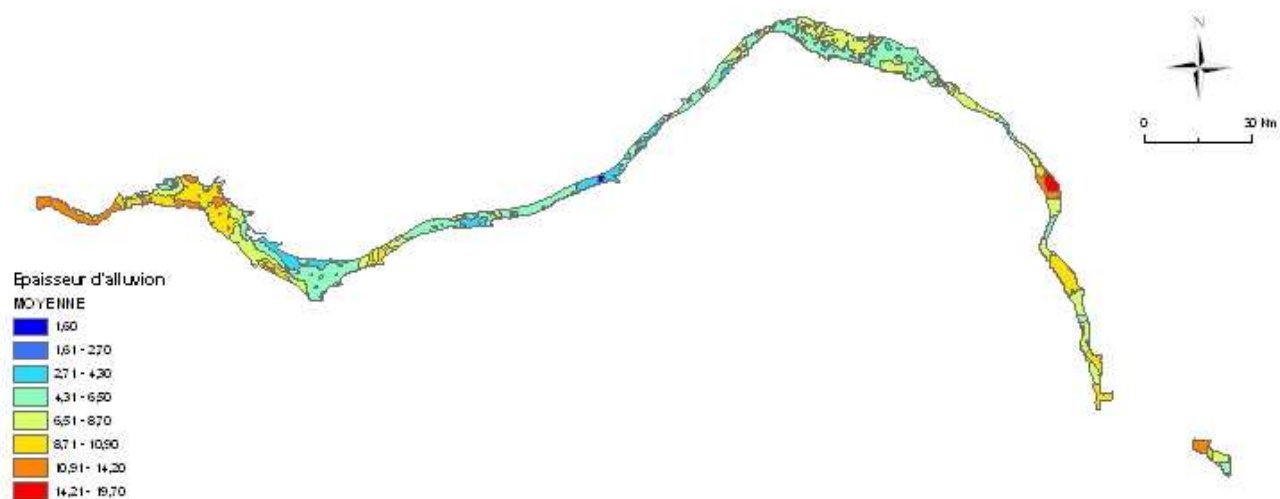


Figure 14 : Epaisseur moyenne d'alluvions, l'épaisseur d'alluvions à Cosnes sur Loire est probablement une erreur (BRGM)

Conclusion

L'objectif de ce travail était d'actualiser et de vérifier une méthode de suivi du lit de la Loire dans l'optique de disposer d'un outil de gestion efficace et simple d'utilisation.

Comme on a pu le constater, la Loire est un fleuve possédant une grande variété de morphologie et de dynamique. De la confluence avec l'Allier jusqu'à Montjean-sur-Loire, la Loire profite de la liberté qui lui est offerte pour revêtir différentes facettes. Large fleuve avec de nombreuses îles et bancs de sable, elle change et se mue en un fleuve rectiligne, homogène et quelque peu monotone avant de profiter de l'apport sédimentaire et hydraulique de nombreuses rivières pour se transformer à nouveau en un remarquable fleuve avec une forte dynamique hydro-sédimentaire.

Ce fleuve, dernier cours d'eau semi-naturel mérite l'ensemble des actions entreprises pour préserver son lit, mais aussi la faune, la flore et le patrimoine des vals qu'il traverse.

Les données utilisées ne remettent pas en cause la sectorisation générale de la Loire définie par P.Ginestet. La sectorisation initiale s'appuie sur des critères bien établis. Par contre, nos résultats vont globalement à l'encontre des prévisions de Ginestet.

Pour les périodes sur lesquelles il a travaillé, l'évolution du fleuve poursuivait une direction continue. Seulement depuis, certaines tendances se sont inversées. Rattachement d'îles, travaux ponctuels, végétalisation de bras, les causes de cette évolution sont nombreuses. Du fait, peut-être, d'une hydrologie modérée, la végétation s'est fortement ancrée sur des bancs de sable peu mis en eau. Profitant de l'ensablement de certains bras peu actif, la végétation s'est pérennisée à de nombreux endroits permettant la formation et l'agrandissement d'îles.

Quoiqu'il en soit, deux tendances se dégagent. La première est la chenalisation avec la réduction de la bande de remaniement du bec d'Allier à la confluence du Beuvron puis en aval, l'élargissement de celle-ci. La seconde est l'apparition d'un certains nombres de nouvelles îles résultants de la végétalisation de bancs de sable quelque soit le secteur étudié.

Afin de constater la pérennisation de ces îles, il serait intéressant, dès que les atlas seront disponibles, de regarder l'évolution entre nos données (1999-2002) et 2005 connaissant l'existence de la crue de 2003. De même, P.Ginestet fait part de prévisions concernant l'évolution de la ligne d'eau. Il serait utile de comparer en détail les tendances énoncées avec les données collectées à la DIREN afin de conclure sur la méthode de sectorisation.

Bibliographie

Boudin L., Cordier J. & Moret J. 2007 - *Atlas de la flore remarquable du Val de Loire entre le bec d'Allier et le bec de Vienne*. Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 464p. (Patrimoines Naturels, 66)

Chapuis S., 1997 - *Analyse multicritère de l'évolution de la Loire moyenne à l'amont d'Amboise 1964-1995*, Rapport de stage, DIREN Centre

Donsimoni M., Berthier H., 2007, BRGM – *Détermination de la présence de karsts sous les levées domaniales du bassin de la Loire et réduction du risque d'effondrement de la digue lié à la présence de ces conduits souterrains naturels – Tranche 1 : Analyse géologique, Rapport provisoire*, 138p.

Dujols B., Ginestet P., 1996, Equipe pluridisciplinaire PLGN - *Stabilisation de l'enfoncement de la Loire moyenne*, Rapport de stage, DIREN Centre

Foutoyet S., 2001 - *Evolution de la ligne d'eau d'étiage de la Loire moyenne période 1986-2000*, Rapport de stage, DIREN Centre

Ginestet P., 1998, DIREN Centre - *Sectorisation de la Loire moyenne en secteurs homogènes de propagation*, 51p.

Ginestet P., 1996, Equipe pluridisciplinaire PLGN - *Stabilisation de l'enfoncement de la Loire moyenne- étude géomorphologique de la Loire entre St Satur et Orléans*, Rapport de stage, DIREN Centre

Gislard J-P. & Planchenault J. 2001 - *Flore de la vallée de la Loire*

ISL, DIREN Centre, Centre de gestion des crues et des étiages, 2004 - *Etude de corrélation des crues de la Loire moyenne*

Lauriol E., 1998, Equipe pluridisciplinaire PLGN - *Guide pour l'interprétation des mosaïques numériques du lit de la Loire*

Malavoi J-R., Gautier J-N., 1997, Equipe pluridisciplinaire PLGN - *Sectorisation géomorphologique de la Loire entre le bec d'allier et le bec de Maine*

PLGN, 1997, plaquette - *Architecture du modèle Loire*

PLGN, 1997, plaquette - *La Loire en crue*

PLGN, 1999, plaquette - *Restaurer et entretenir le lit de la Loire*

PLGN, DIREN Centre, Service bassin Loire Bretagne, 2002 - *Restauration et entretien du lit de la Loire et de ses affluents, guide méthodologique 1ere partie*, 68p.

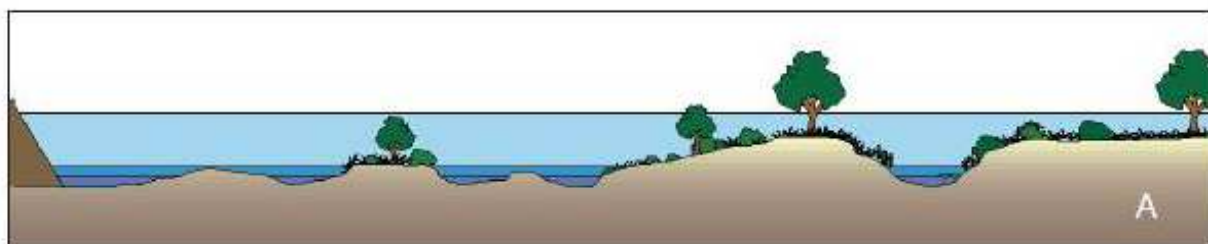
SDAGE Rhône Méditerranée Corse, 1998, guide technique n°2 - *Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau*

Liste des figures

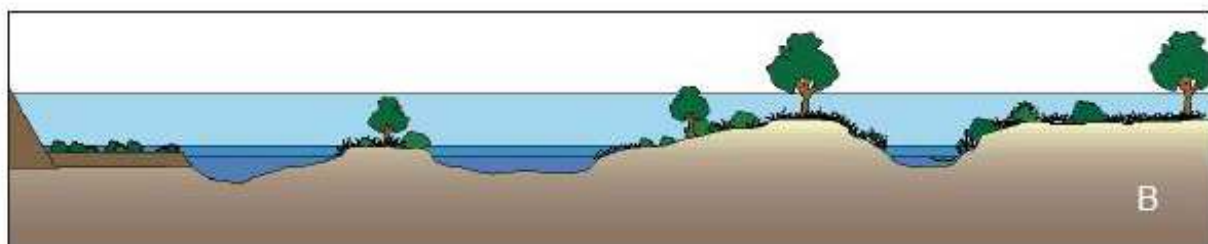
Figure 1 : Cadre géomorphologique de la Loire	5
Figure 2 : La Loire et ses principaux affluents.	6
Figure 3 : Effondrement du Pont Wilson	8
Figure 4 : Zoom sur les transects	13
Figure 5 : Les transects de la Loire	14
Figure 6 : Carte de morphologie, secteur du bec d'Allier	15
Figure 7 : Détail sur l'extraction à partir des cartes de morphologies	17
Figure 8 : Carte de végétation, secteur du bec d'Allier	19
Figure 9 : Détail sur l'extraction à partir des cartes de végétations	21
Figure 10 : Détail sur la photo-interprétation	22
Figure 11 : Exemple du travail sur les flèches d'érosion	23
Figure 12 : Résultats du travail sur les zones sableuses	24
Figure 13 : Rapport d'aspect moyen	42
Figure 14 : Epaisseur moyenne d'alluvions	43
Tableau 1: Typologies retenues pour la couche végétation	20
Tableau 2 : Paramètres de la sectorisation	25
Tableau 3 : Synthèse de la sectorisation	38
Tableau 4 : Récapitulatif des mesures du lit entre 1993 et 2002	40
Tableau 5 : Récapitulatif de l'évolution entre 1993 et 2002	41

Annexes

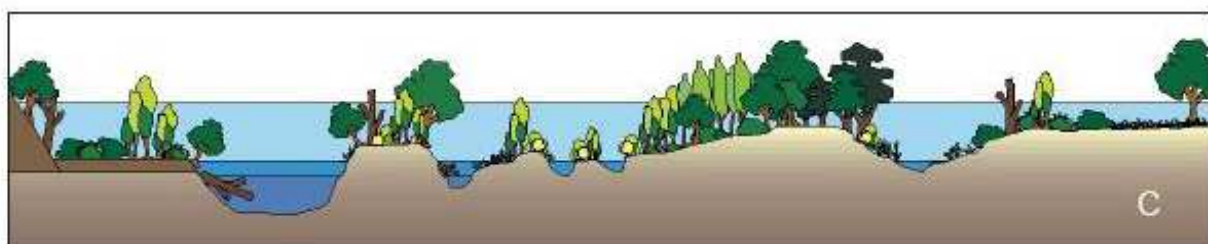
Annexe 1 : Evolution du lit de la Loire (d'après Bacchi et Berton, 1998)



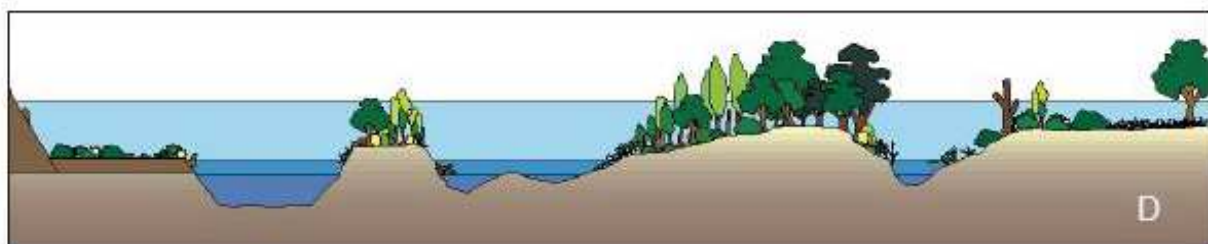
1750 : État du lit avant l'implantation des ouvrages de navigation



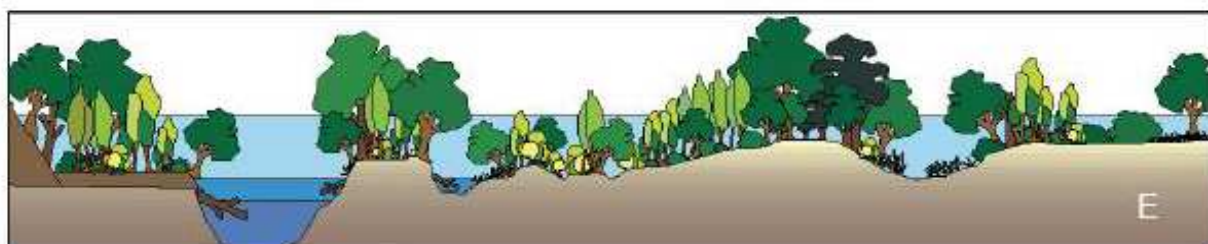
1850 : Implantation des ouvrages destinés à favoriser la navigation



1993 : État du lit de la Loire avant le Plan Loire Grandeur Nature



1998 : Le lit de la Loire après les travaux de restauration et d'entretien



État du lit de la Loire sans action d'entretien

Annexe 2 : Evolution hydrologique du lit de la Loire (Restauration et entretien du lit de la Loire, DIREN Centre)

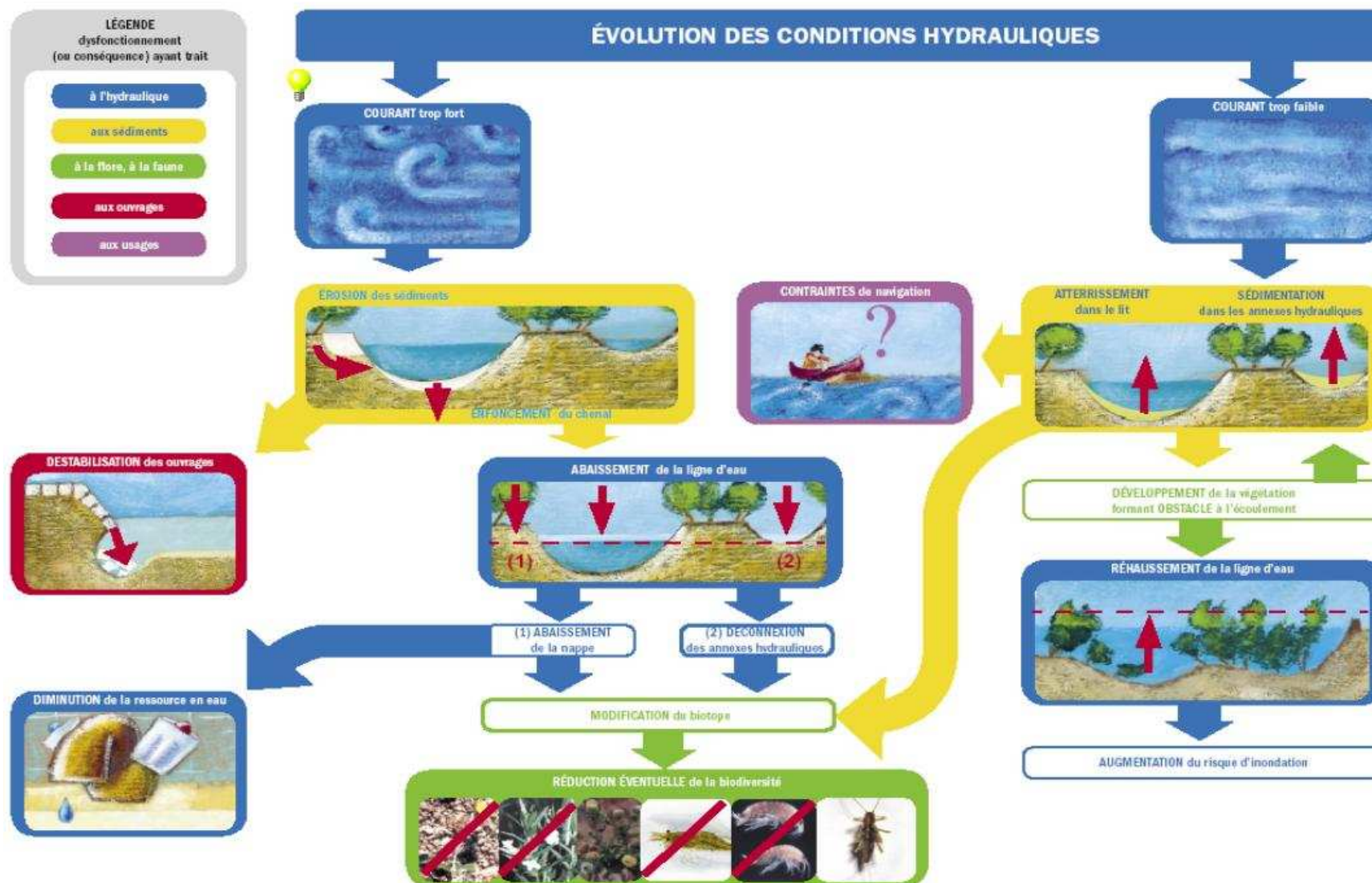


Table des matières détaillée

Sommaire	1
Résumé	2
Abstract	3
Introduction	4
Contexte de l'étude	5
La Loire : un hydrosystème dégradé	5
Les moyens mis en place	8
Le PLGN	8
Le SIEL	9
Le contexte de la sectorisation	10
Méthodologie	11
Le travail de P.Ginestet	11
Les données disponibles	11
Adaptation et complément de la méthode de P.Ginestet	12
Les transects	12
Les cartes de morphologie	14
Les cartes de végétation	18
La photo-interprétation	21
Le rapport d'aspect	22
Les flèches d'érosion	23
Le potentiel érodable	23
Sectorisation	24
Résultats des différents traitements	24
La photo-interprétation	24
Les flèches d'érosion	25
Paramètres de la sectorisation	25
Résultats	26
Unité 1 : Bec d'Allier – Bonny/Loire	26
Unité 2 : Bonny/Loire – Bec de Beuvron	29
Unité 3 : Bec de Beuvron – Les Ponts-de-Cé	32
Unité 4 : Les Ponts-de-Cé – Montjean/Loire	36
Synthèse de la sectorisation	37
Evolution du lit entre 1993 et 2002	39
Rapport d'aspect et épaisseur d'alluvions	42
Conclusion	44
Bibliographie	45
Liste des figures	46
Annexes	47
Annexe 1 : Evolution du lit de la Loire	47
Annexe 2 : Evolution hydrologique du lit de la Loire	48
Table des matières détaillée	49

