

L'INCISION DES COURS D'EAU EUROPEENS : CAS DE LA LOIRE AU NIVEAU DE L'ECOZONE DU FOREZ (42)

Etude géomorphologique et techniques de lutte

Volume 1 : Texte



Mémoire de stage
Pour l'obtention du DESS IHCE
Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées en Ingénierie des Hydrosystèmes Continentaux en Europe

Maître de stage : Jean Marc TAUPIAC



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet et plus particulièrement

Jean-Marc TAUPIAC, directeur environnement FRAPNA Loire et maître de stage, pour m'avoir proposé ce sujet très enrichissant, ainsi que pour son aide et ses précieux conseils.

Djamel MIMOUN, Ecole des Mines de Saint Etienne

Rolland DECHOMET, Ecole des Mines de Saint Etienne

Didier GRAILLOT, Ecole des Mines de Saint Etienne

Jean-Pierre EPINAT, Direction Départementale de l'Équipement de la Loire, service hydraulique.

Merci également à Diane CORBIN, pour son agréable compagnie et son assistance lors de l'utilisation du SIG, André ULMER pour son aide dans les recherches bibliographiques, sans oublier tout le personnel et les stagiaires de l'Ecopôle et de la Maison de la Nature pour leur accueil chaleureux, leur sympathie et leur bonne humeur.

SOMMAIRE

RESUME.....	2
ABSTRACT	2
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	3
INTRODUCTION.....	4
 <u>CHAPITRE 1</u> <u>PRESENTATION DE LA STRUCTURE D’ACCUEIL, OBJET</u> <u>DU STAGE ET METHODOLOGIE.....</u>	 <u>5</u>
1.1 PRESENTATION DE LA STRUCTURE D’ACCUEIL.....	5
1.2 OBJET DU STAGE	9
1.3 METHODOLOGIE	12
 <u>CHAPITRE 2</u> <u>ETAT DES LIEUX ET DIAGNOSTIC</u>	 <u>16</u>
2.1 CARACTERISTIQUES GENERALES DU BASSIN VERSANT DE LA LOIRE AU NIVEAU DE L’ECOZONE	16
2.2 ANALYSE DE LA MORPHODYNAMIQUE FLUVIALE AU NIVEAU DE L’ECOZONE.....	38
2.3 ETAT ACTUEL DU LIT DE LA LOIRE ET PERSPECTIVES D’EVOLUTION.....	52
 <u>CHAPITRE 3</u> <u>TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE L’INCISION ET</u> <u>PROPOSITIONS DE GESTION</u>	 <u>55</u>
3.1 VOLET EUROPEEN : LES TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE L’INCISION DES COURS D’EAU EN EUROPE	55
3.2 PROPOSITIONS DE LUTTE CONTRE L’INCISION AU NIVEAU DE L’ECOZONE	64
3.3 PROPOSITIONS DE GESTION PAR TRONÇONS	75
 CONCLUSION.....	88
BIBLIOGRAPHIE	89
TABLE DES MATIERES	91
LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES	96
ANNEXES.....	97

RESUME

L'incision des lits fluviaux est un phénomène rencontré sur de nombreux fleuves européens. Il se traduit par un enfoncement du lit suite à une réduction des apports sédimentaires. La Loire, souvent présentée comme le dernier fleuve sauvage n'est pas épargnée. Sur sa partie amont dans la plaine du Forez, l'hydrosystème a été fortement perturbé. Les exploitations intensives de granulats et la présence du barrage de Grangent l'ont privé d'une grande partie de ses alluvions. Un linéaire important de protections de berges et de digues empêche la recharge latérale en sédiments. Le résultat est un enfoncement de deux mètres en 150 ans. Les affleurements du substratum (marne) sont les témoins du déficit en charge solide.

Ce stage de fin d'étude au sein de la FRAPNA Loire, gestionnaire de 15 km de rives au niveau de l'Ecozone du Forez a pour objectif de réaliser une étude géomorphologique du fleuve. Celle-ci permet de comprendre les processus qui conduisent à l'incision du lit et met en évidence un enfoncement rapide dans la marne. Les menaces sont réelles : L'abaissement de la nappe d'accompagnement corrélée à l'enfoncement du lit pourrait rendre insuffisantes les ressources en eau potable et modifier les écosystèmes alluviaux. La stabilité des ouvrages de franchissement du cours d'eau pourrait également être compromise.

Pour être efficace, la lutte contre ce phénomène, doit se faire à plusieurs niveaux :

- Stabilisation du lit par implantation de seuils et par pavage artificiel
- Recharge en alluvions par apports extérieurs de matériaux dans le lit et par érosion des berges.

A ce niveau, la définition de l'espace de liberté, l'entretien de la végétation et une meilleure gestion des débits réservés sont des éléments essentiels.

Mots clés : incision - exploitation de granulats – barrage – Charge solide - affleurement de substratum – stabilisation du lit – recharge en alluvions – espace de liberté

ABSTRACT

River channel incision is a phenomenon observed in many European rivers. It has the effect of deepening the riverbed due to a reduction of sediments supply. The Loire river, which is often described as the last wild river, is not spared by this phenomenon. In its upstream part, in the Forez Plain, its hydrosystem has been profoundly disturbed. Intensive gravel extraction and the presence of the Grangent dam have deprived it from a large quantity of its alluvial deposits. A significant length of embankments and dikes prevents sediments from eroding the bank. The result has been a deepening of the riverbed by two metres over the last 150 years. The fact that the substratum (marl) shows on the surface demonstrates the bed load deficit. My work experience in the FRAPNA Loire (Rhones Alpes Federation for the Protection of the Environment), which is responsible for the management of 15 km of riverbanks in the Forez Ecozone, was aimed at conducting a geomorphologic study of the river. This study helps to understand the process which leads to river channel incision and shows a rapid deepening of the riverbed into the marl. This represents real threats: the lowering of the water table combined with a deepening of the riverbed could create shortages of drinking water and modify alluvial ecosystems. The stability of the bridges over the river could also be jeopardized. In order to be effective, the fight against this phenomenon must be conducted at several levels:

the stabilization of the riverbed by introducing weirs and an artificial armoured bed

the restocking of alluvial deposits by external supply of materials and by riverbank erosion. In this area, the definition of the river's space of freedom, the upkeep of vegetation and a better management of the dam's waterflows are major factors.

Key words : Channel incision – Gravel extraction – Dam – Bed load - Stabilization of the riverbed - Restocking of alluvial deposits - River's space of freedom

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ACE Action Communautaire pour l'Environnement

CORA Centre Ornithologique Rhône-Alpes

DDAF Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt

DDE Direction Départementale de l'Équipement

DIREN Direction Régionale de l'Environnement

DRIRE Direction Régionale de l'Industrie de la Recherche et de l'Environnement

EMSE Ecole des Mines de Saint Etienne

FRAPNA Fédération Rhône-Alpes de Protection de la Nature

LPO Ligue pour la Protection des Oiseaux

FEDER Fond Européen de Développement Régional

LIFE L'instrument financier pour l'Environnement

SDAGE Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

SIEL Système d'Information sur l'Évolution du Lit de la Loire

SIG Système d'Information Géographique

UE Union Européenne

WWF World Wildlife Found

INTRODUCTION

De nombreuses rivières européennes sont concernées par des problèmes d'enfoncement du lit, conséquence des extractions de granulats, de la déprise rurale qui a conduit les versants à produire de moins en moins de sédiments, et de l'effet des barrages piégeant les sédiments immédiatement à l'amont. La Loire forézienne est particulièrement touchée par ce phénomène d'incision. En effet, sur le site de l'Ecozone du Forez situé à environ 30 kilomètres en aval du barrage de Grangent, sur la Loire supérieure, le fleuve voit son fonctionnement hydrologique et morphologique perturbé par l'influence de cet ouvrage, et par l'exploitation intensive de ses alluvions dont il a été l'objet. En 150 ans, il s'est enfoncé de 1 à 2 mètres selon les secteurs. Aujourd'hui, la FRAPNA Loire (Fédération Rhône Alpes de Protection de la Nature) est gestionnaire de 400 ha de zones humides réparties le long de 14 km de fleuve entre le pont de Montrond les Bains et le pont de Feurs. Sur ce secteur appelé Ecozone. La FRAPNA a pour objectif de redonner un espace de liberté à la Loire. Ce stage de fin d'études réalisé au sein de la FRAPNA Loire à l'Ecopôle du Forez s'inscrit dans le cadre du plan de gestion 2003-2008 dont l'objectif principal est de restaurer l'hydrosystème du fleuve Loire dans l'optique d'une dynamique naturelle. Le travail se découpe en plusieurs phases: Tout d'abord une phase d'état des lieux et de diagnostic du fonctionnement hydrologique et géomorphologique permettant de caractériser le phénomène d'incision, ensuite une phase de recherche de solutions de lutte contre l'incision du lit, enfin des propositions de gestion concrètes adaptées aux problématiques de la Loire forézienne seront présentées.

CHAPITRE 1 PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL, OBJET DU STAGE ET METHODOLOGIE

1.1 PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

1.1.1 La FRAPNA région

La FRAPNA (Fédération Rhône-Alpes de Protection de la Nature) est une association régie par la loi de 1901 reconnue d'utilité publique, elle a été créée en 1971 pour défendre le parc de la Vanoise d'une amputation de 5000 ha au profit d'une station de sports d'hiver. Elle compte aujourd'hui 8 sections départementales autonomes: Ain, Ardèche, Drôme, Isère, Loire, Rhône, Savoie, Haute-Savoie, fédérées au sein d'une section régionale. Une charte définit les objectifs auxquels adhèrent l'ensemble des sections départementales.

Ces objectifs sont :

- Empêcher la destruction des milieux naturels
- Préserver la biodiversité dans le cadre d'un développement durable
- Favoriser l'information, la sensibilisation et l'éducation à l'environnement

La FRAPNA, reconnue d'utilité publique, agit en partenariat étroit avec d'autres associations comme le Centre Ornithologique de Rhône Alpes (CORA) ou la Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO), et adhère à la fédération nationale des associations régionales de protection de la nature: France Nature Environnement.

1.1.2 La FRAPNA Loire

La FRAPNA Loire, association de loi 1901 a été créée en 1984. Elle compte environ 500 adhérents, une vingtaine d'associations membres, et emploie 17 salariés (cf Annexe 1 : organigramme). Son siège social se trouve à la maison de la nature à Saint Etienne. Elle possède un bâtiment annexe : La Nef de l'Ecopôle du Forez à Chambéon et gère la Maison de la Réserve à Saint-Victor/Loire.

Ses objectifs sont :

- Protéger les milieux naturels et les paysages ligériens
- Sensibiliser le public pour l'éducation à l'environnement
- Veiller à l'application des lois et réglementations environnementales

Ainsi, la FRAPNA Loire adhère aux objectifs globaux de la charte régionale, mais ceux-ci ont été adaptés aux problématiques départementales.

Ses moyens d'actions :

- Concertation avec les pouvoirs publics et les collectivités locales
- Participations aux commissions départementales officielles et aux enquêtes publiques
- Sensibilisation et information du public par des publications, animations, conférences et expositions.
- Inventaires et études scientifiques
- Acquisition de parcelles possédant un fort intérêt écologique.

1.1.3 Le projet Ecopôle / Ecozone

1) historique

La constatation des nombreux dysfonctionnements de l'hydrosystème liés notamment aux endiguements, extractions en lit mineur, déficit d'apports solides bloqués dans la retenue de Grangent, a conduit la FRAPNA Loire à engager une réflexion autour de la gestion du fleuve.

En 1987, l'association achète 11 ha d'anciennes gravières sur la commune de Chambéon. L'objectif principal était la création d'un pôle d'observation de l'avifaune et de réhabilitation des milieux fluviaux. C'est à cet endroit que sera construit plus tard, le bâtiment de l'Ecopôle du Forez.

En 1988-89, 150 ha de terrains sont donnés à la FRAPNA Loire par les trois sociétés de graviéristes dans le but de les réhabiliter. D'importants travaux de réaménagement des gravières en eau sont alors réalisés (création de triples berges, adoucissement des pentes, plantations...)

En 1990, une ACE (Action Communautaire pour l'Environnement) est signée avec la CEE (Communauté Economique Européenne) pour la période 1991 – 1996. Cette ACE avait pour vocation d'acquérir, de réhabiliter et de gérer 750 ha de milieux fluviaux entre Montrond les Bains et Feurs, et de redonner un espace de liberté au fleuve. Ce projet est baptisé « **Ecozone** ». L'Etat s'engage à donner au site le statut de zone spéciale de conservation du Réseau Natura 2000 et à opter en accord avec la FRAPNA Loire pour la création juridique d'une réserve naturelle : ce statut de réserve naturelle n'est toujours pas reconnu.

En 1993, la Nef d'observation du bâtiment de l'Ecopôle du Forez a été ouvert au public. Une muséographie, une mare pédagogique et un sentier de découverte ont été aménagés.

Parallèlement, un contrat LIFE baptisé « Loire Nature » a été signé par Espaces Naturels de France, WWF-France (World Wildlife Funds), et l'Etat français pour la période 1993-1999. Ce type de contrat : L'Instrument Financier pour l'Environnement (LIFE) créé par l'Union Européenne vient soutenir les initiatives locales dans le domaine de la protection de la nature et des habitats. L'objectif du programme LIFE Loire Nature est de préserver un espace de liberté pour la Loire et l'Allier.

En 1994, le gouvernement français adopte le Plan Loire Grandeur Nature. Il a pour but de concilier développement économique, sécurité des personnes vis à vis des inondations et préservation des milieux naturels.

En 2000 le programme LIFE a été renouvelé pour 6 ans et intégré au volet restauration de la diversité écologique du milieu du Plan Loire Grandeur Nature. L'Ecopôle du Forez devient opérateur Loire Nature.

Toutes les actions menées sur l'Ecozone doivent répondre aux exigences du SDAGE Loire Bretagne créé en 1996.

2) Partenaires, acteurs et financements

Le projet et les actions de l'Ecopôle et de l'Ecozone ont été réalisés grâce à de nombreux partenaires :

- L'Union européenne : jusqu'en 1996, elle agissait à travers l'ACE n°2242/90/02-7. Aujourd'hui, elle agit à tous les niveaux à travers des financements accordés par le FEDER.

- Les institutionnels : Ministère de l'environnement, conseil général et régional. Ces organismes participent au financement des actions de l'Ecopôle / Ecozone.
- Les services techniques de l'Etat : DDE DDAF, DRIRE, DIREN. Ces structures ont apporté les moyens techniques d'aménagement et de réhabilitation du site ainsi qu'une participation financière.
- Les carriers : Morillon Corvol, Montagne, Delage, Sograma
Ces entreprises ont rétrocédé des gravières en fin d'exploitation , Morillon Corvol a financé les études de réhabilitation du site et une partie du suivi scientifique.
- Les mécénats privés : Galeries Lafayette (pour le suivi castor), Patagonia, EDF/GDF (enterrement de lignes électriques), WWF.
- Les financiers : Crédit Agricole
- Les associations : WWF (World Wildlife Funds), LPO (ligue pour la protection des oiseaux), CORA (Centre Ornithologique Rhône Alpes), SSNLF (Société des Sciences Naturelles Loire Forez), CPSFV (Club de Pêche Sportive Forez Velay)

3) Objectifs des plans de gestion

Un premier plan de gestion a été mis en place pour la période 1997-2001. Il présentait différents volets :

- Un volet accueil du public
- Un volet milieux naturels qui comportait plusieurs objectifs classés à court, moyen ou long termes et visant à :
 - Augmenter la capacité d'accueil de la faune et de la flore
 - Poursuivre les études et les suivis scientifiques
 - Restaurer le fleuve Loire dans l'optique d'une dynamique fluviale naturelle

Le deuxième plan de gestion appelé Plan Pluriannuel d'Actions (PPA) actuellement en cours pour la période 2003-2008 conserve pour objectif à long terme celui de **Restaurer l'hydrosystème du fleuve Loire dans l'optique d'une dynamique fluviale naturelle** et en fait son objectif principal.

Les objectifs à long terme du plan de gestion 2003-2008 sont ainsi définis :

- Objectifs relatifs à la conservation du patrimoine

- Objectif principal : **Restaurer l'hydrosystème du fleuve Loire dans l'optique d'une dynamique fluviale naturelle**
- Protéger les biotopes alluviaux et restaurer leurs fonctions naturelles
- Accroître la diversité écologique et l'attractivité du site
- Objectifs relatifs à l'accueil du public, à la pédagogie et à la gestion du milieu naturel
 - Mettre en place une organisation optimale de gestion et de suivi du site
 - Comprendre le fonctionnement écologique en poursuivant les études et les suivis scientifiques
 - Contrôler l'accueil du public afin de rendre la fréquentation du site compatible avec des objectifs de conservation du patrimoine naturel
- Objectifs de fonctionnement global
 - Programmer et maîtriser les actions pour une gestion durable du site
 - Favoriser les relations avec l'extérieur

1.2 OBJET DU STAGE

L'objectif de ce stage est de réaliser une étude géomorphologique permettant de comprendre la dynamique sédimentaire, de qualifier le phénomène d'incision du lit de la Loire et les processus qui y conduisent, de proposer des moyens de lutte concrets, qui permettront de stopper ce phénomène et de recharger en partie le stock alluvial.

1.2.1 Définition du phénomène d'incision

L'incision désigne un abaissement du lit des cours d'eau par surcreusement. Une réduction importante des apports sédimentaires est l'origine principale de ce surcreusement.

1) Les principales causes

L'incision du lit résulte de la conjugaison de nombreux facteurs naturels et anthropiques.

a Facteurs naturels : influence des variations climatiques

La dynamique fluviale est contrôlée par deux variables fondamentales qui sont le débit liquide Q et le débit solide Q_s , soit les flux en eau et en sédiments.

Ces deux variables sont les moteurs de la dynamique fluviale et peuvent subir des changements de régime au gré des variations climatiques.

Une période de refroidissement comme le Petit Age Glaciaire s'est traduite par une augmentation des débits liquides et solides, une accentuation du phénomène de tressage, un élargissement de la bande active et un exhaussement du plancher alluvial.

Une période de réchauffement climatique comme celle que nous traversons aujourd'hui induit une baisse de Q et Qs, et une augmentation du phénomène de creusement des lits fluviaux.

A l'échelle des temps géologiques, les cours d'eau ont subi de fortes variations de régime hydrologique et sédimentaire à l'origine de la formation des terrasses alluviales.

b Facteurs anthropiques

A ces variations naturelles du débit solide, il faut ajouter les aménagements anthropiques qui pour bon nombre d'entre eux se traduisent par une diminution des apports en charge solide.

L'hydrosystème dans la Loire forézienne est très perturbé par ces aménagements. Tous les éléments se conjuguent pour réduire considérablement les flux de sédiments. Le barrage de Grangent, construit en 1957, bloque les apports solides, l'exploitation intensive du matériel alluvionnaire en lit mineur et en lit majeur depuis les années 50 a privé la Loire d'au moins 20 millions de m³ de sédiments (SOGREAH, 1996), un linéaire important de digues et d'enrochements empêche l'érosion des berges, et donc la recharge en sédiments.

2) Les principales conséquences

Sur la Loire forézienne, le résultat de ce déficit en charge solide est un enfoncement du fond du lit de 2 mètres en 150 ans.

Voir paragraphe n° « Etude des profils en long »

a Conséquences écologiques

L'incision du lit entraîne une baisse du niveau de la nappe d'accompagnement, et par ce biais, une modification des peuplements végétaux et une déconnexion des annexes hydrauliques.

L'absence de sédiments a mis à jour le substratum tertiaire (marnes vertes), entraînant une réduction des habitats aquatiques ainsi que l'apparition de seuils difficilement franchissables pour certaines espèces piscicoles.

b Conséquences socio-économiques

L'abaissement du niveau de la nappe peut, à terme, entraîner une réduction de la productivité des captages d'eau potable. On peut citer l'exemple de la Ville d'Andrézieux-Bouthéon située à quelques kilomètres en amont du secteur d'étude et qui aujourd'hui ne peut plus puiser dans la nappe alluviale. Elle doit s'alimenter directement dans la Loire, ce qui suppose des traitements beaucoup plus coûteux pour potabiliser cette ressource.

De plus, l'enfoncement du lit peut provoquer une déstabilisation des ouvrages de franchissement du fleuve, comme cela a été le cas pour le pont Wilson à Tours en 1978.

1.2.2 Contexte

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'objectif principal à long terme du dernier plan de gestion : « Restaurer l'hydrosystème du fleuve Loire dans l'optique d'une dynamique fluviale naturelle ». Le retour total à une dynamique fluviale naturelle est peu envisageable compte tenu de l'état d'artificialisation des milieux. Cependant, la lutte contre le phénomène d'incision répond partiellement à cet objectif dans la mesure où elle passe par le rétablissement d'un transport solide et d'une dynamique latérale active.

Ce stage répond au principe initial qui a prévalu lors de la création de l'Ecozone, et aux objectifs du Plan Loire Grandeur Nature, à savoir redonner un espace de liberté pour la Loire. Cependant l'espace de liberté n'a jamais été défini au sens fonctionnel du terme. Il doit s'intégrer à cette étude car il constitue un élément primordial pour un fonctionnement « plus naturel » de l'hydrosystème, pour la recharge du stock alluvial et pour la lutte contre l'incision du lit.

Le travail est réalisé en collaboration étroite avec l'Ecole des Mines de Saint Etienne et la Direction Départementale de l'Equipeement de la Loire. Ces deux organismes vont être amenés à réaliser des investigations sur l'incision du lit mais à plus grande échelle (secteur située entre les barrages de Grangent et de Villerest). Le travail réalisé au cours de ce stage pourra par la suite être intégré à cette étude, et l'Ecozone du Forez pourrait servir de chambre expérimentale à ces recherches. Il s'avère donc indispensable d'harmoniser les méthodes de travail et d'utiliser les mêmes logiciels de traitement des données.

1.3 METHODOLOGIE

Les variations géomorphologiques sont analysées en se référant aux changements de régime du moteur de la dynamique fluviale, c'est à dire les variations relatives des flux d'eau (Q) et de sédiments (Qs), (Schumm, 1977)

Il s'agit donc d'étudier les modifications de ces paramètres qu'on appelle variables de contrôle, et les adaptations morphologiques opérées par le cours d'eau en réponse à ces variations.

Etude des variables de contrôle :

Variables de contrôle majeures

- La modification du **débit liquide Q** sera analysée à travers une synthèse des données existantes sur le régime de la Loire, l'historique de ses crues, et les aménagements qui ont conduit à modifier le fonctionnement hydrologique naturel.
- Le **débit solide Qs** est beaucoup plus difficile à analyser car les données sont moins nombreuses. Il a été estimé grâce à la formule de Meyer Peter

Variables de contrôle secondaires

- La **pente** de la vallée va conditionner la vitesse du courant, et donc la capacité érosive. Des profils en longs réalisés à différentes époques permettent de calculer la pente.
- La **granulométrie du fond et des berges** va conditionner le débit de début d'entraînement, c'est à dire le débit à partir duquel les matériaux vont pouvoir être mobilisés. Ce paramètre est donc déterminant pour la dynamique du fleuve. Des courbes granulométriques sont disponibles auprès des carriers et d'EDF (barrage de Villers). Elles permettent d'avoir des données précises sur les caractéristiques des sédiments, mais des investigations de terrain permettent d'observer à plus petite échelle les phénomènes de pavage ou d'absence de matériel alluvial.
- La **végétation des berges** constitue un élément stabilisant. Son évolution est observable par comparaison du linéaire de ripisylve sur les photographies aériennes de 1946 et de 2004, ainsi que par des prospections sur le terrain.

Etude des variations morphologiques

Les adaptations morphologiques du cours d'eau s'observent à travers des éléments qu'on appelle variables de réponse dont les principales sont :

- Le tracé en plan
- Le profil en long
- La géométrie du profil en travers et notamment le rapport largeur/profondeur

Pour étudier l'évolution du tracé en plan, nous disposons de nombreux documents cartographiques et photographiques. Leur analyse se fait par superposition des différents tracés au moyen d'un SIG (Système d'Information Géographique), ce qui permet le croisement de données indispensables pour réaliser le diagnostic morphodynamique. Le logiciel utilisé est ArcMap version 8.3, logiciel utilisé par la FRAPNA Loire, et l'EMSE. Il permet des passages faciles avec Arcinfo, autre logiciel de SIG utilisé par l'EMSE. Les logiciels Arcinfo et Mapinfo ont été utilisés ponctuellement pour traiter certains documents, mais le rendu final de toutes les cartes est au format Arcmap version 8.3.

Les documents les plus récents sont nombreux et n'ont pas tous été sélectionnés.

La carte de Cassini constitue le document le plus ancien dont nous disposons. Elle peut permettre de localiser certains anciens lits, mais elle n'est pas d'une grande précision.

Les documents retenus sont :

- La carte au 1 :20 000 de 1849 réalisée par le ministère des armées suite aux grandes inondations de 1846.
- La couverture aérienne de 1946 (IGN), première photographie aérienne réalisée avant les plus fortes perturbations de l'hydrosystème.
- La couverture aérienne de 1980 (IGN), témoin de l'époque où l'exploitation de granulats était à son apogée.
- La couverture aérienne de 1991 (IGN)
- Les orthophotoplans de 2001 (IGN)
- Une campagne de photographies aériennes réalisée en juillet 2004 (Maison de la Télédétection, Cémagref)

Les campagnes de photographies aériennes de 2001 et de 2004 permettent d'encadrer la crue de décembre 2003, et ainsi d'en observer les effets et le fonctionnement.

Pour l'évolution du profil en long, nous disposons de 4 profils en long permettant d'évaluer l'enfoncement du lit et l'ajustement de la pente. Ils ont été réalisés à différentes périodes :

- 1856, profil en long réalisé par le Syndicat des Dignes
- 1921, profil en long réalisé par l'IGN
- 1995, profil en long réalisé par la DDE 42 dans le cadre d'une étude géomorphologique de la Loire dans le département de la Loire.
- 2004, profil en long réalisé par l'Ecole de Mines de Saint Etienne au moyen d'un GPS différentiel, lors d'une descente de la Loire en canoë. Ce dernier permet d'avoir une très grande précision et d'observer toutes les irrégularités de la pente (enregistrement de 1 point toutes les secondes)

Le manque de profils en travers anciens ne permet pas d'observer nettement les changements de géométrie du cours d'eau. Les observations de terrain constituent les principales sources de données sur les ajustements de la géométrie. Des profils en travers réalisés sur la base d'un modèle numérique de terrain et du logiciel 3 D analyst permettent d'obtenir des profils en travers des berges et du lit majeur, mais pas du fond du lit car c'est la ligne d'eau qui est référencée sur le Modèle Numérique de Terrain.

L'étude des unités écologiques peut permettre de mettre en évidence les dysfonctionnements de l'hydrosystème.

La réalisation d'une carte des unités morphologiques selon la typologie Loire nature récemment mise en place par le SIEL (Système d'Information sur l'Evolution du lit de la Loire) constituera un point de départ au suivi des évolutions de la géomorphologie fluviale. Cette carte a pour base la campagne de photographies aériennes réalisée en juillet 2004, et peut être comparée avec les orthophotoplans de 2001.

La définition d'un espace de liberté permet aussi bien d'apporter des éléments de diagnostic que des éléments de lutte contre l'incision du lit puisque ce principe permet une recharge en sédiments par l'érosion des berges. Les éléments de diagnostic nécessaires à la définition de l'espace de liberté figurent dans le chapitre 2 et la définition des enveloppes de l'espace de liberté dans le chapitre 3. Celles-ci ont été déterminées selon la méthode du guide technique n°2 de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse : Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau.

Le présent rapport comporte une dimension européenne. Aussi, les propositions de gestion énoncées dans le troisième chapitre s'appuient sur quelques expériences européennes de lutte contre l'incision des grands fleuves. Cette partie a donc nécessité une grande part de bibliographie et de contact avec d'autres gestionnaires de cours d'eau aux problématiques similaires. Elle présente une analyse des possibilités d'adaptation des différentes techniques au cas de la Loire. Les estimations sommaires des coûts d'interventions se basent sur les expériences d'autres gestionnaires et sur des grilles coût.

CHAPITRE 2 ETAT DES LIEUX ET DIAGNOSTIC

2.1 CARACTERISTIQUES GENERALES DU BASSIN VERSANT DE LA LOIRE AU NIVEAU DE L'ECOZONE

2.1.1 Caractéristiques physiques

1) Localisation et délimitation de la zone d'étude

L'Ecozone se situe en plein cœur de la plaine du Forez, à 30 km au nord de Saint Etienne et 50 km au sud de Roanne. Ce secteur appartient à la Loire supérieure. Le fleuve s'y écoule selon un tracé sud-nord après avoir parcouru 169 km, de la source au barrage de Grangent, dans des gorges assez profondes. Au sortir du barrage de Grangent, la Plaine du Forez s'étend sur une longueur de 45 km jusqu'aux Gorges de Villerest. Elle est encadrée à l'ouest par la barrière montagneuse des Monts du Forez (1640 m), et à l'est par les Monts du Lyonnais. Son altitude est comprise entre 320 et 350 m NGF. (Voir carte 1 : Localisation de l'Ecozone du Forez).

L'Ecozone se trouve à 25 km environ en aval du barrage de Grangent. Elle s'étend de Marclopt à Feurs et concerne six communes :

- Feurs
- Saint-Laurent La Conche
- Magneux Haute Rive
- Marclopt
- Chalain Le Comtal
- Chambéon

La Loire traverse l'Ecozone sur environ 12,5 km de son cours. Par extension, on considérera plus souvent les ponts de Montrond les Bains (RD 496) et de Feurs (RN 89) comme étant les limites de la zone d'étude, soit une longueur développée du fleuve de 14,5 km.

A ce niveau, le fleuve est large de 60m et profond de 1 à 3 mètres.

2) Contexte climatique

Le climat de la plaine du Forez se caractérise par une dominante continentale due essentiellement au rôle de barrière des reliefs qui la ceinturent de toutes parts. La température moyenne annuelle est modérée ($11,4^{\circ}\text{C}$) tandis que l'amplitude entre le mois le plus froid et le mois le plus chaud est élevée ($17,7^{\circ}\text{C}$) (Voir figure 1: Diagramme ombrothermique). Sur la bordure orientale du Massif Central, les Monts du Forez constituent une barrière topographique aux grands flux d'Ouest. Sur les hauts sommets se déversent 1500 mm d'eau par an, asséchant ainsi les masses d'air (effet de Föhn) qui n'apportent plus que 700 mm de précipitations par an lorsqu'elles traversent la plaine du Forez. Le maximum des pluies survient en été en raison des orages et des averses de forte intensité.

L'encaissement de la plaine du Forez tend à renforcer les contrastes saisonniers. L'été comporte de nombreuses journées à chaleur pesante et étouffante (température supérieure à 30°C 29 jours/an), alors que l'hiver laisse fréquemment apparaître, un brouillard épais, et des températures très froides (80 jours de gel par an en moyenne).

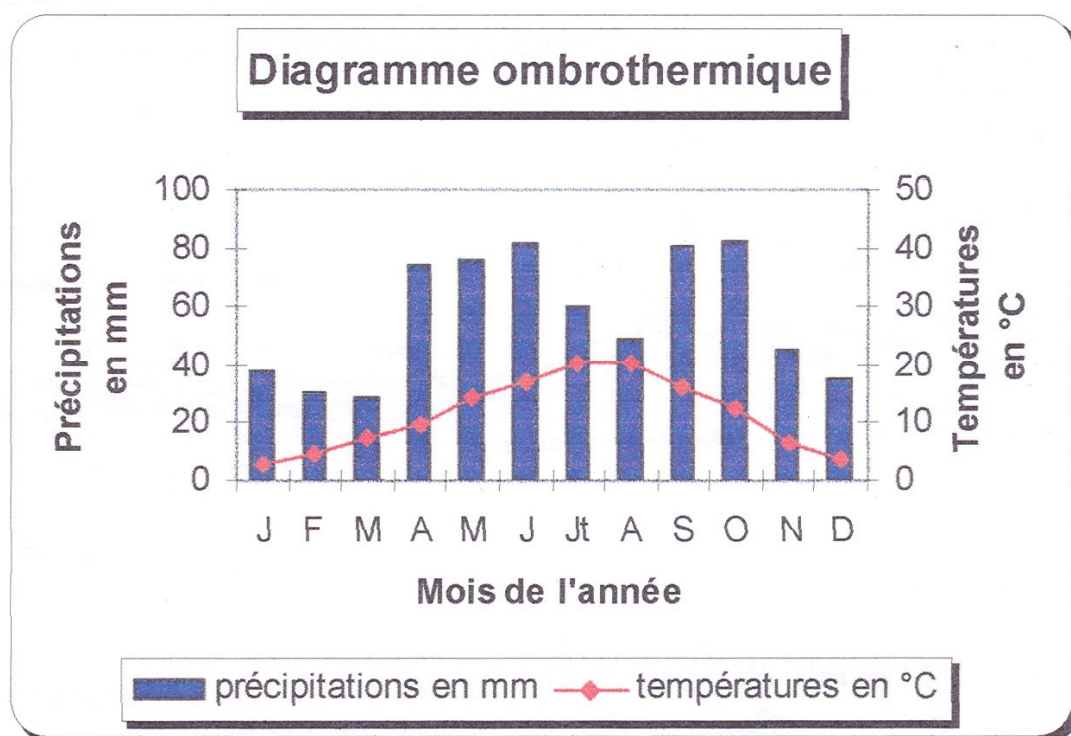


Figure n°1: Diagramme ombrothermique de la station météorologique de Feurs
Source : Météo France

3) Géologie et hydrogéologie

a Géologie

Voir carte 2 : Géologie de l'Ecozone

La plaine du Forez est un fossé d'effondrement tertiaire. Sous l'effet de la surrection alpine, les Monts du Forez se sont exhaussés, et la plaine, couverte d'un système lacustre s'est alors enfoncée, tout en se remblayant de sédiments argilo-sableux épais (marnes vertes également appelées « lauzes », et grès rouge).

Au cours du quaternaire, la Loire a déposé les produits d'érosion de l'amont, et s'est incisée dans ces terrains, formant un système de terrasses essentiellement développées en rive droite du fleuve.

La coupe type de la vallée présente les éléments suivants :

- Des terrasses alluviales anciennes, perchées, totalement séparées de la Loire actuelle (14 mètres au droit de Montrond les Bains)
- Un escarpement où affleurent à la base les formations tertiaires, qui constituent un point dur limitant la vallée actuelle de la Loire
- La plaine alluviale formée d'un matelas sablo-graveleux de l'ordre de 2,5 à 6 mètres d'épaisseur
- Le lit mineur de la Loire, large de 100 mètres en moyenne et qui se trouve directement sur les formations tertiaires ou sur un matelas alluvial de faible épaisseur (de l'ordre de 1m)
-

b Hydrogéologie

Aquifère des formations tertiaires :

Dans la Plaine du Forez, seuls les sables de Poncins peuvent être considérés comme potentiellement aquifères. Cette formation correspond à des horizons sableux intercalés dans des séries argileuses. Elle est présente sur la commune de Magneux Hautes Rives, mais pas sur le secteur d'étude. Les marnes vertes, essentiellement constituées d'argiles ne sont pas perméables.

Aquifère des alluvions récentes :

Les principales ressources en eau se trouvent dans les formations alluviales quaternaires. Une campagne de mesure réalisée en mai 1995 par SOGREAH à l'occasion d'une étude

géomorphologique a pu mettre en évidence une alimentation de la nappe provenant des alluvions anciennes des coteaux. La Loire draine donc l'aquifère alluvial, en particulier en période de hautes eaux de la nappe (février). Le gradient piezométrique est de 7‰ environ suivant la direction principale d'écoulement souterrain : perpendiculairement au fleuve.

Ce secteur se caractérise par une épaisseur de remplissage de 5 à 7 mètres au dessus du substratum tertiaire imperméable. La faible épaisseur d'alluvions en tous points du profil en long indique que la pente du toit du substratum suit la pente du lit de la Loire. La hauteur d'alluvions mouillées lors de l'étiage de la nappe (automne) est généralement inférieur à 2 mètres. (Allignol, 1997 ; CPGF, 1976-1978).

Vulnérabilités de la nappe :

Cet aquifère est très vulnérable tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif.

D'un point de vue qualitatif, elle peut être sujette à des pollutions directes ou indirectes (à partir des eaux de la Loire, notamment en période de crue).

D'un point de vue quantitatif, l'abaissement du lit entraîne une augmentation du drainage de la nappe et donc, une réduction de l'épaisseur mouillée.

D'autre part, le colmatage de la Loire et les protections de berges ont pour effet de diminuer les échanges entre la nappe et le cours d'eau, et les possibilités d'alimentation de la nappe par la Loire en période de hautes eaux du fleuve.

Une campagne de levées piezométriques complète de la plaine du Forez a été réalisée en 1970. Il existe un écart systématique de 1 mètre avec les mesures effectuées par SOGREAH en 1995. Ces observations mettent en évidence un abaissement du toit de la nappe, mais ne reflètent que d'un état ponctuel de la nappe (Les mesures n'ont pas été réalisées dans les mêmes conditions)

Depuis 1998, des piézomètres ont été installés, mais la période d'étude est trop courte pour permettre de tirer des conclusions. Les observations qualitatives sur la déconnexion des annexes hydrauliques et sur la baisse de productivité des captages permettent de confirmer que le niveau de la nappe s'est effectivement abaissé.

4) Réseau hydrographique et hydrologie

a Réseau hydrographique

(Voir carte 3 : réseau hydrographique)

La Loire traverse le département du Sud au Nord selon un tracé légèrement sinueux. Il existe une opposition marquée entre les affluents des deux rives due à la différence d'ampleur des reliefs. Les affluents rive gauche provenant des Monts du Forez (La Mare, le Lignon et l'Aix) ont un régime pluvio-nival marqué avec deux maxima : L'un en automne suite aux pluies orageuses de forte intensité, l'autre au printemps, lors de la fonte des neiges parfois brutale. Les affluents rive droite provenant des Monts du Lyonnais (La Coise, La Toranche et la Loise) présentent des crues moins violentes et des étiages plus sévères. Leur tracé est plus stable, et les apports de versants sont plus faibles.

Sur le secteur de l'Ecozone, la Loire ne reçoit pas d'affluent susceptible de modifier son régime de manière significative. Ce sont pour les principaux :

- Le Gand en rive gauche
- La Toranche et le Garollet en rive droite.

Le réseau hydrographique est plus dense en rive droite qu'en rive gauche mais est plutôt constitué de petits ruisseaux.

En revanche, à l'amont immédiat de l'Ecozone, se trouve le secteur des « trois becs ». Avec en rive gauche le bec de Mare, et en rive droite la Coise et l'Anzieux (Affluent de la Coise). La Mare présente un module plus faible que celui de la Coise, mais une dynamique plus active et un potentiel plus important en terme d'apports solides. Ce secteur fera l'objet d'une attention particulière dans cette étude car il présente une dynamique importante et influence fortement l'Ecozone de par sa situation amont. Le Lignon et la Loise rejoignent la Loire en aval de l'Ecozone.

b Hydrologie

Caractéristiques générales

La Loire supérieure se situe à un carrefour d'influences climatiques, ce qui rend son régime hydrologique extrêmement variable. Le régime est de type pluvial avec des dates d'occurrences des minima et des maxima très différentes d'une année sur l'autre et des débits moyens mensuels très irréguliers selon les années.

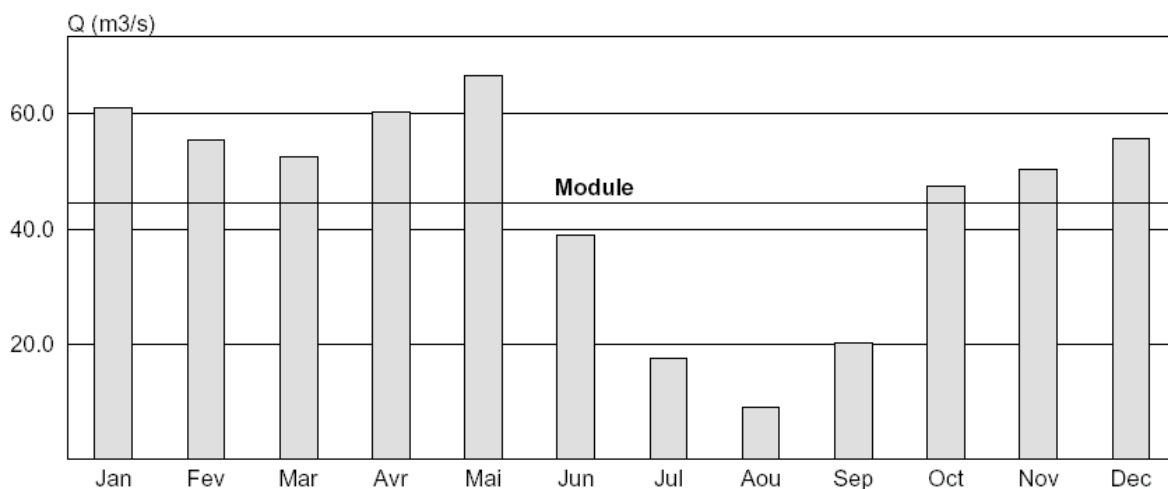


Figure n°2 : Débits moyens mensuels de la Loire à Montrond les Bains
Source : DIREN Rhône-Alpes (calcul sur 18 années)

Régime moyen

Le module de la Loire à la station de Montrond les bains est de 44,5 m³/s, 45,7 m³/s à Feurs (DIREN Rhône Alpes _ module calculé sur 18 années). A Montrond, le bassin versant couvre une surface de 4832 km², ce qui fait un débit spécifique de 9,2 L/s/km²

Les crues de la Loire

La caractéristique majeure de la Loire supérieure est la double origine de ses crues :

- Les crues d'origine méditerranéenne ou crues cévenoles, caractérisées par une montée des eaux subites et une décroissance presque aussi rapide.
- Les crues mixtes résultant de la conjonction des pluies océaniques et des pluies cévenoles ou des pluies océaniques et de la fonte des neiges : Leur concomitance occasionne les crues les plus importantes de la Loire.

Les crues océaniques pures n'influencent pas la Plaine du Forez.

Hydrogramme type

Les très grandes crues arrivent principalement en automne par la conjonction des pluies cévenoles et océaniques. Ces crues donnent généralement un hydrogramme aux caractéristiques suivantes :

- Temps de montée des eaux de 22 heures
- Débit stable au voisinage du maximum pendant 5 heures environ
- Durée totale de crue de l'ordre de 50 heures

Cependant, ces caractéristiques sont à considérer avec précaution car deux crues différentes n'ont jamais le même hydrogramme.

Débits caractéristiques

Le tableau suivant présente les débits journaliers des crues de période de retour 2, 5, 10, 25, 30, 50 et 100 ans. (Une crue de période de retour 2 ans (Q2) est une crue qui chaque année a une chance sur 2 de se produire)

	Station de Montrond les Bains	Station de Feurs
Q2 (m ³ /s)	420	410
Q5 (m ³ /s)	630	610
Q10 (m ³ /s)	770	740
Q25 (m ³ /s)	2200	
Q30 (m ³ /s)	2850	
Q50 (m ³ /s)	4400	
Q100 (m ³ /s)	5600	

Tableau n°1 : Débits caractéristiques de la Loire aux Stations de Montrond les Bains et Feurs
Source : DIREN de Bassin _ DIREN Rhône-Alpes _ Agence de l'eau Loire Bretagne

Historique des crues

Avant le XVIII^{ème} siècle

Il existe dans des chroniques et des cahiers de doléances quelques données très imprécises sur les événements antérieurs au XVIII^{ème} siècle. Par exemple, « la crue de 1508 qui fut un désastre à la Petite Motte (amont de Feurs), où 15 maisons furent emportées ». (Crépet F., 1997). Il semblerait que de nombreuses crues de ce type se soient produites sans qu'on en connaisse les caractéristiques.

Au cours du XVIII^{ème} siècle

En 1711, un ouvrage hydraulique important a été édifié. Situé à l'entrée des Gorges de Villerest, la digue de Pinay est en réalité un barrage à perthuis destiné à inonder la plaine du Forez, espace à l'époque très peu anthropisé, de manière à stocker les eaux de crue et à préserver l'aval.

La fin du XVIII^{ème} siècle est marquée par de très importants épisodes de crues, les principaux étant ceux des 10 et 11 novembre 1790 et du 3 mars 1795, qui malgré le manque

de données laissent envisager ces évènements comme les plus violents jamais survenus à l'échelle historique sur la Loire amont (temps de retour 200 ans) (Crépet F., 1997)

« Lors de la crue de 1790, à Bigny sur la rive gauche au niveau de Feurs, la rivière a déplacé son lit de 600 m vers l'Ouest. Le niveau des eaux se situait 20 pieds au dessus de son niveau habituel causant des dégâts considérables à Cléppé, la Motte, Bigny, Magneux Hautes Rives... »

Le XIXème siècle

La première moitié du XIXème a connu une accalmie en matière d'inondations, puis la fin de ce même siècle a été marquée par une période de forte hydraulicité. Les grandes crues de 1846, 1856, 1866 ont dépassé les débits de la crue centennale et sont à l'origine des premières mesures de hauteurs d'eau et de cartographies très précises du lit de la Loire. D'autres évènements importants ont marqué cette fin de siècle au cours des années 1875, 1878, 1888, 1891, 1898, pour ne citer que les principaux. Cette période de torrencialité accrue semble correspondre à une augmentation de la pression anthropique sur le haut bassin versant, associée à d'importants déboisements susceptibles d'accélérer les écoulements, et combinés à des phénomènes climatiques importants.

Avec les grandes crues du XIXème siècle, la philosophie d'aménagement du cours d'eau va radicalement changer. On va chercher à « domestiquer » le fleuve de manière à se protéger des inondations. Un syndicat des digues est créé et de nombreuses levées sont édifiées.

	Boucle de Marclopt	Moriaud
Ligne d'eau d'étiage cote NGF (m)	336,98	329,46
Crue 1846 cote NGF (m)	342,80	341,25
Variation de la hauteur d'eau (m)	+ 5,82	+ 11,79

	Boucle de Marclopt	Moriaud
Ligne d'eau d'étiage cote NGF (m)	336,98	329,84
Crue 1856 cote NGF (m)	341,72	334,07
Hauteur d'eau (m)	4,74	4,23

	Boucle de Marclopt	St Laurent la Conche	Villeneuve
Ligne d'eau d'étiage _ cote NGF (m)	336,54	334,26	332,3
Crue 1866 cote NGF (m)	341,37	338,39	342,52
Hauteur d'eau (m)	4,83	4,13	10,22

Tableau n°2 : Cotes des crues de 1846, 1856, 1866 sur l'Ecozone

Source : Ministère des armées, fin XIXème

La crue de 1846 est aujourd'hui la crue de référence servant à délimiter le champ d'inondation, mais il semble que celle-ci n'est pas été la plus importante.

Le XXème siècle

La période de forte hydraulité de la fin du XIXème se poursuit au début du XXème avec les crues marquantes de 1907 et 1913. En revanche, depuis les années 20, une raréfaction des épisodes d'inondations est observée. Les principaux événements se sont produits dans les années 1933, 1943, 1973, 1976, 1980, 1994, 1996, mais leur ampleur a été bien moindre qu'au XIXème siècle.

■	1848	1907	1976	1980	1996	1999
Niveau au dessus de la ligne d'étiage (m)	6.26	6.6	4.3	5.5	4.74	2.54
Débit (m ³ /s)	4850	5000	1750	3500	2200	940
Cote NGF(m)	337.75	338.09	335.79	336.99	336.23	334.03

Tableau n°3: Hauteurs d'eau et débits de quelques crues de la Loire à la station de Montrond les Bains (331.49 m NGF)

La première crue importante du XXIème siècle est celle des 2 et 3 décembre 2003, assimilable à une trentennale, elle a atteint un débit de 2422 m³/s à la station de Feurs. L'impact de cette crue est développé dans le paragraphe 2.2.2.

Les étiages

La Loire possède des étiages très bas, le haut bassin de la Loire étant constitué essentiellement de massifs cristallins fissurés ou de massifs volcaniques, et les réserves alluviales de la plaine du Forez étant relativement pauvres.

	Station de Montrond les Bains	Station de Feurs
Q _{MNA5} (m ³ /s)	5,58	6,03

Tableau n°4 :Débits d'étiage de la Loire aux Stations de Montrond les Bains et Feurs
Source : DIREN Rhône Alpes

Influences des ouvrages hydrauliques

Les ouvrages hydrauliques perturbent fortement le régime hydrologique de la Loire. Ainsi, les étiages sont fortement marqués par un caractère artificiel, influencés à la fois par le débit réservé du barrage de Grangent et celui réservé au canal du Forez.

Le barrage de Grangent, mis en service en 1957, tend à réguler les crues de faible amplitude ($< Q_2$), celles qui, à long terme, sont les plus morphogènes. En revanche, il devient complètement transparent au passage des crues plus importantes. Les forts débits liquides sont donc peu modifiés, alors que la charge de fond (débit solide) reste bloquée dans la retenue. L'équilibre entre débit liquide et débit solide est rompu et la capacité érosive de la Loire dans la plaine du Forez s'en trouve augmentée. Les conséquences sur la dynamique fluviale vont se traduire par l'incision du lit, l'érosion des berges, et la modification des milieux annexes. De plus, son fonctionnement peut faire varier brusquement les débits de 2 à 200 m³/s dans la même journée, et son influence sur les niveaux d'eau se fait sentir au moins jusqu'à Feurs.

Le barrage de Feurs est un barrage mobile qui est abaissé pour un débit supérieur à 1500 m³/s, pour des raisons de sécurité. En effet, pour de tels débits, la stabilité de l'ouvrage est menacée. Il présente donc l'avantage d'être transparent au passage des sédiments en cas de crue supérieure à la crue décennale. C'est pourquoi on retrouve des bancs alluviaux à l'aval immédiat du barrage de Feurs.

2.1.2 Caractéristiques écologiques

1) Qualité de la Loire

a Qualité physico-chimique des eaux de la Loire

Les données proviennent du Ministère de l'environnement, du réseau du département et de l'agence de l'eau Loire- Bretagne. (CESAME 2003).

- D'une manière générale dans la Plaine du Forez, la Loire présente une eau oxygénée, peu minéralisée, avec une quantité de phytoplancton normale sans eutrophisation particulière. Elle ne montre pas de pollution notable par la matière organique. En revanche, les concentrations en nitrates montrent de fortes variations selon les saisons, et les teneurs en phosphates sont plus de 10 fois supérieures à la normale. La situation est correcte en ce qui concerne les

micro-polluants organiques et minéraux mais la Loire présente une contamination bactériologique importante.

- Au niveau de l'Ecozone : Sur la période 1997/1999 la qualité physico-chimique est jugée passable au niveau de l'Ecopôle à mauvaise en amont et en aval. La qualité des nitrates (10,4mg/l) et la qualité phosphore est mauvaise. Une pollution organique est observée : qualité MOOX (Matières Organiques Oxydables) moyenne et qualité AZOT (matières azotées hors nitrates) mauvaise. Les paramètres déclassants semblent être l'Azote (ammoniaque, nitrites, N Kjeldhal), et la DCO (Demande Chimique en Oxygène).

b Qualité biologique

La qualité biologique reste plutôt moyenne dans l'ensemble. Elle s'est cependant localement améliorée puisque l'IBGN (Indice Biologique Global Normalisé) la juge très bonne à l'Ecopôle mais mauvaise en amont. D'une part la mauvaise qualité de l'eau constitue un paramètre limitant. D'autre part, l'absence de matériel alluvial sur de très grandes surfaces rend la qualité de l'habitat médiocre.

2) Richesse écologique de l'Ecozone

L'Ecozone conserve un grand intérêt grâce à l'importante diversité des composantes de l'hydrosystème fluvial et à son héritage anthropique.

a Une grande diversité de milieux

La répartition des espèces végétales est très liée à la dynamique du fleuve et aux battements de la nappe alluviale. C'est pourquoi l'étude des unités écologiques constitue un élément indispensable dans l'étude de la dynamique fluviale.

Ainsi, l'Ecozone présente une mosaïque de milieux variés : Milieux aquatiques, milieux amphibies et milieux terrestres. (Voir annexe 2 : Les principales unités écologiques de l'Ecozone et les groupements végétaux associés).

Et carte n° : Les unités écologiques de l'Ecozone du Forez en 2001

Les milieux aquatiques :

Le fleuve Loire :

Le substrat de la Loire, majoritairement représenté par des affleurements de marne ou par un pavage de galets pluridécimétriques est peu propice au développement de végétaux (Voir

photo ci-dessous). La végétation du cours vif est principalement composée d'algues capables de résister au courant.



Photo n°1 : substrat constitué d'un pavage de galets



Photo n°2 : absence de matériel alluvial : affleurement continu de marne

Les annexes hydrauliques :

Il s'agit des gourds, bras morts et bras secondaires. Ces milieux sont plus ou moins connectés au fleuve. Le courant y est faible ou nul, ce qui favorise le développement des végétaux macrophytes (Elodée, Myriophylle, Cératophylle, Potamot, Renoncule aquatique...) et en fait des milieux originaux, intéressants en terme de biodiversité. Cependant, la plupart d'entre eux ont tendance à se combler. Certains bras morts, souvent situés en rive droite du fleuve le long des coteaux, ont été creusés dans la marne et ne sont pas du tout propices au développement d'une telle végétation. Ils sont alors fréquemment recouverts de lentilles d'eau.

Les gravières :

Depuis 2002, date de cessation de l'activité des gravières du Garollet, il n'existe plus de gravières en activité sur l'Ecozone hors mis un site de lavage des matériaux à Marclopt. Les anciennes gravières présentent une configuration variable selon leur âge et leur réarrangement. Leur position par rapport au fleuve les rend plus ou moins sujettes à des risques de captures ce qui entraînerait une perte supplémentaire de sédiments pour la composante alluviale du lit mineur actuel.

On trouve sur l'Ecozone une multitude de trous d'eau, anciennes petites zones d'extraction ou de décantation, souvent atterris avec développement de baldingeraies, et entourées de boisements denses. Celles-ci se différencient difficilement des gourds naturels. On distingue : des bassins très fermés avec des rives boisées et des berges raides, de grands bassins aux

formes géométriques et aux berges herbacées comme à Marclopt, et d'autres gravières complètement réaménagées avec des triples berges, des hauts fonds et des îlots comme celles de l'Ecopôle.

Milieux amphibies

Bancs de sable et de galets, grèves

Les îlots dénués de végétation sont les témoins de la dynamique active de la Loire. Lorsque le fleuve n'a pas la capacité de transporter toute la charge solide, les sables, graviers et galets se déposent, formant des bancs qui sont remodelés, déplacés et érodés en fonction de l'énergie du cours d'eau. Les espèces annuelles pionnières sont alors particulièrement abondantes. Mais ces milieux sont aujourd'hui rares sur le secteur de l'Ecozone car la capacité de transport du fleuve est bien supérieure à la charge solide disponible. Ces milieux ont donc tendance à disparaître. De plus, le maintien d'une végétation pionnière nulle ou herbacée nécessite de fréquentes périodes d'inondation, hors la régulation des petites crues par le barrage de Grangent n'y est pas favorable. Ces milieux évoluent donc rapidement vers un stade arbustif puis boisé, et ont tendance à se figer.

Communautés d'hélophytes et mégaphorbiaies hygrophiles

Les communautés d'hélophytes, communément appelées roselières sont assez peu étendues sur l'Ecozone. Une étude réalisée au cours de l'année 2004 a permis de mettre en évidence une fermeture de ces milieux. En effet, les roselières sont pour la majorité en régression, en cours d'atterrissement, ou en cours de colonisation par les ligneux et les espèces invasives (Renouée du Japon pour l'essentiel) (Souriau S., 2004). Cette étude a mis en évidence une importante progression des saulaies arbustives et des boisements tendres liée à la régulation du régime hydrique du cours d'eau. Elle met en cause l'incision du lit de la Loire et les variations brutales de débit liées au fonctionnement du barrage de Grangent qui constitue un facteur limitant le développement des espèces caractéristiques des roselières.

Milieux terrestres

Boisements à dominance de bois tendre

Lorsqu'on compare les photos aériennes de 1946 et 2004, on constate que les milieux sylvicoles se sont particulièrement développés. La ripisylve s'est étalée de manière assez continue sur une bande plus ou moins large de chaque côté du fleuve, alors qu'elle était quasiment inexistante en 1946. Les boisements de bois tendres sont représentés par la saulaie-

peupleraie dont les espèces principales sont le saule blanc et le peuplier noir *Salix alba* et *Populus nigra* à différents stades d'évolution : Stade pionniers arbustifs ou stades plus avancés avec différentes strates arbustives et arborescentes. Cette formation nécessite des inondations fréquentes pour rester à un stade dynamique juvénile. Son développement généralisé est un signe de la réduction des fréquences d'inondations, mais également de l'éloignement de la nappe alluviale.

Boisements à dominance de bois dur

Les véritables forêts de bois durs sont très rares sur l'Ecozone. En revanche, on trouve de nombreux boisements mixtes où les saules et peupliers sont encore bien présents, mais où se développent des frênes, ormes champêtres, chênes pédonculés, érables champêtres, sureau, merisiers, aulnes et quelques espèces invasives comme l'érable négundo et le robinier faux acacia. Il est probable que les forêts de bois tendres évoluent progressivement vers des forêts à dominance de bois durs du fait d'une réduction de la fréquence des inondations et de l'abaissement de la nappe alluviale liée à l'incision du lit dans les secteurs les plus éloignés du cours d'eau ou les secteurs isolés par des digues.

Friches herbacées et arbustives

Les friches herbacées colonisent les îlots et en l'absence de remaniement par les crues, elles évoluent rapidement vers un stade arbustif

Les autres unités écologiques sont plus éloignées du cours d'eau et donc moins liées à la dynamique fluviale. Il s'agit des friches herbacées et arbustives, pâture et prairie de fauche zones agricoles de grande culture

Les zones agricoles de grande culture sont peu présentes sur l'Ecozone mais très importante à la périphérie ; En revanche, les prairies ont laissées la place à des boisements denses.

Les espaces anthropisés sont liés aux anciennes exploitations de gravières, mais sont à l'abandon et tendent à disparaître

L'impact du dysfonctionnement de l'hydrosystème sur la répartition des unités écologiques est difficile à mettre en évidence. En effet, il n'existe pas de cartographie des unités écologiques antérieures à 2000. Seul l'observation du terrain et l'interprétation des photographies aériennes permettent à l'heure actuelle d'évaluer l'impact de l'incision du lit sur les unités écologiques.

b Une grande richesse floristique et faunistique

La richesse floristique et faunistique est le témoin de conditions écologiques variées ;

LA FLORE

Des espèces protégées, plantes rares, aux espèces d'intérêt local ou interdépartemental, 513 espèces de végétaux ont été recensées à ce jour (Source Ecopôle 2004). Le recensement s'enrichit en permanence avec le suivi régulier réalisé par le service « gestion et étude des milieux » de l'Ecopôle. La plupart des espèces remarquables sont liées aux milieux aquatiques, aux milieux alluviaux pionniers (grèves, zones humides) et aux milieux secs. Mais on trouve aussi des espèces intéressantes dans la ripisylve de bois tendre, les zones de friches et de remblais et dans les forêts de bois durs.

(Voir annexe 2 « principales unités écologiques de l'Ecozone avec groupement végétaux »)

LA FAUNE

Oiseaux

L'intérêt de l'Ecozone se manifeste en toute saison, en période de nidification mais surtout en période de migration et d'hivernage. Les observations régulières effectuées ont permis de recenser 234 espèces dont au moins 27 espèces rares. Le réaménagement écologique de l'Ecopôle a favorisé la progression des espèces nicheuses (65 recensées), mais il faut souligner que le fonctionnement du barrage de Grangent est néfaste pour la nidification des limicoles sur les grèves de la Loire (Chevaliers et Gravelots). Le fleuve Loire est un axe de migration privilégié pour de nombreuses espèces de passage sur l'Ecozone (143), les plus marquantes, cigognes blanches et noires, Balbuzard pêcheur. Le dortoir le plus important se situe sur l'Ecopôle.

Mammifères

38 espèces sont recensées. L'événement majeur a été le succès de la réintroduction du Castor d'Europe dans la plaine du Forez (25 à 35 individus sur l'Ecozone). La pression de chasse étant forte aux alentours, le secteur sert aussi de refuge pour de nombreux mammifères (ongulés, chevreuils, sangliers).

Poissons

Des pêches électriques ont été réalisées en 1996 par le Cemagref/EDF sur la Loire depuis l'aval de Montrond jusqu'à Epercieux-St-Paul. 18 espèces ont été retrouvées sur l'ensemble du cours prospecté. Le nombre total d'espèces n'est que de 11 à hauteur de l'Ecopôle.

Très peu de carnassiers et de gros cyprinidés sont retrouvés pas de Sandre. 7 espèces ont disparu depuis longtemps. L'Anguille, le Saumon Atlantique, la Lamproie marine ne remontent plus jusqu'à hauteur de l'Ecozone en raison des barrages de Villerest et de Roanne situés en aval. L'Ombre commun qui remontait dans les années 1940 sur la Loire jusqu'à hauteur de Chambéon ne dépasse pas aujourd'hui les abords immédiats de la confluence du Lignon. La perte de connexion avec les milieux annexes, résultant des endiguements et de la domestication du régime hydrique du fleuve, limite les échanges et les sites de frayères. Le débit réservé du barrage de Grangent, tantôt insuffisant, tantôt trop important lors des lâchés, est préjudiciable à la ponte des poissons. A noter que deux frayères ont été aménagées sur l'Ecopôle où l'on retrouve le Brochet et la Bouvière.

Mollusques et Crustacés

3 espèces de náyades ont été identifiées sur la zone. L'Ecrevisse américaine est présente sur l'étang Faure de l'Ecopôle et sur la Loire.

Reptiles et Amphibiens

10 espèces de reptiles et 10 espèces d'amphibiens ont été observés. La présence du Crapaud Sonneur à ventre jaune n'a pas été observée de façon récente. Certains pensent qu'il a disparu.

Insectes

- De nouvelles espèces de papillons ont été observées (12 sur le département) ce qui amène à 301 les espèces de Papillons recensés sur l'Ecozone. On les trouve principalement dans les milieux boisés et les roselières.
- Les Coléoptères dont une nouvelle espèce, le Grand Capricorne occupent pour la majorité les milieux forestiers et aquatiques.

Araignées

11 espèces recensées sont présentes au niveau des friches, des herbacées et des arbustes.

3) Un territoire à préserver

Malgré son passé lié à l'exploitation importante de gravières et à la présence de ses 2 barrages, le fleuve Loire présente sur le secteur de l'Ecozone tout un ensemble d'écosystèmes :

- Aquatiques ; tressages artificiels (anciennes gravières capturées lors des crues), étangs (gravières réhabilitées), gourds (bras morts appelés également boire en Loire moyenne), bras secondaires, îlots, marais...
- Amphibies ; marais, berges, grèves, bancs de sable...
- Terrestres ; îles, forêts, friches, prairies, cultures...

Ces milieux possèdent un intérêt écologique certain. Avec plus de 390 espèces végétales, plus de 230 espèces d'oiseaux, l'Ecopôle est une réserve ornithologique d'intérêt inter-régional.

a Statuts de protection

(Voir carte 4 : Statuts d'inventaires et de protections de l'Ecozone du Forez)

L'Ecozone possède 3 statuts de protection :

- Une ZPS (Zone de Protection Spéciale pour les oiseaux) statut validé en décembre 2003 dans le cadre du réseau NATURA 2000.
- Une réserve de pêche : Villeneuve
- Une réserve nationale de chasse

Une réflexion est en cours pour le statut de Réserve Naturelle Volontaire.

De plus l'Ecozone est classée :

- Au niveau régional : Patrimoine Naturel de Rhône-Alpes.
- Au niveau départemental : ENS (Espace Naturel Sensible).

Elle a fait l'objet de nombreux inventaires et est incluse dans :

- Une ZNIEFF (Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique) de type I n°4202 2125 : "Chambons de Magneux Haute-Rive" (prairies et terres cultivées sans boisement : intérêt avifaunistique).
- Une ZNIEFF de type I n°4202 2104 : "Lit majeur de la Loire de Montrond à Feurs" (cours d'eau rapide : intérêt écologique, botanique, faunistique).

- Une ZNIEFF de type II de la plaine du Forez n°4202 : "grand ensemble naturel riche et peu modifié offrant des potentialités biologiques remarquables".
- Une ZICO (Zone d'Importance Communautaire pour les Oiseaux) n°RA.09 "Plaine du Forez" qui est d'importance internationale pour la nidification des oiseaux d'eau.

2.1.3 Analyse du territoire et des différents usages

1) Organisation spatiale

Limites administratives et aspect foncier.

Sur les 6 communes de l'Ecozone, les terrains n'ont pas tous le même statut. (Voir carte 6)

Ce sont :

- soit des terrains dont la FRAPNA est propriétaire (56% de la totalité du site) ;
- soit ils appartiennent au Domaine Public Fluvial et la FRAPNA en est amodiatrice depuis 1997 et pour 9 ans ;
- soit ils appartiennent à des propriétaires privés.

Voir carte 5 : « limites administratives et infrastructures »

Occupation du sol

L'Ecozone se situe en aval de zones très urbanisées. Dérivée à la sortie du barrage de Grangent pour alimenter le canal du Forez en rive gauche, la Loire traverse un espace de grandes cultures. De nombreuses gravières en morcellent le paysage. Les secteurs de terres riches dénommés les « chambons » par opposition aux « varennnes » (les terres difficiles à travailler) sont le siège de cultures industrielles de maïs irriguées par l'eau provenant de la Loire ou de sa nappe alluviale. Les gravières de part et d'autre du lit mineur ont créé un espace intermédiaire dont le fonctionnement hydraulique est complexe, là où il y a un siècle poussait une lande à moutons. Ce fonctionnement hydraulique est bien caractérisé en rive gauche grâce aux modélisations. Les modélisations en rive droite sont en cours d'élaboration. Des chapelets de levées offrent une protection locale à proximité des fermes et des chambons.

La comparaison des cartes d'occupation du sol en 1946 et 2001 permet de mettre en évidence une évolution des espaces. (Voir carte n°7 et 8)

Les surfaces agricoles situées en bordure du lit mineur ont peu progressé. L'espace est assez peu urbanisé, et les habitations se trouvent majoritairement sur les coteaux. Les grands

bouleversements observés au niveau de l'occupation des sols concernent la part respective des prairies et boisements. En effet, les surfaces boisées étaient très rares en 1946 et correspondaient aux anciens méandres abandonnés qui avaient vu la succession végétales s'opérer. Les prairies de pâture et de fauche étaient omniprésentes. Elles ont aujourd'hui été remplacées par des boisements. Les haies ont en grande partie disparu. Une large ripisylve s'est installée sur la quasi totalité du linéaire du fleuve. Les nombreux bancs vifs présents en 1946 dans toutes les convexités des méandres ont en grande partie disparu. Les alluvions ont été extraits, et de nombreux plans d'eau de gravière ont vu le jour. Les annexes hydrauliques et les anciens méandres sont aujourd'hui moins visibles qu'en 1946, car masquées par la végétation ou comblées.

2) Usages et aménagements

La Loire est le support de différents usages : l'irrigation, l'hydroélectricité, l'habitat et zones d'activités... Les gravières se partagent le lit majeur avec souvent des activités agricoles. A tout cela, s'ajoutent les usages récréatifs (pêche, chasse) et l'animation nature du site.

Exploitation de granulats

Les alluvions de la Loire ont été exploitées pour répondre aux besoins en matériaux du bassin de Saint Etienne.

Les extractions en lit mineur ne concernaient, dans les années 20, que quelques centaines de m³ par site. C'est dans les années 50 que les prélèvements se sont accélérés pour atteindre leur maximum dans les années 70, puis être interdits en 1986.

Les extractions en lit majeur se sont développées dans les années 60 pour faire face au manque de ressources et aux contraintes juridiques grandissantes de l'exploitation en lit mineur. Au départ, les sites d'extraction se situaient à moins de 10 mètres des berges. Les matériaux des berges eux mêmes ont été exploités par endroit, remplacés par des matériaux divers (terre de découverte, remblais...) Les traces de ces pratiques sont observables sur l'Ecozone au niveau de l'Ile Moriaud ainsi qu'à Marclopt.

Les gravières se sont par la suite éloignées du fleuve et aujourd'hui, l'activité a cessé sur l'Ecozone. La dernière gravière exploitée est celle du Garollet. Elle a cessé son activité en 2002. Ainsi, l'Ecozone est constituée d'une multitude d'anciennes gravières en eau, remblayées ou capturées par le fleuve. (voir carte n°)

Les gravières en lit majeur ont nécessité des aménagements connexes comme l'endiguement et les protections de berges qui empêchent la mobilisation du stock alluvial et favorisent l'incision.

La production d'hydroélectricité

Le barrage de Grangent a été construit en 1957 au niveau du seuil de Saint Victor à la sortie des gorges de la Loire. Il fonctionne comme une centrale d'écluse, produisant 145GWh/ an. Le rythme des lâchés et des retenues modifie les écoulements du fleuve à l'aval.

Agriculture domaine des grandes cultures

Si elle est pratiquement absente du site d'étude, l'agriculture constitue une part importante de l'activité économique des communes sur lesquelles s'étend l'Ecozone. D'après les divers recensements agricoles, le nombre d'exploitations a légèrement diminué mais leur surface a augmenté. L'agriculture est principalement orientée vers la grande culture avec une part importante pour la culture de céréales et de maïs fourrage. La superficie toujours en herbe se maintient sur quelques communes malgré une progression importante des surfaces en terre labourables. Toute cette activité a un impact sur l'aménagement de l'hydrosystème dans :

- La lutte contre l'inondation des terres agricoles

De nombreuses digues, ou plutôt des levées en terre ont été érigées à partir du XVIIIème siècle afin de protéger les terres agricoles contre les inondations. Jusqu'en 1850, seuls quelques ouvrages isolés avaient été implantés, puis de nombreux ouvrages généralement en retrait de 50 à 100 m par rapport au lit mineur ont été construits par le syndicat des digues en à la fin du XIXème. La caractéristique essentielle des levées de la Loire est la continuité du système en rive gauche, et la faible longueur de digues en rive droite où la présence de terrasses de 15-20 m de haut constitue une protection naturelle.

- L'irrigation

Une partie du débit de la Loire a été dérivé dans le canal du Forez pour permettre l'irrigation des terres agricoles.

- La lutte contre l'érosion des terres agricoles

Les zones où les berges étaient les plus sollicitées (concavités des méandres) ont été protégées par des enrochements, bloquant ainsi la dynamique latérale.

Alimentation en eau potable

Le secteur d'étude compte trois captages d'eau potable : celui du Syndicat intercommunal des Petites Varennes, implanté sur la commune de Chalais le Comtal, en limite Ouest du lit majeur, s'alimente essentiellement à partir des apports latéraux provenant des coteaux.

Celui de Magneux Hautes Rives ne capte pas l'aquifère alluvial, mais des strates sablo-gréseuses d'âge tertiaire.

Le champ captant de la commune de Feurs se trouve sur la rive gauche de la Loire entre la départementale 107 et la berge du fleuve. Compte tenu de l'importance des débits prélevés, 75% du débit d'exhaure provient d'un phénomène de réalimentation induite par le cours d'eau. Pour favoriser cette réalimentation et compenser le phénomène d'abaissement du lit, la commune de Feurs s'est vue contrainte de réaliser un seuil au droit du champ de captage qui produit annuellement près d'un million de m³. Ce seuil est un ouvrage mobile qui est abaissé lors des crues (pour un débit supérieur à 1500 m³/s) pour des raisons de sécurité. En effet, pour de tels débits, la stabilité de l'ouvrage est menacée.

Pêche et chasse

La chasse est interdite sous toutes ses formes sur la totalité des terrains appartenant à la FRAPNA et sur les secteurs inclus dans le domaine public à l'exception de la commune de Marclop.

La pêche est autorisée sur la Loire mais pas sur les plans d'eau appartenant à la FRAPNA. Cependant, une réserve de pêche a été aménagée à Villeneuve dans l'ancien lit de la Loire.

Tourisme et animation nature du site

A proximité de l'Ecozone, un riche patrimoine historique favorise l'activité touristique. La zone centrale de l'Ecopôle du Forez constituée de gravière réhabilitées est aménagée pour l'observation de l'avifaune. Elle accueille un public nombreux et varié (60 000 à 80 000 visiteurs par an et 10 000 scolaires), ce qui en fait le deuxième site touristique du département.

Le tableau n°5 page suivante présente les principaux travaux effectués dans le lit de la Loire.

Dates	Interventions humaines	Crues
1702	Concession de la navigation à une "compagnie de balisage" et suppression d'obstacles dans le lit mineur.	
1711	Edification de la digue du Pinay.	
1790		Grande crue
Milieu XVIII°	Levées en terres des Vorzes à Magneux, de Turagneux et de Villeneuve à Chambéon.	
1846		La plus forte crue connue en plaine du Forez.
1849	Levée de Perdriat et défense de St Romain à Magneux, des Perrichons à Marclopt, de M. de Poncins à St Laurent et à Feurs.	
1856 et 1857		Grandes crues.
1858	Création du Syndicat des digues de Magneux-Chambéon.	
1863	Levée en terre de Villeneuve au Lignon	
1864		Grande crue.
1866	Digue Champin à Magneux.	Grande crue.
1871		Grande crue.
1872	Digue Neyron à Villeneuve.	
1881	Digue de Turagneux (barrant un bras de la Loire devenu le Gour jaune), digue de Villeneuve.	
1907		Très grande crue.
1954	Réunification des Syndicats des digues de la plaine du Forez. Début de l'Exploitation artisanale du granulat sur le site de l'Ecopôle.	
1957	Mise en service du barrage de Grangent.	
1965	Début de l'exploitation industrielle du granulat à Villeneuve.	
1976		Capture de certaines gravières entre Les Vorzes et Turagneux.
1980	Apogée de l'exploitation industrielle des gravières.	Grande crue. Intrusion de la Loire dans des bassins en aval de Turagneux, formant un bras annexe.
1985	L'exploitation des gravières diminue fortement d'intensité à Magneux et Chambéon.	
1989	Fermeture du bras annexe de Turagneux par un seuil.	
1991	Cessation de l'exploitation du site de l'Ecopôle et début des travaux de réaménagement.	
1996		Grande crue
2003		Grande crue

Tableau n°5 : principaux travaux effectués dans la lit majeur du fleuve et principales crues
D'après CESAME, 2003

2.2 ANALYSE DE LA MORPHODYNAMIQUE FLUVIALE AU NIVEAU DE L'ECOZONE

2.2.1 Etude du tracé en plan

La carte n°9 : représente l'évolution des tracés de la Loire depuis 1846.

Les documents utilisés pour réaliser cette carte ne couvrent pas tous l'ensemble du secteur d'étude :

- La carte au 1/20 000 de 1849 (Ministère des armées) couvre la zone de Marclopt à Feurs
- La couverture aérienne de 1946 (IGN), de l'aval de la Boucle de Marclopt à l'aval de l'île Moriaud
- La couverture aérienne de 1980 (IGN), de Marclopt à la Grande Motte
- La couverture aérienne de 1991 (IGN), de Marclopt à Feurs
- Les orthophotoplans de 2001 (IGN), du pont de Montrond les Bains au pont de Feurs
- La campagne de photographies aériennes de juillet 2004 (Maison de la Télédétection, Cémagref), du Pont de Montrond les Bains à la Petite Motte

La superposition des tracés permet de faire apparaître une bande de méandrage, également appelée espace de mobilité historique. Cette enveloppe est tracée en joignant les extrémités des méandres selon la méthode du guide technique n°2 de l'agence de l'eau RMC. Les anciens méandres visibles sur certaines photographies aériennes ont également été pris en compte. Cependant, l'enveloppe obtenue n'est peut être pas très réaliste, notamment au niveau de la Boucle de Marclopt. En effet, à ce niveau, les terrasses alluviales constituent une contrainte naturelle, et la Loire n'a pas emprunté cette espace à l'échelle historique. C'est pourquoi les zones de terrasses peuvent être retirées de cet espace de mobilité historique. L'enveloppe obtenue a une largeur de 500 à 1400 mètres.

Les divagations ont été intenses entre 1849 et 1946. L'Ecozone a donc été un secteur à dynamique active au point que certains méandres se sont complètement inversés.

Ces deux tracés peuvent être considérés comme représentatifs de l'état naturel de la Loire. Même si elle n'était pas exempte d'interventions humaines à cette époque (aménagements

pour la navigation, protections de berges, digues, prélèvements diffus de granulats), ces aménagements n'ont pas perturbé de manière significative la dynamique du fleuve.

Depuis 1946, les tracés de la Loire sont presque tous confondus. Les divagations ont été très faibles, le tracé en plan s'est figé.

Largeur du lit mineur

Le lit mineur actuel a une largeur moyenne de 60 mètres en moyenne. Une réduction de la largeur du lit mineur depuis 1850 est observable. Cette réduction peut avoir une origine naturelle due à la réduction des débits liquides et solides, et peut trouver une explication dans le processus d'incision du lit qui favorise le développement de la végétation des berges. En l'absence de forte crue capable de déraciner les végétaux, le fleuve se retrouve contraint entre deux bandes de ripisylve de plus en plus larges. Cette observation est toutefois à nuancer, car de nombreuses sources d'erreurs sont possibles : déformations des photographies aériennes, erreurs de calages, différences de débits du fleuve d'un document à l'autre qui entraîne une variation de la largeur. Cependant, les erreurs de calage semblent minimales car les anciens méandres observés sur les photos aériennes coïncident exactement avec le tracé de 1849.

Style fluvial

La carte de 1849 laisse apparaître un lit unique à méandres peu accentués. Le coefficient de sinuosité (rapport longueur développée sur longueur du tronçon en ligne droite) est de 1,32. Cette valeur correspond à un cours d'eau très sinueux, mais la forte sinuosité de la Boucle de Marclopt entraîne une surestimation de cette valeur. La Loire est plutôt un cours d'eau sinueux. Le calcul de cette même valeur en 2001 donne un chiffre de 1,28 qui traduit une réduction de la longueur développée du cours d'eau.

$Si < 0,5$	cours d'eau rectiligne
$1,05 < Si < 1,25$	cours d'eau sinueux
$1,25 < Si < 1,5$	cours d'eau très sinueux
$> 1,5$	cours d'eau méandrique

Tableau n°6 : Indices de sinuosité des cours d'eau

Les documents de 1849 et 1946 ne laissent pas apparaître de traces de tressage. Les îles sont très rares et semblent être apparues à la suite de changement brutal de tracé (Ile Moriaud par

exemple). En revanche, depuis 1980, certains secteurs de tressages sont. Ceux-ci ne sont pas naturels mais résultent de la capture de gravières.

Amplitude des méandres

L'amplitude des sinuosités est assimilée à l'espace de mobilité d'équilibre (Malavoi JR, 1998). A l'aide du logiciel Arc Map, cette valeur a été évaluée à 900 mètres en moyenne sur l'Ecozone, mais elle est très variable selon les méandres considérés. En règle générale, l'amplitude d'équilibre correspond à 10 fois la largeur à plein bord du cours d'eau. Les largeurs observées sur la Loire varient de 50 à 200 mètres.

Un espace de mobilité d'équilibre, ou amplitude théorique, a été représenté sur la carte n°10, sur une largeur de 900 mètres équi-répartie de part et d'autre du cours d'eau. Cependant, les 900 m ont été décalés en rive gauche là où les terrasses représentaient des contraintes en rive droite.

2.2.2 Evaluation de la dynamique sédimentaire

1) Capacité de transport des sédiments

a Granulométrie

Une courbe granulométrique des sédiments arrivant au niveau du barrage de Villereest permet de définir le diamètre moyen (D50) des sédiments charriés par la Loire. Celui-ci est de 20 à 25 mm (Voir Annexe 3). Les caractéristiques des sédiments au niveau de l'Ecozone sont vraisemblablement assez proches de celles des sédiments à Balbigny (queue de retenue du barrage de Villereest à 10 km en aval du secteur d'études). Les carriers estiment aussi ce diamètre moyen à 20-25 mm. Cependant, un phénomène naturel de tri granulométrique ou pavage est observé sur les dépôts alluviaux. Le diamètre moyen des couches de surface (également appelée armure) est plus proche de 45 mm.

b Débit de début d'entraînement

C'est le débit à partir duquel les matériaux vont commencer à être mobilisés. Il correspond au débit à partir duquel l'armure (couche de surface de granulométrie plus grossière) va être rompue, et où le transport va commencer. Il a été évalué entre 250 et 300 m³/s par (SOGREAH, 1996), ce qui correspond à un débit atteint entre 5 et 10 jours par an.

c Débit solide

SOGREAH dans son étude géomorphologique en 1996 a évalué la capacité de transport à 10000 m³/ an, à l'aide des formules de Meyer Peter. Ces formules tiennent compte des caractéristiques physiques du lit (géométrie de la section, granulométrie...). Cependant, l'évaluation du débit solide qui transite effectivement par charriage est difficile. Les méthodes de mesure du débit solide sont très peu au point, et les données sur la Loire amont sont rares. L'évaluation du remplissage dans la retenue de Grangent apporte tout de même des éléments intéressants : Les apports auraient atteint 1,4 millions de m³ en 40 ans, soit environ 35 000 m³/an par charriage et suspension. Il est tout à fait probable que la part du charriage se situe autour de 10 000 m³/an. L'évaluation de la capacité de transport par la formule de Meyer Petter est entachée d'une très forte marge d'erreur. Aussi les résultats ne donnent que des ordres de grandeur.

Du fait de la présence du barrage de Grangent, le débit solide qui transite dans la plaine du Forez est très inférieur à la capacité de transport d'où une forte érosion du fond du lit pour permettre l'augmentation du débit solide.

d Rôle morphogène des crues

Les crues de la Loire réputées pour leur ampleur peuvent avoir une action morphologique importante. Même si les grosses crues peuvent avoir des conséquences majeures sur les changements de la morphologie fluviale (recul des berges, changement brutal de lit), le débit le plus efficace est le débit le plus proche de la capacité d'écoulement à plein bord, il est également appelé débit morphogène. En effet, lorsqu'il y a débordement, l'inondation du lit majeur permet la dissipation de l'énergie et l'action morphogène de la crue s'en trouve diminuée.

Le débit de plein bord oscillerait entre 160 et 210 m³/s à Montrond les Bains (Crépet, F., 1997_Chiffres correspondant aux 5% supérieurs des débits classés, méthode Bravards & Petts, 1994). Selon la DDE 42, les premiers débordements surviendraient dès 150 m³/s sur la Loire forézienne.

Etude de la crue de décembre 2003

Modélisation des surfaces inondées

La crue des 2 et 3 décembre 2003 peut être assimilée à une crue de fréquence trentennale.

La carte n°11 montre les surfaces inondées lors de cette crue. Pour réaliser cette carte, un modèle hydrodynamique 2D a été utilisé. Il repose sur un modèle numérique de terrain et des laisses de crue référencées. La couverture a été discrétisée en mailles de 25 m (Voir Annexe 4 Modélisation des surfaces inondées extrait de la thèse de Djamel MIMOUN). L'exactitude de cette carte est discutable compte tenu du peu de laisses de crues ayant servi à caler le modèle. De plus, seule l'influence de la Loire a été prise en compte, alors que les affluents, L'Alliot en particulier (Voir carte n°3 : réseau hydrographique), sont également sortis de leur lit. Cependant, les témoins de cette crue, (personnel de la FRAPNA, riverains) s'accordent pour confirmer que la représentation sur la carte des surfaces inondées est assez conforme à leurs observations lors de la crue.

Caractérisation des écoulements

Les hauteurs d'eau sur les digues permettent de faire apparaître les secteurs qui sont submergés en premiers et donc les secteurs où les ouvrages sont les plus sollicités. Les observations de terrain au début de la période de stage (mai) ont permis de répertorier les brèches dans les digues avant qu'elles ne soient comblées ou que la végétation efface les traces du passage de cette crue.

Impacts sur la morphologie du fleuve

Ces impacts sont observables par la comparaison des photographies aériennes de 2001 et 2004. Une cartographie des unités morphologiques a été réalisée pour chacune de ces dates selon la typologie du SIEL (Système d'Information sur l'Evolution du Lit de la Loire) mise en place par l'équipe pluridisciplinaire du Plan Loire Grandeur Nature. Ces deux campagnes encadrent la crue de décembre 2003 et peuvent mettre en évidence son rôle morphogène. Il en ressort que certains secteurs ont subi des modifications importantes : Amont de Montrond, Boucle de Marclopt, Tressage du Gourd Jaune, Ile Moriaud, La Caille. Ces modifications sont décrites de manière plus précise dans la partie analyse par tronçon (Paragraphe 3.3.). Cependant, il convient de rester prudent car l'analyse est biaisée pour trois raisons principales :

- Prises de vue réalisées pour des débits du fleuve différents (environ 10 m³/s pour 2001 et 20 m³/s pour 2004). Toutes les unités morphologiques ne sont pas visibles de la même manière.
- Pas de vérification sur le terrain pour les unités morphologiques de 2001

- Erreurs de calage possibles, des photographies aériennes.

Ce sont surtout les observations de terrain en début de stage qui ont permis de cerner les impacts de cette crue.

2) Stock alluvial

Le stock alluvial correspond aux matériaux que le fleuve a déposé au fil du temps. Le stock alluvial potentiellement mobilisable se situe dans le lit majeur actuel et correspond à la largeur des alluvions Fz sur la carte géologique. Cet espace est également appelé espace de mobilité maximal et sert à la définition de l'espace de mobilité du fleuve.

Les exploitations de granulats ont entraîné une disparition irréversible d'une partie du stock alluvial nécessaire à l'équilibre géomorphologique. Les prélèvements en lit majeur peuvent être évalués après calcul des surfaces d'anciennes gravières en eau, remblayées ou capturées que l'on multiplie par l'épaisseur moyenne des alluvions. On obtient un volume de sédiments prélevés de 3 millions de m³ sur l'ensemble de l'Ecozone. En revanche, il est beaucoup plus difficile d'évaluer les extractions en lit mineur. Celles-ci ont cessé en 1986, et se sont traduites par une disparition des nombreux bancs vifs qui existaient auparavant. Les volumes prélevés en lit mineur ont été estimés à 5 millions de m³ sur l'ensemble de la Plaine du Forez (DRIRE Rhône Alpes)

De plus la présence du barrage de Grangent a privé la Plaine du Forez d'une part importante du stock alluvial en piégeant au moins 1,4 millions de m³ de sédiments dans la retenue (Source : Sogreah, 1996).

Ces estimations soulignent l'importance des volumes prélevés pour l'exploitation de granulats, ce qui explique que cette activité soit la plus préjudiciable à l'équilibre géomorphologique. Une partie du stock alluvial a ainsi été amputée, et la majeure partie du stock restant n'est pas mobilisable compte tenu des contraintes latérales relatives à l'occupation des sols.

3) Erosion latérale

Aujourd'hui, le débit solide est nul à l'entrée de la plaine du Forez. Seuls les apports de sédiments par érosion latérale et par les affluents sont possibles.

Comparaison avec photographie de 1946 : nombreux bancs alluviaux peu végétalisés et remobilisés de façon régulière. Depuis les années 80, presque tous les bancs de convexité ont été exploités.

Les divagations ont été importantes jusqu'en 1946. Certains méandres se sont complètement inversés, et des bras morts sont visibles sur la photo aérienne de 1946. Ils montrent que la progression des méandres s'est poursuivie entre 1849 et 1946 avant que ceux-ci ne se recoupent puis s'inversent. Depuis 1946, le tracé de la Loire est resté très stable, sauf dans certains secteurs où des érosions très localisées se sont produites ainsi que des captures de gravières. Les contraintes représentées par les protections de berges sur les rives concaves des méandres sont vraisemblablement responsables cette réduction de la dynamique latérale.

Processus de capture des gravières :

En fonction de la position et de l'éloignement par rapport au cours d'eau, les gravières sont plus ou moins sujettes à des phénomènes de capture. C'est à dire que suite à l'érosion latérale, le nouveau tracé du cours d'eau va emprunter la gravière. Ce phénomène est observé en divers points de l'Ecozone : A l'amont de la Boucle de Marclopt, Au niveau du tressage du Gourd Jaune, au niveau du bras du Brochet, et de la Petite Motte. Il se traduit fréquemment par un tressage localisé. La gravière est capturée, des sédiments vont se déposer et former des bancs et de multiples chenaux, puis l'un des chenaux sera privilégié, pendant que les autres se combleront, et la Loire retrouvera son style naturel sinueux.

Calcul des taux d'érosion

A l'aide du logiciel Arcmap, en découpant les tracés deux à deux, il est possible de calculer les surfaces érodées et abandonnées par la Loire entre deux dates, cela permet d'obtenir des taux d'érosion. (Voir tableau n°7)

période étudiée	Longueur du tronçon étudié	Surfaces abandonnées			Surfaces érodées		
		ha	ha/an	ha/km/an	ha	ha/an	ha/km/an
1849-1946	6,135 km	61,3	0,63	0,1	29,2	0,3	0,049
1946-1980	6,135 km	15,57	0,46	0,075	17,76	0,52	0,085
1980-1991	9,3 km	17,9	11,62	0,175	33,17	3,02	0,324
1991-2001	12,5 km	10,51	1,05	0,084	13,04	1,3	0,104
2001-2004	12,5 km	7,15	2,38	0,191	9,88	3,29	0,263

Tableau n°7 : Bilan des surfaces érodées et abandonnées

Le bilan des surfaces érodées et abandonnées n'est pas équilibrées. Entre 1850 et 1946, il y a eu plus de surfaces abandonnées que de surfaces érodées. Ce qui traduit en général une baisse de l'activité géomorphologique. Cependant, pour un tel intervalle de temps, les erreurs sont grandes. Outre les erreurs dues aux déformations des plans et photographies aériennes et les erreurs de calage, les déplacements de cours d'eau qui se sont produits entre les deux dates ne sont pas comptabilisés. Les valeurs sont donc largement sous-estimées. Depuis 1946, la tendance s'est inversée, alors que l'activité géomorphologique a plutôt été ralentie. Les surfaces érodées sont plus importantes que les surfaces abandonnées, mais il semblerait que ce phénomène soit lié aux captures de gravières qui augmentent la surface occupée par le lit.

4) Erosion verticale

a L'incision du lit

L'érosion latérale étant en grande partie bloquée, la dissipation de l'énergie ne peut se faire que par l'érosion du fond du lit. Les profils en long mettent en évidence un enfoncement de 1 à 2 mètres depuis 1850.

b Les affleurements de marnes

Cet enfoncement a mis à jour le substratum tertiaire. Ainsi, de longs affleurements de marnes vertes apparaissent parsemés çà et là de galets pluridécimétriques. Sur d'autres cours d'eau, l'incision pourrait être stoppée ou nettement ralentie lorsque le substratum est mis à jour à condition que celui-ci soit très résistant. Sur la Loire, ce n'est pas le cas. En effet, la marne est très érodable, et le processus d'incision semble s'accélérer dès que celle-ci est découverte.

La marne se présente sous différentes formes :

- Des affleurements réguliers qui subissent une érosion lente en surface
- Des seuils souvent disposés en série

Les signes d'une érosion rapide sont frappant : Des blocs de 50 cm à 80 cm de large se détachent des seuils et se déposent plus loin. Dès que ces blocs ne sont plus immergés, ils subissent une dessiccation très rapide et sont disparaisent en moins d'un an. Les dépôts observés en divers endroit sur les berges ne peuvent avoir été apportés que par la crue de

décembre 2003. Les seuils reculent et les affleurements subissent également une autre forme d'érosion en surface qu'on appelle « effet canyon »

c Processus d'ajustement des affluents

De la même manière, les affluents doivent ajuster leur profil en long en réponse à l'incision du lit de la Loire. L'opposition entre les affluents des deux rives est encore une fois très marquée. Le bassin versant de la Mare en rive gauche produit une charge solide importante et contribue ainsi à recharger la Loire. La confluence de la Mare est le seul endroit où des avancées de langues sableuses sont observables. Sur l'autre rive, la confluence avec la Toranche s'apparente plutôt à « canyon incisé » dans la marne avec de hauts seuils en série (de l'ordre de 1m de haut).

2.2.3 Etude des pentes et profils en long

Dans la plaine du Forez, la Loire présente une pente anormalement élevée pour un secteur de plaine. Cette forte pente s'explique par la nature même de la plaine du Forez : bassin d'effondrement inclus dans le socle primaire qui a été surélevé par les mouvements tectoniques du Néogène (Le Griel, 1975). Au niveau de l'Ecozone, elle avoisine 0,9‰, mais elle n'est pas du tout uniforme : nulle à l'aval de la zone d'étude, la pente atteint des valeurs de 4‰, au niveau de certains seuils à l'amont. (Voir figure n°3 : profil en long de la Loire en 2004)

Les ruptures de pentes observées permettent de dégager 8 tronçons sur lesquels nous reviendrons dans le paragraphe 3.3. Ceux-ci se traduisent par une dynamique et un fonctionnement morphologique différent. Des propositions de gestion adaptées à chacun d'entre eux peuvent être formulées.

Tronçon	Longueur (m)	pente (‰)
1	1673,2	1,35
2	1759,3	0,09
3	1425,9	1,98
4	1292,2	0,14
5	674,1	2,72
6	875,6	0,13
7	1592,7	1,45
8	3780,0	0,01
Ecozone	13072,9	0,82

Tableau n°8 : Longueurs et pentes des tronçons

La plus faible pente est observée sur le tronçon 8 et correspond à l'influence du barrage de Feurs, la plus forte pente sur le tronçon 5. Les secteurs à plus forte pente se traduisent sur le terrain par une érosion importante et de nombreux seuils de marne en série (Voir carte 12)

Figure n°3 : Profil en long de la Loire en 2004

Comparaison des profils en long

L'évolution du fond du lit peut être évaluée à l'aide des profils en long réalisés à différentes périodes (1850, 1921, 1989, 1995) (Voir figure n°4 page suivante). (Pour des raisons techniques, le profil de 2004 n'a à cette heure pas encore pu être intégré à cette figure).

La comparaison de ces profils laisse apparaître un enfoncement généralisé de l'ordre de 1 mètre, avec des secteurs plus sensibles où le lit a été creusé sur plus de 2 mètres.

Incision la plus forte : 2,60m au niveau de la Boucle de Marclopt,

Incision la plus faible : 0,86 mètres à l'amont du tressage du Gourd Jaune si on excepte l'influence du barrage de Feurs

Ces profils en long donnent un ordre d'idée de l'enfoncement qui s'est produit, mais le déplacement du lit rendent difficiles les comparaisons. Les Points kilométriques des deux profils les plus anciens ne sont pas du tout les mêmes que ceux des profils ultérieurs.

Ainsi, malgré ces imprécisions, il est possible d'observer un début d'enfoncement du lit en 1921. Ce phénomène peut s'expliquer par une réduction naturelle des débits solides. En effet, la fin du XIX^{ème} siècle correspond à la fin du Petit Age Glaciaire qui s'est traduit par une baisse des débits liquides et solides. Il est également possible que les impacts des premières extractions en lit mineur se soient fait sentir.

L'incision s'est poursuivie entre 1921 et 1995 (enfoncement de 0,8 à 1,3m). Sur le profil en long de 1995, la stabilisation de la ligne d'eau à l'aval de la zone d'étude est liée à la mise en place du barrage de Feurs. Cet ouvrage a bien fonctionné puisqu'il avait pour but de relever la ligne d'eau pour permettre l'alimentation en eau potable.

Il devient plus juste de comparer les profils de 1995 et de 2004 car les variations du tracé en plan ont été très limitées au cours des 10 dernières années. La Loire se serait encore enfoncée de 40 à 60 cm en une dizaine d'années, mais une partie de la différence d'altitude de la ligne d'eau peut également être due à une différence de débit entre les deux campagnes, dont nous ne connaissons pas la valeur. Les deux campagnes ont été réalisées à l'étiage et on peut raisonnablement penser que la différence de la hauteur d'eau entraînée par la variation de débit n'excède pas 10cm.

L'évolution des profils en long s'est traduite par :

- une accentuation de la pente moyenne, même en tenant compte de l'aplanissement lié au barrage de Feurs : de 0,78‰ en 1856, elle est passée à près de 0,9‰ en 2004.

- Un enfoncement général de l'ordre de 2m, avec un exhaussement local lié à l'implantation du barrage de Feurs et une valeur record de 2,60m au niveau de Marclopt.

Dans son fonctionnement naturel, le cours d'eau va constamment ajuster sa pente en réponse aux variations des débits solides pour atteindre une pente d'équilibre, mais celle-ci n'a plus le même sens dès lors que le substratum est mis à jour. Les ajustements ne se font pas de la même manière car les processus d'érosion sont différents. Les alluvions sont entraînés par charriage alors que la marne s'érode principalement par décrochement de gros blocs et recul des seuils. On peut imaginer que le processus de recul des seuils de marne soit stoppé lorsque la Loire aura atteint une pente d'équilibre. Mais les pentes observées dans les formations alluviales n'ont plus de raison d'être respectées en l'absence de matelas alluvial. Le lit tend alors vers des pentes plus faibles que dans l'état initial sur alluvions. Ainsi, par ce processus de recul des seuils de marne, le phénomène d'incision du lit ne semble pas prêt de s'arrêter.

.

Figure 4 : Profils en long de la Loire depuis 1856

2.3 ETAT ACTUEL DU LIT DE LA LOIRE ET PERSPECTIVES D'EVOLUTION

2.3.1 Etat actuel du lit

1) Un cours d'eau à caractère sinueux contraint

Si la Loire a connu des divagations intenses entre 1849 et 1946, elle présente à l'heure actuelle un tracé stable voire figé. Le fleuve est contraint entre les terrasses en rive droite, les digues en rive gauche, et deux bandes de ripisylve de plus en plus large. Il ne présente plus un lit unique sur l'ensemble de l'Ecozone : des tressages par capture de gravières sont apparus récemment. Des îles se sont formées.

2) Une restriction des apports en sédiments

- *Très faibles quantités d'apports de sédiments par l'amont.* Le débit solide naturel de la Loire est de l'ordre de 10 000m³/an mais il est aujourd'hui nul à l'entrée de la plaine du Forez. Les sédiments sont piégés par le barrage de Grangent (1,4 Mm³ accumulés)
- *Très peu d'apport par les berges.* Tous les bancs de convexité ont été exploités entraînant une disparition irréversible d'une partie du stock alluvial. Les berges protégées sur les rives concaves entravent l'érosion naturelle.
- *l'équilibre dynamique favorisé par les crues est rompu.* Les crues les plus morphogènes sont régulées par le barrage de Grangent. Les bancs alluviaux peu végétalisés et remobilisés de façon régulière par les crues disparaissent.

3) Une rupture de l'équilibre dynamique : Un processus d'enfoncement du lit

- *Incision du lit avec un enfoncement de 1m à 2,60m:* L'érosion latérale en grande partie bloquée et le débit solide nettement inférieur à la capacité de transport en aval du barrage obligent la Loire à dissiper son énergie par érosion verticale. Ce phénomène est accentué par la pente anormalement élevée et non uniforme pour un secteur de plaine.
- *Affleurements du substratum tertiaire :* La marne est très érodable et le processus s'accélère dès que celle-ci n'est plus immergée.

4) Atteinte à la diversité écologique

- *Flore riche* (513 espèces recensées) mais :
 - ⇒ diminution des végétaux macrophytes, dominance d'algues dans le cours vif et de lentilles d'eau dans les bras morts creusés dans la marne
 - ⇒ remplacement progressif des espèces pionnières typiques des grèves, régression des roselières, embroussaillage des milieux ouverts et colonisation des friches non entretenues par des espèces invasives
 - ⇒ risque d'évolution des forêts de bois tendre vers des forêts à dominance de bois durs.
- *Faune diversifiée* avec de nombreuses espèces – site ornithologique majeur mais :
 - ⇒ Peu d'espèces de poisson recensées, sites de frayères limités par l'absence d'alluvions et la déconnexion des annexes hydrauliques.

2.3.2 Perspectives d'évolution

1) Aléas d'érosion : Peu de possibilité de recharge latérale

La carte n°13 présente les contraintes latérales et aléas d'érosion sur une période de 50 ans. Les contraintes latérales laissent peu d'espace pour la divagation du cours d'eau. Le potentiel de recharge en matériaux est ainsi très limité.

2) Captures d'anciennes gravières : conséquences controversées

La faible profondeur des gravières foréziennes a limité les impacts néfastes des captures. Compte tenu de la faible épaisseur d'alluvions au naturel, le fond des gravières est au même niveau que le lit du fleuve, c'est à dire au niveau du toit du substratum tertiaire. Cependant, même si le phénomène de tressage contribue à diversifier les milieux et offre des bancs alluviaux temporaires, il se solde toujours par un comblement et constitue ainsi un piège à sédiments. Or compte tenu du manque de matériel alluvial, chaque perte est pénalisante pour le cours d'eau.

3) Recul des seuils de marne : poursuite de l'enfoncement du lit

L'affleurement des marnes à l'échelle de l'évolution géomorphologique d'une rivière est un phénomène récent dont il est difficile de prévoir l'évolution. Cependant, l'évaluation du recul des seuils est parlant : Recul cumulé de 200 m pour la seule crue de 1994. Les mêmes phénomènes ont été observés lors des crues de 1996 et 2003. De grandes quantités de marnes (plusieurs milliers de m³) continuent à être érodées à chaque crue, elles sont immédiatement désagrégées et donc ne contribuent pas durablement à augmenter la charge solide. Rien ne laisse présager l'arrêt du phénomène.

2.3.3 Mise en place d'un suivi de l'évolution du lit de la Loire.

Dans le cadre du Système d'Information sur l'Evolution du Lit de la Loire (SIEL), mis en place par l'Equipe pluridisciplinaire du Plan Loire Grandeur Nature, une typologie des unités morphologiques, encore provisoire à ce jour, a été établie (La typologie des unités morphologiques figure en annexe 5). La carte n°14 a été réalisée sur la base des photographies aériennes de 2004 selon cette typologie et constitue le point de départ d'un suivi de la morphologie du fleuve selon de critères communs pour tous les opérateurs Loire Nature.

La comparaison des unités morphologiques à différentes époques lui donnerait plus de pertinence, mais ce travail n'avait jamais été réalisé auparavant. Les orthophotoplans de 2001 (Voir carte n°15 : Unités morphologiques de la Loire en 2001) permettent de donner quelques éléments de comparaison, mais les prises de vues ont été réalisées pour des débits du fleuve différents. Toutes les unités morphologiques ne sont pas visibles de la même manière.

Dans le cadre de l'étude géomorphologique de la Loire dans le département de la Loire, la DDE 42 a mis en place un système de suivi photographique des seuils de marne. Celui-ci doit permettre de renseigner de manière plus précise sur la vitesse d'évolution de ces seuils. Je ne dispose pas des premiers résultats de ce suivi.

CHAPITRE 3 TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE L'INCISION ET PROPOSITIONS DE GESTION

3.1 VOLET EUROPEEN : LES TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE L'INCISION DES COURS D'EAU EN EUROPE

Les solutions pouvant être apportées au problème de l'incision du lit sont encore peu nombreuses.

La mise en place de seuils, le pavage, la recharge artificielle en sédiments sont les méthodes classiquement utilisées. A l'heure actuelle de nouvelles méthodes appliquées à l'ingénierie géomorphologique se développent. L'approche de gestion devient plus globale et tient compte de la dynamique fluviale. Elle ne traite pas seulement les conséquences mais surtout les causes de la dégradation des hydrosystèmes. Accroître la mobilité du lit, préserver un espace de liberté à la rivière, améliorer les flux de sédiments sont les objectifs essentiels à la restauration des cours d'eau incisés. Cependant, nous disposons de très peu de recul pour mesurer les effets de ces méthodes. La modélisation des flux de sédiments n'est pas suffisamment au point pour permettre d'appréhender l'ensemble des processus morphologique qui suivront les actions.

3.1.1 Les techniques dites traditionnelles

1) La mise en place de seuils

C'est la technique la plus communément utilisée pour lutter contre l'érosion régressive sur de nombreux cours d'eau européens : Rhône, Rivières des Alpes, Cours d'eau d'Espagne, d'Allemagne...

La technique vise à :

- relever le niveau de l'eau pour éviter la propagation de l'érosion à l'amont ;
- réduire la pente afin de dissiper l'énergie cinétique en cassant les vitesses d'écoulement et diminuant ainsi la capacité érosive ;
- interrompre le transit des matériaux vers l'aval par réengrèvement du lit.

Le matériau doit être choisi pour sa rugosité afin que la dissipation d'énergie commence par le seuil lui-même. C'est la pierre qui est retenue pour la construction des seuils sur les grands cours d'eau. Le positionnement des ouvrages, leur nombre, leur forme, leur hauteur, sont à définir d'après l'observation du terrain et la dynamique du cours d'eau. Les seuils sont placés en travers du cours d'eau, aux endroits où l'accélération des vitesses est observable et l'érosion la plus forte. Une succession de petits seuils, plutôt qu'un gros est préférable afin de limiter le déficit sédimentaire à l'aval et de permettre la libre circulation des poissons. Par exemple, 50 seuils successifs ont été installés sur un tronçon de 2 km sur le Tabeillon suisse. La réduction de la pente entre deux seuils freine l'érosion du lit. A l'aval immédiat du seuil, une fosse de dissipation, deux fois plus large que le seuil doit être aménagée pour casser les vitesses d'écoulement et donc la force érosive de la rivière et assurer la pérennité de l'ouvrage. Le seuil sert également de soutien d'étiage pour l'alimentation de la nappe, et une fente centrale est souvent prévue pour assurer la continuité d'étiage.

Attention, cette technique peut repousser le problème en aval ou simplement le retarder. Temporairement, le seuil interrompt le transit vers l'aval ce qui peut provoquer le rehaussement des lignes d'eau de crue.

2) La stabilisation par pavage artificiel

Cette technique est mise en place lorsque le substratum tendre a été mis à jour et connaît une incision rapide. Elle permet de reconstituer un matelas d'alluvions protecteur du lit.

Le matériau choisi doit être peu mobile. Il peut être issu de la fraction la plus grossière de la rivière ou d'extractions dans le lit majeur.

La taille des alluvions doit être correctement dimensionnée. Elle est déterminée par des calculs d'entraînement de matériaux. Le débit de début d'entraînement est un paramètre fondamental.

Le pavage est déposé par des engins en couche mince sur l'ensemble du fond du lit.

Cette technique présente un coût élevé. L'approvisionnement en matériaux peut être difficile. De plus, il faut tenir compte de la possibilité de rejet de matières en suspension, si le substratum continue à être érodé dans les interstices.

3) Apport mécanique de matériaux extérieurs au lit

Cet apport permet d'accroître la charge sédimentaire.

Ce sont des matériaux de curage qui sont utilisés. Ils sont déposés soit hors eau mais le plus près possible du lit pour être facilement mobilisables, soit dans le lit après dérivation temporaire des eaux. Ces matériaux doivent pouvoir être entraînés et la surface du dépôt doit être submergée par la crue annuelle afin d'éviter toute accumulation pouvant se végétaliser.

Cette technique lourde et délicate est coûteuse. De plus, elle peut favoriser une concentration importante de matières en suspension lors d'un dépôt en eau avec une dégradation possible du milieu.

3.1.2 Techniques relevant de l'ingénierie géomorphologique

1) L'espace de liberté

Le maintien d'un espace de liberté accroît la mobilité de la rivière et permet la fourniture locale de charge de fond au chenal. Avec un tracé plus long, la vitesse d'écoulement est réduite et le cours d'eau dissipe son énergie de manière moins agressive. Pour les rivières qui ont perdu leur mobilité, la fourniture de matériaux leur permet de réenclencher une dynamique d'érosion naturelle.

On cherche ici à remplacer progressivement l'érosion verticale par l'érosion latérale.

Les érosions des berges sont donc envisagées pour fournir les sédiments. La méthode consiste en l'enlèvement de protection des berges, l'entretien des francs bords pour limiter le développement de la végétation, et en l'accentuation des écoulements vers les berges par exemple par la mise en place de déflecteurs. Si le lit est en équilibre, l'érosion latérale s'accompagne d'un dépôt sur la berge opposée.

L'érosion latérale permet aussi l'ouverture de plans d'eau ou d'anciens chenaux déconnectés, ce qui améliore l'écêtement des crues tout en luttant contre l'incision.

Cette méthode touchant les berges est difficile à faire accepter par les riverains. Il est impératif avant sa mise en œuvre de déterminer la largeur érodable le long des berges et de définir une politique foncière : achat de terrain ou compensation financière en cas d'érosion de terres agricoles par exemple.

2) Une meilleure gestion du transport solide et une amélioration des flux de sédiments

Le stock en sédiments peut être accru en remobilisant les bancs figés qui ne participent plus à l'activité morphologique du lit. Le lit principal peut être déplacé pour l'éloigner d'une zone sensible ou bien la remise en eau d'un ancien lit peut être envisagée. Ces actions ne sont efficaces que si les matériaux peuvent être repris par les crues ordinaires. Il faut donc veiller à ce que la hauteur et la vitesse des eaux soient suffisantes.

L'amélioration des flux de sédiments peut être provoquée par des actions sur les débits morphologiquement actifs :

- ouverture complètes de vannes qui bloquent le transit des sédiments ;
- création de nouvelles ouvertures dans un barrage (vannes de fond) ;
- modification des débits dérivés

Ces opérations requièrent de la prudence, ces « lâchés artificiels » peuvent poser des problèmes de sécurité à l'aval.

Les ouvrages devraient permettre d'assurer la continuité du transit. Lorsque c'est possible, les ouvrages mobiles doivent être préférés. On peut envisager l'aménagement de passe à sédiments pour les barrages existants.

3.1.3 Quelques exemples de grands fleuves européens ayant subi un forte incision

1) Le RHÔNE

a Les aménagements du Rhône

Cours d'eau puissant, impétueux et longtemps dangereux, son tracé irrégulier sur 812km a nécessité de grands travaux d'aménagements pour faire du Rhône une grande artère fluviale qui permette la production d'énergie, l'équipement industriel, la navigation et aussi l'irrigation.

L'équipement énergétique du Rhône par le biais des centrales hydroélectriques fournit 17TWh / an. Le débit de l'eau maîtrisé et abondant permet l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation et l'utilisation comme fluide de refroidissement dans l'énergie nucléaire. La navigation est largement employée grâce à un débit régularisé (biefs à faible pente, écluses à grand gabarit).

A l'amont de Lyon, le fleuve avait une structure en tresse entravant la navigation. C'est la raison pour laquelle le Canal de Miribel a été créé en 1850 par creusement et stabilisation d'un bras qui parcourait la plaine alluviale, entraînant la disparition du tressage.

b Impacts de ces aménagements

Le changement de régime hydraulique, la diminution des apports solides depuis l'amont (présence de barrages), l'extraction dans le lit mineur ont provoqué un affaissement généralisé de ce canal visible dès 1952. L'estimation de l'incision maximale de ce canal est de l'ordre de 5m entre 1987 et 1994 et de 1m entre 1985 et 1994. Il s'agit d'une valeur record. Les impacts sont nombreux. Il y a diminution de la ressource en eau pour la consommation d'eau potable et pour l'industrie par abaissement de la nappe d'accompagnement du fleuve. L'écêtement des crues est diminué, Les risques d'eutrophisation et d'assèchement des milieux sont augmentés. Les berges enrochées du canal sont déstabilisées et menacent à long terme certains ouvrages.

c Techniques de lutte employées

Pour enrayer ce phénomène, des aménagements ont été réalisés :

- Le débit réservé a été augmenté de 30m³/s à 60m³/s ;
- Un seuil a été mis en place afin de limiter les processus d'incision et de relever la ligne d'eau d'étiage.

D'autres solutions ont été proposées.

Elles sont basées sur un équilibre dynamique permettant une autorégulation du cours d'eau et sur un équilibre statique stabilisant définitivement le plancher alluvial.

Le principe est de :

- diminuer les forces tractrices lors des crues par l'élargissement du canal là où c'est possible et par la mise en place de déflecteurs à certains endroits provoquant l'érosion latérale sur une des deux rives
- diminuer les débits de plein bord pour permettre une réduction des vitesses dans le chenal en crue
- définition un espace de liberté permettant la recharge latérale
- accroître la sinuosité pour augmenter la longueur développée et ainsi réduire les pentes et les vitesses

L'apport de sédiments est envisagé pour recharger le lit par transfert ou par ouverture de barrages et de canaux. Cette méthode est déjà utilisée sur le Rhône en Chautagne.

Un autre projet de stabilisation du lit et des berges du Rhône sur le secteur franco-suisse, à la hauteur de Chancy et de Pougny (Ain) voit le jour. Il consiste en la réalisation d'un seuil intégrant différents éléments :

tapis d'enrochement au centre du fleuve avec des blocs de 0,9m de diamètre, disposés sur 40m de largeur et 100m de longueur ;

protections de berges linéaires par enrochement et stabilisation végétale ;

protections de berges ponctuelles par épis « dormants », situés à l'extérieur du lit du fleuve.

2) Le RHIN

a Les aménagements

Le Rhin traverse sur 1320 km des régions très différentes ce qui se répercute sur son régime et ses possibilités d'utilisation. Il se divise en quatre tronçons :

le Haut-Rhin, de la sortie du Lac de Constance à Bâle en Suisse;

Le Rhin supérieur, de Bâle à Bingen en Allemagne ;

Le Rhin moyen, de Bingen à Bonn en Allemagne ;

Le Rhin inférieur, de Bonn à l'embouchure au Pays-Bas.

Jusqu'au Lac de Constance, son cours est celui d'un torrent alpin typique.

Les eaux du Rhin et de ses affluents sont donc largement utilisées pour la production hydroélectrique dans les cours supérieurs. Ils produisent quelque 30 milliards de kWh

d'électricité. Entre 1995 et 1996, 11 centrales hydrauliques ont été érigées sur le Haut-Rhin. Les ouvrages ont été construits sur le cours du Rhin lui-même et sur le grand canal d'Alsace aménagé le long du Rhin pour la navigation. A proximité de Bâle, de nombreuses centrales hydroélectriques de basse chute sont exploitées en partie en commun par la Suisse et l'Allemagne.

Après Bâle, à l'état naturel, le Rhin dessinait des méandres divagants dans cette région en cours d'affaissement. Un lit artificiel a été creusé au cours de la seconde moitié du 19^{ème} siècle et le fleuve est aujourd'hui enfermé entre des digues. Les ravages des inondations ont été en grande partie arrêtés mais le raccourcissement du fleuve en augmentant sa puissance érosive a provoqué la mise à nu des barres de calcaire que recouvraient ses alluvions et l'enfoncement de la nappe d'accompagnement.

D'abord navigable uniquement sur son cours inférieur en aval de Coblenche grâce à des digues et épis aménagés dès le 18^{ème} siècle le Rhin a subi des travaux menés depuis le milieu du 19^{ème} siècle pour vaincre les difficultés de navigation en amont .

Par ses débouchés maritimes et ses divers canaux : la canalisation du Neckar, du Main, de la Moselle, de la Sarre, Le canal de la Marne au Rhin et le canal Rhin-Lippe, la liaison avec le Rhône par la trouée de Belfort et de la Saône, la liaison avec le Danube par la liaison Rhin-Main-Danube, le Rhin constitue la plus importante artère fluviale européenne. C'est la voie d'eau internationale la plus intensément utilisées dans le monde, empruntée par des bateaux de plus de 3000 Tonnes.

b Impacts de ces aménagements

Les aménagements pour la navigation, la protection contre les crues, et les ouvrages hydroélectriques ont entraîné un raccourcissement du Rhin d'un quart de sa longueur entre Bâle et la frontière de la Hesse. Les barrages constituent des pièges à sédiments qui ne peuvent plus transiter vers l'aval. La vitesse du courant s'accroît rapidement. Les îles et bancs de graviers sont détruits, les refuges et frayères à poissons disparaissent. L'érosion du fond du fleuve augmente et entraîne la baisse du niveau des eaux souterraines. Les vieux bras du Rhin, affluents phréatiques et zones alluviales ne communiquent plus avec le fleuve. 85% des zones alluviales inondables du Rhin supérieur et du Rhin inférieur ont disparu. Sur le haut Rhin, une incision de 7m en cent ans a été enregistrée.

c Techniques de lutte employées

La situation du Rhin est complexe. Les enjeux sont différents entre l'Allemagne et les Pays-Bas qui souffrent de la surabondance d'eau. L'enfoncement du lit et la concentration des débits par les épis sont favorables à la navigation. Comment lutter alors contre les effets secondaires provoqués par l'incision sans entraver les usages.

Le CIPR, Commission Internationale pour la Protection du Rhin a mis en place une stratégie commune. Il met en avant l'importance des champs d'expansion des crues, la réactivation des zones alluviales ainsi que la limitation des usages à proximité des cours d'eau. Dans certains tronçons, la destruction des barrages et des seuils devenus inutiles est envisagée.

L'apport artificiel de matériaux est une méthode d'ingénierie couramment utilisée sur le Rhin sous les barrages de Gamsheim et Iffezheim. Chaque année quelques 167000m³ de matériaux avec un diamètre moyen de 22mm sont déposés dans la rivière.

Actuellement, la recharge du lit en alluvions se fait souvent à l'aide de péniches qui récupèrent les sédiments dans des zones d'accumulations indésirables pour la navigation et les déposent à l'aval des barrages pour permettre le transit.

3) LE DANUBE

a Les aménagements du Danube

Le Danube avec une direction générale Ouest-Est traverse ou longe de nombreux états. Deuxième fleuve d'Europe centrale après la Volga par sa longueur 2850 km, la superficie de son bassin plus de 800 000 km², l'importance de son débit moyen 6500m³/s, il ne perd jamais le contact avec les grands systèmes montagneux du continent. Bien qu'il traverse quelques unes des plus grandes plaines d'Europe Centrale, le bassin Pannonien, la plaine moldo-valaque et le sud de l'Ukraine, il est alimenté jusqu'à son delta par des affluents qui lui apportent les eaux des Alpes, des Carpates et des Balkan. De nombreuses variantes de régime sont enregistrées de son cours supérieur à la mer Noire.

Des ouvrages hydrauliques et hydroélectriques ont été aménagés sur son cours. La navigation sur le fleuve sans atteindre l'intensité du trafic rhénan s'est développée avec l'industrialisation.

La rétention et l'extraction de sédiments ainsi que le recoupement des méandres pour obtenir des tronçons rectilignes sont les premières causes de dégradation de ce grand cours d'eau.

b Impacts de ces aménagements

Les impacts de l'incision affectent le Danube à certains endroits. Sur le Danube supérieur, en Allemagne des abaissements de 2,5m ont été mesurés localement. Il a été noté un abaissement du niveau de l'eau de 3 à 4m vers Bratislava en Slovaquie. Le problème essentiel concerne la zone humide qui représente une part importante dans l'écosystème de la rivière. La fréquence et la durée d'inondation sont diminuées provoquant ainsi des conditions d'habitats différentes et la perte de certaines espèces.

c Techniques de lutte employées

La priorité dans la restauration est de stopper l'incision. De hauts seuils sont installés souvent couplés à des stations hydroélectriques.

En 1993 en Slovaquie et en Allemagne, la solution apportée pour le Danube a été la relocalisation du courant du lit incisé dans un ancien bras.

Dans la région de Baden-Württemberg en Allemagne la restauration a consisté à la remise en eau de deux méandres consécutifs qui sont plus élevés que le canal incisé. Une intersection avec l'ancien chenal rectiligne et des sortes de barrages régulant le niveau d'eau permettent un écoulement faible. Ainsi, la zone humide se retrouve encerclée par de nouvelles bandes créées et l'ancien chenal qui n'est plus bloqué et participe à la décharge des eaux en cas de crue. Aucune autre mesure de protection n'a été projetée. Les graviers, extraits des deux méandres ont été réutilisés directement pour la construction. L'installation naturelle des successions végétales a été préférée aux plantations.

Deux ans après les travaux, les deux nouvelles bandes ont bougées de 10m par érosion latérale puis se sont stabilisées. De nouveaux habitats se créent au sein de la zone humide avec des secteurs constamment en eau et d'autres inondés par alternance. Cette zone après les travaux a été désignée zone protégée pour la conservation de la nature.

Mais le problème initial n'est peut-être pas résolu de façon définitive. L'incision peut-elle toucher le nouveau chenal ? Nous manquons de recul pour le savoir.

3.2 PROPOSITIONS DE LUTTE CONTRE L'INCISION AU NIVEAU DE L'ECOZONE

Dans son ensemble, la Loire possède un grand potentiel écologique et en comparaison aux autres fleuves européens a été assez peu modifiée. Dans cet ensemble ligérien relativement préservé, la Plaine du Forez constitue un point noir, où l'hydrosystème a été profondément dégradé. L'intérêt de restaurer cette partie de la Loire pour que le fleuve puisse conserver son image de « fleuve sauvage » est grand, mais la restauration de la Loire forézienne est un paradoxe car le retour à une dynamique « naturelle » ne pourra se faire sans de lourdes interventions humaines.

Compte tenu de l'ampleur du phénomène d'incision du lit sur l'Ecozone et plus généralement sur la Loire forézienne, une multitude d'actions doivent être menées si on souhaite tenter d'enrayer ce problème. En effet, l'emploi isolé d'une des méthodes de lutte quelle qu'elle soit, offrirait peu d'espoir de réussite. Seule une combinaison de méthodes variées pourrait avoir des effets notables.

La lutte contre l'incision du fleuve doit être menée à deux niveaux :

Objectifs à court terme :

La priorité est de stopper l'érosion verticale afin d'assurer la stabilité des ouvrages d'art, la production d'eau potable et la conservation des milieux alluviaux.

Objectifs à long terme :

L'autre niveau d'intervention consiste à redonner une certaine dynamique sédimentaire au fleuve afin qu'il puisse durablement reconstituer un matelas alluvial, et ainsi pérenniser les actions ponctuelles de stabilisation du lit.

3.2.1 Stabilisation du lit à la cote actuelle

Deux solutions peuvent permettre de répondre à cet objectif à court terme : L'implantation de seuils en travers du lit mineur et le pavage artificiel.

1) Implantation de seuils ou de rampes en enrochements

Avantages

La constitution d'un point dur va stopper les érosions régressives.

En relevant les lignes d'eau, les seuils réduisent la pente et les vitesses d'écoulement, ce qui conduit à diminuer la capacité érosive, et empêche les érosions progressives.

Inconvénients

La modification des écoulements induite par le seuil peut avoir une incidence sur la qualité des eaux (réchauffement, développement d'algues) ainsi que sur les écosystèmes aquatiques. En fonction de la hauteur de l'ouvrage, la franchissabilité par les poissons peut être compromise.

L'implantation d'ouvrages en travers du lit mineur est en contradiction avec le grand objectif de gestion à savoir redonner à la Loire une dynamique naturelle. Cependant, le retour vers une dynamique naturelle ne sera pas engagé tant que les problèmes liés à l'incision du lit n'auront pas été résolus. Dans ce cadre, toutes les solutions doivent être envisagées.

Choix des emplacements

Les seuils constituent des aménagements lourds qui doivent être réservés aux secteurs les plus vulnérables : les secteurs à forte pente et où les seuils de marnes subissent de fortes érosions. L'urgence consiste en une stabilisation des seuils de marne car ce sont des points faibles à l'origine d'un départ de plusieurs milliers de m³ de matériaux lors d'une même crue.

Des seuils en enrochements peuvent être implantés au droit de ces seuils de marne. Cependant, il faudra veiller à ce qu'ils restent immergés en permanence. Dans le cas contraire, l'érosion des marnes pourrait se poursuivre par dessiccation.

Dimensionnement des ouvrages

Avant de dimensionner les seuils, la définition de leurs objectifs est essentielle. Dans le cas présent, il s'agit bien de stopper les érosions régressives et de réduire la pente afin de diminuer la capacité érosive. La seule implantation de seuils pour le réengrèvement du lit ne serait pas suffisante. Elle suppose l'existence de secteurs de recharge en alluvions entre deux seuils, or les secteurs d'érosion latérale sont rares. Une reconstitution efficace du matelas alluvial par implantation de seuils peut être obtenue moyennant des ouvrages de 2 à 2,5

mètres de haut (Sogreah, 1998). Il s'agit donc d'ouvrages très lourds pour un exhaussement du fond du lit attendu de l'ordre de 30 cm.

L'implantation de seuils immergés ou de rampes en enrochements peut constituer une alternative. Elle ne permettrait pas de recharger le lit en alluvions mais stopperait les érosions régressives des seuils de marne. Elle permettrait également de limiter les impacts négatifs des seuils. Si le départ de blocs de marne est bloqué, l'érosion par dessiccation dans les interstices pourrait se poursuivre. Il convient de chercher des solutions pour éviter ce problème comme par exemple veiller à ce que les seuils restent immergés en permanence.

Estimation des coûts

De manière générale, le coût de l'installation de seuils en pierre peut être évalué à 36 € le mètre linéaire. En considérant une largeur de 100 mètres, l'installation d'un seuil revient à 3600€ environ.

Contraintes juridiques

L'implantation d'ouvrages en travers du cours d'eau peut être soumise à autorisation au titre de l'article 10 de la loi n°92-3, loi sur l'eau du 3 janvier 1992 (voir annexe 6). Le dimensionnement des ouvrages déterminera si oui ou non ils concernent la rubrique 2.4.0. de cette loi.

2) Pavage artificiel

Avantages

Le pavage va constituer une couche protectrice et éviter l'érosion de la marne.

Inconvénients

Les inconvénients résident dans les coûts élevés, dans l'approvisionnement en matériaux et dans la possibilité de rejet de matières en suspension si la marne continue à s'éroder dans les interstices sous le pavage.

Choix des secteurs à traiter

Compte tenu du coût élevé de cette méthode, toutes les zones d'affleurement de marne ne pourront pas être traitées. Les secteurs à traiter en priorité sont les secteurs les plus vulnérables soit les secteurs d'affleurements de seuils de marne en série.

Méthode opératoire et dimensionnement des matériaux utilisés

Le principe est de disposer un matelas de galets au fond du lit. Ceux-ci doivent être dimensionnés de telle manière qu'ils puissent rester en place. Ce qui implique que le débit de début d'entraînement ne puisse pas être atteint à l'échelle de plusieurs dizaines d'années. Les valeurs retenues sont des galets de 80 mm de diamètre. Pour une telle granulométrie, le débit de début d'entraînement atteint 2686 m³/s. (calcul réalisé à l'aide des formules de Meyer Peter pour une pente moyenne de 0,9‰ et une largeur moyenne du lit mineur de 80 mètres). Ces valeurs sont à ajuster en fonction de la pente et des caractéristiques de la géométrie du lit au droit du secteur à traiter.

Blocage aval

Un dimensionnement de la granulométrie adéquate permet d'assurer la stabilité globale des matériaux déposés dans le lit. Cependant, la partie aval du secteur traité sera plus sensible aux érosions régressives et doit être stabilisée afin d'éviter le départ de matériaux par un effet mécanique de roulement. La stabilité des matériaux situés en amont sera assurée par la présence même de matériaux en aval.

Le blocage aval pourra se faire de différentes manières : disposition de blocs plus largement dimensionnés, implantation de seuils immergés du même type que ceux décrits dans le paragraphe précédent..

L'approvisionnement en matériaux :

La logique voudrait que les matériaux apportés à la Loire soient ses propres matériaux, ceux qui aujourd'hui sont extraits dans le lit majeur. Deux problèmes se posent : la disponibilité et le coût élevé des matériaux. Les galets de la gamme granulométrique 60-120 mm peuvent se trouver assez facilement, mais les galets de granulométrie plus élevée (80-150 mm) pouvant être nécessaires pour certaines conditions locales d'écoulement particulières sont plus rares (sources DDE, graviéristes).

Estimation des coûts

Les coûts d'approvisionnement en matériaux (fourniture, transport, mise en place) peuvent être estimés à 10,6 €/T HT ou 21,3 €/m³ HT

Compte tenu de ce coût élevé, l'ensemble des secteurs d'affleurement de marne ,ne peuvent pas être traités de cette manière. C'est pourquoi il est indispensable de définir des ordres de priorités.

Contraintes juridiques

Ces travaux pourraient être concernés par les rubriques 2.4.0., 2.5.0., et 2.5.3. de l'article 10 de la loi sur l'eau n°92-3 du 3 janvier 1992 (Voir annexe 6), opérations soumises à autorisation.

3.2.2 Reconstitution d'une dynamique sédimentaire et d'un matelas alluvial

1) L'érosion latérale et la définition de l'espace de liberté

Concept

L'espace de liberté est un espace à préserver pour permettre au cours d'eau de conserver ou de retrouver son potentiel d'ajustement en plan (divagations), d'ajustement en long (ajustement des pentes et de la longueur), et d'équilibrer son bilan sédimentaire.

L'espace de liberté a donc pour but de :

- Préserver ou rétablir les capacités d'ajustement du cours d'eau
- Préserver la recharge alluviale
- Préserver la diversité des milieux terrestres et aquatiques
- Garantir la quantité et la qualité des ressources en eau en luttant contre l'incision

Domaine d'application

L'espace de liberté s'applique aux cours d'eau à dynamique active. C'est le cas de la Loire dans son fonctionnement naturel.

Pour être cohérent, il doit être appliqué à l'ensemble de la zone d'étude et même au delà, car le retour a un état d'équilibre sur un secteur donné, est tributaire des conditions amont et aval.

Délimitation de l'espace de liberté

L'espace de liberté a été défini selon le guide technique de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (1998)

La définition de l'espace de liberté se fait en trois grandes étapes :

Définition de l'espace de mobilité maximal : EMAX

C'est l'enveloppe la plus vaste. Elle correspond à la largeur des alluvions récentes sur la carte géologique. (Voir carte n°16)

L'espace de mobilité maximal délimite l'espace balayé par le cours d'eau à l'échelle des derniers milliers d'années. Il n'est pas exclu que les processus actuels d'érosion latérale se propagent au delà, vers les terrasses plus anciennes, voire dans les formations tertiaires marneuses.

Définition de l'espace de mobilité fonctionnel : EFONC

Cet espace est le plus complexe à délimiter et sa cartographie peut être effectuée en 6 sous-étapes :

- Approche par le concept d'amplitude d'équilibre

Ce concept décrit dans le paragraphe 2.2.1. se traduit par une enveloppe de 900 mètres autour du fleuve. (Voir carte n°10)

- Approche par la capacité de transport

Cette approche a essentiellement pour but d'identifier les gravières en lit majeur qui pourront être intégrées à l'espace de mobilité fonctionnel et celles qui devront en être exclues si leur volume dépasse notablement le volume théorique transporté par le cours d'eau (environ 10000m³). Ces dernières risqueraient de piéger la charge solide et de générer un processus d'érosion progressive. C'est le cas des gravières de Marclopt, de l'Ecopôle, de Garollet, du Gour d'Antais et de la Petite Motte.

- Approche géomorphologique historique

Il s'agit de réaliser une cartographie de l'espace de divagation historique (voir carte 9)

- Cartographie de zones d'érosion à 50 ans (Voir carte 13)

L'aléa d'érosion est délicat à définir. Il se base sur les taux d'érosion observés dans les secteurs où le cours d'eau a conservé une dynamique active (10 m/an au droit de Montrond les Bains). La cartographie des zones érodables tient compte de ce taux d'érosion et des secteurs où l'érosion est bloquée par des protections de berges ou des digues.

- Délimitation de l'enveloppe minimale fonctionnelle

C'est une étape de synthèse qui intègre l'ensemble des enveloppes précédemment définies. La carte n°17 représente l'enveloppe externe de l'espace de mobilité fonctionnel.

➤ **Approche socio-économique**

Cette étape intègre les contraintes socio-économiques majeures : Zones urbanisées, voies de communication principales, ouvrages d'art, puits de captage non déplaçables, gravières en lit majeur dont le volume pourrait bloquer la charge alluviale.

L'enveloppe finale de l'espace de mobilité fonctionnel est l'enveloppe externe définie à l'étape précédente à laquelle ont été retirées les contraintes socio-économiques majeures. Au niveau de l'Ecozone, le risque de capture de gravières est très fort, ce qui réduit considérablement cette enveloppe. Le potentiel de recharge alluviale par l'érosion des berges est assez restreint. (Voir carte 18)

Définition de l'espace de mobilité minimal EMIN

Cette dernière enveloppe est l'espace de mobilité fonctionnel retouché au cas par cas en fonction des enjeux et par concertations avec les acteurs locaux. Elle n'est pas du ressort de ce rapport.

Actions parallèles à mettre en place pour favoriser l'érosion des berges

➤ **Proscrire les protections de berges**

A l'intérieur de l'espace de liberté, toute nouvelle protection de berge sera à éviter sauf en cas d'enjeux majeurs. L'acquisition de parcelles ou l'indemnisation des riverains en cas de recul des berges peuvent permettre d'éviter ce problème. Les coûts de l'acquisition de parcelles en bord de Loire s'élève entre 4500 et 5500 €/ha. La suppression de certaines protections de berge existantes peut être envisagée en fonction de l'enjeu des terrains riverains.

➤ **Entretenir les francs bords**

L'entretien des Francs Bords peut permettre de réduire les contraintes sur les berges en empêchant le développement d'une végétation trop dense.

➤ **Diriger les écoulements vers les berges où les enjeux sont les moins forts**

Afin de réenclencher une dynamique latérale active, l'implantation de déflecteurs qui dirigent le courant vers les berges érodables peut également être envisagée. Le coût de tels ouvrages est du même ordre que celui des seuils immergés à savoir 36 € par mètre linéaire.

Cadre juridique

La notion d'espace de liberté possède un cadre juridique fort. Elle fait partie des grandes préconisations du SDAGE, avec lesquelles toutes les actions de gestion doivent être en conformité.

SDAGE Loire Bretagne :

« dans les zones de forte variabilité du lit des cours d'eau, un fuseau sera déterminé à l'intérieur duquel la priorité sera laissée au déplacement des bras ou des méandres. Si des champs captants menacés s'y trouvent, leur déplacement devra être envisagé en tout premier lieu, de même que pour toute autre activité qui pourrait requérir une protection »

De plus, l'arrêté ministériel du 24 janvier 2001 modifiant l'arrêté du 22 septembre 1994 stipule :

« Les exploitations de carrières de granulats sont interdites dans l'espace de mobilité du cours d'eau ». (Art II , alinéa 1).

« L'espace de mobilité du cours d'eau est défini comme l'espace du lit majeur à l'intérieur duquel le lit mineur peut se déplacer » (Art II , alinéa 2).

Ainsi, si la préservation de l'espace de liberté n'assure pas à elle seule la recharge alluviale à court terme, la définition de l'espace de mobilité fonctionnel permet d'empêcher l'implantation de nouvelles contraintes préjudiciables à l'hydrosystème.

2) Actions sur la végétation

Le développement de la végétation et surtout des ligneux sur les îlots et grèves n'est pas favorable au transit des sédiments. Le développement d'une ripisylve dense limite considérablement les possibilités de divagation du cours d'eau, et donc de recharge latérale en sédiments.

L'entretien de la végétation a donc deux objectifs principaux :

- Réduire l'emprise de la végétation afin de limiter les phénomènes de peignage des sédiments
- Favoriser la remobilisation des bancs alluviaux et l'érosion latérale.

Inconvénients :

La mise à nu des îlots et atterrissements favorise le développement d'espèces végétales invasives comme la renouée du Japon pouvant être problématique.

Coûts

Les coûts des déboisements sont modestes et peuvent s'accompagner d'une scarification des îlots. Cette technique permet de casser la couche de surface de granulométrie plus grossière pour favoriser l'entraînement des sédiments lors du passage de la crue.

3) Apports extérieurs de matériaux dans le lit.

Les difficultés résident dans la recherche des matériaux, dans le transport et le coût élevé des opérations. Cette technique nécessiterait l'extraction de quantités importantes de sédiments dans le lit majeur or les sites d'extraction possibles sont de plus en plus rares et les enjeux fonciers de plus en plus forts. Les matériaux sont de moindre qualité (granulométrie différente de celle des matériaux du lit mineur et grandes quantités de fines).

4) Actions au niveau du barrage de Grangent***a Gestion des débits réservés***

Les variations importantes de niveau d'eau en période d'étiage favorisent la dessiccation des marnes et donc le processus d'enfoncement du lit. Un débit réservé plus important au sortir du barrage de Grangent pourrait éviter l'émersion des marnes et réduire ainsi le phénomène de dessiccation. Outre les contraintes concernant le fonctionnement du barrage, il existe une convention avec la ville de Saint Etienne pour que le barrage soit maintenu plein pendant toute la période estivale afin de permettre les loisirs nautiques. L'action sur les débits réservés ne peut se faire que par un consensus entre les différents gestionnaires et acteurs locaux. D'un point de vue fonctionnel, la modélisation des surfaces immergées peut apporter une aide précieuse pour la définition de ce débit.

b Gestion du transit solide

Comme nous l'avons vu au paragraphe 3.1.2., une meilleure gestion du transit solide au niveau des barrages peut passer par l'installation de vannes de fond. Compte tenu du niveau de pollution des sédiments stockés dans la retenue, cette solution aurait des conséquences plutôt catastrophiques sur les écosystèmes aquatiques. Faut-il rappeler que la vidange décennale réglementaire n'est pas effectuée sur ce barrage pour ces mêmes raisons ?

c Dragage des sédiments : Une solution alternative ?

Afin de rétablir le transport solide, d'autres solutions méritent d'être étudiées. L'approvisionnement en alluvions pour l'apport de matériaux extérieurs dans le lit étant très difficile, le dragage des sédiments nouvellement déposés à l'amont de la retenue de Grangent, pourrait constituer une source d'alimentation en alluvions.

On peut raisonnablement penser que les matériaux déposés à l'amont de la queue de retenue soient les plus grossiers et les moins pollués, mais avant tout dragage, des analyses précises de la qualité des sédiments seraient à effectuer.

Récupération des sédiments

Dans le cas de sédiments peu pollués, un dragage mécanique pourrait s'effectuer à l'aide de draglines pour des coûts de 12€/m³ (Source : VNF). La queue de retenue est aussi l'endroit le moins profond ce qui faciliterait les opérations.

Transport

Le transport est souvent l'opération la plus coûteuse. Il peut s'effectuer de différentes manières : le transport par route est très coûteux et fastidieux à mettre en place. Le transport par barge ou péniche permet de charger de plus grandes quantités de sédiments et ainsi de réduire les coûts.

Reste la question du franchissement du barrage. L'installation de tapis roulant peut être une solution mais elle reste à étudier.

Dépôt des sédiments dans le lit du cours d'eau à l'aval du barrage.

Deux solutions sont envisageables :

Dépôt des matériaux directement dans le lit du fleuve. Cette solution est délicate car elle nécessite une dérivation temporaire des eaux et favorise le relargage de matières en suspension.

Dépôt des sédiments sur les berges avec talutage de manière à ce qu'ils puissent être mobilisés lors de la crue annuelle.

Ces interventions peuvent avoir des conséquences importantes sur les lignes d'eau en crue qu'il conviendra d'évaluer de manière précise. Le dépôt des sédiments serait peut-être préférable à l'aval des secteurs très urbanisés (aval d'Andrézieux Bouthéon) plutôt qu'à l'aval immédiat du barrage. D'autant que l'aval immédiat du barrage ne subit guère d'incision. Un pavage du lit s'est constitué. Ce nouveau paramètre augmenterait encore le coût des opérations, mais réduirait les risques en matière de sécurité.

Avantages

Cette méthode permet de rétablir un transport solide et donc d'aller dans le sens d'un système plus fonctionnel en aval du barrage. L'implantation simultanée de petits seuils immergés favoriserait la reconstitution du matelas alluvial au niveau de la plaine du Forez, et éviterait le passage trop rapide des sédiments vers l'aval, où ils seraient piégés dans la retenue de Villerest. Il est à noter que le barrage de Villerest est équipé de vannes de fond et peut permettre le passage des sédiments.

Inconvénients et contraintes

Les contraintes en matière de sécurité des personnes et le coût élevé des opérations représentent des inconvénients majeurs. D'autres inconvénients peuvent se faire sentir comme les perturbations occasionnées par les travaux de dragage sur l'hydrosystème, le paysage et sur les usages (La retenue de Grangent, au niveau des Gorges de la Loire est un site de loisirs très fréquenté).

Coûts et financements

Le chiffrage des opérations ne peut être effectué à ce jour, il comprendrait les coûts du dragage, du transport, du talutage des berges, du système de franchissement du barrage des études de qualité des sédiments de risques encourus.

Les exploitants de gravières en milieu alluvionnaire sont les plus à même d'effectuer ce genre de travaux. Ils disposent du matériel nécessaire. Les coûts de fonctionnement pourraient être

assurés par une entreprise de graviéristes qui prélèverait un certain pourcentage de matériaux pour son exploitation. Mais cette éventualité se heurte à l'interdiction d'exploitation dans le lit mineur des cours d'eau.

Contraintes juridiques

Ce projet serait soumis à autorisation au titre de la loi sur l'eau. Les rubriques concernées seraient la rubrique 2.6.1. relative au dragage, la rubrique 2.5.0. relative aux travaux conduisant à une modification des profils en long et en travers du cours d'eau, et la rubrique 2.5.3. relative aux remblais en lit mineur constituant un obstacle à l'écoulement des crues. (Voir annexe 6)

3.2.3 Financements des techniques de lutte contre l'incision

Les sources de financement pour ces travaux de restauration de l'hydrosystème sont à rechercher, mais différents organismes pourraient participer : Agence de l'eau Loire Bretagne, FEDER, Conseils Régionaux et Généraux, Ministère de l'Environnement, EDF, graviéristes...

3.3 PROPOSITIONS DE GESTION PAR TRONÇONS

Chacun des tronçons décrits ci-dessous se réfère à une carte illustrée dans le volume 2.

3.3.1 Montrond : Les Trois Becs

Ce tronçon situé à l'amont du pont SNCF de Montrond les Bains possède une dynamique active.

Ce secteur doit son nom des Trois Becs à la confluence avec la Mare en rive gauche, la Coise et l'Anzieux, affluent de la Coise en rive droite.

L'occupation des sols à proximité est agricole : zone des Petits Chambons.

Il n'a pas été touché directement par les extractions. C'est un secteur « naturel » mais où les phénomènes d'érosion sont exacerbés par le déficit des apports d'amont.

a Etat des berges et érosion latérale

Les berges sont assez verticales avec une hauteur de 3 à 4 m et ne sont pas protégées. Une érosion importante est observable sur les 2 rives : recul d'environ 30m sur un linéaire de 400 mètres entre 2001 et 2004 ce qui correspond à un volume de 25 000 m³ susceptible de recharger le lit à l'aval. Ces terrains ont été acquis par le Conseil Général de la Loire dans le but de permettre cette érosion. Une colonie intéressante d'hirondelles de rivages a pu s'installer à cet endroit. Toujours en rive droite, à l'aval de cette zone, un important dépôt d'alluvions grossiers (galets en surface) s'est formé lors de la crue de 2003 par peignage des sédiments dans la végétation. Les alluvions ne semblent pas provenir de l'érosion de cette berge, leur granulométrie est beaucoup trop élevée. Ils proviennent très probablement des stocks des gravières en exploitation à l'amont du site qui ont été emportés par la crue.

b Etat du lit et érosion verticale

Les affleurements de marnes ne sont pas visibles. En revanche, on retrouve des blocs de taille métrique à l'amont immédiat du pont en provenance des seuils de CRAINTILLEUX.

c Perspectives d'évolution en absence d'intervention

L'érosion de la berge constitue l'un des rares points où la recharge en alluvions est significative. A raison de 10m/an, cette érosion peut produire 8000m³ de sédiments. Les apports de la Mare (affluent) peuvent également constituer un point intéressant au niveau local. Les dépôts situés en rive droite constituent un stock facilement mobilisable. Cependant, une végétation arborescente favorise le phénomène de peignage et empêche les sédiments d'aller recharger le lit en aval.

d Principes de gestion

Le secteur apparaît comme fonctionnel, aucune intervention ne semble justifiée, si ce n'est une intervention sur la végétation pour éviter ce phénomène de peignage des sédiments. Il conviendra également de veiller à ce que ces alluvions, réduisant la section des écoulements, n'aient pas d'impact sur les lignes d'eau à l'amont des ponts.

3.3.2 Montrond : Aval du pont SNCF

Ce tronçon s'étend de l'aval du pont de Montrond à l'amont de la boucle de Marclopt

a Etat des berges et érosion latérale

La Loire longe la terrasse en rive droite, ce qui laisse apparaître par endroit une falaise de marne d'une dizaine de mètres. La rive gauche est occupée par les terres agricoles. La berge est assez verticale, d'une hauteur de 2m environ. Les matériaux sont de granulométrie variée et les berges sont peu cohésives. Cependant, la configuration de la sinuosité ne rend pas cette berge très sujette à l'érosion (convexité du méandre) D'autant que la ripisylve est dense. Au contraire, des grèves rattachées à la rive gauche ont été observées.

b Etat du lit et érosion verticale

Les affleurements de marne sont omniprésents à l'aval du pont de Montrond mais ils ne présentent pas de configuration en seuil transversal. Une nouvelle configuration qui n'avait pas été décrite auparavant apparaît sur ce tronçon. Ils sont érodés par départ de blocs de marne à partir du milieu du chenal.

c Perspectives d'évolution en absence d'intervention

L'évolution latérale est assez limitée en rive droite à cause de la proximité de la terrasse au niveau de la concavité du méandre ; Celui-ci pourrait se rétracter mais la ripisylve dense en rive gauche ne favorise pas les érosions.

d Principes de gestion

Ce secteur pourrait se prêter à l'implantation de déflecteurs afin de favoriser les érosions sur la rive gauche. Celle-ci présente un bon potentiel de recharge alors que l'érosion en rive droite est bloquée par la terrasse. Cependant une réduction de la sinuosité augmenterait la pente, ce qui n'est pas forcément souhaitable. Des études plus précises doivent être menées si on souhaite favoriser cette érosion.

3.3.3 Tronçon 1 : Marclopt amont

Ce tronçon correspond à l'amont de la boucle de Marclopt . Il est caractérisé par une pente moyenne importante (1,35‰). C'est un secteur d'anciennes gravières, très proche du lit mineur. Les gravières les plus en amont ont été capturées et forment des chenaux multiples.

L'intérieur de la boucle de Marclopt (convexité du méandre) est occupé par un grand plan d'eau séparé de la Loire par des digues en remblais. La berge opposée est une zone de culture.

a Etat des berges et érosion latérale

En rive gauche, l'érosion latérale est bloquée par des enrochements sur la rive concave. C'est pourquoi le tracé en plan de la boucle de Marclopt est resté relativement stable dans le temps.

En rive droite, des chutes d'arbres au cours de la crue 2003 ont provoqué des encoches d'érosion localisées. Plus impressionnantes ont été les brèches dans les digues occasionnées par le passage de la Loire au niveau du grand plan d'eau.

La capture d'anciennes gravières par succession de plan d'eau en série peut être apparentée aujourd'hui à un bras secondaire en cours de comblement. Cependant, celui-ci a été rouvert lors de la crue de 2003. Certaines grèves ont été remises à nues. La végétation des îlots (peupliers noirs majoritairement) a été couchée mais repart.

b Etat du lit et érosion verticale

L'entrée du tronçon est constituée d'un seuil d'une pente de 4‰ sur 150m. C'est un seuil de marne partiellement recouvert d'une faible épaisseur d'alluvions grossiers. Le reste du tronçon fait apparaître des affleurements continus de marne sur toute la largeur du lit mineur et trois seuils de taille plus modeste que le premier qui montrent une forte érosion.

c Perspectives d'évolution en absence d'intervention

- Erosion latérale bloquée en rive gauche. Les enrochements sont en mauvais état et pourraient être déstabilisés, rendant possible une érosion future.
- Possibilité de changement de lit et abandon du chenal principal. La Loire emprunterait alors le bras secondaire actuel ou possibilité de conservation du lit actuel avec comblement du bras secondaire.
- Risque de recoupement du méandre et de capture de la gravière située dans la convexité. La direction des écoulements de la Loire en crue et les brèches observées dans les digues tendent à renforcer cette hypothèse. Cependant l'altitude élevée du plan d'eau par rapport à celle de la Loire pourrait constituer une limite.

Outre le piégeage de sédiments qu'entraînerait la capture, une réduction du linéaire du fleuve aurait pour conséquence d'augmenter encore la capacité érosive.

d Principes de gestion

- La priorité est d'éviter la capture de la gravière située dans la convexité du méandre. Cette gravière d'un volume supérieur à 300 000 m³ est susceptible de piéger une grande quantité de sédiments. Un retalutage des berges pourrait permettre de limiter ce risque.
- Maintenir la connexion du bras secondaire car il permet de répartir les écoulements et de limiter les agressions du lit au niveau du bras principal
- Ne pas entretenir les protections de berges en rive droite à défaut de les supprimer.
- Protéger les seuils de marne soit par des rampes en enrochement soit par pavage, mais compte tenu de la forte pente, les rampes en enrochements sont plus faciles à implanter.

3.3.4 Tronçon 2 : Marclopt aval

Ce tronçon est caractérisé par une pente très faible qui lui confère un faciès d'écoulement de plat lentique très homogène. Un site de traitement des matériaux est présent en rive droite.

a Etat des berges et érosion latérale

La granulométrie des berges est plus fine qu'à l'amont. Les protections des berges sont présentes sur tout le linéaire en rive gauche et à hauteur du site de traitement des matériaux en rive droite.

b Etat du lit et érosion verticale

Une profondeur et une turbidité de l'eau importante ne permettent pas d'observer la composition du fond de lit et de savoir si les affleurements de marne sont présents. Cependant l'observation de marnes en pied de berge sur 20cm laisse penser que le fond est constitué d'affleurements continus.

c Perspectives d'évolution en absence d'intervention

Les perspectives d'évolution en cas de recoupement du méandre et concernant les érosions en rive gauche ont été énoncées pour le tronçon précédent. Cependant, la vitesse d'érosion verticale sera certainement plus faible compte tenu de la faible pente.

d Principes de gestion

Aucune intervention ne semble justifiée

3.3.5 Tronçon 3 : Secteur du Gourd Jaune

Le tronçon 3 débute à l'aval de la boucle de Marclopt et se termine à l'aval du Gourd Jaune. Il se caractérise par une pente moyenne importante, avec un phénomène de tressage à l'aval (tressage du Gourd Jaune). La dynamique du tracé en plan a été plus grande ici que sur les deux tronçons précédents.

Il se découpe en 3 sous-tronçons :

1) Premier sous-tronçon

Le 1^{er} sous tronçon en amont apparaît moins endommagé que les autres. Il possède des îlots et des bancs de galets sur une surface importante.

a Etat des berges et érosion latérale

Les berges ne sont pas protégées en rive droite. Leur hauteur est de 2 à 3 m avec une cohésion assez faible. Les secteurs d'érosion y sont visibles. En rive gauche, On trouve des grèves et des berges enrochées.

b Etat du lit et érosion verticale

Les substrats sont constitués de galets, sables et graviers et de blocs de marne très probablement en provenance de Marclopt et déposés ici. La pente est importante et on trouve des radiers : habitat intéressants pour la macrofaune benthique.

c Perspectives d'évolution en absence d'intervention

Remobilisation possible des bancs alluviaux à condition que la végétation ne se soit pas trop installée. Des érosions sont possibles dans les extrados, mais la proximité de la terrasse limite les possibilités de divagation en rive droite. En rive gauche, la divagation est bloquée.

d Principes de gestion

- Veiller à ce que les îlots ne se stabilisent pas et puissent être mobilisés. Envisager des déboisements dans le cas contraire.

2) Deuxième sous-tronçon

Le 2^{ème} sous tronçon diffère par sa pente. Il correspond à un replat juste avant le seuil de marne à l'entrée du tressage du Gourd Jaune. Les berges sont semblables au 1^{er} sous tronçon. On observe l'apparition de marne dans le lit.

a Etat du lit et érosion verticale

Compte tenu de la faible pente le lit est moins sollicité.

b Principes de gestion

Aucune action particulière n'est à prévoir. Le rehaussement général du plancher alluvial permettrait de maintenir des connexions avec les annexes hydrauliques intéressantes en rive gauche, mais il ne dépend guère d'actions ponctuelles sur ce court tronçon.

3) Troisième sous tronçon

C'est une zone de tressage avec une réserve importante de sédiments sur les îles. Elle est apparue à la suite de la capture d'une gravière lors de la crue de 1980.

a Etat des berges et érosion latérale

En rive droite, on retrouve une terrasse de 10m de haut constituée de marne.

La rive gauche est subverticale et constituée d'alluvions.

b Etat du lit et érosion verticale

L'érosion verticale était déjà présente en 1946 : 2 seuils de marne actuels étaient déjà identifiables sur la photo aérienne de 1946.

Des dépôt et atterrissements sont observables à l'entrée du chenal d'alimentation des plans d'eau de l'Ecopôle.

Des affleurements continus de marne se retrouve dans chacun des bras de tressage. Elle s'explique par l'exploitation des matériaux jusqu'au toit du substratum, suivie d'une capture de la gravière.

c Perspectives d'évolution en absence d'intervention

L'abandon des bras secondaires au profit du bras du milieu réduit la sinuosité du cours d'eau. Le chenal principal emprunté est très étroit et peut être amené à subir une forte incision. L'érosion latérale est bloquée en rive droite. Elle serait possible en rive gauche mais à l'heure actuelle le cours d'eau emprunte un autre chenal. Les matériaux des îles peuvent être facilement remobilisés.

d Principes de gestion

- Limiter l'emprise de la végétation sur les îlots. Des actions de déboisements ont déjà été menées à l'automne 2003 et ont permis de remobiliser d'importantes quantités de sédiments.
- Eviter la déconnexion des chenaux secondaires car ils permettent d'étaler les écoulements et de réduire les forces érosives sur le fond.
- Pour stopper l'incision, l'implantation de seuils et le pavage peuvent être envisageables sur ce tronçon, mais la pente importante (2,6‰) nécessiterait des matériaux de granulométrie plus grossière et augmenterait les difficultés de réalisation dans le cas d'un pavage

3.3.6 Tronçon 4 : Ecopôle

La Pente est très faible, le faciès de courant est plat et homogène. La rive gauche est occupée par les plans d'eau de l'Ecopôle.

a Etat des berges et érosion latérale

En rive droite, l'incision dans la marne est de 1m en pied de berge.

Des annexes hydrauliques sont présentes entre la Loire et les terrasses mais ont été creusés dans la marne et offrent peu d'intérêt écologique.

En rive gauche, la berge est constituée d'alluvions de granulométrie variée. Elle est haute de 3m environ et n'est pas protégée.

b Etat du lit et érosion verticale

L'affleurement de marne est continu. L'érosion se fait par le milieu du chenal et produit un « effet canyon ». A ce niveau, la confluence de la Toranche présente une incision marquée dans la marne et de nombreux seuils en série.

c Perspectives d'évolution en absence d'intervention

Poursuite de la perte des matériaux par le milieu du chenal. L'incision importante par ce processus est à surveiller. Il y a peu d'évolution possible en rive droite. Risque de capture des plans d'eau de l'écopôle par débordement au niveau du tronçon 3.

d Propositions de gestion

- Eviter la capture des plans d'eau de l'Ecopôle qui présentent un volume cumulé supérieur à 500 000 m³. Pour cela, il faut conserver les digues en bon état.
- La technique du pavage pour bloquer l'incision pourrait être efficace. La pente est faible ce qui favoriserait la stabilité des matériaux et nécessiterait une granulométrie moins importante. Mais le linéaire à traiter est très long. Les coûts seraient élevés. La technique des seuils est moins adaptée dans ce contexte.

3.3.7 Tronçon 5 : Amont de l'Ile Moriaud

La pente est plus forte sur ce tronçon. On retrouve de nombreux seuils de marne sur ce tronçon.

Un bras mort, bras principal en 1850, témoigne des divagations passées.

L'île Moriaud encadrée par le lit actuel de la Loire et cet ancien bras a fait l'objet d'exploitations de granulats sur toute sa superficie, puis les gravières ont été réaménagées. L'entrée du bras a été barrée par une digue en remblais.

a Etat des berges et érosion latérale

Rive gauche : Bras du Brochet. Cette ancienne gravière capturée a été réaménagée en un site de frayère, elle assure un niveau d'eau toujours satisfaisant pour la reproduction des poissons. Elle est aménagée à l'aval par un seuil ce qui la rend sujette à des atterrissements. La rive droite à l'entrée de l'île Moriaud est caractérisée par la présence d'une digue en remblais. C'est le passage préférentiel de la Loire lorsqu'elle est en crue et qu'elle cherche à reprendre son ancien tracé. La digue a été endommagée lors des crues de 1996 et 2003.

b Etat du lit et érosion verticale

On retrouve les affleurements de marne et des seuils en série, mais des galets recouvrent cette marne par endroit constituant un pavage protecteur.

c Perspectives d'évolution en absence d'intervention

Possibilité de changement de lit par reprise de l'ancien bras

Comblement du Bras du Brochet et incision du chenal principal.

Divagation bloquée qui laisse peu d'espoir de recharge alluviale même avec une reprise de l'ancien bras.

d Principes de gestion

- L'arrêt de toute exploitation sur l'île Moriaud ne rend plus indispensable l'entretien de la digue. Le site a été récemment évacué par les ferrailleurs. Un retalutage permettant la reconnexion du bras mort par l'amont et réduirait ainsi les forces érosives sur le chenal peut être effectué.

- Le curage du Bras du brochet peut être envisagé avec dépôt des matériaux dans le chenal.

- Stabilisation des seuils de marnes par pavage

3.3.8 Tronçon 6 : Villeneuve

La pente est plus faible.

a Etat des berges et érosion latérale

Rive gauche : Un enrochement est installé dans le but de protéger les terres agricoles

En rive droite, au niveau de l'île Moriaud, la berge est souvent constituée de remblais.

b Etat du lit et érosion verticale

Les affleurements réguliers constituent une surface lisse et entraînent une réduction du coefficient de rugosité rendant le courant très agressif à la Caille (secteur situé juste en aval). Une érosion se produit par abrasion de la surface du substratum, moins rapide que dans les tronçons amont et aval où l'érosion se fait par recul des seuils.

c Perspectives d'évolution en absence d'intervention

Poursuite de l'abrasion des marnes

Risque d'un changement de lit déjà évoqué pour le tronçon précédent (reprise du bras mort)

d Principes de gestion

- L'enlèvement des protections de berge et le rachat des terrains en rive gauche pourrait être envisageable, mais la digue protégeant le hameau de Villeneuve pourrait se trouver menacée. Cette solution est à appréhender avec précautions. De plus, le coût de l'enlèvement des protections de berge est élevé.
- Un pavage du substratum pourrait avoir un effet bénéfique, augmenter sensiblement la qualité de l'habitat et limiter l'abrasion, mais compte tenu de l'importance de la surface à traiter et de la faible vitesse d'érosion, ce secteur ne constitue pas une priorité.

3.3.9 Tronçon 7 : La Caille

Secteur de la Caille, amont de la Grande Motte et Confluent du Garollet.

La pente est forte avec de nombreux seuils en série.

La gravière amont du Garollet, la plus grande, est séparée de la Loire par une digue haute. Les gravières aval sont des plans d'eau anciens plus ou moins reliés entre eux et en communication avec la Loire pour des débits assez faibles.

a Etat des berges et érosion latérale

La hauteur moyenne de la rive gauche est de 2 mètres. Cette berge est constituée d'alluvions.

La rive droite est protégée par des enrochements et hautes de 4 mètres environ.

b Etat du lit et érosion verticale

Les affleurements généralisés se présentent sous forme de petits seuils de 0,20 à 0,70m de hauteur. Ces seuils évoluent rapidement et reculent par départ de pavés de 20 à 30cm de côté.

c Perspectives d'évolution en absence d'intervention

Probabilité de recoupement du méandre ce qui en apparence pourrait fournir une charge alluviale importante. Mais la convexité du méandre a été exploitée puis remblayée, et la caractéristique des matériaux de remblais n'est pas connue. La remobilisation de ces remblais n'est pas forcément souhaitable.

d Principes de gestion

- La protection des seuils de marne par pavage est ici particulièrement bien adaptée. Une étude détaillée de cette solution sur ce tronçon a été effectuée par SOGREAH en 1998, mais depuis, aucune action n'a été mise en place.
- Le déboisement du banc de convexité de la Caille permettrait de limiter les phénomènes de peignage des sédiments. En effet, un volume important de sédiments a été stoppé par la végétation lors de la crue de 2003.
- Les enrochements en rive droite sont assez récents, et permettent pour l'instant d'éviter la capture de la gravière du Garollet. Aucune action n'est à prévoir concernant les protections de berge.

3.3.10 Tronçon 8 : De la Grande Motte à Feurs

Ce tronçon correspond à l'influence du barrage de Feurs. Il a fait l'objet d'un recalibrage après la crue de 1980. C'est un secteur d'anciennes gravières.

a Etat des berges et érosion latérale

Rive gauche : Le tronçon s'étend sur les secteurs de la Grande Motte et de la Petite Motte. Au niveau de la grande Motte la berge est haute, enrochée pour protéger les habitations bordant le cours d'eau. La petite Motte présente une grande largeur et de nombreuses îles apparues suite à la capture d'une gravière. Les dépôts d'alluvions et de blocs de marne sur ces îles ont été importants lors de la crue de 2003.

En rive droite se trouvent les anciennes exploitations du Gourd Nantais et du Gourd de Randan séparées de la Loire par une digue haute et régulière.

b Etat du lit et érosion verticale

L'érosion verticale ne concerne pas ce tronçon qui subit l'influence du barrage de Feurs.

c Perspectives d'évolution en absence d'intervention

Risque de capture des gravières situées en rive droite, ce qui pourrait piéger une grande partie de sédiments mais les possibilités de divagation au-delà des gravières sont grandes.

Erosion en pied de berge par le marnage du plan d'eau de retenue.

Stabilisation des îles par la végétation et phénomène de peignage des sédiments

d Propositions de gestion

- Le déboisement des îlots permettrait d'augmenter le transit des sédiments vers l'aval, lors de l'ouverture du barrage de Feurs, mais l'accès est difficile et le dérangement de la faune serait important.

- Compte tenu des possibilités de divagation au-delà de la gravière, il n'apparaît pas indispensable de lutter à tout prix contre la capture des petits plans d'eau. Cependant, il convient d'éviter la capture de la plus grande des gravières.

CONCLUSION

L'évolution du paysage fluvial laisse une Loire forézienne et ses abords imprégnés par la marque de l'homme. Les aménagements, surtout depuis la deuxième moitié du XX^{ème} siècle ont fortement perturbé l'hydrosystème. Le barrage de Grangent et les extractions massives de granulats l'ont amputée d'une grande partie de son stock alluvial. C'est une Loire incisée, coulant sur le substratum, qui a perdu sa dynamique latérale et ses possibilités de divagation. Les grèves et bancs de galets qui faisaient l'originalité de ce milieu ont quasiment disparu, colonisés par une végétation arborescente. Les gourds sont en nette régression et on assiste à une banalisation des milieux alluviaux. Les conséquences de ce phénomène observé sur de nombreux fleuves européens conduisent à une prise de conscience de la nécessité de préserver et de restaurer ces hydrosystèmes dégradés. En effet, il apparaît indispensable de lutter contre ce dysfonctionnement majeur qu'est l'incision du lit, si on tient à préserver l'originalité des milieux alluviaux et à assurer la pérennité des usages, en particulier, la production d'eau potable. Le problème est complexe et les solutions sont variées. Elles ouvrent une perspective vers un nouveau mode de gestion du fleuve, intégrant sa dynamique naturelle et ses capacités d'ajustement. La préservation d'un espace de liberté pour les cours d'eau à dynamique active en est le résultat.

BIBLIOGRAPHIE

LIVRES

- AUCLAIR R., BELIN B., BOUCHARDY C., CLAVIER JL., COCHET G., FAIN J., FEL A., MALAVOI JR., SOUCHON Y., SURMELY F., TORT M, 2002, -La Loire – Vallées et vals du grand fleuve sauvage -, Delachaux et Niestlé, Paris, 287 pages

DOCUMENTS ET OUVRAGES

- ALLIGNOL F., avril 1997, Analyse spatiale et aide à la décision pour la recherche de nouveaux gisements alluvionnaires. Application à la Loire supérieure, Université Jean Monnet de Saint Etienne, Ecole des Mines de Saint Etienne, Thèse de doctorat, 255 pages.
- CESAME, GEO SCOP, 2003, Plan de gestion Ecozone/ Ecopôle du Forez 2003-2008, Volet milieux naturels, Etat des lieux, FRAPNA Loire, 84 pages.
- CREPET F., mai 1997, Les effets de l'artificialisation des écoulements : application aux bassins de la Loire et de l'Allier amont, Université de Cergy Pontoise, thèse de doctorat, 547 pages.
- DELORME F., octobre 1994, Les Changements de la morphodynamique fluviale de la Loire dans la plaine du Forez entre Montrond et Feurs, Université de Lyon III, mémoire de DEA Interface Homme Nature, 121 pages.
- DUPIEUX N., octobre 2003, - Elaboration d'un protocole commun de description des annexes fluviales du programme Loire Nature – Document de travail – Orléans, Equipe Pluridisciplinaire du Plan Loire Grandeur Nature, Espaces Naturels de France mission scientifique. 37 pages
- Equipe Pluridisciplinaire du Plan Loire Grandeur Nature, WWF France, Espaces Naturels de France, DIREN Centre, Agence de l'eau Loire Bretagne, Ministère de l'Environnement, 1998, - Les actions les plus marquantes du programme Loire Nature 1993-1998 – Recueil d'expériences – Paris, WWF, 1998, 152 pages
- Equipe pluridisciplinaire du Plan Loire Grandeur Nature, Description des unités morphologiques du lit de la Loire et de l'Allier
- MALAVOI J.R., novembre 1998, Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau, guide technique n°2, Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 40 pages.
- MIMOUN D., février 2004, Spatialisation de l'information, une aide à l'analyse hydraulique et paysagère - Développement lors de la réhabilitation des sites post-industriels – Cas du réaménagement des gravières en eau en milieu alluvionnaire – 362 pages.

- SOGREAH Ingénierie, AQUASCOP, juillet 1996, étude géomorphologique de la Loire dans le département de la Loire, Direction Départementale de l'Équipement de la Loire, Ministère de l'environnement, Agence de l'eau Loire-Bretagne, Conseil général de la Loire, UNICEM Rhône-Alpes, 5 volumes
- SOGREAH Ingénierie, juin 1998, Reconstitution du matelas alluvial de la Loire, Etude générale, Etude détaillée du site de Feurs la Grande Motte, Direction Départementale de l'Équipement de la Loire, 46 pages.

RAPPORTS DE STAGE

- CHATEAUVIEUX M., septembre 2002, - L'île Moriaud – Bilan et perspectives – Rapport de stage de Maîtrise des Sciences et Techniques en Ingénierie des Milieux Aquatiques et des Corridors Fluviaux, Université de Tours, 60 pages
- SOURIAU S., juillet 2004 – Les roselières de l'Écopôle du Forez – Etat des lieux et propositions de gestion – Mémoire de maîtrise biologie des populations et des Ecosystèmes, Université d'Angers
- THEVENET J., 2003, - La Boucle de Marclopt – Etat des lieux et propositions de gestion – Mémoire de DESS Restauration des Milieux Aquatiques Continentaux, Université de Clermont Ferrand, 48 pages

SITES INTERNET CONSULTES

- DIREN Rhône Alpes
- DIREN de bassin Loire Bretagne
- IGN

CARTES UTILISEES

- Carte IGN au 1 :25 000 : Feurs
- Carte IGN au 1 :25 000 : Veauche
- Ministère des Armées, 1849, Carte au 1 :20 000

PHOTOGRAPHIES AERIENNES

- IGN : Missions de 1946, 1980, 1991, 2001
- CEMAGREF, Maison de la Télédétection, juillet 2004

TABLE DES MATIERES

RESUME.....	2
ABSTRACT	2
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	3
INTRODUCTION.....	4

CHAPITRE 1 PRESENTATION DE LA STRUCTURE D’ACCUEIL, OBJET DU STAGE ET METHODOLOGIE.....

1.1 PRESENTATION DE LA STRUCTURE D’ACCUEIL.....	5
▪ 1.1.1 La FRAPNA région 5	
▪ 1.1.2 La FRAPNA Loire 5	
▪ 1.1.3 Le projet Ecopôle / Ecozone 6	
1) historique.....	6
2) Partenaires, acteurs et financements.....	7
3) Objectifs des plans de gestion.....	8
1.2 OBJET DU STAGE	9
▪ 1.2.1 Définition du phénomène d’incision 9	
1) Les principales causes	9
a Facteurs naturels : influence des variations climatiques	9
b Facteurs anthropiques.....	10
2) Les principales conséquences.....	10
a Conséquences écologiques.....	10
b Conséquences socio-économiques	11
▪ 1.2.2 Contexte 11	
1.3 METHODOLOGIE	12

CHAPITRE 2 ETAT DES LIEUX ET DIAGNOSTIC

2.1 CARACTERISTIQUES GENERALES DU BASSIN VERSANT DE LA LOIRE AU NIVEAU DE L’ECOZONE	16
▪ 2.1.1 Caractéristiques physiques 16	
1) Localisation et délimitation de la zone d’étude.....	16
2) Contexte climatique.....	17
3) Géologie et hydrogéologie	18
a Géologie	18
b Hydrogéologie.....	18
4) Réseau hydrographique et hydrologie.....	20
a Réseau hydrographique	20
b Hydrologie.....	20

▪	2.1.2 Caractéristiques écologiques	25
1)	Qualité de la Loire.....	25
a	Qualité physico-chimique des eaux de la Loire	25
b	Qualité biologique	26
2)	Richesse écologique de l'Ecozone	26
a	Une grande diversité de milieux.....	26
b	Une grande richesse floristique et faunistique	30
3)	Un territoire à préserver	32
a	Statuts de protection	32
▪	2.1.3 Analyse du territoire et des différents usages	33
1)	Organisation spatiale	33
2)	Usages et aménagements.....	34
2.2	ANALYSE DE LA MORPHODYNAMIQUE FLUVIALE AU NIVEAU DE L'ECOZONE.....	38
▪	2.2.1 Etude du tracé en plan	38
▪	2.2.2 Evaluation de la dynamique sédimentaire	40
1)	Capacité de transport des sédiments.....	40
a	Granulométrie.....	40
b	Débit de début d'entraînement	40
c	Débit solide	41
d	Rôle morphogène des crues.....	41
2)	Stock alluvial.....	43
3)	Erosion latérale.....	43
4)	Erosion verticale.....	45
a	L'incision du lit	45
b	Les affleurements de marnes.....	45
c	Processus d'ajustement des affluents	46
▪	2.2.3 Etude des pentes et profils en long	46
2.3	ETAT ACTUEL DU LIT DE LA LOIRE ET PERSPECTIVES D'EVOLUTION.....	52
▪	2.3.1 Etat actuel du lit	52
1)	Un cours d'eau à caractère sinueux contraint.....	52
2)	Une restriction des apports en sédiments	52
3)	Une rupture de l'équilibre dynamique : Un processus d'enfoncement du lit.....	52
4)	Atteinte à la diversité écologique	53
▪	2.3.2 Perspectives d'évolution	53
1)	Aléas d'érosion : Peu de possibilité de recharge latérale	53
2)	Captures d'anciennes gravières : conséquences controversées.....	53
3)	Recul des seuils de marne : poursuite de l'enfoncement du lit	54
▪	2.3.3 Mise en place d'un suivi de l'évolution du lit de la Loire.	54

CHAPITRE 3 TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE L'INCISION ET PROPOSITIONS DE GESTION 55

3.1 VOLET EUROPEEN : LES TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE L'INCISION DES COURS D'EAU EN EUROPE 55

▪ 3.1.1 Les techniques dites traditionnelles 55

- 1) La mise en place de seuils 55
- 2) La stabilisation par pavage artificiel 56
- 3) Apport mécanique de matériaux extérieurs au lit..... 57

▪ 3.1.2 Techniques relevant de l'ingénierie géomorphologique 57

- 1) L'espace de liberté 57
- 2) Une meilleure gestion du transport solide et une amélioration des flux de sédiments 58

▪ 3.1.3 Quelques exemples de grands fleuves européens ayant subi un forte incision 58

- 1) Le RHÔNE 58
 - a Les aménagements du Rhône 58
 - b Impacts de ces aménagements..... 59
 - c Techniques de lutte employées 59
- 2) Le RHIN 60
 - a Les aménagements 60
 - b Impacts de ces aménagements..... 61
 - c Techniques de lutte employées 62
- 3) LE DANUBE 62
 - a Les aménagements du Danube 62
 - b Impacts de ces aménagements..... 63
 - c Techniques de lutte employées 63

3.2 PROPOSITIONS DE LUTTE CONTRE L'INCISION AU NIVEAU DE L'ECOZONE 64

▪ 3.2.1 Stabilisation du lit à la cote actuelle 64

- 1) Implantation de seuils ou de rampes en enrochements 65
- 2) Pavage artificiel..... 66

▪ 3.2.2 Reconstitution d'une dynamique sédimentaire et d'un matelas alluvial 68

- 1) L'érosion latérale et la définition de l'espace de liberté 68
- 2) Actions sur la végétation 71
- 3) Apports extérieurs de matériaux dans le lit 72
- 4) Actions au niveau du barrage de Grangent 72
 - a Gestion des débits réservés 72
 - b Gestion du transit solide 73
 - c Dragage des sédiments : Une solution alternative ?..... 73

▪ 3.2.3 Financements des techniques de lutte contre l'incision 75

3.3 PROPOSITIONS DE GESTION PAR TRONÇONS 75

▪	3.3.1 Montrond : Les Trois Becs	75
a	Etat des berges et érosion latérale	76
b	Etat du lit et érosion verticale.....	76
c	Perspectives d'évolution en absence d'intervention	76
d	Principes de gestion.....	76
▪	3.3.2 Montrond : Aval du pont SNCF	77
a	Etat des berges et érosion latérale	77
b	Etat du lit et érosion verticale.....	77
c	Perspectives d'évolution en absence d'intervention	77
d	Principes de gestion.....	77
▪	3.3.3 Tronçon 1 : Marclopt amont	77
a	Etat des berges et érosion latérale	78
b	Etat du lit et érosion verticale.....	78
c	Perspectives d'évolution en absence d'intervention	78
d	Principes de gestion.....	79
▪	3.3.4 Tronçon 2 : Marclopt aval	79
a	Etat des berges et érosion latérale	79
b	Etat du lit et érosion verticale.....	79
c	Perspectives d'évolution en absence d'intervention	80
d	Principes de gestion.....	80
▪	3.3.5 Tronçon 3 : Secteur du Gourd Jaune	80
1)	Premier sous-tronçon.....	80
a	Etat des berges et érosion latérale	80
b	Etat du lit et érosion verticale.....	80
c	Perspectives d'évolution en absence d'intervention	80
d	Principes de gestion.....	81
2)	Deuxième sous-tronçon.....	81
a	Etat du lit et érosion verticale.....	81
b	Principes de gestion.....	81
3)	Troisième sous tronçon	81
a	Etat des berges et érosion latérale	81
b	Etat du lit et érosion verticale.....	81
c	Perspectives d'évolution en absence d'intervention	82
d	Principes de gestion.....	82
▪	3.3.6 Tronçon 4 : Ecopôle	82
a	Etat des berges et érosion latérale	82
b	Etat du lit et érosion verticale.....	83
c	Perspectives d'évolution en absence d'intervention	83
d	Propositions de gestion.....	83
▪	3.3.7 Tronçon 5 : Amont de l'Ile Moriaud	83
a	Etat des berges et érosion latérale	84

b	Etat du lit et érosion verticale.....	84
c	Perspectives d'évolution en absence d'intervention	84
d	Principes de gestion.....	84
▪	3.3.8 Tronçon 6 : Villeneuve	84
a	Etat des berges et érosion latérale	84
b	Etat du lit et érosion verticale.....	85
c	Perspectives d'évolution en absence d'intervention	85
d	Principes de gestion.....	85
▪	3.3.9 Tronçon 7 : La Caille	85
a	Etat des berges et érosion latérale	85
b	Etat du lit et érosion verticale.....	86
c	Perspectives d'évolution en absence d'intervention	86
d	Principes de gestion.....	86
▪	3.3.10 Tronçon 8 : De la Grande Motte à Feurs	86
a	Etat des berges et érosion latérale	86
b	Etat du lit et érosion verticale.....	87
c	Perspectives d'évolution en absence d'intervention	87
d	Propositions de gestion.....	87
	CONCLUSION.....	88
	BIBLIOGRAPHIE	89
	TABLE DES MATIERES	91
	LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES	96
	ANNEXES.....	97

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

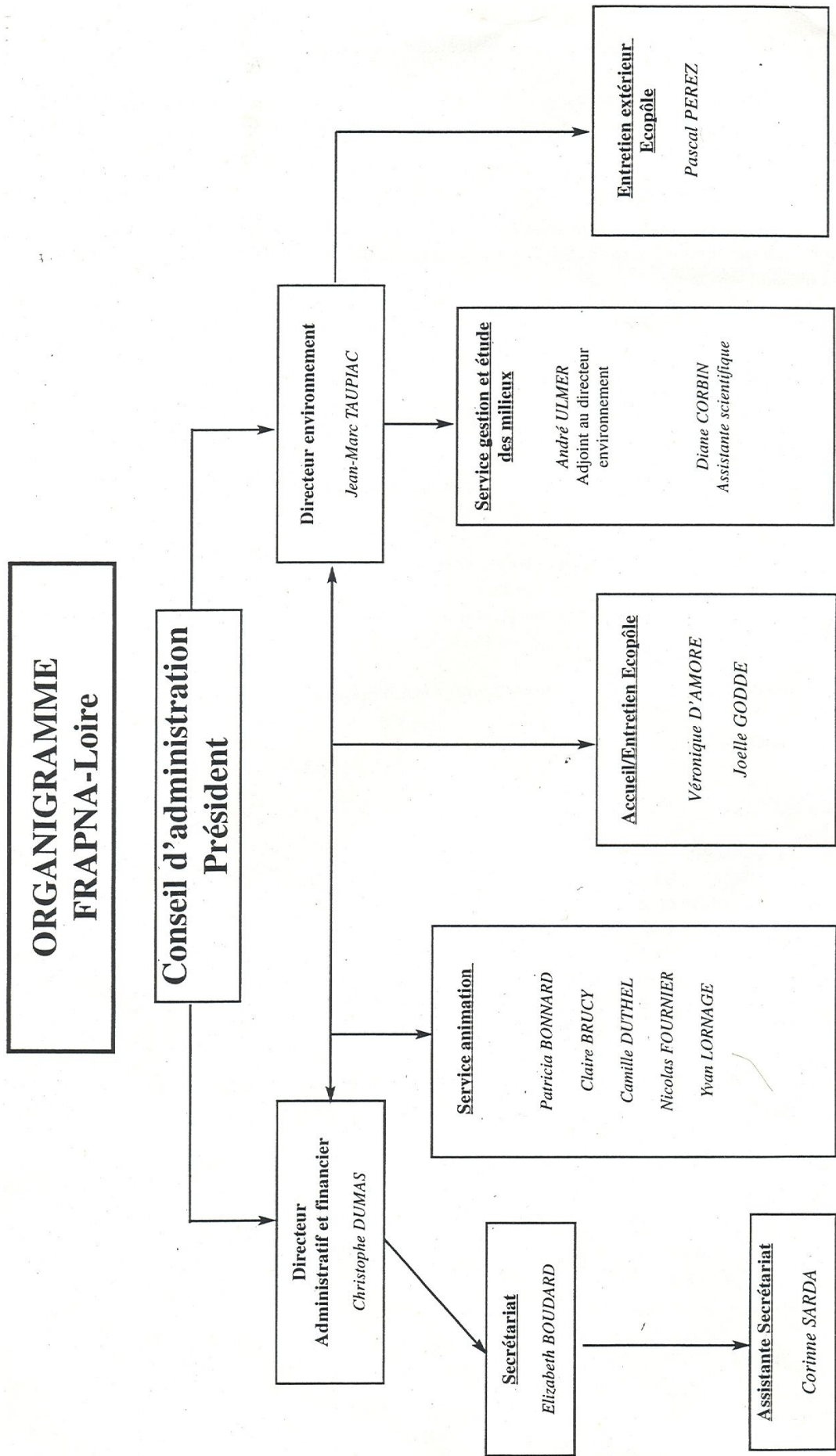
Figure n°1: Diagramme ombrothermique de la station météorologique de Feurs	17
Figure n°2 : Débits moyens mensuels de la Loire à Montrond les Bains	21
Tableau n°1 : Débits caractéristiques de la Loire aux Stations de Montrond les Bains et Feurs	22
Tableau n°2 : Cotes des crues de 1846, 1856, 1866 sur l'Ecozone.....	23
Tableau n°3: Hauteurs d'eau et débits de quelques crues de la Loire à la station de Montrond les Bains (331.49 m NGF).....	24
Tableau n°4 :Débits d'étiage de la Loire aux Stations de Montrond les Bains et Feurs.....	24
Tableau n°5 : principaux travaux effectués dans la lit majeur du fleuve et principales crues .	37
Tableau n°6 : Indices de sinuosité des cours d'eau.....	39
Tableau n°7 : Bilan des surfaces érodées et abandonnées	44
Tableau n°8 : Longueurs et pentes des tronçons.....	47
Figure n°3 : Profil en long de la Loire en 2004.....	48
Figure 4 : Profils en long de la Loire depuis 1856.....	51

ANNEXES

- Annexe 1 : Organigramme FRAPNA Loire
- Annexe 2 : Unités écologiques et groupements végétaux
- Annexe 3 : Courbe granulométrique
- Annexe 4 : Méthodologie de modélisation des surfaces submergées lors de la crue des 2 et 3 décembre 2003
- Annexe 5 : Typologie des unités morphologiques
- Annexe 6 : Décret 93-743 du 29 mars 1993 en application de l'article 10 de la loi 92-3, loi sur l'eau de 3 janvier 1992

ANNEXE 1

Organigramme de la FRAPNA Loire



ANNEXE 2

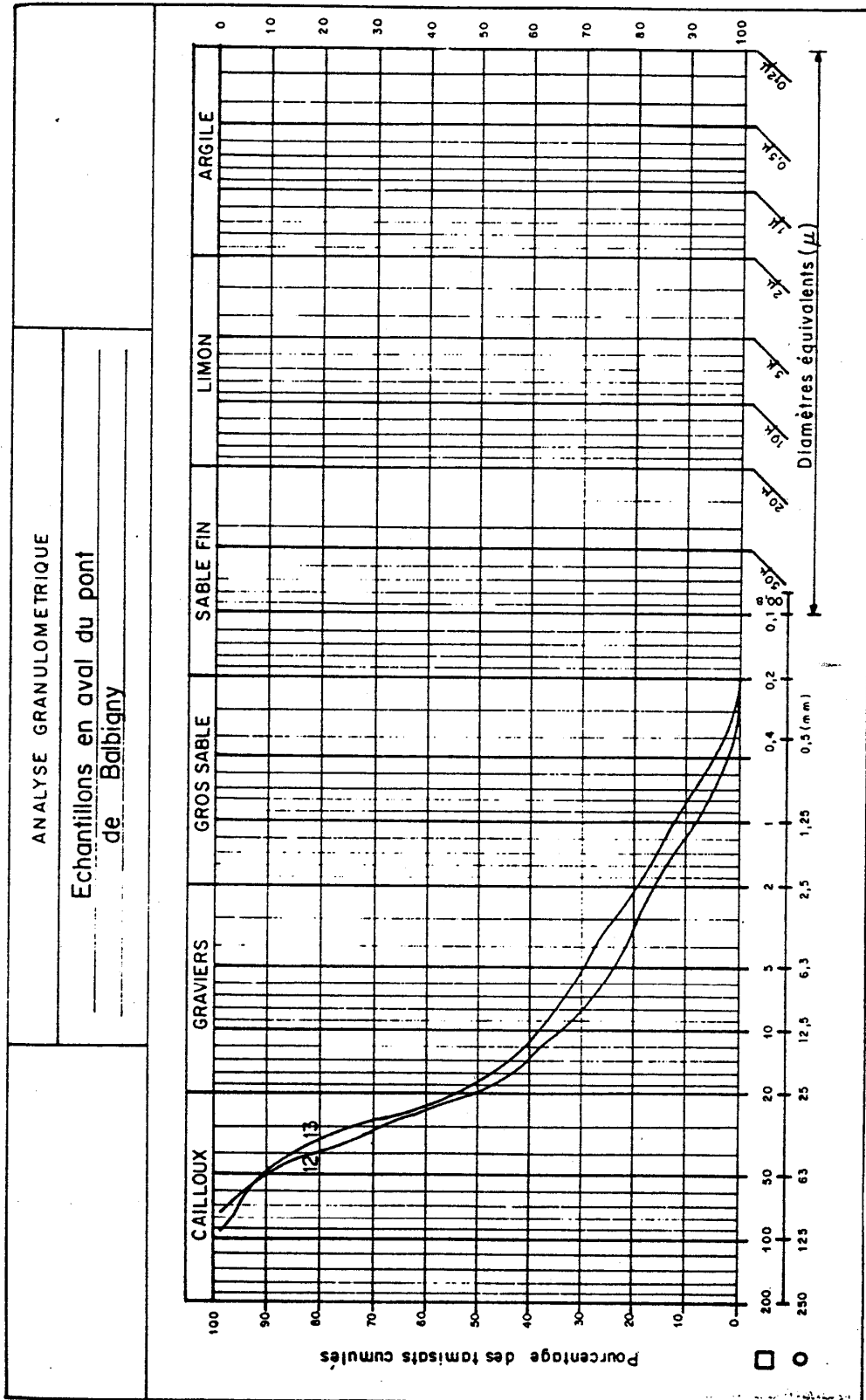
Unités écologiques et groupements végétaux

CESAME, 2003

ANNEXE 3

Courbe granulométrique

COURBE GRANULOMETRIQUE DES ALLUVIONS DE LA LOIRE (Source: EDF - site de Villerest - Etude du charriage des matériaux)



ANNEXES 4

Méthodologie de modélisation des surfaces submergées lors de la crue des 2 et 3 décembre 2003

Extrait de la thèse de Djamel MIMOUN, février 2004 : *Spatialisation de l'information, une aide à l'analyse hydraulique et paysagère*

- *Développement lors de la réhabilitation des sites post-industriels*
- *Cas du réaménagement des gravières en eau en milieu alluvionnaire*

Ecole des Mines de Saint Etienne

V.5.1.3 Reconstitution des surfaces inondées

La représentation dans l'espace des données relatives aux hauteurs d'eau dans la rivière demande la reconstruction en 2D des zones submergées. Il ne s'agit pas d'un simple problème de calcul d'intersection entre deux surfaces : le terrain naturel et les plans d'eau inclinés successifs représentant les surfaces entre deux sections en travers de la rivière. La topologie du terrain doit être prise en compte, notamment dans les zones de confluence de la rivière.

Notre méthode de détermination des surfaces en eau libre repose sur un modèle numérique de terrain, décrit précédemment, qui autorise une restitution fidèle des micro-reliefs (cuvette, bosse), des levées de terre et des digues. Cette couverture est discrétisée en un GRID dont la taille des mailles fait 25 mètres, ce qui correspond à la plus petite taille de maille dans le modèle hydrodynamique (NEWSAM).

La première étape concerne la détermination des différentes surfaces en eau de la rivière à partir des hauteurs d'eau simulées par le modèle hydraulique. Pour cela, on affecte à chaque tronçon les valeurs de hauteurs discrétisées en 43 séquences (figure 66a). On détermine alors, pour chaque séquence, un modèle numérique d'élévation *-h_théorique-* de l'eau pour le lit mineur par interpolation des hauteurs d'eau fournies par les sections. Le déclenchement de cette procédure s'effectue d'abord sur le lit principal, puis sur les bras secondaires et sur le chenal d'alimentation en eau du bassin principal. Néanmoins, ces procédures ne permettent pas de restituer la géométrie exacte du lit de la rivière ; elles donnent simplement une enveloppe polygonale « théorique » délimitée par les sections en travers.

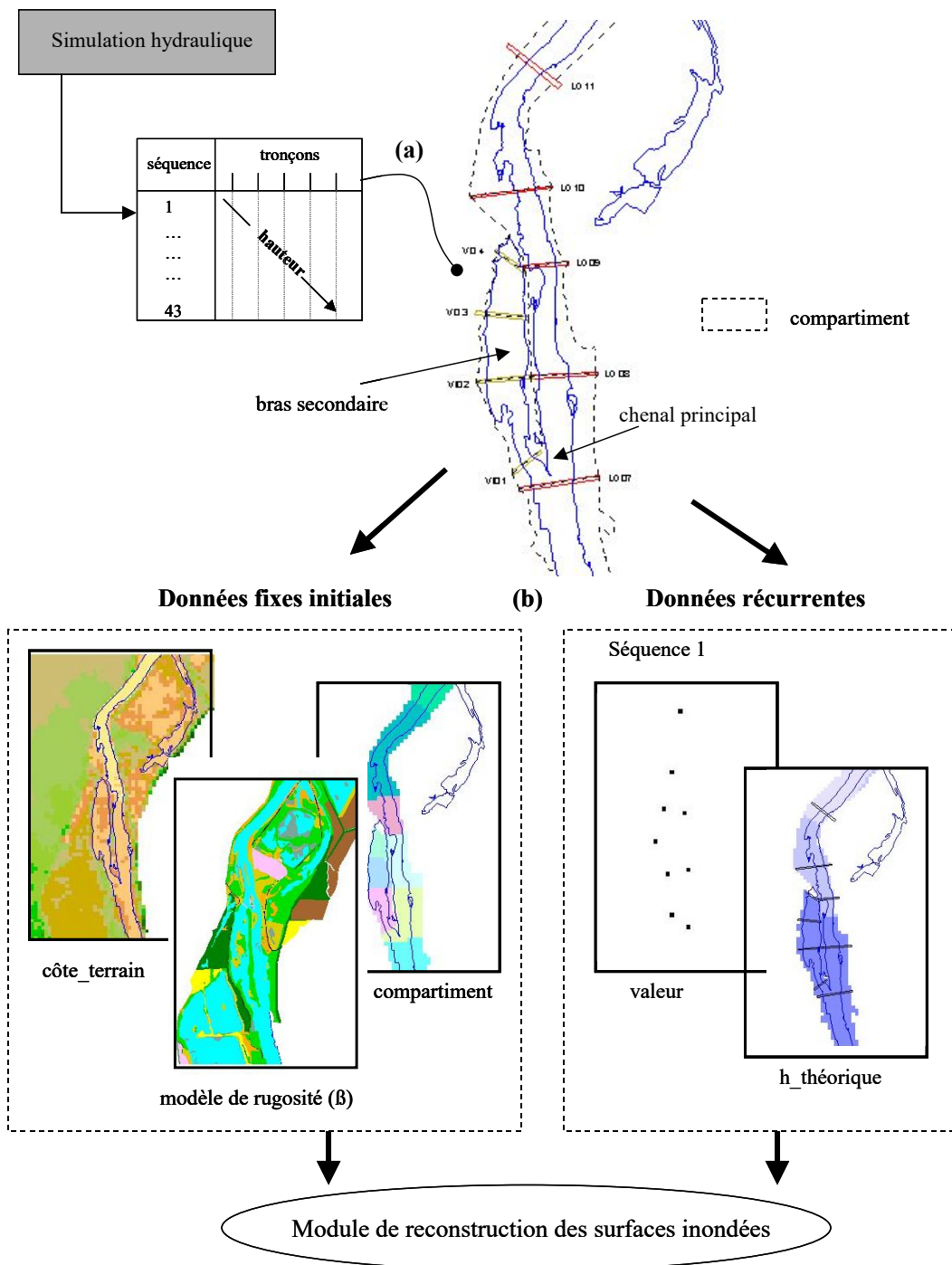


Figure 66 : *Méthodologie de construction des surfaces inondées*

La reconstitution des lignes de rivage de la rivière et des zones submergées nécessite donc d'adjoindre au SIG un module développé en langage C ; les fonctions d'analyse spatiale contenues dans les SIG ne permettant pas d'effectuer ce traitement.

Pour cela, 5 fichiers d'assignation sont créés à partir des couvertures raster d'une résolution de 25 mètres (**figure 66b**) :

-le modèle numérique de terrain nommé *-côte_terrain* -qui décrit la topographie du lit mineur et de la plaine alluviale.

-le modèle numérique de rugosité représente la résistance à l'écoulement des eaux le long de la rivière ; résistance qui augmente localement la hauteur d'eau au droit des berges. Sa construction consiste à partitionner la zone en s'appuyant sur le type de végétation. Dans notre cas, un coefficient de rugosité β variant de 1 à 1.025 est alloué à la plaine alluviale, selon que le sol est occupé par des boisements ou des terres labourées. Les plans d'eau se voient attribuer une valeur de 1.

-un fichier compartiment hydraulique qui permet de zoner d'une part le lit majeur et d'autre part les différents secteurs compris entre deux tronçons consécutifs du lit mineur de la rivière. Il s'agit de représenter les phénomènes de surverse au droit du lit mineur qui se produisent lors des épisodes de montée de eaux de la rivière.

- un fichier de points *-valeur-* représentant les hauteurs d'eau « imposées » au niveau de chaque tronçon dans l'axe de la rivière. Il s'agit du fichier de calcul qui sera renseigné.

- le modèle numérique d'élévation de l'eau dans la rivière *-h_théorique-* décrit précédemment.

Les deux derniers fichiers concernent des données récurrentes relatives aux séquences successives de la simulation hydraulique. Ils sont donc reconstruits pour chaque séquence à la différence des trois premiers fichiers qui contiennent des données fixes initiales.

Le module développé est basé sur un processus itératif utilisant la méthode de résolution des différences finies. Une description détaillée de l'algorithme est donnée en figure x.

Les conditions initiales sur les hauteurs d'eau sont données par la matrice *-valeur-* ; des valeurs positives pour les mailles renseignées et des valeurs nulles pour les autres. Pour chaque maille dont la valeur n'est pas imposée, on vérifie si dans les quatre mailles voisines (N,E,S,O) on a une hauteur d'eau « imposée » supérieure à la côte du terrain naturel de la maille (lue dans la matrice *-côte_terrain-*). Dans ce cas, deux situations se présentent selon que l'on se situe dans le lit mineur ou le lit majeur de la rivière.

Dans le premier cas, la hauteur d'eau de la maille est égale à la valeur « théorique » pré-calculée par le SIG et stockée dans la matrice *h_théorique*. La hauteur d'eau devient alors une hauteur imposée non modifiable (*trait_maille[i]=1*).

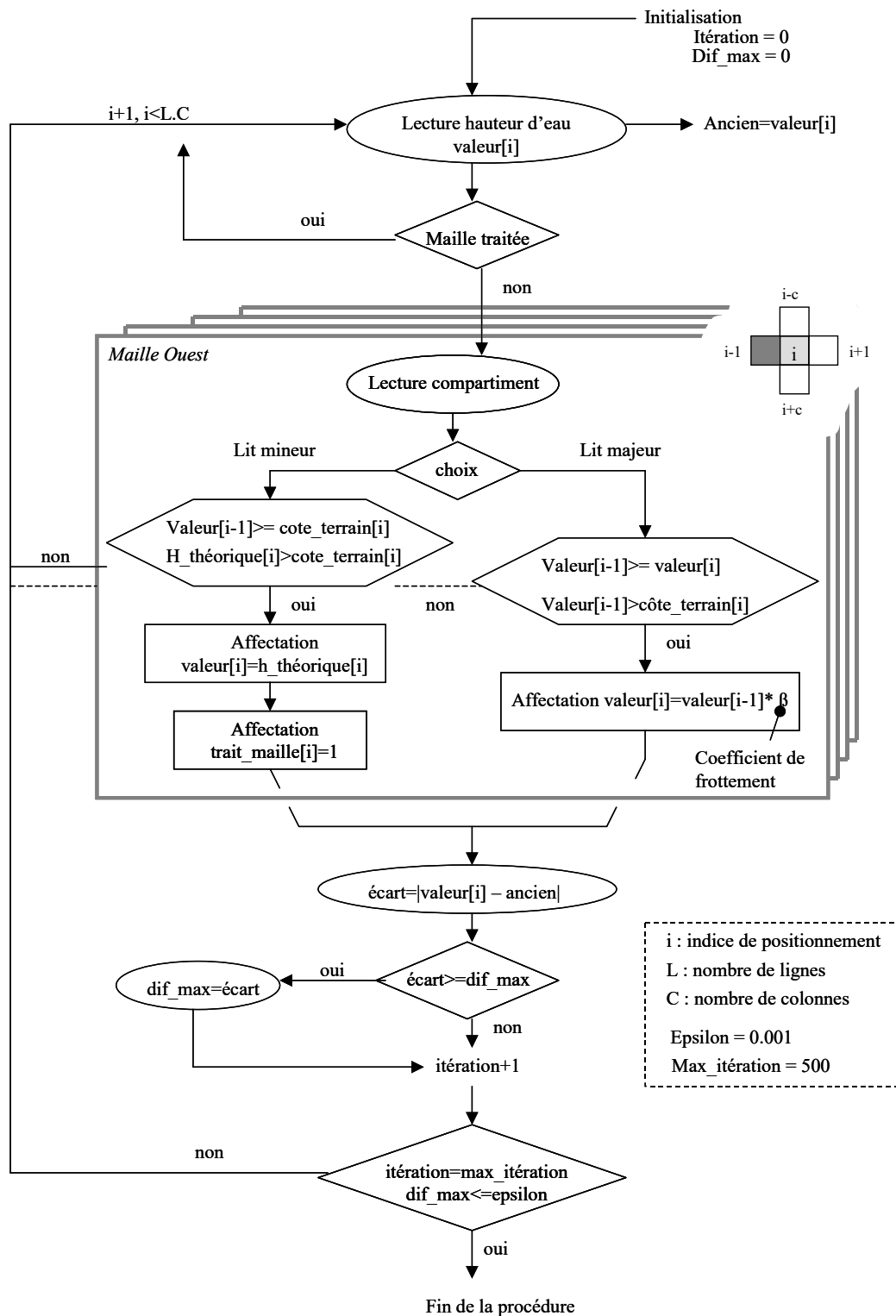


Figure 67 : *Algorithme de reconstitution des surfaces inondées*

Dans le deuxième cas, la hauteur d'eau est égale à la plus grande valeur des 4 mailles voisines afin de représenter le débordement vers la plaine alluviale. Dans ce dernier cas, cette valeur peut être multipliée par le coefficient de rugosité β (paramètre de calage).

Le calcul s'arrête automatiquement lorsque toutes les mailles sont renseignées ; c'est à dire lorsque l'écart le plus grand calculé pour l'ensemble des mailles de la matrice à chaque itération est inférieur à une valeur epsilon fixée à 0.01 mètres.

Le fichier des surfaces en eau reconstituées est alors exporté dans le SIG pour être visualisé.

Dans notre application, le nombre d'itérations pour la période simulée (figure 65) varie de 8 pour la période de basses eaux (séquence 1) à 86 itérations pour le pic de crue du 10/12/2000 (séquence 6). Le coefficient de rugosité β est fixé à 1 pour l'ensemble du lit majeur en raison d'un manque de connaissance des niveaux d'eau atteints par la rivière lors des épisodes de crue. En outre, cette valeur maximise la vitesse de convergence du modèle.

Ainsi, cette procédure permet de restituer finement les surfaces submergées, notamment les zones de surverse et les débordements par l'aval. En outre, les zones de dépressions topographiques déconnectées hydrauliquement de la rivière ne sont pas mises en eau.

La figure suivante montre la répartition spatiale en fréquence d'inondation des zones submergées sur la période d'étude (Septembre 2000 à Septembre 2001). Pour réaliser cette carte, les 43 cartes d'inondation calculées sont transformées en valeurs booléennes : 0 pour les cellules non inondées (absence) et une valeur représentant le nombre de jours de la phase considérée pour les cellules inondées (présence). L'addition des valeurs contenues dans les cartes permet de construire la couverture.

Ainsi pour un débit de 365 m³/s, la zone de débordement couvre pour notre zone d'étude une superficie d'environ 6.8 hectares, soit une augmentation de 40 % de la surface en eau. Le recul de la ligne de rivage n'est pas uniforme le long du tracé de la rivière : il atteint un maximum de 200 mètres en rive gauche en aval du bassin (12). Les bassins 6, 7, 8, 9, 10 et 11 se retrouvent alors alimentés par les eaux superficielles.

Les variations du niveau d'eau dans la rivière et des surfaces inondées représentent les conditions limites essentielles à la simulation hydrodynamique. Ces variations obligent à représenter les échanges gravières / rivière /nappe différemment en fonction du jeu de débits.

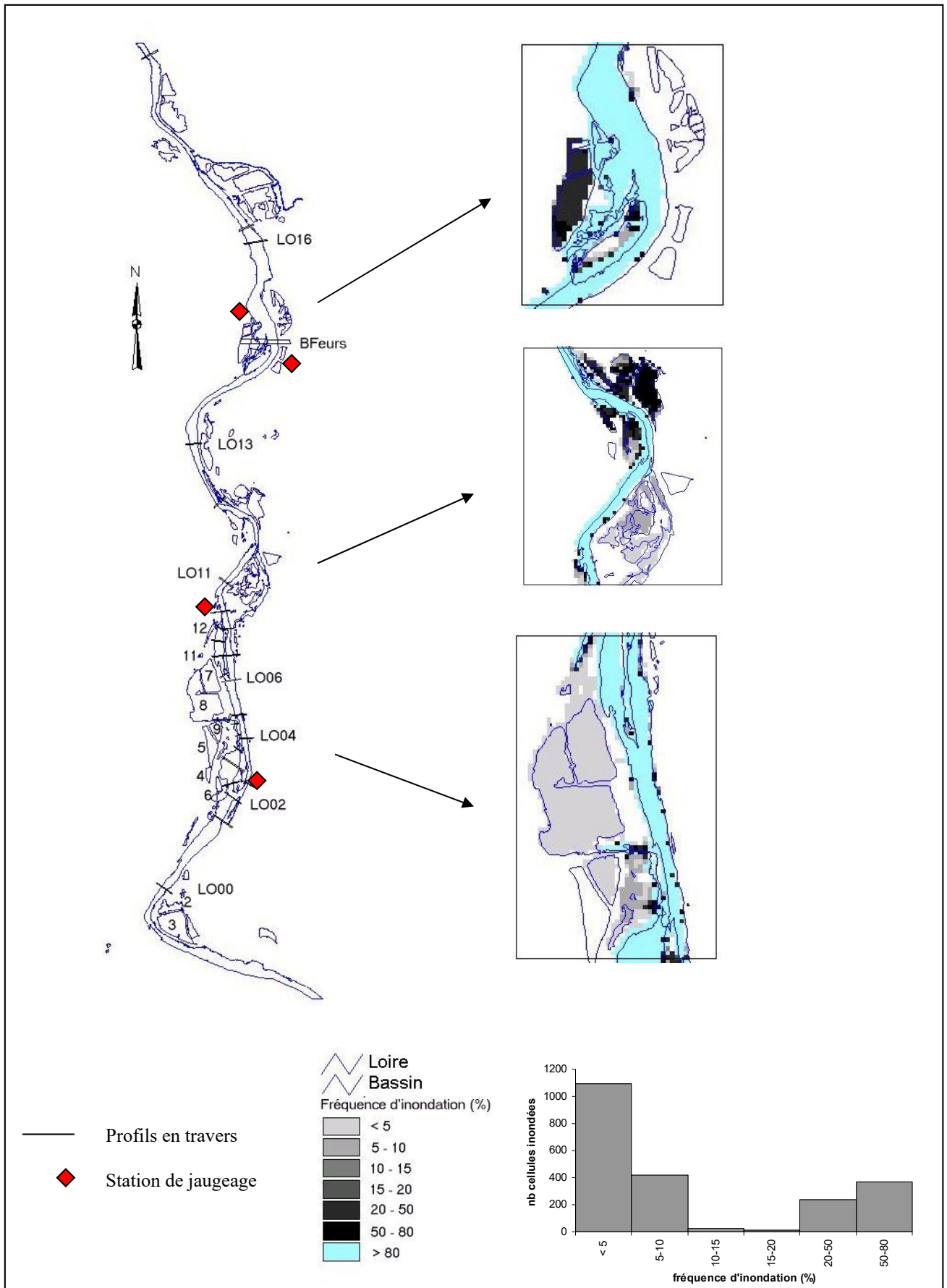


Figure 68 : Morphologie des surfaces submergées représentées en fréquences d'inondation pour l'hydropériode 2001 (Septembre 2000 à Septembre 2001). La taille de la cellule est fixée à 25 m.

Annexe 5

Typologie des unités morphologiques

Annexe 6

***Décret 93-743 du 29 mars 1993 en application de
l'article 10 de la loi 92-3, loi sur l'eau Du
3 janvier 1992***

