



# Retour d'expérience sur les renforcements de digues dans les secteurs où la Loire coule en pied

Sylvain SAXER

Stage réalisé pour l'obtention de la Licence I.U.P. I.M.A.C.O.F

Juin - Août 2006

Maître de stage : Jean-Claude Jouanneau



ministère  
des Transports,  
de l'Équipement,  
du Tourisme  
et de la Mer

**CETE**  
Normandie  
Centre

centre d'Études  
techniques  
de l'Équipement

Laboratoire  
régional des  
Ponts et Chaussées  
de Blois

  
**UNIVERSITÉ**  
FRANÇOIS - RABELAIS  
TOURS



**IMACOF**

# Remerciements

Ce stage réalisé au sein du département Environnement du L.R.P.C. de Blois a été enrichissant d'un point de vue professionnel et humain.

Je tiens à remercier mon maître de stage, Jean Claude Jouanneau de m'avoir proposer cette étude. Je tiens aussi à le remercier pour m'avoir fait partager son expérience sur les digues, les renforcements et aussi sur la Loire.

J'exprime des remerciements particuliers à Gwen Glaziou pour son investissement tout au long de mon stage.

Je remercie aussi toute l'équipe Bathymétrie pour leur accueil et pour leurs nombreux conseils au bureau ou sur les chantiers. Merci à Martine Gaullier, Pierre Juranville, Robert Quenioux, Alain Legrand et Maxime Hordeaux.

Enfin, merci aux stagiaires et vacataires de l'été 2006, en particulier Elsa et Germain.

# Sommaire

Remerciements .....	3
Sommaire .....	4
Résumé .....	5
Summary .....	5
Introduction .....	6
Partie 1 : Généralités .....	7
Partie 2 : Matériel et Méthodologie.....	15
Partie 3 : Résultats.....	20
Partie 4 : Discussion.....	35
Conclusion.....	41
Bibliographie.....	42
Table des matières .....	43
Table des Figures .....	45
Annexes .....	46

## Résumé

Depuis des siècles, les valls inondables de la Loire sont protégés des crues du fleuve par des digues, ou levées. Des renforcements ont été réalisés depuis 1979, sur certains secteurs en contact avec le lit mineur de la Loire. Un retour d'expérience sur les différentes techniques utilisées en pied de digue est effectué dans cette étude. L'analyse des principaux types de méthodes s'appuie sur des constatations visuelles (mai-août 2006) et sur l'expérience du service bathymétrie du L.R.P.C de Blois dans ce domaine.

Plusieurs types de ruptures sont connus pour ces ouvrages en remblai. L'état des sites est à mettre en relation avec les sollicitations subies par le secteur renforcé (érosion latérale, affouillement).

Les renforcements par techniques végétales (fascines), par enrochements et par palplanches sont étudiés. Les renforcements, utilisant des enrochements, présentent des caractéristiques différentes suivant le site (dimensionnement, quantité et nature des blocs employés). Les techniques végétales résistent dans les sites faiblement sollicités. Les renforcements en palplanches ont été utilisés sur des où l'érosion latérale est importante. Malgré le renforcement, ces sites présentes des marques d'attaques du courant.

L'entretien du talus est indispensable pour garantir la bonne tenue d'une digue et de son renforcement. La mise en place d'un chemin de service praticable côté fleuve facilite l'entretien et la surveillance des digues.

**Mots clés : Levée de la Loire / Pied de digues / Retour d'expérience / Renforcements / Entretien**

## Summary

Since centuries, the flood plains of the Loire are protected by dams. Strengthenings have been built since 1979 in the sectors on the bank of the main channel. This study consist in an experience feed-back on the different technics used in order to protect the dam's bottom.

The analysis of main types of method is based on visual observations (May-August 2006) and on the bathymetric knowledges of the L.R.P.C of Blois.

Differents types of dam breach are knowing for embankment structures. The state of study dams is link up the threats due to the river (erosion and digs in the main channel).

The strengthenings studied are the rock strengthenings, the strengthenings with mettalic fence and the strengthening using plants (fascine). The rock strengthenings show different charateristics (rock size, rock types, rock quantity).

The strengthening using plants are adapting to the sector with little threats. The strengthening with mettalic fence is used in the sector with lots of erosion. Those sectors show stream attacks.

The maintenance of the dam is essential to guarantee the good behaviour of dam and its strengthening. The maintenance and the monitoring become easier with the installation of a service road on the dam bottom.

**Key words : Dams of the Loire / Dam bottom / Experience feed-back / Strengthening / Maintenance**

# Introduction

Les plaines inondables de la Loire moyenne sont protégées par un système de digues, appelées sur ce fleuve : levées. Des enjeux s'y concentrent, en terme d'économie mais aussi en terme de vies humaines. Si des inondations similaires à celle de 1856, plus forte crue de Loire répertoriée, se répétaient aujourd'hui, ce ne sont pas moins de 300 000 personnes qui seraient menacées.

L'entretien et la surveillance de ces ouvrages, présent sur plusieurs centaines de kilomètres constituent un enjeu de sécurité publique. Parmi les différents secteurs de digues, ceux où la Loire coule en pied préoccupent particulièrement les gestionnaires. Ainsi, depuis les années 1970, les zones présentant des indices de fragilité ont été renforcées.

Alors qu'un état des lieux de toutes les digues où la Loire coule en pied est en cours de réalisation, il a paru intéressant d'analyser l'évolution des différents renforcements.

Le retour d'expérience des renforcements de digue en contact avec le lit mineur, fait l'objet de ce présent rapport de stage.

Effectué au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois, ce stage d'une durée de neuf semaines s'inscrit dans la deuxième année de l'Institut Universitaire Professionnalisant « génie de l'environnement option Ingénierie des Milieux Aquatiques et des COrridors Fluviaux » (I.U.P. I.MA.C.O.F, université de Tours).

A partir des visites de terrains réalisées dans le cadre d'études en cours au L.R.P.C., le travail effectué durant le stage consiste en un inventaire et une analyse des techniques de renforcements mises en place sur la Loire. Les inspections de digues, la participation à des chantiers de bathymétrie, à un chantier de topographie et à la réalisation de tranchées de reconnaissance ainsi qu'une recherche bibliographique ont permis d'apprécier l'évolution des digues étudiées.

Après avoir présenté l'organisme d'accueil, la première partie de ce rapport présente les levées de la Loire, leurs différents mécanismes de rupture et les contraintes subies par ces ouvrages.

La démarche adoptée pour cette étude et le matériel utilisé par le L.R.P.C pour inspecter les renforcements sont traités dans une deuxième partie.

La troisième partie est consacrée à la présentation des différents renforcements. Enfin une discussion sur l'évolution de ces méthodes s'appuyant sur des observations de terrains est aussi abordée.

# Partie 1 : Généralités

## 1. Présentation de l'organisme et contexte de l'étude

### 1.1. Présentation de l'organisme

Ce stage a été effectué au sein de l'unité Hydraulique- Risque d'inondation- Bathymétrie du département Environnement du Laboratoire de Recherche des Ponts et Chaussées de Blois (L.R.P.C.). Ce laboratoire appartient au Centre d'Etude Technique de l'Equipement (C.E.T.E.) Normandie Centre ; établissement sous la tutelle du Ministère de l'Equipement, des Transports, de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de la Mer. Le département Environnement, dirigé par J.C. JOUANNEAU, est divisé en unités : les unités Acoustique Recherche et Acoustique Opérationnelle, l'unité Hydraulique- Sédimentologie- Recherche (H.S.R.), l'unité Hydraulique- Risque d'inondation- Ruissellement (H.R.R.) et l'unité Hydraulique- Risque d'inondation- Bathymétrie (B.H.).

Cette dernière unité est composée de six agents, leurs activités s'articulent autour de la reconnaissance des fonds aquatiques (cartographie et bathymétrie) et de la détermination des zones inondables.

#### Rôle et missions

Le L.R.P.C. de Blois est une structure de l'Etat. Bureau d'études public, il a vocation à répondre à toute demande dans ses domaines de compétences. Il collabore avec les autres services du Ministère en particulier avec les Directions Départementales de l'Equipement (D.D.E.). Les Directions Régionales de l'Environnement (D.I.R.E.N.) peuvent aussi leur confier des études, telles qu'une campagne d'inspections des digues de la Loire. De plus en plus, les collectivités territoriales sont demandeuses d'études auprès de L.R.P.C. (politique de décentralisation).

Le département Environnement a deux types de missions : l'une opérationnelle, l'autre de recherche et de méthodologie. Dans la première, le service peut effectuer des prestations d'étude (production de données et interprétation/exploitation).

Depuis le début des années 80, l'unité Hydraulique- Risque d'inondation- Bathymétrie a développé, entre autres, des techniques de bathymétrie adaptées aux cours d'eau et aux ouvrages en rivière. Elle réalise également de nombreuses études hydrauliques (étude d'impact d'ouvrage, atlas de zones inondables). Elle a également une mission d'assistance à maîtrise d'ouvrages sur certaines études (par exemple : contre-expertises sur des études de conception de renforcements de digues par S.O.G.R.E.A.H.).<sup>1</sup>. Les unités H.S.R., H.R.R. et B.H. travaillent en étroite relation, pour les études concernant la Loire.

---

<sup>1</sup> Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques

## **1.2. Contexte de l'étude**

La stabilité des digues situées dans des secteurs où la Loire coule en pied est jugée prioritaire. Dans ce cadre, la D.I.R.E.N. a commandé au L.R.P.C. de Blois « le diagnostic général des pieds des digues domaniales du bassin de la Loire en contact avec le lit mineur ». Cela représente 120 sites potentiels soit 130 kilomètres répartis entre Roanne (Loire) et la confluence avec la Maine (Maine et Loire) (annexe : 1). Pour cela une inspection visuelle de chaque site est réalisée par les agents du département Environnement. Pour les sites repérés comme sensibles, une campagne bathymétrique et une étude géotechnique, effectuée par le L.R.P.C., complètent cet état des lieux.

Profitant de la visite systématique des sites, il a semblé opportun à J.C. JOUANNEAU d'observer l'évolution des différents renforcements de digues rencontrés sur ces levées, réalisés depuis les années 1970. C'est dans cet optique de retour d'expérience que s'inscrit ce stage. L'accent se porte dans ce rapport sur les pieds de levées.

## **1.3. Les levées**

### **1.3.1. La Loire endiguée**

Pour limiter la durée d'inondation des cultures, des turcies, nom donné localement aux levées primitives, ont, au départ, été érigées dans le val d'Anjou (VIII<sup>ème</sup>). Les digues se sont ensuite généralisées à toute la Loire, devenant les principaux ouvrages de protection contre les crues.

Le système a été adapté au cours des siècles. Les dernières modifications sensibles datent de la fin du XIX<sup>ème</sup>. Un programme de renforcement des levées domaniales a été entrepris dès 1970. Ce programme s'est poursuivi durant la première phase du Plan Loire Grandeur Nature 1994-1999 (D.I.R.E.N. Centre).

Après les inondations de 2002 et 2003 dans le sud de la France, les digues sont à nouveau au centre des préoccupations dans le dispositif de lutte contre les inondations (enjeu principal du P.I.L.G.N.<sup>2</sup>).

Depuis sa radiation de la nomenclature des voies navigables en 1998, la gestion de la Loire moyenne et de ces digues est assurée par la D.I.R.E.N. du Bassin Loire Bretagne (D.I.R.E.N. Région Centre). Elle s'occupe entre autre de la maîtrise d'ouvrage générale des digues. Les services déconcentrés de l'Équipement (D.D.E.) sont en charge des renforcements des levées dans chaque département.

### **1.3.2. Enjeux en cas de ruptures.**

Parallèlement au développement des levées, la population des vals a augmenté ; si bien qu'aujourd'hui, 300 000 personnes habitent dans les vals inondables (annexe 3).

---

<sup>2</sup> Plan Interdépartemental Loire Grandeur Nature

Ce sont 115 000 logements, 14000 entreprises, 87000 ha agricoles, 8200 ha de cultures spécialisées qui sont menacées (E.P.P.L.G.N.<sup>3</sup>, février 2000). La politique actuelle est de bannir la construction de nouvelles digues. Cependant les enjeux résultants de l'implantation historique dans les vals protégés sont tels que les digues sont conservées comme pièces maîtresses de la lutte contre les inondations. Il est donc indispensable de maintenir un bon état de l'ensemble des levées. L'apparition d'une brèche provoquerait l'inondation brusque du val protégé.

### 1.3.3. Crues de la Loire

Au XIX<sup>ème</sup>, lors des trois grandes crues historiques: 1846, 1856 et 1866, de nombreuses brèches sont apparues, 350 en Loire moyenne. Depuis aucune crue d'une telle ampleur n'est venue menacer la stabilité des digues. Les crues 2003 et 1983 sont les crues récentes les plus importantes.

### 1.3.4. Description d'une levée.

Les levées sont des ouvrages construits par étapes à différentes périodes suivant l'évolution des usages du fleuve ou les besoins de protection (fig.1). Actuellement l'ouvrage moyen a une hauteur d'environ 8m, sa largeur en pied varie quant à elle suivant les renforcements (entre 20 et 30m). La levée sépare le lit endigué du val (plaine alluviale qui s'étend jusqu'au coteau).

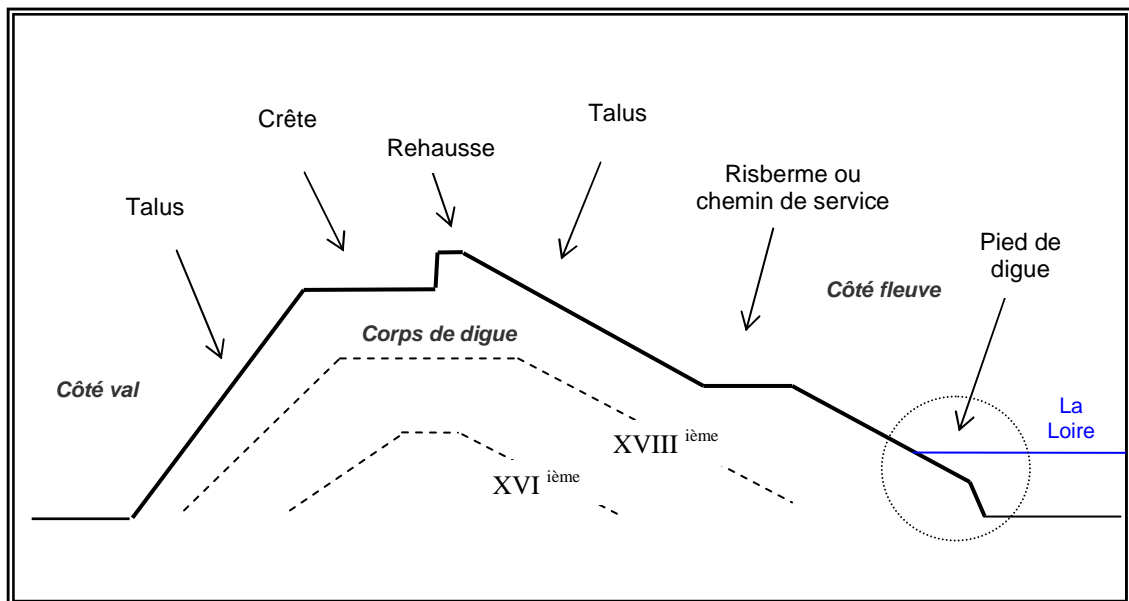


Figure 1 : Schéma type d'une levée de la Loire

## 1.4. Différents mécanismes de rupture de digues.

Cette étude ne s'intéresse qu'aux digues en remblai (terre). La partie qui suit, nécessaire à la compréhension des renforcements de digues est fortement inspirée par l'ouvrage : *Surveillance*,

<sup>3</sup> Equipe Pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature

*entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations* (Mériaux et al, 2004), ouvrage du Cemagref faisant actuellement référence en France.

#### 1.4.1. La surverse

La surverse, débordement de l'eau au-dessus de la digue, conduit généralement et rapidement à la brèche par érosion régressive du talus coté val de la crête (fig.1 bis). La surverse est due à un phénomène externe : la crue d'un niveau supérieur à l'événement de référence qui a servi au dimensionnement de la hauteur de la digue. Pour la Loire, la crue de 1856 est l'événement de référence.

La surverse peut aussi se produire lorsque l'eau du val rejoint le fleuve en franchissant à nouveau la digue (surverse par retour). Les surverses ont souvent lieu au niveau des points bas du profil en long des levées.

Afin de limiter ce risque de submersion, les banquettes, ou rehausses, présentes sur l'ensemble des crêtes des levées ont été construites pour élever le niveau des digues. Actuellement, la cote du sommet des digues semble suffisante pour empêcher ce phénomène. La prévention de la surverse étant du ressort du dimensionnement originel de l'ouvrage, aucun renforcement ne prend spécifiquement en compte ce risque.

#### 1.4.2. Les érosions externes et les affouillements

Les talus de digues côté fleuve, en particulier lorsque le cours d'eau jouxte directement la levée, subissent en crue les effets des courants hydrauliques qui peuvent provoquer des érosions à leur base (fig.1 bis). Il en résulte un raidissement de la pente locale qui, associé à la saturation en eau des matériaux, entraîne alors des glissements favorisant à leur tour les perturbations hydrauliques (vortex et érosions). Par glissements successifs du talus côté fleuve de la levée, on peut ainsi aboutir à l'ouverture d'une brèche.

Les facteurs de sensibilité à ce type de dégradation sont de trois ordres :

- La vitesse moyenne de l'eau le long du talus de la levée.
- Les perturbations hydrauliques locales (arbres, piles ou toute construction sur le parement coté fleuve mais aussi courbes prononcées dans l'axe de la digue).
- Nature et état de la protection du talus coté fleuve.

Le changement de nature de la protection (passage d'une zone de perré à une zone enherbée) constitue un fort facteur de vulnérabilité.

Sur les secteurs en contact direct avec le lit mineur, ce risque est important. C'est pourquoi des renforcements en pied de digues, côté val, ont été réalisés.

#### 1.4.3. Erosion interne (ou renard hydraulique)

En crue, les hétérogénéités de perméabilité peuvent être à l'origine de zones de circulation préférentielle de l'eau. Selon la charge hydraulique (différence du niveau d'eau entre le côté val et

côté fleuve) et la nature des matériaux, on peut obtenir localement le gradient hydraulique critique qui provoque l'érosion interne du sol. Créant progressivement un conduit le long duquel gradient et vitesse augmente rapidement avec le temps. L'amplification du phénomène peut aller jusqu'à la création d'une galerie à travers la digue (renard hydraulique), puis d'une brèche par effondrement (fig.1 bis).

Les facteurs de sensibilité à ce type de dégradation sont de deux ordres :

-Les excavations ou les galeries dans la levée réduisant la longueur du chemin hydraulique entre le coté fleuve et le coté val. (Terriers d'animaux fouisseurs et conduits racinaires d'arbres mort mais aussi constructions et canalisations).

-La mauvaise étanchéité à la jonction entre le remblais et ouvrages transversaux. Les constructions réalisées dans les digues sont incontestablement les principaux facteurs de risque

On peut rattacher les phénomènes de fontis observables dans le cas d'effondrement karstique.

Les renforcements coté val mais aussi ceux réalisés dans le corps de digue ont parmi leurs objectifs celui de limiter ce risque.

#### 1.4.4. Rupture d'ensemble des digues en remblai

Un profil de digue étroit avec des pentes de talus fortes (33°) ainsi qu'une piézométrie élevée dans la digue liée à l'absence de drainage et à la présence de couches hétérogènes sont deux éléments favorisant ce risque.

Il faut ajouter à cela la faible compacité ou la présence d'une couche argileuse sous-consolidée au niveau des fondations. Ces trois facteurs sont potentiellement réunis dans les zones d'anciennes brèches dont la réparation n'a pas toujours été menée dans les meilleures conditions.

Lors d'une décrue rapide, la rupture du talus coté rivière peut aussi se produire. Ce phénomène, lié aux sous-pressions qui se développent pendant la période de hautes eaux, concerne surtout des talus de digues constitués de matériaux argileux et dont les pentes sont raides ou les perrés sont trop étanches (revêtement de pierres recouvrant la moitié supérieure du talus côté fleuve).

Un rechargement en remblai de la digue et/ou la mise en place d'un rideau de palplanches dans le corps de digue sont préconisés afin de garantir une bonne stabilité de l'ensemble des levées en crue mais aussi en décrue.

Suivant la géométrie, le lieu et le type de rupture craint, le gestionnaire opte pour tel ou tel renforcement. Les renforcements récents, réalisés en pied, ont comme objectifs de limiter les risques d'érosion externe, d'affouillement mais aussi celui de rupture d'ensemble (butée de pied servant de contrefort à la décrue). La connaissance des contraintes du milieu sur les levées est nécessaire pour le choix a effectué.

## **1.5. Contraintes du milieu sur les digues**

### **1.5.1. Contraintes subies par l'ensemble des levées.**

#### **◆ Contraintes hydrostatiques s'exerçant sur un remblai en terre.**

En crue, la différence de niveau d'eau rehausse la cote de la ligne de saturation en eau à l'intérieur de la digue et crée une circulation d'eau interne du fleuve vers l'aval induisant des zones de circulation préférentielle. La vitesse de l'écoulement des eaux infiltrées dans la digue est telle qu'elle entraîne les matériaux, créant un trou dans la digue. La présence d'arbres et d'animaux fouisseurs accélère ce phénomène. Le risque de stabilité d'ensemble et celui d'érosion interne sont favorisés (cf. § I.1.4.3. et § I.1.4.4.).

#### **◆ Effondrement karstique**

Particularité de la Loire moyenne, des effondrements karstiques peuvent affecter la solidité des digues. La Loire coule dans la région d'Orléans sur un substratum karstique (calcaire de Beauce). Cette couche comporte une multitude de cavités creusées par l'eau (origine des pertes de la Loire alimentant le Loiret). Il arrive que certaines cavités s'effondrent, se traduisant par un affaissement localisé du sol. Il est possible qu'une digue s'affaisse lorsqu'un effondrement karstique se produit sous l'ouvrage (Jargeau, 2003). Ce phénomène naturel imprévisible déstabilise la digue qui n'assure plus son rôle de protection. Lorsqu'il survient, un confortement doit être réalisé rapidement sur l'ouvrage.

Aucun renforcement n'est adapté spécifiquement à ce phénomène qui ne peut être anticipé.

### **1.5.2. Contraintes liées à la présence de la Loire en pied.**

La tendance naturelle de la Loire est de migrer dans toute sa vallée. La barrière physique, que constitue la digue, limite la divagation du lit. Le déplacement du lit mineur est donc contraint par cet ouvrage dans certains secteurs. Ainsi, là où le fleuve coule en pied de digue, des phénomènes liés à l'hydrodynamique du fleuve viennent solliciter le pied de l'ouvrage.

#### **◆ Morphologie de la Loire**

La Loire se déplace entre les levées, son lit mineur étant généralement moins large que son lit endigué. On observe en Loire moyenne une alternance entre un cours d'eau à chenal unique et des secteurs où plusieurs chenaux apparaissent.

Les digues se trouvent donc alternativement à l'écart du chenal, en bordure d'un chenal secondaire et au bord du chenal principal. Les secteurs où le fleuve coule en pied de digue, sont soumis à des sollicitations qui varient donc suivant la configuration du cours d'eau.

#### **◆ Orientation du courant par rapport à l'ouvrage (contrainte hydrodynamique)**

Des modifications dans la trajectoire du fleuve apparaissent sur tout son cours. Suivant la configuration du fleuve, le courant peut venir frapper de façon oblique la digue ou couler parallèlement à celle-ci.

Le courant est parallèle dans les zones rectilignes (fig. 2). La sollicitation est répartie sur toute la zone. Les vortex ou tourbillons indiquant une forte sollicitation du fleuve peuvent être observés dans les veines de courant (creusement du fond)



**Figure 2 : Orientation parallèle du courant (site de la Ménitré, Maine-et-Loire, août 2006)**

Des contraintes géométriques naturelles ou forcées font que, sur certains secteurs, un courant oblique attaque la digue, provoquant des érosions locales plus ou moins prononcées (fig.3). De part et d'autre de cette zone de grande contrainte hydraulique, des zones de sédimentation sont généralement présentes. Ce phénomène est observé lors des changements rapides de direction du lit (méandre de Sandillon, digue de Nevers par exemple). Au niveau d'une île, le débit du chenal principal peut venir frapper de façon oblique la digue en rive opposée directement à l'aval.



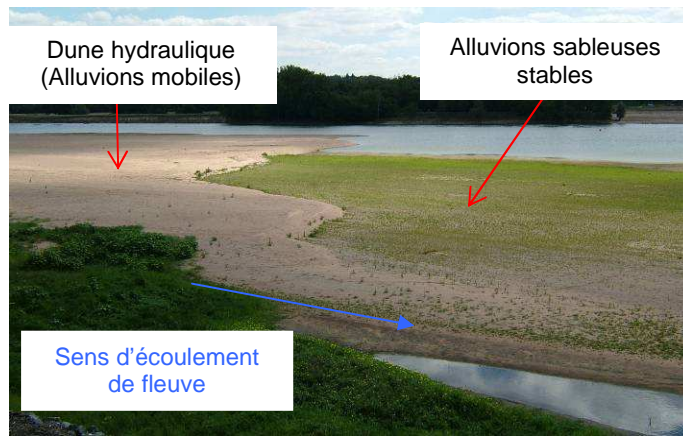
**Figure 3 : Orientation oblique du courant (site de Saint-Maturin, Maine-et-Loire, août 2006)**

L'orientation du courant varie suivant le niveau d'eau. A l'étiage, le courant d'un secteur peut être oblique alors qu'en crue le débit réparti uniformément dans le lit endigué arrive parallèlement.

#### ◆ Mobilité du fond

Il est possible de diviser la Loire moyenne en deux zones au niveau de la mobilité du fond (annexe 1). A l'amont, la force du courant ne permet pas le dépôt massif de sédiments fins. Le substratum affleure à plusieurs reprises. Le fond du chenal est relativement stable.

Depuis la Chapelle-sur-Loire et jusqu'à la fin de la Loire moyenne, une couche parfois épaisse d'alluvions mobiles recouvre le substratum. Le fond sableux paraît stable (pavage à sa surface). Par contre des quantités importantes de sable se déplacent sous forme de dunes hydrauliques (fig.4)



**Figure 4 : Front aval d'une dune hydraulique (Saint-Clément-des-levées, Maine-et-Loire, août 2006)**

Ces mouvements amont-aval de matériaux s'observent après des crues morphogènes.

La cote du fond s'en trouve modifiée régulièrement. A la Chapelle-sur-Loire, l'amplitude d'une dune a été mesurée à 2 m (résultat bathymétrie sonar latéral, avril 2006). Dans le Maine-et-Loire, des différences de l'ordre de 4 mètres sont constatées.

Ces déplacements de matériaux peuvent être à l'origine d'affouillements (fosse en pied de digue) qui sont une source de déstabilisation (cf. § I.1.4.2).

L'enfoncement généralisé du lit de Loire, entre 1 et 2 mètres selon le lieu, a déplacé la cote des pieds de talus. Ceux-ci ne sont plus protégés par les consolidations disposées à l'ancienne cote des pieds. Cet abaissement de la ligne d'eau rend vulnérable les digues face aux attaques en pied (érosion, mobilisation de matériau). Celles-ci ne sont désormais plus suffisamment protégées.

Les renforcements des années 1970 ont eu, entre autres, comme objectif de palier cette faiblesse des pieds de digue. Selon le département mais aussi suivant la période, différentes techniques de renforcement ont été mises en œuvre sur ces sites. C'est pourquoi le retour d'expérience se porte principalement sur les renforcements en pieds de levées

## Partie 2 : Matériel et Méthodologie

### **1. Démarche adoptée pour l'étude.**

#### **1.1. Recensement des différentes techniques de renforcement.**

Depuis sa création, le service bathymétrie a travaillé sur de nombreux secteurs sensibles en Loire moyenne. Les connaissances du service en matière de renforcement de digues ont permis d'identifier différents sites ainsi que les méthodes utilisées. La liste a été complétée durant les inspections des digues demandées par la D.I.R.E.N. Centre.

#### **1.2. Recherche des matériaux utilisés.**

L'observation visuelle d'une digue permet de reconnaître les principaux éléments constituant le renforcement (palplanches, enrochements, présence d'une risberme, présence de terre végétale, etc....).

La documentation concernant chaque renforcement (schémas de principe, date, caractéristiques) a été demandée aux gestionnaires concernés (D.D.E.). L'ancienneté de certains renforcements ou le manque de « mémoire » des services (archives introuvables, agents ayant effectué les travaux désormais en retraite) a rendu la collecte d'informations assez difficile.

La recherche bibliographique apporte certaines précisions manquantes (Rethoret H. 1998, S.O.G.R.E.A.H. 2005)

#### **1.3. Retour d'expérience des renforcements.**

##### **1.3.1. Enquête auprès des services gestionnaires.**

Le retour d'expérience se base sur les remarques des services gestionnaires assurant régulièrement la surveillance et l'entretien des digues. La rencontre avec certains d'entre eux ainsi que l'analyse de comptes-rendus de réunions apportent certaines informations (travaux d'entretien, faiblesses observées). Les réunions ont eu lieu dans le cadre de l'étude des digues menée pour le compte de la D.I.R.E.N.

##### **1.3.2. Constatation de l'évolution des sites**

L'inspection visuelle de sites permet de mettre en évidence les faiblesses dans la protection actuelle de la digue. Durant ce stage, tous les sites étudiés ont été visités.

Lors d'études actuelles ou antérieures, certains pieds de digues étudiés dans ce rapport, par exemple, font l'objet d'une campagne bathymétrique. Le service bathymétrie dispose de différents

outils permettant d'inspecter une digue et de caractériser le lit de la Loire à son pied. L'interprétation des résultats des différentes inspections renseigne sur l'état actuel du renforcement.

## 2. Présentation des différentes méthodes et matériels d'inspection : le cas de la Levée de La Chapelle-sur-Loire.

De nombreuses digues ont été inspectées par l'une ou l'autre de ces méthodes durant ce stage et plus généralement depuis plusieurs années par le service environnement du L.R.P.C. La présentation des méthodes s'articule autour de la digue de la Chapelle-sur-Loire (Indre-et-Loire), site sur lequel toutes ont été appliquées.

### 2.1. Présentation du site

Il s'agit d'un secteur rectiligne endigué de 5 km où le fleuve longe le pied de levée (rive droite). Cette levée protège l'amont du val d'Authion, principal enjeu de la Loire moyenne. La Loire coule sur une zone très sableuse à forte mobilité des fonds. Depuis l'amont c'est le premier site présentant de telles variations de ses fonds dans le temps (cf. § 1.5.2).

Considéré depuis longtemps comme un site sensible, une protection discontinue en enrochements a été réalisée en pied de levée. De nombreuses études de surveillance ont été réalisées par le L.R.P.C. de Blois.

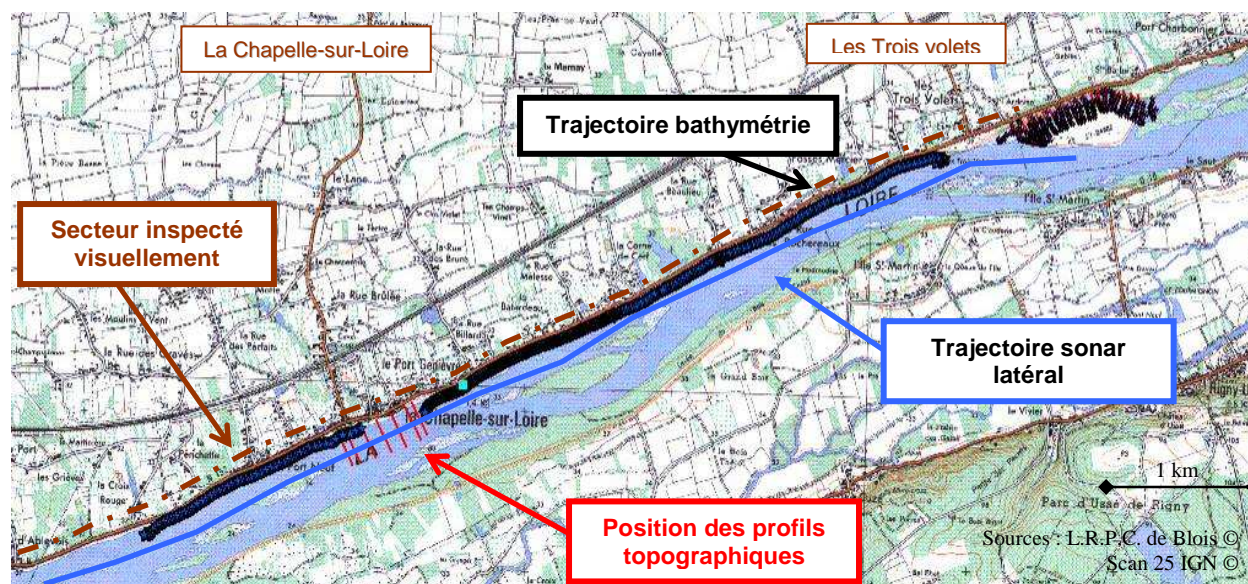


Figure 5 : Localisation des inspections réalisées sur la levée de La Chapelle-sur-Loire (Indre-et-Loire)

### 2.2. Inspection visuelle

Cette méthode permet d'identifier les caractéristiques du renforcement : pente des talus, nature des matériaux, mesure de la largeur de la risberme, limite du renforcement, type de végétation, état du pied de digue...

Elle permet de reconnaître les signes de désordre mécaniques ou hydrauliques (début de glissement, etc....) Elle permet aussi de reconnaître des attaques extérieures qui peuvent devenir des zones à problèmes : présence d'arbres, de terriers d'animaux fouisseurs. (Degoutte G., 2004)

Durant cette inspection, une description générale des contraintes imposées par la Loire sur la digue est réalisée (nature et profondeur du lit, orientation du courant en basses et hautes eaux, nombre de chenaux).

La reconnaissance des 5 km de digues construites de part et d'autre de La Chapelle-sur-Loire s'est déroulée les 15 et 20 juin 2006 lors de l'inspection dans le cadre de l'étude pour le compte de la D.I.R.E.N. (annexe : 4). A cette occasion les principales faiblesses de cette digue ont été identifiées (cf. § III.1.1.1).

Cette inspection de la partie émergée d'une digue est le préalable à toute autre inspection plus poussée.

## 2.3. Méthode de cartographie

### 2.3.1. Bathymétrie verticale

Elle ne s'intéresse pas directement à l'ouvrage étudié. Cette méthode permet de cartographier le fond d'un cours d'eau (fig. 6 et 7). Un sondeur vertical mesure la profondeur à l'aplomb du bateau (ODOM Echotrac MKIII, 33kHz et 200kHz).

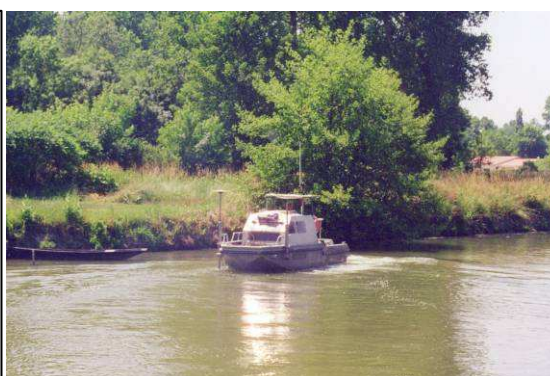
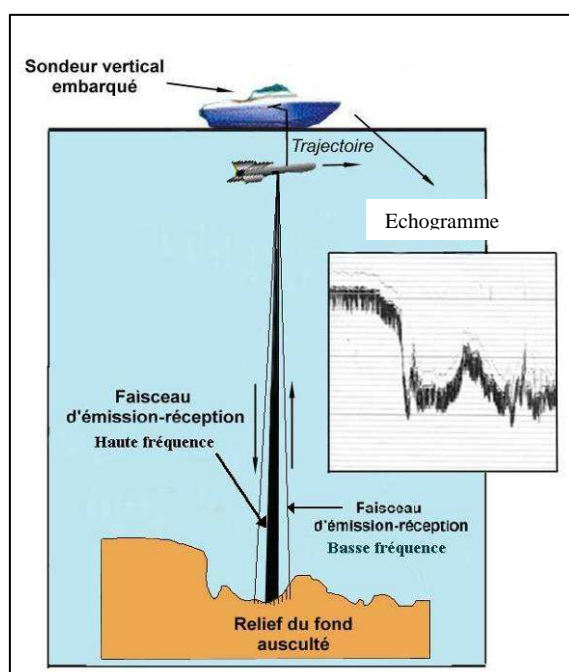
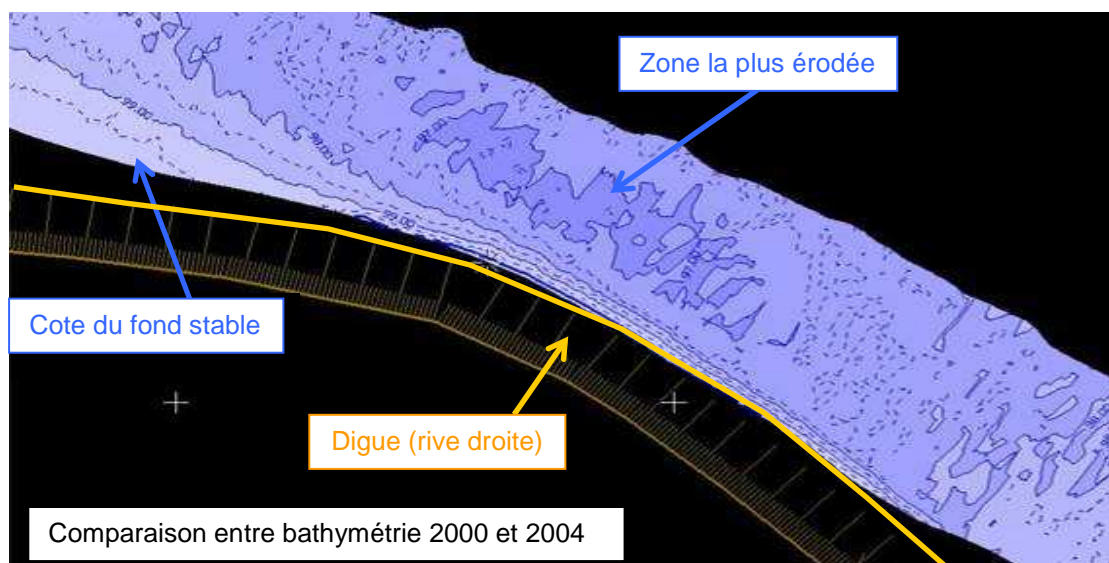


Figure 7 : Chantier de bathymétrie (L.R.P.C., 2006)

Figure 6 : Schéma de principe des relevés bathymétriques (L.R.P.C, 2006)

Le positionnement du bateau dans l'espace est assuré soit par un géodimètre robotisé Trimble 5600- ATS soit, si les berges ne sont pas trop boisées, par un GPS cinématique temps réel (Trimble 4700). Le résultat est rendu sous forme de carte topographique avec courbes de niveau du fond du cours d'eau.

Le suivi bathymétrique est réalisé depuis 1984 ; par la suite d'autres campagnes de mesure ont eu lieu en 1994, 2000 et 2004. La superposition des relevés de différentes campagnes fait apparaître les variations de cote du fond (fig. 8).



**Figure 8 : Evolution des fonds par comparaison des relevés bathymétriques (L.R.P.C, 2006)**

La comparaison des cartographies des fonds sur une bande en pieds de levée met en évidence des zones d'érosion/dépôt, de déplacements de bancs de sables. Entre 2000 et 2004, des zones d'érosion ont été observées sur le site de la Chapelle-sur-Loire (fig.8).

Grâce à cette technique, les zones d'érosion du lit à proximité d'une digue sont identifiées, leur évolution dans le temps est aussi mesurée. Ces zones d'affouillement en pied peuvent entraîner la déstabilisation du renforcement.

### 2.3.2. Topographie

Cette technique permet de caractériser les digues depuis la crête jusqu'au lit, si la profondeur d'eau n'est pas trop importante (mesures réalisées à pied). Les dérèglements au dessus de la ligne d'eau peuvent ainsi être mesurés.

Le théodolite permet de lever les différents points caractéristiques de la digue et de son pied. Des profils topographiques des digues sont ensuite établis.

A La Chapelle-sur-Loire, des profils topographiques terrestres de la digue et du lit (à l'étiage) ont été effectués lors de deux campagnes de mesure (2001 et 2004). La comparaison diachronique des mêmes profils a permis d'établir une tendance locale à l'érosion (amplitude de 10-15 cm environ). Cette constatation a confirmé que cette digue était vulnérable et que d'autres études préalables à un renforcement étaient nécessaires afin d'observer l'état du renforcement immergé.

## 2.4. Sonar latéral

L'utilisation de cet outil permet d'inspecter des ouvrages immergés. Les enregistrements sont des images des fonds et des ouvrages. L'inspection des pieds de levée met en évidence les glissements de matériaux, les affouillements ou tout autre dysfonctionnement.

Pour la digue de la Chapelle-sur-Loire, le sondeur bi-fréquence (C-max CM2, 325 kHz et 780 kHz) a permis de repérer les alternances entre zones renforcées et non renforcées, les glissements d'enrochements, l'emprise des enrochements sur le fond naturel ou encore d'identifier les fonds sur lesquels reposaient les enrochements (fig.9 et 10).

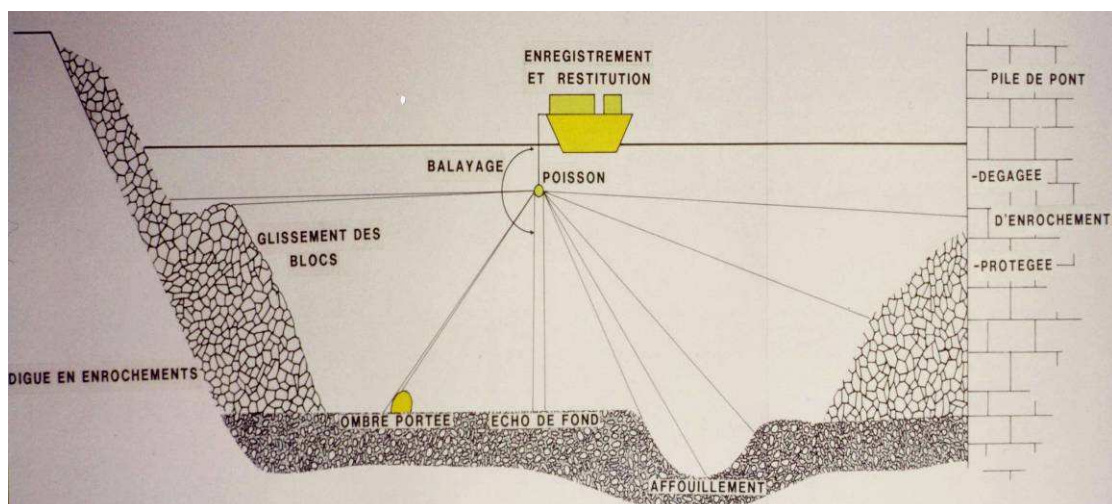


Figure 9 : Schéma de principe du sonar latéral (L.R.P.C, 2006)

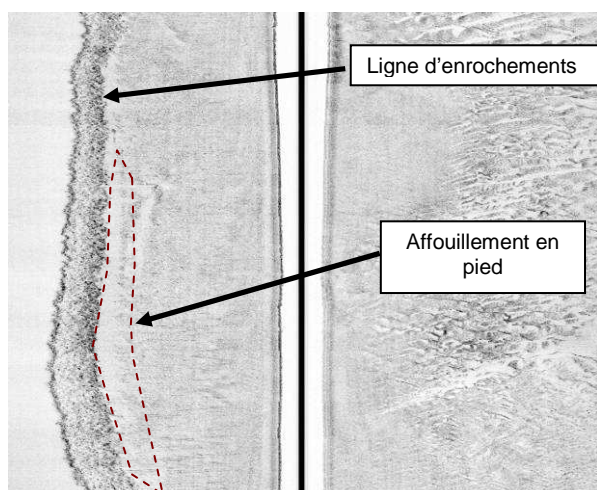


Figure 10 : Visualisation du pied de digue (enregistrement sonar latéral, avril 2006, L.R.P.C.)

Cette technique est parfaitement adaptée à l'observation des pieds de digue.

Ces méthodes sont distinctes mais l'interprétation de leurs résultats apporte des informations complémentaires. La bathymétrie verticale met en évidence les causes de déstabilisation de son pied en s'intéressant au lit du fleuve. Le sonar latéral permet d'avoir une image directe d'un renforcement, donc d'identifier l'ampleur des déstabilisations.

## Partie 3 : Résultats

### 1. Renforcements du pied de digue.

La liste des méthodes décrites ci après n'est pas exhaustive. Elle présente les grands types de renforcements, réalisés depuis 1979 : enrochement, palplanches et méthodes douces (localisation des sites en Annexe 2).

#### 1.1. Renforcement par enrochements

##### 1.1.1. Carapace en enrochements

Ce renforcement a été réalisé sur les sites des Trois volets et de La Chapelle-sur-Loire (Indre-et-Loire) entre 1979 et 1982. C'est le plus ancien des renforcements décrits dans cette étude. Le linéaire renforcé s'étend sur environ de 6,5 kilomètres.

##### ◆ Contexte et objectif du renforcement

Sur ces sites, une érosion du pied de digue par une attaque directe du courant mais aussi par la présence d'un affouillement du lit à proximité a été constatée (cf.§ II.2.1). Le renforcement devait permettre d'arrêter l'érosion du pied de digue.

##### ◆ Description du renforcement (fig. 11)

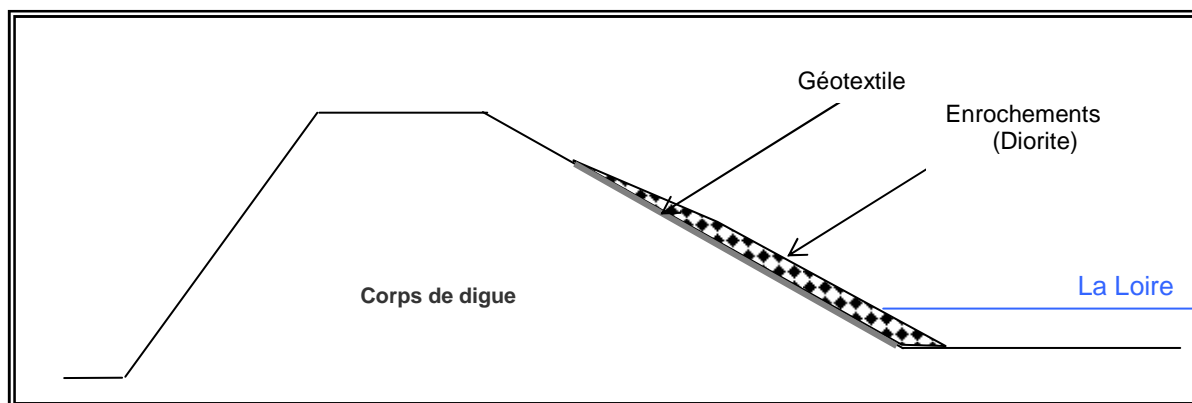


Figure 11 : Schéma du renforcement effectué sur le site de La Chapelle-sur-Loire (37)

Pour limiter l'érosion, il a été décidé de recouvrir le pied de digue d'une couche d'enrochement (blocs de grande taille en diorite, roche dure). Entre le flanc de la digue et les enrochements, une couche de géotextile a été déposée. Le but de cette couverture est d'empêcher le départ des matériaux fins du talus en disposant une barrière physique qui est perméable à l'eau. Aucun autre matériau n'a été rajouté. La pente du talus a été peu modifiée (43°).



**Figure 12 : Vue générale du renforcement (La Chapelle-sur-Loire, juin 2006)**

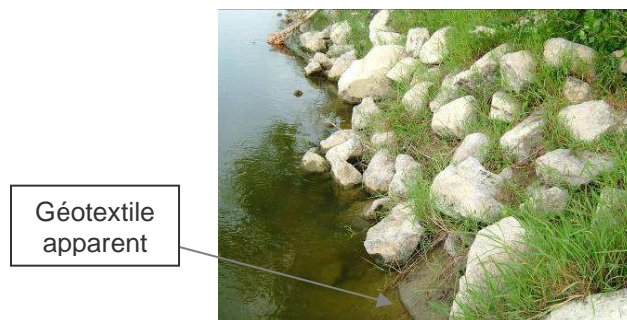


**Figure 13 : Enrochements en pied de digue (La Chapelle-sur-Loire, juin 2006)**

#### ◆ **Etat lors de l'inspection de 2006**

En pied de digue, des enrochements ont glissé sur le géotextile. Les enrochements s'ensouillent suivant la pente de l'affouillement. Les matériaux retenus par le géotextile s'affaissent eux aussi. Cela entraîne un raidissement de l'inclinaison de la couche de géotextile qui favorise à son tour la descente des enrochements. Les mouvements de matériaux rendent le géotextile visible. Celui-ci commence à se déchirer mettant à nu les matériaux fins qu'il protégeait.

La protection de l'ensemble du pied de digue n'est plus assurée par cette technique (fig. 14)



**Figure 14 : géotextile apparent et enrochements manquants (La Chapelle-sur-Loire, juin 2006)**

Le talus coté fleuve est envahi par les broussailles et les arbres. Le développement d'arbres favorise la déstabilisation des enrochements. La pente, trop importante ainsi que la présence d'enrochements sans chemin de service ne permet pas le passage des véhicules d'entretien et de surveillance.

#### **1.1.2. Rechargement du talus et carapace en enrochements.**

Réalisé il y a environ 20 ans, quelques années après le renforcement de La Chapelle-sur-Loire, cette méthode a été utilisée pour renforcer le site de La Frilière (Indre-et-loire)

#### ◆ **Contexte du site et objectif du renforcement**

Ce site en contact permanent avec le lit mineur subit les attaques directes du courant. Les vortex hydrauliques en sont des témoins. Un affouillement important a motivé le renforcement. La comparaison entre les bathymétries de 1989 et 2000 indique à certains endroits une érosion moyenne de 50 cm. Afin de limiter le risque de rupture par érosion externe, une protection du pied par une carapace d'enrochements a été réalisée.

### ◆ Description du renforcement (fig. 15)

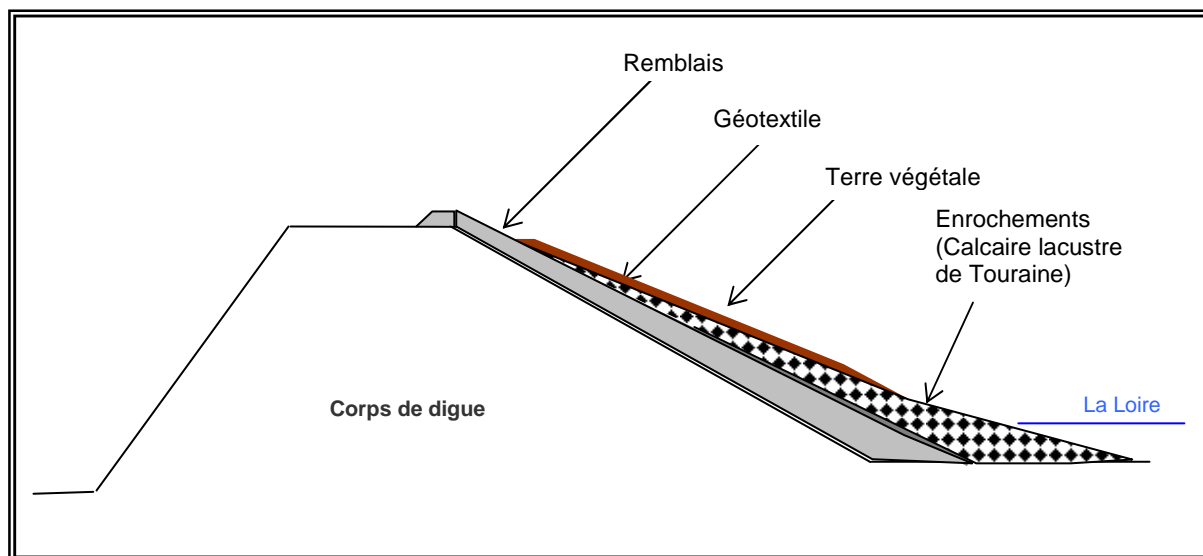


Figure 15 : Schéma du renforcement effectué sur le site de La Frillère (37)

Un rechargement en remblai a été réalisé sur le talus côté fleuve. Une couche de géotextile recouvre ces matériaux fins. Sur tout le flanc de levée, de gros enrochements ont été déposés sur cette couverture.



Figure 17 : Vue générale de la végétation en pied de digue (La Filière, Indre-et-Loire, juin 2006)



Figure 16 : Enrochements en pied de digue (La Frillère, Indre-et-Loire, juin 2006)

La blocométrie de ces blocs, en calcaire lacustre de Touraine, est supérieure à celle décrite à La Chapelle-sur-Loire. L'ajout de matériaux stabilise la digue et a adouci la pente du talus (30°). On peut aussi s'attendre par l'adoucissement de la pente à une meilleure stabilité des enrochements.

### ◆ Etat lors de l'inspection de 2006

Actuellement, on observe que certains enrochements sont tombés dans le lit et que d'autres sont en équilibre précaire. Malgré tout, après avoir mis plusieurs années à se stabiliser, le renforcement semble désormais en place (com. pers Jouanneau JC) (fig.16). Une nouvelle bathymétrie devrait permettre d'observer l'évolution de la base immergée de ce renforcement. En effet si l'affouillement qui avait été mis en évidence est toujours présent, la stabilité de ce renforcement n'est peut être que provisoire.

La partie inférieure du talus n'est pas recouverte de terre végétale ce qui limite l'entretien. En pied des arbres ont poussé sur tout le linéaire (fig.17). Un entretien est à faire pour couper les arbres. Des encoches d'érosion commencent à apparaître derrière certains arbres. La pente trop importante du talus et surtout l'absence de chemin service compliquent elles aussi l'entretien.

### 1.1.3. Rechargement du talus avec carapace en enrochements, terre végétale et risberme

Ce type de renforcement a été mis en place en 1997 en amont du bourg de Bréhémont (Indre-et-Loire, 37) sur 1,8 kilomètre.

#### ♦ Contexte et objectif du renforcement

Le linéaire renforcé est en contact permanent avec le lit mineur. Le renforcement a été mis en place afin de limiter l'attaque du pied de digue.

#### ♦ Description du renforcement (fig.18)

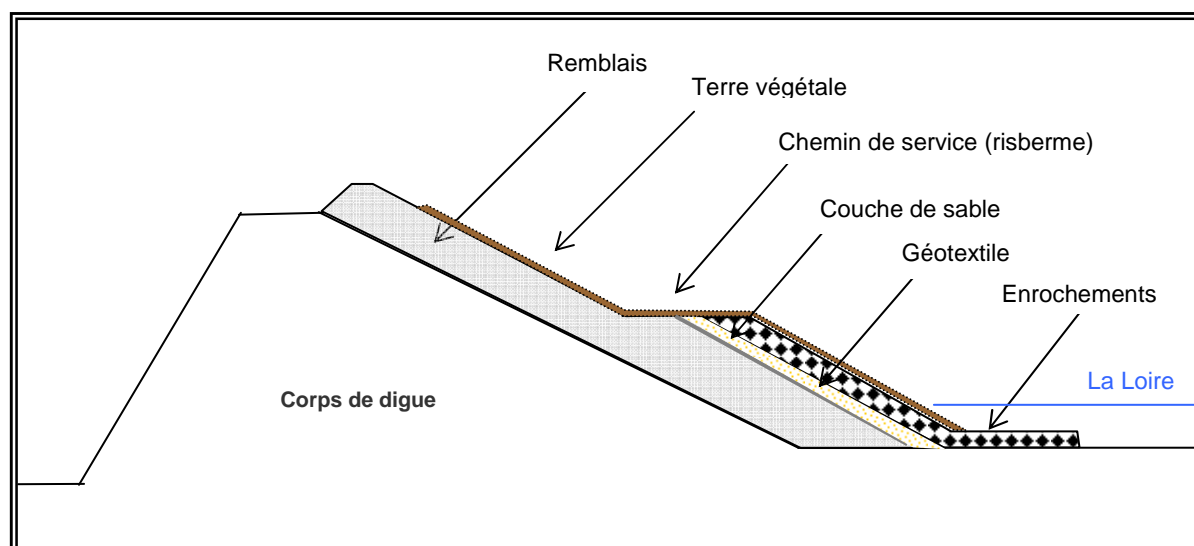


Figure 18 : Schéma du renforcement effectué sur le site de Bréhémont (37)

Coté fleuve, un rechargement en remblais fins a été effectué. Cet ajout vise à augmenter la stabilité d'ensemble de la digue et à allonger le chemin hydraulique (cf. § I.1.4.3.). Le remblai a été disposé de façon à créer à mi-hauteur une risberme qui sert de chemin d'entretien (fig.19). La pente du talus modifiée est de 27°. Une couverture en géotextile a été posée sur le nouveau remblai.

Comme sur les deux renforcements précédemment décrits, la pose d'une couche d'enrochements vient protéger le pied de la digue (fig.20). Ici, ce revêtement en enrochements se prolonge sur quelques mètres dans le fond du lit.

Par rapport aux renforcements de La Chapelle-sur-Loire, le géotextile n'est pas en contact direct avec les enrochements. Afin d'assurer une meilleure cohésion entre les enrochements et les matériaux superficiels du talus, une couche de sable de protection a été disposée sous les enrochements ; ce matériau faisant office de couche tampon.



**Figure 20 : Enrochements en pied de digue (Bréhémont, Indre-et-Loire, juin 2006)**



**Figure 19 : Vue générale du renforcement de Bréhémont (Indre-et-Loire, juin 2006)**

Une couche de terre végétale vient recouvrir le renforcement. Une végétation herbacée se développe sur le talus de digue. Le chemin de service permet l'entretien du talus. La terre végétale qui recouvre les enrochements permet le fauchage. Dans le cas de Bréhémont, un effort a été réalisé pour faciliter l'accès aux usagers du fleuve. Après le renforcement, des escaliers en béton et des anneaux d'amarrage ont été disposés sur la digue (fig. 21 et 22).



**Figure 21 : Anneau d'amarrage disposé sur le renforcement (Bréhémont, Indre-et-Loire, juin 2006)**



**Figure 22 : Escalier ancré sur le renforcement (Bréhémont, Indre-et-Loire, juin 2006)**

#### ◆ **Etat lors de l'inspection de 2006**

Les enrochements qui ont mis deux années à se stabiliser, sont maintenant fixés. Ce renforcement a une bonne tenue générale. Les enrochements ne glissent pas, ils assurent une protection contre l'érosion.

La végétation sur le talus de la digue reste à la strate herbacée, car un entretien fréquent est possible. En pied, des arbustes se sont développés. Ils ont maintenant atteint une taille qui pourrait menacer la stabilité du pied. Il est temps de les élaguer.

Suite à la décrue de 2003, les escaliers ont été un peu déchaussés (fig.22) mais ils reposent néanmoins sur les enrochements stabilisés. Cela n'affecte donc pas la stabilité de la digue. Il y a également des escaliers à La Chapelle-sur-Loire, le constat est le même.



**Figure 23 : Découverte partiel des matériaux sous un escalier (Bréhémont, Indre-et-Loire, juin 2006)**

Après 9 ans de mise en place et malgré la sollicitation du courant, ce renforcement semble garantir la solidité de la digue. Contrairement à La Chapelle-sur-Loire, la présence d'un chemin de service et les aménagements facilitant l'accès permettent une surveillance et un entretien complet du talus.

#### **1.1.4. Massif d'enrochements avec butée de pieds et risberme**

Dans le Maine-et-Loire, entre 1997 et 2005, tous les secteurs où la Loire coule en pied de digue ont été confortés par cette méthode. Cela représente 15 kilomètres en discontinu. Il en résulte un traitement homogène, présenté comme une seule et même technique dans ce rapport.

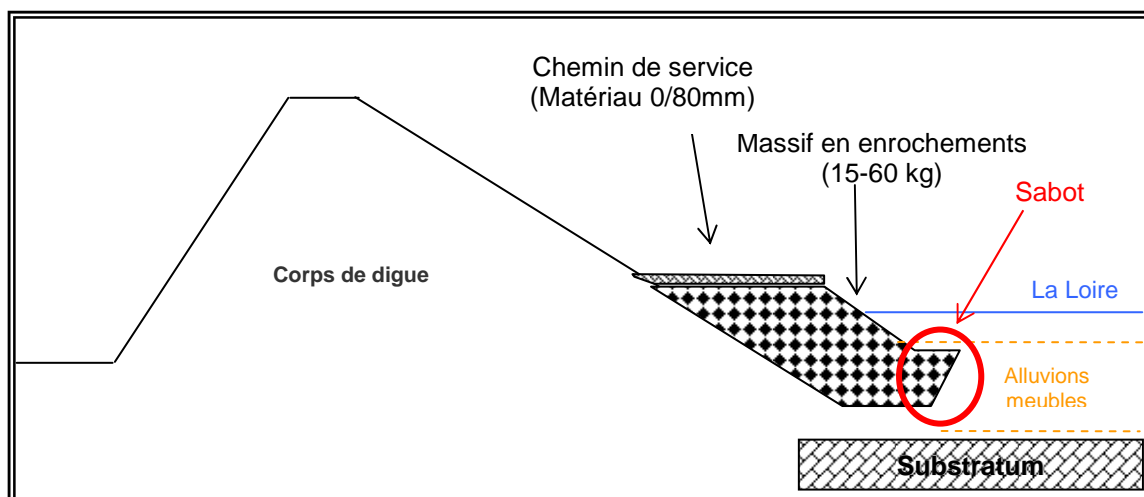
##### **♦ Contexte et objectifs de ces renforcements**

Sur tous ces secteurs, les sollicitations sont importantes (érosion et instabilité générale des fonds). Les pentes des talus sont voisines de 40° et la présence de zones urbanisées encastées sur certains secteurs sont des menaces pour la stabilité de la digue. Les premiers objectifs (1995) visaient à protéger le pied des érosions latérales mais aussi à améliorer la stabilité générale en aménageant un massif d'enrochements (carapace en enrochement jugée insuffisante). L'épaisseur de sédiments mobilisables est importante. La mise en mouvement potentielle de ces alluvions sur une épaisseur de l'ordre de la dizaine de mètres provoquerait la déstabilisation du pied de digue par érosion externe due à un affouillement (cf. § I.1.4.2.). Après cette prise en considération en 2000, il a été effectué un ancrage des enrochements dans les alluvions sur une profondeur de 2 mètres.

Un revêtement en enrochement du talus sans ancrage, a paru, ici, insuffisant car l'érosion directe par le courant n'est pas le risque principal. Il a été choisi, pour lutter contre la menace d'un affouillement en pied, de réaliser un massif en enrochements ancré dans les alluvions.

## ◆ Description du renforcement (fig. 24)

Figure 24 : Schéma du renforcement effectué sur le site de Saint-Clément-des-Levées (49)



La partie supérieure du talus généralement en perré jointoyé est en bon état, il n'a pas été prévu de renforcement sur toute la hauteur du talus. La pente du talus n'a pas été modifiée (40°).

Afin de créer une butée de pied, une souille dans les alluvions meubles a été réalisée. Le fond de cette souille constitue la base du massif d'enrochement. La profondeur voisine de 2 mètres ne correspond pas forcément à celle où l'on rencontre le sommet du substratum. Pour constituer un massif, les enrochements déversés ont été réagencés à la pelle mécanique de façon à garantir une bonne cohésion entre les blocs. Les blocs sont de nature divers. La blocométrie est relativement petite (calibre 15/90 kg) (Rethoret, 1998). La quantité d'enrochements utilisés est importante, le massif de butée de pied est construit à raison de 35-40 tonnes par mètre linéaire.

La cote du sommet du massif a été dimensionnée de sorte à pouvoir s'en servir comme un chemin de service. En effet, la largeur du massif étant de l'ordre de 5 mètres, il est possible d'utiliser son sommet comme chemin de service. Pour ce faire, les enrochements ont été recouverts par une couche de granulats 40-80 mm sur une épaisseur de 15 centimètres. Afin d'assurer une bonne transition, les enrochements recouvrent la base du perré.



Figure 25 : Vue générale renforcement en pied type "Maine-et-Loire" (Les Rosiers, août 2006)

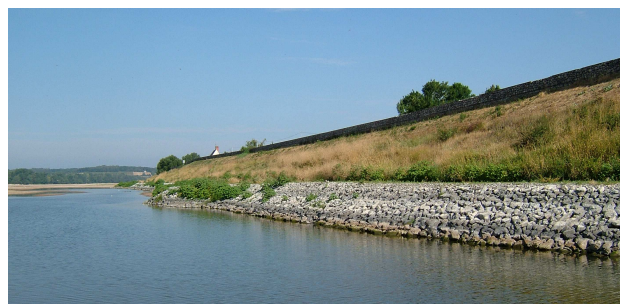


Figure 26 : Enrochements en butée de pied (Les Rosiers, août 2006)

Les alluvions décaissées, mêlées à des anciens blocs d'enrochements, ont été redispesées en avant du renforcement.

#### ♦ **Etat lors de l'inspection de 2006**

En comparaison aux autres renforcements, l'état général de tous les secteurs est très bon. Que le renforcement se trouve dans une zone de courant ou en retrait du chenal principal, les enrochements protégeant les chemins de services sont en place. Sur 15 kilomètres, seulement 10 mètres de butée présentent des traces de glissement (site de la Bohalle). Sachant qu'il persiste des incertitudes sur l'épaisseur d'alluvions mais aussi sur la profondeur effective de la butée (le substratum est-il atteint ?), ce mouvement de blocs proviendrait-il d'un défaut de mise en œuvre ou bien d'un sapement par mobilisation des sédiments ?

Le chemin de service est praticable sur tous les sites visités. Le perré protégeant le talus est en bon état quel que soit le matériau utilisé (diorite, dalles de béton ou pavés en béton).

La mise en place d'un massif d'enrochement avec une butée de pied semble répondre aux exigences de ces sites. Ces travaux sont relativement récents, il faut donc être prudent pour tirer des conclusions en particulier sur les risques de sapement et attendre encore quelques années pour observer leur évolution.

## **1.2. Rideau de palplanches**

### **1.2.1. Contexte et objectif de ce renforcement**

Plusieurs pieds de digue en amont d'Orléans ont été renforcés par un rideau de palplanches. Il s'agit des sites de Bou (1994) et Saint-Benoît (1998-2001) (Loiret-49).

Les contraintes géométriques sont très prononcées sur ces secteurs. Les courants sont obliques entraînant une érosion latérale du pied de digue. Pour lutter contre cette érosion externe, une barrière physique a été jugée nécessaire.

### **1.2.2. Description du renforcement (fig.27 bis)**

Un rideau de palplanches métalliques (acier oxydable) est mis en place au pied de la digue. La palplanche est fichée dans le substratum ce qui lui assure une stabilité. Elle ressort du fond de façon à ce que le sommet soit immergé seulement en hautes eaux. Du remblai constitué de matériaux de Loire est disposé entre le rideau de palplanches et le flanc de la digue (fig. 27). Sur chaque site, une longrine en béton a été construite au sommet des palplanches pour protéger les matériaux directement derrière (fig.28).



**Figure 27 : Renforcement par un rideau de palplanches (Saint-Benoît, Mériaux et al, 2004)**



**Figure 28 : Rideau de palplanches surmonté d'une longrine en béton (Saint -Benoît, Loiret, août 2006)**

#### ◆ Particularités du site de Saint-Benoît

Entre le talus et les palplanches, le remblai (granulats 20-50 mm) constitue un sentier d'une largeur d'environ 2 mètres. Ces matériaux ont été décaissés par le cours d'eau, il y a quelques années, une réfection récente a permis de rajouter la quantité manquante.

#### ◆ Particularités du site de Bou

L'espace entre les palplanches et le talus est suffisamment important pour qu'un chemin de service ait été mis en place. Le revêtement de ce chemin est un béton. Tout comme les palplanches, ce matériau offre une faible résistance au courant. Les longrines cachent les palplanches qui, comme à Saint-Benoît, sont en contact direct avec le fleuve. Il est donc impossible d'observer l'évolution de ce rideau de métal même à l'étiage.



**Figure 29 : Longrine du renforcement de Bou masquant le rideau de palplanches (Maine-et-Loire, août 2006)**

### 1.2.3. Etat lors de l'inspection de 2006

Là où elles sont visibles, les palplanches commencent à être corrodées par l'eau mais elles assurent encore pleinement leur rôle. Il semble que l'utilisation de matériaux offrant une faible résistance à l'écoulement déplace les menaces à d'autres points sensibles de la digue.

Après la mise en place des palplanches, un renfort par des longrines en béton a été nécessaire. Le matériau au sommet des palplanches a ainsi été protégé. Mais l'érosion s'est, à nouveau, déplacée. A Saint-Benoît, le granulat du sentier a en partie été emporté par le fleuve sans effet grave pour le moment. Une encoche d'érosion est présente à l'amont immédiat du renforcement.

A Bou, le revêtement en béton du chemin n'offrant que peu de résistance au courant, présente lui aussi des faiblesses. Sur le revêtement béton qui n'a pas résisté, des sillons d'érosion apparaissent le long des longrines et le long du talus.

A Bou, les grosses incisions laissent apparaître le remblai meuble sur lequel une végétation s'installe. La circulation sur le chemin de service est rendue difficile par les rigoles d'écoulements (fig. 30). A Saint-Benoît, le sentier est envahi par des ronces. L'entretien ne peut être réalisé facilement.



**Figure 30 : Sillons d'érosion sur le revêtement du chemin de service (site de Bou, Loiret)**

Sur les deux renforcements, les palplanches assurent leur protection. Mais des indices d'érosion, montre que ses secteurs restent sollicités.

### **1.3. Aménagement des pieds de levées par technique végétale : Fascines.**

Mises en œuvre entre 2003 et 2005 dans le Loir-et-Cher, cette technique vise à stabiliser le pied du chemin de service. Dans les secteurs où la Loire coule en pied, seule, la technique des fascines a été utilisée.

#### **1.3.1. Contexte et objectif de ces renforcements**

Excepté peut être à Chousy-sur-Cisse, les sites traités par cette méthode sont comparativement aux autres secteurs présentés moins sollicités. Les contraintes géométriques ne sont pas fortes, tracé de la Loire dans ces secteurs relativement rectiligne. L'épaisseur d'alluvions meubles n'est pas aussi importante que dans les sites à l'aval.

### 1.3.2. Description du renforcement (fig. 31)

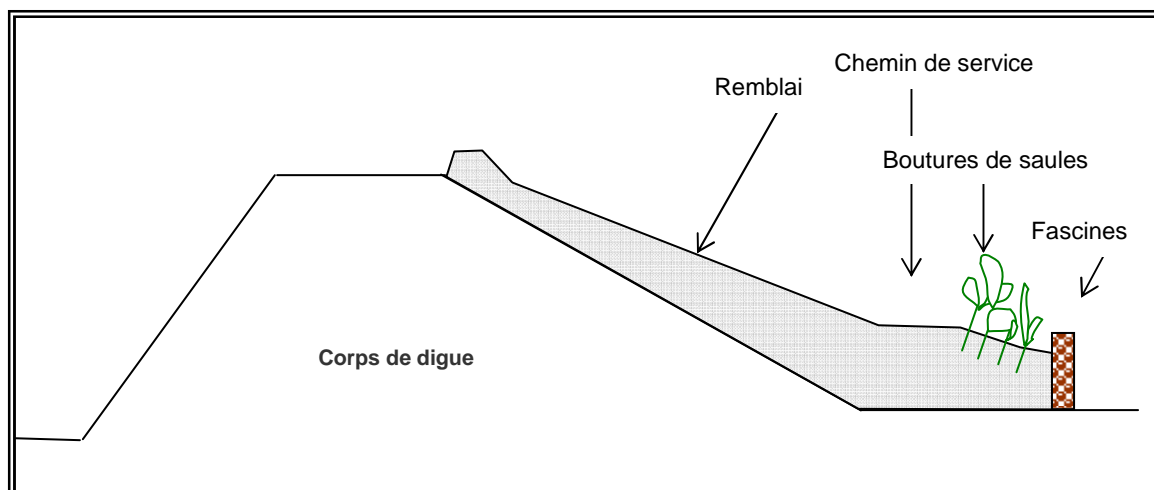


Figure 31 : Schéma du renforcement effectué sur le site de Chousy-sur-Cisse (41)



Figure 32 : Vue général renforcement par technique végétale (Saint-Dyé, Loir-et-Cher, août 2006)



Figure 33 : Fascine et saules en pied de chemin de service (Saint-Dyé, Loir-et-Cher, août 2006)

En pied de digue, un chemin de service est créé à l'aide de matériaux tout venant (comme les argiles à silex) (fig. 32). La cote du chemin permet l'entretien du talus.

En pied du chemin de service, une fascine est disposée sur tout le linéaire (branchage entrelacés entrant des pieux en acacias enfoncés verticalement dans le fond) (fig. 33). Sur la partie supérieure du pied, des boutures de saules arbustifs sont plantées à des intervalles de 0,5 mètre sur 3 rangées. A la base de la fascine, des branches parafeuilles sont disposées de façon à dissiper au moins dans les premiers temps l'attaque du courant. Après quelques mois, les saules enracinés protègent de l'érosion du chemin de service.

La fascine protège le pied le temps que la végétation plantée soit assez développée pour assurer le maintien du chemin. Au bout de plusieurs années, la végétation doit stabiliser le pied et limiter l'érosion.

Cette technique a donc pour objectif d'aider une végétation rivulaire à se développer et ainsi recréer une berge « naturelle » en pied d'un chemin de service et non plus immédiatement en pied de digue. Créant un réseau racinaire fin mais dense qui stabilise le talus du chemin, la végétation limite l'érosion. En cas de forte érosion, le chemin de service devient une sorte de fusible pour la digue. Les matériaux du chemin pouvant être emportés par le fleuve et non pas ceux constituant la digue. C'est

une conception différente du renforcement par rapport aux méthodes « classiques » conçues pour résister aux fortes sollicitations.

### 1.3.3. Etat lors de l'inspection

Les branches parafeuilles sont peu robustes. Il n'en reste plus beaucoup sur les sites.

Les fascines sont toujours présentes sur les sites. Néanmoins sur une trentaine mètres à Chousy-sur-Cisse, une partie des branches a été emportée. Au dessus, une zone d'érosion est présente. Lors de la crue, les saules, trop jeune, ne devaient pas être encore assez enracinés, le pied du chemin de service n'était donc pas assez protégé. En 2006, un nouveau bouturage de saules a été réalisé sur cette zone.

Il semble que cette technique de renforcement mette plusieurs années avant d'offrir une protection optimale ; la réussite d'un tel aménagement nécessite donc une absence de crue forte la première année au moins après sa mise en place.

A Saint-Dyé, les saules en arrière de la fascine occupent avec une grande densité le pied du chemin. Le chemin ne présente pas d'encoche d'érosion particulièrement marquée. La fascine en place depuis 2000 commence à se désagréger mais la stabilité est désormais garantie par la végétation. Les sollicitations à Saint-Dyé sont plus faible que celles à Chousy-sur-Cisse, cela explique peut être la différence de tenue des renforcements.

## **2. Chemin de service coté fleuve**

Les chemins de service ne sont pas des renforcements. Mais leur mise en place est un atout considérable pour l'entretien de la digue et la surveillance, et donc contribue fortement à la pérennité des renforcements. Ils peuvent aussi constituer un stock de matériaux, renforçant la stabilité de la digue. C'est pourquoi sur la plupart des renforcements récents, une risberme est créée sur laquelle un chemin de service est établi.

### **2.1. Cote du chemin**

L'enjeu de la bonne définition de cette cote est de garantir l'accès suivant le niveau d'eau du fleuve mais aussi l'entretien du talus.

Dans le Loir-et-Cher, la cote du chemin est déterminée pour que les engins puissent faucher la partie du talus qui ne leur est pas accessible depuis la crête de la digue.

Dans le Maine-et-Loire, la cote des chemins de service est de 1m supérieur à l'altitude du 0 de l'échelle limnimétrique de Saumur. La circulation y est possible environ 7 mois de l'année. Depuis le chemin il est possible de faucher le talus et la butée de pied.

Ainsi dans les départements où ils ont été mis en place, ce sont soit les contraintes hydrologiques soit les contraintes techniques d'entretien qui ont servi à choisir la cote. La prise en

compte de ces deux paramètres, serait préférable pour une meilleure estimation. L'intégration paysagère et les contraintes vis-à-vis des principes la loi sur l'eau serait aussi des aspects à prendre en compte.

## **2.2. Matériau de recouvrement**

Le matériau de recouvrement du chemin de service a une grande influence sur la praticabilité par les engins d'entretien.

A Saint-Dyé, la couche superficielle est assez fine. On observe la présence d'ornières. Le matériau utilisé est trop fin, le passage des véhicules après une crue ou une pluie est difficile (fig. 34).



**Figure 34 : Ornières dans un chemin de service (Saint-Dyé, Loir-et-Cher, août 2006)**

Les chemins de service dans le Loir-et-Cher ont été réalisés avec le remblai disponible lors des travaux de renforcements. Les matériaux utilisés ont donc des granulométries différentes. Le choix du matériau se faisait en fonction des déblais disponibles et ne répondait pas à une exigence particulière. Parmi les matériaux utilisés, l'argile à silex présente le plus d'avantage (résistance à la crue et circulation).

Dans le Maine-et-Loire, les butées de pied en enrochements supportent un chemin de service. Les enrochements sont recouverts d'un remblai superficiel d'environ 15 centimètres. Ce matériau permet l'utilisation du chemin de service. Sa granulométrie, 40-80 mm, assure une bonne protection qui n'a pas été mise à mal depuis sa mise en place (fig. 25).

Les sollicitations fortes sur les sites de Bou et Saint-Benoît ont eu des conséquences sur le chemin de service. Le site de Saint-Benoît (renforcement palplanches) ne dispose pas réellement de chemin de service (seulement sentier). Les granulats (20-50 mm) déposés entre les palplanches et le talus permettent une inspection et un entretien à pied. Lors de la crue de 2003, une partie de ce remblai a été emportée par la crue, un rechargement a été nécessaire.

Une couche de béton peu épaisse recouvre le chemin de service à Bou (fig.30). On observe des sillons d'érosion sur le bord du chemin. L'utilisation d'un matériau liaisonné et étanche montre donc des inconvénients.

La nature du matériau de recouvrement diffère d'une digue à l'autre en fonction des matériaux disponibles au moment de la construction. Dans certaines configurations, les matériaux utilisés offrant à priori une meilleure résistance, n'ont pas eu l'effet voulu (Bou et Saint-Benoît).

Il est préférable de laisser le chemin se végétaliser (de façon contrôlée car cela créerait une couche de terre végétale). Mieux en terme paysager, cette couche ne change rien quant à la tenue du revêtement, mais pose éventuellement des problèmes de circulation (boue, ornières...)

### **2.3. Raquettes de retournement et épis**

En saillie du talus de digue ou du chemin de service, des épis sont présents sur une bonne partie du cours de la Loire. Leur rôle perturbateur de l'écoulement du fleuve pourrait avoir un impact sur la stabilité des digues.

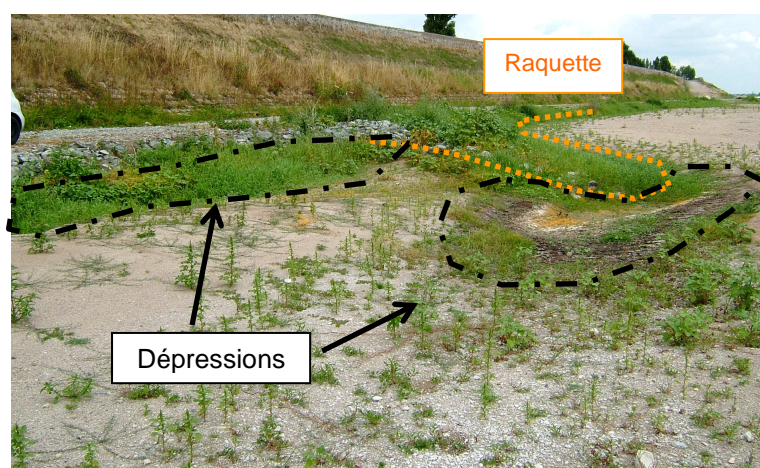
Des épis sont présents à l'amont du site de la Frilière (fig.17). Construits pour rendre la Loire navigable, ces ouvrages dévient le courant. Il a été observé (bathymétrie en 1993 et 2000), immédiatement à l'aval des épis, des affouillements à proximité du pied de digue. Les épis n'ayant dorénavant plus d'utilité, il serait préférable de les rasoir.

Sur les renforcements récents (Loir-et-Cher et Maine-et-Loire), des raquettes de retournement ont été laissées le long du chemin de service. Sorte de petits épis, ils permettaient aux engins de faire demi-tour lors de la construction du chemin (fig. 35).



**Figure 35 : Raquettes de retournement en saillie du chemin de service (Saint-Clément-des-Levées, Maine-et-Loire, août 2006)**

Ils créent une perturbation, visible parfois à l'aval (vortex hydraulique), pour l'écoulement le long de la digue (fig. 36).



**Figure 36 : Zones d'érosion à l'aval d'une raquette de retournement (La Bohalle, Maine-et-Loire, août 2006)**

Contrairement aux grands épis aidant à la navigation, leurs effets sont de plus faible ampleur et restent à quantifier. Leur étude à l'étiage mais aussi en crue pourrait quantifier leurs impacts éventuels sur les renforcements (bathymétrie en projet).

## Partie 4 : Discussion

### 1. Retour d'expérience sur les méthodes de renforcements en pieds de digue.

#### 1.1. Renforcements en palplanches

La protection physique assurée par un rideau de palplanches est efficace et semble satisfaisante. Toutefois, les érosions survenues au dessus des palplanches ont obligé le gestionnaire à réaliser plusieurs aménagements (rechargement à l'arrière du rideau, mise en place de longrines, réfection du chemin). La durée de vie de ce rideau en contact permanent avec le fleuve paraît incertaine (corrosion observée sur le site de Saint-Benoît). L'impact paysager et environnemental de ce matériau n'est plus compatible avec l'image de la Loire qualifié de fleuve sauvage. Ces arguments ont amené le gestionnaire à envisager de nouveaux renforcements (com. pers Seidlitz B). La dernière étude en cours prévoit l'utilisation d'enrochements avec un chemin de service (S.O.G.R.E.A.H, mai 2006) et non plus des palplanches.

Malgré cela, des remarques peuvent tout de même être formulées. Les renforcements en palplanches doivent faire l'objet de mesures d'accompagnement visant à diminuer la vitesse et l'érosion des zones situées de part et d'autre du renforcement. Le linéaire renforcé doit être supérieur au secteur sollicité originellement pour prévenir ces effets. Un suivi reste à faire après l'aménagement.

Les palplanches sont aussi utilisées pour renforcer le corps de digue. Que les palplanches soient dans le corps de digue ou en pied, peu de mesures sur leur corrosion n'ont été faites dans le temps. Il faudrait réaliser des sites témoins où le rideau peut être arraché. Afin d'évaluer leur vieillissement sur ces sites, des mesures doivent être effectuées (mesures de résistivité et diagraphie de sondages en polarisation spontanée APS) (com. pers Jouanneau J.C.).

#### 1.2. Renforcements par technique végétale (Fascines)

Les renforcements par techniques végétales consistent à recréer une végétation naturelle en pied de chemin de service. C'est la végétation qui assure la protection du chemin. C'est une conception du renforcement différente des autres renforcements. Passé les deux premières années de mise en place où le pied est peu protégé (encoche d'érosion à Chousy-sur-Cisse), cette technique semble efficace. Un entretien régulier afin de limiter la taille des arbres et d'empêcher la colonisation du chemin de service paraît nécessaire.

Cette méthode, dite douce, semble adaptée aux sites où il n'y a pas de sollicitations particulières (érosions latérales peu prononcées, absence d'alluvions meubles susceptibles d'être mobilisées en crue). Dans ces secteurs, cette technique est une alternative intéressante aux techniques « lourdes » qui sont coûteuses. Financièrement intéressantes, les techniques végétales sont aussi un

atout paysager par rapport aux autres méthodes. Elles pourraient donc être plus répandues, à condition d'analyser au préalable le degré de sollicitation du site à renforcer.

### **1.3. Renforcements en enrochements**

Cette méthode semble être la méthode qui garantit la meilleure protection dans les sites où les sollicitations sont les plus fortes (mobilité du substrat et vitesse du courant élevée). Cette méthode utilisée depuis des années a subi de nombreuses évolutions : depuis le simple déversement le long du talus jusqu'aux méthodes avec butée de pied et chemin de service. L'étude des différentes variantes permet de mettre en évidence les caractéristiques à prendre en compte pour un nouveau renforcement.

#### **1.3.1. Choix des enrochements**

Les enrochements ont été surdimensionnés lors des premiers renforcements récents (La Chapelle-sur-Loire et la Frilère). Pour autant, la stabilité des enrochements ne semble pas être meilleure. Leur réarrangement pour obtenir une bonne cohésion est plus difficile (beaucoup de vides). Depuis, la taille des enrochements a été adaptée (Bréhémont et Maine-et-Loire) aux sollicitations du site (vitesse du courant, orientation du courant), selon les formules existantes de dimensionnement (formules : Rock manual). Par exemple, sur des sites fortement sollicités du Loiret, des blocs de 10-60kg (blocométrie moyenne) sont proposés (S.O.G.R.E.A.H., mai 2006), venant confirmer ces observations.

Le choix d'enrochements assurant la stabilité intrinsèque d'un renforcement est à adapter aux vitesses observées. Pour chaque site, la blocométrie établit par calculs est suffisante. Pour des raisons de meilleure imbrication, il ne faut pas aller au-delà et ce quel que soit le matériau employé.

#### **1.3.2. Matériaux de transition entre les enrochements et le talus.**

##### **♦ Le géotextile**

Il est difficile d'évaluer la durée de vie d'un géotextile. Sa mise en œuvre dans des chantiers immergés est incertaine. Cette couverture flotte contrairement aux granulats posés dessus.

Le géotextile utilisé à La Chapelle-sur-Loire rend instable le renforcement (glissement progressif des enrochements).

##### **♦ Filtre granulaire**

Il faut privilégier l'utilisation d'un filtre granulaire entre les enrochements et le matériau du talus. En cas d'affouillement cette couche de transition s'ensouille avec les enrochements. La couche de transition assure une plus grande cohésion entre les blocs et le matériau du talus. Pour diminuer les vides entre les enrochements et accroître la cohésion entre les matériaux, une mise en œuvre en mélange est envisagée (S.O.G.R.E.A.H, mai 2006). Les enrochements et la couche de transition sont mélangés avant d'être mis en place diminuant ainsi l'érosion qui peut avoir lieu entre les blocs (meilleure imbrication de granulats).

### 1.3.3. Mise en œuvre des enrochements

#### ◆ **Enrochements sur talus**

Premières techniques utilisant des enrochements en Indre-et-Loire, cette mise en œuvre observée à La Chapelle-sur-Loire et la Frilière montre des faiblesses (déséquilibre des blocs ou glissement). La différence de tenue des enrochements, entre les deux sites, laisse penser que la tenue de ces blocs est fonction de la pente du talus sur lequel ils reposent. Ou bien, cette différence pourrait simplement être le fait de l'écart d'âge entre ces renforcements (bathymétrie en projet pour confirmer).

#### ◆ **Enrochements sur talus avec sabot reposant sur le fond**

Le sabot mise en œuvre à Bréhémont semble apporter une stabilité supplémentaire à l'ouvrage. Cette technique répond parfaitement aux contraintes de ce site.

#### ◆ **Butée de pieds**

L'élaboration d'un massif d'enrochement paraît être un moyen adapté pour conforter la stabilité du talus de digue côté fleuve. L'imbrication des enrochements est fondamentale pour la bonne tenue générale. Ce stock important de blocs en pied, comparé au simple revêtement en enrochement, est adapté à la lutte contre l'érosion. Par rapport au sabot déposé sur le fond, l'ancrage du sabot de pied dans les alluvions assure une meilleure stabilité lorsque la couche de sédiment est importante. Cependant les difficultés de mise en œuvre (la souille dans le sable qui se comble au fur et à mesure), ont poussés les maîtres d'œuvre à ficher la butée à moins de 2 mètres sans pouvoir prolonger jusqu'au substrat (incertitudes sur la stabilité de l'ouvrage lors d'un départ important d'alluvions).

Il s'agit d'une technique lourde, très gourmande en enrochement et donc onéreuse. Il faut réserver ce renforcement à des secteurs particulièrement sollicités.

### 1.3.4. Solution contre la déstabilisation des enrochements par affouillement.

Afin de lutter contre les déstabilisations en pied dans les sites où une mobilité du fond est observée, il est bon de chercher des éléments permettant d'envisager la méthode la mieux adaptée.

#### ◆ **Constat**

Le sous-dimensionnement des blocs n'est pas en cause dans le glissement de certains enrochements. En effet les matériaux crayeux de faible dureté et de granulométrie comprise entre 10 et 30 cm sont en place après plus d'un siècle dans les renforcements non sujet aux mouvements de matériaux (Aval du Bourg de Bréhémont, Indre-et-Loire) (fig.37). Ces blocs n'ont pas été entraînés par le fleuve. Par ailleurs, l'eau ne les a pas dissous. La blocométrie et la nature des blocs ne sont donc pas la cause principale des glissements d'enrochements.



**Figure 37 : Protection par enrochements crayeux (taille 10-30 cm) du pied de digue  
(Aval Bréhémont, Indre-et-Loire, juillet 2006)**

Il faut rechercher la cause entre autre dans la grande épaisseur de sable. Cette raison paraît la plus évidente.

#### ◆ Particularités des sites

Dans la zone considérée comme étant la « Basse Loire », il est difficile d'évaluer la cote minimale du fond sableux mobilisable. L'épaisseur d'alluvions meubles pourrait être localement de l'ordre de la dizaine de mètres (estimation pessimiste de 2000). Pour palier le manque de stabilité de cette grande quantité de sable, il paraît important de mettre en œuvre une grande quantité d'enrochements.

#### ◆ Perspectives pour faire face aux mouvements du lit

La tentative du Maine-et-Loire, vise à éviter ce phénomène en fichant les enrochements suffisamment profondément pour que la cote du lit ne s'abaisse jamais en dessous. L'idéal serait d'aller jusqu'au substratum mais cela reste difficile à mettre en œuvre. Le constat actuel montre que les butées n'ont pas subi de dégradation depuis leur mise en œuvre, relativement récente (évolution à surveiller).

Le phénomène d'affouillement pourrait aussi être intégré dans la conception du renforcement. La quantité d'enrochements mise en œuvre serait telle qu'elle constituerait un stock de matériaux important. Une partie des ces blocs pourrait se déposer dans l'affouillement au cours même du creusement, sans que la stabilité du renforcement en soit affectée (com. pers Jouanneau). Dans ce cas, l'ensouillement d'enrochements agencés ne serait pas nécessaire.

## **2. L'entretien des talus et la surveillance**

La surveillance des levées est l'élément essentiel permettant de maintenir la pérennité d'un renforcement et ainsi d'anticiper les dégradations pouvant mener à la formation de brèches. L'expérience des sites visités montre que ceux munis d'un chemin de service sont entretenus et faciles d'accès, rendant ainsi la surveillance efficace (Bréhémont, Choussy-sur-Cisse ou encore dans le Maine-et-Loire). Par contre les talus difficiles d'accès sont au moins en partie à l'abandon (La Chapelle-sur-

Loire, La Frilière). La mise en place d'un chemin de service constitue donc une avancée non discutable ; reste à évoquer les techniques de sa mise en œuvre.

## **2.1. Cote du chemin de service et nature des matériaux**

La cote du chemin doit permettre la circulation durant la majeure partie de l'année. Dans les zones calmes (vitesse relativement faible), une couche de limons fins peut se déposer sur le chemin à la décrue. Cet apport de matériaux meubles peut rendre difficile la circulation (ornières, ...). Il serait donc préférable de réaliser le chemin à une cote suffisante pour ne pas observer ce phénomène trop régulièrement. Il est préférable de prendre en compte, dans la mesure du possible, les deux contraintes (hydrologie et cote adaptée pour le fauchage du talus). Par ailleurs, plus le chemin est élevé plus le volume de remblai nécessaire est important. L'impact sur le milieu et le prix des travaux augmentent en conséquence.

Il paraît indispensable que les enrochements soient recouverts par une couche de matériaux plus fins pour permettre la circulation des véhicules. Sur des enrochements nus, l'entretien depuis le pied est limité (La Frilière). Le béton utilisé à Bou semble être un matériau non adapté. Il demande un entretien après chaque crue pour le rendre à nouveau carrossable (des morceaux de béton sont emportés).

L'utilisation d'une couche de matériaux concassés 20-50 mm (ou 40-80mm) ou d'argiles à silex est préférable à d'autres matériaux de granularité différente (com. pers Jouanneau J.C). Ces matériaux garantissent un chemin praticable qui résiste à une crue moyenne.

## **2.2. L'entretien fréquent pour permettre une bonne surveillance**

Surveiller et observer l'évolution dans le temps des renforcements est important. Il est préférable que l'entretien soit réalisé régulièrement.

La bonne visibilité d'un renforcement paraît importante. Ce n'est pas le cas lorsqu'une végétation dense se développe mais aussi lorsque certains aménagements cachent le renforcement (par exemple, mauvais dimensionnement). En effet, les longrines en béton utilisées pour stabiliser les palplanches masquent leur état. L'observation de l'évolution des palplanches est ainsi rendue difficile (fig.29).

La végétation herbacée utile pour améliorer la résistance à l'érosion est généralement entretenue sur la digue. Le fauchage effectué permet de limiter sa taille ainsi que le développement des broussailles et arbustes.

Dans le Maine et Loire, l'entretien est plus strict sur le parement perreyé coté fleuve et le chemin de service. Le perré ainsi que les enrochements restent la plupart du temps apparent. Le gestionnaire ne prend pas le risque de laisser se développer des essences ligneuses, un entretien strict laissant peu de végétation est réalisé. En Indre-et-Loire, les arbustes sont tolérés en pied. Le risque de voir des arbres apparaître sur la digue étant de toute façon limité par un fauchage régulier, il serait peut-être bon de laisser la végétation herbacée coté fleuve (déjà le cas coté val).

Certes, la végétation herbacée peut masquer en partie la surveillance du pied depuis le chemin. Il peut aussi être craint que le fait de laisser cette végétation soit un terrain favorable au développement d'arbustes. D'un autre côté, il est difficile d'enlever toute la végétation en particulier celle qui se développe sur les butées en enrochement. Il paraît donc opportun de laisser une végétation herbacée se développer en limitant régulièrement sa hauteur. En été, aux endroits où la végétation est dense, une inspection depuis le fleuve pourrait être réalisée. Cette vision directe du pied permettrait aussi de repérer les zones de glissement.

### **2.3. Limiter le risque de renard hydraulique**

La lutte contre le développement des arbres vise à limiter les encoches d'érosion observées en pied autour des arbres déracinés, et aussi à limiter le risque de renard hydraulique, galeries à l'emplacement d'un système racinaire décomposé.

Contre le risque d'érosion interne (renard hydraulique), il faut éviter les cavités dans le corps de digue, limiter la présence de souche sur le talus. Cela passe par un entretien fréquent. Les terriers d'animaux fouisseurs en particulier ceux des blaireaux sont à limiter. Des fontis ont été observés au dessus de terriers qui pourtant avaient été bouchés avec un ciment bentonite. Malgré ce traitement, des cavités ont persisté dans les anciennes galeries, une érosion interne a donc conduit à la formation de fontis en surface. La surveillance de ces traitements est donc indispensable.

Dans les secteurs où la Loire coule en pied, des renforcements paraissent nécessaire pour lutter contre certaines menaces liées au fleuve. Mais l'entretien et la surveillance d'une digue et de son renforcement sont indispensables.

# Conclusion

A partir de la description de plusieurs sites étudiés durant ce stage, il a été possible de réaliser un retour d'expérience des différentes techniques de renforcement des digues sur les secteurs où la Loire coule en pied.

Suivant l'intensité des sollicitations et leur nature, il apparaît qu'une adaptation du renforcement aux spécificités du site est préférable. Ce retour d'expérience n'a, en effet, pas vocation à promouvoir une solution unique, mais plutôt d'inciter à hiérarchiser les techniques envisageables en fonction des sollicitations. Conclusions sur les différentes techniques selon le type de sollicitation :

## **-Sollicitation faible**

- Toutes les techniques sont valables mais certaines sont peut être lourdes (coût disproportionné)
- Les techniques végétales semblent adaptées

## **-Erosion par le courant**

- Palplanches avec mesures d'accompagnement (essais sur leur évolution à faire)
- Privilégier les enrochements à mettre en œuvre de façon adaptée (pente du talus, blocométrie et quantité) avec sabot superficiel.

## **-Mouvement de matériaux**

- Expérience de la butée de pied à suivre, pour l'instant résultat concluant
- De toute façon un stock important d'enrochements en pied est nécessaire

Par, ailleurs, suite aux différentes visites, il apparaît obligatoire d'avoir des chemins de services de part et d'autre de la digue. Côté fleuve, sa mise en œuvre doit tenir compte des contraintes liées à la Loire. Une prise en compte simultanée de la submersion et du fauchage pour déterminer la cote est nécessaire. La granulométrie et la nature du revêtement du chemin doivent faciliter le passage des véhicules et éviter l'érosion en crue.

Enfin, l'entretien des digues est la clé de leur bon état. Les arbres ne doivent donc pas se développer sur la digue. La végétation herbacée laissée ne doit pas empêcher la surveillance fréquente des renforcements, mais elle participe à la protection contre l'érosion.

Ce retour d'expérience s'appuie essentiellement sur des constatations de terrains (visites entre mai et août 2006) et sur les réflexions issues de l'expérience du L.R.P.C. sur les levées de la Loire. Il est à noter que l'historique des renforcements est plus ou moins bien connu. C'est pourtant cette mémoire qui est la base d'un retour d'expérience. Sur certains renforcements récents, en particulier ceux du Maine-et-Loire avec un recul supérieur sur ces sites, d'autres réflexions seront donc à mener. Ce travail réalisé avec le L.R.P.C de Blois constitue un premier support sur lequel viendront se greffer les observations des prochaines années.

# Bibliographie

## Ouvrages

**C.E.T.M.E.F.**, *Ouvrages de navigation et écoulements souterrains, phénomènes, surveillance, prévention et réparation*, édition V.N.F, 2002, 144 pp.

**Certu**, *Aménager des rivières en ville, exemples et repères pour le montage d'opération*, éditions Certu, 2002, 161pp.

**Dion R.**, *Le Val de Loire, étude de géographie régionale*, Laffitte Reprints, édition 1978, 752 pp.

**Masson M.**, *Cartographie des zones inondables, approche hydrogéomorphologique*, D.D.E., M.E.D.D., Les éditions Villes et Territoires, 1996, 97 pp.

**Mériaux P.**, Royet P. et Folton C, *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations : guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires*, Cemagref édition, réédition 2004, 199 pp.

## Rapports

**Degoute G.**, Méthodes de reconnaissance et de surveillance-élaboration d'un diagnostic, CGGREF, session 2 du colloque : Sécurité des digues fluviales e de Navigation, Orléans, 25 et 26 novembre 2004.

**Durand E. et Houry G.**, *Rapport de synthèse, levées de la Loire rive gauche. Commune de Montlouis-sur-Loire, Etat des digues et définition des confortements*, Rapport C.E.T.E Normandie Centre, L.R.P.C. de Blois, nov 2003, 41 pp +annexes

**Equipe Pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature**, *Atlas des enjeux socio-économiques exposés au risque inondation en Loire moyenne*, février 2000, 241 pp.

**Halbeq W.**, *Actualisation du risque de rupture dans les levées de la Loire département du Loir-et-Cher*, Equipe Pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature, mars 1998, 21 pp.

**Jouanneau J.C.**, *Reconnaissance bathymétrique des fonds aquatiques*, L.R.P.C. de Blois, Unité Technique cours d'eau, Ponts Formation Edition, juin 2006, 35 pp.

**Rethoret H.**, *Retour d'expérience sur les techniques de renforcement de pieds de levées*, Rapport D.I.R.E.N. Centre, 2001, 3 volumes, 63 pp.

**S.O.G.R.E.A.H.** consultants, *Maîtrise d'œuvre relative à la conception du renforcement des levées sur les sites de Sandillon, Saint-Benoit-sur-Loire, Sigloy et Ouvrouer-les-Champs*, D.D.E. du Loiret, A.I.T.L., Rapport-Projet, mai 2006, 108 pp.

**Tardivo C.**, *Réalisation d'un atlas de zones inondables, l'Aisne amont et l'Aire dans le Département des Ardennes, méthodologie française et suisse*, Rapport de D.E.S.S. I.H.C.E., C.E.T.E Normandie Centre, L.R.P.C de Blois, sept. 2005, 86 pp.

**Giken Europe BV**, la méthode SMP Silent Piler, prospectus publicitaire, Pays-Bas, juin 2006, 4 pp.  
[www.cetemef.equipement.gouv.fr](http://www.cetemef.equipement.gouv.fr)  
[www.ecologie.gouv.fr](http://www.ecologie.gouv.fr)

# Table des matières

Remerciements .....	3
Sommaire .....	4
Résumé .....	5
Summary .....	5
Introduction .....	6
Partie 1 : Généralités .....	7
1. Présentation de l'organisme et contexte de l'étude .....	7
1.1. Présentation de l'organisme .....	7
1.2. Contexte de l'étude .....	8
1.3. Les levées .....	8
1.3.1. La Loire endiguée .....	8
1.3.2. Enjeux en cas de ruptures .....	8
1.3.3. Crues de la Loire .....	9
1.3.4. Description d'une levée .....	9
1.4. Différents mécanismes de rupture de digues .....	9
1.4.1. La surverse .....	10
1.4.2. Les érosions externes et les affouillements .....	10
1.4.3. Erosion interne (ou renard hydraulique) .....	10
1.4.4. Rupture d'ensemble des digues en remblai .....	11
1.5. Contraintes du milieu sur les digues .....	12
1.5.1. Contraintes subies par l'ensemble des levées. ....	12
♦ Contraintes hydrostatiques s'exerçant sur un remblai en terre. ....	12
♦ Effondrement karstique .....	12
1.5.2. Contraintes liées à la présence de la Loire en pied. ....	12
♦ Morphologie de la Loire .....	12
♦ Orientation du courant par rapport à l'ouvrage (contrainte hydrodynamique) ..	12
♦ Mobilité du fond .....	13
Partie 2 : Matériel et Méthodologie .....	15
1. Démarche adoptée pour l'étude .....	15
1.1. Recensement des différentes techniques de renforcement. ....	15
1.2. Recherche des matériaux utilisés. ....	15
1.3. Retour d'expérience des renforcements. ....	15
1.3.1. Enquête auprès des services gestionnaires. ....	15
1.3.2. Constatation de l'évolution des sites .....	15
2. Présentation des différentes méthodes et matériels d'inspection : le cas de la Levée de La Chapelle-sur-Loire. ....	16
2.1. Présentation du site .....	16
2.2. Inspection visuelle .....	16
2.3. Méthode de cartographie .....	17
2.3.1. Bathymétrie verticale .....	17
2.3.2. Topographie .....	18
2.4. Sonar latéral .....	19
Partie 3 : Résultats .....	20
1. Renforcements du pied de digue. ....	20
1.1. Renforcement par enrochements .....	20

1.1.1.	Carapace en enrochements .....	20
♦	Contexte et objectif du renforcement .....	20
♦	Description du renforcement (fig. 11).....	20
♦	Etat lors de l'inspection de 2006 .....	21
1.1.2.	Rechargement du talus et carapace en enrochements. ....	21
♦	Contexte du site et objectif du renforcement .....	21
♦	Description du renforcement (fig. 15).....	22
♦	Etat lors de l'inspection de 2006 .....	22
1.1.3.	Rechargement du talus avec carapace en enrochements, terre végétale et risberme 23	
♦	Contexte et objectif du renforcement .....	23
♦	Description du renforcement (fig.18).....	23
♦	Etat lors de l'inspection de 2006 .....	24
1.1.4.	Massif d'enrochements avec butée de pieds et risberme .....	25
♦	Contexte et objectifs de ces renforcements .....	25
♦	Description du renforcement (fig. 24).....	26
♦	Etat lors de l'inspection de 2006 .....	27
1.2.	Rideau de palplanches .....	27
1.2.1.	Contexte et objectif de ce renforcement.....	27
1.2.2.	Description du renforcement (fig.27 bis) .....	27
♦	Particularités du site de Saint-Benoît .....	28
♦	Particularités du site de Bou .....	28
1.2.3.	Etat lors de l'inspection de 2006 .....	28
1.3.	Aménagement des pieds de levées par technique végétale : Fascines. ....	29
1.3.1.	Contexte et objectif de ces renforcements.....	29
1.3.2.	Description du renforcement (fig. 31).....	30
1.3.3.	Etat lors de l'inspection.....	31
2.	Chemin de service coté fleuve .....	31
2.1.	Cote du chemin.....	31
2.2.	Matériau de recouvrement.....	32
2.3.	Raquettes de retournement et épis.....	33
Partie 4 : Discussion .....		35
1.	Retour d'expérience sur les méthodes de renforcements en pieds de digue. ....	35
1.1.	Renforcements en palplanches .....	35
1.2.	Renforcements par technique végétale (Fascines) .....	35
1.3.	Renforcements en enrochements.....	36
1.3.1.	Choix des enrochements.....	36
1.3.2.	Matériaux de transition entre les enrochements et le talus.....	36
♦	Le géotextile .....	36
♦	Filtre granulaire .....	36
1.3.3.	Mise en œuvre des enrochements.....	37
♦	Enrochements sur talus.....	37
♦	Enrochements sur talus avec sabot reposant sur le fond .....	37
♦	Butée de pieds .....	37
1.3.4.	Solution contre la déstabilisation des enrochements par affouillement. ....	37
♦	Constat.....	37
♦	Particularités des sites .....	38
♦	Perspectives pour faire face aux mouvements du lit.....	38
2.	L'entretien des talus et la surveillance .....	38
2.1.	Cote du chemin de service et nature des matériaux .....	39

2.2. L'entretien fréquent pour permettre une bonne surveillance .....	39
2.3. Limiter le risque de renard hydraulique .....	40
Conclusion.....	41
Bibliographie .....	42
Table des matières .....	43
Table des Figures .....	45
Annexes .....	46

## Table des Figures

Figure 1 : Schéma type d'une levée de la Loire.....	9
Figure 2 : Orientation parallèle du courant (site de la Ménitrie, Maine-et-Loire, août 2006) .....	13
Figure 3 : Orientation oblique du courant (site de Saint-Maturin, Maine-et-Loire, août 2006) .....	13
Figure 4 : Front aval d'une dune hydraulique (Saint-Clément-des-levées, Maine-et-Loire, août 2006) .....	14
Figure 5 : Localisation des inspections réalisées sur la levée de La Chapelle-sur-Loire (Indre-et-Loire) .....	16
Figure 8 : Evolution des fonds par comparaison des relevés bathymétriques (L.R.P.C, 2006) .....	18
Figure 9 : Schéma de principe du sonar latéral (L.R.P.C, 2006).....	19
Figure 10 : Visualisation du pied de digue (enregistrement sonar latéral, avril 2006, L.R.P.C.) .....	19
Figure 11 : Schéma du renforcement effectué sur le site de La Chapelle-sur-Loire (37).....	20
Figure 12 : Vue générale du renforcement (La Chapelle-sur-Loire, juin 2006).....	21
Figure 13 : Enrochements en pied de digue (La Chapelle-sur-Loire, juin 2006) .....	21
Figure 14 : géotextile apparent et enrochements manquants (La Chapelle-sur-Loire, juin 2006).....	21
Figure 15 : Schéma du renforcement effectué sur le site de La Frilère (37) .....	22
Figure 18 : Schéma du renforcement effectué sur le site de Bréhémont (37) .....	23
Figure 19 : Vue générale du renforcement de Bréhémont (Indre-et-Loire, juin 2006) .....	24
Figure 20 : Enrochements en pied de digue (Bréhémont, Indre-et-Loire, juin 2006) .....	24
Figure 21 : Anneau d'amarrage disposé sur le renforcement (Bréhémont, Indre-et-Loire, juin 2006).....	24
Figure 22 : Escalier ancré sur le renforcement (Bréhémont, Indre-et-Loire, juin 2006).....	24
Figure 23 : Découverte partiel des matériaux sous un escalier (Bréhémont, Indre-et-Loire, juin 2006) .....	25
Figure 25 : Vue générale renforcement en pied type "Maine-et-Loire" (Les Rosiers, août 2006).....	26
Figure 26 : Enrochements en butée de pied (Les Rosiers, août 2006) .....	26
Figure 27 : Renforcement par un rideau de palplanches (Saint-Benoît, Mériaux et al, 2004) .....	28
Figure 28 : Rideau de palplanches surmonté d'une longrine en béton (Saint -Benoît, Loiret, août 2006) .....	28
Figure 29 : Longrine du renforcement de Bou masquant le rideau de palplanches (Maine-et-Loire, août 2006) .	28
Figure 30 : Sillons d'érosion sur le revêtement du chemin de service (site de Bou, Loiret).....	29
Figure 31 : Schéma du renforcement effectué sur le site de Chousy-sur-Cisse (41).....	30
Figure 32 : Vue général renforcement par technique végétale (Saint-Dyé, Loir-et-Cher, août 2006) .....	30
Figure 33 : Fascine et saules en pied de chemin de service .....	30
Figure 34 : Ornières dans un chemin de service (Saint-Dyé, Loir-et-Cher, août 2006).....	32
Figure 35 : Raquettes de retournement en saillie du chemin de service (Saint-Clément-des-Levées, Maine-et-Loire, août 2006).....	33
Figure 36 : Zones d'érosion à l'aval d'une raquette de retournement (La Bohalle, Maine-et-Loire, août 2006)....	34
Figure 37 : Protection par enrochements crayeux (taille 10-30 cm) du pied de digue .....	38
Figure 1bis : Différents mécanismes de rupture de digues (d'après Degoute G, novembre 2004) .....	verso 6
Figure 27bis : Différents mécanismes de rupture de digues (d'après Degoute G, novembre 2004) .....	verso 23

Note : Les figures n'ayant pas de source ont été réalisées par Saxer S, 2006. (en particulier photographies prises en bord de Loire durant ce stage).

# Annexes

**Annexe 1** : La Loire moyenne.

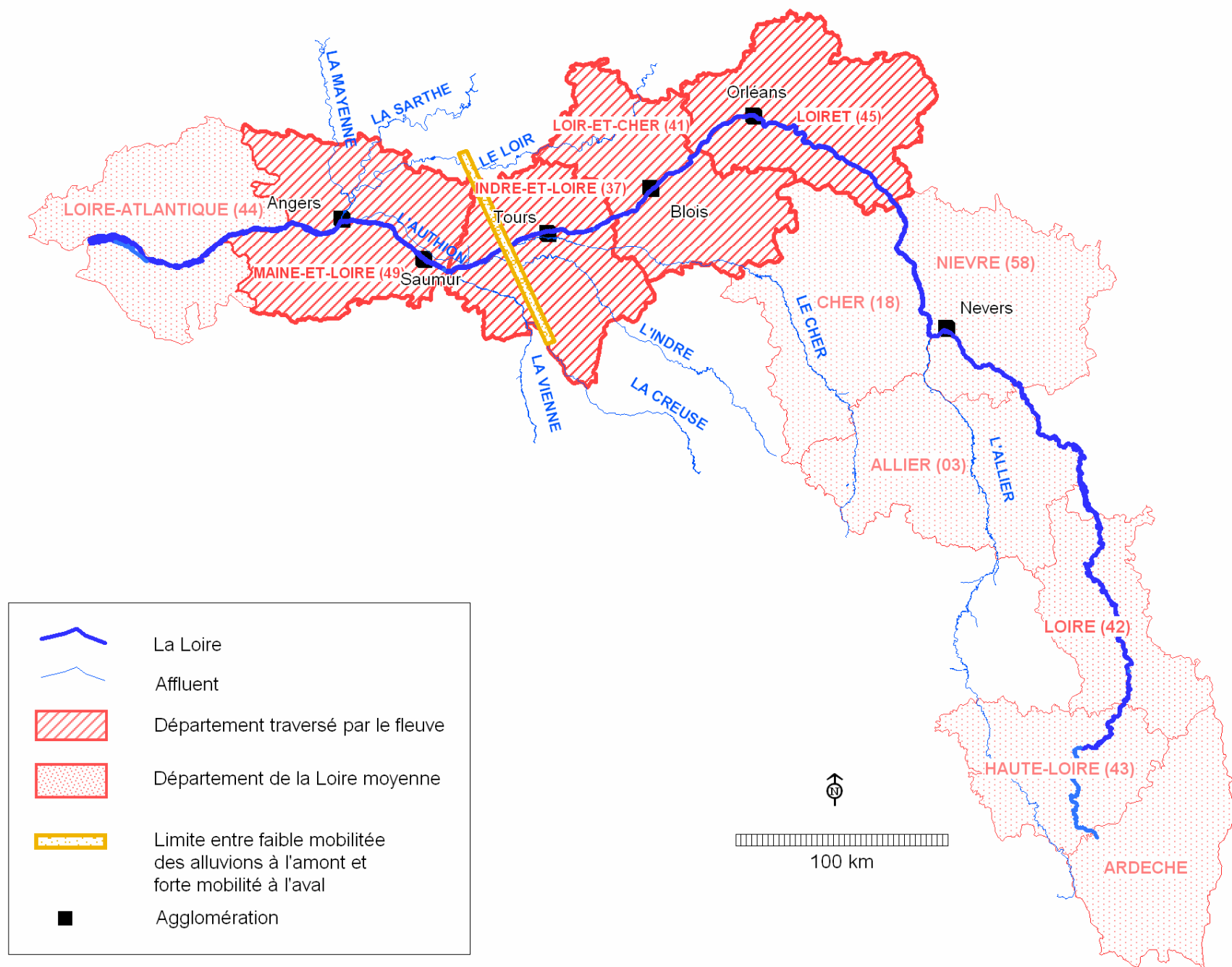
**Annexe 2** : Localisation des secteurs de digues étudiés.

**Annexe 3** : Vals de Loire et Population concernée par une crue cinq-centennale.

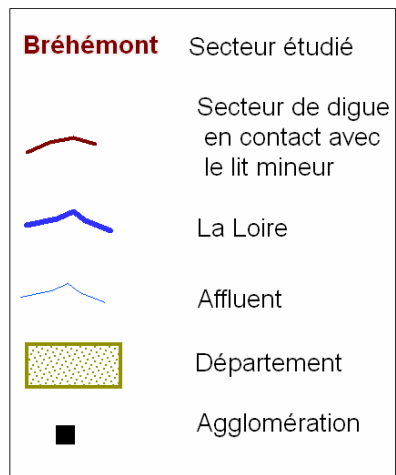
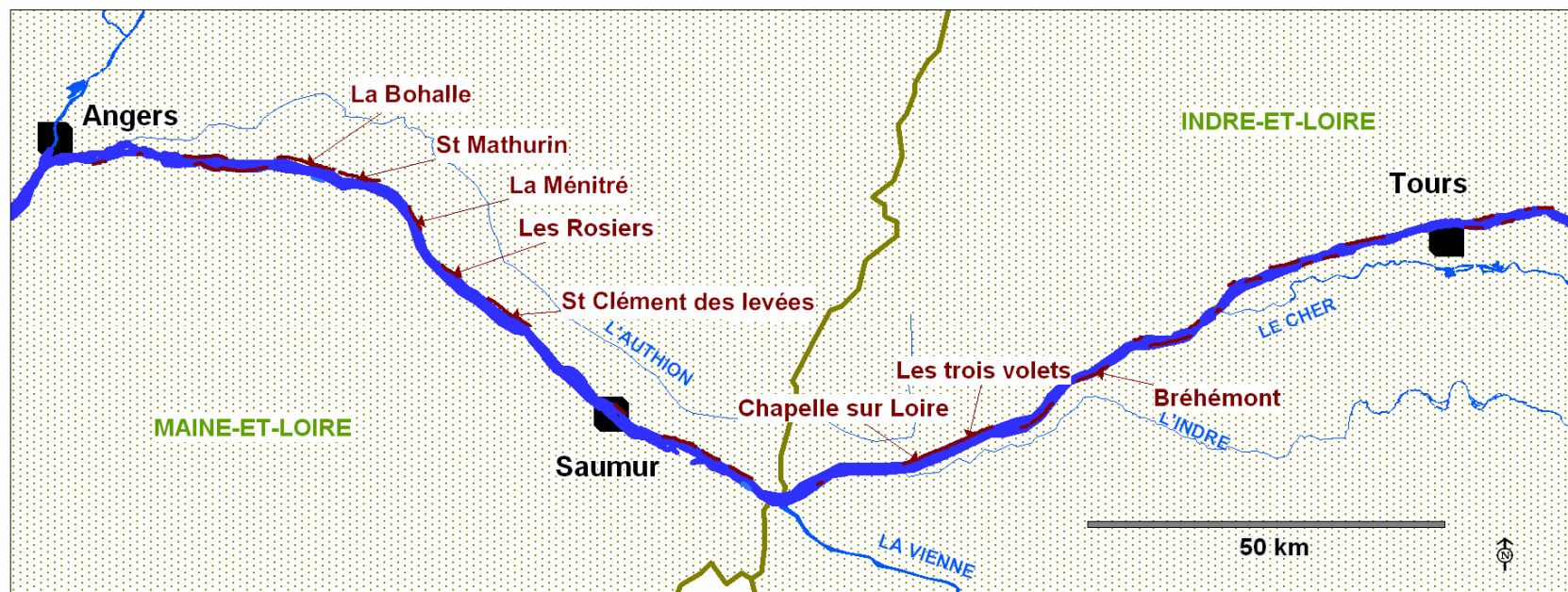
**Annexe 4** : Fiche d'inspection de digue

(Source : L.R.P.C Blois, d'après Mériaux et al, 2004)

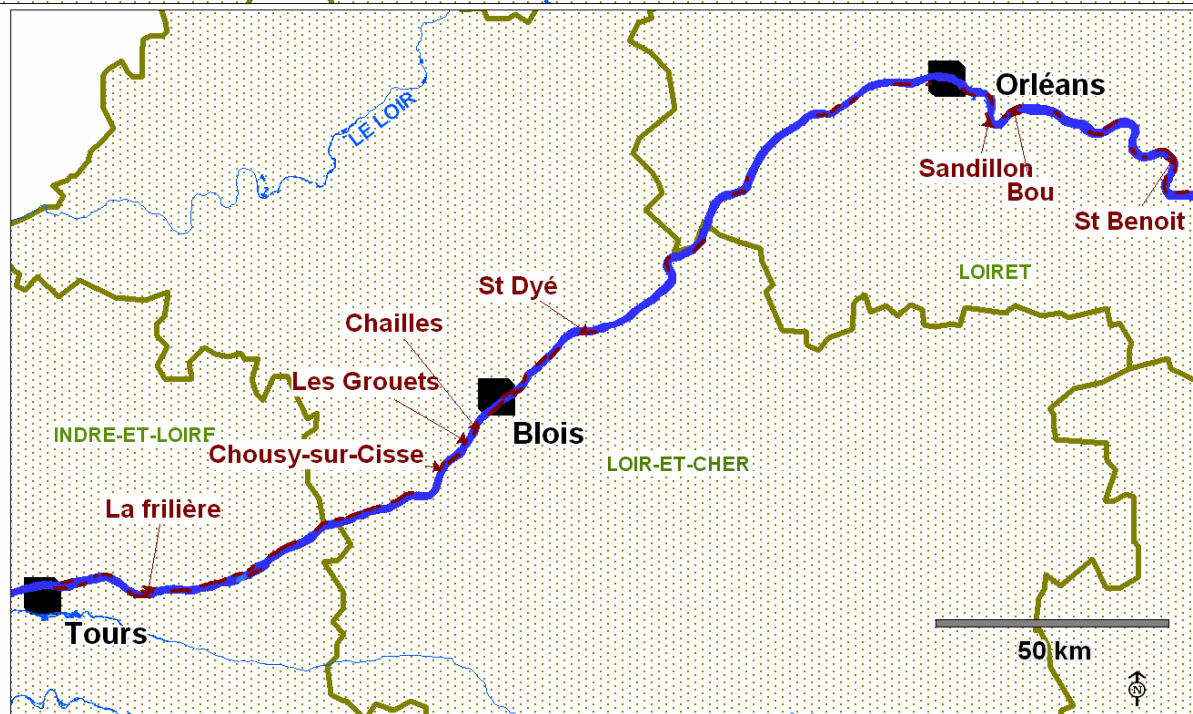
## Annexe 1 : La Loire moyenne



## Annexe 2 : Localisation des secteurs de digue étudiés



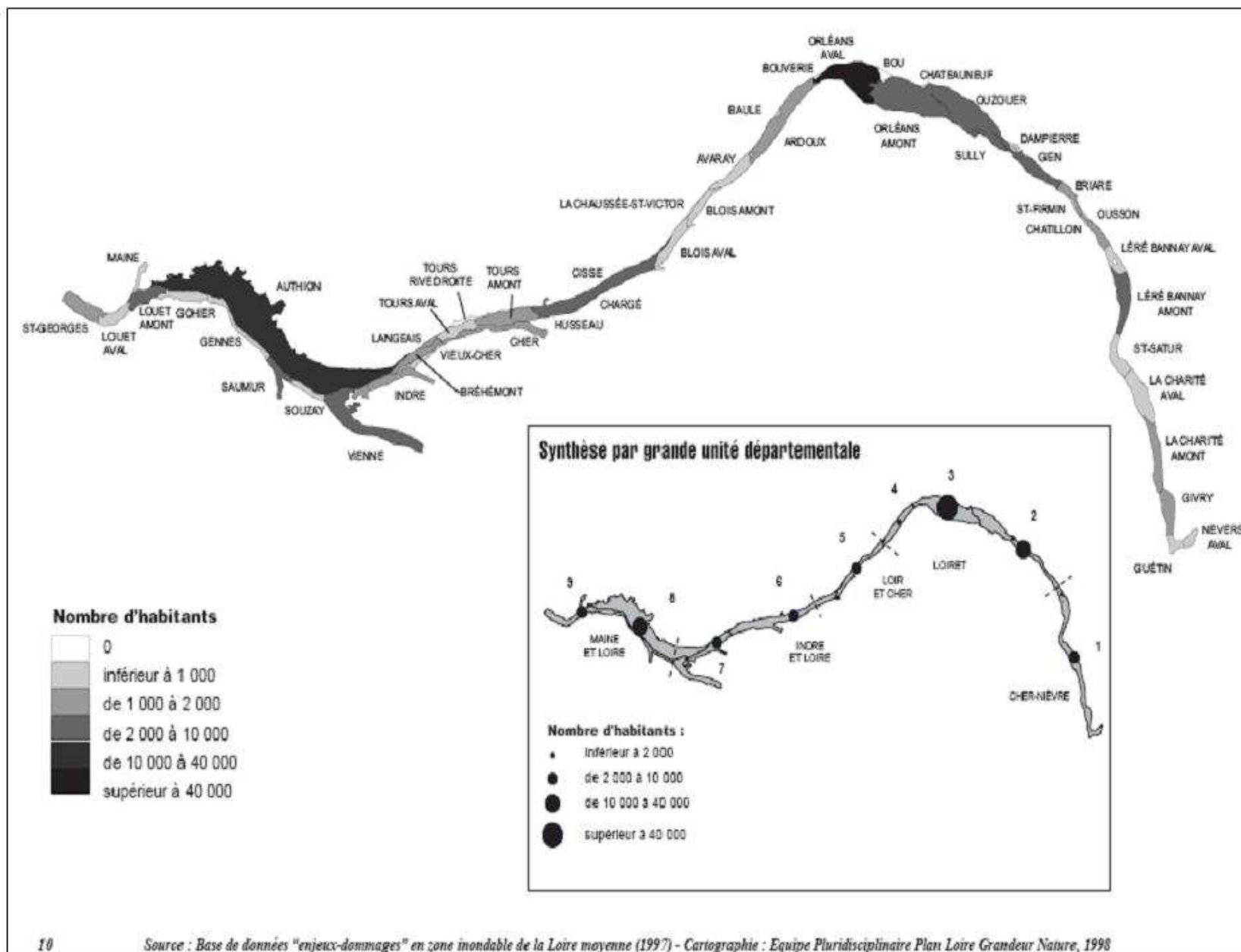
source : BD carto, Top 25 (IGN)  
DIREN Centre



## Annexe 3 : Vals de Loire et

## Population concernée par une crue cinq-centennale

Source : E.P.P.L.G.N., février 2000



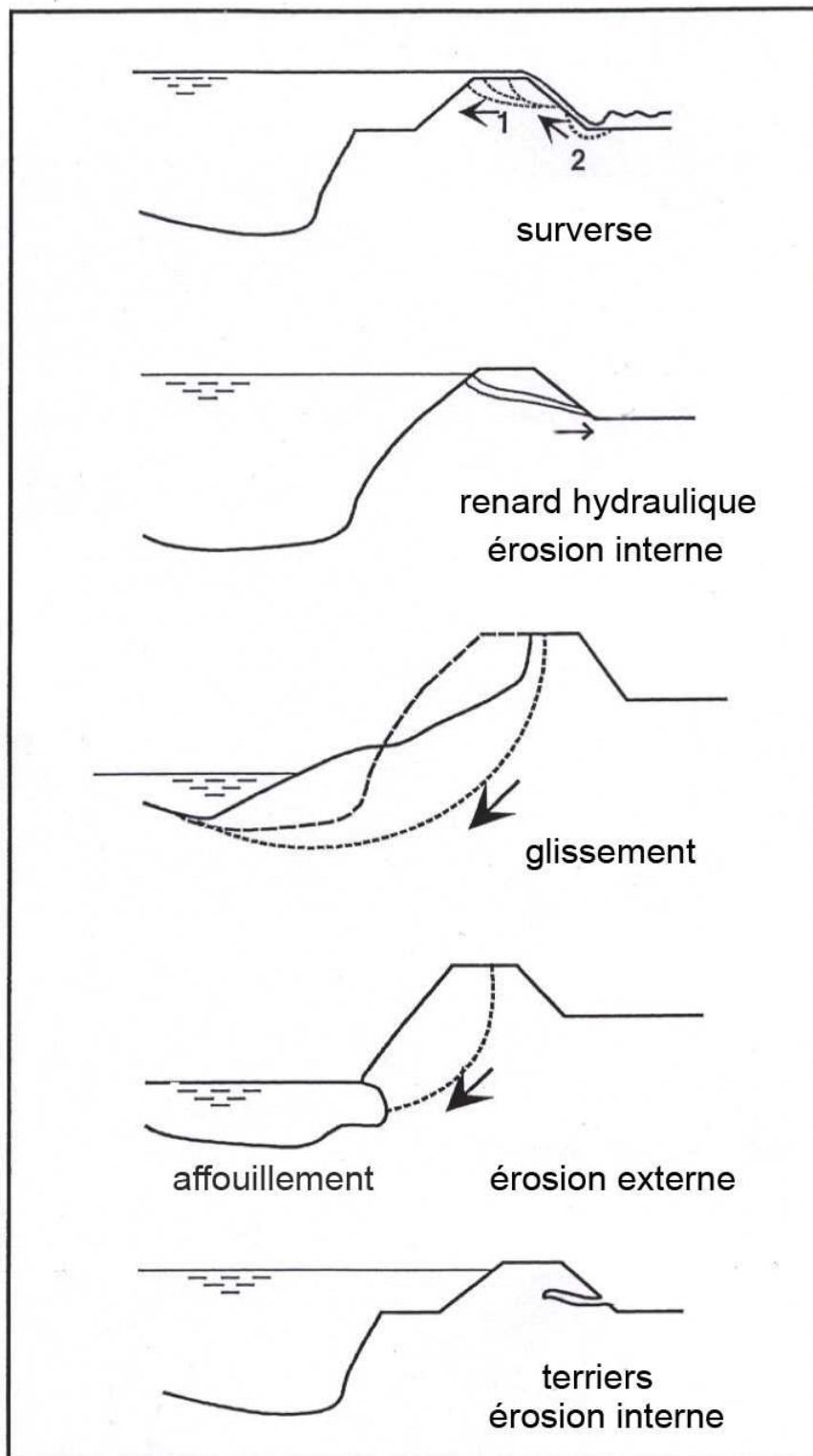


Figure 2 : Différents mécanismes de rupture de digues (d'après Degoute G, novembre 2004)

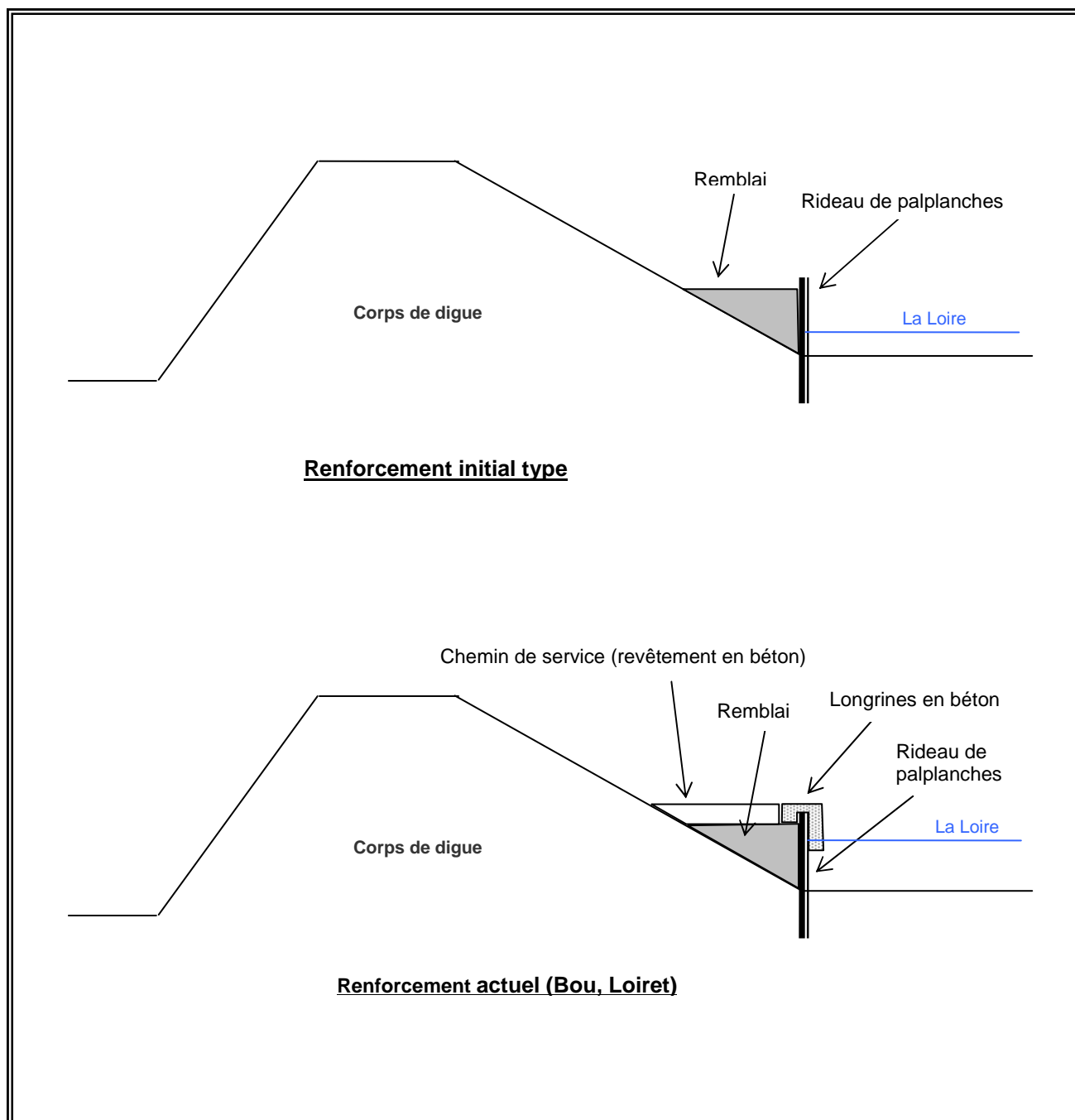


Figure 27 bis: Schéma du renforcement effectué sur le site de Bou (45)