

**DDT DU LOIRET**

---

# **ÉTUDE DE DANGERS DU SYSTEME DE PROTECTION DU VAL DE LA BOUVERIE CONTRE LES INONDATIONS DE LA LOIRE**

***Rapport d'étude***

800494\_PG\_BOUVERIE.do



## 0. RESUMÉ NON TECHNIQUE DE L'ÉTUDE DE DANGERS

### 0.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE DE DANGERS

L'étude de dangers du système d'endiguement du val de la Bouverie a été réalisée par BRLingénierie. Les études de dangers sont des études réglementaires qui s'imposent à tous les propriétaires de digues fluviales ou maritimes protégeant plus de 10 personnes (article R.214-115 du code de l'environnement). Ces études doivent être réalisées d'ici à fin 2014.

Une étude de dangers a pour objectifs :

- ▶ De préciser le rôle et le fonctionnement du système de digues
- ▶ D'analyser les phénomènes physiques susceptibles de provoquer ou de favoriser une rupture de ces digues
- ▶ De quantifier en termes de probabilité les risques de défaillance des digues correspondants
- ▶ D'analyser les conséquences d'une éventuelle rupture des digues en termes de risques pour les biens et les personnes
- ▶ De proposer des mesures de réduction des risques : mesures structurelles (travaux de renforcement) mais aussi mesures de gestion et mesures fonctionnelles

Le système d'endiguement du val de la Bouverie s'étend sur environ 3,6 km de la rive droite de la Loire, sur les communes de la Chapelle-Saint-Mesmin et Chaingy.

La zone protégée par le système d'endiguement du val de la Bouverie, appelée communément val de la Bouverie, abrite environ 530 personnes.

De par sa population protégée et de sa hauteur, le système d'endiguement du val de la Bouverie devrait être classé en digue de classe C<sup>1</sup>.

### 0.2 COMPOSITION DU SYSTÈME D'ENDIGUEMENT DU VAL DE LA BOUVERIE

Le système de protection du val de la Bouverie est un système de digues ouvert en aval assurant la protection du val éponyme.

Il est constitué de la levée de la Chapelle, d'un linéaire d'environ 3600 m et sa hauteur moyenne est de l'ordre de 3,4 m. Sur les 2700 premiers mètres, elle est propriété de l'Etat au titre du Domaine Public Fluvial et gérée, par délégation du Préfet du Loiret, par la Direction Départementale des Territoires du Loiret (DDT 45). Sur ses 900 derniers mètres, elle est assise sur différentes parcelles privées

---

<sup>1</sup> Une digue est considérée de classe C si sa hauteur par rapport au terrain naturel dépasse 1 m et si la population qu'elle protège est comprise entre 10 et 1000 habitants.

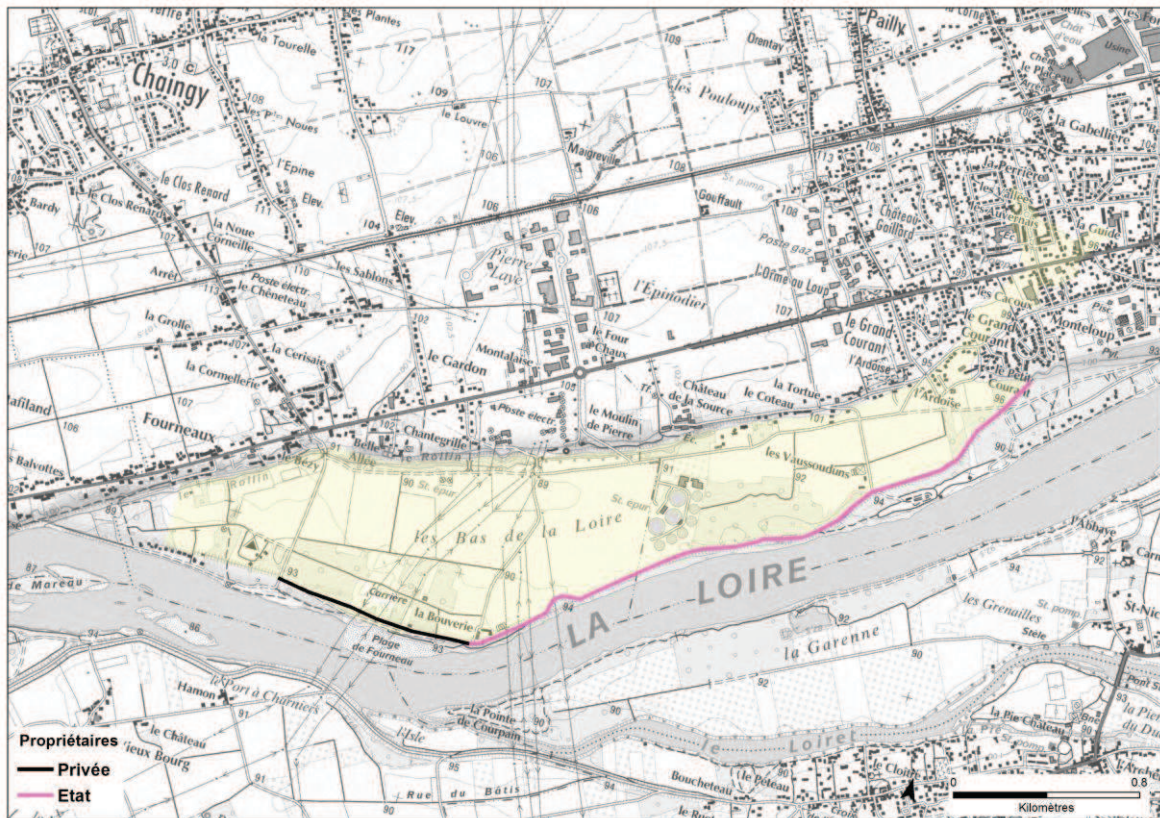


Figure 1 : Propriétaires de la levée de la Chapelle

Comme toutes les levées de la Loire, la levée de la Chapelle est un ouvrage ancien qui a été construit et reconstruit par élévations et élargissements successifs au fil des siècles et des crues. Il s'agit sur la totalité du linéaire d'un ouvrage en terre, non résistant à la surverse.

Les différentes visites techniques approfondies ainsi que les éléments du dossier d'ouvrage ont permis d'identifier un certain nombre d'anomalies susceptibles de fragiliser l'ouvrage en cas de crue :

- Canalisations incluses dans la levée,
- Bâtiments encastres dans la digue,
- Végétation sur et aux abords de la levée,
- Terriers d'animaux fouisseurs,
- Obstacles sur les talus de digue.

La levée de la Chapelle est notamment fragilisée par la présence d'une végétation ligneuse abondante sur une part importante de son linéaire, constituant en cela un facteur favorable au risque de rupture par érosion interne.

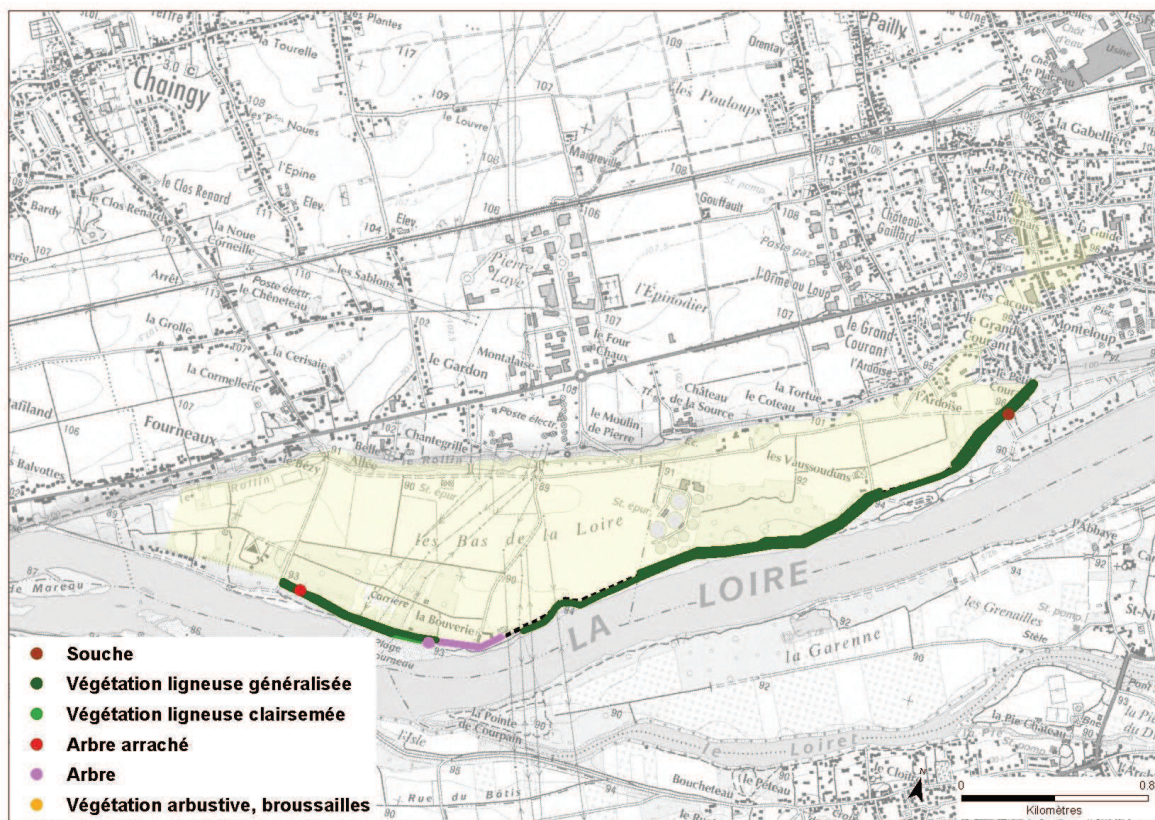


Figure 2 : Localisation et caractérisation de la végétation présente sur le système d'endiguement du val de la Bouverie

### 0.3 DANGERS LIÉS AU SYSTÈME D'ENDIGUEMENT DU VAL DE LA BOUVERIE

Les dangers liés au système d'endiguement du val de la Bouverie résultent principalement de l'irruption accidentelle d'eau à l'intérieur du val lors d'une crue de la Loire suite à l'ouverture partielle ou totale d'une brèche sur un tronçon de la levée.

### 0.4 NIVEAU DE PROTECTION ET NIVEAU DE SÛRETÉ DU SYSTÈME D'ENDIGUEMENT DU VAL DE LA BOUVERIE

Le niveau de protection correspond au niveau d'eau en Loire au-delà duquel la zone protégée commence à être inondée sans rupture préalable de la digue suite au débordement au-dessus de la crête de digue. Le niveau de protection correspond donc à l'occurrence de la crue de premières surverses.

Le niveau de sûreté se définit comme le niveau d'eau en Loire au-delà duquel la probabilité de rupture de la digue ne peut plus être considérée comme négligeable.

La notion de « niveau de sûreté » renvoie au risque de rupture alors que celle de « niveau de protection » est associée à la surverse. Un système d'endiguement est qualifié de parfaitement fiable si son niveau de sûreté est supérieur à son niveau de protection, c'est-à-dire que la rupture avant surverse est improbable.

Les digues de la Loire ne pouvant en général être considérées comme parfaitement fiables du fait de leur conception et des désordres les affectant, on parlera de « niveau de protection apparent » plutôt que de « niveau de protection » afin de ne pas entretenir l'illusion d'une protection réelle jusqu'à l'occurrence de crue en question.

#### 0.4.1 Objectif de protection historique

Comme indiqué précédemment, les levées de la Loire ont été érigées de manière progressive et réhaussées suite à chaque crue majeure ayant provoqué leur surverse, dans l'objectif illusoire de les rendre insubmersibles.

Les dernières réhausses faisant suite aux crues de 1846, 1856 et 1866, on peut estimer que le niveau de protection recherchée alors correspondait aux crues en question, soit une occurrence de l'ordre de 200 ans.

#### 0.4.2 Niveau de protection apparent

Les niveaux d'eau dans le lit endigué de la Loire ont été calculés par l'intermédiaire d'un modèle hydraulique pour 14 occurrences de crues allant de 2 ans à 10 000 ans, soit pour un débit de la Loire au bec d'Allier s'échelonnant de 1900 m<sup>3</sup>/s à 14 200 m<sup>3</sup>/s. Il a été supposé dans les calculs qu'aucune brèche ne se produisait en amont et en aval du val de la Bouverie.

Les niveaux d'eau calculés ont été comparés à l'altimétrie de la crête de l'ouvrage afin de déterminer l'occurrence et la localisation des premières surverses.

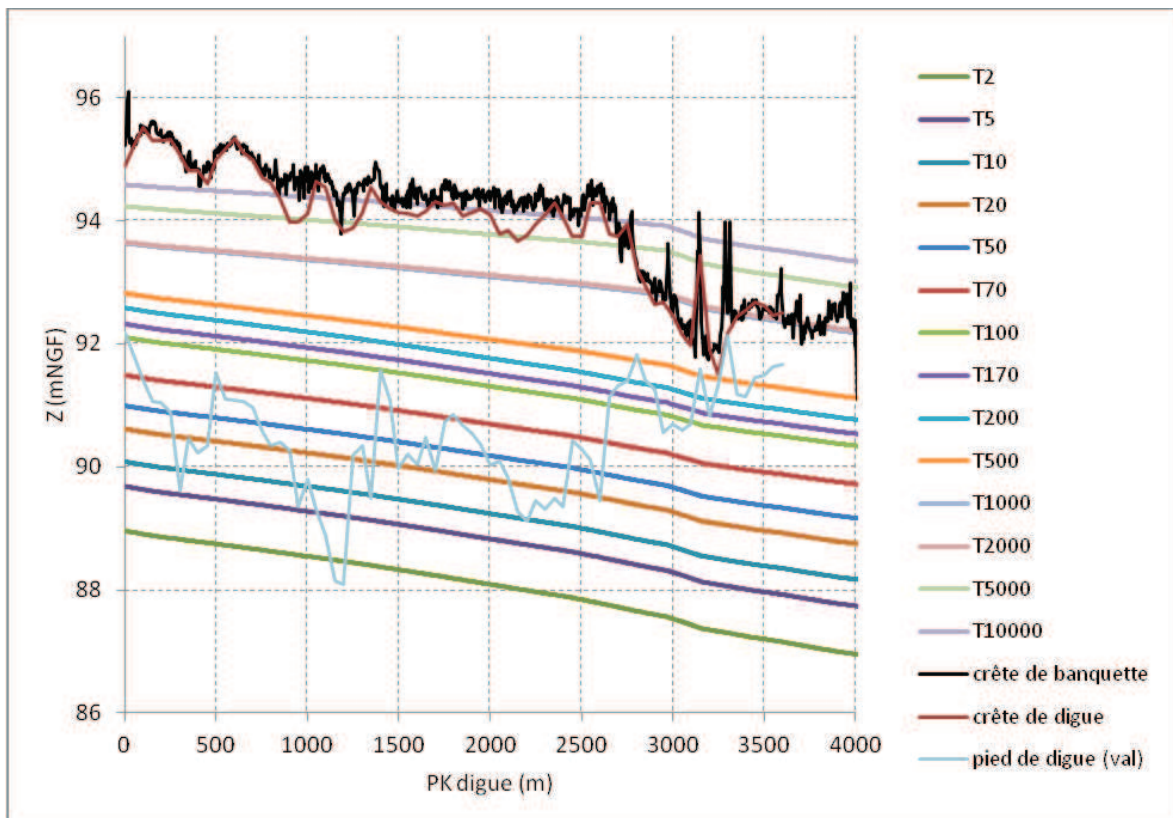


Figure 3 : Lignes d'eau, profils en long de la crête de banquette, crête de digue et pied de digue (côté val)

La comparaison des lignes d'eau et du profil en long de la crête de digue mettent en évidence :

- que les premières surverses sur la partie de la levée située en aval du PK 2700 (tronçon privé) se produiraient pour une crue de période de retour 500 ans, correspondant à un débit au bec d'Allier de 8500 m<sup>3</sup>/s
- que les premières surverses sur la partie de la levée située en amont du PK 2700 (tronçon domanial) se produiraient pour une crue de période de retour 5000 ans, correspondant à un débit au bec d'Allier de 12 800 m<sup>3</sup>/s

Compte tenu de ces différences, deux niveaux de protection apparents distincts sont retenus :

- le niveau atteint par la crue cinquentennale (Q500) définit donc le niveau de protection apparent de la partie du système d'endiguement située en aval du PK 2700 (tronçon privé) du val de la Bouverie et des enjeux qui s'y rattachent. A une telle crue correspond une hauteur de 6,1 m à l'échelle de crue d'Orléans, située une dizaine de kilomètres en amont
- le niveau atteint par la crue quinquamillénale (Q5000) définit donc le niveau de protection apparent de la partie du système d'endiguement située en amont du PK 2700 (tronçon domanial) du val de la Bouverie et des enjeux qui s'y rattachent. A une telle crue correspond une hauteur de 6,5 m à l'échelle de crue d'Orléans

Toutefois, à partir de la crue de période de retour 70 ans, soit un débit de 5000 m<sup>3</sup>/s au bec d'Allier et une hauteur à l'échelle de crue d'Orléans de 4,7 m, la zone commencerait à être inondée par remous à partir du linéaire aval non endigué.

Entre la crue de période de retour 70 ans et la crue quinquamillénale (Q5000), le point d'établissement du remous remontrait d'environ 1,5 km, la digue étant progressivement submergée de l'aval vers l'amont.

Pour la crue de période de retour 5000 ans, correspondant au niveau de protection apparent du val de la Bouverie, et en l'absence même de toute défaillance du système d'endiguement, la quasi-totalité de cette zone protégée serait quoiqu'il en soit inondée par remous de la Loire. Toutefois, pour une telle occurrence de crue, seule une quarantaine des 526 habitants situés dans la zone protégée seraient susceptibles d'être soumis à un tel phénomène.

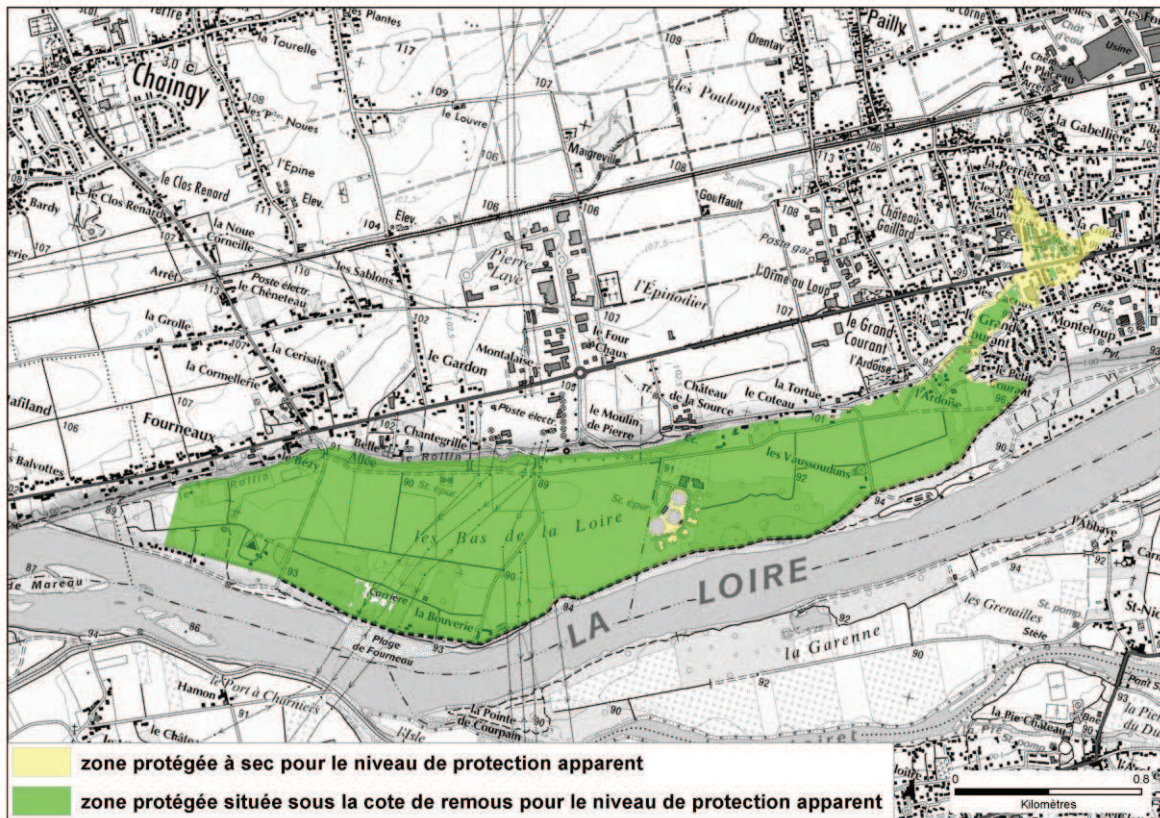


Figure 4 : Zone protégée soumise au remous et zone protégée à sec pour le niveau de protection apparent

### 0.4.3 Défaillance du système d'endiguement

L'analyse de la défaillance des digues en remblai constitutives du système d'endiguement considère 5 modes de rupture potentielle de l'ouvrage :

- Rupture liée à la surverse
- Rupture suite à érosion interne
- Rupture suite à glissement de talus
- Rupture suite à érosion externe
- Rupture suite à soulèvement hydraulique en pied de digue

L'estimation des probabilités de rupture s'appuie sur une discrétisation de la digue en tronçons élémentaires de 50 m de long caractérisés par leur géométrie (crête de digue, pente des talus, largeur en pied, etc.), les sollicitations hydrauliques (niveaux d'eau en Loire) qui s'y appliquent, les différentes anomalies (végétation, terriers, bâtiments encastrés, canalisations traversantes, etc.) qui s'y rattachent, les caractéristiques géotechniques des matériaux qui le composent et les modalités de gestion en période de crue qui y sont pratiquées.

Les calculs sont effectués pour chacun des 5 modes de rupture précités, pour chaque occurrence de crue et chaque tronçon élémentaire de digue par l'intermédiaire d'un modèle de calcul d'aléa de rupture.

Deux principales zones de défaillance potentielle sont mises en évidence au travers de cette analyse :

- Autour du PK 400, secteur où sont présents une végétation dense ainsi qu'une dépression liée à une fosse d'érosion d'une brèche historique
- Autour du PK 1250, secteur où sont présents une végétation dense ainsi qu'une dépression liée à une fosse d'érosion d'une brèche historique et où il n'existe pas d'assise peu perméable

**Le niveau de sûreté du système d'endiguement compris entre celui atteint pour la crue de période de retour 70 ans et la crue centennale, correspondant à un débit de l'ordre de 5500 m<sup>3</sup>/s au niveau du bec d'Allier et à une hauteur de 5 m à l'échelle de crue d'Orléans.**

Au-delà de ce niveau, la probabilité de rupture au droit du tronçon élémentaire de digue le plus fragile (en l'occurrence vers le PK 1250) ne peut plus être considéré comme négligeable. La probabilité de rupture est estimée à 1% pour la crue centennale, 11% pour la crue bicentennale (Q200) et est quasi certaine à partir de la crue cinqcentennale (Q500).

#### **0.4.4 Description du fonctionnement probable du système d'endiguement dans son état actuel**

Comme indiqué précédemment, le risque de défaillance de l'ouvrage ne peut plus être considéré comme négligeable au-delà de la crue de période de retour 70 ans et devient même très probable à partir de la crue cinqcentennale, soit bien en deçà du niveau de protection apparent correspondant à celui atteint pour la crue quinquamillénale que le profil en long de la digue faisait ressortir. Le système d'endiguement du val de la Bouverie ne peut donc être considéré comme fiable.

A partir de la crue quinquamillénale, la digue entrerait quoiqu'il en soit en surverse ce qui entrainerait de manière quasi-certaine sa rupture et la (sur-)inondation du val et de ses habitants.

En conclusion, en l'état actuel, le système d'endiguement présenterait probablement un fonctionnement anormal et préoccupant pour des crues supérieures ou égales à la crue centennale.

### **0.5 CARACTÉRISATION DE LA GRAVITÉ DU RISQUE ASSOCIÉ À LA DÉFAILLANCE DU SYSTÈME D'ENDIGUEMENT**

#### **0.5.1 A l'échelle du val**

L'étude de dangers évalue les conséquences du risque d'inondation dans le val au travers de différents scénarios d'inondation dont les conséquences sont déterminées à partir de simulations réalisées en utilisant des modèles hydrauliques.

Pour chaque scénario de brèches, la gravité de l'inondation du val qui en résulterait est appréciée par l'intermédiaire du nombre de personnes inondées. La criticité du scénario est quant à elle évaluée en croisant sa probabilité de survenance avec la gravité de ses conséquences.

La sélection des scénarios de défaillance répond à des objectifs de représentativité et de diversité des situations pouvant être rencontrées et s'appuie notamment sur :



- Les résultats issus de l'identification des secteurs de défaillance les plus probables
- La localisation des enjeux
- Le fonctionnement hydraulique interne de la zone protégée

Sur cette base, deux scénarios de brèches ont été simulés et analysés.

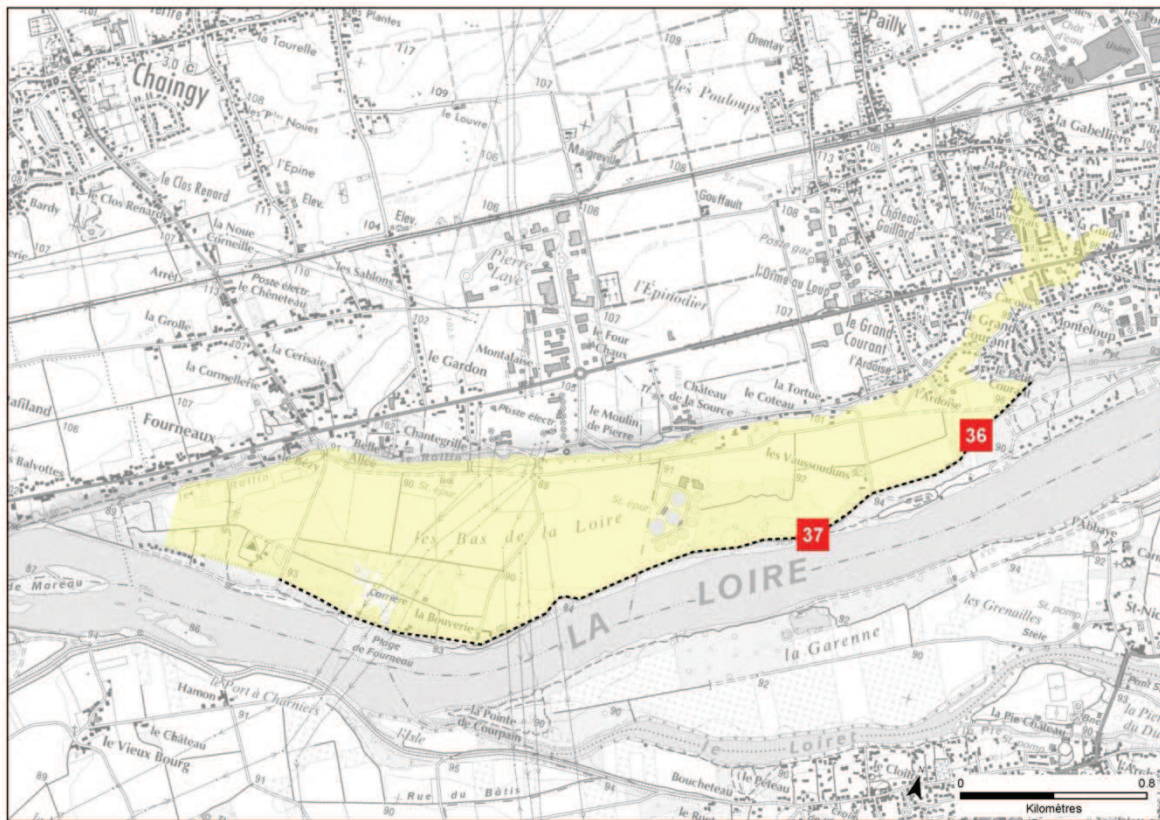


Figure 5 : Carte de localisation des scénarios de brèches retenus

Le scénario le plus pénalisant en termes de gravité (enjeux impactés) est le scénario 37 « brèche en amont de la STEP ». C'est aussi le scénario le plus probable.

Dans ce scénario, une quarantaine de personnes (soit moins de 10% de la population protégée) résidant dans le val de la Bouverie seraient inondées.

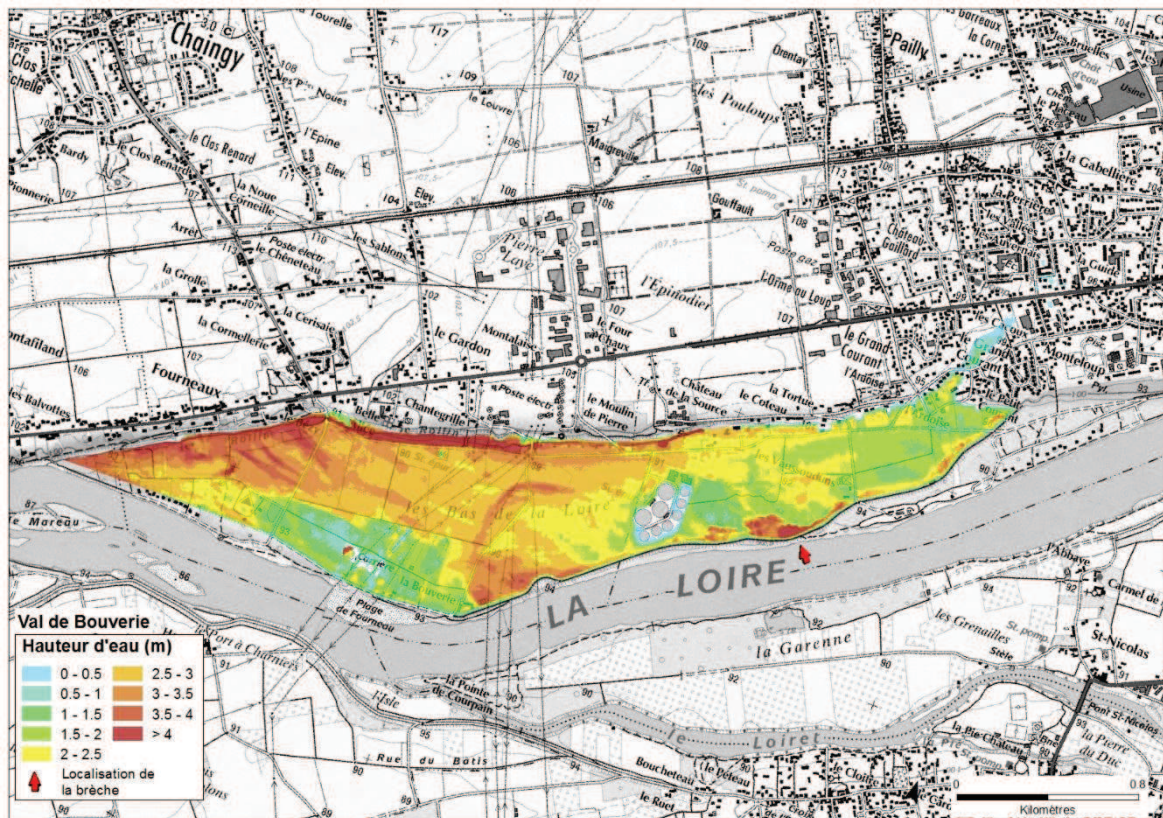


Figure 6 : Carte des hauteurs d'eau maximales - Scénario 37

Compte tenu de la fréquence probable de défaillance du système d'endiguement et des conséquences humaines que cela engendrerait, le risque de rupture peut être qualifié d'« acceptable ».

### 0.5.2 A l'arrière immédiat des digues

Au-delà des différents scénarios envisagés et simulés, l'analyse des brèches historiques et des fosses d'érosion associées amènent à prendre en compte une zone de dissipation d'énergie en arrière des digues suite à la rupture potentielle de l'ouvrage.

Au regard des observations faites sur les événements historiques, la longueur de cette zone de dissipation peut être estimée à cent fois la différence entre le niveau en Loire pour le niveau de protection apparent et le niveau du terrain naturel dans le val ou le niveau du remous le cas échéant.

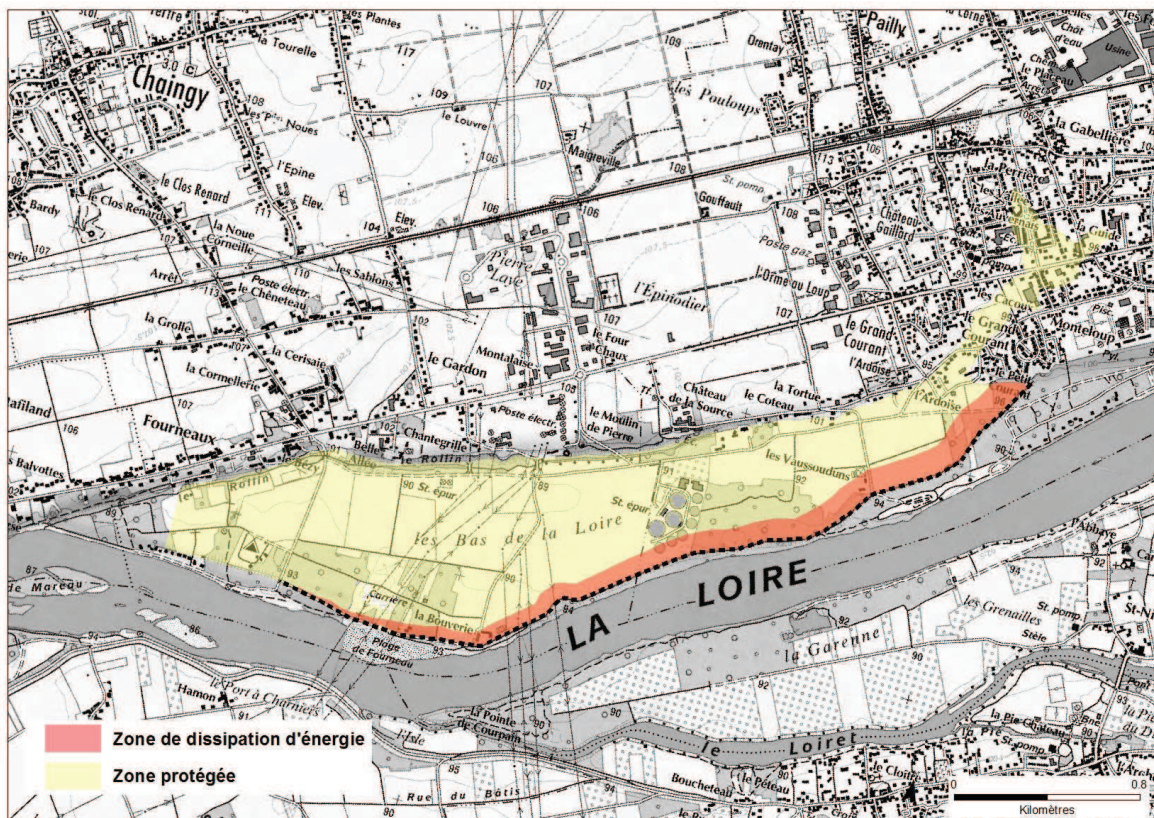


Figure 7 : Zone de dissipation d'énergie en arrière des levées

## 0.6 MESURES DE RÉDUCTION DES RISQUES

L'étude de dangers du système d'endiguement du val de la Bouverie a mis en évidence la forte probabilité d'une défaillance des ouvrages dont les conséquences seraient sérieuses, justifiant de fait la mise en place de mesures de réduction des risques.

La définition d'un programme de mesures de réduction des risques s'appuie sur les résultats de l'analyse fonctionnelle du système, du diagnostic d'aléa de rupture et de l'analyse des conditions de propagation de l'onde de rupture. Un tel programme combine :

- Mesures de gestion du risque, c'est-à-dire des mesures préventives et/ou opérationnelles relatives à la limitation des conséquences potentielles d'une défaillance du système d'endiguement
- Les mesures structurelles et fonctionnelles, basées sur la résorption des anomalies recensées afin d'augmenter le niveau de sûreté et de fiabiliser le système d'endiguement
- Les mesures relatives à l'amélioration des connaissances, permettant d'affiner le diagnostic réalisé dans le cadre de la présente étude de dangers

### 0.6.1 Mesures de gestion du risque

Les résultats de l'étude de dangers doivent être intégrés dans les différents dispositifs existants de gestion du risque pour lesquels ils fournissent des éléments de connaissance complémentaires :

- Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI) : l'étude de dangers a mis en évidence le danger que continue de constituer une crue moyenne de la Loire pour les enjeux situés dans le val malgré la présence de la digue ; à l'inverse, elle a permis de mettre en évidence l'aléa supplémentaire que génèrerait une défaillance de l'ouvrage de protection
- Plans Communaux de Sauvegarde : les résultats de l'étude de dangers devront être pris en compte dans les PCS existants ou en cours d'élaboration
- Plan de Surveillance des Levées et consignes écrites : en identifiant les secteurs les plus fragiles, l'étude de dangers constitue une base de travail pour permettre au gestionnaire de prioriser ses actions de surveillance et d'entretien et de mettre en place la logistique (moyens matériels et humains requis, prépositionnement, etc.) afférente à la mise en œuvre d'interventions pour les réparations d'urgence
- Plan d'évacuation des populations : dans l'attente d'une fiabilisation du système d'endiguement et compte tenu des modalités d'inondation du val en cas de défaillance du système d'endiguement, une évacuation préventive du val doit être envisagée en cas de crue susceptible de conduire à l'ouverture d'une brèche au sein de l'ouvrage de protection

### 0.6.2 Améliorations structurelles et fonctionnelles de la digue

Le diagnostic de rupture conduit à proposer un programme de travaux de fiabilisation du système d'endiguement en deux étapes :

- Un ensemble d'interventions prioritaires afin de limiter le risque de rupture avant surverse et permettant ainsi de rehausser le niveau de sûreté de manière sensible ; les principales mesures entrant dans ce cadre sont :
  - o Prévenir les attaques et restaurer les levées affectées par des terriers, notamment entre les PK 550 et 700 et au droit du PK 2400
  - o Suppression de la végétation entre les PK 250 et 500 ainsi qu'entre les PK 1250 et 1300
- Un ensemble d'interventions complémentaires permettant d'éviter la défaillance du système d'endiguement après surverse et permettant d'atteindre un niveau de sûreté supérieur au niveau de protection apparent

Le coût estimé de la fiabilisation du système d'endiguement du val de la Bouverie est de l'ordre de 750 000 euros.

### 0.6.3 Amélioration des connaissances

La présente étude de dangers a mis en évidence les limites des connaissances de certains phénomènes au rang desquels peuvent être rangés les mécanismes d'effondrements karstiques, les mécanismes d'érosion interne, la formation et le développement des brèches ainsi que les calculs de probabilité de rupture global d'un système d'endiguement.

L'étude de dangers a également mis en évidence les limites relatives à la connaissance des ouvrages eux-mêmes : détection d'anomalies, recherche d'archives sur les modes de réalisation et de mise en œuvre, identification des canalisations traversantes non recensées, etc.

Des études et investigations complémentaires sont en cours ou doivent être lancées afin d'apporter des éléments de réponse à ces questions.