Concertation & Action Inondation

Etude des vals de Loire dans les départements du Cher et de la Nièvre

Inondations : sommes-nous prêts ?

Etude des vals de Loire dans les départements du Cher et la Nièvre

Etat des lieux des connaissances
Partie 4 : volets hydrologique et hydraulique

Novembre 2011

l'Europe s'engage dans le bassin de la Loire
PLAN LOIRE GRANDEUR NATURE
Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Région Centre
Conseil Général Cher
ETABLISSEMENT PUBLIC LOIRE

Etude des vals de Loire dans les départements du Cher et de la Nièvre

Rapport de phase 1

Etat des lieux

Partie 4 : volets hydrologique et hydraulique

hydratec groupe setec

Tour Gamma D
58, quai de la Rapée
75583 Paris cedex 12
☎ : 01 40 04 64 02
🖷 01 43 42 24 39

ASCONIT CONSULTANTS

Parc Scientifique Tony Garnier
6-8, espace Henry Vallée
69366 LYON CEDEX 07
☎ 04 78 93 68 90
🖷 04 78 94 11 98

Réf : 016F270
Date : 10 nov. 2011

Sommaire

I. L'HYDROLOGIE DE LA LOIRE 4

I.1 Présentation générale 4

I.2 Le régime hydrologique de la Loire dans le périmètre d'étude 5

I.3 Le régime hydrologique de la Loire en crue dans le périmètre d'étude 8

I.4 Les affluents de la Loire 10

I.5 Morphologie et dynamique du lit de la Loire 11

I.6 L'étude Loire moyenne et le modèle LM98 sous Hydra 12

I.7 Le modèle LM09 pour la prévision des crues entre Givry et Langeais sous Hydrariv 17

I.8 Le modèle LM10 pour les études de danger des digues de classe A 29

I.9 De LM98 à LM10-VA 31

II. L'HYDROLOGIE DES MODELES DE LA LOIRE MOYENNE 32

II.1 Les points d'injection de débit de LM98 32

II.2 Les points d'injection de débit dans LM09 et LM10 35

II.3 Les apports constants des biefs filaires des vals 38

II.4 les hydrogrammes types de l'étude Loire moyenne 40

II.5 L'hydrologie des crues de calage de décembre 2003 et novembre 2008 43

III. L'INTERET DU MODELE LOIRE MOYENNE 45

III.1 Mise en évidence des mécanismes d'inondation 45

III.2 Retour d'expérience sur des crues réelles et mise en évidence du rôle de Villerest 47

IV. ANNEXE 1 : L'HYDROLOGIE DES ETUDES HYDRAULIQUES EN LOIRE MOYENNE 53

IV.1 L'étude hydrologique conduite par la DIREN Centre et par l'Equipe Pluridisciplinaire 53

IV.2 La méthode, les études et les hypothèses utilisées pour définir l'hydrologie de l'étude Loire moy. 54

IV.3 La méthode du Gradex 55

IV.4 Les hypothèses sur la forme de l'hydrogramme de la crue 56

IV.5 Des hydrogrammes de crue naturelle aux hydrogrammes influencés par le barrage de Villerest 56

IV.6 Le barrage de Villerest et ses modalités de gestion 57

V. ANNEXE 2 : CONNAISSANCE DES MECANISMES D'INONDATION 60

V.1 Vals du Bec d'Allier et de Cours-les-Barres 60

V.2 Val de La Charité 62

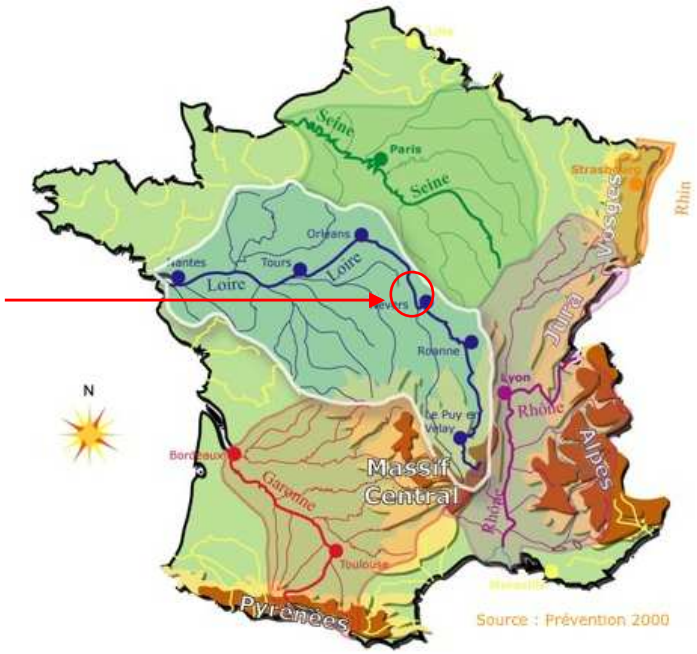
V.3 Val de Léré 64

I. l'hydrologie de la Loire

I.1 Présentation générale

La Loire draine 1/5ème du territoire français. Le régime du fleuve est très irrégulier : son débit a fluctué entre 11 m^3/s à Gien pendant l'été de 1949 et 7000 m^3/s estimés en 1856 et 1866 dans cette même ville.

Le périmètre d'étude



Du point de vue hydrologique, le périmètre d'étude appartient à la zone de Loire comprise entre le Bec d'Allier jusqu'à l'aval de Tours, longue de 300 km, où la superficie du bassin versant de la Loire passe de 32 600 km^2 à 42 130 km^2 de manière à peu près linéaire.

La surface drainée à Givry est de 32 610 km^2, elle est de 34 126 km^2 à St-Satur, de 35 270 km^2 à Chatillon-sur-Loire et de 35 500 km^2 à Gien. À Nevers, juste après la confluence de la Nièvre, le bassin versant est de 17 570 km^2. En aval immédiat, la Loire reçoit en rive gauche des petits affluents drainant le lit majeur et les vals rive gauche de l'ADN - ruisseau de la vieille Loire, de la Bouelle et du Petit Gour – avant d'être rejointe par l'Allier. Au Bec d'Allier, son bassin versant est augmenté de 14 310 km^2.

Le tableau ci-après met en perspective ces différentes valeurs :

Station	SBV (km2)	%/SBV Givry	%/SBV Chatillon
Nevers	17 570	53.9	49.8
Allier	14 310	43.9	40.6
Givry	32 610	100.0	92.5
St-Satur	34 126	104.6	96.8
Chatillon-sur-Loire	35 270	108.2	100.0
Gien	35 501	108.9	100.7

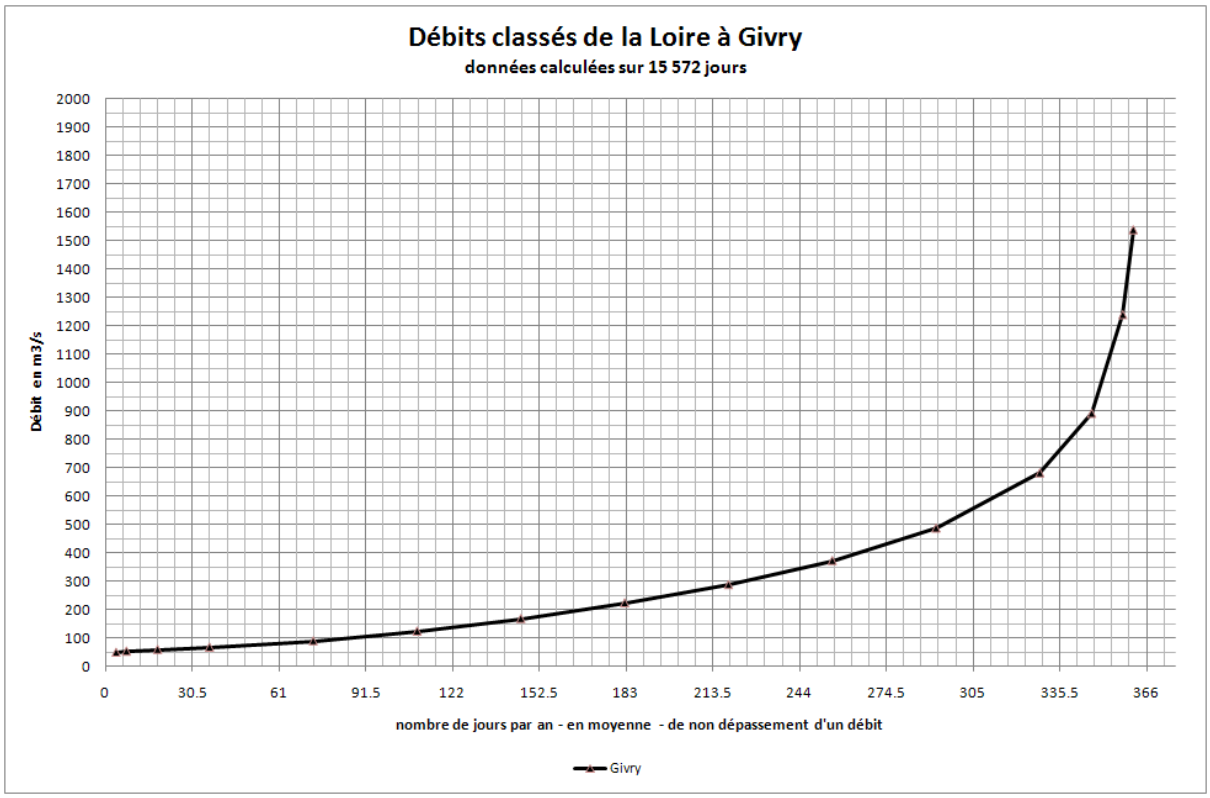
Pour le territoire d'étude, il est surtout important d'identifier avec soin l'apport de la Loire à Nevers et celui de l'Allier au pont SNCF du Guétin. Sur ce long tronçon, on ne rencontre en effet aucun autre apport notable d'affluent, la définition du débit de la Loire au Bec d'Allier conditionne donc fortement les résultats.

I.2 Le régime hydrologique de la Loire dans le périmètre d'étude

Dans le périmètre d'étude, les débits caractéristiques de la Loire en basses eaux, en moyennes eaux et en crues fortes sont connus à la station hydrologique de Givry. La fiche de synthèse établie par la DREAL Centre et disponible sur le site de la Banque Hydro est présentée ci-après.
Le bassin versant de la Loire à Givry s'étend sur une superficie de 32 610km². Les valeurs des débits caractéristiques du fleuve, QMNA5 (débit d'étiage quinquennal sec), module (débit moyen annuel) et débits journaliers des crues de période de retour 2, 5, 10, 20 et 50ans, sont présentées dans le tableau suivant :

	Débit à Givry (m^3/s)
Qmna5	54
Module	317
2ans	1 800
5ans	2 400
10ans	2 800
20ans	3 300
50ans	3 800
Nov 2008	2 450
Déc 2003	3 370

La Banque Hydro fournit la courbe des débits classés de la Loire. Cette courbe indique le nombre de jours par an pour lesquels un débit donné est ou n'est pas dépassé. Elle caractérise le régime hydrologique moyen du fleuve.



La Loire présente ainsi :

- un débit de basses eaux de 100 m^3/s environ (débit non dépassé 3 mois par an) ;
- un débit de moyennes eaux de 220 m^3/s environ (débit non dépassé 6 mois par an) ;
- un débit de hautes eaux de 750 m^3/s (débit dépassé 1 mois par an).

LA LOIRE à COURS-LES-BARRES [GIVRY]

Code station : K4000010 Bassin versant : 32610 km²

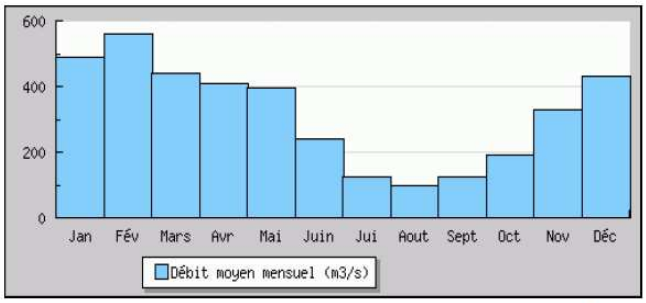
Producteur : DREAL Centre E-mail : hydromel-centre@developpement-durable.gouv.fr

SYNTHESE : données hydrologiques de synthèse (1967 - 2011)
Calculées le 28/02/2011 - Intervalle de confiance : 95 %

écoulements mensuels (naturels) — données calculées sur 45 ans

	janv.	fév.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	Année
Débits (m3/s)	490.0 #	558.0 #	440.0 #	411.0 #	396.0 #	241.0 #	123.0 #	99.20 #	125.0 #	190.0 #	331.0 #	429.0 #	318.0
Qsp (l/s/km2)	15.0 #	17.1 #	13.5 #	12.6 #	12.1 #	7.4 #	3.8 #	3.0 #	3.8 #	5.8 #	10.2 #	13.2 #	9.8
Lame d'eau (mm)	40 #	42 #	36 #	32 #	32 #	19 #	10 #	8 #	9 #	15 #	26 #	35 #	308

Qsp : débits spécifiques
Codes de validité :
- (espace) : valeur bonne
- ! : valeur reconstituée par le gestionnaire et jugée bonne
- # : valeur estimée (mesurée ou reconstituée) que le gestionnaire juge incertaine



modules interannuels (loi de Gauss - septembre à août) — données calculées sur 45 ans

module (moyenne)
318.0 [294.0;342.0]

fréquence	quinquennale sèche	médiane	quinquennale humide
débits (m3/s)	240.0 [210.0;270.0]	320.0 [280.0;380.0]	390.0 [360.0;420.0]

basses eaux (loi de Galton - janvier à décembre) — données calculées sur 45 ans

fréquence	VCN3 (m3/s)	VCN10 (m3/s)	QMNA (m3/s)
biennale	57.00 [53.00;61.00]	60.00 [55.00;65.00]	73.00 [66.00;80.00]
quinquennale sèche	46.00 [41.00;49.00]	48.00 [43.00;52.00]	54.00 [48.00;60.00]

crues (loi de Gumbel - septembre à août) — données calculées sur 39 ans

fréquence	QJ (m3/s)	QIX (m3/s)
biennale	1700. [1600.;1900.]	1800. [1600.;2000.]
quinquennale	2300. [2100.;2600.]	2400. [2200.;2700.]
décennale	2700. [2500.;3200.]	2800. [2600.;3300.]
vicennale	3100. [2800.;3700.]	3300. [2900.;3800.]
cinquantennale	3600. [3200.;4300.]	3800. [3400.;4500.]
centennale	non calculé	non calculé

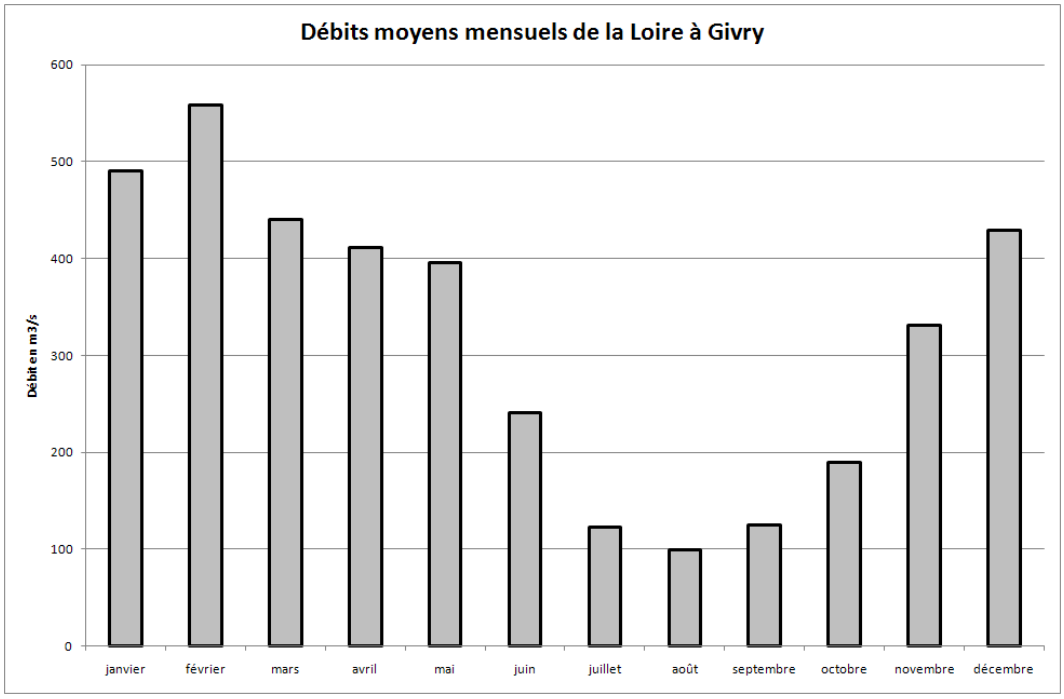
maximums connus (par la banque HYDRO)

hauteur maximale instantanée (cm)	490	6 décembre 2003 22:00
débit instantané maximal (m3/s)	3400.	6 décembre 2003 22:00
débit journalier maximal (m3/s)	3290.	6 décembre 2003

débits classés — données calculées sur 15572 jours

fréquence	0.99	0.98	0.95	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01
débit (m3/s)	1540.	1240.	892.0	682.0	487.0	372.0	287.0	223.0	167.0	123.0	88.50	66.50	58.00	52.50	48.20

La Banque Hydro indique également les débits moyens mensuels. Ils sont représentés sur le graphique ci-après.



On distingue la période d'étiage de Juillet à Octobre, de la période de hautes eaux de Décembre à Avril.

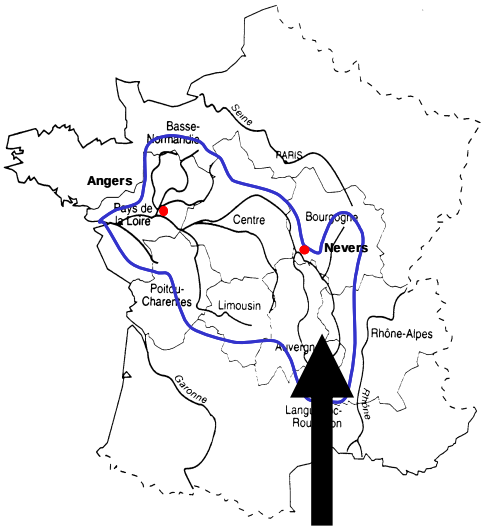
I.3 Le régime hydrologique de la Loire en crue dans le périmètre d'étude

Des volcans du Massif Central au marais de la Grande Brière, les climats sont très contrastés. Ils engendrent trois types de crues : les crues «cévenoles» : les crues «océaniques» et les crues « mixtes » : ce sont les plus fortes crues qui proviennent de la conjonction des deux types d'événements précédents.

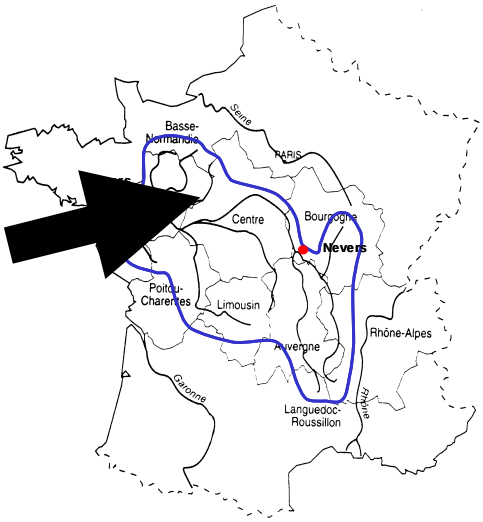
Ces différentes crues génèrent des événements de puissance variable. L'analyse des crues connues et historiques a permis de déterminer des volumes types de crue, des débits de pointe, des formes générales d'hydrogrammes et des durées à l'aide de méthodes statistiques.

Les schémas ci-après présentent les trois différents types de crues que l'on peut observer sur la Loire.

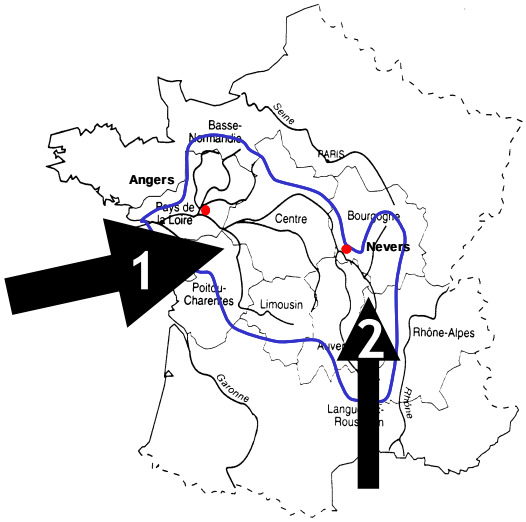
Les crues cévenoles, type 1980, 1996, 2003 et 2008 : provoquées par des orages violents et brusques, elles se localisent dans le haut bassin de la Loire et de l'Allier.
Des masses d'air chaud franchissent la Méditerranée et se gorgent d'eau. Elles viennent butter sur les Cévennes. Elles dépassent les Cévennes et restent bloquées par les Alpes. Il tombe 200 à 600 mm de pluie en 48 heures. Toutefois, c'est une crue faible à moyenne qui arrive en Loire moyenne.



Les crues océaniques, type 1982, 1995, 1998 : dues à de longues périodes de pluies océaniques, elles s'installent surtout à l'Ouest et au Nord du bassin versant.
A l'origine, une suite de dépressions vient de l'Atlantique. En passant au Sud elle provoque une crue sur la Vienne, puis le Cher comme en décembre 1982. Elle peut aller jusqu'à l'Allier puis la Loire. Pour ce type d'événements, la pointe de crue de la Loire passe après celle de la Vienne.



Les crues mixtes, type 1846, 1856, 1866, 1907 : ce sont les crues les plus fortes en Loire moyenne. Elles proviennent de la conjonction des deux types d'événements. Elles ont lieu en mai-juin ou en octobre - novembre, voire exceptionnellement fin septembre.
Des pluies océaniques touchent tout le bassin, y compris le Nord du haut-bassin. Une petite crue océanique généralisée apparaît. Un orage cévenol survient sur le haut-bassin et provoque une crue qui « surfe » sur la crue océanique.
Pour ces événements forts, les crues de l'Allier et de la Loire au Bec d'Allier sont généralement concomitantes à quelques 10 heures près.



1.4 Les affluents de la Loire

Les affluents de la Loire dans le secteur d'étude sont présentés ci-après.

1.4.1 Dans la secteur du val de Cours les Barres

En rive droite, **le ruisseau du Riot** qui traverse Fourchambault (SBV 42km^2).
Les quais de Fourchambault sont inondés par débordement latéral dès les premières crues simulées. L'inondation s'étend par remous de la Loire dans le ruisseau du Riot, inondant des quartiers de la ville, des deux côtés de la voie ferrée. La situation pourrait être aggravée en cas de crue concomitante du Riot.

En rive gauche, **la Canche**, drain du val de Cours les Barres et du petit bassin versant associé.
A l'aval, le débouché de la Canche vers la Loire à travers la levée est équipé d'un ouvrage anti-retour partiel. Cet ouvrage permet de limiter la remontée de la Loire dans le val pour des crues faibles par la fermeture d'une double porte. En cas de crues plus importantes, l'eau peut toutefois se déverser de la Loire dans le val au-dessus d'un seuil en blocs cimentés.

En rive gauche, **l'Aubois**, qui conflue à Marseille les Aubigny (SBV 328 km^2).
La ligne de maisons située entre la Loire et le canal latéral à Marseille-les-Aubigny est inondée dès les premières crues simulées. Elle est soumise à de fortes vitesses d'écoulement. L'inondation s'étend par remous de la Loire dans l'Aubois, qui pourrait aggraver localement l'inondation s'il était également en crue et n'arrivait pas à déboucher correctement en Loire.

En rive droite, **le ruisseau du Moulin** (SBV 28 km^2) qui conflue en aval de Germigny-sur-Loire.

1.4.2 Dans le secteur de la Charité amont

Dans ce secteur qui s'étend en rive gauche de la Loire sur environ 16 km de Marseille-lès-Aubigny à l'amont du déversoir de Passy, le réseau hydrographique comprend :
En rive gauche **le ruisseau du Châteauvert**, qui draine une partie du val de la Charité et qui rejoint la Loire en aval du pont de la Charité. Ce ruisseau est équipé d'un ouvrage anti-retour.
En rive droite **le Mardelon** qui conflue en aval de la Marche (SBV 26 km^2) et la Douceline à La Marche.

1.4.3 Dans le secteur de la Charité aval

Dans ce secteur qui s'étend sur une vingtaine de kilomètres depuis le déversoir de Passy jusqu'à Saint-Satur, le réseau hydrographique est constitué en rive gauche par :

- **Le ruisseau du Lac**, qui se jette dans la Loire en aval du pont de Pouilly ;
- **Le Moule** qui rejoint la Loire au droit de Thauvenay ;
- **La Vauvise** (SBV 467 km^2) qui franchit le canal à Saint-Bouize et rejoint la Loire à Saint-Thibault ;
- **La Colette** qui traverse Saint-Satur.

Le Moule, la Vauvise et la Colette ainsi que leurs affluents franchissent le canal latéral au moyen de siphons hydrauliques.
En rive droite, le réseau hydrographique est constitué par **le Mazou** qui traverse Mesves sur Loire (SBV 208 km^2).

1.4.4 Dans le secteur du val de Léré

Dans ce secteur qui s'étend sur une longueur totale de 30 km entre Saint-Satur et Ousson-sur-Loire, le réseau hydrographique comprend en rive droite :

- **le Nohain** qui traverse d'est en ouest Cosne-Cours-sur-Loire ;
- **le Saint-Loup** qui traverse Myennes ;
- **l'Oeuf** qui passe à la Celle-sur-Loire, **le ruisseau des Frossards** aux Pelus ;
- **la Vrille** qui traverse Neuvy-sur-Loire (SBV 200 km2) ;
- **la Cheuille** qui passe devant Bonny-sur-Loire dans son cours parallèle au fleuve et marque la limite entre les départements de la Nièvre et du Loiret dans son cours d'est en ouest à Bonny-sur-Loire.

Et en rive gauche :

- **la Belaine** à Bannay ;
- **la Judelle** à Léré (SBV 77.8 km2) ;
- **la Balance** à Sury-près-Léré qui longe la CNPE de Belleville à l'ouest.

1.5 Morphologie et dynamique du lit de la Loire

En Loire moyenne, la pente de la ligne d'eau de crue est forte, de l'ordre de 40 cm par km. Les cotes sont de 172 mNGF au bec d'Allier, 93 mNGF à Orléans, 47 mNGF à Tours et 18 mNGF à Tours.

Le régime hydraulique du bassin de la Loire a été fortement influencé par l'action humaine. En particulier, en Loire moyenne, la superficie des plaines inondables a été réduite en raison de la construction de digues, réduisant d'autant la capacité d'écoulement pendant les crues. Sur certains secteurs où le lit majeur naturel présentait historiquement une largeur de 6 à 8 km, les écoulements sont aujourd'hui contraints entre deux digues dans un couloir de 300 m.

Le lit de la Loire est principalement constitué de sable et est très mobile. Sur son parcours en Loire moyenne, la Loire est endiguée, ce qui empêche la divagation naturelle de son lit et confère une grande vitesse aux eaux de crue ainsi qu'un grand pouvoir d'érosion.

Depuis le siècle dernier, le lit de la Loire a fortement évolué. La chenalisation du lit engagée au siècle dernier pour améliorer la navigation, mais surtout l'extraction massive des granulats dans le lit mineur de la Loire aux abords des grandes agglomérations, ont provoqué l'enfoncement du lit mineur du fleuve de 1 à 2,50 m de profondeur. Ce phénomène a retardé et retarde les débordements de la Loire, avec un triple effet néfaste :

- la Loire a emprunté plus rarement de nombreux bras secondaires ; la végétation s'y est modifiée, y a perdu son caractère écologique intéressant de milieu humide et régulièrement renouvelé. Elle demande, pour ne pas augmenter les débordements lors des crues plus rares, un entretien régulier, que n'assure plus le fleuve ;

- un lit plus profond, aux berges plus instables, augmente le risque de déstabilisation en crue des pieds de levée qui, sur 130 km, sont en contact direct avec le lit mineur ;

- l'enfoncement n'étant pas homogène le long du cours, les débordements sont décalés depuis le siècle dernier, ce qui a déréglé le système de protection par déversoir mis au

point alors. En particulier, les déversoirs de Gien, Blois, Ouzouer, Montlivault et Vieux-Cher entrent en fonctionnement pour des crues trop fréquentes, tandis que les déversoirs de Jargeau, Avaray, la Chapelle aux Naux fonctionneraient trop tard pour remplir leur rôle de protection du système d'endiguement contre la surverse.

I.6 L'étude Loire moyenne et le modèle LM98 sous Hydra

I.6.1 Contexte de l'étude Loire moyenne

L'étude des différents scénarios de crue pour évaluer dans quelles conditions hydrologiques et hydrauliques le territoire Loire Moyenne est susceptible d'être inondé, a été conduite durant la période 1997-1999 à l'aide du modèle numérique de propagation des crues de la Loire entre Nevers et Montjean - modèle "Loire moyenne" - établi par HYDRATEC pour le compte de l'Etat, de l'Epala (aujourd'hui Etablissement public Loire) et de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne.

De Nevers à Angers, ont été modélisés : **450 km de Loire**, les principaux affluents, 150 000 ha de zones inondables et 600 km de levées isolant 100 000 ha de val en **33 vals différents**.

Le modèle a été construit à partir d'une **topographie établie en 1995** et définie pour le lit du fleuve par un profil en travers de Loire tous les kilomètres, et pour les vals par la cartographie existante, principalement les cartes de l'Institut Géographique National au **1/25 000ème**, et par une série de profils réalisés sur certains axes routiers ou sur des ouvrages pouvant influencer les écoulements (ponts). Ce travail minutieux a été réalisé en concertation avec les gestionnaires du fleuve et les élus riverains.

Le découpage de la Loire moyenne en **casiers et domaines filaires** a été présenté lors de réunions organisées par le préfet dans chaque département (Cher et Nièvre ensemble) au début de l'année 1997.

Le modèle a été utilisé pour alimenter le débat technique concernant :
- le diagnostic de la situation actuelle ;
- la restauration et l'entretien du lit du fleuve ;
- la modification du système de levées et l'impact de l'ouvrage écrêteur du Veurdre.

Le diagnostic résulte alors de la mise en eau du modèle pour une série progressive de crues, depuis la crue cinquantennale jusqu'à la crue cinq-centennale. Il permet de comprendre les conditions d'écoulement et d'inondation dans la configuration du lit de 1995 pour différentes crues.

La modélisation de travaux de restauration et d'entretien du lit a permis de calculer les effets hydrauliques sur les conditions d'écoulement des crues que l'on pourrait attendre de différentes politiques d'aménagement du lit. La définition d'un « état de référence du lit » finalise cette recherche.

L'évaluation de différents scénarios de travaux de protection contre les inondations a été faite sous la direction de l'Equipe pluridisciplinaire et du Comité Technique de l'étude Loire moyenne composé des techniciens de l'Etat, de l'EPALA et de l'Agence de l'Eau Loire Bretagne. Plus de 50 tests d'aménagements, portant toujours sur la totalité de la Loire moyenne, ont été analysés.

1.6.2 Le logiciel Hydra

Hydra est un logiciel de simulation des écoulements à surface libre développé par Hydratec en 1982 et régulièrement enrichi depuis pour satisfaire les besoins d'analyse en constante évolution en hydraulique fluviale.
Il répond aux demandes exprimées par les Maîtres d'Ouvrage pour résoudre les problèmes d'aménagement et de gestion hydraulique de vallées, rivières et canaux, des plus simples aux plus complexes.

Une même simulation peut intégrer deux concepts de modélisation :

- le domaine «filaire» privilégiant une direction d'écoulement dans l'axe de la vallée,
- le domaine «casiers» qui prend en compte les particularités géométriques et topographiques locales du champ d'inondation.

L'analyse du problème et les particularités du site conduisent généralement à panacher les deux concepts afin d'aboutir à la représentation la plus adaptée au cas à traiter.

Figure 1 : Modélisation du val d'Ouzouer et de Sully sous Hydra

Hydra constitue une chaîne complète de simulation couvrant l'hydrologie, l'hydraulique, la diffusion de polluants, la régulation et la prévision. Les possibilités d'application offertes par Hydra témoignent de la large expérience acquise par Hydratec dans le domaine fluvial.

Hydra est développé sous environnement Windows 32bits ; il comprend de nombreux pré-processeurs et post-processeurs, ainsi que des interfaces graphiques et cartographiques puissantes couplées à des Systèmes d'Information Géographique.

Le modèle, basé sur une topographie représentative du fleuve, de son lit et de ses vals, qui résout avec le même algorithme, les équations de l'hydraulique ramenées à une dimension (équation de Barré de Saint-Venant) dans les tronçons linéaires (ou filaires) du fleuve et de ses affluents et calcule les lois d'échanges hydrauliques entre lit et casier ou entre casiers, est à même de représenter correctement les phénomènes d'atténuation ou d'entrée d'eau dans les vals.

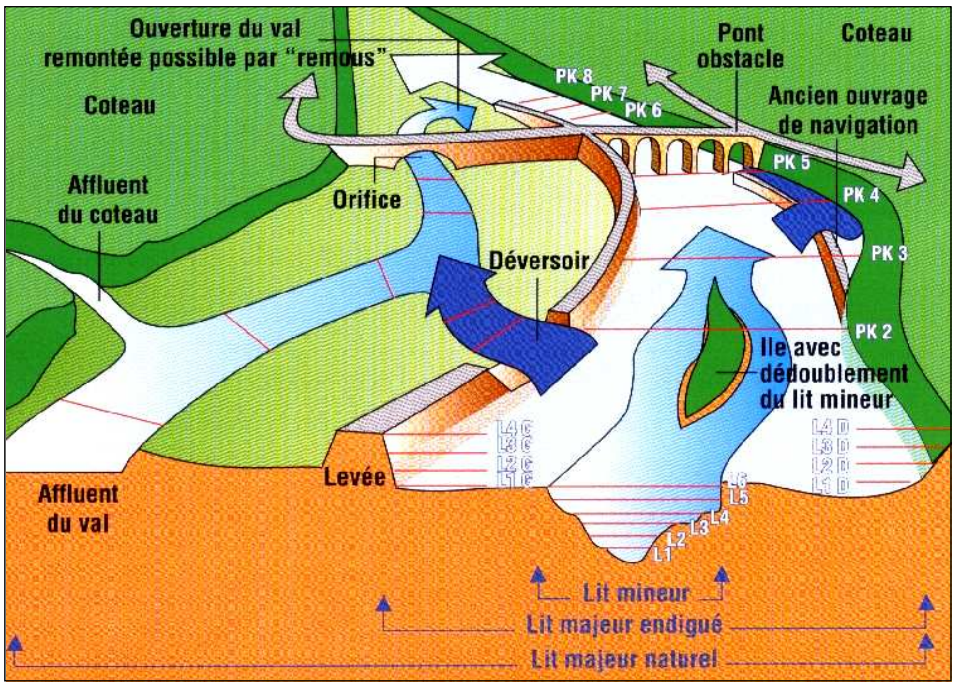
Le modèle LM98 ne simule pas les effets du vent, les rehausses dans les courbures, les brèches accidentelles par renard hydraulique, érosion du pied de levée, déstabilisation par circulation d'eau en fondation et autres fragilités internes, les remontées de la nappe alluviale et les embâcles.

1.6.3 Description du modèle LM98 sous Hydra

Le modèle repose sur la mise en œuvre de deux principes de modélisation distincts : le modèle filaire et le modèle à casiers.

Le modèle filaire rend compte du fonctionnement de la Loire, de ses affluents et des principaux axes d'écoulement.

Les emprises d'écoulement sont, la Loire limitée par ses coteaux ou par des levées, les principaux affluents du fleuve, les ruisseaux ou thalwegs de drainage dans les vals, les terrains situés dans le prolongement des déversoirs.



Le couloir d'écoulement est gradué en points kilométriques : le pont de la RN7 à Nevers est le pk 0 km, le pont de Montjean sur la Loire est le pk 433.800 km. Une table de correspondance existe avec les autres systèmes de repérage du lit de la Loire.

Le modèle filaire est construit à partir de profils en travers. L'hydraulicien synthétise les profils en travers levés par le géomètre avec 14 points significatifs de chaque section. Il interpole des profils supplémentaires pour rester fidèle à la géométrie du lit du fleuve. Le long des filaires, le modèle calcule l'évolution des niveaux d'eau, des vitesses moyennes d'écoulement et des débits.

Les données utilisées pour construire et caler le modèle filaire allouent à celui-ci une précision, en moyenne, de 25 centimètres environ.

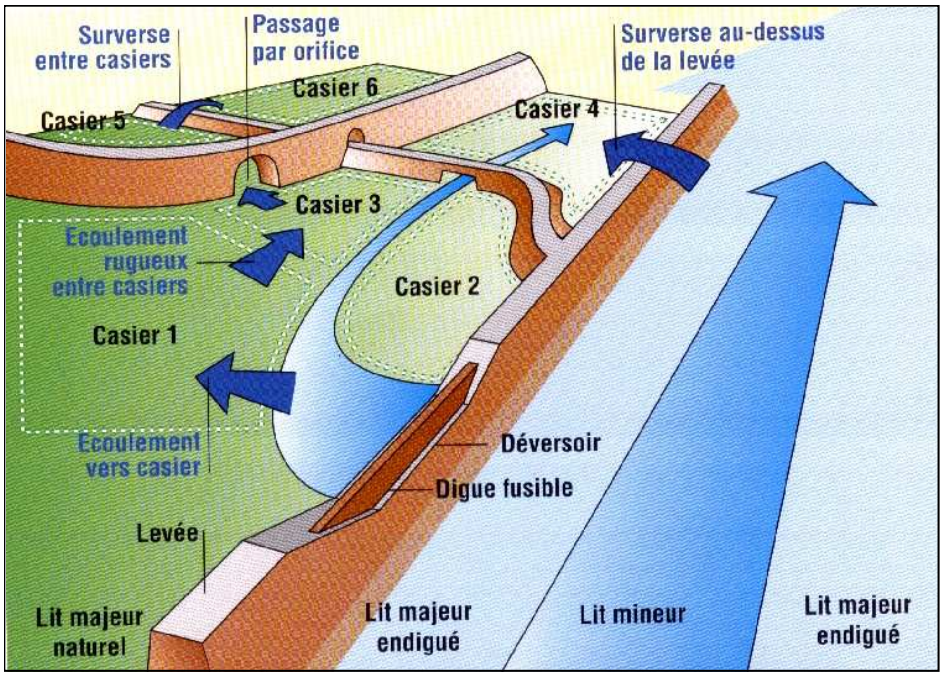
Les ponts et les seuils artificiels situés dans le lit de la Loire et de ses principaux affluents ont été modélisés en introduisant dans le calcul une perte de charge augmentant avec le débit. Les ponts anciens aux arches étroites et encombrantes sont représentés par des pertes de charge plus importantes que les ponts modernes ayant une faible emprise sur le fleuve.

Les algorithmes de calcul, utilisés pour représenter le fonctionnement du fleuve en forte crue, ne prennent pas en compte deux facteurs susceptibles, dans la réalité, de modifier localement les niveaux d'eau : la force centrifuge qui peut rehausser les niveaux d'eau dans l'extrados des virages serrés de 20 centimètres environ et l'effet de fetch - le fetch étant la distance sur laquelle le vent souffle dans la même direction, plus le fetch est grand, plus le vent est fort, et si ce vent souffle depuis déjà plusieurs heures de la même direction, plus la vague est haute.

Dans un filaire, l'eau coule généralement de l'amont vers l'aval. Toutefois, dans les zones de confluence de deux filaires, l'écoulement peut changer de sens lors des crues, le niveau de l'eau peut monter par « remous ». C'est ce qu'il se produit dans les affluents ou les vals lorsque la montée d'eau en Loire les inonde de l'aval vers l'amont.

Le modèle en casier représente les champs d'expansion des crues situés au-delà du lit majeur endigué de la Loire, dans les vals et dans les espaces inondables riverains du fleuve.

Chaque casier est défini géographiquement par ses contours qui coïncident, en général à des obstacles physiques ayant une incidence sur les écoulements : levées, coteaux, routes, etc. puis numériquement par sa superficie et par une courbe surface/hauteur $\alpha(Z)$ où α est le pourcentage de la superficie du casier situé sous la cote Z.



La planimétrie générale du terrain est ainsi entrée dans le modèle ce qui définit le volume d'eau susceptible d'être stocké dans la zone inondée.
Les échanges entre un casier et filaire ou entre deux casiers correspondent aux entrées et sorties d'eau analysées et dimensionnées. Ils sont représentés dans le modèle par des liaisons numériques de quatre types : la loi de surverse, la loi d'orifice, l'écoulement rugueux et la brèche.

Dans la **loi de surverse**, l'eau déborde au-dessus d'un talus, du canal, d'une route en remblai ou de la levée. Dans ce dernier cas, la liaison déversante est calée au niveau de l'arase du point bas de la levée ou de la banquette. Les débits susceptibles d'entrer dans le val sont calculés par une loi de type déversement simple, fonction de la cote d'arase et de la largeur de la zone basse.

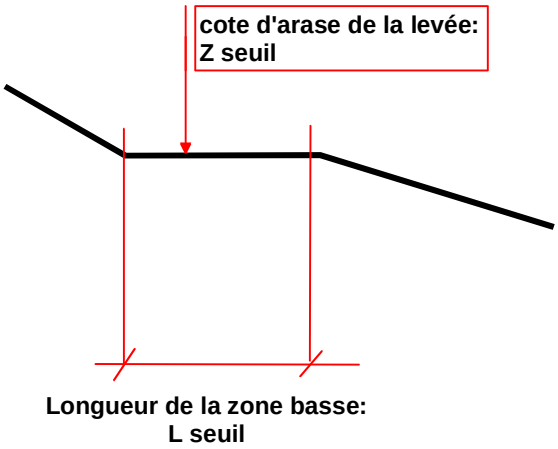


Figure 2 : Schématisation d'une liaison surverse

La **loi d'orifice** est une liaison qui simule un passage par une ouverture quelconque : buse, dalot ou pont.

Dans l'**écoulement rugueux** de casier à casier, l'eau coule sans obstacle précis, mais les forces de frottement de l'eau sur le terrain sont représentées.

La **liaison de type brèche** dans la levée représente l'ouverture progressive d'une brèche lorsque le niveau d'eau dépasse le niveau altimétrique "seuil" correspondant généralement au sommet de la levée ou de la banquette. Le même type de liaison est utilisé pour représenter les déversoirs équipés de fusibles.

La liaison brèche est implantée au même endroit que l'élément déversoir mais sa définition comporte deux niveaux altimétriques :

- Une cote haute correspondant dans le modèle LM98 à la cote d'arase du point bas de la levée ou de la banquette qui entraîne le déclenchement de la brèche si le niveau d'eau lui est supérieur ;
- Une cote plus basse correspondant au niveau du seuil de déversement pris en compte dans les équations lorsque la brèche est déclenchée. C'est approximativement la cote du terrain naturel.

La brèche s'ouvre en 12 heures dans le modèle LM98, comme schématisé ci-après :

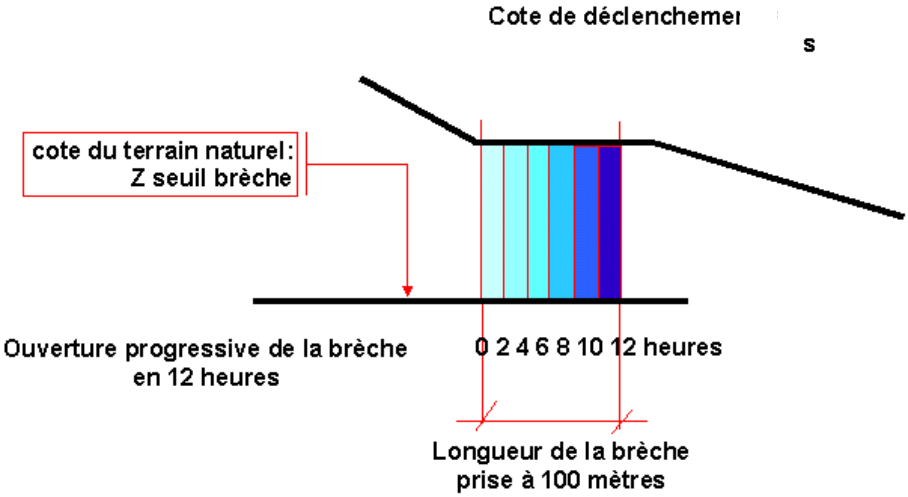


Figure 3 : Schématisation d'une liaison brèche

1.6.4 Calage du modèle LM98

Le calage du modèle a consisté à retrouver, par le calcul et avec la plus grande précision possible, les niveaux d'eau observées sur le terrain par la Diren de Bassin pour les crues de novembre 1992, janvier 1994, mai et décembre 1996.

Le modèle est capable de bien reproduire la réalité pour ces crues puisqu'il restitue, **à plus ou moins 15 centimètres, 87% des 300 niveaux observés** par les services de l'Etat lors de ces quatre crues.

1.7 Le modèle LM09 pour la prévision des crues entre Giury et Langeais sous Hydrariv

1.7.1 Contexte de l'étude

Courant 2008, la DIREN Centre, qui a en charge la prévision des crues sur le bassin de la Loire en amont du bec de Vienne et sur la totalité des bassins du Cher et de l'Indre, a missionné Hydratec pour concevoir un outil opérationnel de prévision des crues de la Loire en Loire moyenne, basé sur une évolution du modèle LM98 de l'étude Loire moyenne.
Le Service de Prévision des Crues Loire Cher Indre (SPC LCI) de la DIREN, qui assure par ailleurs l'annonce de crue, la prévision et l'information en utilisant un outil de calcul par accroissement de débit, a piloté le déroulement de la mission.

Cette opération s'est déroulée en 3 étapes :

- Une première phase de transposition du modèle LM 98 sous le logiciel de simulation des systèmes fluviaux HYDRA-RIV développé et commercialisé par Hydratec et Terrasol à partir du code de calcul HYDRA. Ce nouveau modèle couvre un secteur allant de Decize et Moulins à l'amont jusqu'à Montjean à l'aval, et à pour objectif de permettre de disposer d'un modèle de prévision des crues en Loire entre Imphy et Moulins à l'amont et jusqu'à Langeais à l'aval ;

- Une seconde phase de mise à jour et de recalage du modèle de simulation Loire moyenne. Le travail a consisté en un affinage de l'architecture du modèle là où des besoins d'amélioration ont été mis en évidence après l'étude détaillée de la crue de décembre 2003, et où des données supplémentaires existent. Ce travail a été suivi d'un (re)calage et d'une validation sur un jeu de cinq crues, dont les crues de 2003 et 2008. Il s'est concrétisé par la fourniture à la DREAL Centre des fichiers du modèle actualisé LM09 sous HYDRA-RIV. Le modèle transmis additionne celui de l'étude Loire moyenne remanié entre Nevers et Montjean et le modèle global filaire-casier ADN2008 de l'Etude Global du Risque Inondation de l'Agglomération de Nevers (EGRIAN), construit par Hydratec pour l'Agglomération De Nevers, depuis Decize et Moulins à l'amont jusqu'à Saint-Satur à l'aval ;

- Une troisième phase d'adaptation du modèle à la prévision des crues en temps réel.

1.7.2 Le logiciel HydraRiv

HYDRARIV est un progiciel de modélisation hydrologique et hydraulique des espaces fluviaux. Il est conçu pour intégrer dans un même modèle des schémas de représentation contrastés, tels que la schématisation filaire, les casiers et les maillages bi-dimensionnels.

Cette souplesse permet d'adapter au mieux la modélisation à la spécificité des configurations rencontrées dans le domaine fluvial et aux objectifs de modélisation poursuivis.
HYDRARIV est une application totalement autonome, gérant tout à la fois la génération et l'édition des modèles via une interface graphique dédiée, le pilotage des calculs et l'exploitation des résultats. Elle est organisée autour d'un module de pilotage développé en VB6 et d'une base de données spécifique, interne à l'application : aucune licence externe n'est requise.
Le noyau de calcul est constitué par le logiciel HYDRA, développé et exploité par Hydratec depuis plus de 20 ans. Ce noyau englobe des algorithmes généraux intéressant les écoulements superficiels ; il est utilisé dans plusieurs domaines d'intervention, dont l'hydraulique fluviale. La chaîne de simulation HYDRA est totalement transparente à l'utilisateur car elle est pilotée par l'interface d'HYDRARIV.

Les concepts de modélisation manipulés par HYDRARIV présentent un haut niveau d'intégration avec pour avantages :

- **L'ergonomie** : la description d'un domaine fluvial est basée sur des schémas de modélisation diversifiés accordant une grande latitude de choix au modélisateur selon sa compréhension du fonctionnement hydraulique du système modélisé. Par ailleurs HYDRARIV est conçu pour fonctionner dans un environnement WINDOWS. Il respecte les « guides de style Windows », ainsi que les règles d'ergonomie des environnements Windows ;
- **La fiabilité et la robustesse** : la génération d'un modèle hydraulique subit de nombreux contrôles de cohérence des données et active automatiquement les options de calcul les plus appropriées aux caractéristiques du modèle défini par l'utilisateur ;
- **La performance** : l'organisation interne des entités de modélisation est entièrement prise en charge par des programmes de génération spécifiques. Ceux-ci sont conçus pour optimiser la taille des systèmes matriciels et donc minimiser les temps de calcul.

HYDRARIV ne dispose pas de fonctions SIG proprement dite, ces fonctions sont assurées par un logiciel d'accompagnement : HYDRAMAP, pour toutes les taches mettant en œuvre un Modèle Numérique de Terrain. HYDRAMAP est un module applicatif du logiciel SIG MAPINFO et fonctionne donc dans l'environnement de ce dernier.

Il agit comme pré-processeur d'HYDRARIV pour générer en lot certaines entités de modélisation comme le maillage et les liaisons internes d'un sous domaine bi-dimensionnel et donc faciliter le renseignement de ces objets. De même il assure le traitement cartographique de certains résultats produit par HYDRARIV. Le lien entre ces deux applicatifs est assuré par des procédures d'importations et d'exportations gérées par HYDRARIV.

Cette distinction entre HYDRAMAP et HYDRARIV est voulue : elle assure une optimisation des traitements en valorisant au mieux les fonctionnalités de chaque environnement de travail selon l'étape de modélisation.

1.7.3 Description du modèle LM09 sous HydraRiv

- **Calage du modèle en propagation**

Une fois transposé sous Hydrariv, le modèle LM09 a été adapté avec pour objectif de permettre une bonne prévision des crues de la Loire.

Dans cette optique, la propagation en temps des hydrogrammes a été particulièrement étudiée et, afin d'améliorer la représentation de la propagation de la crue, initialement trop rapide, **le module de calculs « sinus-lm »** a été spécifiquement développé dans le cadre de cette étude.
Il simule un allongement du trajet du courant le long d'un tronçon de lit mineur. Ceci a pour effet de ralentir la propagation de la crue.

- **Utilisation du MNT pour améliorer la définition de certains secteurs**

La construction du modèle de simulation LM09 a bénéficié du levé topographique haute résolution réalisé par un système de scannage par Laser aéroporté en mars 2002 et en mars-avril 03.

L'objectif de ce levé était d'obtenir un modèle altimétrique de haute résolution de la zone inondable de la Loire sur sa partie comprise entre Nevers et Nantes et partiellement de quelques affluents, soit environ 2000 km².

Une campagne de prise de vues aériennes a également été réalisée pendant l'été 2002 dans le but de produire des orthophotoplans de l'ensemble de la zone.

Le Modèle Numérique de Terrain obtenu à partir de ces données est un semis de points qui comprend uniquement les éléments modelant le terrain naturel (TN) : Terrain Naturel "nu", TN sous végétation, ouvrages modelant le TN [digues, quais, remblais…] hors les artefacts liés à la végétation (arbres isolés, …), les zones bâties et les surfaces en eau.
La densité de point pour les semis de points est supérieure à 1 point pour 4 m², y compris sous couvert végétal.

Plusieurs secteurs du modèle ont donc été retravaillés, sur la base de ce MNT et de nouvelles données topographiques. Il s'agit en particulier des :

- Secteur de Fourchambault ;
- Traversée de la Charité ;
- Déversoirs du Bec d'Allier, de Passy et de la Madeleine.

- **Modification du modèle dans le secteur de Fourchambault**

Le secteur de Fourchambault a récemment connu des travaux de restauration du lit de la Loire.

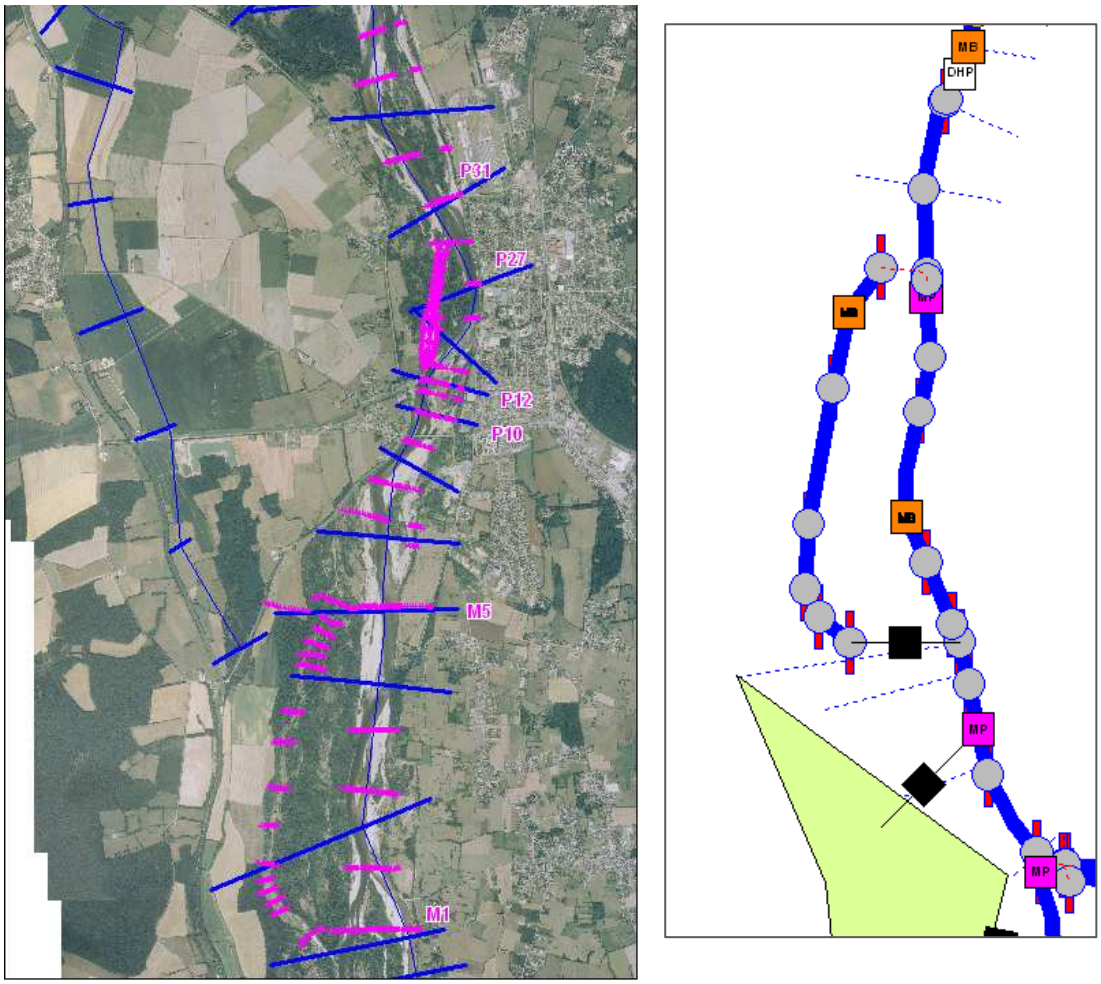


Figure 4 : Modification du modèle dans le secteur de Fourchambault

Une branche a été ajoutée dans le modèle dans ce secteur pour modéliser le bras secondaire qui a été remis en état de fonctionner.

De nouvelles données bathymétriques ont été exploitées dans le secteur de Fourchambault, et de nouveaux profils en travers ont été ajoutés pour rendre compte de l'ensemble des travaux effectués.

- **Modification du modèle dans la traversée de La Charité**

La traversée de La Charité, et en particulier le secteur du pont, n'était pas modélisée de manière satisfaisante au vu des premiers résultats de simulation.

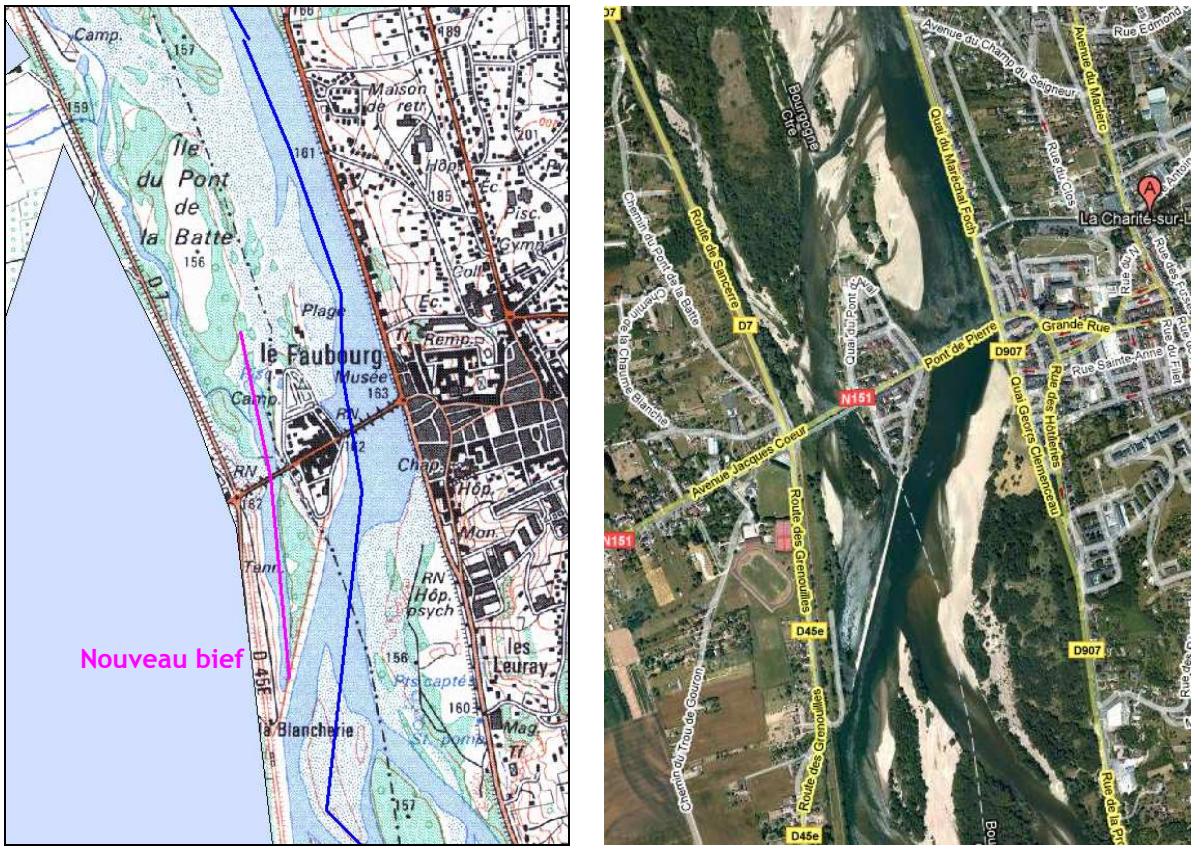


Figure 5 : Modification du modèle dans la traversée de La Charité

Les profils en travers du secteur ont été modifiés afin de prendre en compte le rétrécissement du lit de la Loire dû à l'existence d'une chevrette. Un petit bief a également été ajouté afin de modéliser l'écoulement après surverse sur la chevrette.

Par ailleurs, la perte de charge associée au pont de La Charité a été augmentée, en particulier pour les plus petits débits, afin de retrouver dans les calculs de la ligne d'eau les effets du seuil du pont.

- **Déversoir du Bec d'Allier**

Le déversoir du Guétin situé dans la levée du val du Bec d'Allier est modélisé dans LM98 par une unique liaison de type surverse (QMS) entre l'Allier et le casier GU01 :

Déversoir	Bief	PK	Aval	Liaison	Type	Zdev	Ldev
Bec d'Allier	50	1002.15	GU01	ALLGU01D	QMS	172.85	400

La carte ci-dessous présente le Modèle Numérique de Terrain dans le val du Guétin et donne les altitudes de la levée et du déversoir :

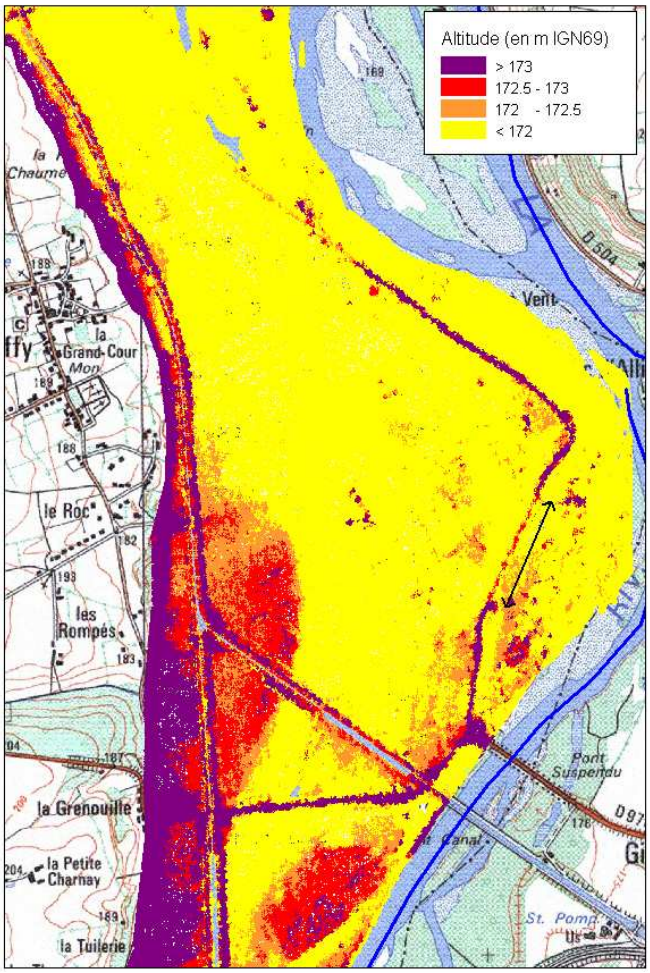


Figure 6 : MNT dans le val du Bec d'Allier

Le graphique ci-après correspond à une coupe le long du déversoir réalisée à partir du MNT. Sur cette coupe, est superposé le profil en long des liaisons hydrauliques modélisant le déversoir du Guétin dans le modèle LM98.

Au vu de cette superposition, les liaisons hydrauliques sont ajustées pour tenir compte des données topographiques fournies par le MNT.

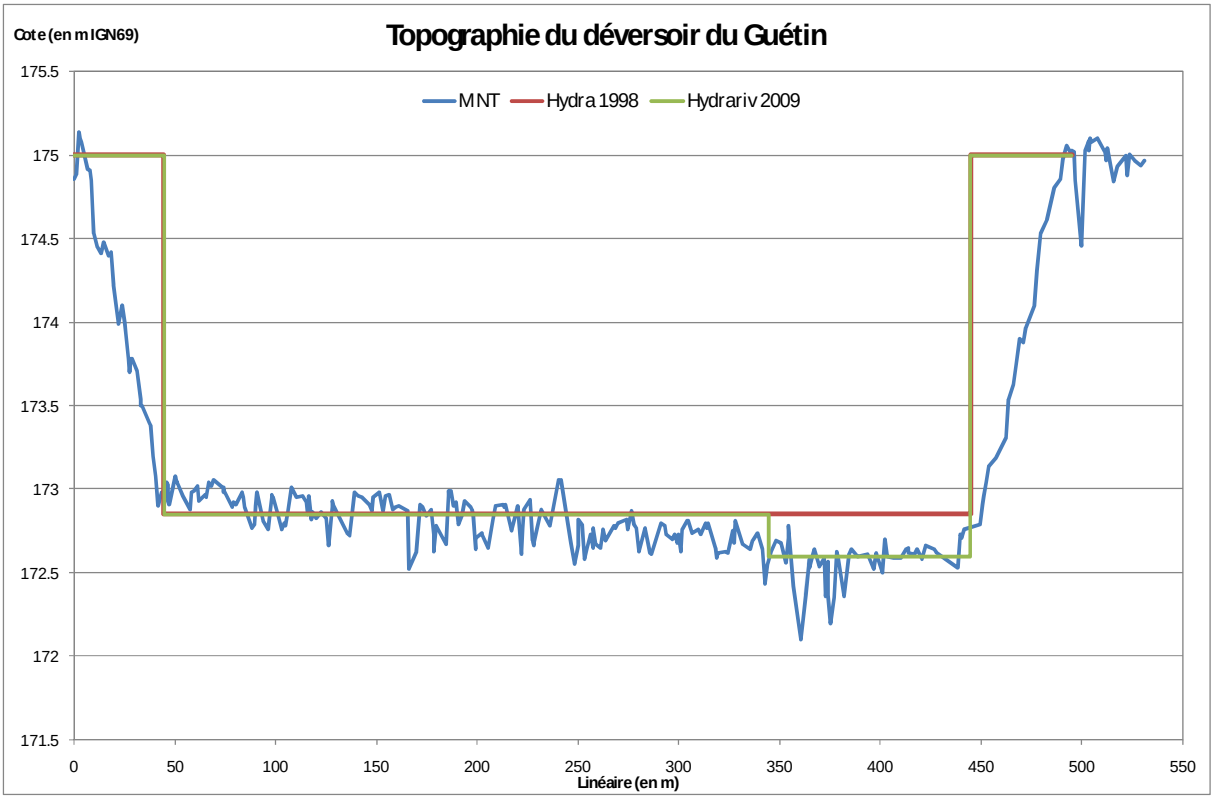


Figure 7 : Modification du déversoir du Guétin dans le modèle LM09

Les nouvelles caractéristiques des liaisons hydrauliques modélisant le déversoir qui ont été définies sont les suivantes :

Déversoir	Bief	PK	Aval	Liaison	Type	Zdev	Ldev
Bec d'Allier	50	1002.15	GU01	ALLGU01D1	QMS	172.85	300
				ALLGU01D2	QMS	172.60	100

Le déversoir modélisé a ainsi été abaissé de 15 cm sur un quart de sa longueur.

- **Déversoir de Passy (val de La Charité)**

Le déversoir de Passy situé dans la levée du val de La Charité est modélisé dans LM98 par 7 liaisons de type surverse (QMS) entre la Loire et le ruisseau du Lac :

Déversoir	Bief	PK	Aval	Liaison	Type	Zdev	Ldev
Passy	7	1038.45	56	038LA001	QMS	157.45	200
		1038.65		038LA002	QMS	157.4	200
		1038.85		038LA003	QMS	157.35	200
		1039.0699		039LA001	QMS	157.1	150
		1039.25		039LA002	QMS	157	200
		1039.4301		039LA003	QMS	156.9	150

La carte ci-dessous présente le Modèle Numérique de Terrain dans le val de la Charité et donne les altitudes de la levée et du déversoir :

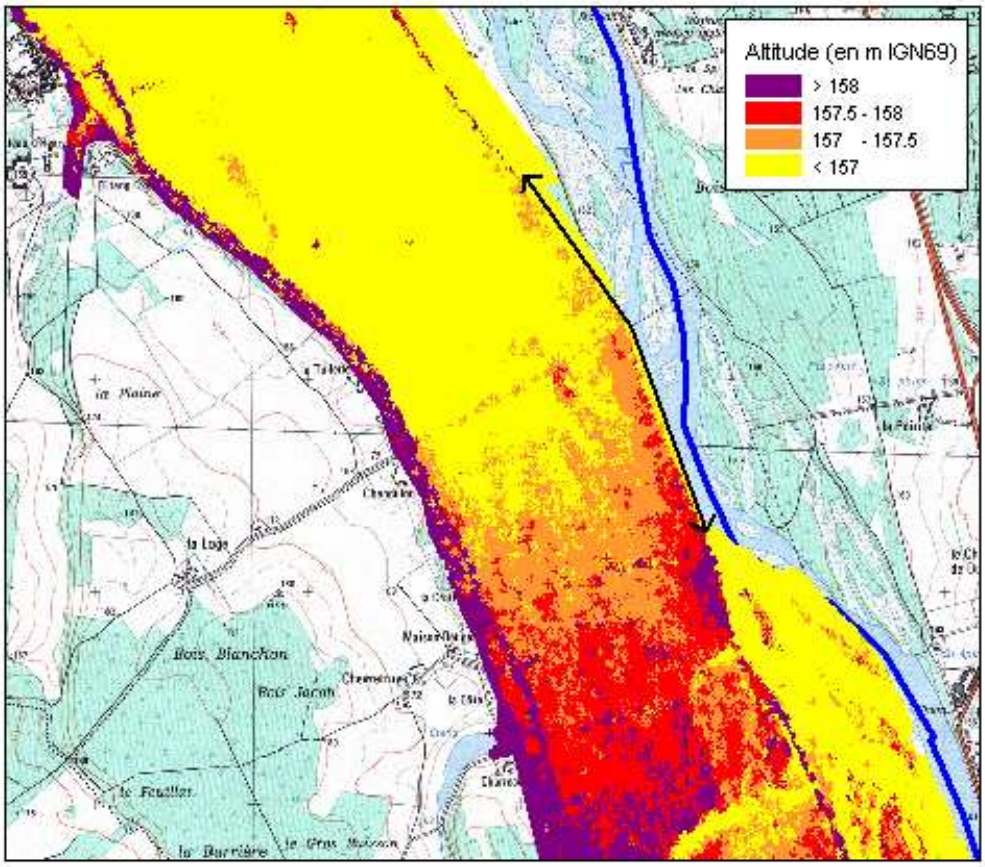


Figure 8 : MNT au niveau du déversoir de Passy

Le graphique ci-après correspond à une coupe le long du déversoir réalisée à partir du MNT. Sur cette coupe, est superposé le profil en long des liaisons hydrauliques modélisant le déversoir de Passy dans le modèle LM98.

Au vu de cette superposition, les liaisons hydrauliques n'ont pas été modifiées.

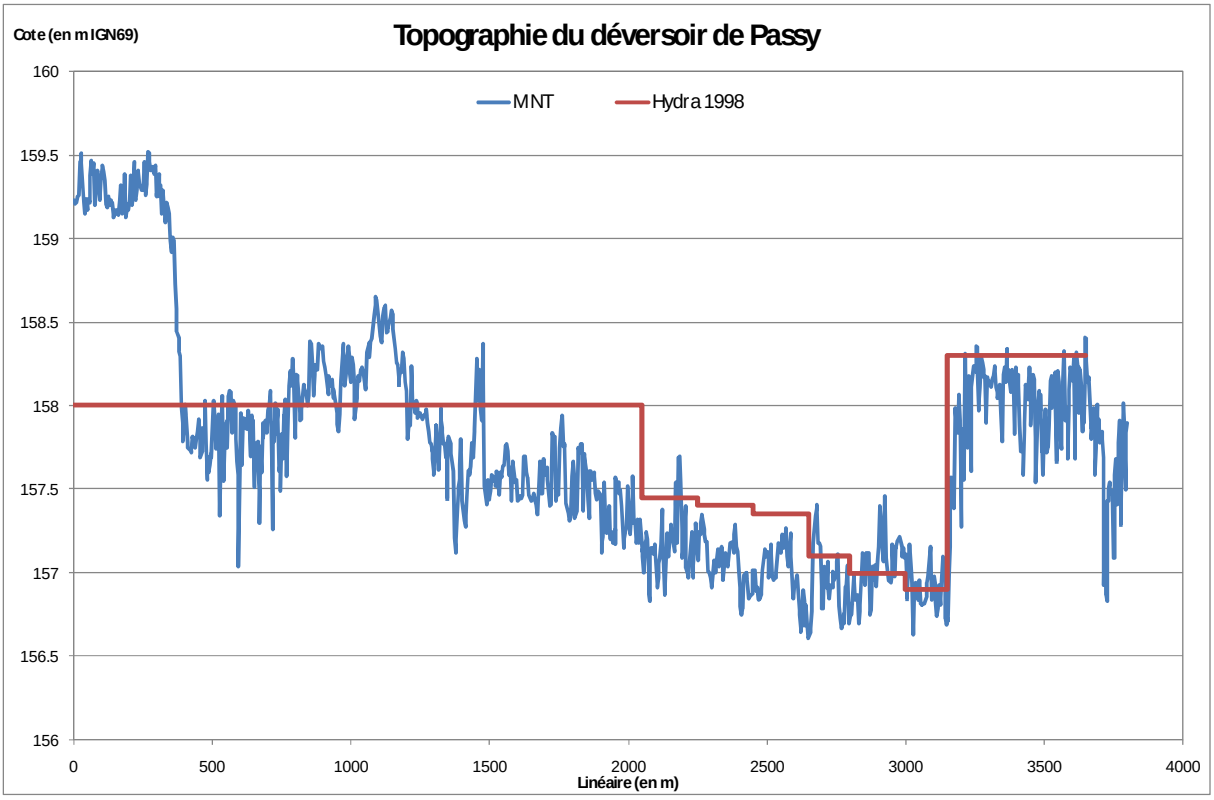


Figure 9 : Caractérisation du déversoir de Passy dans le modèle LM09

- **Déversoir de La Madeleine (val de Léré)**

Le déversoir de La Madeleine situé dans la levée du val de Léré est modélisé par 10 liaisons de type surverse (QMS) entre la Loire et le casier BE01 :

Déversoir	Bief	PK	Aval	Liaison	Type	Zdev	Ldev
Madeleine	11	1077.1	BE01	770BE01M	QMS	139.4	200
		1077.3		772BE01M	QMS	139.25	200
		1077.5		774BE01M	QMS	139.1	200
		1077.7		776BE01M	QMS	139.1	200
		1077.9		778BE01M	QMS	139	200
		1078.1		780BE01M	QMS	138.4	200
		1078.3		782BE01M	QMS	138.7	200
		1078.53		784BE01M	QMS	138.7	250
		1078.72		786BE01M	QMS	139.23	150
		1078.9		788BE01M	QMS	139.3	200

La carte ci-dessous présente le Modèle Numérique de Terrain dans le val de Léré et donne les altitudes de la levée et du déversoir.

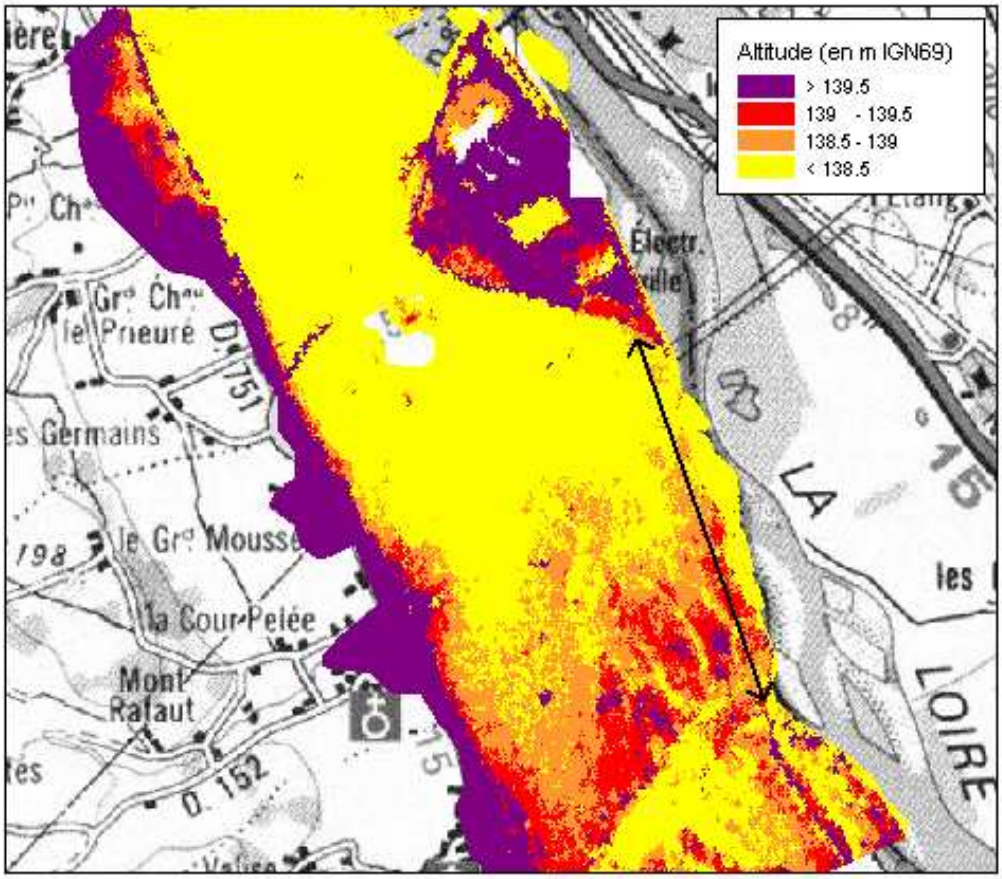


Figure 10 : MNT au niveau de déversoir de Passy

Le graphique ci-après correspond à une coupe le long du déversoir réalisée à partir du MNT. Sur cette coupe, est superposé le profil en long des liaisons hydrauliques modélisant le déversoir de la Madeleine dans le modèle LM98.
Au vu de cette superposition, les liaisons hydrauliques ont été ajustées pour tenir compte des données topographiques fournies par le MNT.

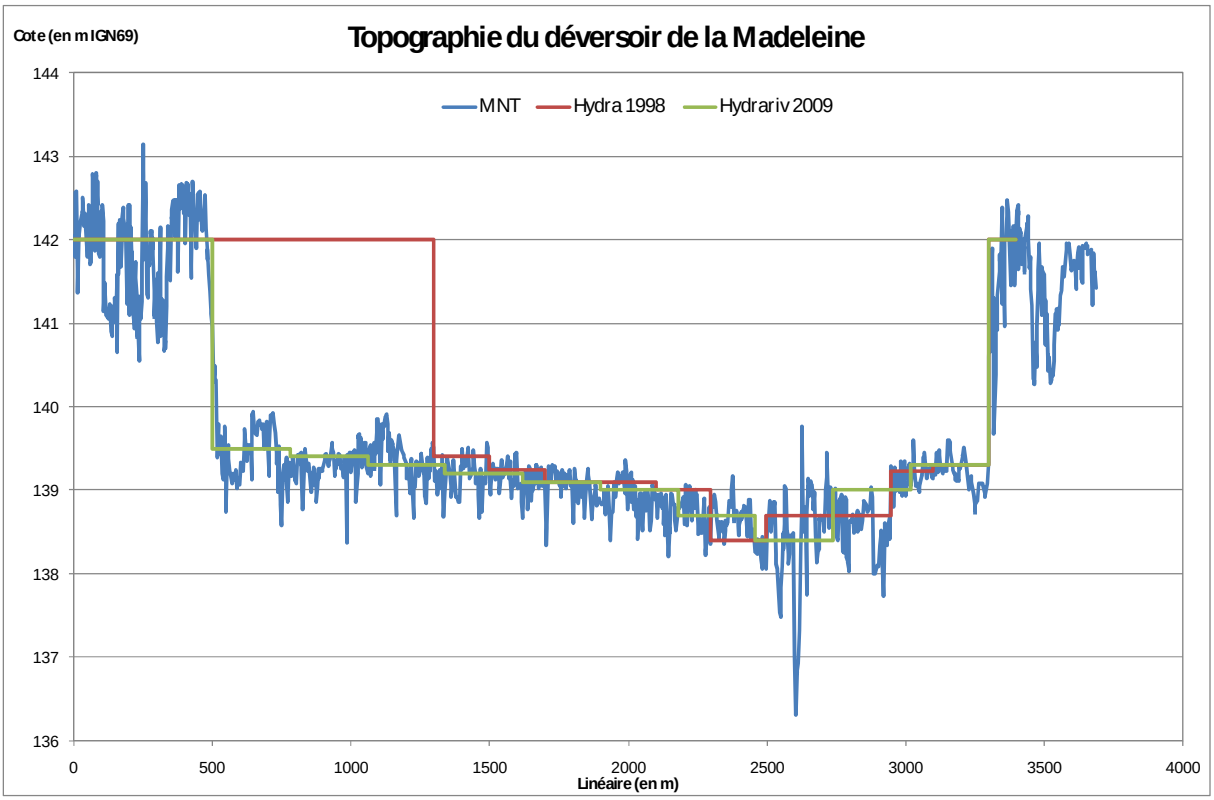


Figure 11 : Modification du déversoir de la Madeleine dans le modèle LM09

Au final, les caractéristiques des liaisons hydrauliques modélisant le déversoir de la Madeleine, retenues pour le modèle LM09, sont les suivantes :

Déversoir	Bief	PK	Aval	Liaison	Type	Zdev	Ldev
Madeleine	11	1077.1	BE01	770BE01M	QMS	139.5	280
		1077.3		772BE01M	QMS	139.4	280
		1077.5		774BE01M	QMS	139.3	280
		1077.7		776BE01M	QMS	139.2	280
		1077.9		778BE01M	QMS	139.1	280
		1078.1		780BE01M	QMS	139.0	280
		1078.3		782BE01M	QMS	138.7	280
		1078.53		784BE01M	QMS	138.4	280
		1078.72		786BE01M	QMS	139.0	280
		1078.9		788BE01M	QMS	139.3	280

Les longueurs déversantes ont ainsi été augmentées par rapport au modèle LM98.

1.7.4 Calage du modèle LM09

Du fait de son but final d'aider à la prévision de crue, le modèle LM09 repris et mis à jour avec de nouvelles données topographiques, a été optimisé sur **5 crues de calage** : novembre 2008, juin 2008, novembre 2003, février 1999 et novembre 1996, et vérifié sur **5 crues de validation** : janvier 2008, avril 2005, janvier 2004, février 2003, mai 2001.
Le calage a ainsi permis d'améliorer la représentativité du modèle à l'échelle globale de la Loire en limitant les écarts de cotes entre les calculs et les mesures :

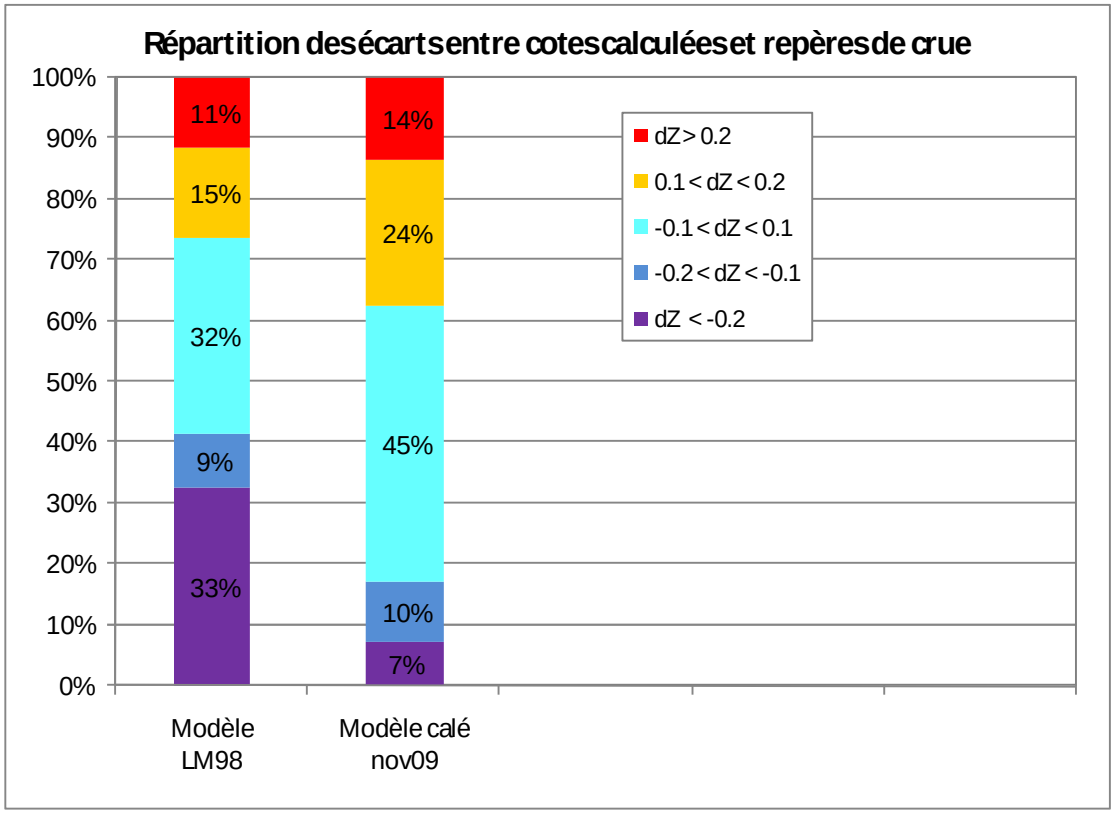


Figure 12 : Résultats du calage de LM98 et LM09

I.8 Le modèle LM10 pour les études de danger des digues de classe A

I.8.1 Contexte de l'étude

Dans le cadre des études de dangers des digues de classe A de la Loire moyenne, une bonne propagation dans le temps de la crue n'est pas nécessaire et il a été décidé de supprimer le module sinus-lm qui constitue un artefact numérique et de le recaler sur les crues récentes fortes de décembre 2003 et novembre 2008. Dans ce contexte, fin 2010, la DREAL Centre a missionné hydratec dans le cadre des études de dangers pour reprendre la version « prévision de crue » via LM09 afin de la recaler en privilégiant cette fois, le calcul des lignes d'eau plutôt que la propagation de la crue.

Cette prestation qui avait pour objet principal le recalage du modèle Loire Moyenne sur les crues de décembre 2003 et de novembre 2008, a donné lieu à la réalisation du modèle LM10. Rappelons que le modèle initial « LM98 » était calé sur les crues de novembre 1992, janvier 1994, mai et décembre 1996. Les résultats de la simulation de la crue de décembre 2003, en injectant les débits mesurés à la station de Givry, indiquent que le modèle donne une ligne d'eau correcte, malgré des problèmes de décalage temporel des hydrogrammes propagés.

I.8.2 Description du modèle LM10

L'emprise du modèle LM10, entre le bec d'Allier et le bec de Maine est représentée sur la carte ci-dessous.

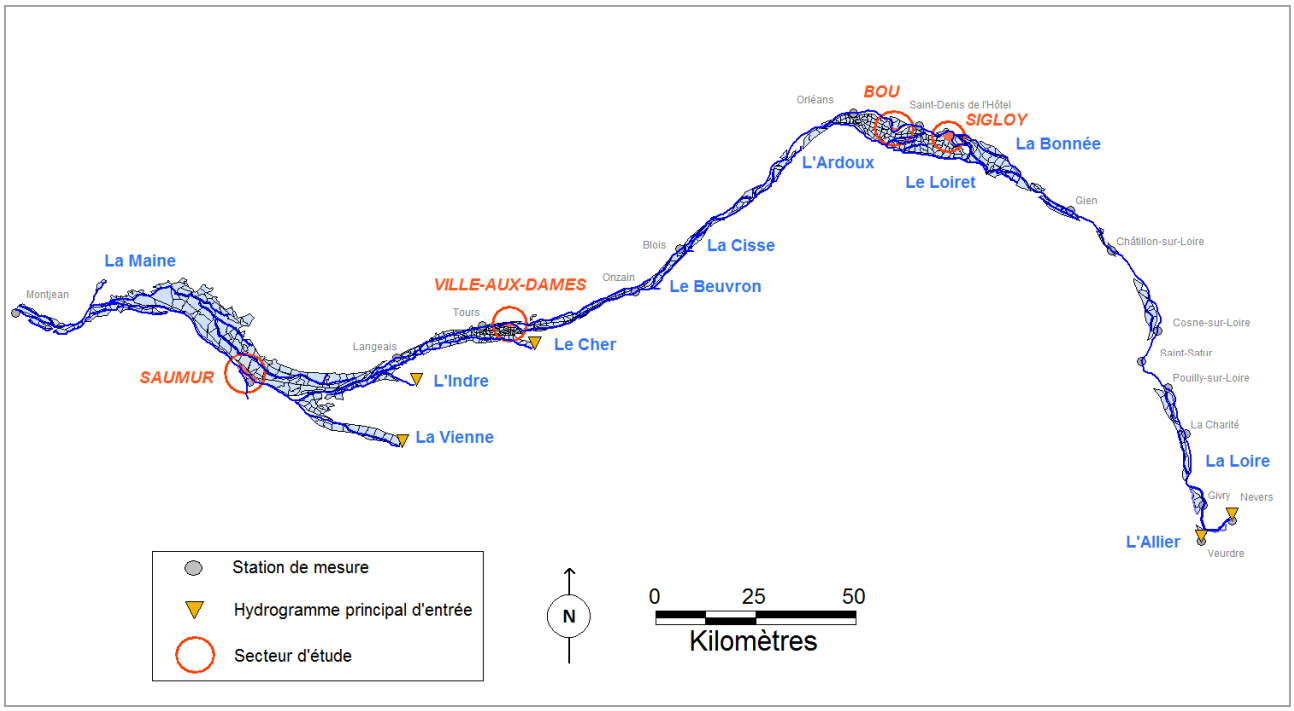


Figure 13 : Architecture du modèle LM10, entre Nevers-Livry et Montjean-sur-Loire

Le modèle Hydrariv LM10 a été affiné à partir du modèle LM09, lui-même issu du modèle LM98, sur quatre secteurs :

- méandre de Sigloy ;
- méandre de Bou ;
- secteur de la Ville-aux-Dames (Tours) ;
- secteur de Saumur.

I.8.3 Calage du modèle LM10

Les tableaux ci-après présentent la répartition des écarts de niveaux entre les repères de crue et les cotes calculées au même PK pour les deux crues de calage de décembre 2003 et novembre 2008 :

Crue nov08	%
-0.1 ≤ dz ≤ 0.1	43%
-0.15 ≤ dz ≤ 0.15	60.5%
-0.2 ≤ dz ≤ 0.2	71%
-0.3 ≤ dz ≤ 0.3	88%

Crue dec03	%
-0.1 ≤ dz ≤ 0.1	52%
-0.15 ≤ dz ≤ 0.15	71.7%
-0.2 ≤ dz ≤ 0.2	84%
-0.3 ≤ dz ≤ 0.3	96%

Figure 14 : Résultats du calage de LM10

Ces derniers résultats ont été obtenus après une analyse critique des repères de crue. 10 repères sur 208 pour la crue de Décembre 2003 et 10 sur 157 pour la crue de Novembre 2008 ont été jugés peu fiables car incohérents par rapport aux autres repères de crue et donc non pris en compte lors de l'analyse des résultats.

Les performances actuelles du modèle Lm10 sont les suivantes :

- Près de 80% des écarts sont dans l'intervalle ± 20 cm ;
- Plus de 90%, dans l'intervalle ± 30 cm.

1.9 De LM98 à LM10-VA

1998

Modèle LM98 :
Etude Loire moyenne (Equipe Pluridisciplinaire)

Objectifs :
- Diagnostic de la situation actuelle
- Restauration et entretien du lit du fleuve
- Modification du système de levées et impacts de l'ouvrage écrêteur du Veurdre

Caractéristiques :
- *de Nevers-Veurdre à Angers*
- *modèle filaire-casiers sous **Hydra***
- *topographie de 1995*
- *calage : crues de novembre 1992, janvier 1994 et décembre 1996*

2008-2009

Modèle temps réel LM09 :
Prévision des crues (SPC LCI)

Objectifs :
- Transposition sous Hydrariv
- Actualisation du modèle LM98
- Outils de prévision en temps réel

Caractéristiques :
- *de Givry à Langeais*
- *modèle filaire-casiers sous **HydraRiv***
- *redécoupage des zones de remous des vals et modifications ponctuelles à l'aide du MNT*
- *calage en propagation, cotes et débits (**option sinus-lm**)*
- *5 crues de calage : nov2008, juin 2008, nov2003, fév1999 et nov1996*
- *5 crues de validation*

Novembre-Décembre 2010

Modèle LM10 : Etudes de danger des digues (DREAL Centre)

Objectifs :
- Etude de dangers des digues de classe A

Caractéristiques :
- *modèle filaire-casiers sous **HydraRiv***
- *affinage du modèle dans certains méandres*
- *Calage (**sans l'option sinus-lm**) : crues de décembre 2003 et novembre 2008*

Janvier-Février 2011

Modèle LM11-VA :
Etude des vals de Loire dans les départements du Cher et de la Nièvre (EP Loire)

Objectifs :
- Etude des vals amont de Loire Moyenne (VA≡Vals Amont)

Caractéristiques :
- *modèle filaire-casiers sous **HydraRiv***
- ***redécoupage des casiers des vals pour tenir compte des zones à enjeux et des aménagements futurs***

II. l'hydrologie des modèles de la Loire moyenne

II.1 Les points d'injection de débit de LM98

La mise en eau du modèle Loire LM98 est réalisée en injectant des débits variables en fonction du temps (voire constants) en tête des filaires (la Loire et ses affluents) ou dans les tronçons filaires structurant le modèle : les ruisseaux dans les vals et les terrains situés dans le prolongement des déversoirs.

Secteur d'étude

	Les filaires à alimenter	l'Hydrogramme est injecté	Bief	PK modèle	Val concerné si affluent d'un val
1	La Loire	à Nevers	1	0.00	
2	L'Allier	au pont SNCF du Guétin	50	0.00	
3	La Canche	en tête du filaire	52	0.00	Val de Givry
4	Le ru de Château Vert	en tête du filaire	54	0.00	Val de La Charité amont
5	Le Moule	en tête du filaire	56	0.00	Val de La Charité aval
6	La Judelle	en tête du filaire	58	0.00	Val de Léré
7	Le Rousson	en aval du déversoir de Saint-Martin d'Ocre, en tête du filaire	59	0.00	Val de Gien
8	Le Bras	en tête du filaire	61	0.00	Val de Gien
9	La Sange	en tête du filaire	62	100.00	Val de Sully-sur-Loire
10	La Bonnée	en tête du filaire	64	100.00	Val d'Ouzouer
11	La Vieille Bonnée	en tête du filaire	66	100.00	Val d'Ouzouer
12	La Dhuy et le Loiret	en tête du filaire	78	0.00	Val d'Orléans
13	L'Ousson	en tête du filaire	76	0.00	Val d'Orléans
14	La Marmagne	en tête du filaire	70	0.00	Val d'Orléans
15	Un fossé théorique	en aval du déversoir de Jargeau	72	0.00	Val d'Orléans
16	L'Ardoux	en tête du filaire	86	0.00	Val d'Ardoux
17	L'Ime	en tête du filaire	88	0.00	Val d'Ardoux
18	La Tronne	en tête du filaire	92	100.00	Val d'Avaray
19	La Noue	en aval du déversoir de Montlivault	94	100.00	Val de Blois
20	Un fossé théorique	en aval du déversoir de La Bouillie	100	100.00	Val de Blois
21	Le Cosson	en tête du filaire	96	100.00	Val de Blois
22	Le Beuvron	en tête du filaire	104	100.00	Val de Blois
23	La Cisse	en tête du filaire	108	100.00	Val de Cisse
24	La Brenne	dans le filaire de la Cisse	108	136.00	Val de Cisse
25	L'Amasse	dans le filaire de la Loire à Amboise	27	272.67	
26	Le Cher	à Azay-sur-Cher	110	100.00	
27	Un fossé théorique	en aval du déversoir du Vieux Cher	112	0.00	Val du Vieux Cher
28	Un fossé théorique	en aval du déversoir de la Chapelle aux Naux	114	0.00	Val de Bréhémont
29	L'Indre	à Azay-le-Rideau	116	0.00	
30	La Vienne	à l'Ile-Bouchard	120	100.00	
31	Le Thouet 1	en tête du filaire	122	0.02	
32	Le Thouet	dans le filaire	122	0.00	
33	Le Lane	en tête du filaire	124	0.00	Val d'Authion
34	Le Changeon	en tête du filaire	129	2.00	Val d'Authion
35	Le Lathan	en tête du filaire	130	0.00	Val d'Authion
36	L'Authion 2	dans le filaire	126	44.16	Val d'Authion
37	Le Régaure	en tête du filaire	132	0.00	Val d'Authion
38	L'Authion 1	dans le filaire	128	50.74	Val d'Authion
39	L'Authion	dans le filaire	128	50.74	Val d'Authion
40	Le Petit Louet	en tête du filaire	134	0.00	Val de Gohier
41	L'Oudon	en amont de la Maine	136	0.00	
42	La Sarthe	en amont de la Maine	136	0.01	
43	Le Loir	en amont de la Maine	136	0.02	
44	La Mayenne	en amont de la Maine	136	0.03	
45	Le Louet	en tête du filaire	138	0.00	
46	Le Bras de Chalonnes	en tête du filaire	140	0.00	
47	Le Layon	dans le filaire	140	1.50	
48	La Loge	en tête du filaire	142	0.00	

Figure 15 : Points d'injection de débits dans LM98

C'est l'étude hydrologique « Loire moyenne » qui définit les apports de la Loire à Nevers et de l'Allier au Pont du Guétin.

Les apports des petits affluents (Canche, Moule, Judelle,…) circulant dans les vals sont essentiellement définis pour assurer un débit minimum constant dans les filaires des vals pour que le modèle puisse calculer. Ces débits, de l'ordre de 3 à 10 m^3/s, sont très petits devant les débits circulant dans les vals lorsque les déversoirs les alimentent ou lorsque des brèches s'ouvrent. Ils n'ont pas d'influence sur la crue mais sont nécessaires pour des impératifs numériques. Toutefois, ils sont parfois suffisants pour mettre en

eau certains fonds de casier. Dans la réalité, cela pourra aussi survenir si une pluie vient provoquer localement de petites inondations dues aux seuls affluents.

Pour informations (car hors secteur d'étude) :

Les affluents de la Loire entre Blois et Tours : Beuvron, Cosson, Masse, Cisse et Brenne ont été construits par l'équipe pluridisciplinaire à partir de données existantes aux stations hydrologiques avec un débit maximum proche du débit journalier de période de retour 20 ans.
Sur avis du groupe d'experts en hydrologie, les apports retenus pour le Cher, l'Indre, la Vienne, le Thouet, le Loir, la Sarthe, la Mayenne, l'Oudon et le Layon correspondent aux hydrogrammes observés lors de la crue de 1856 extraits des rapports de "l'étude de propagation des crues de la Loire" réalisée en 1982 par SOGREAH. Les données avaient alors été fournies par le Service Hydrologique Centralisateur. Ces apports sont caractérisés par des pointes de crue qui arrivent 2 à 3 jours environ avant la pointe de crue en Loire, ce qui tend à épaissir l'hydrogramme en Loire plutôt qu'à le rendre plus pointu.
Notons qu'à la demande du Comité de Pilotage de l'étude, l'Equipe pluridisciplinaire avec l'appui du Service de Bassin Loire Bretagne a élaboré des hydrogrammes de crue centennale pour le Cher et la Vienne afin de réaliser deux tests supplémentaires pour analyser l'effet de la concomitance de ces apports avec le passage de la crue de Loire.
L'apport de l'Authion a été estimé (sur la base d'indications fournies par le Service de Bassin Loire Bretagne de la DIREN Centre) par l'équipe pluridisciplinaire. Il a été réparti par Hydratec entre ses différents affluents, pour satisfaire au critère d'alimentation des filaires.

Dans le cadre d'un modèle à l'échelle interrégionale (au 1/50 000ème) il a été délibérément choisi de ne pas multiplier les scénarios à comparer en gardant le même débit sur les affluents quelle que soit la période de retour. Par conséquent, les résultats sont fiables et homogènes sur le secteur du Bec d'Allier à Tours, où on ne note pas d'apport notable des affluents, pour les crues de période de retour supérieure à 70 ans. Ils sont à prendre avec plus de précautions en aval de Tours où les principaux affluents de la Loire pourraient avoir un comportement différent de celui simulé.

II.2 Les points d'injection de débit dans LM09 et LM10

Pour les besoins du passage du modèle LM98 en temps réel, l'hydrologie a été redéfinie : en effet, il ne s'agit plus de tester des crues de projet, mais des crues réelles, mesurées à des stations hydrologiques.
Deux types d'apports sont à distinguer :

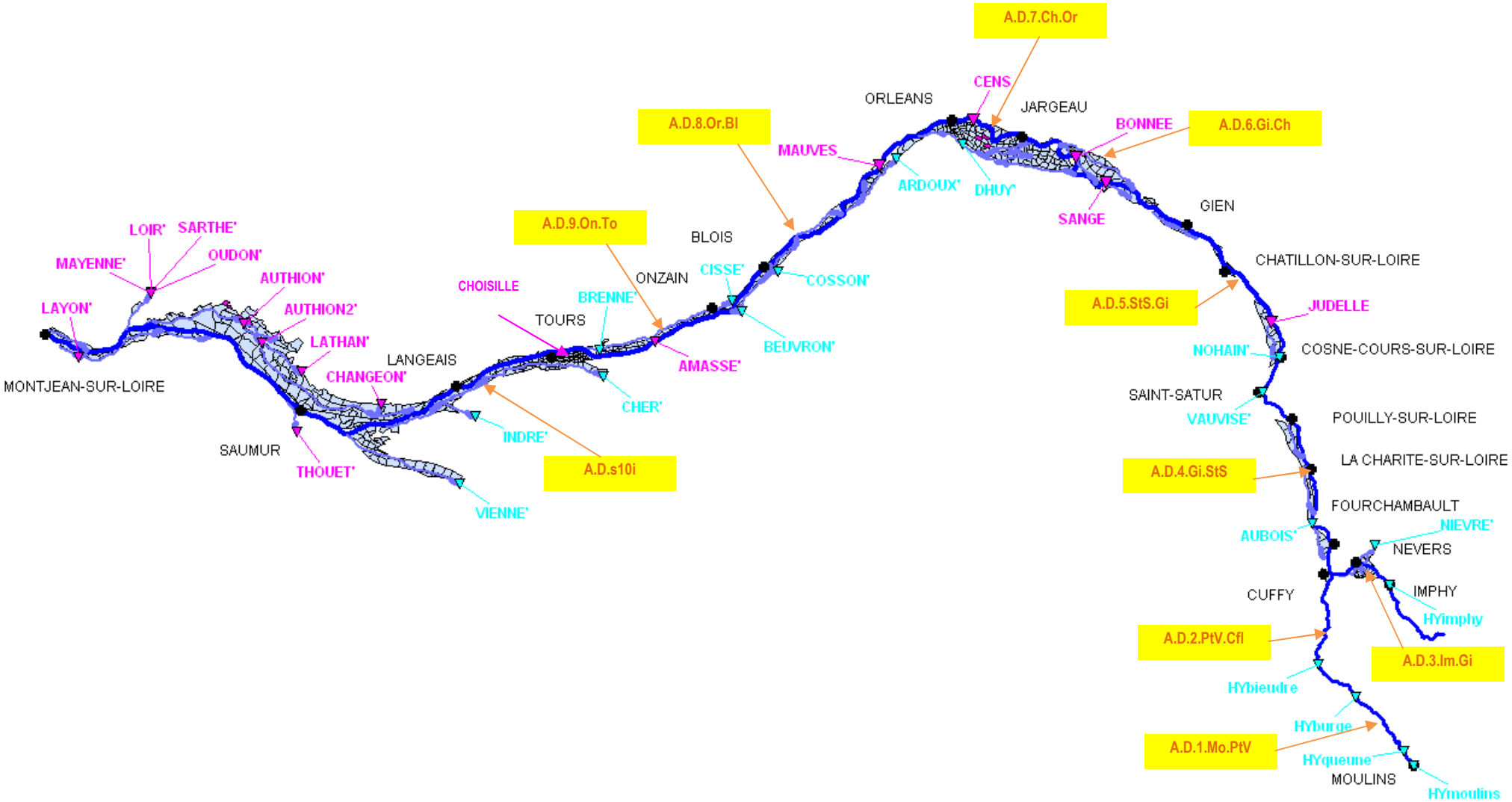
- les hydrogrammes variables modélisant la Loire, l'Allier ainsi que leurs affluents ;
- les apports constants qui jouent plutôt un rôle dans la stabilité numérique du modèle et qui sont injectés généralement dans les biefs filaires des vals.

II.2.1 Les hydrogrammes variables de la Loire, l'Allier et leurs affluents

Les différents apports variables injectés dans le modèle pour restituer l'hydrologie d'une crue sont listés ci-dessous et indiqués sur la carte page suivante. Les hydrogrammes sont définis dans des fichiers externes sous Hydrariv. Selon la source des données, ils peuvent être classés en 4 catégories :

	Nombre	Superficie BV	%
Apport estimé avec les données de la station hydrologique	4	44 276	78%
Apport estimé avec les données de la station hydrologique et extrapolé sur la surface totale du bassin versant	11	6 723	12%
Apport estimé avec les données d'une ou plusieurs stations hydrologiques situées sur d'autres bassins versants	6	976	2%
Apport regroupant des petits affluents et des apports diffus estimé avec les données d'une ou plusieurs stations hydrologiques situées sur d'autres bassins versants	10	4 569	8%

	N°	Affluents	Rive	Superficie BV km2	Référence station (Code banque Hydro)	Superficie BV contrôlé	%
Imphy-Givry	1	L' Allier Moulins		12 980.0	Moulins - K3450810	12 980	100
	2	La Queune	G	111.4	Neuvy - K3464010	109	98
	3	La Burge	G	225.9	Aubigny - K3553010	225	100
	4	A.D.1.Mo.PtV		383.0	Neuvy - K3464010 et Aubigny - K3553010		
	5	La Bieudre	G	333.3	Pouzy Mésangy - K3603010	143	43
	6	A.D.2.PtV.Cfl		276.0	Pouzy Mésangy - K3603010		
	7	La Loire Imphy		17 390.0	Imphy - K1900010	17 390	100
	8	La Nièvre	D	636.6	Arzembouy - K1954010 (224km²) Champlemy - K1943010 (192km²)	416	65
	9	A.D.3.Im.Gi et la Colâtre		273.4	Neuvy - K3464010, Aubigny - K3553010 et Pouzy Mésangy - K3603010		
Givry-St-satur	10	L' Aubois	G	327.9	Grossouvre - K4013001	140	43
	11	A.D.4.Gi.StS et Mazou, ruisseaux du Riot et du Moulin, Madelon		721.0	St-Bouize - K4073101		
	12	La Vauvise	G	467.0	St-Bouize - K4073101	392	84
St-Satur-Gien	13	Le Nohain	D	529.2	St-Martin-sur-Nohain - K4094010	473	89
	14	La Judelle	G	77.8	St-Martin-sur-Nohain - K4094010		
	15	A.D.5.StS.Gi et Vrille, Cheuille, Ousson, Ethelin, Trézée		766.8	St-Martin-sur-Nohain - K4094010		
Gien-Châteauneuf	16	La Sange	G	49.2	St-Martin-sur-Nohain - K4094010		
	17	A.D.6.Gi.Ch et Notreure, Aquiaulne et Bec d'Able		686.2	St-Martin-sur-Nohain - K4094010		
	18	La Bonnée	D	182.1	St-Martin-sur-Nohain - K4094010		
Châteauneuf-Orléans	19	Le Cens	D	243.3	Dhuy à St-Cyr-en-Val - K4383110 Lailly-en-Val - K443010		
	20	A.D.7.Ch.Or et la Bionne		309.0	Dhuy à St-Cyr-en-Val - K4383110 Lailly-en-Val - K443010		
Orléans-Blois	21	Le Dhuy	G	281.7	St-Cyr-en-Val - K4383110	216	77
	22	Les Mauves	D	275.3	Constant : 1.1 m3/s		
	23	A.D.8.Or.Bl		517.0	Dhuy à St-Cyr-en-Val - K4383110 Lailly-en-Val - K443010		
	24	L'Ardoux	G	275.9	Lailly-en-Val - K443010	155	56
Blois-Onzain	25	Le Beuvron	G	2 185.0	Tour-en-Sologne - K4672220 sinon : Lailly-en-Val - K443010	1070	49
Onzain-Tours	26	L'Amasse	G	135.7	Nazelles-Négron - K4853001		
	27	A.D.9.On.To		194.0	Nazelles-Négron - K4853001		
	28	La Cisse	D	1 300.0	Nazelles-Négron - K4853001	790	61
Tours-Langeais	29	La Choisille	D	288.4	Tours-sur-Cher - K6710910	174	60
	30	Le Cher	G	13 680.0	Tours-sur-Cher - K6710910	13 620	100
	31	A.D.s10 = Bresme, ruisseau du Breuil, Roumer	D	442.6	Tours-sur-Cher - K6710910		



Apport d'affluent basé sur données DIREN disponibles

Apport d'affluent corrélé

Apport diffus et petits affluents

Figure 16 : Carte des points d'injection d'hydrogrammes variables dans LM09 (Imphy-Moulins)

II.3 Les apports constants des biefs filaires des vals

Dans le modèle initial de 1998, dans les branches filaires des vals, des débits constants (HC) ont été injectés pour s'assurer de la stabilité numérique du modèle.
Les 37 hydrogrammes constants injectés dans le modèle LM09-IM (constitué du modèle ADN-IM et LM98c en mode complexe) sont listés ci-dessous et indiqués sur la carte page suivante. Les débits injectés ont été calés pour s'assurer de la stabilité numérique du modèle dans les branches filaires des vals. Ils ne devraient a priori pas être modifiés ultérieurement.

Modèle	Nom hydrariv	Débit (m3/s)
LM98c	AUTHION1	1
LM98c	BONNEE	6
LM98c	BOUILLIE	2
LM98c	BRAS	5
LM98c	canc	2
LM98c	canche1	2
LM98c	CHALONN	1
LM98c	CHAPNAU	3
LM98c	chat	2
LM98c	chatea	-2
LM98c	chatve	2
LM98c	DEVJARG	2
LM98c	fermsang	-2.7
LM98c	HY_judel	-5
LM98c	IME	2
LM98c	judell	5
LM98c	judl	5
LM98c	lacanche	-2
LM98c	LANE	1
LM98c	LOGE	1
LM98c	LOIRET	5
LM98c	LOUET	1
LM98c	MARMAGN1	2
LM98c	NOUE	5
LM98c	OUSSN	2
LM98c	PTITLOU	0.1
LM98c	RAULAC	5
LM98c	REGAURE	1
LM98c	ROUSSO	2
LM98c	sang	2.7
LM98c	sange	3
LM98c	THOUET1	1
LM98c	TRONNE	8
LM98c	VIBONNEE	3
LM98c	VIEUCHER	2
LM98c	BRASD	1
LM98c	HC1	1

Modèle	Nom hydrariv	Débit (m3/s)	Correspondance LM98c
ADNim	HYbouelle	0	
ADNim	HYeperon	0	
ADNim	HYpeuilly	0	
ADNim	HYpres	0	
ADNim	HYrollet	0	
ADNim	HYsavigny	0	
ADNim	Canche	2	canche1
ADNim	Chatvert	2	chatve
ADNim	HCcanche	-2	lacanche
ADNim	HCchatvert	-2	chatea
ADNim	HCloirecanche	2	canc
ADNim	HCloirechatvert	2	chat
ADNim	Raulac	5	raulac

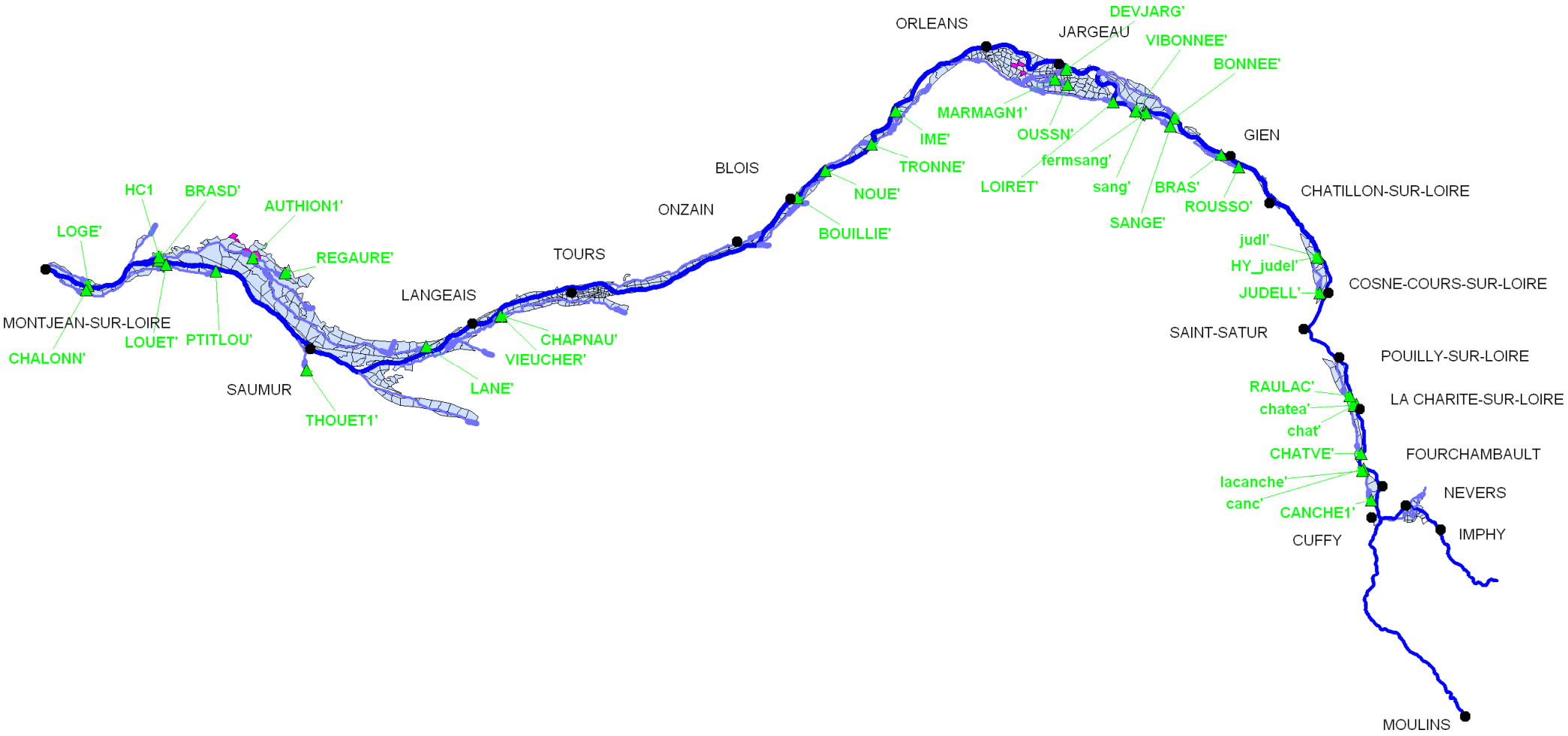


Figure 17 : Carte des points d'injection des débits constants dans le modèle LM09

II.4 les hydrogrammes types de l'étude Loire moyenne

Les crues transitant le long des vals de Loire dans les départements du Cher et de la Nièvre sont issues de la jonction de la Loire et de l'Allier au Bec d'Allier. Les apports intermédiaires sont dans la zone d'étude d'un ordre de grandeur notablement inférieur à ces apports amont. Dans la continuité de l'étude Loire moyenne, les 6 hydrologies étudiées correspondent aux crues de période de retour 50, 70, 100, 170, 200 et 500 ans au Bec d'Allier. On considère que les crues de la Loire sont écrêtées par le barrage de Villerest. L'hypothèse d'écrêtement retenue est de 1 000 m^3/s.
En ce qui concerne l'Allier, deux hypothèses ont été étudiées dans le cadre de l'étude Loire moyenne : avec ou sans écrêtement par l'ouvrage du Veurdre. Au total, 12 hydrologies différentes sont donc simulées.

Période de retour (ans)	**Débit naturel au Bec d'Allier (m^3/s)**	**Hydrologies simulées**	
		Débit écrêté par Villerest (m^3/s)	Débit écrêté par Villerest et le Veurdre (m^3/s)
50	5 200	4 200	3 600
70	6 000	5 000	4 200
100	7 000	6 000	5 200
170	7 500	6 500	5 750
200	8 000	7 000	6 250
500	9 500	8 500	7 650

Les courbes suivantes permettent de visualiser les hydrogrammes injectés en tête des filaires représentant successivement la Loire et l'Allier :

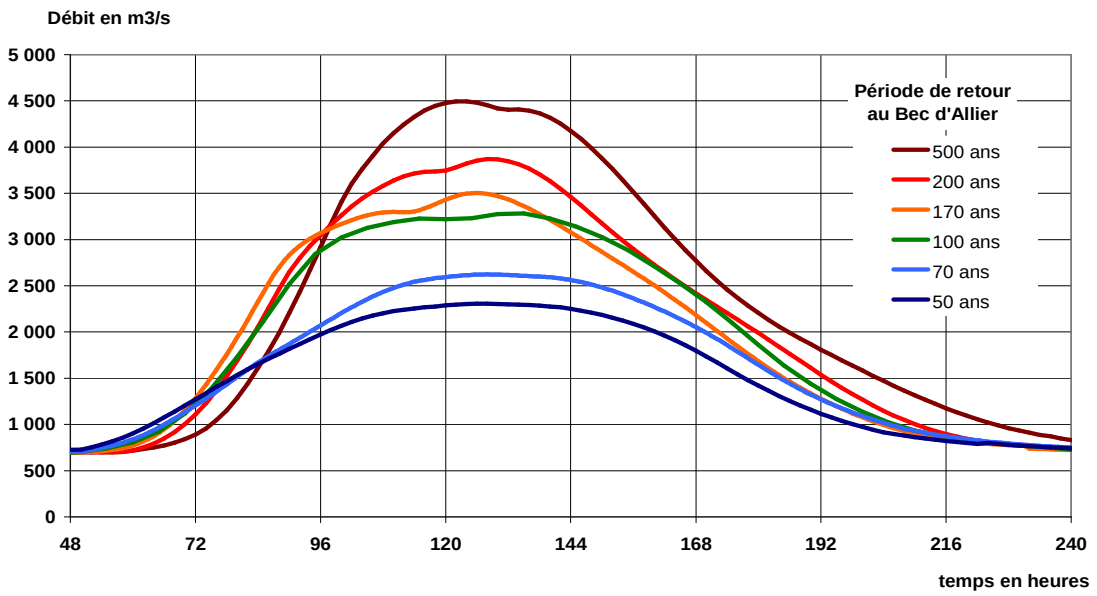


Figure 18 : Hydrogrammes de la Loire écrêtés par Villerest injectés dans le modèle Loire Moyenne à Nevers

Pour l'Allier, les courbes indiquent l'action de l'ouvrage écrêteur du Veurdre, en fonction de la crue, en amont au Bec d'Allier :

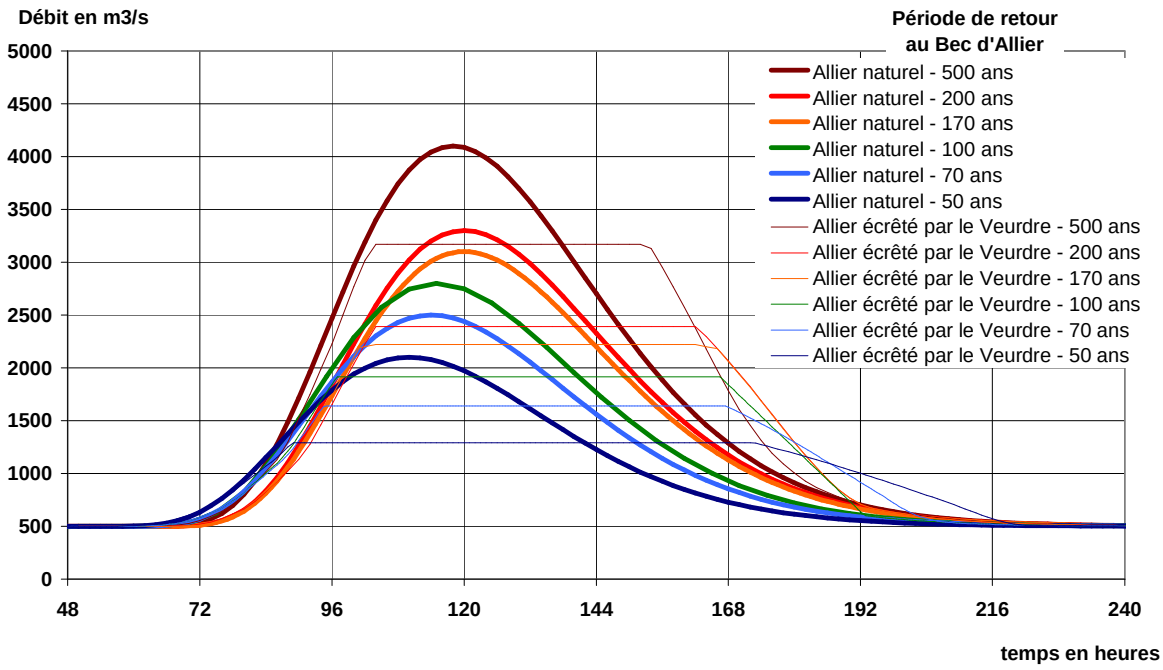
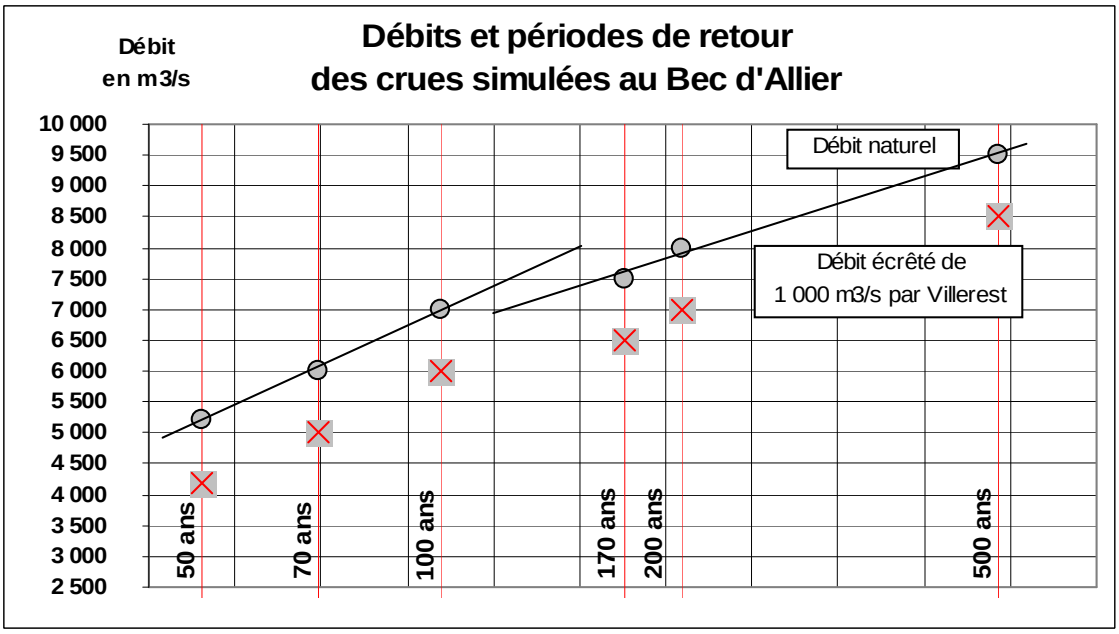


Figure 19 : Hydrogrammes de l'Allier naturels et écrêtés par le Veurdre injectés dans le modèle Loire Moyenne au Guétin

Ces hydrogrammes sont identiques pour tous les scénarios étudiés. L'analyse de toutes les crues connues et historiques a permis de déterminer des volumes de crue, des débits de pointe, des formes générales et des durées à l'aide de méthodes statistiques. Les techniciens ont voulu traduire la notion de fréquence d'apparition des événements en temps de retour, ce qui ne facilite pas spécialement la compréhension du risque.



En ce qui concerne la Loire Moyenne, la relation entre la force des crues, caractérisée par le débit au Bec d'Allier écrêté de 1 000 m^3/s par Villerest, et les périodes de retour retenues, a conduit à répartir les crues en trois familles, selon une approche générale à l'échelle de la Loire moyenne.

II.4.1 Les crues de temps de retour 50, 70 et 100 ans

Ce sont les crues qui touchent des riverains non protégés. Notons que contrairement aux autres vals de la Loire moyenne, les vals de Loire dans les départements du Cher et de la Nièvre sont déjà inondés pour ces scénarios de crue de temps de retours 50, 70 ou 100 ans. Cette inondation peut se faire par remous dans la partie aval des vals, par le fonctionnement des déversoirs ou par rupture des levées.

La crue cinquantennale au Bec d'Allier est une crue forte de débit 4 200 m^3/s au Bec d'Allier, écrêtée par Villerest (débit naturel sans Villerest de 5 200 m^3/s). Elle correspond à un événement comparable à la crue de 1907 qui a réussi à s'écouler dans le lit sans provoquer de rupture de levée. Cette période de retour de 50 ans signifie qu'elle a une probabilité de survenance de 2 % chaque année.

La crue septentennale au Bec d'Allier est une crue de débit 5 000 m^3/s au Bec d'Allier, écrêtée par Villerest (débit naturel sans Villerest de 6 000 m^3/s). Cette période de retour de 70 ans signifie qu'elle a une probabilité de survenance de 1,4 % chaque année.

La crue centennale au Bec d'Allier est une crue traditionnellement retenue comme référence pour les études. Elle correspond à un débit de débit 6 000 m^3/s au Bec d'Allier, écrêté par Villerest (débit naturel sans Villerest de 7 000 m^3/s). Cette période de retour de 100 ans signifie qu'elle a une probabilité de survenance de 1 % chaque année.

II.4.2 Les crues de temps de retour 170 et 200 ans

Ce sont les fortes crues qui provoquent des dommages malgré le système de protection par levée. Ce sont des crues comparables aux grandes crues historiques de 1846, 1856, et 1866. Elles correspondent à des débits de 6 500 m^3/s et 7 000 m^3/s au Bec d'Allier, écrêtés par Villerest (débits naturels sans Villerest de 7 500 m^3/s et 8 000 m^3/s). La crue deux-centennale a une probabilité de survenance de 0,5 % chaque année.

II.4.3 La crue de temps de retour 500 ans

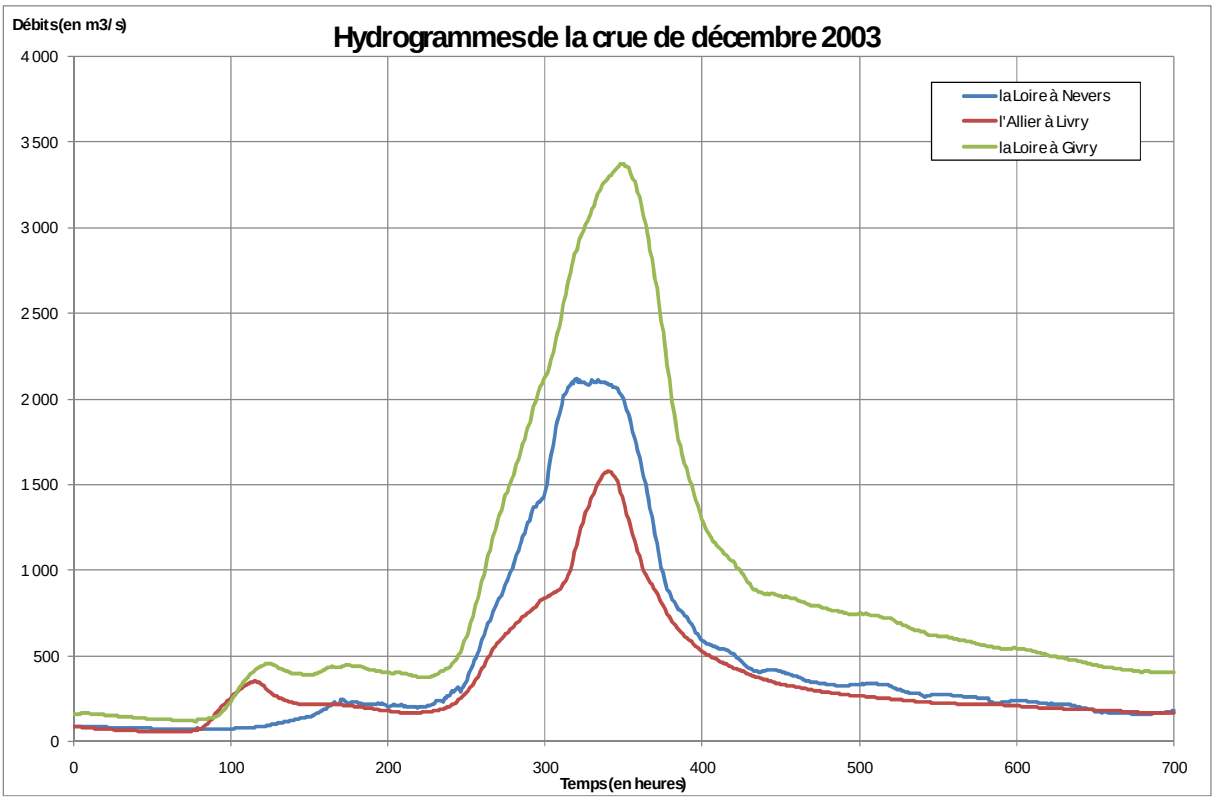
C'est la crue la plus forte qui a été étudiée dans l'étude Loire moyenne. Le choix de ce temps de retour relève d'une décision d'analyser avec le modèle une crue extrême, mais dont la survenance reste probable. Elle correspond à un débit de 8 500 m^3/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest (débit naturel sans Villerest de 9 500 m^3/s). Elle a chaque année une probabilité de 0,2 % de se produire, à titre d'exemple elle est 20 fois plus probable et fréquente que la crue utilisée pour calculer la protection des centrales nucléaires le long de la Loire.
N.B. : Les débits arrondis ont aussi guidé les choix de types de crue, de façon à simplifier les mémorisations.

II.5 L'hydrologie des crues de calage de décembre 2003 et novembre 2008

Les deux dernières crues importantes de la Loire (et de l'Allier) sont celles de décembre 2003 et de novembre 2008. Le modèle utilisé pour l'étude des vals de Loire dans les départements du Cher et de la Nièvre, est issu du modèle LM10 qui a été calé spécifiquement sur ces 2 crues récentes. En voici les caractéristiques :

Crue	La Loire à Nevers écrêtée par Villerest (m^3/s)	L'Allier à Livry (m^3/s)	La Loire à Givry (m^3/s)
Novembre 2008	1 850	860	2 450
Décembre 2003	2 120	1 580	3 370
50 ans	2 300	2 100	4 300
70 ans	2 600	2 500	5 000
100 ans	3 300	2 800	5 900
170 ans	3 500	3 100	6 570
200 ans	3 900	3 300	7 080
500 ans	4 500	4 100	8 570

Les graphiques ci-dessous représentent les hydrogrammes mesurés aux différentes stations, pour les deux événements de crue considérés :



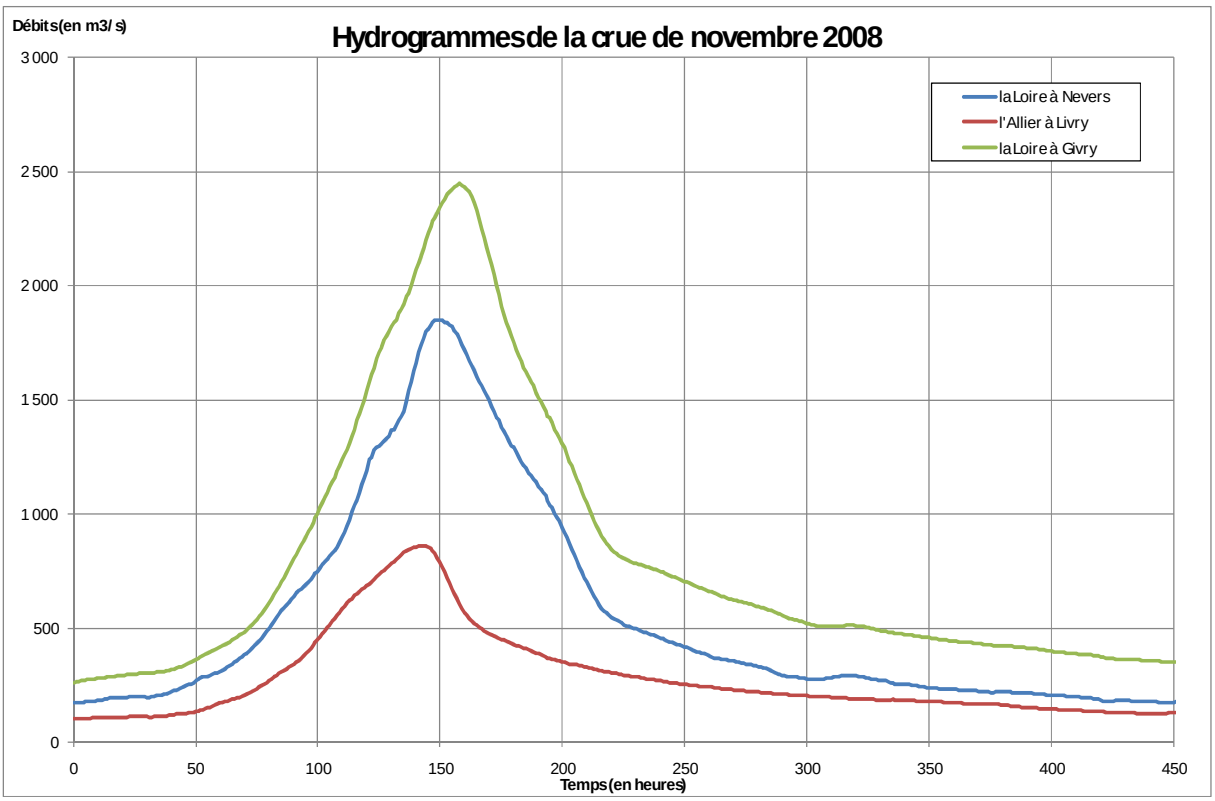


Figure 20 : Hydrogrammes des crues de calage de décembre 2003 et novembre 2008

III. L'intérêt du modèle Loire moyenne

III.1 Mise en évidence des mécanismes d'inondation

Pour simuler le fonctionnement du système de protection par levées et déversoirs, il a fallu concevoir et développer un système numérique adapté à la Loire. La modélisation retenue permet de simuler plusieurs mécanismes qui correspondent à différentes configurations Loire – levées – système de protection (en partant du plus bas vers le plus haut), telles que :

- Les deux vals protégés par un déversoir de grande longueur calé au terrain naturel (interruption de la levée) :
  - Val de la Charité avec le déversoir de Passy ;
  - Val de Léré avec le déversoir de la Madeleine.
- Le val du Bec d'Allier qui est protégé par un déversoir plus haut que le terrain naturel, sans fusible.
- Les vals non équipés de déversoirs, inondés suite à la surverse généralisée de la levée ou à l'apparition de brèche:
  - Val de Cours-les-Barres ;
  - Val de La Charité amont ;
  - Val de Léré amont.

Le modèle aide à mettre en évidence les mécanismes d'inondation en Loire : que ce soit, tout d'abord, les inondations directes subies par les communes en prise directe avec le fleuve, ou, du fait de l'existence du système de levées de la Loire moyenne structurant les mécanismes d'inondation des vals complexes qui rendent difficile la compréhension du risque pour les riverains.

Inondation du Val par remous dans l'affluent. Tous les vals non fermés à l'aval subissent ce type d'inondation. Le niveau d'eau dans le val est alors égal au niveau en Loire à l'extrémité aval de la levée. La présence de la levée permet de maintenir une différence de niveau entre la Loire et le val et protège donc ce dernier.
Dans les zones de confluence, l'écoulement change de sens lors des crues, de la Loire vers l'amont à la montée, selon le sens ordinaire à la décrue. Ces derniers écoulements peuvent être rapides parce que la Loire descend vite. La présence d'eau des deux côtés de la levée limite les risques de déstabilisation de ces ouvrages dans ces secteurs.

Inondation du val par fonctionnement d'un déversoir au terrain naturel. Il y a trois déversoirs de ce type en Loire moyenne : le déversoir de Passy dans le val de La Charité, le déversoir de la Madeleine dans le val de Léré et le déversoir de Gohier.

Inondation du val par fonctionnement d'un déversoir simple, plus haut que le terrain naturel, sans fusible. Il y a cinq déversoirs de ce type en Loire moyenne : le déversoir du Bec d'Allier dans le val du même nom, le déversoir de Saint-Martin-sur-Ocre dans le val de Gien, le déversoir de Dampierre dans le val du même nom, le déversoir de Mazan dans le val d'Ardoux.

Inondation du val par fonctionnement d'un déversoir plus haut que le terrain naturel, équipé d'un fusible. Il y a cinq déversoirs de ce type : le déversoir d'Ouzouer dans le val du même nom, le déversoir de Jargeau dans le val d'Orléans, le déversoir d'Avaray dans le val du même nom, le déversoir de Montlivault dans le val de Blois, les déversoirs du Vieux Cher et de La Chapelle-aux-Naux dans le val de Bréhémont.

La cote de déclenchement du fusible est définie par le point bas du fusible. Lorsque la Loire atteint ce niveau de déclenchement, le fusible s'efface jusqu'au niveau du seuil fixe et le débit entrant est défini par une loi de surverse sur ce niveau de seuil.

Inondation du val par ouverture d'une brèche dans la levée suite à une surverse. Ce type de brèche apparaît lorsque le niveau d'eau dépasse la cote de crête de la digue. La lame d'eau déversante peut alors attaquer le talus par érosion régressive, et engendrer une brèche dans la levée. Il s'agit de la première cause identifiée de rupture en Loire lors des trois crues du XIXème siècle.

Les principaux vals inondés suite à la surverse généralisée de la levée ou à l'apparition de brèches sont en Loire moyenne ceux de Cours-les-Barres, La Charité amont, Léré, Briare, Sully, Langeais et Authion.

Inondation du val par ouverture d'une brèche suite à une destablisitation de la levée. Lors des crues du 19ème siècle, de nombreuses brèches se sont ouvertes dans les levées avant que le niveau d'eau n'atteigne le sommet de la levée. Ces brèches ont été causées par différents phénomènes : infiltrations d'eau, érosion des pieds de levées, glissements de talus, etc.

Afin de mettre en évidence les mécanismes d'inondation en Loire moyenne et de caractériser l'aléa hydraulique de manière graduée, les simulations ont été effectuées pour 6 scénarios de crues de la Loire, constituées au Bec d'Allier par les apports de l'Allier et de la Loire. Les 6 scénarios tiennent compte du rôle écrêteur de crue du barrage de Villerest (considéré égal à 1 000 m^3/s au Bec d'Allier).

Ces crues sont associées aux périodes de retour suivantes au Bec d'Allier :

- 50 ans (4 200 m^3/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest, 5 200 m^3/s naturels) ;
- 70 ans (5 000 m^3/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest, 6 000 m^3/s naturels) ;
- 100 ans (6 000 m^3/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest, 7 000 m^3/s naturels) ;
- 170 ans (6 500 m^3/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest, 7 500 m^3/s naturels) ;
- 200 ans (7 000 m^3/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest, 8 000 m^3/s naturels) ;
- 500 ans (8 500 m^3/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest, 9 500 m^3/s naturels).

III.2 Retour d'expérience sur des crues réelles et mise en évidence du rôle de Villerest

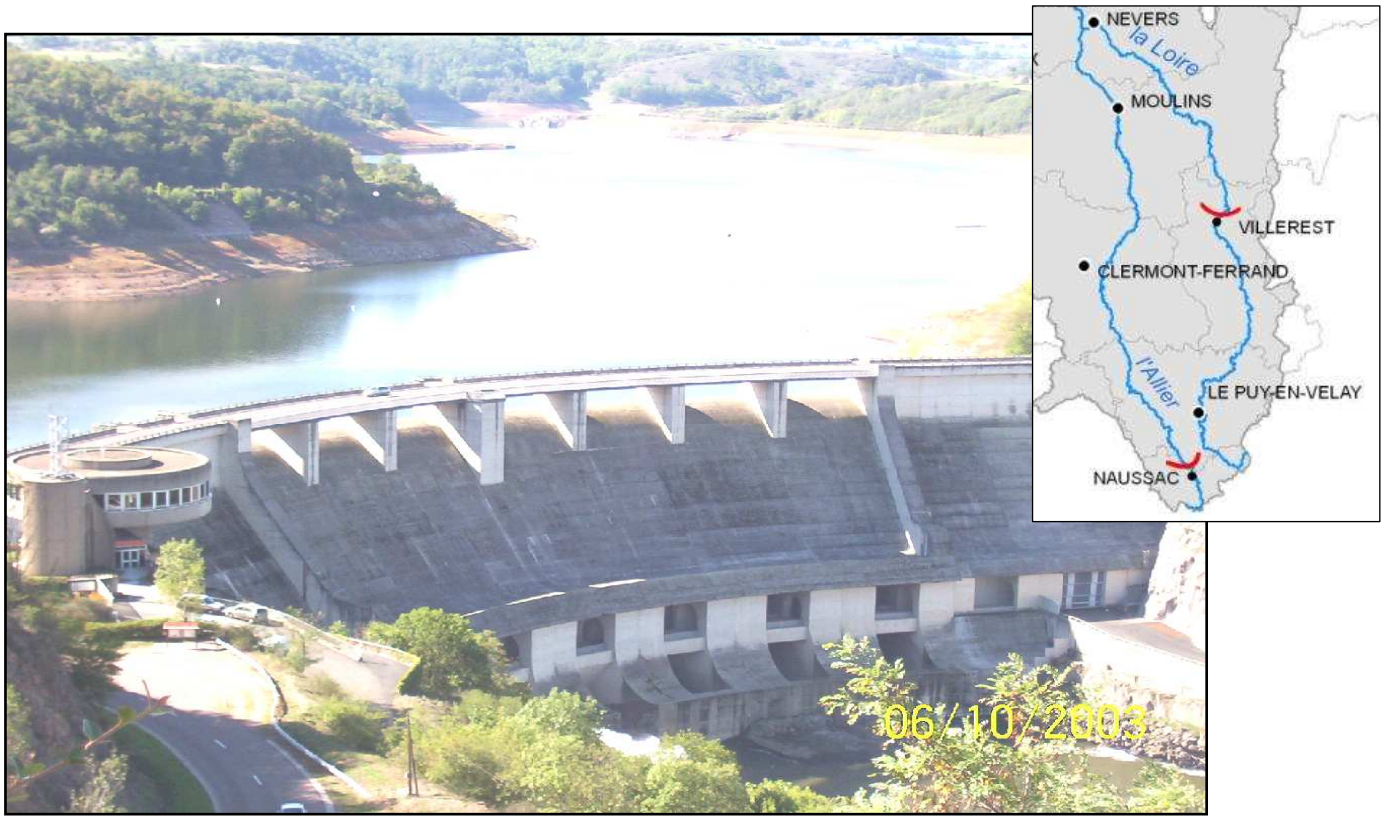
Le barrage de Villerest est opérationnel depuis 1984. Il s'agit du seul barrage ayant une fonction d'écrêtement des crues sur la Loire. Les autres barrages du bassin (dont Naussac, Grangent, etc.) ont des fonctions de soutien d'étiage ou de production hydroélectrique.

La retenue du barrage de Villerest s'étend sur 36 km entre Montrond-les-Bains et Roanne. Les fonctions de l'ouvrage, définies dans le décret du 18 avril 1977 déclarant d'utilité publique les travaux de construction du barrage de Villerest, sont :

- L'écrêtement des crues de la Loire ;
- Le soutien d'étiage.

La production d'énergie hydroélectrique est une fonction secondaire de l'ouvrage (production annuelle de 167 GWh).

Le principe de gestion du barrage consiste à contrôler le débit sortant en ouvrant plus ou moins les vannes mobiles de l'ouvrage, en fonction des débits prévus et observés à l'entrée de la retenue. Ainsi, au plus fort de la crue, le débit sortant est inférieur au débit entrant, ce qui atténue les niveaux maxima qui auraient été atteints à l'aval.



Le modèle hydraulique Loire moyenne a également été utilisé pour simuler des crues réelles, comme celles récentes de décembre 2003 et novembre 2008, afin de mettre en évidence les bénéfices du barrage de Villerest.

Dans un premier temps, il s'agissait de reconstituer la propagation de ces crues de Nevers jusqu'à Tours sur la base des données hydrologiques disponibles auprès du centre de gestion des crues et des étiages à la DIREN Centre à Orléans.

Puis, dans un second temps, l'analyse de la propagation de la crue avec et sans l'action du barrage de Villerest a permi d'évaluer le long du fleuve son rôle d'écrêtement ainsi que le bénéfice en termes de moindre sollicitation des levées et des déversoirs qu'il apporte.

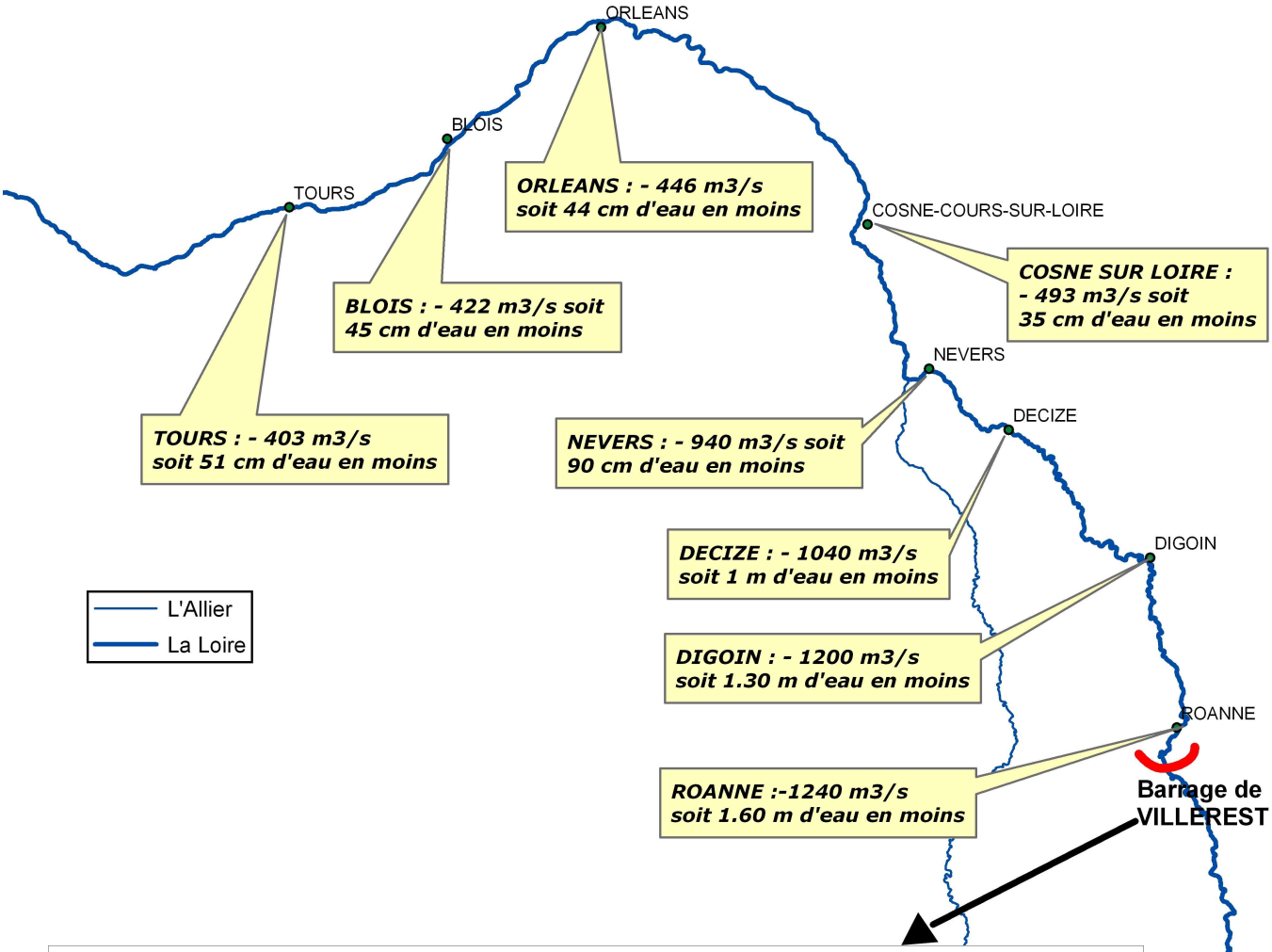
La crue de décembre 2003 :

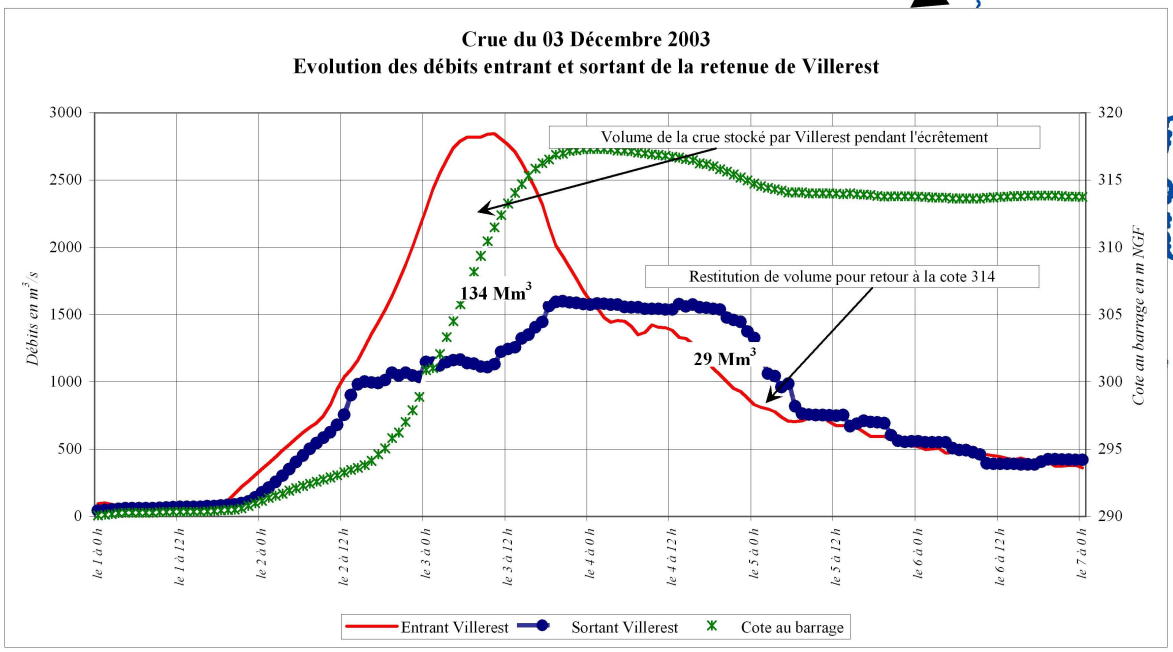
Il s'agit de la plus forte crue connue à Villerest depuis 1907. L'action du barrage de Villerest a permis de réduire son débit de 2900 m3/s à 1600 m3/s. Lors de cette crue, trois vals ont été inondés en Loire moyenne suite au fonctionnement des déversoirs : La Charité aval, Léré aval et le val de Gien.

D'après le modèle, sans Villerest, le val du Bec d'Allier aurait été inondé par remous. Par ailleurs, trois déversoirs auraient pu être sollicités sans l'action du barrage de Villerest : le déversoir du Bec d'Allier, celui de Dampierre et de La Bouillie à Blois car la revanche est comprise entre 0 et -0,20 m correspondant à l'incertitude issue du calage du modèle. Le déversoir de Léré aurait fonctionné de manière plus importante sans l'action du barrage de Villerest et celui de Saint-Martin d'Ocre aurait légèrement fonctionné.

Les schémas ci-après présentent l'impact du barrage de Villerest sur l'hydrogramme de crue et sur la ligne d'eau de la Loire. Le gain en ligne d'eau du barrage sur la Loire moyenne est de 35 à 90 cm suivant les secteurs.

Crue de Décembre 2003 sur la Loire : les effets de l'écrêtement par le barrage de Villerest.





La crue de novembre 2008 :

Lors de la crue de novembre 2008, le débit entrant était de 3 100 m^3/s au maximum, le débit sortant maximum a été de 1 750 m^3/s. La pointe de crue a ainsi été stockée dans la retenue, entraînant par ailleurs une élévation du niveau d'eau d'environ 12 m à l'amont de la retenue. L'écrêtement réalisé par l'ouvrage a permi d'abaisser les lignes d'eau maximales de l'ordre de 40 à 50 cm en Loire moyenne.

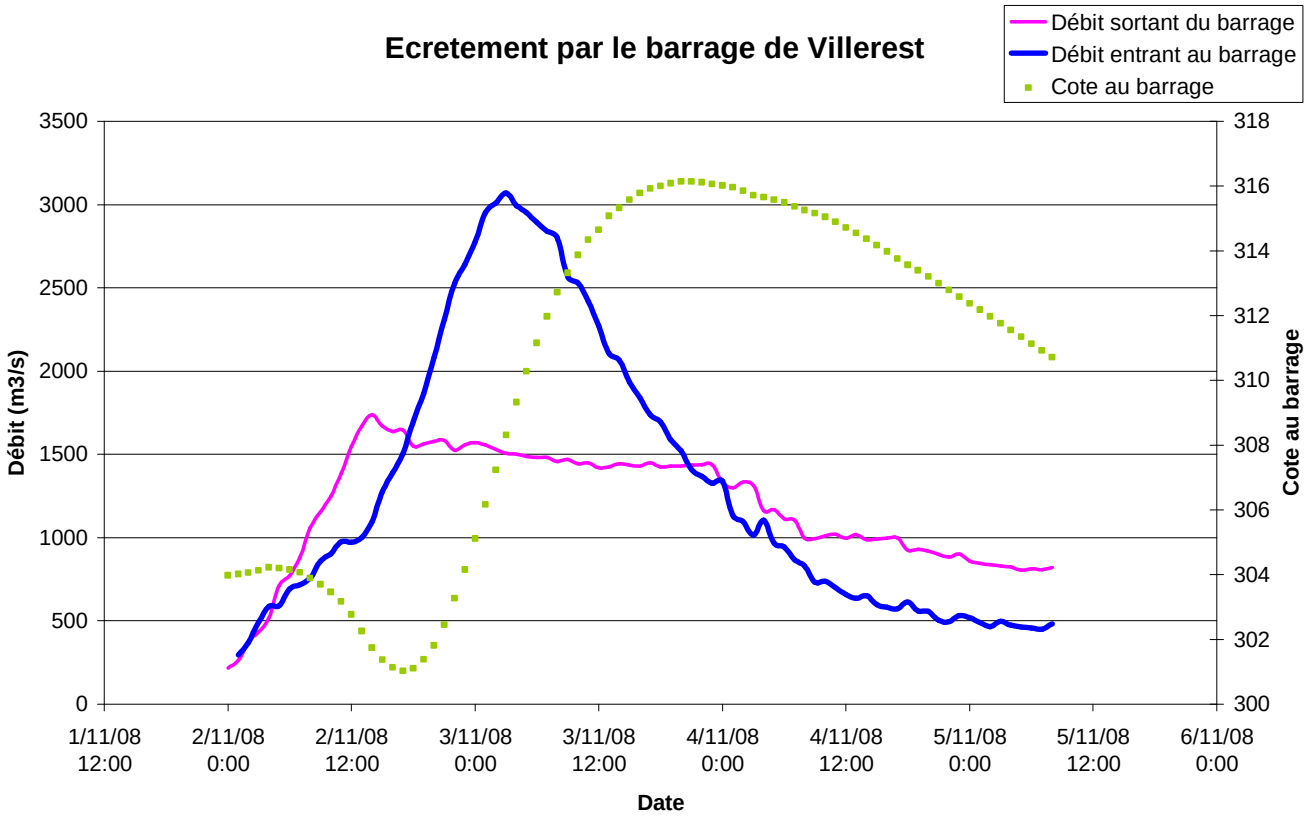


Table des figures

Figure 1 : Modélisation du val d'Ouzouer et de Sully sous Hydra 13
Figure 2 : Schématisation d'une liaison surverse 16
Figure 3 : Schématisation d'une liaison brèche 16
Figure 4 : Modification du modèle dans le secteur de Fourchambault 20
Figure 5 : Modification du modèle dans la traversée de La Charité 21
Figure 6 : MNT dans le val du Bec d'Allier 22
Figure 7 : Modification du déversoir du Guétin dans le modèle LM09 23
Figure 8 : MNT au niveau du déversoir de Passy 24
Figure 9 : Caractérisation du déversoir de Passy dans le modèle LM09 25
Figure 10 : MNT au niveau de déversoir de Passy 26
Figure 11 : Modification du déversoir de la Madeleine dans le modèle LM09 27
Figure 12 : Résultats du calage de LM98 et LM09 28
Figure 13 : Architecture du modèle LM10, entre Nevers-Livry et Montjean-sur-Loire 29
Figure 14 : Résultats du calage de LM10 30
Figure 15 : Points d'injection de débits dans LM98 33
Figure 16 : Carte des points d'injection d'hydrogrammes variables dans LM09 (Imphy-Moulins) 37
Figure 17 : Carte des points d'injection des débits constants dans le modèle LM09 39
Figure 18 : Hydrogrammes de la Loire écrêtés par Villerest injectés dans le modèle Loire Moyenne à Nevers 40
Figure 19 : Hydrogrammes de l'Allier naturels et écrêtés par le Veurdre injectés dans le modèle Loire Moyenne au Guétin 41
Figure 20 : Hydrogrammes des crues de calage de décembre 2003 et novembre 2008 44
Figure 21 : Principe de fonctionnement hydraulique des Vals du Bec d'Allier et de Cours-les-Barres 60
Figure 22 : Principe de fonctionnement hydraulique du Val de la Charité 62
Figure 23 : Principe de fonctionnement hydraulique du Val de Léré 64
Figure 24 : Principaux mécanismes d'inondation avant rupture par surverse mis en évidence lors de l'étude Loire moyenne de 1998 66
Figure 25 : Risque de rupture de levées par surverse selon l'étude Loire moyenne de 1998 67

Liste des Annexes

Annexe 1 - L'hydrologie des études hydrauliques en Loire moyenne
Annexe 2 - Connaissance des mécanismes d'inondation

IV. Annexe 1 : l'hydrologie des études hydrauliques en Loire moyenne

IV.1 L'étude hydrologique conduite par la DIREN Centre et par l'Equipe Pluridisciplinaire assistés par un groupe d'experts

L'étude hydrologique « Loire moyenne » a défini les hypothèses d'alimentation en eau du modèle Loire moyenne - construit et calé entre 1997 et 1999 par hydratec pour le compte de l'Etat, de l'Epala (EP Loire) et de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne - pour simuler la propagation des crues et pour évaluer dans quelles conditions hydrologiques et hydrauliques, le territoire Loire moyenne est susceptible d'être inondé.

Cette étude hydrologique est le résultat du travail de la DIREN Centre (DREAL Centre), de l'Equipe Pluridisciplinaire et d'un groupe d'experts en hydrologie qui a accompagné le Comité Technique de l'étude Loire moyenne dans la définition de l'hydrologie et qui a validé la démarche de définition des apports.

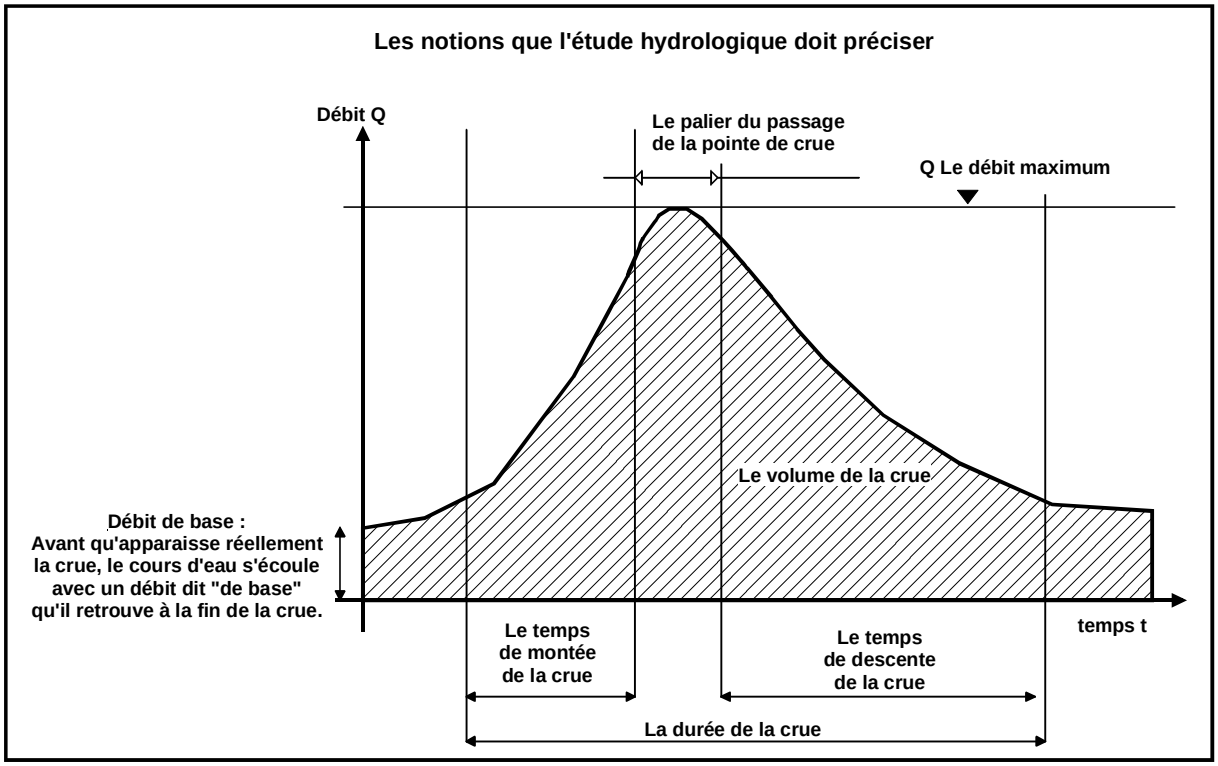
Le groupe d'experts a validé la quantification des débits variables en fonction du temps injectés dans le modèle de façon à disposer de scénarios cohérents avec les scénarios déjà utilisés dans les études antérieures, principalement ceux représentant la crue de 1866 en tenant compte aussi des particularités de la crue de 1866, et de décliner ces scénarios en fonction de la période de retour.

Des études hydrologiques spécifiques ont montré le caractère exceptionnel de la forme de la crue de 1856 (très fort débit de pointe et relativement faible volume dans la partie supérieure de l'hydrogramme), la forme plausible pour les crues très fortes étant plutôt celles de la crue de 1866 et de 1907 (fort débit de pointe et important volume).

Ces hypothèses hydrologiques servent à caractériser la fréquence d'apparition des différents mécanismes d'inondation incluant l'inondation directe des communes riveraines de la Loire, celle des vals par remous, le fonctionnement des déversoirs, la rupture de levées suite à leur submersion, etc.

La connaissance du déroulement des crues anciennes nous indique que tous ces phénomènes ne se produisent pas au même moment dans la progression de la crue et que leur réalisation dépend de l'importance de la crue. C'est la raison pour laquelle le modèle de simulation est utilisé en régime transitoire simulant successivement la mise en eau du lit et des vals, le passage de la pointe de crue et la descente des niveaux d'eau jusqu'à la fin de la crue.

Dans la pratique, pour alimenter le modèle, il faut définir, à chaque point d'injection du modèle de simulation, un hydrogramme représentant l'évolution des débits entrant dans le modèle en fonction du temps et en fonction de la période de retour. Chaque hydrogramme mesure la forme et l'importance de l'apport : temps de montée, débit au passage de la pointe de crue et forme de la pointe, temps de descente et, implicitement, volume d'eau que cela représente.



Avec ces données d'entrée, le modèle calcule, non seulement le déroulement de la crue en tout point donné de la Loire moyenne (pk modèle), mais encore son évolution du Bec d'Allier jusqu'à Montjean et évalue :

- Les délais d'apparition des atteintes, leur importance et leur durée,
- L'écrêtement de la pointe de crue consécutive à l'inondation des territoires, au fur et à mesure de sa progression vers l'aval et son renforcement suite aux arrivées des affluents de la Loire.

IV.2 La méthode, les études et les hypothèses utilisées pour définir l'hydrologie de l'étude Loire moyenne

La mise au point de l'hydrologie « Loire moyenne » s'appuie sur de nombreuses études menées depuis des décennies sur la Loire entre autre par le Service Hydrologique Centralisateur (aujourd'hui Service de Bassin de la DIREN Centre – DIREN de Bassin) et sur de multiples résultats concernant les crues historiques de 1856, 1866 et 1907.

La démarche méthodologique a suivi les quatre étapes suivantes :

- **La méthode du Gradex**

Elle apporte en fonction de la période de retour, à partir du débit moyen naturel sur 5 jours au Bec d'Allier, le volume de la crue et le débit de pointe naturel.

- **Les études du SHC réalisées à partir de 1975**

Elles apportent la méthode statistique de construction des hydrogrammes des crues naturelles synthétiques.

- **Les études sur le rôle et l'action du barrage de Villerest**

Elles donnent la transformation que le stockage dans la retenue et l'écrêtement par inondation de la vallée de la Loire entre Roanne et Nevers, occasionnent à l'hydrogramme de crue naturelle à Nevers. Elles produisent l'hydrogramme de crue synthétique de la Loire à Nevers influencé par le barrage de Villerest.

- **Les analyses sur les apports importants de la partie aval de la Loire moyenne**

Elles conduisent à conclure qu'une hydrologie robuste et simple, comme celle reconstituée pour la crue type 1856, est suffisante dans le cadre de l'étude Loire moyenne pour conduire le diagnostic hydraulique du tronçon de Loire compris entre le Val de Bréhémont et les Pont-de-Cé. Ce scénario hydrologique est d'abord réaliste en tant que généré par la partie « océanique » de la pluie mixte. Son utilisation est conforme à l'usage technique consistant à fixer certains paramètres pour en étudier d'autres, puisqu'il rend possible la compréhension du fonctionnement de la Loire dans ces secteurs en limitant l'analyse aux cas d'étude les plus productifs d'enseignements.

IV.3 La méthode du Gradex

C'est la méthode recommandée par le Comité International des grands barrages pour l'estimation des crues de projet pour la conception des barrages. Le postulat de base de la méthode du Gradex est qu'il doit y avoir une relation entre la distribution statistique des débits et celle des pluies génératrices puisque les débits sont formés par les pluies.

Dans certaines conditions d'écoulement extrêmes (crues très fortes), le sol est si saturé que tout accroissement de pluie va se traduire, en terme de volume - débit moyen sur une durée T - par le même accroissement en débit. Autrement dit tout ce qui est précipité, ruisselle. Le calcul du volume susceptible de ruisseler lorsqu'on dépasse sur le bassin versant de la Loire, la saturation, nécessite un premier choix : celui de la durée de la pluie à considérer. Cette durée correspond au temps caractéristique du bassin versant visible sur les hydrogrammes des crues fortes de la Loire après la confluence de l'Allier.

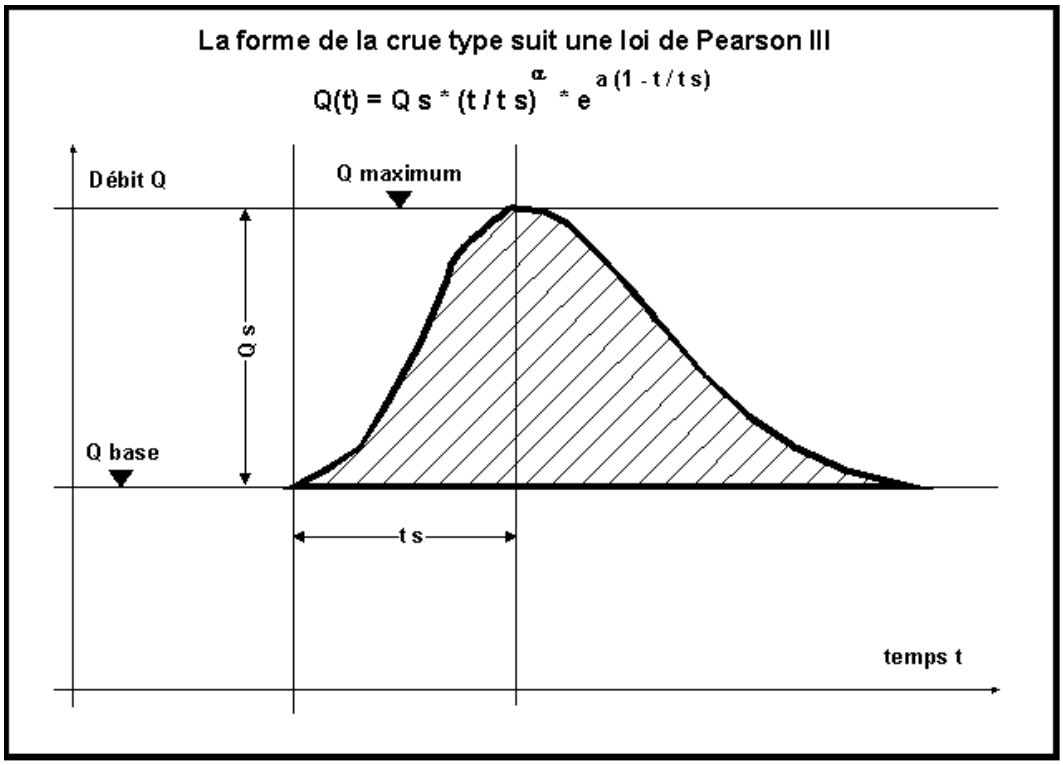
Les hydrogrammes reconstitués pour les crues très fortes du passé fixent le choix d'un temps caractéristique de 4 jours pour la Loire à Nevers et pour l'Allier au Veurdre et de 5 jours pour la Loire au Bec d'Allier.

Un second choix est nécessaire dans la suite du calcul. Il concerne l'évaluation du rapport (p) entre le débit de pointe de la crue et le débit moyen sur 5 jours. En considérant les hydrogrammes reconstitués, nous retenons la valeur (p) = 1,6 à Givry – Bec d'Allier – 1,5 à Nevers et 1,8 au Veurdre.

IV.4 Les hypothèses sur la forme de l'hydrogramme de la crue

Les études réalisées par le SHC pour définir la forme de l'hydrogramme de la crue, ont porté sur un échantillon constitué de l'ensemble des crues fortes et très fortes reconstituées par le Service de 1852 à 1980.

Pour les débits de crue de l'échantillon ayant atteint ou dépassé les valeurs de 2000 m^3/s à Givry, 1500 m^3/s à Nevers et 800 m^3/s au Veurdre, en ne retenant alors que la partie de l'hydrogramme pour laquelle le débit était supérieur à 0,6 Qmax, il a été constaté que la forme de la crue est bien décrite par une loi statistique hydrologique de PEARSON type III.



IV.5 Des hydrogrammes de crue naturelle aux hydrogrammes influencés par le barrage de Villerest

Connaissant par la méthode du Gradex, le débit de pointe et le volume d'une crue pour une période de retour donnée et sa forme par la Loi de Pearson III, l'Equipe pluridisciplinaire a pu, pour la première fois, construire les hydrogrammes naturels pour la Loire à Nevers et l'Allier au Veurdre pour différentes périodes de retour comprises entre la cinquantennale et la millénale.

Si l'hydrogramme de l'Allier au Veurdre est encore naturel, celui de la Loire à Nevers est aujourd'hui influencé par le barrage de Villerest.

La méthode de définition de l'hydrogramme synthétique écrêté par le barrage de Villerest à Nevers utilisée par l'Equipe pluridisciplinaire a consisté à enchaîner, pour chaque période de retour de crue étudiée, les opérations suivantes :

- La propagation de Roanne à Nevers de l'hydrogramme synthétique de la Loire à Villerest. Cet hydrogramme est construit selon la même méthode que l'hydrogramme synthétique à Nevers – sans tenir compte du barrage de Villerest. Il est propagé avec le modèle de simulation des crues construit en 1996 par le Bureau d'Etudes Techniques HORIZONS (aujourd'hui rattaché à SAFEGE) lors d'une étude précédente pour le compte du Service de Bassin Loire Bretagne de la DIREN Centre.

- Le calcul de la différence entre l'hydrogramme synthétique à Nevers et l'hydrogramme à Villerest propagé. Cette différence est supposée correspondre aux apports intermédiaires - entre autre du Morvan – qui arriveront aussi en Loire lorsque le barrage de Villerest fonctionnera.

- L'écrêtement de l'hydrogramme synthétique de la Loire à Villerest avec le logiciel du Centre de Gestion du réseau CRISTAL et la propagation jusqu'à Nevers avec le modèle de simulation de crue de la DIREN Centre. Ils donnent l'hydrogramme synthétique de Villerest influencé par le barrage arrivant à Nevers.

- L'addition de cet hydrogramme avec l'hydrogramme représentant les apports intermédiaires issu du calcul 2 et le lissage de la somme donnent enfin l'hydrogramme synthétique écrêté par le barrage de Villerest à Nevers.

IV.6 Le barrage de Villerest et ses modalités de gestion

Le barrage de Villerest par décret du 4 mai 1983 est un ouvrage à buts multiples. Ses fonctions principales sont l'écrêtement des crues et le soutien d'étiage. La production d'électricité et l'utilisation touristique estivale du site sont des fonctions secondaires.

Le barrage est un ouvrage poids arqué en béton de 70 mètres de haut pour une largeur en crête de 469 mètres.

Sa crête est au niveau 325 mètres. Les organes d'évacuation consistent en :

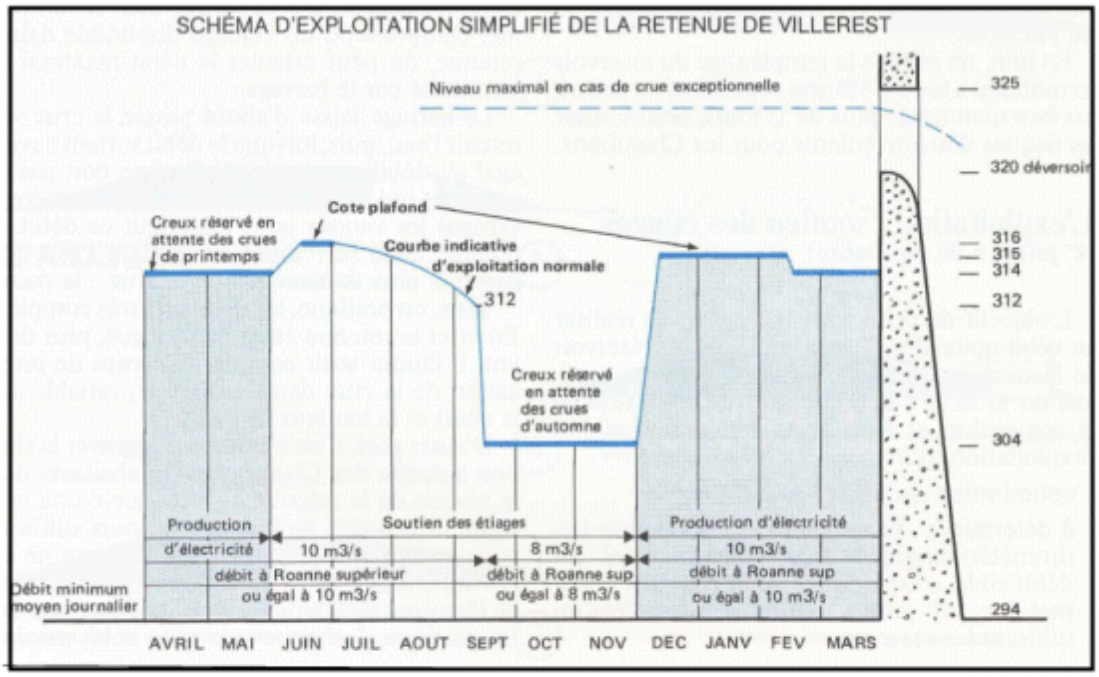
- Un déversoir de surface calé à 320 mètres.
- Cinq pertuis de demi-fond calés au niveau 290 mètres,
- Un pertuis de faibles débits calé au niveau 280 mètres,
- Un pertuis de fond du barrage calé au niveau 270 mètres,

La tranche inférieure du volume de retenue est située sous le niveau 290 mètres, elle représente une capacité de 15 millions de m^3.

La tranche moyenne est définie entre les niveaux 290 et 316 mètres. A 316 mètres, la tranche supérieure commence, le plan d'eau occupe 770 hectares, le volume d'eau retenu est de 128 millions de m^3.
A 320 mètres, le plan d'eau occupe 1700 hectares, le volume d'eau retenu est de 165 millions de m^3. A 324 mètres, le plan d'eau occupe 2300 hectares, le volume d'eau est de 238 millions de m^3. Si le plan d'eau atteint ce niveau, le déversoir du barrage évacue 8500 m^3/s.

Le règlement d'eau définit le schéma d'exploitation du barrage de Villerest :

- Du 1er décembre au 15 décembre, la cote de la retenue n'excède pas 315 mètres. L'amplitude maximale des variations journalières de niveau est inférieure à 0,5 mètres.
- Du 15 décembre au 31 mai, la cote de retenue est comprise entre 313,5 et 314 mètres pour le stockage éventuel d'une crue de printemps.
- A partir du 1er juin, le niveau de la retenue est relevé jusqu'à la cote maximale de 316 qui n'est pas maintenue plus de quinze jours ; au-delà de ces quinze jours, la cote est ramenée dans un nouveau délai maximal de 15 jours à une valeur au plus égale à 315,5 mètres. Le niveau de la retenue descend pour assurer le soutien d'étiage.
- Du 15 septembre au 15 novembre, la cote de retenue ne dépasse pas 304 mètres pour le stockage éventuel d'une crue d'automne.



Nota : Le Comité de Gestion Technique des Réservoirs de Naussac et Villerest (CGTRNV) a décidé en 1999 de garantir un débit au pied de l'ouvrage de Villerest de 12 m^3/s toute l'année.

Pour la préservation du château de La Roche situé dans le lac de la retenue, la commission locale de concertation a préconisé de limiter la cote en juin à 315,30 NGF maxi.

Le rôle complémentaire de la retenue dans le soutien d'étiage explique pourquoi le creux réservé est plus important dans l'attente des crues d'automne que celui dans l'attente des crues de printemps.

Le principe de gestion du barrage enchaîne 5 phases :

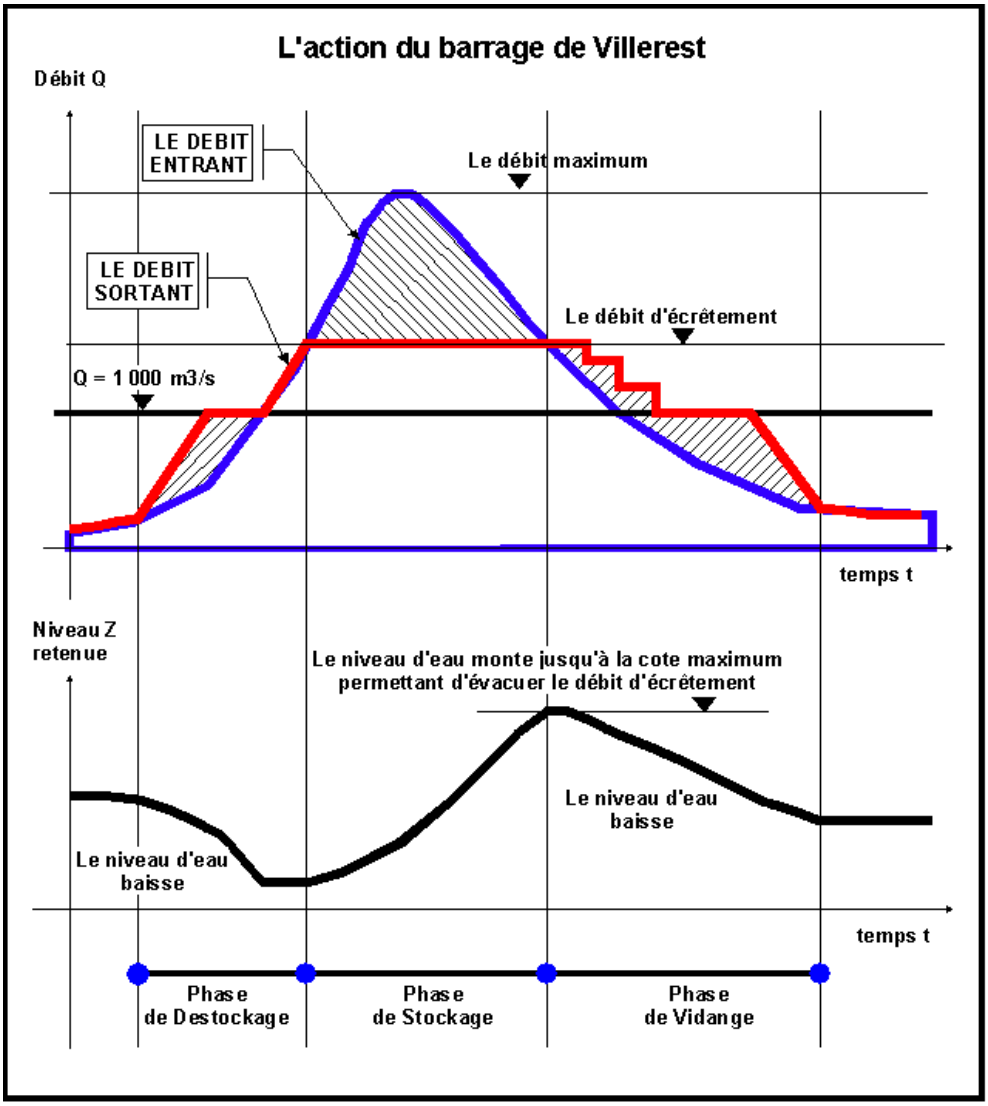
Phase 1 : la définition de l'état de risque de crue. Cela se produit lorsque des pluies supérieures à 50 mm sont mesurées sur un au moins des pluviomètres témoins dans le bassin versant ou si la Loire atteint 350 m^3/s à Bas-en-Basset. Dans cet état, du 10/9 au 30/11, le niveau dans le barrage est descendu à 304 mètres et du 1/12 au 9/9 le niveau est descendu à 314 mètres.

Phase 2 : la définition de l'état de crue. Cela se produit lorsque 1000m^3/s sont prévus à Feurs ou 1000 m^3/s sont constatés à Montrond, Feurs ou à l'entrée du barrage. Dans cet état, il y a astreinte et permanence obligatoire et recherche de la prévision du débit maximum de la Loire au barrage.

Phase 3 : le destockage de la retenue est mis en œuvre pour créer le plus grand creux possible avant l'arrivée de la pointe de crue.

Phase 4 : le stockage et l'écrêtement de la crue sont effectifs, le barrage restitue à l'aval moins d'eau qu'il n'en reçoit à l'amont. Cette phase commence une fois que le débit maximum arrivant au barrage est prévu, que le débit d'écrêtement et le niveau pour atteindre ce débit en sortie est calculé. Elle s'arrête lorsque ce niveau est atteint et, donc que le débit entrant dans le barrage est égal au débit sortant.

Phase 5 : le retour à la cote normale est recherché en augmentant le débit envoyé à l'aval.



Notons que le modèle complet définissant les modalités de gestion du barrage pour les trois phases de destockage, stockage et vidange, est secouru par différentes procédures de calcul ce qui garantit, même en mode dégradé d'acquisitions des données nécessaires pour gérer le barrage, un écrêtement important de la crue.

V. Annexe 2 : Connaissance des mécanismes d'inondation

Ce chapitre reprend les principaux résultats issus du document « Crues Loire moyenne - Résultat des crues fortes et très fortes simulées en Loire moyenne » dans la situation de référence 1998.

V.1 Vals du Bec d'Allier et de Cours-les-Barres

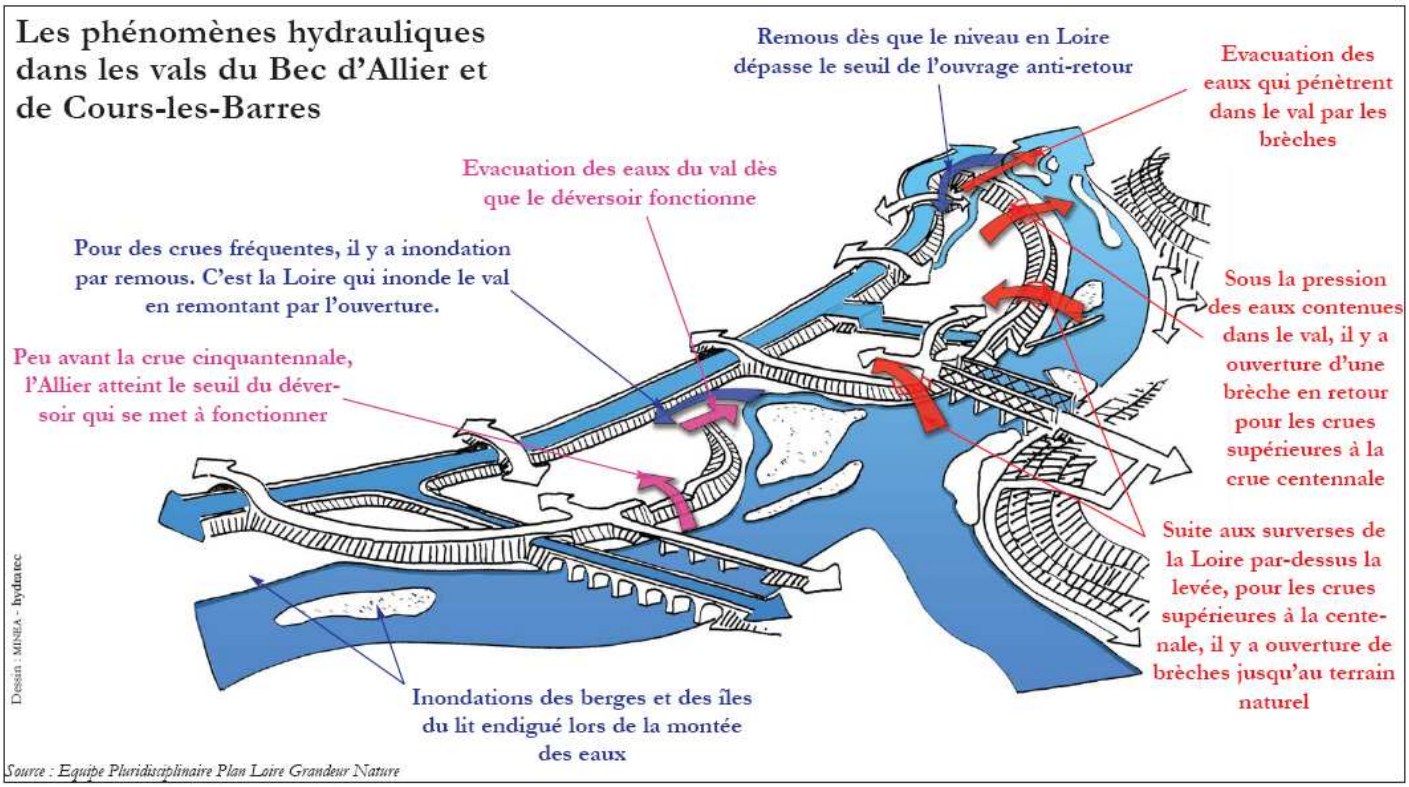


Figure 21 : Principe de fonctionnement hydraulique des Vals du Bec d'Allier et de Cours-les-Barres (Source EPLoire-Minéa-hydratec)

V.1.1 Inondations du val du Bec d'Allier dans le modèle LM98

Le val est d'abord inondé par remous de la Loire pour un débit faible, bien inférieur aux débits maxima simulés par le modèle. Le déversoir entre ensuite rapidement en fonctionnement pour une crue de 2 200 m^3/s sur l'Allier correspondant dans les crues types simulées à une crue tout juste inférieure à la crue cinquantennale au Bec d'Allier.

L'inondation dépasse 1 m de hauteur moyenne pour ce niveau de crue et augmentera régulièrement avec le niveau de crue au Bec d'Allier pour atteindre au maximum 5 m de hauteur pour la crue cinq-centennale.

V.1.2 Inondations du val de Cours-les-Barres dans le modèle LM98

La levée de ce val n'est pas protégée par un déversoir de sécurité. Elle laisse s'écouler la Canche à travers un ouvrage anti-retour partiel en deux parties : un déversoir coté à un niveau qui devrait empêcher les crues inférieures à la crue décennale de pénétrer dans le val, et le cours calibré de la Canche qui peut être obturé par une porte jusqu'à ce même niveau. Les inondations par remous dans la Canche par-dessus le déversoir de l'ouvrage anti-retour ont lieu pour toutes les crues simulées. Elles vont en s'amplifiant avec le niveau de crue.

Pour la crue centennale, la Loire atteint le sommet de la levée en plusieurs points entre Givry et Le Poids de Fer. La levée n'étant pas munie de banquette dans cette zone, on se trouve alors à la limite de la surverse sur une centaine de mètres. La revanche moyenne disponible sur l'ensemble du val est de 50 cm.

Pour les crues de périodes de retour supérieures à 100 ans, le modèle simule des ouvertures de brèches suite à des surverses par-dessus le sommet de la levée entre Givry et Le Poids de Fer, ce qui a pour conséquence l'inondation généralisée du val avec des hauteurs maximales de l'ordre de 4 m. Le niveau à l'aval amènera vraisemblablement l'eau contenue dans le val à passer par-dessus la levée pour retourner en Loire et rompre la levée "en retour" en Loire.

La situation s'aggrave pour la crue cinq-centennale : malgré l'ouverture de plusieurs brèches, la crue s'appuie sur la banquette pendant environ 1,5 jours tout le long de la levée en amont du pont et passe par-dessus la levée depuis le pont de Fourchambault jusqu'aux Grévelins, soit sur plus de 6 kilomètres. La levée risque d'être endommagée sur une grande part de cette longueur où plusieurs ouvertures de brèches ont été simulées. En amont du pont de Fourchambault, une ouverture de brèche a été simulée suite à une surverse au niveau d'une interruption de la banquette qui n'aurait pas été protégée. L'inondation dans le val atteint des hauteurs maximales de l'ordre de 5 m.

Le tablier du pont de Fourchambault est atteint, sans embâcle végétal, par la crue centennale. Toutes les crues plus fortes submergeront le pont et risquent de déstabiliser le tablier.

V.1.3 Inondations de Fourchambault et de Marseille-lès-Aubigny dans le modèle LM98

Les quais de Fourchambault sont inondés par débordement latéral dès les premières crues simulées. L'inondation s'étend par remous dans le ruisseau du Riot, inondant des quartiers de la ville, des deux côtés de la voie ferrée. La situation pourrait être aggravée en cas de crue concomitante du Riot.

La ligne de maisons située entre la Loire et le canal latéral à Marseille-les-Aubigny est inondée dès les premières crues simulées. Elle est soumise à de fortes vitesses d'écoulement. L'inondation s'étendra par remous de la Loire dans l'Aubois, qui pourrait aggraver localement l'inondation s'il était aussi en crue et n'arrivait pas à déboucher correctement en Loire.

V.2 Val de La Charité

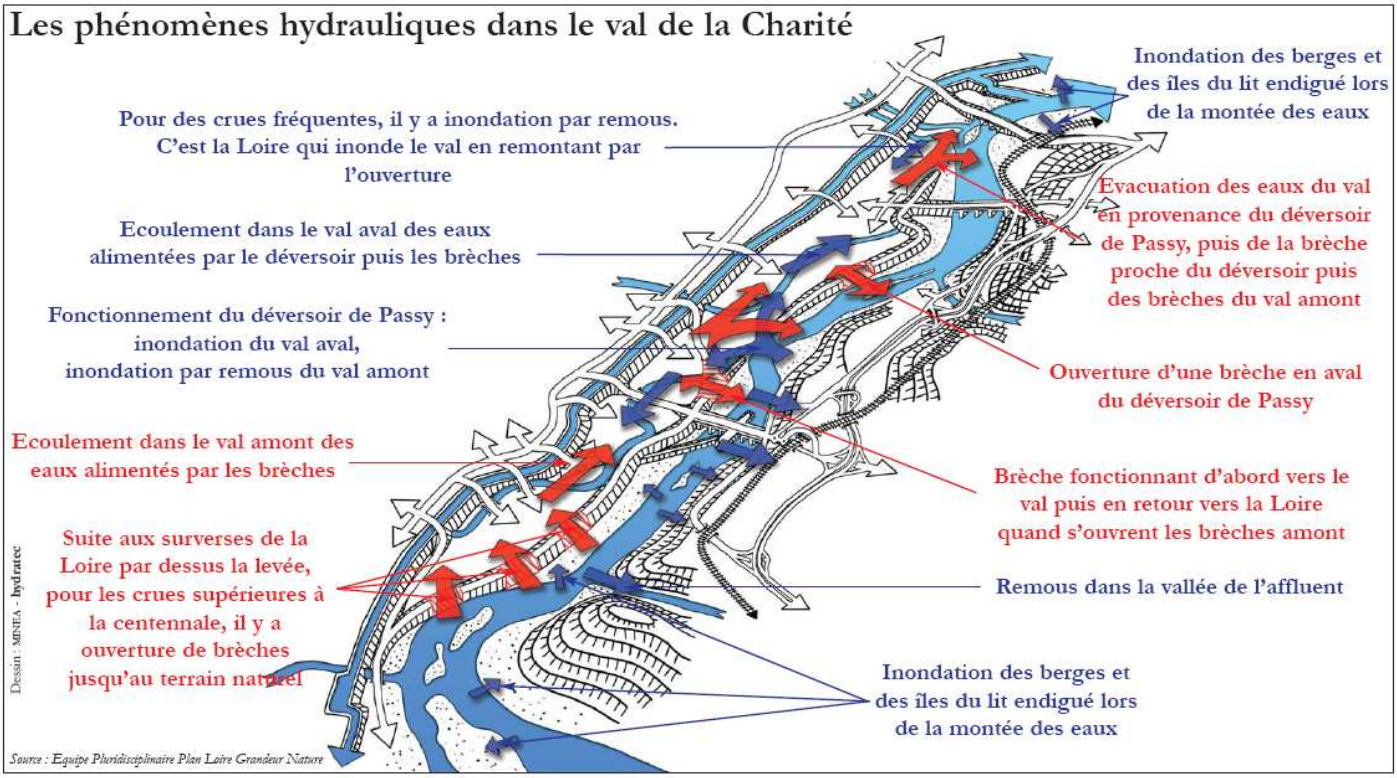


Figure 22 : Principe de fonctionnement hydraulique du Val de la Charité (Source EPLoire-Minéa-hydratec)

V.2.1 Inondations du val de la Charité dans le modèle LM98

Les premières inondations ont lieu par remous dans le val, dans le secteur de Couargues pour une période de retour entre décennale et vingtennale.

Le déversoir de Passy, situé au terrain naturel entre en fonctionnement pour un débit au Bec d'Allier de 4 000 m^3/s environ, soit une crue légèrement inférieure à la cinquantennale. Il fonctionne donc pour toutes les crues simulées.
Son fonctionnement entraîne non seulement l'inondation du val de Passy-Couargues, situé en aval, mais aussi celle du val de Beffes-Argenvières par remous dans le val. Le remous inonde La Chapelle-Montlinard pour la crue cinquantennale et Saint-Léger-le-Petit pour la crue centennale.
Les hauteurs d'eau maximales dans le val de Passy-Couargues atteignent 1 à 2 m pour la crue cinquantennale et 2 à 3 m pour la crue centennale.

A partir de la crue centennale, les premières surverses par-dessus la levée apparaissent en amont et en aval du pont de la Charité, entraînant l'ouverture de brèches de 200 m de long dans le modèle. Il est à noter que la brèche en amont du pont n'a pas été modélisée.

La crue de temps de retour 170 ans au Bec d'Allier atteint le sommet de la banquette et surverse en trois points du val amont : en amont de la station de pompage de Beffes, au Trou des Rauches et vers la station de pompage au droit de Saint-Léger-le-Petit. Ces surverses déclenchent l'ouverture de brèches dans le modèle et l'inondation de la totalité du val avec des hauteurs d'eau maximales de 3 à 4 m dans le val de Beffes-Argenvières et 2,5 à 3 m dans le val de Passy-Couargues.

Une partie du débit entrant par les brèches du val amont ressort du val par le déversoir de Passy et par la brèche située en aval du pont de la Charité qui fonctionne alors en retour en Loire. Cette brèche et le déversoir fonctionnent donc d'abord dans le sens Loire - val puis dans le sens val - Loire au cours de la crue.

D'après le modèle, les crues deux-centennale et cinq-centennale surversent et ouvrent des brèches aux mêmes endroits. Les hauteurs d'eau atteignent 4 à 5 m dans le val amont et 3 à 4 m dans le val aval pour la crue cinq-centennale.

Les débits qui entrent dans le val amont par les brèches sont très élevés : jusqu'à 500 m^3/s pour la crue de période de retour 170 ans et 2 000 m^3/s pour la crue cinq-centennale d'après les résultats du modèle. Ces résultats sont à prendre avec précaution car ils correspondent à une géométrie de brèche spécifique, définie lors de la modélisation en fonction des observations effectuées pendant les crues de 1856 et 1866 et qui ne correspondra pas forcément à la géométrie des brèches susceptibles de s'ouvrir dans la réalité.

V.2.2 Inondations hors du val de la Charité dans le modèle LM98

Les communes de La Marche, La Charité (quais et île), Mesves, Pouilly (quais) et Saint-Satur (zone de Saint-Thibault) sont inondées par débordement latéral de la Loire dès les premières crues simulées.
Les communes les plus touchées sont Mesves, où les inondations peuvent être aggravées par une crue concomitante du Mazou, Saint-Satur, en particulier le secteur de Saint-Thibault, et l'île de la Charité.

V.2.3 Inondations à l'ouest du canal latéral à la hauteur du val de la Charité dans le modèle LM98

Les secteurs situés à l'ouest du canal latéral sont théoriquement soustraits des atteintes directes de l'inondation de la Loire par le canal. Or, il existe dans le secteur situé entre le coteau et le canal un risque d'inondation soit par les affluents de la Loire (Moule, Vauvise, etc.) qui passent en siphon sous le canal pour rejoindre la Loire, soit par remontée et affleurement de la nappe phréatique du val. L'inondation à l'ouest du canal dépendra de l'ampleur des apports de ces affluents et de la capacité résiduelle d'évacuation des exutoires existants et des pompages de secours.
La jonction en Loire du canal latéral à Saint-Satur dispose de deux portes de garde contre les crues, l'une en Loire, l'autre au niveau de la digue du canal.

V.3 Val de Léré

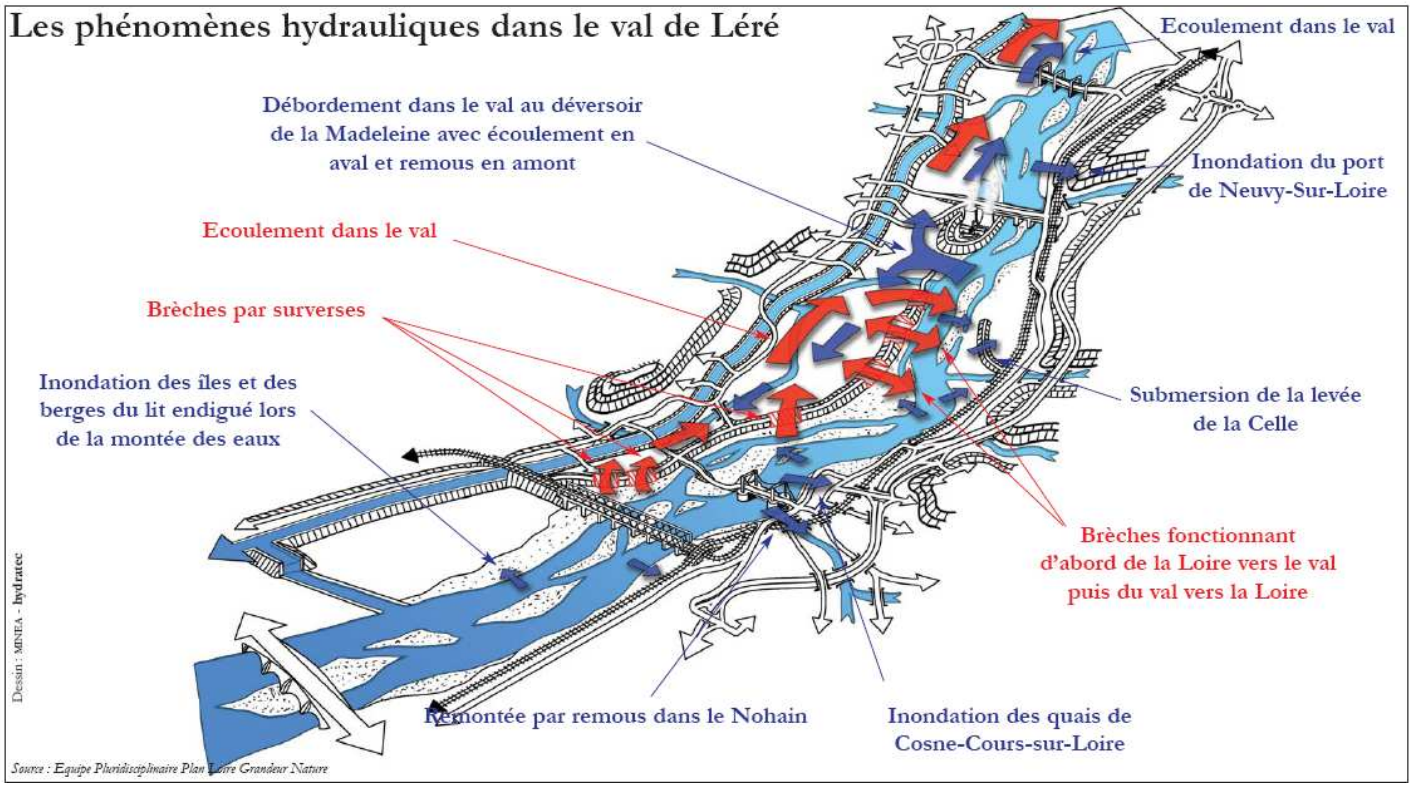


Figure 23 : Principe de fonctionnement hydraulique du Val de Léré (Source EPLoire-Minéa-hydratec)

V.3.1 Inondations du val de Léré dans le modèle LM98

Le val de Léré est inondable d'abord par le remous de Loire qui vient de l'aval de la centrale nucléaire et s'étend vers l'amont en longeant le coteau. Il apparaît pour une crue de période de retour 3 à 5 ans, lorsque le déversoir au terrain naturel au droit de la confluence avec la Judelle entre en fonctionnement pour une période de retour de 5 ans. Le remous ne remonte pas nettement plus en amont avant que la partie déversoir de la digue de la Madeleine ne se mette en fonctionnement.

Pour la première crue simulée (de niveau cinquantennal), le secteur entre Belleville et la centrale est inondé avec une hauteur moyenne de 2 m. Le remous remonte en amont de Léré, dans la rivière Judelle jusqu'au hameau de Grouzeau avec des hauteurs maximales moyennes de 1 m.

L'inondation pour la crue centennale remonte à mi-chemin entre Léré et Boulleret avec des hauteurs d'eau maximales moyennes de 3 m. La crue dépasse le sommet de la levée et s'appuie sur la banquette existante en quatre sites : au droit de la Chevrette de l'Ile de Cosne, face à Myennes, à la Motte et à l'amont de la Madeleine. Le modèle simule une brèche sur ce dernier site suite à une surverse par-dessus la levée.

La crue deux-centennale atteint le sommet de la levée sur 80 % de sa longueur et s'appuie sur la banquette. Elle surverse en plusieurs endroits. Le modèle ouvre des brèches dans le secteur de la Madeleine et dans le secteur des Fouchards et du Rognon, en amont du val. Le val est alors totalement inondé.

La crue cinq-centennale ouvre des brèches aux mêmes endroits. Les hauteurs maximales moyennes d'inondation du val vont de 3 m à 5 m.

Le pont de St-Satur est un pont récent. Les arches disposées vers les rives sont basses, pour se raccorder à la route d'accès qui est au niveau du sol ou presque. Elles se mettent en charge partiellement dès la crue cinquantennale. Il ne se met jamais totalement en charge pour aucune crue simulée.

Le pont Aubry et le pont de Neuvy ne sont jamais en charge et disposent d'un tirant d'air suffisant quelle que soit la crue simulée. Le pont de Cosne est partiellement mis en charge pour la crue deux-centennale.

La centrale nucléaire est hors d'eau quelle que soit la crue simulée.

V.3.2 Inondations hors du val de Léré dans le modèle LM98

Des inondations se produisent dans la zone de confluence du Nohain à Cosne-Cours-sur-Loire et de la Vrille à Neuvy-sur-Loire. L'inondation s'étendra par remous de la Loire dans ces affluents, qui pourraient aggraver localement l'inondation s'ils étaient aussi en crue et n'arrivaient pas à déboucher correctement en Loire.

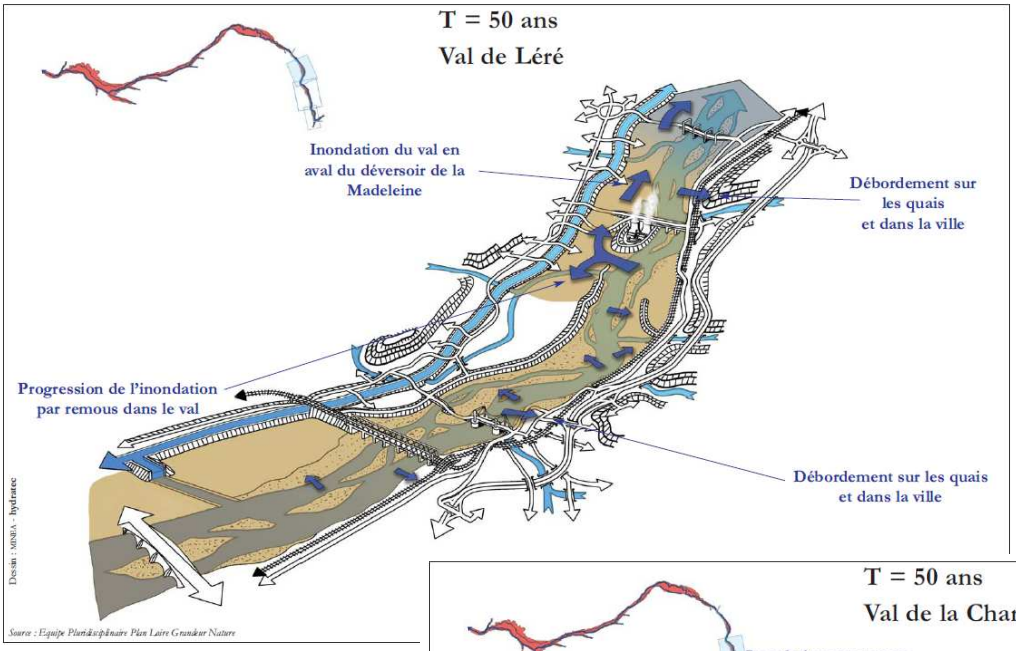
V.3.3 Inondations à l'ouest du canal latéral à la hauteur du val de Léré dans le modèle LM98

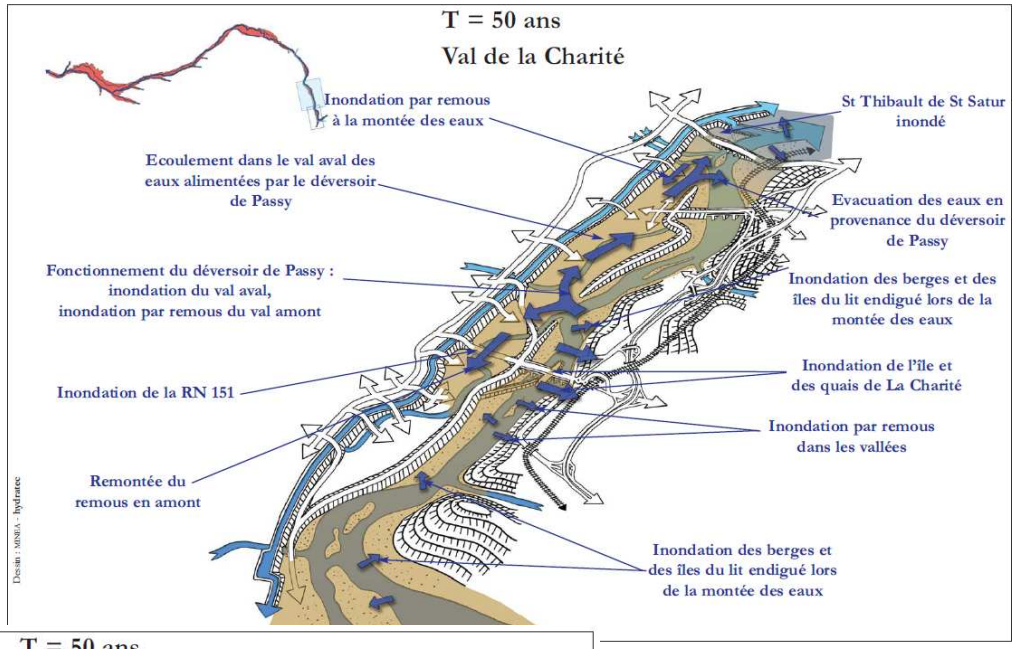
Le canal latéral situé en rive gauche de la Loire protège en partie de l'inondation les secteurs situés à son ouest. Il existe dans le secteur situé entre le coteau et le canal un risque d'inondation par les affluents de la Loire qui passent en siphon sous le canal pour rejoindre la Loire. L'inondation à l'ouest du canal dépendra de l'ampleur des apports de ces affluents et de la capacité résiduelle d'évacuation des exutoires existants et des pompages de secours.

Un risque d'inondation par remontée de la nappe, passant sous le canal, existe également dans ce secteur.

Des inondations ont eu lieu dans ce secteur à deux reprises en 2001 (printemps et été) alors que la Loire n'était pas en crue. De telles inondations pourraient se reproduire dans des conditions similaires lors d'une crue de la Loire.

Figure 24 : Principaux mécanismes d'inondation avant rupture par surverse mis en évidence lors de l'étude Loire moyenne de 1998





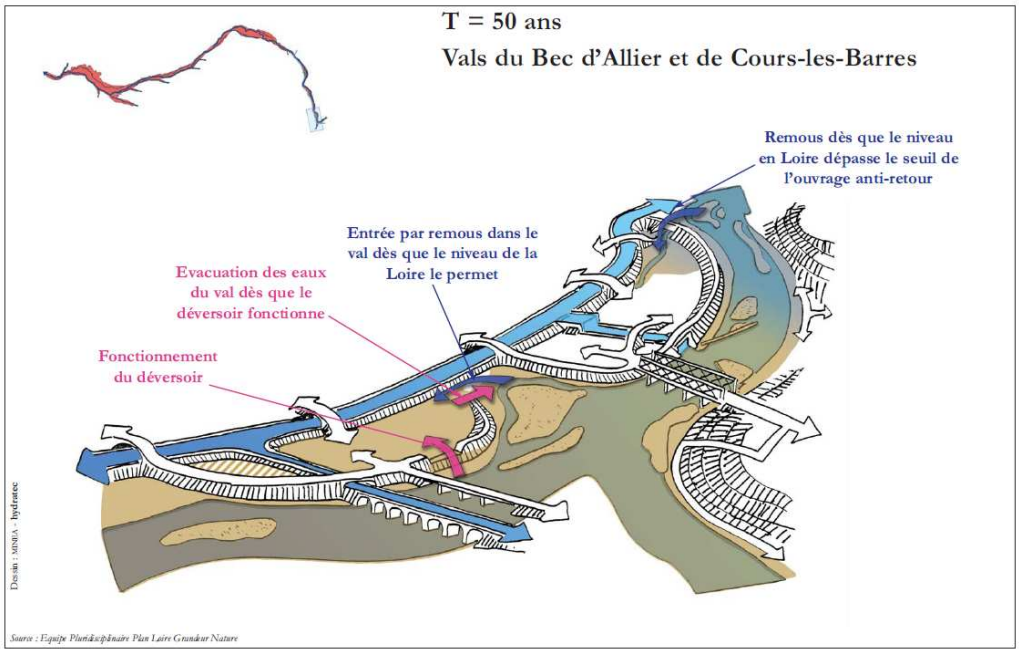
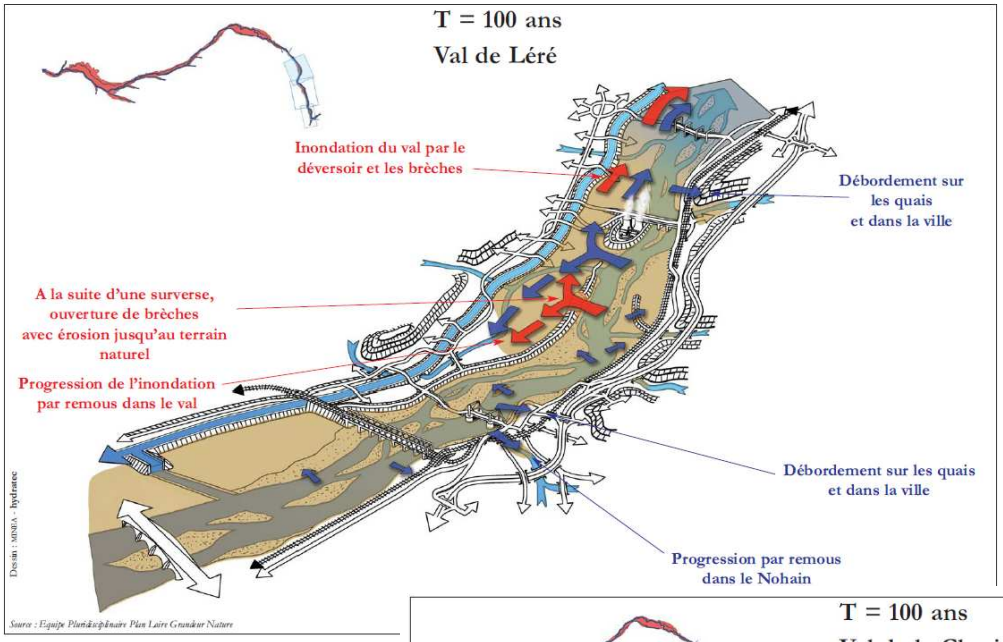
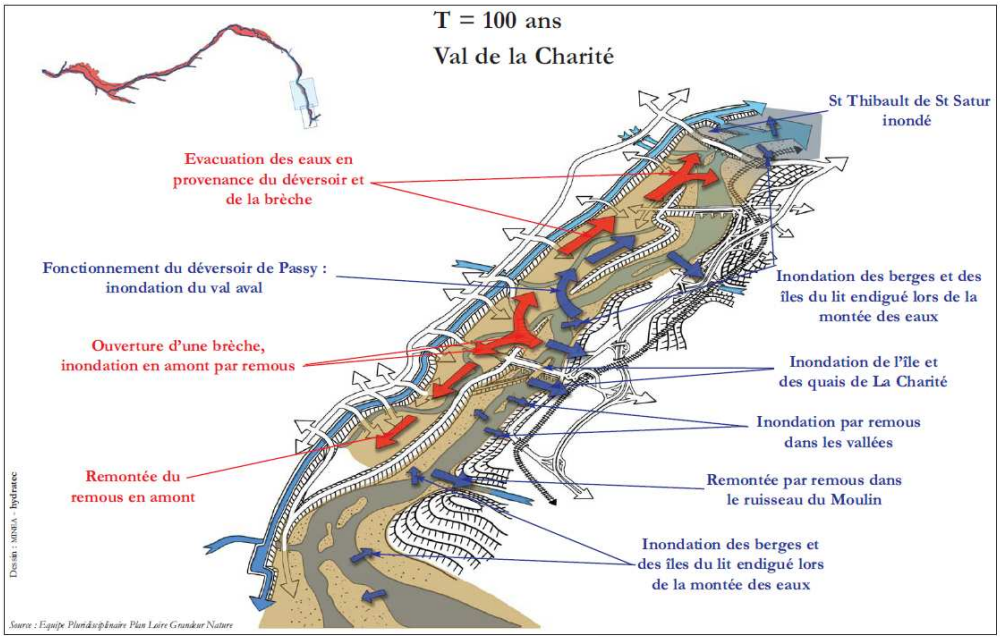
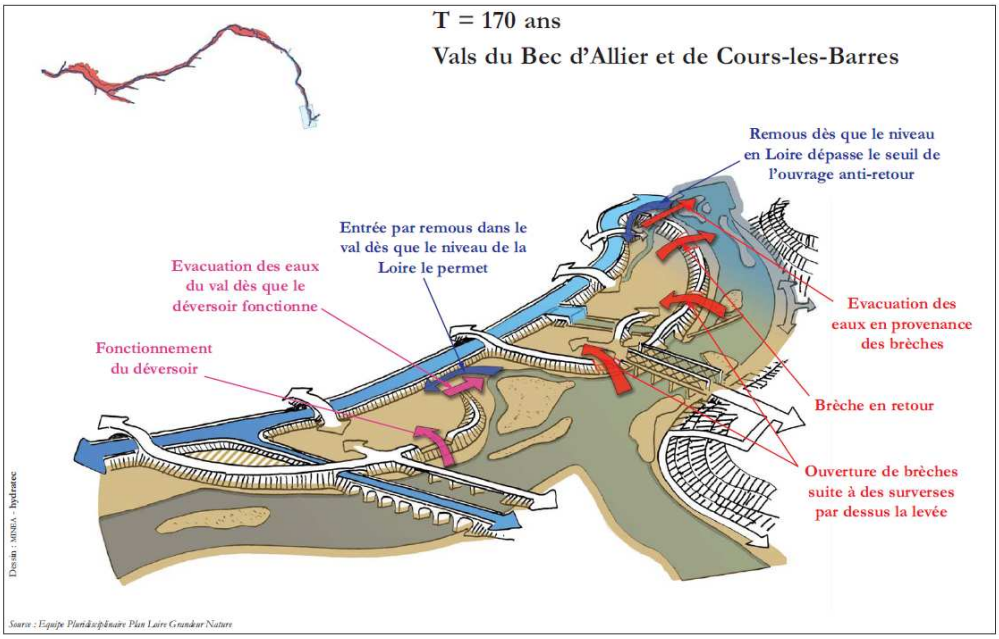


Figure 25 : Risque de rupture de levées par surverse selon l'étude Loire moyenne de 1998







Lors de l'apparition d'une crue centennale l'ouverture des premières brèches par surverse aggrave les inondations dans les vals de La Charité et de Léré. Les secteurs non protégés des communes riveraines subissent des atteintes fortes : Fourchambault, La Charité-sur-Loire, Cosne-Cours-sur-Loire, Neuvy-sur-Loire, Saint-Thibault, Ousson. Lors de l'apparition de la crue de période de retour 170 ans, les brèches par surverse apparaissent dans le val de Cours les Barres.