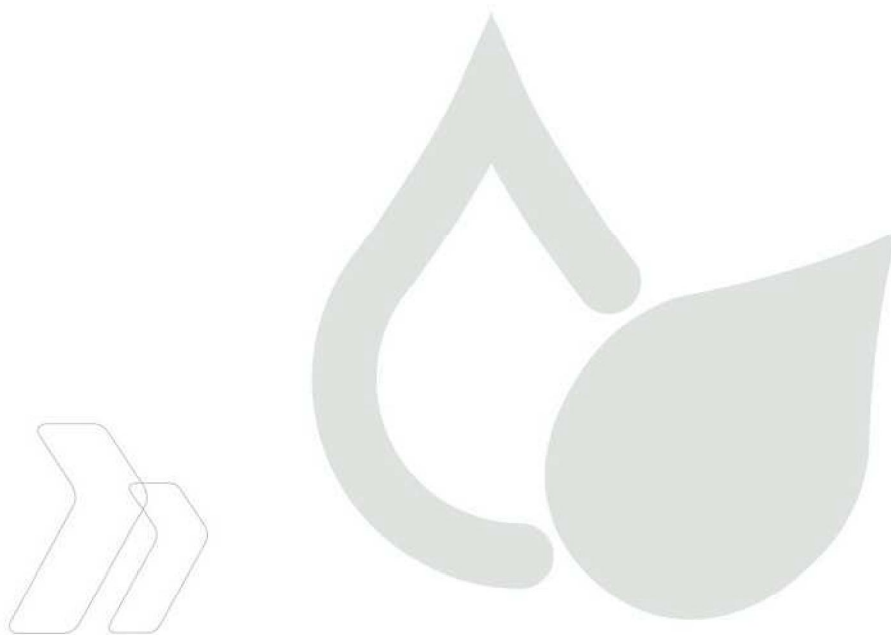


Eau
Environnement



ETUDE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE DE LA
LOIRE DANS L'ALLIER ET LA SAONE ET LOIRE

**Rapport de phase 1 : Connaissance du
territoire et étude hydrologique**



DIRECTION
DEPARTEMENTALE
DES TERRITOIRES DE
L'ALLIER

Rapport n° : RL0268
Révision n° : 6
Date : 29/01/2015

· Votre contact :
· Benjamin SEUROT
· seurot@isl.fr

Rapport















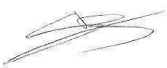




ISL Ingénierie - Lyon
Le Forum
29 rue Maurice Flandin
69003 Lyon - FRANCE
Tél. : +33 4 27 11 85 00
Fax : +33 4 72 34 60 99

www.isl.fr

ISL
Ingénierie

Visa

| Révision | Date | Rédacteur(s) | Relecteur(s) |
|----------|------------|---|---|
| 0 | 10/07/2012 | M. Leplay (chargée d'étude)  B. Seurot (Chef de projet)  | G. Chevallet (superviseur)  |
| 1 | 31/08/2012 | M. Leplay (chargée d'étude)  B. Seurot (Chef de projet)  | G. Chevallet (superviseur)  |
| 2 | 08/10/2012 | M. Leplay (chargée d'étude)  B. Seurot (Chef de projet)  | G. Chevallet (superviseur)  |
| 3 | 12/02/2014 | M. Leplay (chargée d'étude)  B. Seurot (Chef de projet)  | G. Chevallet (superviseur)  |
| 4 | 04/09/2014 | M. Leplay (chargée d'étude)  B. Seurot (Chef de projet)  | G. Chevallet (superviseur)  |

| | | | |
|---|------------|---|---|
| 5 | 11/12/2014 | M. Leplay (chargée d'étude)  B. Seurot (Chef de projet)  | G. Chevallet (superviseur)  |
| 6 | 29/01/2015 | M. Leplay (chargée d'étude)  B. Seurot (Chef de projet)  | G. Chevallet (superviseur)  |

SOMMAIRE

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCTION | 1 |
| 2 | RECUEIL DE DONNEES ET SYNTHESE DES ETUDES EXISTANTES | 4 |
| 2.1 | SYNTHESE DES ETUDES EXISTANTES | 4 |
| 2.1.1 | LISTING DES ETUDES RECUEILLIES | 4 |
| 2.1.2 | RESUME DES ETUDES | 6 |
| 2.2 | AUTRES DONNEES RECUEILLIES | 22 |
| 2.3 | ENTRETIENS TELEPHONIQUES | 23 |
| 2.3.1 | ENTRETIEN AVEC LA DREAL CENTRE | 23 |
| 2.3.2 | ENTRETIEN AVEC VNF | 23 |
| 2.3.3 | ENTRETIEN AVEC L'EPTB LOIRE | 24 |
| 2.3.4 | ENTRETIEN AVEC LE CONSEIL GENERAL DE L'ALLIER | 24 |
| 2.4 | ENQUETES EN COMMUNE ET VISITES DE TERRAIN | 25 |
| 2.4.1 | ENQUETES EN COMMUNE | 25 |
| 2.4.2 | VISITES DE TERRAIN | 26 |
| 2.5 | CARTE INFORMATIVE | 30 |
| 3 | ANALYSE HYDROLOGIQUE | 32 |
| 3.1 | CONTEXTE HYDROLOGIQUE | 32 |
| 3.2 | CRUES HISTORIQUES | 32 |
| 3.2.1 | LES TROIS GRANDES CRUES DU XIXEME SIECLE | 32 |
| 3.2.2 | HYDROGRAMMES DES TROIS GRANDES CRUES DU XIXEME SIECLE | 33 |
| 3.3 | ANALYSE DES PLUIES | 34 |
| 3.3.1 | LOCALISATION DES STATIONS PLUVIOMETRIQUES ET CARACTERISTIQUES | 35 |
| 3.3.2 | ANALYSE STATISTIQUE DES PLUIES JOURNALIERES | 36 |
| 3.3.3 | PLUIES CENTREES SUR 24 H ET REPARTITION SUR LE SECTEUR D'ETUDE | 41 |
| 3.3.4 | PLUIES DE PROJET THEORIQUES | 44 |
| 3.3.5 | ANALYSE DES EVENEMENTS DE DECEMBRE 2003 ET NOVEMBRE 2008 | 46 |

| | | |
|-------|--|-----------|
| 3.4 | INFLUENCE DU BARRAGE DE VILLEREST | 49 |
| 3.5 | ANALYSE DES DEBITS | 50 |
| 3.5.1 | ANALYSE AUX STATIONS HYDROMETRIQUES | 50 |
| 3.6 | MODELISATION HYDROLOGIQUE | 59 |
| 3.6.1 | DECOUPAGE EN SOUS BASSINS VERSANTS | 60 |
| 3.6.2 | TEMPS DE CONCENTRATION DES SOUS BASSINS VERSANTS | 60 |
| 3.6.3 | CONSTRUCTION DU MODELE HYDROLOGIQUE | 61 |
| 3.6.4 | DETERMINATION DES HYDROGRAMMES DES CRUES DE NOVEMBRE 2008 ET DECEMBRE 2003 | 64 |
| 3.6.5 | ANALYSE DE L'INFLUENCE DES PRINCIPAUX AFFLUENTS DE LA LOIRE SUR LE SECTEUR D'ETUDE | 67 |
| 3.6.6 | DETERMINATION DES HYDROGRAMMES DE CRUE | 73 |
| 4 | SYNTHESE | 78 |

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE 2 : SYNTHESE DES QUESTIONNAIRES D'ENQUETES

ANNEXE 3 : TABLEAU DES REPERES DE CRUE

ANNEXE 4 : TABLEAU DES DEBITS

ANNEXE 5 : CARTE INFORMATIVE

ANNEXE 6 : CHRONIQUE DE DEBITS DE POINTE DE VILLEREST, DIGOIN ET GILLY

ANNEXE 7 : CHRONIQUE DE DEBITS RECONTITUES DE DIGOIN ET GILLY

ANNEXE 8 : PRESENTATION DU LOGICIEL ECRET/GESRES

ANNEXE 9 : TEMPS DE CONCENTRATION OBTENUS PAR BASSIN VERSANT A PARTIR DES FORMULES EMPIRIQUES

ANNEXE 10 : HYDROGRAMMES DES AFFLUENTS POUR LES DIFFERENTES CRUES DE LA LOIRE

ANNEXE 11 : HYDROGRAMMES RECONSTITUES DES AFFLUENTS LORS DE LA CRUE DE 1846

ANNEXE 12 : EXTRAITS DE L'ETUDE DE DANGERS DU BARRAGE DE VILLEREST

TABLE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Localisation du secteur d'étude, la Loire entre Iguerande et Gannay-sur-Loire | 2 |
| Figure 2 : Photo de la berge gauche érodée de la Loire prise depuis le lieu-dit le Petit Fleury sur la commune de Bourbon-Lancy | 27 |
| Figure 3 : Photos recueillies des crues de décembre 2003 et novembre 2008 | 28 |
| Figure 4 : Repère approximatif de crue de 2008 – Lieu dit des Violettes – Saint-Martin-des-Laix | 29 |
| Figure 5 : Repères de crue de 1866 et 1846 – Lieu dit du Ronsy et des Boisseaux | 29 |
| Figure 6 : Echelle à Digoin et anciens repères de crue | 29 |
| Figure 7 : Découpage en planches de la carte informative présentée en ANNEXE 5 | 30 |
| Figure 8 : Repères de crue de 2003 à Port Chasset | 31 |
| Figure 9 : Hydrogrammes de crue de 1846 de la Loire à Roanne et Nevers | 33 |
| Figure 10 : Hydrogrammes de crue de 1856 de la Loire à Roanne et Nevers | 33 |
| Figure 11 : Hydrogrammes de crue de 1866 de la Loire à Roanne et Nevers | 34 |
| Figure 12 : Localisation des stations pluviométriques dans la zone d'étude (les numéros figurés en rouge correspondent au type de station) | 35 |
| Figure 13 : Localisation des stations pluviométriques utilisées pour l'étude statistique (Climathèque) | 38 |
| Figure 14 : Ajustement de Gumbel sur les pluies maximales annuelles journalières pour chaque station | 40 |
| Figure 15 : Répartition des pluies centrées sur 24 h pour T=10 ans (en mm) | 42 |
| Figure 16 : Répartition des pluies centrées sur 24 h pour T=30 ans (en mm) | 42 |
| Figure 17 : Répartition des pluies centrées sur 24 h pour T=50 ans (en mm) | 43 |

| | |
|---|----|
| Figure 18 : Répartition des pluies centrées sur 24 h pour T=100 ans (en mm) | 43 |
| Figure 19 : Pluie de projet double triangle décennale à Decize | 45 |
| Figure 20 : Pluie de projet double triangle centennale à Mont Saint Vincent | 46 |
| Figure 21 : Localisation des stations pluviométriques | 47 |
| Figure 22 : Cartographie des maximaux des pluies journalières enregistrées lors de la crue de 2003 (en mm) | 48 |
| Figure 23 : Cartographie des maximaux des pluies journalières enregistrées lors de la crue de 2008 (en mm) | 49 |
| Figure 24 : Ecrêtement de la crue de novembre 2008 à Villerest | 50 |
| Figure 25 : Cartographie des stations hydrométriques | 51 |
| Figure 26 : Courbes de tarage issues de la Banque Hydro et courbe de tarage retenue à Digoin (courbe en pointillés) | 54 |
| Figure 27 : Courbes de tarage issues de la Banque Hydro et courbe de tarage retenue à Gilly-sur-Loire (courbe en pointillés) | 55 |
| Figure 28 : Ajustements statistiques sur la chronique de débits à la station de Villerest | 56 |
| Figure 29 : Ajustements statistiques sur la chronique de débits à la station de Digoin | 56 |
| Figure 30 : Ajustements statistiques sur la chronique de débits à la station de Gilly-sur-Loire | 57 |
| Figure 31 : Profil type d'un bief | 62 |
| Figure 32 : Eléments structurels du modèle hydrologique | 63 |
| Figure 33 : Hydrogrammes observé et calculé au droit de Digoin – crue de 2008 | 65 |
| Figure 34 : Hydrogrammes observé et calculé au droit de Gilly-sur-Loire – crue de 2008 | 65 |
| Figure 35 : Hydrogrammes observé et calculé au droit de Digoin – crue de 2003 | 66 |
| Figure 36 : Hydrogrammes observé et calculé au droit de Gilly-sur-Loire – crue de 2003 | 66 |
| Figure 37 : Crues de la Loire étudiées pour l'analyse de l'influence des affluents (chronique à Digoin) | 68 |
| Figure 38 : Paramètres retenus pour l'analyse de l'influence des affluents de la Loire | 69 |
| Figure 39 : $Q_{\max,Loire} / Q_{\text{affluent}}$ et $Q_{Loire} / Q_{\max,\text{affluent}}$ en fonction du débit de pointe de la Loire | 71 |
| Figure 40 : Analyse de l'influence de la Vouzance | 72 |
| Figure 41 : Analyse de l'influence de la Besbre | 72 |
| Figure 42 : Hydrogramme type à Villerest | 74 |
| Figure 43 : Hydrogrammes de la Loire pour la simulation hydrologique 1 | 76 |
| Figure 44 : Hydrogrammes de la Loire pour la simulation hydrologique 2 | 76 |
| Figure 45 : Hydrogrammes de la Loire pour la simulation hydrologique 3 | 77 |
| Figure 46 : Hydrogrammes de la Loire pour la simulation hydrologique 4 | 77 |

TABLE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Liste des études hydrauliques existantes sur le secteur d'étude..... | 5 |
| Tableau 2 : Données recueillies sur le secteur d'étude en complément des études existantes..... | 23 |
| Tableau 3 : Communes ayant répondu ou non au questionnaire | 25 |
| Tableau 4 : Caractéristiques des stations pluviométriques de type 0 et 2 présentes sur le secteur d'étude (Source : Climathèque de Météo france)..... | 36 |
| Tableau 5 : Pluies journalières statistiques aux différentes stations issues de l'étude Météo-France | 37 |
| Tableau 6 : Caractéristiques des stations pluviométriques servant à l'étude statistique des pluies journalières (Source : Climathèque de Météo France) | 39 |
| Tableau 7 : Pluies journalières statistiques aux différentes stations issues de l'analyse statistique..... | 41 |
| Tableau 8 : Pluies statistiques centrées sur 24h aux différentes stations pluviométriques retenues | 41 |
| Tableau 9 : Pluies statistiques centrées sur 24h à la station de Montsauche en fonction de la méthode (en mm)..... | 44 |
| Tableau 10 : Coefficient de Montana b..... | 45 |
| Tableau 11 : Stations pluviométriques utilisées pour l'observation des deux évènements | 47 |
| Tableau 12 : Stations hydrométriques présentes sur le bassin d'étude | 52 |
| Tableau 13 : Débits de pointe caractéristiques non influencés par le barrage de Villerest obtenus par ajustements statistiques aux différentes stations hydrométriques avec l'intervalle de confiance à 80% | 58 |
| Tableau 14 : Débits de pointe caractéristiques de la Loire issus des études antérieures | 58 |
| Tableau 15 : Débit de pointe (non influencé) et période de retour des crues historiques à Villerest..... | 59 |
| Tableau 16 : Débit de pointe (non influencé) et période de retour des crues historiques à Digoïn | 59 |
| Tableau 17 : Débit de pointe (non influencé) et période de retour des crues historiques à Gilly..... | 59 |
| Tableau 18 : Formules empiriques pour le calcul du temps de concentration..... | 61 |
| Tableau 19 : Stations hydrométriques utilisées pour l'analyse de l'influence des affluents | 67 |
| Tableau 20 : Analyse de l'influence du Rhins..... | 69 |
| Tableau 21 : Analyse de l'influence du Sornin..... | 70 |
| Tableau 22 : Analyse de l'influence de l'Arconce | 70 |
| Tableau 23 : Analyse de l'influence de l'Arroux..... | 71 |
| Tableau 24 : Pluie de projet cumulées sur 24 h utilisées pour le modèle hydrologique (en mm) | 75 |

1 INTRODUCTION

Dans le cadre du projet de révision du Plan de Prévention des Risques Inondation (PPRI) de la Loire dans le département de l'Allier, la Direction Départementale des Territoires de l'Allier (DDT03) en association avec la Direction Départementale des Territoires de la Saône et Loire (DDT71) souhaite conduire une étude hydrologique et hydraulique des crues de la Loire sur l'ensemble de la traversée du département de l'Allier et de la Saône et Loire.

Le Plan de Prévention des Risques Inondation (PPRI) de la Loire dans le département de l'Allier a été approuvé le 20 juin 2001. Il a été élaboré conjointement aux atlas des zones inondables de la Loire :

- entre Digoin et Nevers (février 1996) basé sur un modèle hydraulique en régime permanent interpolant les lignes d'eau entre les repères de crues relevés (HEC2) de la crue historique de 1846.
- entre Iguerande et Digoin (avril 1998) également basé sur un modèle hydraulique (MIKE 11) en régime permanent interpolant les lignes d'eau entre les repères de crues relevés de la crue historique de 1846.

Ce Plan de Prévention des Risques présente un certain nombre de lacunes et d'imprécisions notamment pour la détermination de la cote de la crue de référence, les profils à interpoler étant parfois très éloignés.

Les inondations qui se sont produites notamment en 2008, et également, en 2003, apportent un nouvel éclairage sur la connaissance de l'aléa inondation de la Loire. La crue de novembre 2008 a été plus importante que celle de décembre 2003 sur la partie amont du territoire d'étude. A Digoin, les deux crues atteignaient quasiment le même niveau. A l'aval de la confluence avec l'Arroux, c'est la crue de 2003 qui était la plus importante. Par ailleurs, les prescriptions applicables par le PPRI sont difficiles à interpréter et ne tiennent pas compte de l'ensemble des possibilités d'urbanisation. Ces éléments ont conduit la DDT à envisager une révision de ce PPRI. Au préalable, la Direction Départementale des Territoires de l'Allier (DDT03) souhaite conduire une étude hydrologique et hydraulique des crues de la Loire sur l'ensemble de la traversée du département de l'Allier et de la Saône-et-Loire qui aboutisse à la description et à la cartographie de l'aléa inondation par la Loire, objet du présent marché.

La Loire étant limitrophe avec le département de la Saône et Loire, la DDT71 est associée et les études sont menées conjointement.

Cette étude permettra également de déterminer des enveloppes complémentaires à la crue de référence afin d'aider les communes dans l'élaboration ou la fiabilisation de leur Plan Communal de Sauvegarde.

L'étude concerne la Loire dans les départements de l'Allier et de la Saône et Loire depuis la limite communale nord de Gannay-Sur-Loire, jusqu'à la limite communale d'Iguerande (sud) soit environ 101 km de cours d'eau principal.

Ainsi, 35 communes sont concernées :

- 12 dans l'Allier : Gannay-sur-Loire, Saint-Martin-Des-Lais, Garnat-Sur-Engievre, Beaulon, Dompierre-Sur-Besbre, Diou, Pierrefitte-Sur-Loire, Coulanges, Molinet, Chassenard, Luneau et Avrilly,
- 23 dans la Saône et Loire : Cronat, Vitry-Sur-Loire, Lesme, Bourbon-Lancy, Saint-Aubin-Sur-Loire, Gilly-Sur-Loire, Perrigny-Sur-Loire, Saint-Agnan, La-Motte-Saint-Jean, Digoin, Varenne-Saint-Germain, Saint-Yan, L'Hopital-Le-Mercier, Vindecy, Bourg-le-Comte, Anzy-le-Duc, Baugy, Chambilly, Marcigny, Saint-Martin-du-Lac, Artaix, Melay et Iguerande.

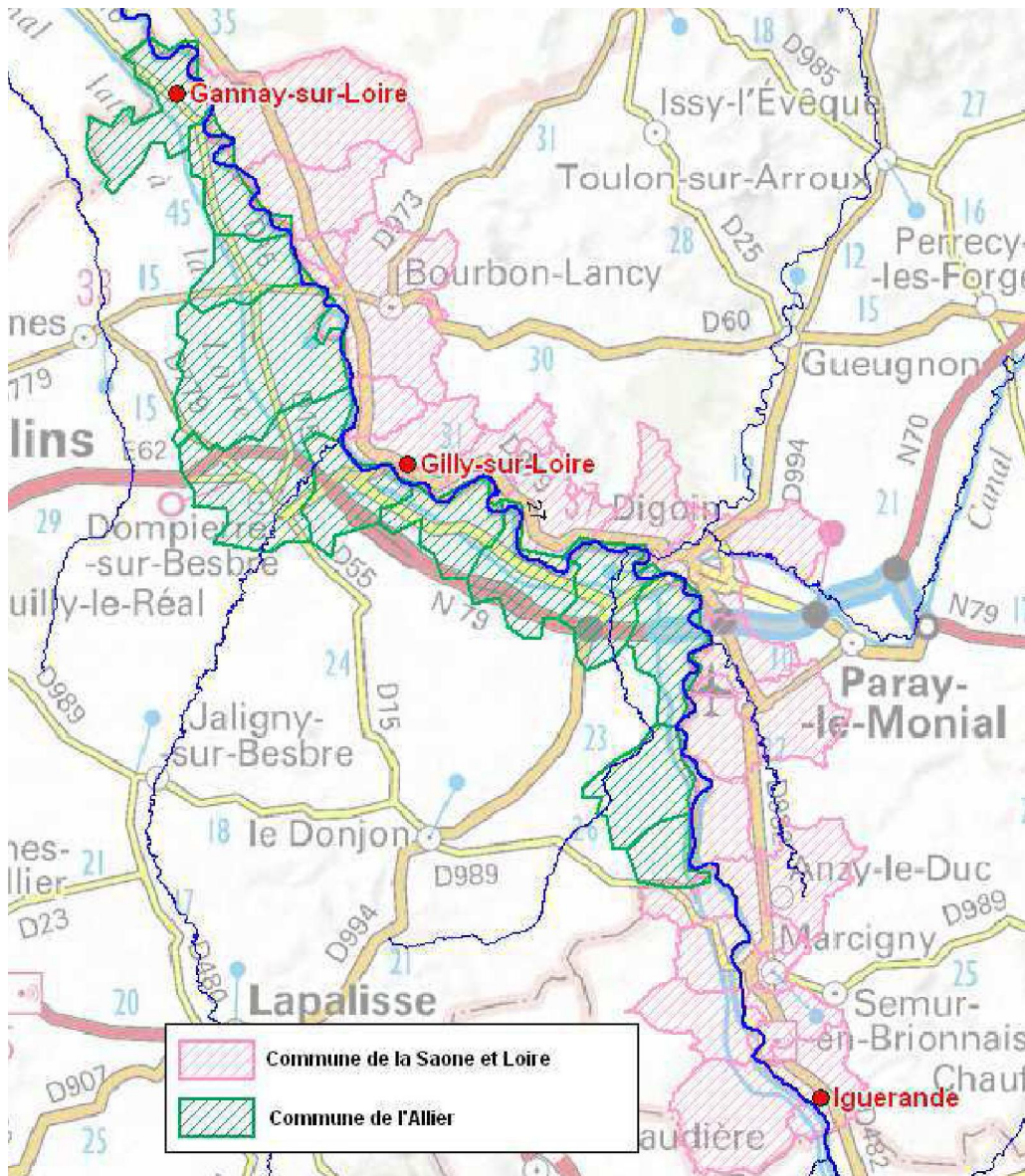


Figure 1 : Localisation du secteur d'étude, la Loire entre Iguerande et Gannay-sur-Loire

L'étude comprend la modélisation de la Loire traversant les 35 communes citées précédemment et prend en compte toute la superficie du lit majeur, ainsi que celle des lits majeurs de ses affluents dans la zone d'influence de la Loire. Elle s'intéresse aussi

(sous forme d'une approche hydrologique simplifiée) aux apports des bassins versants latéraux.

Parmi les affluents à prendre en compte, on peut citer particulièrement :

- l'Arconce,
- l'Arroux,
- la Besbre,
- la Bourbince,
- la Lodde,
- la Somme,
- la Vouzance.

Les objectifs sont donc :

- la définition de l'aléa de référence sur le territoire d'étude (cru historique recalculée ou crue centennale),
- la production de cartes des zones inondées correspondant à des crues intermédiaires dans le cadre d'éventuelles utilisations ultérieures telles que la gestion de crises ou pour les Services de Prévision des Crues (SPC).

Le marché comprend une tranche ferme et trois tranches conditionnelles :

1. Tranche ferme : Connaissance du territoire et étude hydrologique

- **Bibliographie et terrain,**
- **Analyse hydrologique,**
 2. Tranche conditionnelle 1 (TC1) et 2 (TC2)¹ : Etude hydraulique
- Topographie (option),
- Construction et exploitation des modèles.
 3. Tranche conditionnelle 3 (TC3) : Cartographie de l'aléa

Le présent rapport concerne la tranche ferme : connaissance du territoire et étude hydrologique.

¹ La tranche conditionnelle TC1 correspond à l'étude hydraulique pour le secteur situé en aval de Gilly et la tranche conditionnelle 2 correspond à l'étude hydraulique pour le secteur situé en amont de Gilly.

2 RECUEIL DE DONNEES ET SYNTHESE DES ETUDES EXISTANTES

2.1 SYNTHESE DES ETUDES EXISTANTES

2.1.1 LISTING DES ETUDES RECUEILLIES

Les études hydrologiques et hydrauliques existantes sur le secteur d'étude sont recensées dans le tableau ci-après par ordre chronologique de réalisation :

| Titre | Bureau d'études / Auteur | Date | Maître d'ouvrage |
|--|---|---------------------------------|--|
| [1] ² Bassin de la Loire : Notice Hydrologique | A. Babinet (œuvre posthume révisée et complétée par E. Maillet) | 1919 | Direction de la Navigation Intérieure et de l'Aménagement des Eaux |
| [2] Crues de janvier 1994 : ensemble des diverses opérations réalisées par le service de Bassin Loire - Bretagne du 2 au 9 janvier 1994 | | 1994 | DIREN Centre |
| [3] Etude hydraulique de la section Digoin - Molinet pour la RCEA | SILENE | 1994 - 1995 | DDE de l'Allier |
| [4] La Loire : Histoire de protections contre les crues | | Septembre 1996 | Direction Régionale de l'Equipement du Centre |
| [5] Inondation de Digoin le 18 octobre 1846 | Extraits de textes issus d'un ouvrage de M. Oscar Cucherat | Recueil réalisé en octobre 1996 | DDE Saône-et-Loire |
| [6] Etude de la Loire entre Villerest et le Bec d'Allier | EPTEAU | Avril 1997 | DIREN Bassin Loire - Bretagne |
| [7] Atlas des zones inondables de la Loire | Safège | Avril 1998 | DDE Saône et Loire |
| [8] Plan de Prévention de Risques Naturels Prévisibles - Risque Inondation par débordement de la Loire sur les communes de l'Allier | | Approuvé en juin 2001 | DDE de l'Allier |
| [9] Plan de Prévention de Risques Naturels Prévisibles - Risque Inondation par débordement de la Loire sur les communes de la Saône-et-Loire | | Approuvé en juillet 2001 | DDE de la Saône-et-Loire |
| [10] Calcul de la rupture du barrage de Villerest sur la crue historique de 1866 pour la Loire | ISL | Août 2001 | Etablissement Public d'Aménagement de la Loire et de ses Affluents |
| [11] Propagation d'une onde de crue entre Villerest et Pouilly-sous-Charlieu | ISL | 2003 | Etablissement Public Loire |

² Les numéros entre crochets [X] renvoient à la bibliographie en annexe 1.

| Titre | Bureau d'études / Auteur | Date | Maître d'ouvrage |
|---|---|---|--|
| [12] Reconstitution de la crue de décembre 2003 entre Villerest et Givry | ISL | 2004 | Etablissement Public Loire |
| [13] Etude de corrélation des crues de la Loire moyenne | ISL | Septembre 2004 | DIREN Centre |
| [14] Retour d'expérience de la crue de décembre 2003 | Safège | Mars 2005 | Etablissement Public Loire |
| [15] Expertise hydro-géomorphologique sur la commune de Bourbon - Lancy | BCEOM | Avril 2006 | DDE de la Nièvre Service Hydrologie et Voies Navigables |
| [16] Réalisation d'un modèle complet des écoulements entre Feurs et le barrage de Villerest | ISL | Mai 2008 | Etablissement Public Loire |
| [17] Reconstitution de la crue de novembre 2008 entre Villerest et le Bec d'Allier | ISL | Juin 2009 | Etablissement Public Loire |
| [18] Retour d'expérience de la crue de la Loire et de l'Allier de début novembre 2008 | HYDRATEC | Octobre 2009 | Etablissement Public Loire |
| [19] Historique des incidents sur les digues du canal de Loire | | Recueil d'archives sur la période 1844 - 2000 | DDT de l'Allier |
| [20] Extraits de l'étude de dangers du barrage de Villerest | ? | ? | Etablissement Public Loire |
| [21] Etude globale de gestion des crises hydrologiques et de restauration environnementale du haut bassin de la Loire | Hydratec- B.Ledoux-Cabinet Gay-J.R. Malavoi | Septembre 2001 | Etablissement Public Loire |

Tableau 1 : Liste des études hydrauliques existantes sur le secteur d'étude

2.1.2 RESUME DES ETUDES

2.1.2.1 Résumé du document « Bassin de la Loire : Notice Hydrologique », Direction de la Navigation Intérieure et de l'Aménagement des Eaux, A. Babinet (œuvre posthume révisée et complétée par E. Maillet), 1919 [1]

Contexte

Une compilation des principales connaissances hydrologiques relatives à la Loire a été entreprise par A. Babinet depuis 1897 environ et reprise et complétée à sa mort par E. Maillet, dans l'objectif de rassembler les connaissances sur la Loire tel qu'il a été fait sur le bassin de Seine dans le « Manuel hydrologique du bassin de la Seine » [22]. La notice consiste en une description hydrologique du bassin de la Loire, raisonnée en vue de l'annonce de crues.

Hydrologie

La notice comprend quatre chapitres.

Le premier chapitre traite de manière générale de la nature et de l'origine des crues et de l'influence des endiguements sur ces dernières.

Dans le second chapitre, le bassin de la Loire est étudié par bassin partiel. On y décrit, pour les principales stations hydrométriques, les cotes de plus basses et de plus hautes eaux observées, les hauteurs de submersions, les cotes maximales atteintes et les vitesses de propagation des plus fortes crues enregistrées. Les types de crues sont également indiqués. La crue d'octobre 1846 est la plus forte crue enregistrée par les stations hydrométriques de la Loire sur le secteur concerné par la présente étude (entre Iguerande et Gannay-sur-Loire).

Le chapitre trois vise à étudier avec précision les principales crues du bassin de la Loire depuis 1789, en traitant de l'influence particulière de chacun des affluents. Les crues suivantes sont ainsi analysées : janvier 1789, novembre 1790, décembre 1825, janvier 1843, octobre 1846, mai-juin 1856, septembre-octobre 1866, octobre 1872, novembre-décembre 1872, octobre 1907, crues de 1910.

Enfin, le dernier chapitre se focalise sur les règles techniques employées par les différents services de navigation de l'époque pour la prévision des crues de la Loire et de ses affluents. Des remarques et suggestions sont également émises quant aux progrès à réaliser.

2.1.2.2 Résumé du document « Crues de janvier 1994 : ensemble des diverses opérations réalisées par le service de Bassin Loire Bretagne du 2 au 9 janvier 1994 », DIREN Centre, 1994, [2]

Contexte

Ce document présente les différentes actions menées par le Service de Bassin Loire Bretagne de la DIREN de Bassin lors des importantes montées des eaux de la Loire pendant la fin de l'année 1993 et le début de l'année 1994. L'épisode a principalement concerné le bassin de la Vienne et celui de la Loire aval, après sa confluence avec la Vienne. Dans une moindre mesure, la Loire moyenne, l'Allier, la Loire amont après le Bec d'Allier et la Maine ont aussi été touchés.

Hydrologie

Le document est composé de 5 annexes. L'annexe 1 donne un bilan journalier de situation hydrologique dressé par le Centre de Gestion des barrages du Service de Bassin entre les 3 et 14 janvier 1994.

En annexe 2, sont donnés des relevés de ligne d'eau de la Loire dans le secteur Bec d'Allier-Briare et de l'aval de la Vienne et de la Creuse. Des photos de terrain et des photos aériennes prises lors de l'évènement sont données en annexe 3. Un tableau récapitulatif de l'ensemble des jaugeages effectués est donné en annexe 4 ; les jaugeages, principalement concentrés sur la Vienne, sont à l'origine d'une réactualisation de certaines courbes de tarage des stations hydrométriques présentes sur ce bassin. Enfin, des tableaux de débits moyens journaliers mesurés aux différentes stations hydrométriques sont présentés en annexe 5.

2.1.2.3 Résumé du l' « Etude hydraulique de la section Digoin - Molinet pour la RCEA », pour la Direction Départementale de l'Équipement de l'Allier, SILENE, 1994 – 1995 [3]

Contexte

Cette étude s'inscrit dans le cadre de projet de Route Centre Europe Atlantique (RCEA) comprenant notamment un franchissement de la Loire et de son affluent la Vouzance dans les environs de Digoin³. La DDE de l'Allier a souhaité que soit entreprise une étude hydrologique et hydraulique afin de définir l'impact des ouvrages de franchissement sur l'écoulement de la Loire et de définir les dispositions constructives à prévoir.

Hydrologie

Les débits de pointe retenus pour la modélisation sont repris d'une étude réalisée par le Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE) de Lyon en septembre 1991 en accord avec la DIREN d'Orléans ; la méthode d'obtention n'est pas spécifiée. Les débits de crue retenus (Q10, Q50, Q100 et crue de 1846) pour le dimensionnement du franchissement font abstraction de l'influence du barrage Villerest.

Hydraulique

Le logiciel de modélisation n'est pas précisé. Le modèle (1D) s'appuie sur 10 profils en travers. Les simulations sont réalisées en régime permanent. Le calage a été effectué sur les crues de 1983, 1943, 1907, 1866 et 1846 comptant respectivement 10, 6, 4, 2 et 1 laisses de crue. Les coefficients de Strickler varient entre 31 et 36 en lit mineur et 13 et 15 en lit majeur. La perte de charge créée par l'ouvrage correspond à la réduction de section ainsi qu'à l'effet d'entonnement dû au remblaiement de la vallée. Le remous maximum est de 12 cm pour la crue centennale, cette valeur venant s'ajouter aux 80 cm de remous générés par le pont canal situé 2 kilomètres plus à l'aval.

2.1.2.4 Résumé du document « La Loire : Histoire de protections contre les crues », Direction Régionale de l'Équipement du Centre, Septembre 1996 [4]

Ce document présente l'histoire des protections de la Loire, les premières étant apparues entre l'Antiquité et le X^{ème} siècle. Ces protections étaient des turcies, digues formées de bois et de terre, renforçant localement le cordon alluvial et reliant des

³ Les documents transmis ne comprennent pas l'étude hydraulique du franchissement de la Vouzance

buttes insubmersibles (barrage noyé). Elles avaient pour fonction de protéger les terres de culture de l'érosion en ralentissant les courants.

En 1160, Henri II Plantagenêt fait installer des « hôtes » chargés de l'entretien de ces digues. Le siècle ayant été clément et les hôtes installés en ces lieux étant étrangers à la région et n'ayant ainsi pas de croyances superstitieuses ou d'expériences douloureuses de crues, l'avis général s'en ait trouvé profondément modifié. Voyant ces mêmes hôtes bâtirent des constructions neuves, les propriétaires fonciers et le pouvoir royal ont pris confiance en ces protections et de là, a commencé le processus massif d'endiguement de la Loire.

Durant plusieurs siècles, les hommes se sont battus contre les caprices du fleuve. Croyant en l'insubmersibilité des digues de protection, ils n'ont eu de cesse de reconstruire encore et toujours plus haut les digues cloisonnant toujours plus le lit mineur de la Loire.

Malgré une période de doute et de remise en cause du rôle de protection des digues en 1626 avec un ordre d'exécution de 6 déchargeoirs mis en œuvre 20 ans plus tard, l'opinion s'en ait systématiquement retournée vers ce sentiment de nécessité de construire toujours plus de digues élevées qui ont facilement trouvé leur utilité économique dans le transport des marchandises et le transit des hommes. Les agriculteurs mêmes, s'en sont rangés à cet avis, eux qui auparavant utilisaient le limon des crues du fleuve pour rendre leur terre fertile.

La gestion des aménagements du fleuve acquise par l'intendant des turcies, a basculé après la Révolution française sous la direction des Ponts et Chaussées.

Au XIXème siècle, les trois crues dévastatrices de 1846, 1856 et 1866, ayant causées les ruptures de levées et digues et aggravées les conséquences, ont permis de rendre compte de l'effet néfaste de l'endiguement massif de la Loire. Trois solutions ont alors été envisagées. La première consistait à élargir le lit mineur de la rivière en repoussant les digues, ce qui était impossible étant donné l'étendue colossale de la tâche. La seconde consistait à limiter le débit en amont par la construction de nombreux barrages de retenue et la dernière consistait à construire des déversoirs afin de prévenir la formation de brèches. Seulement 7 des 20 déversoirs prévus ont été exécutés entre 1870 et 1891 face à l'opposition des riverains.

Dans les années 1950, un regain d'activités autour de la Loire apparaît et dans les années 1970, 17 réacteurs nucléaires sont implantés le long du fleuve dont 12 sont encore en activité (en 1995). Dans ce contexte, deux grands barrages, Naussac et Villerest, assurant le soutien d'étiage de la Loire, ont été construits afin de compenser les prélèvements pour le refroidissement des réacteurs. Le barrage de Villerest assure également la fonction d'écrêteur de crues.

La gestion du fleuve est depuis 1984 assigné à l'Etablissement Public d'Aménagement de la Loire et de ses Affluents (EPALA) qui a lancé en janvier 1994 le Plan Loire Grandeur Nature dont un de ses trois volets s'intitule « protection des populations contre le risque d'inondation ».

En conclusion, l'auteur propose plusieurs analogies avec le passé et évoque les évolutions de l'aléa et des enjeux sur le bassin. Il n'existe toujours pas de solutions alternatives aux levées auxquelles on attribue une confiance abusive, ce qui favorise l'urbanisation des plaines inondables. Par ailleurs, les levées ont créé un effet de seuil redoutable en ne maintenant qu'une seule alternative : contenance de la crue ou crue catastrophique.

2.1.2.5 Résumé du document « Inondation de Digoin le 18 octobre 1846 », recueil de textes réalisé en octobre 1996, DDE Saône-et-Loire [5]

Ce recueil, réalisé à partir d'un ouvrage de M. Oscar Cucherat, contient deux témoignages sur l'événement de crue qui a eu lieu le 18 octobre 1846.

Le premier s'attarde sur quatre points : la description de Digoin et de ses ouvrages, les effets désastreux de cette crue, les causes de ce désastre, les travaux de réparations engendrés et enfin les moyens de prévenir un semblable sinistre.

Le second traite uniquement et plus en avant des causes de la crue et des moyens de l'empêcher ; il fournit également une description plus détaillée du déroulement de l'épisode.

2.1.2.6 Résumé de l'« Etude de la Loire entre Villerest et le Bec d'Allier », pour la DIREN Bassin Loire-Bretagne, EPTEAU, Avril 1997 [6]

Contexte

Cette étude s'inscrit dans le cadre du schéma d'aménagement global de la Loire compatible avec ses différents usages (hydroélectricité, navigation, irrigation, AEP, seuils de moulins). L'objectif de l'étude demandée par la DIREN Loire - Bretagne est double : d'une part, l'établissement d'un diagnostic global du fonctionnement hydrologique, hydraulique, morphodynamique et écologique, et d'autre part, la proposition de scénarii de gestion et d'aménagement depuis le barrage de Villerest jusqu'au Bec d'Allier.

Morphodynamique

Depuis 1854, on observe une évolution permanente du lit de la Loire. En effet, la largeur du lit moyen a diminué de moitié (100-150 m en 1992 contre 200-300 m en 1854), le caractère sinueux a fortement augmenté, le taux d'érosion est de l'ordre de 9,5 ha/an et le lit mineur s'est globalement enfoncé, du notamment aux extractions massives de sables (excepté au droit des ouvrages). L'évolution récente du lit montre un taux d'érosion latéral de 11 ha/an et un ralentissement de l'enfoncement du lit (30 cm au maximum, arrêt des extractions). Toutes ces variations temporelles du lit de la Loire ont conduit à augmenter son linéaire de 6,5 km (soit 3,6%) depuis 1854.

Hydrologie

L'étude hydrologique vise à déterminer un certain nombre de situations hydrologiques de référence pour différents régimes (crue, étiage, moyen). En régime de crue, les situations sont les suivantes : crue biennale, crue décennale, crue historique naturelle de 1846, crues historiques de 1856 et 1866, naturelles et écrêtées par le barrage de Villerest. L'influence de ce dernier est rappelée dans l'étude.

Les chroniques de débits disponibles aux stations hydrométriques de Roanne, Gilly et Nevers (respectivement 1839-1970, 1908-1987 et 1852-1975) ont fait l'objet d'une étude statistique approfondie et ont permis de déterminer les débits de pointe naturels de période de retour 2 ans, 10 ans, et 100 ans pour ces trois sites.

En complément de ces analyses sur les débits de pointe, des études ont également été effectuées sur les volumes et les formes de crue à Villerest : il en a été conclu que les hydrogrammes à Villerest avaient une forme sensiblement identique en dépit des mécanismes de formation des crues et qu'une loi de Pearson de type III s'adaptait de façon satisfaisante. Les paramètres de la loi de Pearson ont ensuite été ajustés à Nevers, ce qui a permis d'obtenir par la suite les hydrogrammes naturels de crue

biennale et décennale en tout point du bassin versant par interpolation des coefficients de la loi Pearson entre Villerest et Nevers.

Les apports intermédiaires (apports des affluents) ont quant à eux, été déterminés par différence des volumes des hydrogrammes de la Loire en amont et en aval d'un point d'injection.

L'étude hydrologique s'achève par une reconstitution des grandes crues historiques du XIX^{ème} siècle, à savoir les crues de 1846, 1856 et 1866. Les hydrogrammes des crues de 1856 et 1866 sont reconstitués à partir des relevés aux échelles avec une assez bonne fiabilité à Roanne et Nevers. Pour la crue de 1846, les données étant moins précises, la reconstitution est moins fiable. Les apports intermédiaires ont également été reconstitués mais faute de données, le « poids » donné à chacun d'entre eux est aléatoire.

Hydraulique et cartographie

Le modèle d'écoulement a été réalisé avec le logiciel filaire MIKE11. Les crues de calage sont celles de mai 1996 entre Roanne et Le Gannay, celle de septembre 1995 entre Diou et Nevers et celle débordante d'avril 1989 entre Roanne et Nevers. La validation du modèle a été réalisée sur la crue de 1994. Plus de 140 profils ont été utilisés, dont 121 ont été levés pour les besoins de l'étude. Les coefficients de Strickler retenus sont de 25 à 35 en lit mineur et de 15 globalement en lit majeur. Le modèle a permis de simuler les hydrogrammes de référence définis lors de l'étude hydrologique.

Un listing exhaustif des ouvrages hydrauliques présents (barrage, seuils, ponts, levées, digues) est également donné dans le volet hydraulique de l'étude.

L'étude aboutit à une cartographie des zones inondables et à des propositions d'aménagements globales et ponctuelles.

[2.1.2.7 Résumé de l'« Atlas des zones inondables de la Loire », pour les Directions Départementales de l'Equipement de la Saône et Loire et de l'Allier, Safège, Avril 1998 \[7\]](#)

Contexte

Dans le cadre réglementaire de l'article 21 de la loi du 22/07/1987 et suite à l'instauration le 4 janvier 1994 du Plan Loire Grandeur Nature, le gouvernement a exprimé la volonté de mettre en œuvre « la réalisation d'un atlas de zones inondables de la Loire ». Il s'agit d'informer les riverains et les collectivités locales riveraines des risques potentiels liés aux inondations et de réévaluer le programme d'aménagement de la Loire.

L'atlas présente sous forme d'une notice explicative et de cartographies, les zones inondables du lit majeur de la Loire et les risques liés aux inondations depuis la commune d'Iguerande jusqu'à celle de Digoin.

Hydrologie

La notice explicative situe le contexte hydrologique du val de Loire entre Iguerande et Digoin. Dans un premier temps, un rappel des régimes de crue et de l'influence du barrage de Villerest sur les crues est précisé. Les débits de pointe naturels à Roanne, Iguerande, Digoin et Nevers sont ensuite redonnés pour les crues historiques de 1846, 1856 et 1866 et pour les crues statistiques de période de retour 2, 10, 100 et 1 000 ans. Le gain apporté par l'écrêtement du barrage de Villerest est également précisé. L'origine des données hydrologiques présentées n'est pas fournie.

Hydraulique

Un modèle a été réalisé avec le logiciel MIKE11 afin de simuler la crue de 1846 non écrêtée par le barrage de Villerest, plus forte crue connue sur le secteur depuis plus de 250 ans, et d'obtenir des cotes d'eau sur les secteurs présentant des lacunes en terme de laisses de crue.

L'origine de la centaine de profils en travers utilisés n'est pas précisée.

Les hypothèses de modélisation et les hydrogrammes injectés dans le modèle ne sont pas spécifiés.

Cartographie et laisses de crue

Deux cartographies sont définies : celle de l'enveloppe des Plus Hautes Eaux Connues (crue de 1846) et celle de l'aléa correspondant, définie par croisement des classes d'hauteurs d'eau et de vitesses.

Par ailleurs, 34 laisses de crues des inondations historiques de 1846, 1856 et 1866 sont répertoriées avec photos et localisation sur fond de carte IGN.

2.1.2.8 Résumé du « Plan de Prévention de Risques Naturels Prévisibles – Risque Inondation par débordement de la Loire sur les communes de l'Allier », Direction Départementale des Territoires de l'Allier, approuvé par arrêté préfectoral en juin 2001 [8]

Contexte

En application des articles 40.1 à 40.7 de la loi n°95.101 du 2 février 1995, le département de l'Allier a lancé l'élaboration d'un Plan de Prévention de Risque d'Inondation par débordement de la Loire sur les communes de l'Allier. Il contient une note de présentation, une cartographie de l'aléa par commune et un règlement.

Hydrologie

La note de présentation du PPRI resitue les trois grandes crues historiques en précisant que la plus forte d'entre elle sur le secteur reste celle de 1846. Les débits de pointe de période de retour 10, 50 et 100 ans à Nevers sont également précisés à titre indicatif. L'influence du barrage de Villerest sur les crues est rappelée.

Morphodynamique

L'étude précise que le niveau de crues a pu changer étant donné l'évolution du lit de la Loire, due notamment à l'abandon des ouvrages de navigation, à l'extraction excessive de sable dans le lit mineur, au charriage des sédiments et au développement de la végétation des berges et du lit majeur.

Cartographie et laisses de crue

La cartographie s'appuie sur la crue de 1846 cartographiée dans l'Atlas des Zones Inondables.

Elle a été établie pour les 12 communes suivantes : Avrilly, Beaulon, Chassenard, Coulanges, Diou, Dompierre-sur-Besbre, Gannay-sur-Loire, Garnat-sur-Engièvre, Luneau, Molinet, Pierrefitte-sur-Loire et Saint-Martin-des-Lais.

Par ailleurs, 10 laisses de crues des inondations historiques de 1846, 1856, 1866 et sont répertoriées avec photos et localisation sur carte fond de carte IGN.

2.1.2.9 Résumé du « Plan de Prévention de Risques Naturels Prévisibles – Risque Inondation par débordement de la Loire sur les communes de la Saône et Loire »,

[Direction Départementale des Territoires de la Saône et Loire, approuvé par arrêté préfectoral en juillet 2001 \[9\]](#)

Contexte

En application des articles 40.1 à 40.7 de la loi n°95.101 du 2 février 1995, le département de la Saône et Loire a lancé l'élaboration d'un Plan de Prévention de Risque d'Inondation par débordement de la Loire sur les communes de la Saône et Loire. Il contient une note de présentation, une cartographie de l'aléa par commune et un règlement.

Hydrologie

Les commentaires sont les mêmes que pour le PPRI de la Loire sur le département de l'Allier [8].

Morphodynamique

Les commentaires sont les mêmes que pour le PPRI de la Loire sur le département de l'Allier [8].

Cartographie et laisses de crue

La cartographie s'appuie sur la crue de 1846 cartographiée dans l'Atlas des Zones Inondables.

Elle a été établie pour les 22 communes suivantes : Artaix, Baugy, Bourbon-Lancy, Bourg-le-Comte, Chambilly, Cronat, Digoïn, Gilly-sur-Loire, Hopital-le-Mercier, Iguerande, Lesme, Marcigny, Melay, Motte-Saint-Jean, Perrigny-sur-Loire, Saint Agnan, Saint-Aubin-sur-Loire, Saint-Martin-du-Lac, Saint-Yan, Varennes-Saint-Germain, Vindecy et Vitry-sur-Loire.

Par ailleurs, 51 laisses de crues des inondations historiques de 1846, 1856, 1866 sont répertoriées avec photos et localisation sur carte fond de carte IGN.

[2.1.2.10 Résumé de l'étude « Calcul de la rupture du barrage de Villerest sur la crue historique de 1866 pour la Loire », pour l'Etablissement Public d'Aménagement de la Loire et de ses Affluents, ISL, Août 2001 \[10\]](#)

Contexte

L'étude fait suite au volet onde de submersion du Plan Particulier d'Intervention (PPI) mené par ISL pour l'Etablissement Public d'Aménagement de la Loire et de ses Affluents (EPALA) en 1999-2001 [21].

L'objectif de l'étude était de calculer l'hydrogramme de rupture du barrage de Villerest pendant une crue historique de la Loire et d'étudier sa propagation dans la vallée de la Loire sur environ 170 km, jusqu'à l'aval de la confluence Loire-Allier, qui marque le début de la Loire moyenne.

Il s'agissait ensuite de fournir un hydrogramme exploitable pour un modèle hydraulique local situé au niveau de la centrale nucléaire de Belleville. En effet, le val de Loire entre Givry-Fourchambault et la centrale de Belleville, située à environ 70 km à l'aval de Givry est endigué et offre des capacités d'écrêtement négligeables voire nulles pour la gamme de débit (pointe supérieure à 10 000 m³/s) et de volume considérés (plusieurs centaines de millions de m³). De plus, le bassin versant propre de la Loire dans cette zone est très réduit ; le fleuve n'y comprend aucun affluent important. Par conséquent, l'hydrogramme de rupture en crue historique issu du calcul à Givry a pu être utilisé

directement pour des calculs hydrauliques à Belleville, au temps de propagation près entre Givry et Belleville.

Hydrologie

Les crues de référence dans cette zone sont les trois grandes crues du XIX^{ème} siècle, 1846, 1856 et 1866. C'est cette dernière qui a été retenue dans le cadre de la présente étude car bien renseignée et correspondant à la situation la plus défavorable vis-à-vis des hydrogrammes à l'aval de Nevers.

Les hydrogrammes utilisés pour la modélisation hydraulique sont issus des études suivantes :

- entre Villerest et l'amont de Nevers de [6] « étude de la Loire entre Villerest et le Bec d'Allier » pour la DIREN de bassin Loire Bretagne par Horizons-Epteau en mars 1997,
- au niveau de Bec d'Allier de [24] « Crues au Bec d'Allier. Reconstitution des débits de crues anciennes à Givry-Fourchambault, Nevers et le Veudre ».

Hydraulique

L'onde de submersion a été modélisée sous le logiciel DAMBRK de Villerest à Aiguilly, sur les premiers kilomètres, et sa propagation, sous CARIMA d'Aiguilly à Givry-Fourchambault. Le calage du modèle CARIMA s'appuie sur les crues historiques de 1846, 1856 et 1866. Les modèles utilisés sont repris du PPI pour l'EPALA [23], avec toutefois des réglages différents et des hypothèses différentes de tenue des différents remblais. Les données topographiques exploitées proviennent de diverses sources (cabinet Crougneau, 1987), Atlas des zones inondables [7], EDF (1993), DDE Loire (1999), etc.) et regroupent au total environ 180 profils répartis en moyenne tous les kilomètres, datant de 1986 à 1999.

2.1.2.11 Résumé de l'étude de « Propagation d'une onde de crue entre Villerest et Pouilly-sous-Charlieu », pour l'Etablissement Public Loire, ISL, 2003 [11]

Contexte

En septembre 2003, l'Etablissement Public Loire a du réaliser des ouvertures de vannes sur le barrage de Villerest, afin de régler ses automates de contrôle. Ces lâchers assimilables à des crues de période de retour 2 et 5 ans, du fait de leur rapidité et de leur pointe, ont amené le gestionnaire à connaître la propagation des hydrogrammes correspondants et des hauteurs d'eau entre le barrage de Villerest et le pont de Pouilly sur la Loire. Cette étude a ensuite été étendue de Pouilly à Digoin afin de déterminer les caractéristiques d'écoulement (cotes maximales atteintes, hydrogrammes et limnigrammes) sur cette zone.

Hydraulique

Il a été nécessaire dans un premier temps d'étendre le modèle hydraulique réalisé sous CARIMA de l'étude « Onde de rupture du barrage de Villerest » [10] entre le pont d'Aiguilly et le barrage de Villerest. Le modèle hydraulique a ensuite été calé sur la crue d'octobre 1994 et validé sur la crue d'avril 1989.

Les hydrogrammes des lâchers correspondent à une montée progressive par paliers entre un débit de base égal au débit réservé (12 m³/s) et le débit de pointe. La forme des hydrogrammes correspond aux contraintes imposées par les manœuvres du barrage de Roanne. Ce barrage assurant l'alimentation du canal latéral à la Loire entre Roanne et Digoin, il n'est pas possible d'effectuer de baisse préventive. Les lâches

au barrage de Villerest et la manœuvre du barrage de Roanne doivent donc être parfaitement coordonnées et progressives. Le barrage de Roanne est équipé de hausses réparties en 4 passes et les manœuvres d'abaissement total prennent en moyenne plus de cinq heures.

2.1.2.12 Résumé de l'étude de « Reconstitution de la crue de décembre 2003 entre Villerest et Givry », pour l'Etablissement Public Loire, ISL, 2004 [12]

Contexte

La Loire ayant connu une crue importante en décembre 2003, et l'Etablissement Public Loire ayant la responsabilité de la gestion du barrage de Villerest en crue, ISL a été missionné pour déterminer l'influence du barrage de Villerest jusqu'à l'aval du Bec d'Allier.

Hydrologie

Le calcul de propagation a nécessité au préalable une analyse hydrologique basée sur les mesures fournies par les différentes stations hydrométriques présentes sur la Loire et ses affluents. Les apports des affluents à la confluence avec la Loire ont été ajustés en appliquant la formule de Meyer.

Hydraulique

Le modèle hydraulique, modèle CARIMA, est basé sur celui construit par ISL pour l'EPL dans le cadre de l'étude de l'onde de rupture du barrage de Villerest [10] ainsi que pour les simulations ultérieures concernant la manœuvre de vannes du barrage [11].

Le calage a été effectué en terme de propagation d'hydrogramme, il a porté à la fois sur des modifications des coefficients de Strickler et des apports intermédiaires (décalage en temps, rapport des homothéties par rapport aux mesures des stations hydrométriques). Les coefficients de Strickler sont de 23-25 en lit mineur et de 5-10 en lit majeur.

Le barrage a permis de limiter les débits à 3 500 m³/s à Givry, valeur à comparer aux 4 000 m³/s d'une crue non influencée par l'ouvrage de Villerest.

2.1.2.13 Résumé de l' « Etude de corrélation des crues de la Loire moyenne », pour la DIREN Centre, ISL, Septembre 2004 [13]

Contexte

Le Service d'Annonce de Crues de la Loire Moyenne a confié à ISL une mission visant à la mise au point et la validation de corrélations entre les débits et les hauteurs aux différentes stations hydrométriques suivies par le service.

Hydrologie

L'étude s'articulait autour de 4 phases.

La phase 1 a concerné le dépouillement des données sous forme d'hydrogrammes et de limnigrammes informatisés (en hauteur et débits) fournis par le Centre de Gestion des Crues et des Etiages (CGCE).

La phase 2 a visé à déterminer les temps de propagation entre les stations de mesure et les stations de prévision.

La phase 3 comprenait le calage et les tests de validation sur les modèles de prévision.

La phase 4 consistait en l'élaboration et la validation de modèles de prévision opérationnels.

2.1.2.14 Résumé du document « Retour d'expérience de la crue de décembre 2003 », pour l'Etablissement Public Loire, Safège, Mars 2005 [14]

Contexte

Suite à la forte crue survenue en décembre 2003, les partenaires du Plan Loire ont chargé l'Etablissement Public Loire de mettre en œuvre le retour d'expérience de cet événement. Le secteur étudié couvre la Loire depuis l'aval de Villerest jusqu'au bec du Cher.

Hydrologie

L'événement a débuté le 30 novembre pour se terminer le 11 décembre. Deux pics de débit ont pu être observés à Chadrac le 2 et le 3 décembre (respectivement 850 m³/s et 650 m³/s) tandis qu'un unique pic a été noté à Feurs le 3 décembre vers 1h/2h du matin (2 400 m³/s).

Le barrage de Villerest a permis d'écrêter 1 600 m³/s sur les 2 800 m³/s entrant dans la retenue. Le rejet aval avait une période de retour de 5 ans alors qu'en entrée son débit était cinquantennal.

L'hydrologie d'apport nous renseigne sur les affluents en crue lors de l'événement. Avec les apports du Morvan, la pointe de crue est d'environ 1 900 m³/s à Gilly. Un débit de 1 550 m³/s a été mesuré à Veudre sur l'Allier. Les autres affluents de la Loire (Cher, Vienne et Maine) n'ont pas connu de crue.

Synthèse des observations

Le traitement de l'ensemble des données collectées sur la crue a permis de cartographier l'enveloppe de la zone inondée, ainsi que les conséquences de la crue en termes d'habitations inondées, de personnes évacuées, d'équipements publics et privés inondés, de routes et de ponts coupés et de problèmes d'alimentation en eau potable, d'assainissement, d'électricité ou de téléphonie.

Il est noté que les moyens de prévision mis en place lors de l'événement étaient insuffisants.

2.1.2.15 Résumé de l'« Expertise hydro-géomorphologique sur la commune de Bourbon – Lancy », pour la DDE 58 - SHVN, BCEOM, avril 2006 [15]

Contexte

La Loire aux alentours de Bourbon-Lancy présente une dynamique fluviale particulièrement active. La divagation et l'érosion y sont très prononcées. Des extractions de sables ont eu lieu en lit mineur pendant de nombreuses années. L'exploitant avait constitué un remblai faisant office de digue, supposé être en matériaux issus de déchets de BTP. Les riverains ont mis en avant le rôle néfaste joué par cette digue. L'objectif de l'expertise fut ainsi d'analyser l'incidence de ce remblai sur la dynamique de la Loire et de proposer des travaux de restauration du site en évaluant leur incidence prévisible.

Hydrologie

Des données de la Banque HYDRO renseignent sur le régime hydrologique de la Loire à la station de Gilly. La station comptait alors 36 années de données depuis 1969. Un ajustement de Gumbel fournit les valeurs des crues décennale ($1\,500\text{ m}^3/\text{s}$), vicennale ($1\,700\text{ m}^3/\text{s}$) et cinquantennale ($1\,900\text{ m}^3/\text{s}$). Ces valeurs sont issues d'un ajustement statistiques sur des débits influencés par le barrage de Villerest.

Morphodynamique

L'étude dresse un état des lieux géomorphologique complet du secteur, depuis le puits d'eau potable de Bourbon-Lancy jusqu'au pont du Fourneau. Elle traite autant de la nature et des caractéristiques des alluvions que de la morphologie des tronçons concernés sans oublier l'évolution récente et ancienne du lit, tout cela en s'appuyant sur de nombreuses cartes détaillées.

2.1.2.16 Résumé de l'étude de « Réalisation d'un modèle complet des écoulements entre Feurs et le barrage de Villerest », pour l'Etablissement Public Loire, ISL, Mai 2008 [16]

Contexte

L'Etablissement Public Loire a la responsabilité de la gestion du barrage de Villerest en crue. L'objectif de cette étude a été de réaliser un modèle d'écoulement des crues entre la ville de Feurs et le barrage de Villerest permettant de réaliser une gestion optimum du barrage de Villerest dans la lutte contre les crues.

Hydrologie

Les stations de mesure utilisées sont au nombre de 9 pour les stations limnimétriques, toutes situées sur la Loire, et au nombre de 9 également pour les stations hydrométriques dont 3 se situent sur la Loire, 5 sur le Lignon et ses affluents et 1 sur l'Aix. Les chroniques utilisées recourent les onze crues les plus importantes de 1988 à 2004.

L'hydrologie d'apport est bien détaillée, elle a permis de déterminer trois points d'injection pour le modèle hydraulique. Les hydrogrammes ont été extrapolés à partir d'une étude de corrélation qui n'a retenu que les stations hydrométriques ayant une corrélation débit-débit supérieure à 0,8. La détermination du débit des affluents est évaluée au prorata des surfaces des bassins versants.

Hydraulique

Le modèle a été réalisé à l'aide du logiciel SWMM. Il compte une cinquantaine de profils en travers du lit mineur qui ont été complétés par des lignes de niveau afin de représenter l'écoulement d'un débit de crue en lit majeur. Ces profils sont parfois très espacés, plus de 5 km, le lit du cours est ainsi mal défini. Quant au barrage, sa loi hauteur-surface et ses dimensions sont réputées parfaitement connues.

Les crues de calage sont les événements qui se sont produits en novembre 1996, octobre 2001, novembre 2002, décembre 2003 et novembre 2004.

Deux paramètres ont été testés : la loi cote-volume qui a été déterminée pour plusieurs valeurs de débit compris entre 10 et $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ et la propagation de l'hydrogramme dépendant du coefficient de Strickler (29 pour le lit mineur et 17 pour le lit majeur).

On retiendra que les débits entrant à Feurs étaient sous-estimés et que ceux sortant par les vannes de Villerest étaient surestimés. Une correction sur le débit a donc été appliquée.

2.1.2.17 Résumé de l'étude de « Reconstitution de la crue de novembre 2008 entre Villerest et le Bec d'Allier » Etablissement Public Loire, ISL, Juin 2009 [17]

Contexte

La Loire ayant connu une crue importante en novembre 2008, et l'Etablissement Public Loire ayant la responsabilité de la gestion du barrage de Villerest en crue, ISL a été missionné pour déterminer l'influence du barrage de Villerest jusqu'à l'aval du Bec d'Allier

Hydrologie

Le calcul de propagation a nécessité au préalable une analyse hydrologique basée sur les mesures fournies par les différentes stations hydrométriques présentes sur la Loire et ses affluents. Les apports des affluents à la confluence avec la Loire ont été ajustés en appliquant la formule de Meyer.

On notera que l'hydrogramme de la Renaison a été reconstitué à partir de celui du Rhins car aucune mesure n'est disponible directement sur la Renaison, tandis que l'hydrogramme de l'Arroux a été déterminé à partir de ceux de Rigny (Arroux) et Vitry (Bourbince), celui de Digoin étant fortement influencé par la Loire.

Hydraulique

Le modèle hydraulique, modèle CARIMA, est basé sur celui construit par ISL pour l'EPL dans le cadre de précédentes études ([10], [11], [12]). Le linéaire modélisé s'étend de Villerest au Bec d'Allier.

Le calage a été effectué en volume et en cote. L'instant d'arrivée des pics de crues varie entre 0 et 5h, excepté pour l'Arroux dont le décalage est de 16h. Les coefficients de Strickler sont de 15-30 en lit mineur et de 5-10 en lit majeur. Les lignes d'eau simulées sont donc celles avec et sans barrage à Villerest et des tests quant aux apports intermédiaires ont été réalisés en doublant les volumes d'apport de certains affluents.

2.1.2.18 Résumé du document « Retour d'expérience de la crue de la Loire et de l'Allier de début novembre 2008 », Etablissement Public Loire, HYDRATEC, Octobre 2009 [18]

Contexte

Suite aux fortes inondations survenues sur les hauts bassins de la Loire et de l'Allier au début du mois de novembre 2008, l'Etablissement Public Loire a souhaité piloter le retour d'expérience de cette crue, à partir de l'analyse et de l'expérience sur les événements qu'ont vécu les maires des communes concernées. Le secteur étudié comprend ainsi la Loire de sa source jusqu'au bec d'Allier, l'Allier sur sa partie amont et la Dore (affluent de l'Allier) dans son intégralité.

Hydrologie

La crue qui a débuté le 1^{er} Novembre 2008 a principalement affecté le bassin de la Loire à l'amont du barrage de Villerest ainsi que la partie la plus à l'amont du bassin de l'Allier (au niveau de Langogne). Sur ces bassins, cette crue est souvent la plus forte observée depuis celle de septembre 1980.

En Loire bourguignonne, cette crue fortement réduite par l'influence du barrage de Villerest, reste une des plus fortes observées depuis la mise en service du barrage en 1985. Elle a atteint des niveaux très comparables à celle de décembre 2003 entre Villerest et Digoin. Contrairement à cette dernière, il n'y a pas eu de crue simultanée

des affluents du Morvan et la crue s'est fortement atténuée le long de la vallée entre Digoin et Nevers.

La crue est globalement d'occurrence 50 ans sur la Loire et ses affluents à l'amont du barrage de Villerest. A Digoin, la période de retour de la crue a été estimée à environ 30 ans et 10 ans à Nevers.

Le barrage de Villerest a très fortement écrêté cette crue, ramenant son débit maximal de 3100 m³/s environ à 1700 m³/s.

Synthèse des observations

Le traitement de l'ensemble des données collectées sur la crue a permis de cartographier l'enveloppe de la zone inondée, ainsi que les conséquences de la crue en termes d'habitations inondées, de personnes évacuées, d'équipements publics et privés inondés, de routes et de ponts coupés et de problèmes d'alimentation en eau potable, d'assainissement, d'électricité ou de téléphonie.

2.1.2.19 Résumé du document « Historique des incidents sur les digues du canal de Loire » [19]

Les digues du Canal latéral de la Loire ont connu plusieurs incidents à la fin du XIX^e siècle. Les résumés suivants retracent entre autres les incidents survenus et leurs réparations.

Digue de Chassenard et travaux à Digoin, Département de l'Allier, Ponts et Chaussées, 1844 – 1852

Ce document retrace l'argumentation tenu entre les deux ingénieurs en charge du projet du tracé de la digue de Chassenard et des travaux de défense à l'amont du pont-aqueduc de Digoin, via leur correspondance de 1844 à 1852. L'un soutient un tracé permettant de protéger un maximum d'habitations tandis que l'autre défend sa position de protéger uniquement le Canal latéral de la Loire.

Canal latéral aval de Chassenard, Ponts et Chaussées, 1847

Ce document regroupe deux profils en long du Canal latéral de la Loire. Ils montrent la partie comprise entre la rive droite de la Loire et un point situé à 600 m à l'aval du pont de Chassenard, dans l'arrondissement de Diou. Ils datent du 13 et du 20 février 1847.

Grosses réparations du Canal latéral, Département de l'Allier, Régie, 1858

Par arrêté du 28 février 1858, il a été ordonné l'exécution d'ouvrages de défense sur la rive gauche de la Loire au niveau d'Avrilly, point où le Canal latéral passe entre le fleuve et le pied du coteau. L'opération a consisté en la mise en place d'enrochements et de perrés sur une longueur de 220 m au droit du coteau d'Avrilly.

Etudes d'inondations et de défense des rives, Départements de la Saône et Loire, de l'Allier et de la Nièvre, Ponts et Chaussées, 1859

Ce document décrit l'avant-projet de défense des rives du fleuve entre l'origine amont du département de la Saône et Loire et la rivière de l'Allier sur une longueur totale moyenne de 157 km.

Réparation de la digue du Perron, Département de l'Allier, Ministère des Travaux publics, Direction des routes, de la navigation et des mines, 1890

En 1890, dans la tranchée du Perron située dans le bief de la Besbre du Canal latéral de la Loire, le projet d'exhaussement du plan d'eau dans le Canal et l'état de dégradation inquiétant de la digue a nécessité des travaux de réparation et d'exhaussement de la murette droite de la cuvette du Perron.

Le Canal franchit au Perron un étranglement du Val de la Loire et est réduit en ce point à une seule voie de bateaux. Il est resserré entre le coteau rocheux et une digue à parois verticales en maçonnerie avec noyau en terre. Cette digue est exposée au choc des bateaux et est fortement attaquée par les gelées, ce qui explique son état avancé de dégradation.

Le relèvement du plan d'eau étant de 60 cm, il a fallu augmenter d'au moins 50 cm les murettes de la tranchée du Perron. Pour cela, la murette a été reconstruite à partir de 50 cm au-dessous du plan d'eau actuel pour être exhausser au total de 1,60 m du côté de la cuvette et de 91 cm du côté opposé, le tout sur une longueur de 423 m et exécuté avec une terre de bonne qualité et pilonnée par couches de 20 cm d'épaisseur.

Rupture de la digue du Canal latéral, Département de l'Allier, Ponts et Chaussées, 1893

Le 18 septembre 1893 a été observé une rupture sur la rive gauche du Canal latéral de la Loire, dans la digue de contre halage du bief de Beaulon, due à une surélévation excessive du plan d'eau.

L'origine de cet incident remonte aux travaux entrepris sur les écluses de l'Huilerie et de Lamotte. En effet, lors de la manœuvre des différentes écluses en jeu pour la mise en eau des biefs, l'écluse de Lamotte n'était pas achevée. Ainsi, lors de l'ouverture de l'écluse amont des Hameaux, l'écluse de Lamotte n'était pas prête. La manœuvre commencée le 16 octobre au matin a donc été interrompue le 17 au matin pour reprendre plus tard dans l'après-midi. Or, concours de circonstances, certains éclusiers en amont ayant été prévenus de l'interruption de la manœuvre ont également baissé leurs ventelles, tandis que les autres non prévenus ont vu le plan d'eau au niveau de leur écluse monter dangereusement. Il en a résulté une accumulation d'eau dans les biefs amont et notamment celui de Beaulon où a eu lieu l'incident.

Travaux d'étanchement et de consolidation, Département de l'Allier, Ponts et Chaussées, 1895 – 1896

Suite aux essais de mise en eau du canal latéral en 1895 et 1896, il a été constaté des points de faiblesse sur les biefs de la Besbre, de Rosières et des Gailloux. Les biefs de Rosières et des Gailloux ont présentés plusieurs points d'infiltration pour un mouillage de 2,20 m, tandis que le bief de Besbre a montré de plus amples faiblesses nécessitant d'importants travaux pour ce même mouillage.

Les travaux exécutés ont consisté à mettre en place des corrois d'un minimum de 30 cm d'épaisseur recouverts d'une couche de terre végétale de 30 cm également sur les biefs de Rosières et des Gailloux. Sur le bief de Besbre, il a également été mis en place ce même type de corrois sur 1557 m, mais également un revêtement en béton sur 346 m en face du hameau du Perron, aux abords des premières maisons de Diou, là où les dégâts étaient plus importants.

Travaux d'étanchement de Diou, Département de l'Allier, Ponts et Chaussées, 1896

Ce document présente les plans réalisés pour les travaux d'étanchement et de consolidation du Canal latéral de la Loire, entre Digoin et Maimbray en juillet 1896. On y trouve un plan général de situation, un plan de la traversée de Diou et des profils en travers types.

Grosses réparations du Canal latéral, Département de l'Allier, Ponts et Chaussées, 1899

Le 1^{er} décembre 1899 vers 22h30, une rupture de digue s'est produite sur le Canal latéral de la Loire dans le bief de la Besbre, du côté du chemin de contre halage, immédiatement à l'amont de la tête amont de l'aqueduc du Ternat. La brèche s'est ouverte sur 11 m de long pour une hauteur de 6,5 m. Les eaux se sont déversées entre le Canal et le coteau par l'aqueduc pour finir leur course dans la plaine. Le volume d'eau déversé a pu être minimisé car deux bateaux se sont échoués juste en amont de la brèche, ce qui a fait obstacle à l'écoulement de l'eau et en aval, les vannes de fond du déversoir du Perron ont immédiatement été grande ouvertes.

Aucun signe précurseur de l'événement n'a été détecté par le personnel en charge du canal, ni par les bateliers présents la nuit du sinistre.

La brèche a été fermée par un écran de maçonnerie en ciment, dont l'axe longitudinal coïncide sensiblement avec celui du chemin de halage et dont l'épaisseur est de 1,50 m à la base et de 1 m au sommet, avec parement vertical du côté du Canal. Ce massif encastré à la base de 60 cm dans une couche argileuse, s'engage latéralement de 1 m dans la partie de digue restée intacte au-dessous du niveau du plafond et de 2 m au-dessus de ce niveau. De part et d'autre de cet écran, les remblais seront constitués par des terres argileuses fortement pilonnées et du côté extérieur et ils seront renforcés à mi-hauteur par une risberme de 2 m de largeur.

Etudes et rapports des crues, Départements de la Saône et Loire et de l'Allier, Ponts et Chaussées, 1907

Ce document dresse un listing exhaustif des zones inondées par la crue d'octobre 1907, ainsi qu'un chiffrage des réparations à exécuter. On trouve également les détails des dommages causés par les crues de la Loire de 1852 à 1907 par types de dégâts et par communes, mais également un rapport des repères de crues à Digoin depuis octobre 1846 jusqu'à novembre 1905.

Le dernier document retrace un incident survenu un siècle plus tard, en mai 2000.

Brèche du Canal latéral à Molinet, Département de l'Allier, mai 2000

Le 23 mai 2000, une brèche s'est ouverte, emportant une dizaine de mètres de digue en rive gauche du Canal latéral de la Loire, immédiatement à l'amont de l'aqueduc de la Micaudière située à l'aval de la commune de Molinet. Ce phénomène est dû à un phénomène latent de renard.

L'écoulement de l'eau a pu être amoindri grâce à la mise en place d'un batardeau au pont-canal de la Vouzance, 1,5 km à l'amont du sinistre. Le débit transitant par la brèche étant supérieur à la capacité de l'aqueduc, il s'en est suivi pendant environ 5 h l'inondation du secteur où sont situées trois maisons d'habitation et la route nationale 79 (Route Centre Europe Atlantique) a été coupée pendant 1 h par une lame d'eau d'une dizaine de centimètres.

2.1.2.20 Extraits de « l'étude de dangers du barrage de Villerest » [20]

Seuls quelques extraits de l'étude de dangers du barrage de Villerest nous ont été communiqués par l'EPTB Loire. Ils concernent :

- Les quantiles de débit retenus au droit du barrage,
- Le principe de fonctionnement du barrage lors d'une crue.

Ces extraits sont donnés en annexe 12 du présent rapport.

2.2 AUTRES DONNEES RECUEILLIES

Le Tableau 2 présente les données recueillies sur le secteur d'étude en complément des études existantes.

| Titre | Date | Source |
|---|----------------------------|----------------------------|
| Cartographie des zones inondables de la crue de 1846 | 1854 | DDT Allier |
| Plan des Surfaces Submersibles de la Loire, section Digoin/Roanne | 1938 | NC |
| Plan des surfaces submersibles de la Loire | 1975 | VNF 58 |
| Base des repères de crues de la Loire (DREAL Centre et DDT03) | 2007 (derniers repères) | DREAL Centre et DDT Allier |
| Levé MNT laser (précision ± 5 cm) | Mars 2009 | DREAL Centre |
| Profil bathymétrique de la Loire (1 profil tous les km) | Avril 2010 | DREAL Centre |
| Bd-Alti | | IGN |
| Levé MNT (précision ± 70 cm) | NC | CRAIG |
| Lignes d'eau levées lors de crues entre 1996 et 2010 | 2008 | DREAL Centre |
| Tableau des hauteurs d'eau maximales aux échelles de Digoin, Gilly-sur-Loire, Diou, le Fourneau et Décize | | DREAL Centre |
| Cartographie de la crue de novembre 2008 | 2008 | Etablissement Public Loire |
| Plans des ouvrages de franchissement de la Loire | | DDT Allier |
| Fiches des stations hydrométriques de Villerest à Chatillon sur Loire | | SPC-LCI |
| Cadastres (raster) des communes concernées par l'étude | | DDT Allier |
| Cartographie par commune de l'onde de submersion réalisée pour le plan particulier d'intervention du barrage de Villerest | 2002 | DDT Allier |
| Dossier complet des photos des crues de la Loire et de l'Arroux de novembre 2008 | | DDT Allier |
| Cartographies et photos de la rivière Arroux – Fiche informative – Inondations – Laisses de crue | | DDT Allier |
| Relevés journaliers des hauteurs d'eau lues à l'échelle de Digoin de 2003 à 2008 | 2003-2008 | VNF |
| Hauteur maximales mesurées à l'échelle de Digoin des principales crues entre 1846 à 1907 | 1908 | VNF |

| Titre | Date | Source |
|--|------|------------|
| Tableau Excel des plus forts débits historiques observés à Roanne ou reconstitués en entrée du barrage (depuis 1835) | | EPTB Loire |

Tableau 2 : Données recueillies sur le secteur d'étude en complément des études existantes

2.3 ENTRETIENS TELEPHONIQUES

Des entretiens téléphoniques, visant à récupérer des données et informations sur le secteur d'étude, ont été réalisés avec :

- la DREAL Centre, (contacts : M. Reinbold et M. Pasquet),
- l'EPTB Loire (contact : Mme Xhaard),
- VNF, (contact : M. Berland),
- Le Conseil Général de l'Allier : (contacts : M. Combelles et M. Rideau).

2.3.1 ENTRETIEN AVEC LA DREAL CENTRE

La DREAL Centre a réalisé un modèle hydraulique sur la Loire entre Villerest et Gilly-sur-Loire dans le but d'établir un système de prévision des crues aux stations hydrométriques de la Loire (Villerest, Digoin, Gilly-sur-Loire et Décize) et d'établir des cartographies de champs d'inondation en temps réel.

Il s'agit d'un modèle hydraulique 1D à casiers réalisé avec le logiciel Hydra-Riv et construit à partir du MNT de 2009 (reprise du modèle utilisé pour le Plan Loire). La modélisation se découpe en deux tronçons, de Villerest à Gilly-sur-Loire et de Gilly-sur-Loire à Nevers. Pour le moment, seule la partie aval a été réalisée et le modèle est en cours de calage. Le calage est réalisé par comparaison des hydrogrammes mesurés au droit des différentes stations hydrométriques de la Loire à ceux calculés par le modèle. Une dizaine d'hydrogrammes de crues réelles sont ainsi utilisés pour le calage. Les lignes d'eau mesurées par la DREAL Centre lors des crues de ces dernières années sont utilisées également pour vérifier la cohérence globale des lignes d'eau calculées par le modèle. Les lignes d'eau mesurées sont cependant difficilement utilisables pour réaliser un calage précis puisque certaines mesures sont éloignées du pic de crue.

La DREAL pense que les crues récentes de 2003 et 2008 sont les plus pertinentes pour le calage de notre modèle du fait de l'évolution rapide et conséquente du lit de la Loire.

Par ailleurs, une recherche bibliographique réalisée par la DREAL nous a permis d'obtenir un tableau des hauteurs d'eau maximales aux échelles de Digoin, Gilly-sur-Loire, Diou, le Fourneau et Décize depuis 1846 environ. La DREAL a dressé une liste assez exhaustive des crues supérieures à 2,5 m à Digoin à partir des registres d'époque (registres de l'échelle et registres sur SAC d'Orléans).

2.3.2 ENTRETIEN AVEC VNF

VNF nous a fourni les relevés quotidiens d'échelles au pont canal de Digoin pour les années 2003 à 2008 et le rapport subdivisionnaire sur les inondations de 1907.

2.3.3 ENTRETIEN AVEC L'EPTB LOIRE

Lors de l'entretien téléphonique, l'EPTB Loire a été questionné concernant les éventuels scénarios pouvant conduire à une transparence du barrage de Villerest lors d'une crue importante et dont voici leur réponse :

« Le cas de non écrêtement d'une crue pourrait correspondre à une défaillance totale de la gestion. Il est toutefois peu probable de ne pas pouvoir du tout écrêter : le processus de gestion en chaîne normale avec prévision et en mode dégradé (sans prévision, modèle de secours) permet en théorie d'écrêter l'ensemble des crues historiques. Il n'est toutefois pas possible de vérifier la prévision sur les crues historiques faute de données et d'instrumentation du bassin. »

On peut cependant imaginer des cas qui conduiraient à réduire la performance de l'écrêtement :

- *le cas d'une crue à plusieurs pointes est prévu dans la chaîne normale, mais il est vrai que plusieurs pointes successives seraient susceptibles de réduire la performance de l'écrêtement – si le barrage est partiellement rempli au moment de la survenue d'une nouvelle pointe (cas non observé historiquement).*
- *en cas de défaillance de la chaîne normale de gestion (par exemple, non réception des données par endommagement des unités de traitement (qui sont doublées), arrachage d'un trop grand nombre de stations (les plus importantes sont également doublées)), il est prévu d'utiliser un modèle de secours qui permet un écrêtement réduit de moitié. »*

L'EPTB Loire nous a fourni par ailleurs les données suivantes :

- des extraits de l'étude de dangers du barrage de Villerest,
- les REX complets des crues de 2003 et 2008,
- un tableau Excel des plus forts débits historiques observés à Roanne ou reconstitués en entrée du barrage (depuis 1835).

2.3.4 ENTRETIEN AVEC LE CONSEIL GENERAL DE L'ALLIER

Le conseil général ne dispose pas de documents ou données pouvant être utiles à l'étude. Deux études ont cependant été évoquées :

- une étude concernant l'espace de liberté de la Loire réalisée par J-R Malavoï pour le Conseil Général de la Saône-et-Loire et datant du début des années 2000 environ,
- une étude commandée au bureau d'études SOMIVAL par le Service Hydrologie et Voies Navigables de la DDE 58 en 2007 visant à définir un programme de restauration et d'entretien du lit de la Loire sur la période 2007/2013.

Ces deux études n'ont pas été récupérées.

2.4 ENQUETES EN COMMUNE ET VISITES DE TERRAIN

2.4.1 ENQUETES EN COMMUNE

Un questionnaire a été envoyé aux 35 communes concernées par l'étude. Ce questionnaire portait sur la caractérisation des inondations sur la commune, les repères de crues existant, les ouvrages hydrauliques de protection, les études et documents existants. A ce jour, 22 questionnaires ont été renvoyés à ISL. Les réponses de l'enquête sont synthétisées en ANNEXE 2.

Le tableau ci-dessous liste les communes ayant répondu ou non au questionnaire d'enquête.

| Commune | Réponse |
|-----------------------|--------------------------------------|
| Artaix | Oui |
| Perrigny-sur-Loire | Oui |
| Saint-Agnan | Oui |
| Avrilly | Oui |
| Molinet | Oui |
| Bourbon-Lancy | Oui |
| Coulanges | Oui |
| Vindecy | Oui |
| Baugy | Oui |
| Saint-Yan | Oui |
| Vitry-sur-Loire | Oui |
| Digoïn | Oui |
| Saint-Martin-des-Lais | Oui |
| L'Hôpital-le-Mercier | Oui |
| Beaulon | Oui |
| Cronat | Oui |
| Gilly-sur-Loire | Oui |
| Luneau | Oui |
| Bourg-le-Comte | Oui |
| Garnat-sur-Engèvre | Oui |
| Marcigny | Oui |
| Gannay-sur-Loire | Commune relancée mais pas de réponse |
| Dompierre-sur-Besbre | Commune relancée mais pas de réponse |
| Diou | Commune relancée mais pas de réponse |
| Pierrefitte-sur-Loire | Commune relancée mais pas de réponse |
| Chassenard | Oui |
| Lesme | Commune relancée mais pas de réponse |
| Saint-Aubin-sur-Loire | Commune relancée mais pas de réponse |
| La-Motte-Saint-Jean | Commune relancée mais pas de réponse |
| Varenne-Saint-Germain | Commune relancée mais pas de réponse |
| Anzy-le-Duc | Commune relancée mais pas de réponse |
| Chambilly | Commune relancée mais pas de réponse |
| Saint-Martin-Du-Lac | Pas de réponse (pas de relance) |
| Melay | Commune relancée mais pas de réponse |
| Iguerande | Commune relancée mais pas de réponse |

Tableau 3 : Communes ayant répondu ou non au questionnaire

La plupart des communes ayant répondu précisent que des crues plus ou moins importantes surviennent chaque année. Les crues notoires qui reviennent généralement dans les questionnaires sont : novembre 2008, avril 2005, décembre 2003, décembre 2002, mai 2001, mai 1983, octobre 1907, septembre 1866, juin 1856 et octobre 1846. Certaines communes précisent qu'en général les crues de la Loire sont peu rapides (crue de 2008 par exemple). Peu de zones inondées ont été tracées par les communes et elles correspondent en général aux documents et cartes réalisés

dans le cadre du PPRI de la Loire de 2001, de l'Atlas des Zones Inondables ou encore par l'Etablissement Public Loire (EPL).

Les repères de crues donnés par les communes ont déjà été recensés dans le cadre de cette étude (repères gravés ou autres identifiés dans les études antérieures, cotes maximales atteintes aux échelles).

Hormis les documents réalisés lors du PPRI, de l'AZI et par l'EPL, certaines communes sont dotées d'un Plan Communal de Sauvegarde comprenant notamment un plan inondation.

Les ouvrages de protection sont peu présents sur le linéaire concerné (épis à Vindecy, digue vétuste (perré) à Coulanges) et les communes ayant répondu au questionnaire ne mentionne pas de projet d'aménagements allant dans ce sens.

2.4.2 VISITES DE TERRAIN

Suite aux questionnaires, une visite de terrain a été réalisée pendant trois jours du 25 au 27 juin 2012. Tout le linéaire de la zone d'étude a été parcouru afin de repérer les différents éléments susceptibles de structurer les écoulements en crue, de rencontrer certains riverains et élus, et de récolter des informations supplémentaires sur les crues récentes (photographie, repère de crues, etc.).

2.4.2.1 Modification du lit majeur et mineur

La Loire est un des derniers grand fleuve sauvage : le lit de la Loire se déplace au cours du temps au gré des crues. Un riverain de Pierrefitte-sur-Loire du hameau des Boisseaux a estimé un déplacement du lit de l'ordre de 200 m ces cinquante dernières années. Il est donc difficile de réutiliser des données bathymétrique et topographique de la zone d'étude trop anciennes. De même, il serait difficile avec la topographie actuelle de simuler l'écoulement des grandes crues du XIXème siècle et d'en retrouver les mêmes caractéristiques.



Figure 2 : Photo de la berge gauche érodée de la Loire prise depuis le lieu-dit le Petit Fleury sur la commune de Bourbon-Lancy

La plupart des terrains proche du cours d'eau sont agricoles, et non constructibles. Il s'agit principalement de pâtures. Quelques hangars ont été construits au sein des exploitations agricoles.

La visite de terrain a permis de rencontrer les habitants des communes, impactés par les inondations. Les habitants semblent marqués par les différentes inondations, ils conservent parfois des traces de ces périodes de crue (photos, documents, articles de journaux, etc.) et parviennent quelques fois à en décrire les zones inondées. Ces informations sont reportées sur les cartes informatives fournies en ANNEXE 5.



Cimetière de Diou lors de la crue de décembre 2003

(source : Journal communal de Diou)



Camping municipal de Diou lors de la crue de décembre 2003

(source : Journal communal de Diou)



Marché couvert à Diou lors de la crue de novembre 2008

(source : Site internet de la mairie)



Stade football à Diou lors de la crue de novembre 2008

(source : Site internet de la mairie)



Pont canal de Digoin lors de la crue de novembre 2008

(source : M. Briand)



Place de la grève à Digoin lors de la crue de décembre 2003

(source : M. Briand)



Cuisine de l'habitation au lieu-dit les Monins à Coulanges lors de la crue de décembre 2003

(source : Riverain)

Figure 3 : Photos recueillies des crues de décembre 2003 et novembre 2008

Bien que la population riveraine se sente concernée par les différentes crues, très peu d'habitants ont marqué les laisses de crue récentes. Il s'agit bien souvent d'une hauteur approximative donnée par rapport au seuil d'un bâtiment comme l'illustre la Figure 4.



Figure 4 : Repère approximatif de crue de 2008 – Lieu dit des Violettes – Saint-Martin-des-Laix

Les crues historiques, ont quant à elle, fait l'objet de repérages précis qui se matérialisent par des traits gravés en plus ou moins bon état de conservation sur certains bâtiments (cf. Figure 5). Cette pratique n'est malheureusement presque plus réalisée ce qui par la suite, est susceptible de nuire à la mémoire des crues de ces dernières années.



Figure 5 : Repères de crue de 1866 et 1846 – Lieu dit du Ronsy et des Boisseaux



Figure 6 : Echelle à Digoin et anciens repères de crue

2.5 CARTE INFORMATIVE

La carte informative, présentée en ANNEXE 5 sous forme d'un atlas cartographique d'une dizaine de planches, regroupe diverses informations susceptibles d'être utilisées dans le cadre de la présente étude.

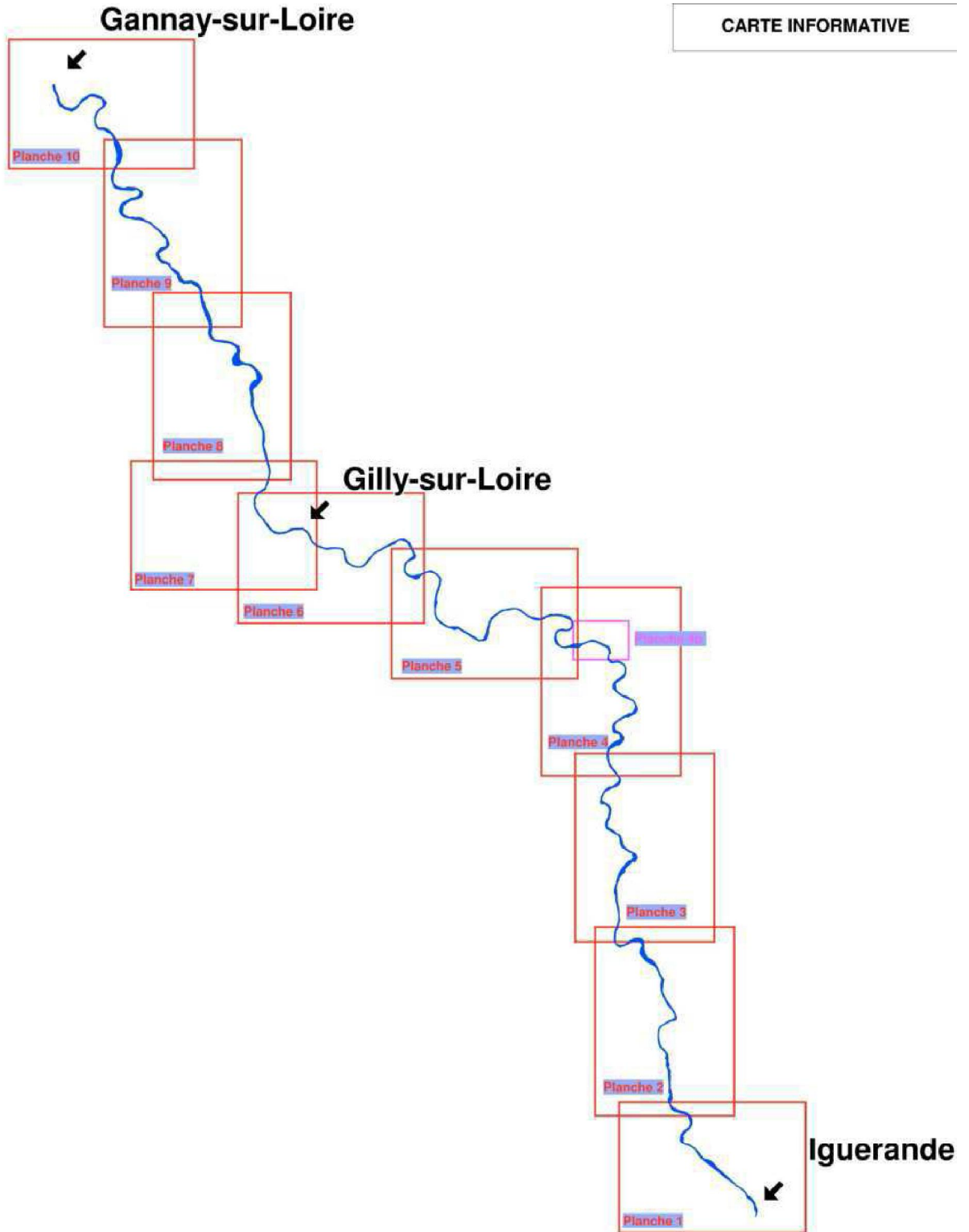


Figure 7 : Découpage en planches de la carte informative présentée en ANNEXE 5

Les cartes permettent de situer :

- les repères des crues historiques (1846, 1856, 1866, 1893, 1907) ainsi que ceux des crues de 1924, 1968, 1983 et ceux des crues plus récentes de 2001, 2002, 2003, 2005 et 2008,
- les débits de pointe pour certaines de ces crues issus d'études antérieures,
- les zones inondées, sur certains secteurs, de la crue de 2008,
- les ouvrages hydrauliques, talus et remblais susceptibles de structurer les écoulements en crue.

Les repères de crue sur le secteur d'étude sont listés sous forme de tableaux en ANNEXE 3.

Les débits de crue sont également listés dans des tableaux en ANNEXE 4.

Remarque : Certains repères des crues de 2003 et 2008 ne correspondent pas forcément au pic de crue. C'est le cas des lignes d'eau levées par la DREAL pendant l'évènement. La date et l'heure sont donc précisées pour ces repères. Ces repères sont différenciés sur la cartographie par un astérisque devant l'identifiant de repère de crue.



Figure 8 : Repères de crue de 2003 à Port Chasset

3 ANALYSE HYDROLOGIQUE

3.1 CONTEXTE HYDROLOGIQUE

Les zones d'apports de la Loire au droit de la zone d'étude sont très diverses : Massif Central, Monts de la Madeleine et massif du Morvan. Ceci implique une diversité des régimes de crues. La Loire à Villerest présente de fortes crues en automne et au printemps alors que ses affluents ont plutôt des crues d'hiver.

On distingue sur la Loire quatre types de crues en fonction des saisons :

- **Crues d'automne** : les perturbations cévenoles de septembre à novembre peuvent provoquer de fortes crues dans les parties montagneuses de la Haute Loire. Ces crues, venant de l'amont et caractérisées par des volumes d'eau très importants sont répertoriées comme les crues les plus violentes à Roanne. La crue de 1846 est de ce type ;
- **Crues d'hiver** : situées entre décembre et janvier, elles sont dues à de fortes précipitations dans le Morvan, avec de forts apports des affluents (Aron, Arroux, etc.). L'apport de la Loire pendant cette période est plutôt faible, les crues sont donc amplifiées entre Digoin et Nevers ;
- **Crues de printemps** : situées entre mai et juillet, elles naissent à l'amont de Villerest, dans les affluents de la Loire en aval de Bas-en-Basset. Ces crues au droit de Roanne sont moins importantes que les crues d'automne. Elles peuvent être renforcées par la concomitance des crues des affluents venant du Morvan. La crue de mai 1856 appartient à cette catégorie ;
- **Crues d'été** : ces crues sont de types crues d'orage. Les débits peuvent être forts mais le volume d'eau est assez faible. Elles sont rapidement atténuées.

3.2 CRUES HISTORIQUES

3.2.1 LES TROIS GRANDES CRUES DU XIXÈME SIÈCLE

3.2.1.1 Crue de 1846

La crue a eu lieu en octobre 1846, c'est une crue d'automne due à un événement pluvieux cévenol. Le débit de pointe à Roanne est très important, les affluents entre Roanne et Nevers apportent un faible volume d'eau supplémentaire. Cette crue a une période de retour estimée à 400 ans au droit de Roanne, et de l'ordre de 200 ans à Nevers.

3.2.1.2 Crue de 1856

La crue de mai 1856 a une période de retour inférieure à 50 ans à Roanne pour un débit de pointe de 2 600 m³/s environ. L'importance des apports du Morvan double quasiment le volume de crue entre Roanne et Nevers. La période de retour de la crue est alors de 120 ans à Nevers, avec un débit de pointe de 4 050 m³/s.

3.2.1.3 Crue de 1866

La crue de septembre 1866 est une crue mixte, causée par la simultanéité des crues de la Loire amont et de ses affluents situés entre Roanne et Nevers. La Loire a un débit de pointe de 3 840 m³/s à Roanne (période de retour proche de 100 ans), les affluents doublent le volume de la crue, le débit à Nevers est estimé à 4 380 m³/s, correspondant à une crue de période de retour de 200 ans.

3.2.2 HYDROGRAMMES DES TROIS GRANDES CRUES DU XIXEME SIECLE

L'étude EPTEAU [6] de 1997 s'achève par une reconstitution des grandes crues historiques du XIXème siècle. Les hydrogrammes des crues de 1846, 1856 et 1866 sont redonnés ci-après.

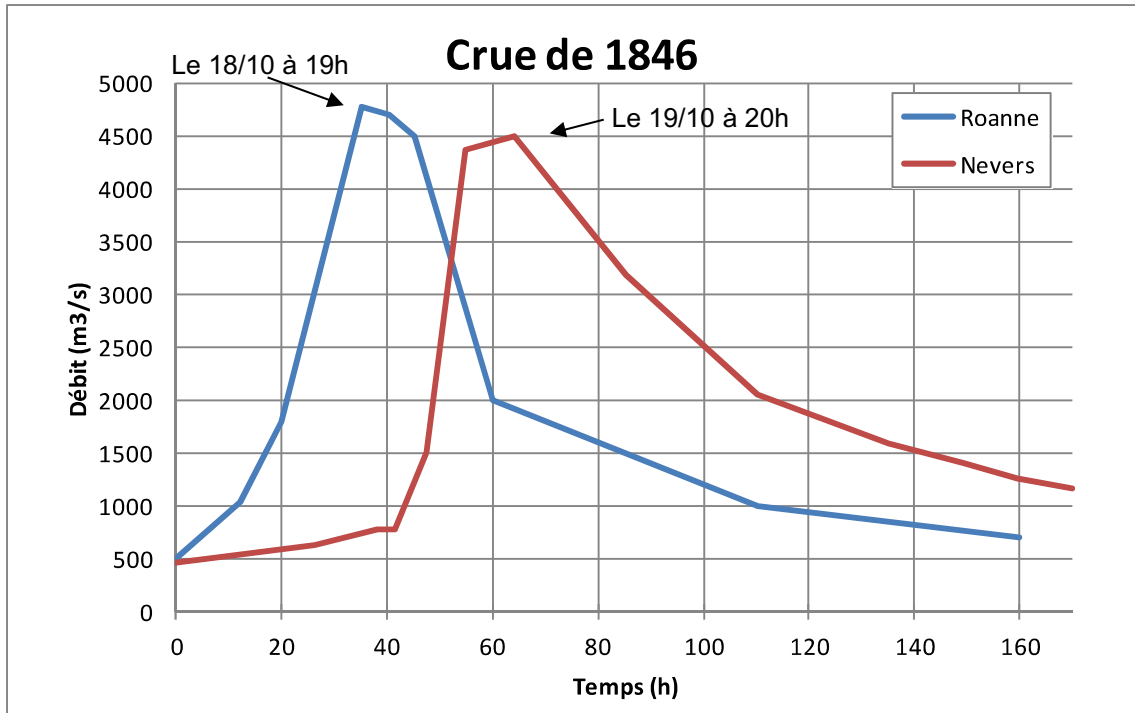


Figure 9 : Hydrogrammes de crue de 1846 de la Loire à Roanne et Nevers

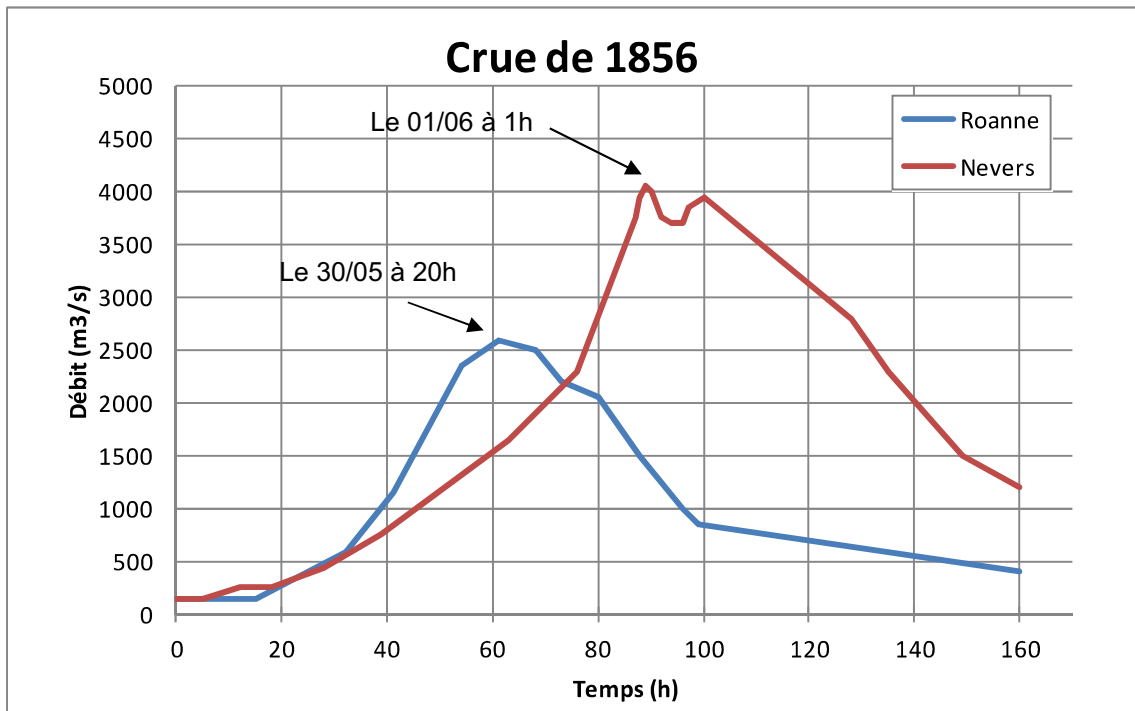


Figure 10 : Hydrogrammes de crue de 1856 de la Loire à Roanne et Nevers

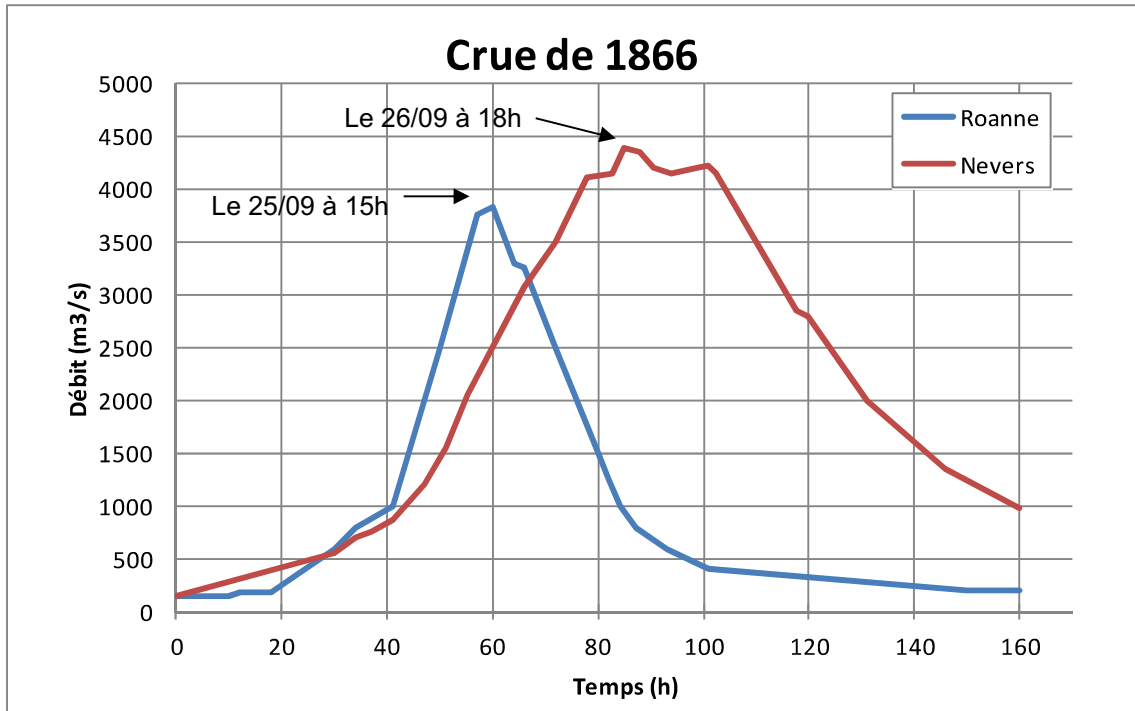


Figure 11 : Hydrogrammes de crue de 1866 de la Loire à Roanne et Nevers

Il est prévu, par la suite, de réaliser une simulation hydraulique de la crue exceptionnelle de 1846. Les hydrogrammes des affluents pour cette crue sont donc présentés en **ANNEXE 11** (source : [6]). Les hydrogrammes des apports intermédiaires ont été calculés de façon sommaire faute d'informations. Ce calcul répartit l'accroissement de volume constaté entre Roanne et Nevers au prorata des surfaces d'apport, et fournit les paramètres des hydrogrammes triangulaires correspondant.

3.3 ANALYSE DES PLUIES

L'objectif de cette partie est de connaître la répartition des précipitations sur l'ensemble du domaine d'étude afin de reconstituer les hydrogrammes des affluents à l'aide d'une loi de transformation pluie/débit.

L'analyse des pluies porte sur le bassin intermédiaire de la Loire compris entre Villerest et Imphy. L'extension retenue est plus large que le secteur sur lequel s'étend l'étude hydraulique, compris entre Iguerande et Gannay-sur-Loire. Il s'agit notamment d'intégrer à l'analyse, et notamment pour le calage du modèle hydrologique décrit au paragraphe 3.6 page 59, les stations hydrométriques de Villerest et d'Imphy sur la Loire.

3.3.1 LOCALISATION DES STATIONS PLUVIOMETRIQUES ET CARACTERISTIQUES

La Figure 12 donne la localisation des différentes stations pluviométriques présentes sur le secteur d'étude.



Figure 12 : Localisation des stations pluviométriques dans la zone d'étude (les numéros figurés en rouge correspondent au type de station⁴)

Type 0 : station synoptique professionnelle avec observation sur place ; Type 2 : station automatique, temps réel ; Type 3 : station automatique temps différé Type 4 : station manuelle

Compte tenu du nombre important de stations pluviométriques dans la zone d'étude, seules les stations de type 0 et 2 sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

| Code station | Nom de la commune | Altitude [m NGF] | latitude | longitude | type | ouverture |
|--------------|---------------------------|------------------|----------|-----------|------|-----------|
| 71491001 | Saint Yan | 242 | 46248 | 4016 | 0 | 1954 |
| 58095001 | Decize | 198 | 46491 | 3274 | 2 | 1936 |
| 58006001 | Anlezy | 215 | 46575 | 3305 | 2 | 1949 |
| 58092001 | Crux-la-ville | 283 | 47081 | 3309 | 2 | 1982 |
| 3253001 | Saint-Pourcain-sur-Besbre | 268 | 46295 | 3370 | 2 | 1994 |
| 58118001 | Fours | 223 | 46488 | 3444 | 2 | 1971 |
| 71047004 | Bourbon-Lancy | 210 | 46366 | 3444 | 2 | 1993-2008 |
| 3248001 | Saint-Nicolas-des-Biefs | 1 022 | 46031 | 3482 | 2 | 1991 |
| 42257002 | Saint-Martin d'Estreaux | 470 | 46122 | 3490 | 2 | 1993 |
| 3226001 | Saint-Didier-en-Donjon | 293 | 46220 | 3511 | 2 | 1997 |
| 42199002 | Saint-André d'Apchon | 380 | 46015 | 3561 | 2 | 1994 |
| 71275002 | Marcigny | 250 | 46166 | 4020 | 2 | 1992-2005 |
| 42184002 | Riorges | 297 | 46032 | 4023 | 2 | 1994 |
| 42170001 | Perreux | 304 | 46014 | 4065 | 2 | 1994-2001 |
| 71542004 | Toulon-sur-Arroux | 306 | 46414 | 4094 | 2 | 1997-2001 |
| 42052002 | Charlieu | 279 | 46095 | 4103 | 2 | 1993 |
| 71014004 | Autun | 303 | 46585 | 4158 | 2 | 1990 |
| 71022001 | Baudemont | 337 | 46167 | 4179 | 2 | 1998 |
| 42128001 | Machezal | 610 | 45560 | 4183 | 2 | 1995 |
| 71486002 | Saint-Vallier | 280 | 46390 | 4210 | 2 | 1991 |
| 71540002 | Torcy | 317 | 46455 | 4267 | 2 | 1981 |
| 71320001 | Mont-Saint-Vincent | 602 | 46377 | 4287 | 2 | 1943 |
| 21567001 | Saint-Prix-les-Arnay | 390 | 47075 | 4299 | 2 | 1996 |

Tableau 4 : Caractéristiques des stations pluviométriques de type 0 et 2 présentes sur le secteur d'étude (Source : Climathèque de Météo france)

3.3.2 ANALYSE STATISTIQUE DES PLUIES JOURNALIERES

On cherche dans cette partie à réaliser l'analyse statistique de pluies journalières sur le bassin étudié.

L'analyse statistique a déjà été réalisée sur certaines stations dans le cadre de l'étude « Estimation des hauteurs de précipitations d'occurrence rare pour des durées de cumul de 1 à 10 jours sur 3000 postes français » - Météo France / 1999. Cette étude

présente une estimation des précipitations pour les périodes de retour de 10, 50 et 100 ans sur plusieurs postes à proximité du bassin versant d'étude. La méthode utilisée est la méthode du renouvellement. L'étude utilise les pluies journalières de 6h à 6h (UTC). La pluie journalière de période de retour de 30 ans est obtenue à l'aide d'une interpolation. L'implantation des stations pluviométriques est figurée sur la Figure 13 par une étoile rouge.

| Station | Période de retour (année) | | | |
|-----------------|---------------------------|------|------|------|
| | 10 | 30 | 50 | 100 |
| La Tuilière | 65,0 | 77,3 | 83,0 | 90,0 |
| Vichy-ville | 64,0 | 75,5 | 81,0 | 88,0 |
| Gueriny | 53,0 | 62,6 | 67,0 | 73,0 |
| Yzeure | 58,0 | 69,6 | 75,0 | 82,0 |
| Trades | 62,0 | 73,1 | 78,0 | 85,0 |
| Charolles | 61,0 | 72,0 | 77,0 | 84,0 |
| Bourbon-Lancy | 60,0 | 71,5 | 77,0 | 84,0 |
| La Collancelle | 52,0 | 62,3 | 67,0 | 73,0 |
| Nolay | 61,0 | 72,5 | 78,0 | 85,0 |
| Neulisse | 66,1 | 80,2 | 87,0 | 95,0 |
| Lamure-sur-Azer | 66,0 | 81,1 | 83,9 | 92,0 |
| Artaix | 68,0 | 81,0 | 87,0 | 95,0 |

Tableau 5 : Pluies journalières statistiques aux différentes stations issues de l'étude Météo-France

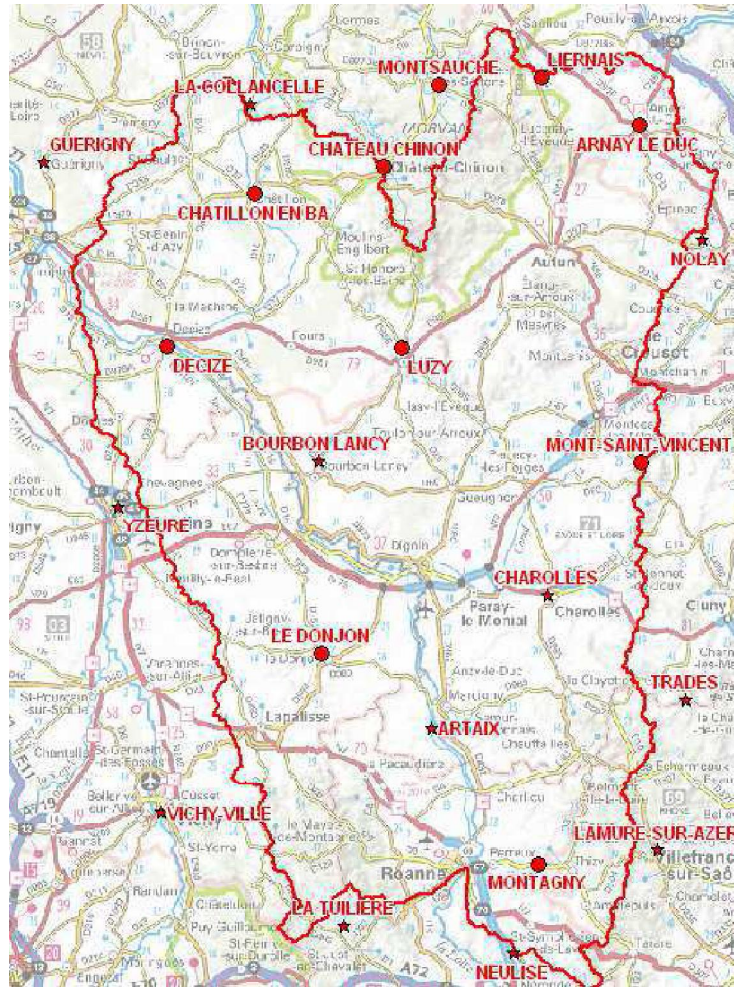


Figure 13 : Localisation des stations pluviométriques utilisées pour l'étude statistique (Climathèque)

Pour compléter l'analyse des pluies journalières, des chroniques de pluies journalières maximales annuelles ont été récupérées sur la climathèque de Météo France pour d'autres stations pluviométriques ; elles sont relevées sur la période fixe de 6h le jour J à 6h le jour J+1. Les stations automatiques ont été implantées pour la plupart récemment. Les événements pluvieux récents (2003 et 2008) sont donc bien renseignés. Par contre, les séries de données sont trop courtes pour pouvoir réaliser une analyse statistique par ajustement. Il faut donc faire appel à des stations limitrophes ou des stations manuelles de type 4.

Les stations choisies pour compléter l'analyse statistique des pluies journalières sont répertoriées dans le tableau ci-dessous, et localisées sur la Figure 13 par un point rouge.

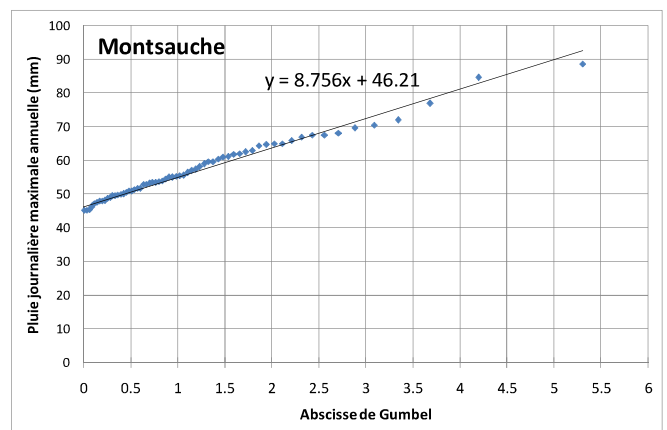
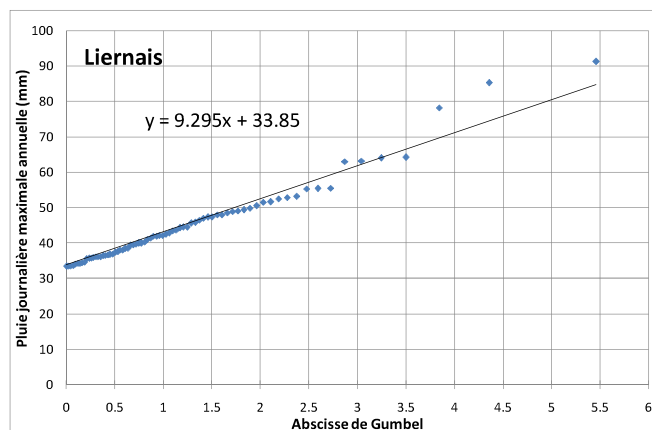
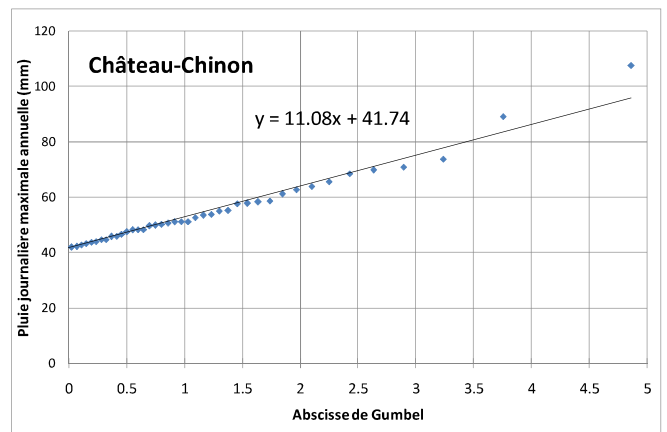
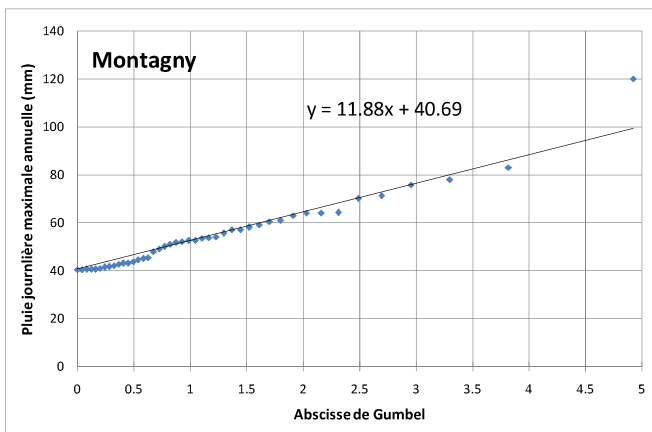
| Code station | Nom de la commune | Altitude [m NGF] | type | ouverture |
|--------------|------------------------|------------------|------|-----------|
| 58065001 | Chatillon en Bazois | 270 | 4 | 1959 |
| 58095001 | Decize | 198 | 2 | 1936 |
| 58062001 | Château-Chinon | 598 | 2 | 1934 |
| 58180001 | Montsauche-les-Settons | 595 | 4 | 1894 |

| Code station | Nom de la commune | Altitude [m NGF] | type | ouverture |
|--------------|--------------------|------------------|------|-------------|
| 21349001 | Liernais | 492 | 4 | 1960 |
| 21023001 | Arnay le Duc | 365 | 4 | 1953 - 1996 |
| 58149001 | Luzy | 300 | 4 | 1960 |
| 3103001 | Le Donjon | 325 | 4 | 1937 |
| 42145003 | Montagny | 438 | 4 | 1942 |
| 71320001 | Mont-Saint-Vincent | 602 | 2 | 1943 |

Tableau 6 : Caractéristiques des stations pluviométriques servant à l'étude statistique des pluies journalières (Source : Climathèque de Météo France)

Un ajustement de Gumbel est alors réalisé pour chaque chronique de précipitations journalières maximales annuelles aux différentes stations.

Les ajustements réalisés sont représentés sur les figures suivantes et les pluies statistiques journalières sont données dans le Tableau 7:



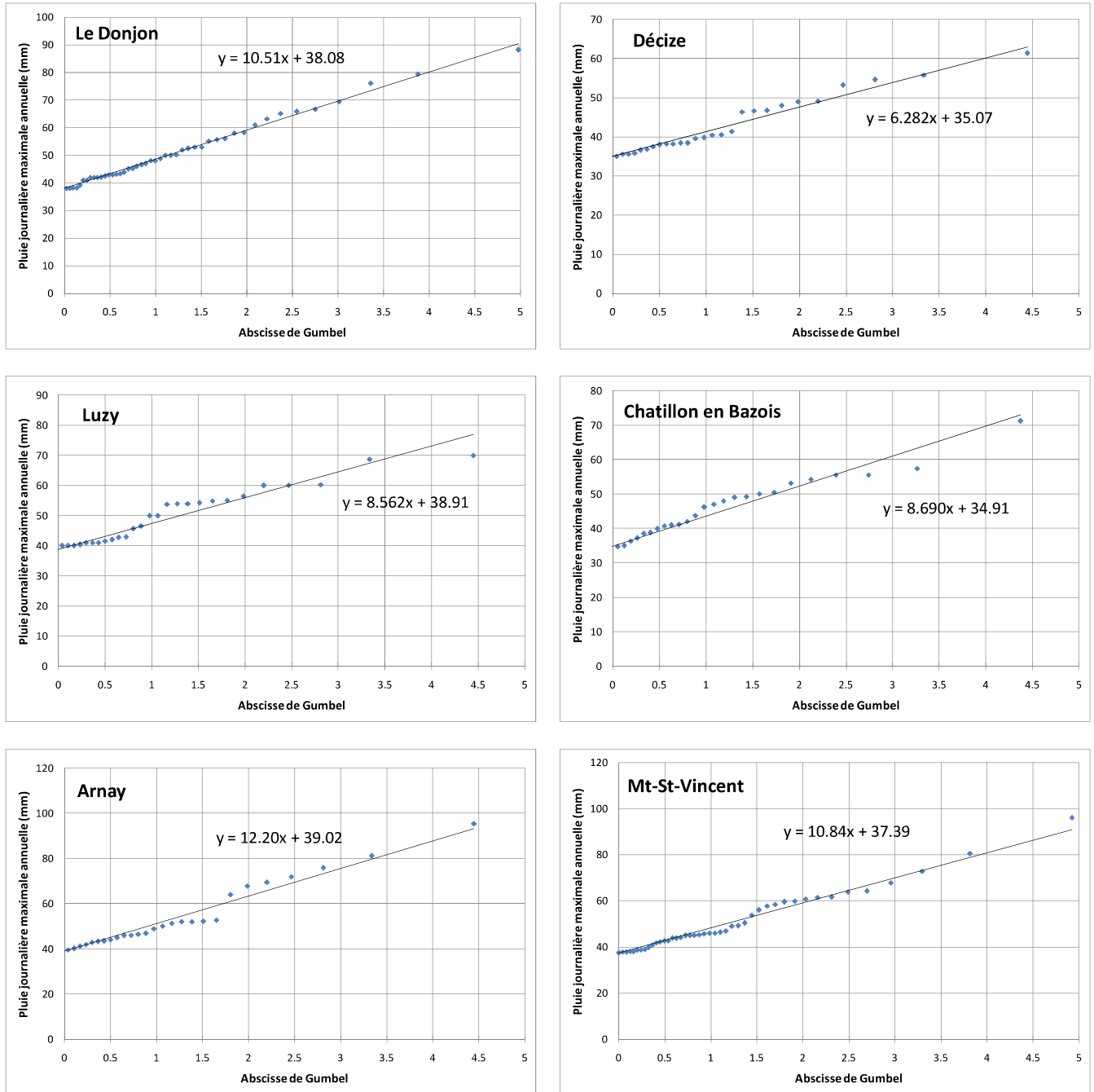


Figure 14 : Ajustement de Gumbel sur les pluies maximales annuelles journalières pour chaque station

| Station | Période de retour (année) | | | |
|------------------------|---------------------------|------|------|------|
| | 10 | 30 | 50 | 100 |
| Chatillon en Bazois | 54,5 | 64,3 | 68,9 | 74,9 |
| Decize | 49,2 | 56,3 | 59,6 | 63,9 |
| Château-Chinon | 66,7 | 79,2 | 85,0 | 92,7 |
| Montsauche-les-Settons | 65,9 | 75,9 | 80,4 | 86,5 |
| Liernais | 54,7 | 65,4 | 70,1 | 76,6 |

| Station | Période de retour (année) | | | |
|--------------------|---------------------------|------|------|------|
| | 10 | 30 | 50 | 100 |
| Arnay le Duc | 66,5 | 80,4 | 86,7 | 95,2 |
| Luzy | 58,2 | 67,9 | 72,4 | 78,3 |
| Le Donjon | 61,8 | 73,7 | 79,1 | 86,4 |
| Montagny | 67,5 | 80,9 | 87,0 | 95,4 |
| Mont-Saint-Vincent | 61,8 | 74,1 | 79,7 | 87,3 |

Tableau 7 : Pluies journalières statistiques aux différentes stations issues de l'analyse statistique

3.3.3 PLUIES CENTREES SUR 24 H ET REPARTITION SUR LE SECTEUR D'ETUDE

Les pluies cumulées sur 24h sont obtenues à partir des pluies cumulées journalières (issues de l'étude des mesures pluviométriques aux stations) multipliées par le coefficient de Weiss. Le coefficient de Weiss permet de recentrer la pluie de 24h par rapport à la pluie journalière. En moyenne, il est considéré que la pluie de 24h de période de retour T donnée $P_{24h}(T)$ est 14% plus forte que la pluie journalière $P_{j_{max}}(T)$ de même période de retour. Ainsi : $P_{24h}(T) = 1,14P_{j_{max}}(T)$.

Les tableaux suivants donnent les pluies centrées sur 24h aux différentes stations pluviométriques retenues au paragraphe précédent.

| Station | Période de retour (année) | | | |
|------------------------|---------------------------|------|------|-------|
| | 10 | 30 | 50 | 100 |
| La Tuilière | 74,1 | 88,1 | 94,6 | 102,6 |
| Vichy-ville | 73,0 | 86,1 | 92,3 | 100,3 |
| Gueriny | 60,4 | 71,4 | 76,4 | 83,2 |
| Yzeure | 66,1 | 79,3 | 85,5 | 93,5 |
| Trades | 70,7 | 83,3 | 88,9 | 96,9 |
| Charolles | 69,5 | 82,1 | 87,8 | 95,8 |
| Bourbon-Lancy | 68,4 | 81,5 | 87,8 | 95,8 |
| La Collancelle | 59,3 | 71,0 | 76,4 | 83,2 |
| Nolay | 69,5 | 82,7 | 88,9 | 96,9 |
| Neulisse | 75,3 | 91,4 | 99,2 | 108,3 |
| Lamure-sur-Azer | 75,2 | 92,5 | 95,7 | 104,9 |
| Artaix | 77,5 | 92,3 | 99,2 | 108,3 |
| Chatillon en Bazois | 62,1 | 73,3 | 78,5 | 85,4 |
| Decize | 56,1 | 64,2 | 67,9 | 72,9 |
| Château-Chinon | 76 | 90,3 | 96,9 | 105,7 |
| Montsauche-les-Settons | 75,1 | 86,5 | 91,6 | 98,6 |
| Liernais | 62,4 | 74,5 | 79,9 | 87,3 |
| Arnay le Duc | 75,8 | 91,6 | 98,8 | 108,5 |
| Luzy | 66,3 | 77,4 | 82,5 | 89,3 |
| Le Donjon | 70,4 | 84,0 | 90,2 | 98,5 |
| Montagny | 76,9 | 92,2 | 99,2 | 108,7 |
| Mont-Saint-Vincent | 70,5 | 84,5 | 90,9 | 99,5 |

Tableau 8 : Pluies statistiques centrées sur 24h aux différentes stations pluviométriques retenues

Les valeurs des pluies statistiques centrées sur 24 h permettent alors d'établir des cartes de répartition pour chacune des périodes de retour étudiées.

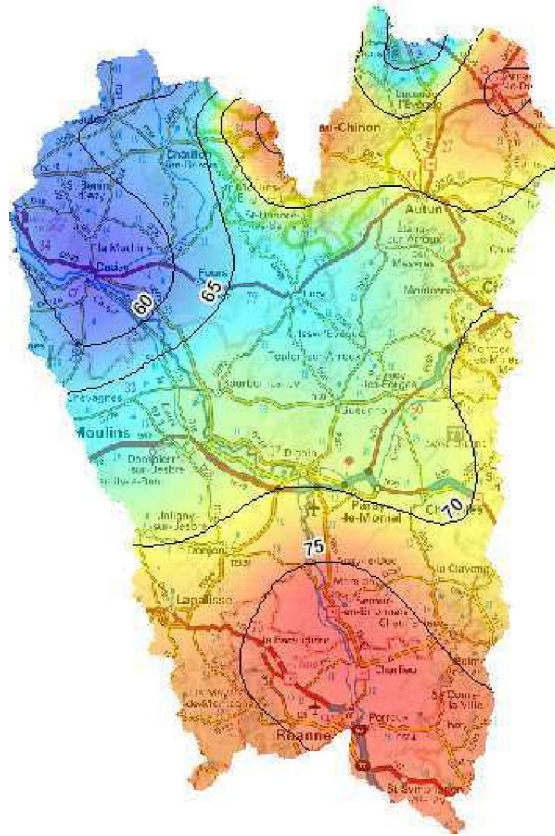


Figure 15 : Répartition des pluies centrées sur 24 h pour T=10 ans (en mm)

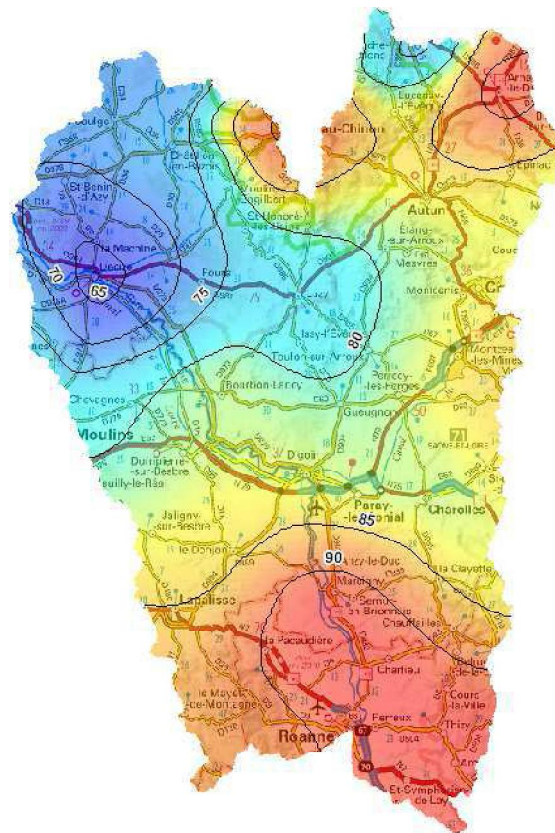


Figure 16 : Répartition des pluies centrées sur 24 h pour T=30 ans (en mm)

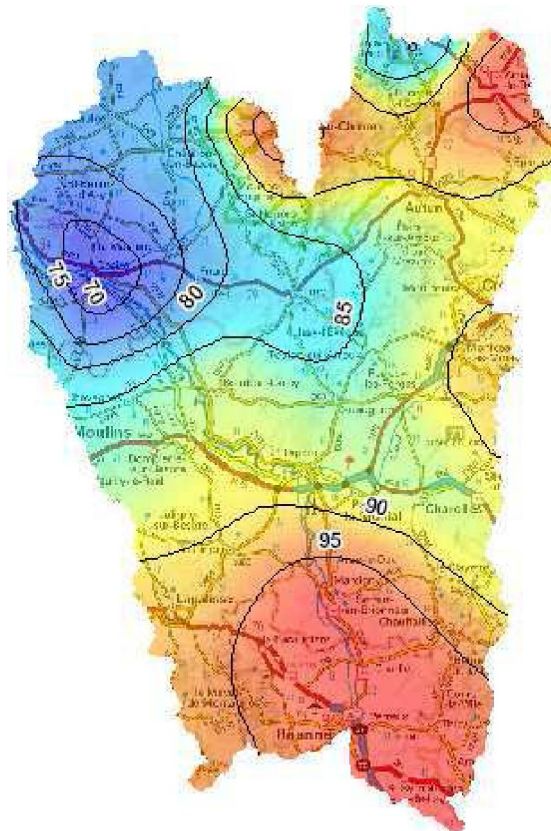


Figure 17 : Répartition des pluies centrées sur 24 h pour T=50 ans (en mm)

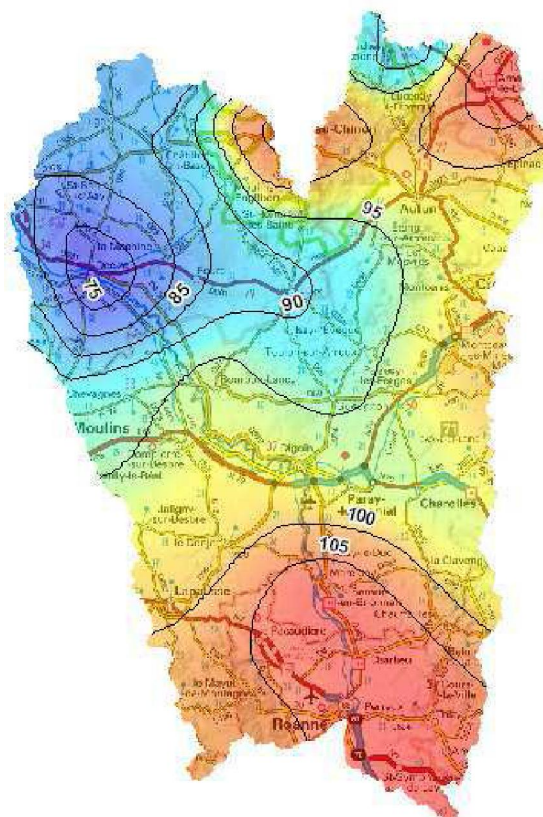


Figure 18 : Répartition des pluies centrées sur 24 h pour T=100 ans (en mm)

Ces cartes indiquent une répartition non homogène des pluies statistiques sur le bassin d'étude. En effet, de fortes pluies sont observées sur le massif du Morvan (au nord du bassin d'étude), et sur le Massif Central (au sud du bassin d'étude) alors que de plus faibles pluies sont mesurées en plaine à l'aval, à proximité de Decize.

3.3.4 PLUIES DE PROJET THEORIQUES

Une pluie de projet est un événement pluvieux fictif représenté par son hyétogramme. Différents types de pluie de projet existent. En France, le modèle de pluie double triangle développé par Desbordes en 1973 est souvent utilisé. Son principe repose sur l'étude d'une série chronologique de pluies réelles constatant que :

- les événements réels sont généralement constitués d'une période de pluie intense relativement courte située à l'intérieur d'une séquence de pluie de quelques heures,
- aucune forme particulière de distribution temporelle des intensités n'est plus probable qu'une autre.

3.3.4.1 Hypothèses

La répartition des pluies journalières statistique montre des cumuls de pluie variables spatialement. La pluie de projet sur la zone d'étude ne pourra pas être homogène sur l'ensemble des bassins versants. Au regard des cartes de répartition, quatre stations représentatives ont été sélectionnées : Decize, Montsauche, Mont-Saint-Vincent et Montagny. Ces stations ont été choisies après l'analyse de la répartition des pluies et du fait de la taille de leur chronique de données.

Les données SHYREG permettent elles aussi de fournir des pluies statistiques. Cette méthode a été développée par le CEMAGREF en partenariat avec Météo-France, le CETE Méditerranée et la Direction de Prévention des Pollutions et des Risques (DPPR) du Ministère de l'Environnement et du Développement Durable. Ces données sont issues d'une régionalisation de la méthode SHYPRE (Simulation d'HYDrogrammes pour la PREDétermination des crues). Elle constitue une base de données de quantiles de pluie à l'échelle du kilomètre carré pour des périodes de retour allant de 2 à 100 ans et pour des durées allant de 1 heure à 3 jours.

| Méthode | Période de retour | | |
|------------|-------------------|-------|-------|
| | 10 | 50 | 100 |
| SHYREG | 81,2 | 107,4 | 122,1 |
| Ajustement | 75,1 | 91,6 | 98,6 |

Tableau 9 : Pluies statistiques centrées sur 24h à la station de Montsauche en fonction de la méthode (en mm)

Le Tableau 9 permet de comparer les valeurs des pluies statistiques en fonction de la méthode au droit de la station de Montsauche. Les pluies issues de la méthode SHYREG sont plus importantes quelle que soit la période de retour. La régionalisation de la méthode de Shyreg manquant de précision sur le secteur d'étude pour les pluies cumulées sur 24 h, une régionalisation par polygones de Thiessen sera réalisée par la suite pour chaque sous bassin du modèle hydrologique à partir des valeurs données par les quatre stations de référence (Decize, Montsauche, Mont-Saint-Vincent et Montagny).

Les pluies de projet sont de type double triangle et de durée 24h. Les précipitations de durées inférieures au pas de temps de 24h sont déterminées à partir de la formule de Montana :

$$\frac{P_t}{P_{24}} = \left(\frac{t}{24}\right)^b$$

où t (en h) représente la durée de précipitation inférieure à 24h et b le coefficient de Montana. P₂₄ représente le cumul journalier de pluie (en mm) pour la période de retour étudiée. Le coefficient b, dit de Montana est calculé à partir des données SHYREG pour une durée d'une heure au droit des stations pluviométriques pour chaque période de retour.

| | T = 10 ans | T = 50 ans | T = 100 ans |
|--------------------|------------|------------|-------------|
| Decize | 0,2022 | 0,1634 | 0,1497 |
| Montagny | 0,2738 | 0,2559 | 0,2488 |
| Mont Saint Vincent | 0,2916 | 0,2679 | 0,2611 |
| Montsauche | 0,2484 | 0,2209 | 0,2111 |

Tableau 10 : Coefficient de Montana b

3.3.4.2 Création des pluies doublement triangulaires

La pluie a une durée totale de 24 h et l'événement plus intense dure 2,4 h, soit un dixième de la durée de l'événement pluvieux.

Les figures ci-dessous sont données à titre illustratif. Il s'agit de la pluie de projet de la station de Decize de période de retour 10 ans et de la pluie centennale de la station de Mont-Saint-Vincent.

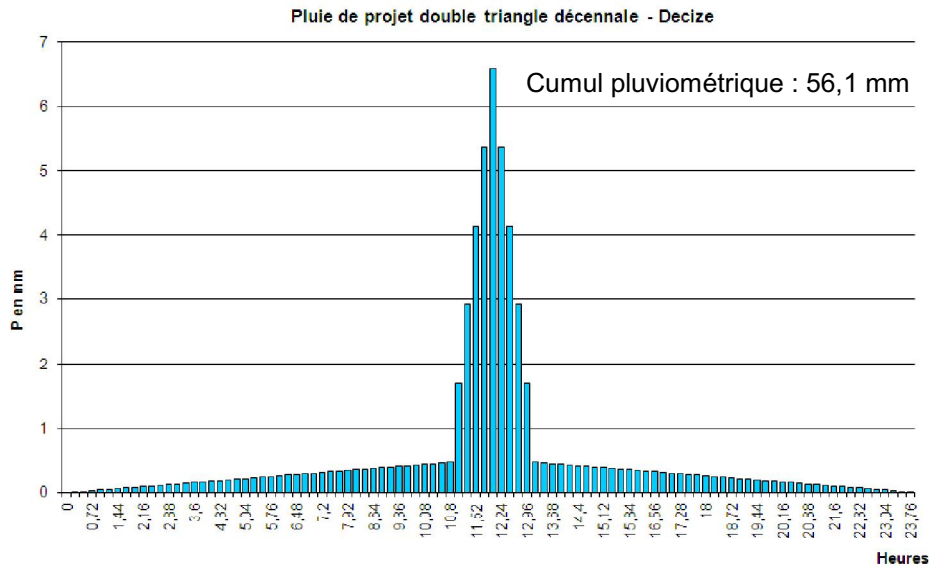


Figure 19 : Pluie de projet double triangle décennale à Decize

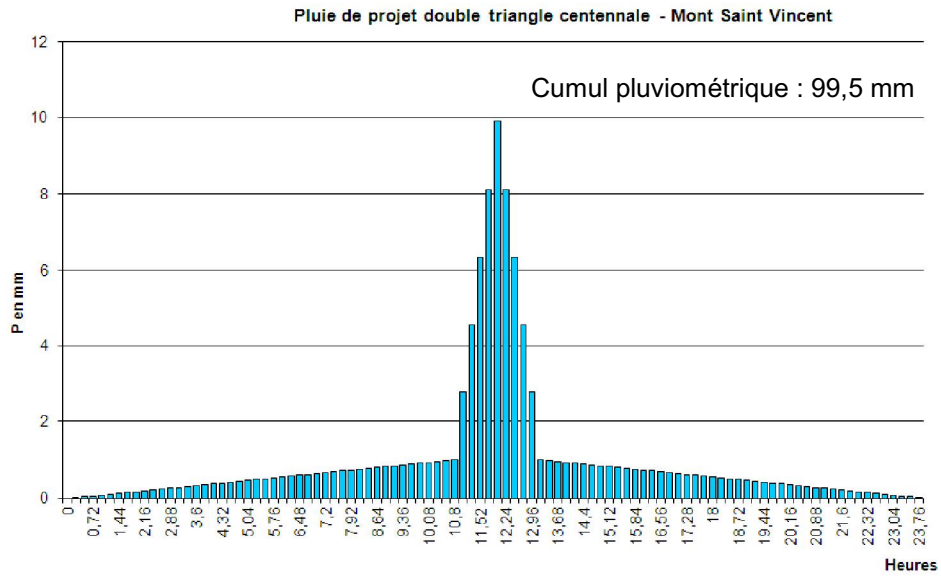


Figure 20 : Pluie de projet double triangle centennale à Mont Saint Vincent

3.3.5 ANALYSE DES EVENEMENTS DE DECEMBRE 2003 ET NOVEMBRE 2008

L'analyse des deux évènements pluvieux se fait uniquement sur le secteur d'étude modélisé.

Deux crues ont eu lieu récemment dans la zone d'étude. Pour analyser le type d'évènement, la répartition de la pluie sur le bassin versant est étudiée. Pour cela, les données horaires de pluviométrie d'une dizaine de stations sont utilisées.

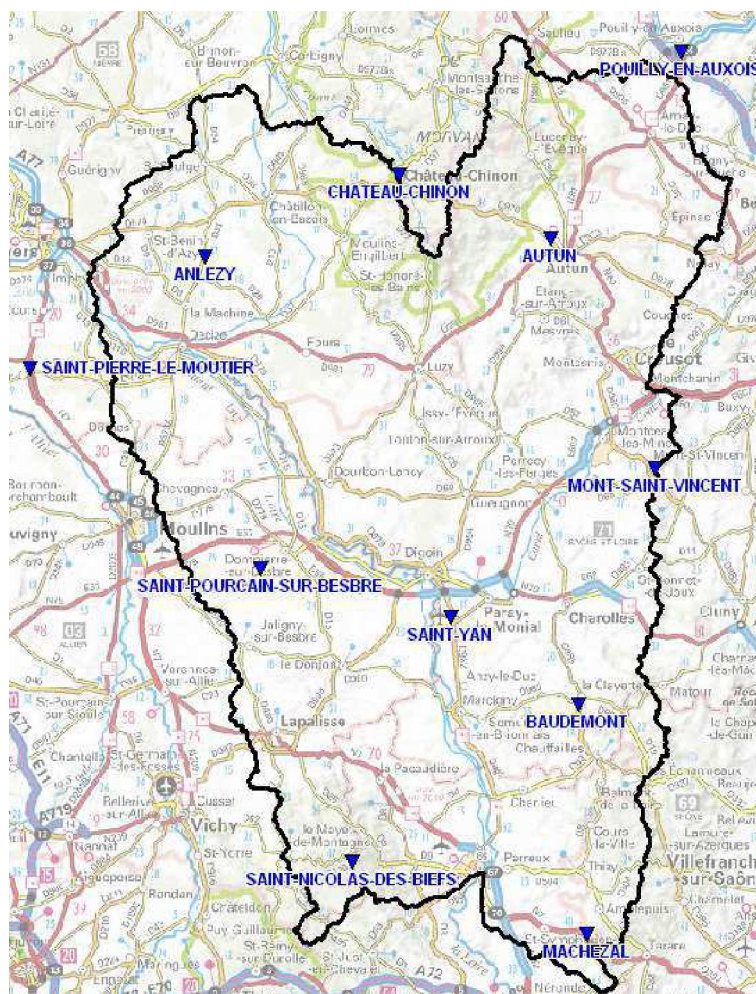


Figure 21 : Localisation des stations pluviométriques

| Code station | Nom de la commune | Altitude [m NGF] | Latitude | Longitude | Type ⁵ | Ouverture |
|--------------|---------------------------|------------------|----------|-----------|-------------------|-----------|
| 71491001 | Saint Yan | 242 | 46248 | 4016 | 0 | 1954 |
| 58006001 | Anlezy | 215 | 46575 | 3305 | 2 | 1949 |
| 03253001 | Saint Pourcain-sur-Besbre | 268 | 46295 | 3370 | 2 | 1994 |
| 03248001 | Saint-Nicolas-des-biefs | 1022 | 46031 | 3482 | 2 | 1991 |
| 71014004 | Autun | 303 | 46585 | 4158 | 2 | 1990 |
| 71022001 | Baudemont | 337 | 46167 | 4179 | 2 | 1998 |
| 42128001 | Machezal | 610 | 45560 | 4183 | 2 | 1995 |
| 71320001 | Mont-Saint-Vincent | 602 | 46377 | 4287 | 2 | 1943 |
| 58062001 | Château-Chinon | 598 | 47047 | 3561 | 2 | 1934 |
| 21501001 | Pouilly-en-auxois | 415 | 47151 | 4337 | 2 | 1931 |
| 58264001 | Saint-Pierre-le-Moutier | 225 | 46477 | 3074 | 2 | 1972 |

Tableau 11 : Stations pluviométriques utilisées pour l'observation des deux évènements

⁵ Type 0 : station synoptique professionnelle avec observation sur place ; Type 2 : station automatique, temps réel

La Figure 22 illustre la répartition des pluies lors de la crue de décembre 2003. Des fortes pluies ont été observées sur la partie sud-est de la zone d'étude le 1^{er} décembre 2003.

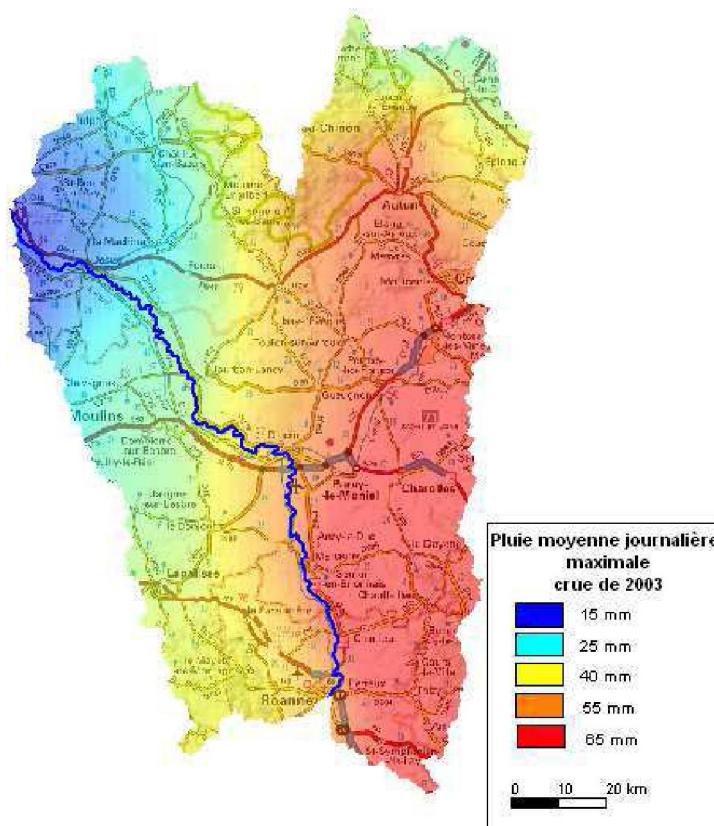


Figure 22 : Cartographie des maximaux des pluies journalières enregistrées lors de la crue de 2003 (en mm)

La crue de novembre 2008 est principalement liée aux apports amont de la Loire, avec de fortes pluies dans la Massif Central (cf. Figure 23). La pluviométrie décroît du sud vers le nord sur le secteur d'étude.

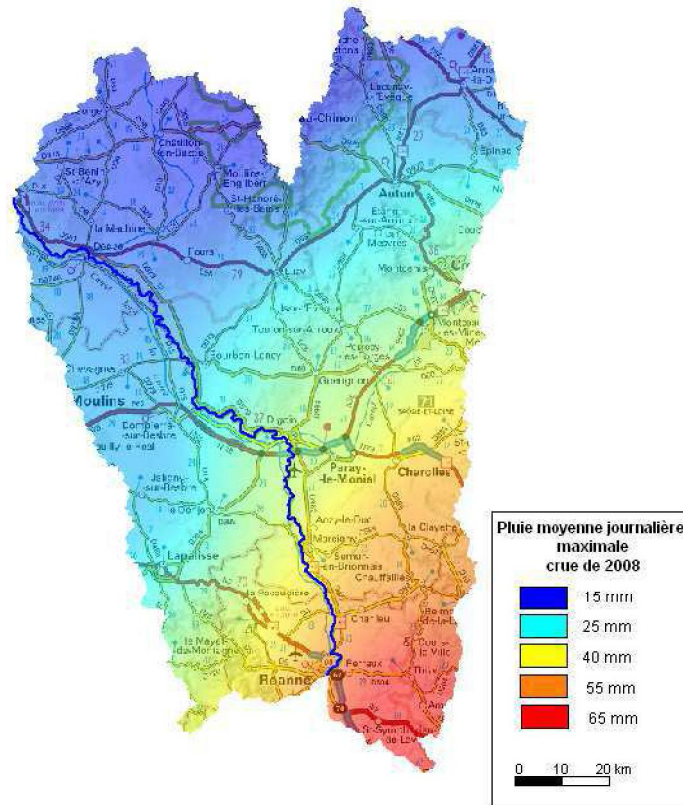


Figure 23 : Cartographie des maximaux des pluies journalières enregistrées lors de la crue de 2008 (en mm)

Ces deux cartes montrent une hétérogénéité de la répartition pluviométrique, ce qui laisse supposer un processus de crue plus ou moins conséquent d'un affluent à l'autre.

3.4 INFLUENCE DU BARRAGE DE VILLEREST

Le barrage de Villerest a été mis en eau en 1985. Propriété de l'Etablissement Public Loire (EPL), il est situé en amont du secteur d'étude dans le département de la Loire. Ce barrage a une double fonction de soutien des étiages et de protection contre les inondations. Son influence sur les crues est déterminante jusqu'à la confluence avec l'Allier, à l'aval de Nevers. Il a notamment un impact très fort sur les crues à l'aval de Roanne. Cet impact est dû à la gestion de la cote de retenue du barrage qui engendre un laminage important de la crue. La gestion fine réalisée par l'Etablissement Public Loire cherche à amplifier cet impact :

- en augmentant la capacité de stockage avec une vidange préventive 20 heures au préalable, en fonction de la prévision de crue ;
- en régulant le débit sortant en fonction du volume de l'hydrogramme prévu ;
- en vidangeant le plus rapidement la retenue en phase décrochée dans le cas d'une seconde crue rapprochée.

Les effets théoriques du barrage sur l'écrêtement des crues sont les suivantes :

- l'ouvrage n'intervient pas sur les crues inférieures à 1 000 m³/s ;
- pour les crues inférieures à 2 000 m³/s, le débit maximal est réduit à 1 000 m³/s ;

- il réduit de la moitié les crues comprises entre 2 000 m³/s et 4 000 m³/s ;
- il diminue de 2 000 m³/s le débit des crues supérieures à 4 000 m³/s.

La Figure 24 ci-après, issue d'une plaquette de présentation du barrage de l'EPL, présente l'écrêtement du barrage sur la crue de novembre 2008.

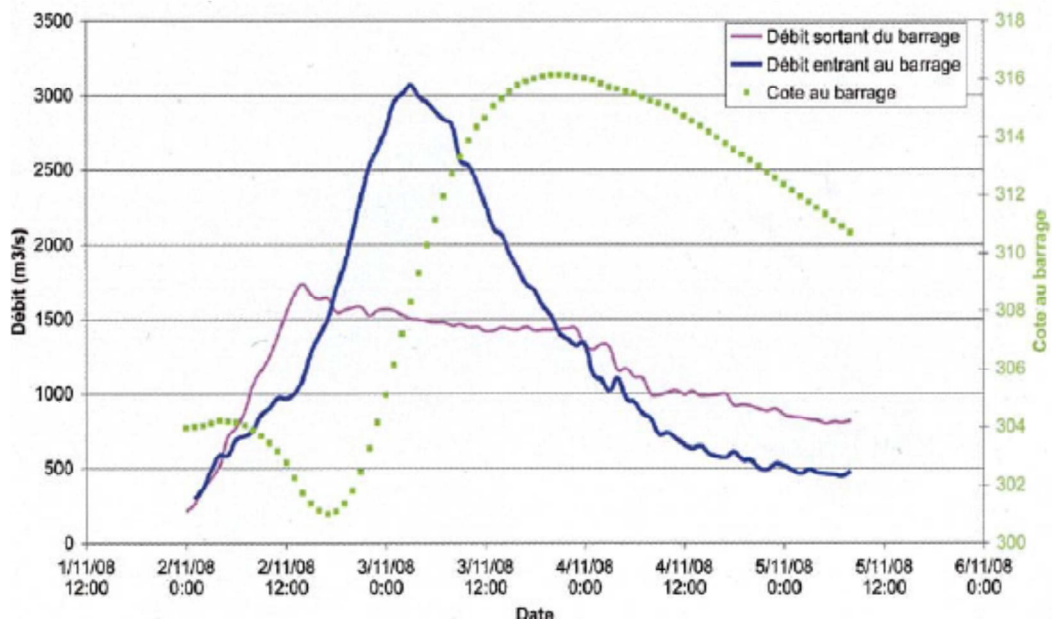


Figure 24 : Ecrêtement de la crue de novembre 2008 à Villerest

Certaines situations pourraient cependant réduire la performance de l'écrêtement du barrage de Villerest :

- situation correspondant à l'arrivée d'une crue avec plusieurs pointes successives : réduction de l'écrêtement si le barrage est partiellement rempli au moment de la survenue d'une nouvelle pointe,
- situation correspondant à une défaillance de la chaîne de gestion,
- erreur de manœuvre des vannes d'évacuation des crues,
- situation catastrophe avec rupture de vannes du barrage ou du barrage lui-même.

Pour la présente étude, **le barrage de Villerest est considéré comme un ouvrage transparent.**

3.5 ANALYSE DES DEBITS

3.5.1 ANALYSE AUX STATIONS HYDROMETRIQUES

Plusieurs stations hydrométriques sont présentes dans la zone d'étude. L'analyse des débits aux stations hydrométriques a pour but de définir les débits de crues caractéristiques de la Loire. Les stations étudiées sont de l'amont vers l'aval : Villerest, Digoin, Gilly et Imphy, localisées par des carrés rouges sur la Figure 25.

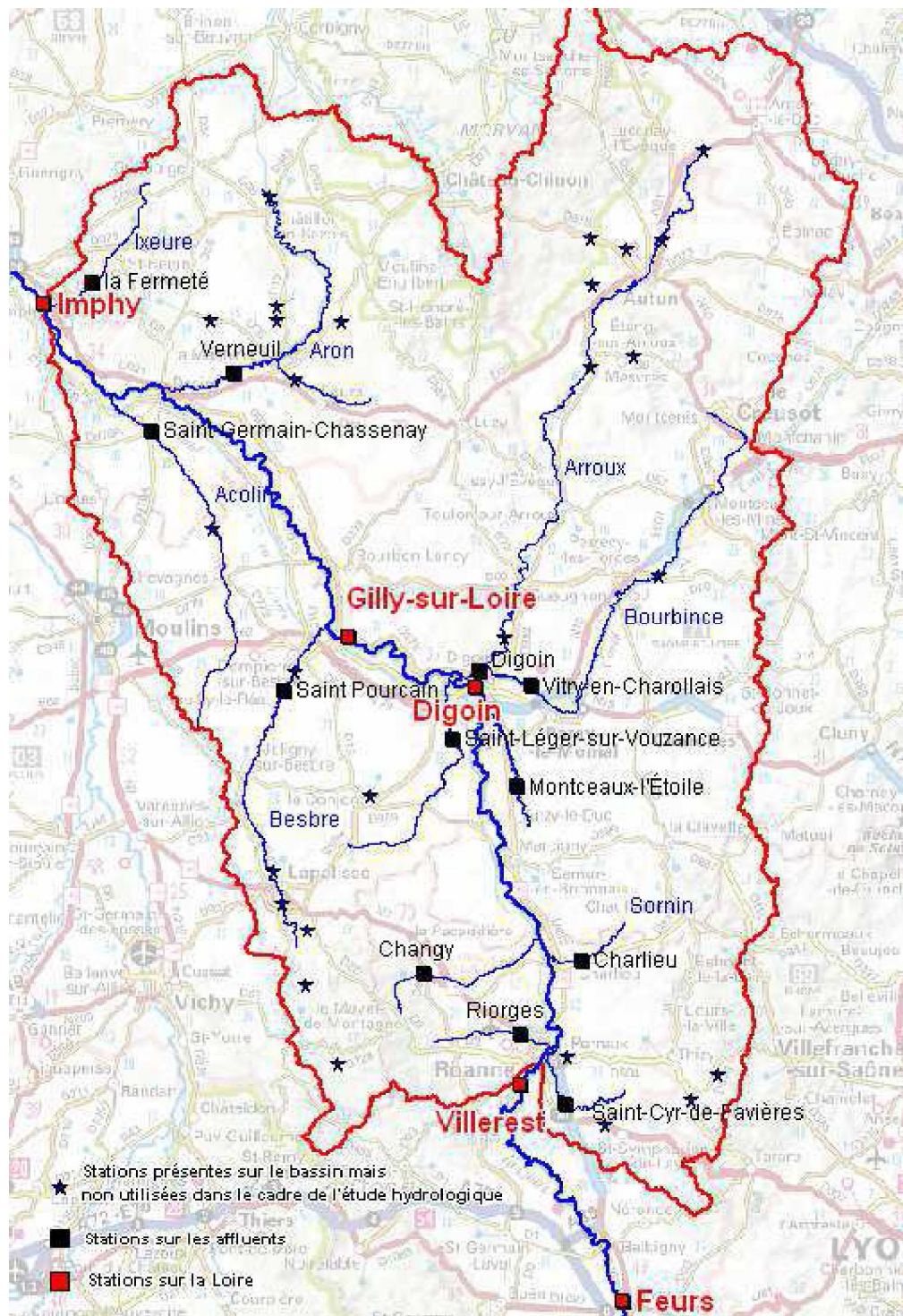


Figure 25 : Cartographie des stations hydrométriques

Les stations représentées par des carrés noirs sont celles présentes sur les affluents. Elles servent par la suite au calage du modèle hydrologique pour les crues de 2003 et 2008.

3.5.1.1 Localisation des stations et caractéristiques

Les caractéristiques des stations de mesure sont présentées dans le tableau ci-dessous et localisées sur la Figure 25 :

| Code | Rivière | Ville | BV (km ²) | Données disponibles |
|----------|-----------|---------------------------|-----------------------|---------------------|
| K0700010 | Loire | Feurs | 4 978 | 1984 - 2012 |
| K0910010 | Loire | Villerest | 6 585 | 1839 - 2012 |
| K1180010 | Loire | Digoin | 9 315 | 1958 - 2012 |
| K1440010 | Loire | Gilly | 13 007 | 1969 - 2012 |
| K1900010 | Loire | Imphy | 17 390 | 2001 - 2012 |
| K0983010 | Rhins | Saint-Cyr de Favières | 427 | 1969 - 2012 |
| K0937010 | Oudan | Riorges | 26 | 1984 - 2012 |
| K1084010 | Teyssonne | Changy | 23 | 1971 - 2012 |
| K1063010 | Sornin | Charlieu | 457 | 1974 - 1986 |
| K1563020 | Besbre | Saint-Pourçain-sur-Besbre | 710 | 1985 - 2012 |
| K1173210 | Arconce | Montceaux l'Etoile | 599 | 1970 - 2012 |
| K1414010 | Vouzance | Saint Leger sur Vouzance | 131 | 1997 - 2012 |
| K1383010 | Bourbince | Vitry en Charollais | 819 | 1967 - 2012 |
| K1391810 | Arroux | Digoin | 3 166 | 1958 - 2012 |
| K1773010 | Aron | Verneuil | 1 465 | 1970 - 2012 |
| K1914510 | Ixeure | La Fermeté | 115 | 1968 - 2012 |
| K1833010 | Acolin | Saint-Germain-Chassenay | 384 | 1970 - 2012 |

Tableau 12 : Stations hydrométriques présentes sur le bassin d'étude

Les stations hydrométriques de Villerest, Digoin et Gilly ont été retenues pour l'étude statistique des débits de pointe de la Loire du fait de leurs longues séries de données. En revanche, la station hydrométrique d'Imphy, en raison d'une chronique trop courte (10 ans), n'a pas été exploitée pour l'analyse statistique.

Les données proviennent en totalité de la Banque HYDRO pour les stations de Digoin et Gilly.

La Banque HYDRO donne les débits de pointe sur la période 1920 – 2012 pour la station de Villerest. Cette chronique a par ailleurs pu être étendue jusqu'à 1839 d'après des données extraites de l'étude EPTEAU [6]. Ces débits ont été fournis à l'époque par le Service Hydrologique Centralisateur (SHC) du Bassin de la Loire et recourent les crues supérieures à 1 000 m³/s de 1839 à 1983.

Les chroniques de débits de pointe des trois stations sont disponibles en ANNEXE 6.

3.5.1.2 Ajustements statistiques

Méthodologie adoptée

La méthodologie suivie afin de réaliser les ajustements statistiques est la suivante :

- Reconstitution des débits naturels depuis 1985⁶;
- Reconstitution des séries de données manquantes depuis 1839 à Digoin et Gilly-sur-Loire;

⁶ Date de construction du barrage de Villerest

- Ajustements statistiques permettant de déterminer les débits de pointe décennaux, trentennaux, cinquantennaux et centennaux au droit des stations hydrométriques étudiées sur la Loire.

Reconstitution des séries de données depuis 1985

Pour les crues supérieures à 1 000 m³/s, le barrage de Villerest lamine les crues : les données des stations situées à l'aval du barrage depuis 1985 sont donc influencées par l'ouvrage. Pour ces crues, on fait l'hypothèse que le débit de pointe à l'aval immédiat du barrage est identique à celui mesuré à Feurs (station située quelques kilomètres en amont du barrage). Ainsi, l'écart entre le débit de Feurs et le débit observé à Villerest est considéré comme étant le débit écrêté par le barrage. Pour les stations de Digoin et Gilly-sur-Loire, le débit écrêté est ajouté au débit de pointe mesuré à la station.

Les crues concernées par cette approche sont celles de 1985 et 2002.

Remarque : certaines crues (1996, 2003 et 2008) ont déjà fait l'objet d'une reconstitution à Villerest par l'EPL, ces valeurs non influencées sont alors retenues.

Reconstitution des séries de données à Digoin et Gilly-sur-Loire

Les chroniques de débit à Digoin et à Gilly-sur-Loire fournissent respectivement 54 et 39 années de valeurs de débits de pointe (les débits de pointe des années 1987, 1988, 1989 et 1991 ne sont pas renseignés à Gilly). L'objectif étant d'évaluer les débits statistiques, le nombre d'années de mesure est insuffisant à Gilly-sur-Loire et Digoin pour donner une bonne estimation du débit centennal.

Afin de palier à ce manque de données, la méthodologie suivante a été adoptée :

Pour Digoin : Les débits sont donnés par la Banque Hydro sur la période 1958-2013. Pour prolonger la chronique, nous avons utilisé les hauteurs lues à l'ancienne échelle de Digoin données par la DREAL Centre et auxquelles nous avons appliqué une loi de tarage pour obtenir les débits. Les courbes de tarage de ces 60 dernières années (Banque Hydro) semblent en effet stables en période de crue, notamment pour des valeurs de débit supérieures à 1 000 m³/s.

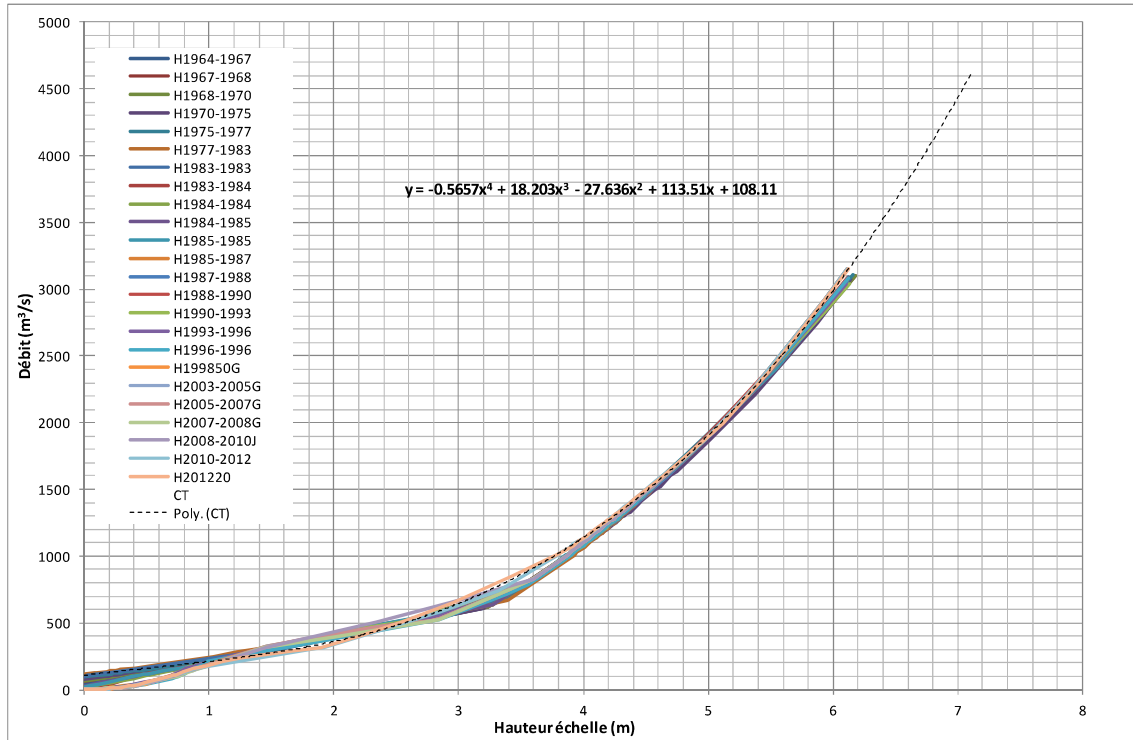


Figure 26 : Courbes de tarage issues de la Banque Hydro et courbe de tarage retenue à Digoin (courbe en pointillés)

Pour Gilly-sur-Loire : Les débits sont donnés par la banque hydro sur la période 1969-2012. Pour prolonger la chronique nous avons utilisé :

- préférentiellement, les hauteurs lues à l'échelle de Diou, données par la DREAL Centre. L'échelle de Diou est la plus proche de celle de Gilly-sur-Loire et présente donc la meilleure corrélation,
- les hauteurs lues à Décize, quand les hauteurs font défaut à Diou. Les hauteurs lues à l'échelle du Fourneau n'ont pas été retenues puisque la Loire a connu un enfoncement très important de son lit sur le secteur, notamment dans les années 1960-1970 suite au recoupement du méandre des Grands Verziaux.

Moyennant ensuite des corrélations avec les hauteurs mesurées à Gilly-sur-Loire, et application d'une loi de tarage, la chronique de débits a été prolongée.

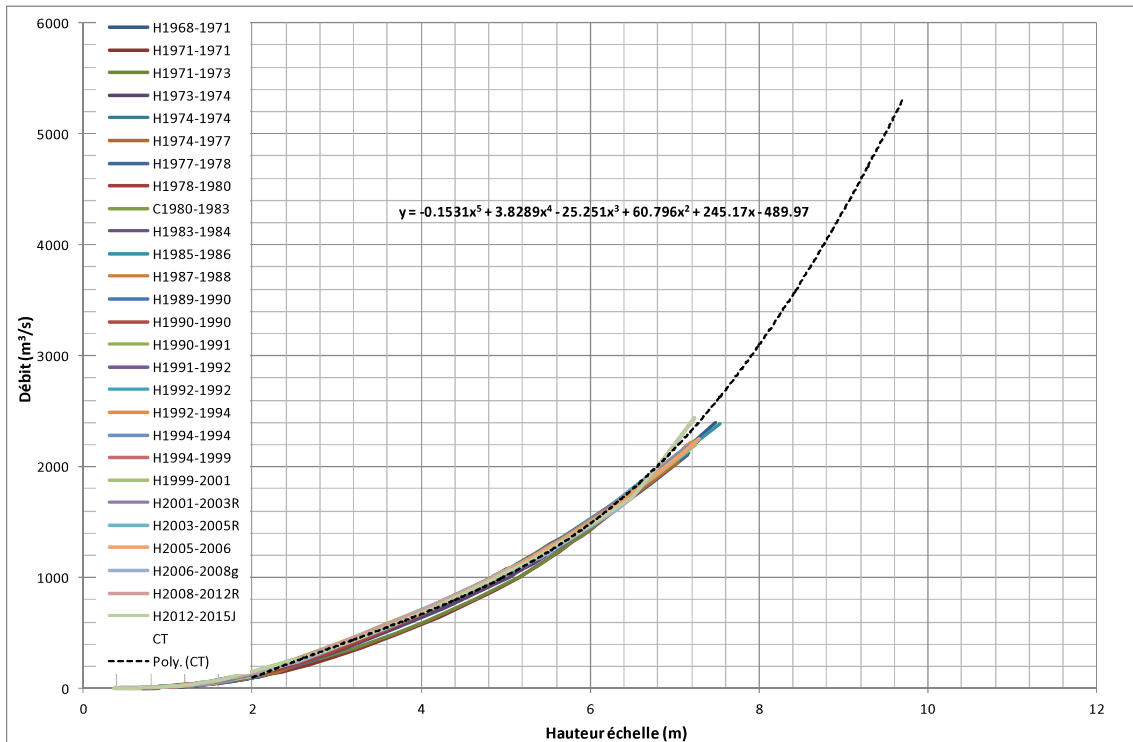


Figure 27 : Courbes de tarage issues de la Banque Hydro et courbe de tarage retenue à Gilly-sur-Loire (courbe en pointillés)

Remarque : Les courbes de tarage utilisées restent extrapolées au delà de 2 000 m³/s environ (maxi jaugé de 1 800 m³/s à Digoin et de 1 920 m³/s à Gilly-sur-Loire), rendant l'estimation des débits des plus fortes crues assez incertaine. L'extrapolation des courbes de tarage pour les débits supérieurs à 2 000 m³/s est cependant confortée par les résultats du modèle hydraulique bidimensionnel utilisé dans la suite de l'étude.

Les chroniques reconstituées sont disponibles en ANNEXE 7.

Néanmoins, il est à noter que la chronique de débits de Villerest fournie par le SHC du Bassin de la Loire n'indiquant que les crues dont le débit a été supérieur à 1 000 m³/s, de nombreuses années de débits ne sont donc pas renseignées avant 1920.

Ajustements statistiques

Plusieurs lois d'ajustements ont été testées sur les chroniques de débits non influencés par le barrage de Villerest des trois stations de la Loire étudiées :

- Loi de Gumbel (notée EV1 sur les graphiques),
- Loi log-Pearson III (notée LP3),
- Loi Pearson III (notée P3),
- Loi gamma inversé (notée IG),
- Loi gamma généralisée (notée GG)
- Loi GEV (notée GEV).

Les ajustements statistiques sont représentés sur les figures suivantes pour chaque station :

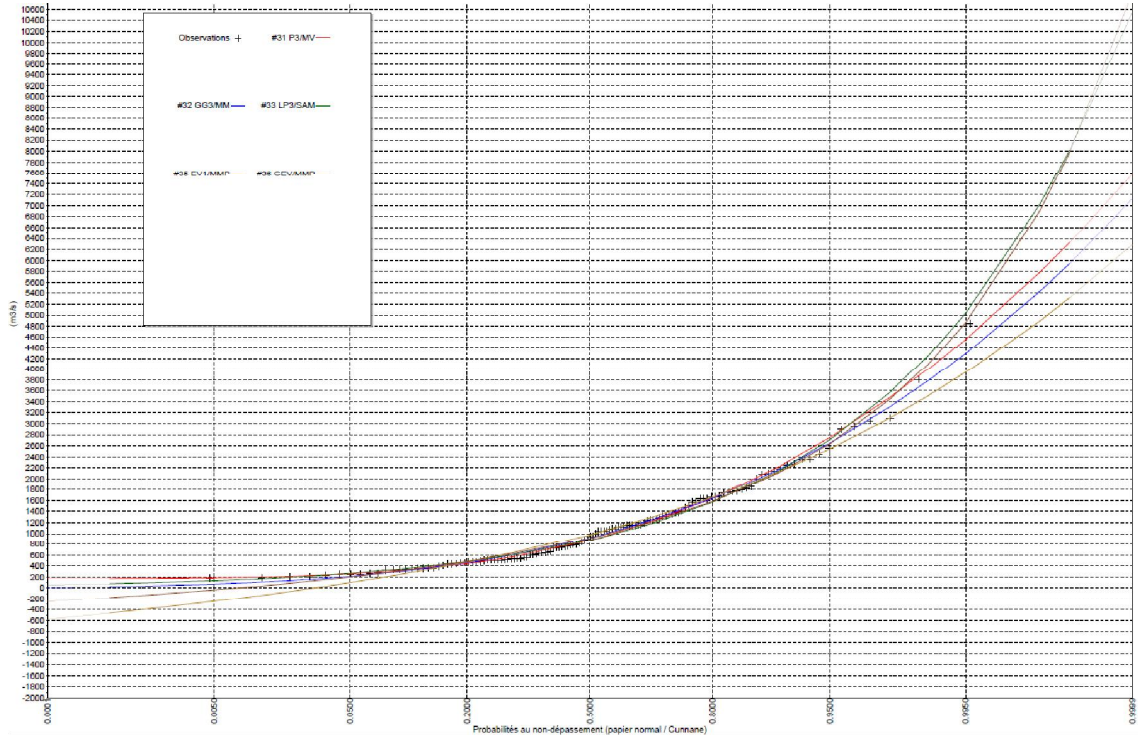


Figure 28 : Ajustements statistiques sur la chronique de débits à la station de Villerest

La loi d'ajustement retenue à Villerest est de type Pearson III (courbe rouge sur la Figure 28).

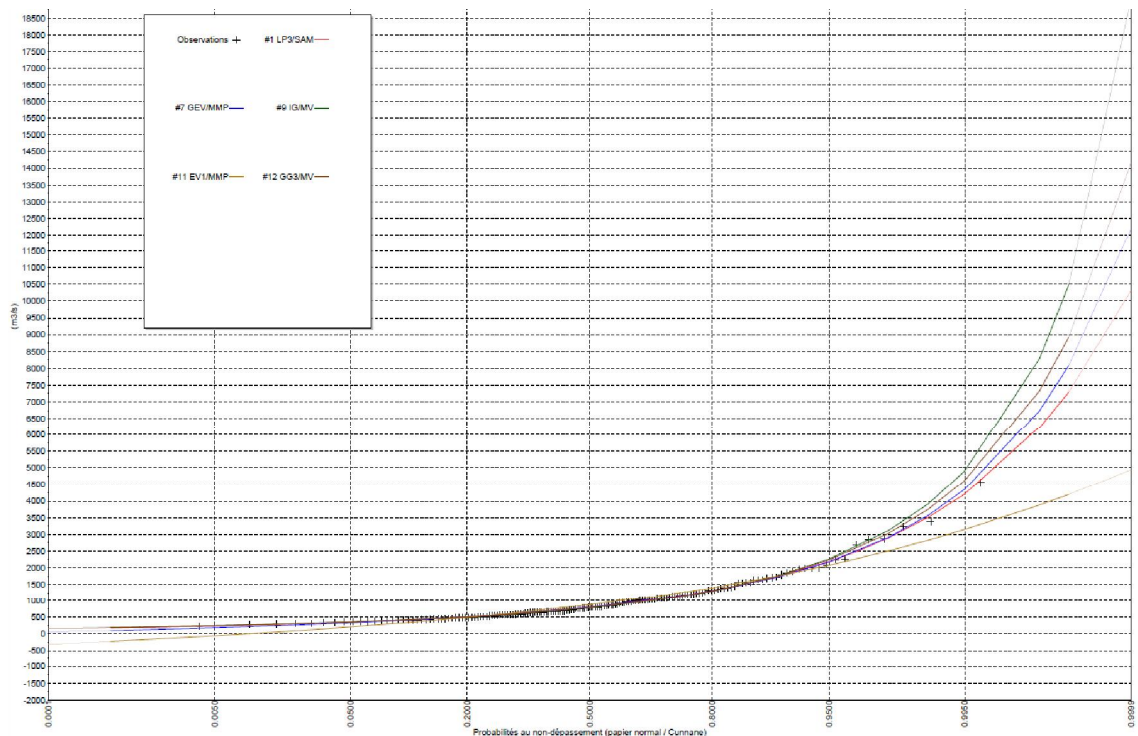


Figure 29 : Ajustements statistiques sur la chronique de débits à la station de Digoin

La loi d'ajustement retenue à Digoin est de type log-Pearson III (courbe rouge sur la Figure 29).

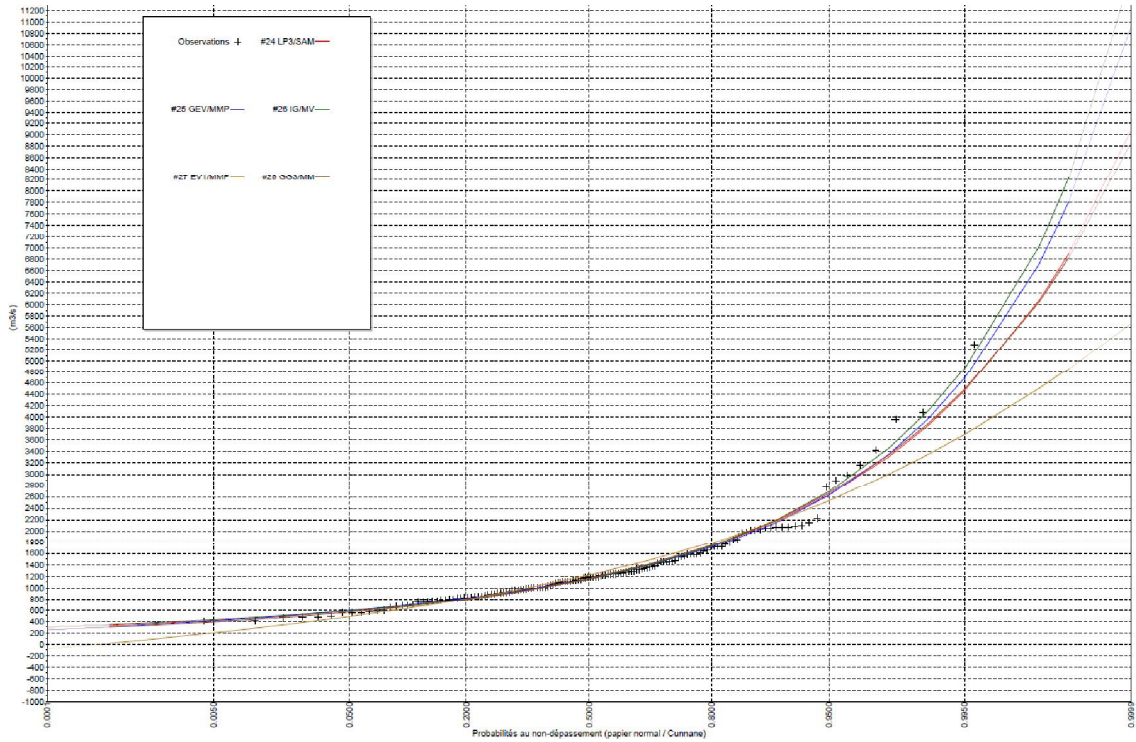


Figure 30 : Ajustements statistiques sur la chronique de débits à la station de Gilly-sur-Loire

La loi d'ajustement retenue à Gilly-sur-Loire est de type gamma inversé (courbe verte sur la Figure 30).

3.5.1.3 Débits de pointe de la Loire

Valeurs issues des ajustements statistiques retenus

Les résultats obtenus par les ajustements statistiques retenus sont présentés dans le tableau ci-dessous :

| Code | Station | Q10 (m ³ /s) | Q30 (m ³ /s) | Q50 (m ³ /s) | Q100 (m ³ /s) |
|----------|-----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| K0910010 | Villerest | 2 200 [1 990 ; 2 410] | 3 070 [2 760 ; 3 380] | 3 470 [3 120 ; 3 830] | 4 010 [3 590 ; 4 430] |
| K1180010 | Digoin | 1 720 [1 570 ; 1 880] | 2 490 [2 150 ; 2 820] | 2 900 [2 440 ; 3 350] | 3 510 [2 830 ; 4 190] |
| K1440010 | Gilly-sur-Loire | 2 190 [1 990 ; 2 380] | 3 020 [2 600 ; 3 430] | 3 450 [2 870 ; 4 030] | 4 110 [3 240 ; 4 980] |

Tableau 13 : Débits de pointe caractéristiques non influencés par le barrage de Villerest obtenus par ajustements statistiques aux différentes stations hydrométriques avec l'intervalle de confiance à 80%

On observe une diminution du débit de pointe entre Villerest et Digoin, ceci se traduit par un écrêtement de l'hydrogramme dans la vallée et une faible contribution des apports intermédiaires. A l'aval de Digoin, les apports non négligeables de l'Arroux et de son affluent la Bourbince entraînent une rehausse des débits de pointe caractéristiques à Gilly-sur-Loire.

Comparaison aux valeurs issues de la bibliographie

Le tableau ci-après synthétise les débits de pointe caractéristiques calculés dans les études antérieures :

| Localisation | Q10 (m ³ /s) | | Q50 (m ³ /s) | Q100 (m ³ /s) | | |
|--------------|-------------------------|---|-------------------------|--|------------------------------------|----------|
| | Etude EPTEAU [6] | Etude globale du haut bassin de la Loire [21] | Etude RCEA [3] | Etude globale du haut bassin de la Loire | Etude EPTEAU [6] et étude RCEA [3] | EPL [25] |
| Villerest | 1 950 | 2000 | 3000 | 3700 | 3800 | 4 000 |
| Digoin | 1 950 | | | | 3800 | |
| Gilly | 1 950 | | | | | |

Tableau 14 : Débits de pointe caractéristiques de la Loire issus des études antérieures

A Villerest, l'actualisation de l'étude hydrologique donne des débits de pointe plus forts que ceux trouvés par l'étude statistique des crues réalisée en 1997 par EPTEAU [6]. L'augmentation du débit de pointe s'explique par l'actualisation des séries de données qui prend en compte 15 années supplémentaires de mesures et notamment deux événements majeurs que sont les crues de décembre 2003 et novembre 2008.

3.5.1.4 Période de retour des crues passées étudiées

Les tableaux ci-après donnent les débits de pointe des trois crues historiques de 1846, 1856 et 1866 et des crues de 2003 et 2008 sans influence du barrage de Villerest. Les débits de pointe des trois crues historiques sont issus de l'étude hydraulique EPTEAU [6]. L'estimation de la période de retour est faite à partir des ajustements statistiques retenus au paragraphe 3.5.1.2.

| La Loire à Villerest | | |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------|
| Date | Débit de pointe (m ³ /s) | Période de retour |
| Octobre 1846 | 4 850 | 295 |
| Mai 1856 | 2 550 | 15 |
| Septembre 1866 | 3 800 | 75 |
| Décembre 2003 | 2 840 | 22 |
| Novembre 2008 | 3 100 | 31 |

Tableau 15 : Débit de pointe (non influencé) et période de retour des crues historiques à Villerest

| La Loire à Digoin | | |
|-------------------|-------------------------------------|-------------------|
| Date | Débit de pointe (m ³ /s) | Période de retour |
| Octobre 1846 | 4 620 | 285 |
| Mai 1856 | 2 620 | 35 |
| Septembre 1866 | 4 004 | 165 |
| Décembre 2003 | 3 030 | 58 |
| Novembre 2008 | 2 880 | 48 |

Tableau 16 : Débit de pointe (non influencé) et période de retour des crues historiques à Digoin

| La Loire à Gilly | | |
|------------------|-------------------------------------|-------------------|
| Date | Débit de pointe (m ³ /s) | Période de retour |
| Octobre 1846 | 4 720 | 180 |
| Mai 1856 | 3 465 | 51 |
| Septembre 1866 | 4 420 | 135 |
| Décembre 2003 | 3 260 | 40 |
| Novembre 2008 | 3 000 | 29 |

Tableau 17 : Débit de pointe (non influencé) et période de retour des crues historiques à Gilly

3.6 MODELISATION HYDROLOGIQUE

Le logiciel GESRES_{ISL} est un modèle de simulation hydrologique permettant de réaliser des modèles de transformation pluie-débit. Il permet ainsi de déterminer un hydrogramme de crue correspondant à un hyétogramme par la méthode GR développée par le CEMAGREF.

Le programme se base sur les éléments suivants :

- des **nœuds** : les équations d'équilibre sont résolues au niveau de ces éléments, servant de support d'attache aux bassins,
- des **bassins versants** : ils sont caractérisés a minima par leur surface, leur temps de concentration et leur coefficient de ruissellement. Ils sont attachés à un nœud correspondant à leur exutoire,

- des **hydrogrammes** : les données hydrologiques, saisies sous forme de séries, sont entrées au niveau des nœuds. La saisie de cette donnée permet de comparer l'hydrogramme issu de la transformation de la pluie en débit à l'hydrogramme réel à l'exutoire du bassin versant,
- des **pluies** : le hyétogramme est saisi sous la forme d'une série à un pas de temps fixé au préalable. Elles sont associées à un bassin versant,
- des **retenues** : associées à un nœud, les retenues sont définies par leur courbe hauteur-surface-volume et leurs caractéristiques générales (niveau normal et volume utile),
- des **flux** : ils renvoient aux organes d'évacuation (seuil à surface libre, orifice, pertuis vanné) et sont définis par leur loi hydraulique respective et leurs caractéristiques géométriques.

3.6.1 DECOUPAGE EN SOUS BASSINS VERSANTS

L'architecture du modèle s'appuie sur une typologie simplifiée.

Un bassin versant est tracé au droit de chaque station hydrométrique répertoriée précédemment. Le sous-bassin versant intermédiaire entre la station et la confluence aval est aussi représenté.

Au final, sur la zone d'étude, 27 bassins et 42 nœuds de calcul ont été pris en compte pour le modèle hydrologique. Le découpage des sous bassins est présenté sur la Figure 32.

3.6.2 TEMPS DE CONCENTRATION DES SOUS BASSINS VERSANTS

Le temps de concentration correspond au temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée "hydrologiquement" de l'exutoire pour parvenir à celui-ci.

Plusieurs formules empiriques existent pour estimer le temps de concentration :

| Nom de la méthode | Formulation |
|--------------------|---|
| Ventura | $T_c = \frac{7,62}{60} \cdot \sqrt{\frac{S}{i}}$ |
| Kirpich | $T_c = 0,0195 \cdot \frac{L^{0,77}}{60} \cdot i^{-0,385}$ |
| Johnstone et Cross | $T_c = \frac{5,66}{60} \cdot \sqrt{\frac{L}{1000 \cdot i}}$ |
| Passini - Turraza | $T_c = 0,108 \frac{(SL)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{i}}$ |

| | |
|--------------------------------|---|
| Méthode SCS | $T_c = 0,023 \cdot \left(\frac{L}{1000}\right)^{0,8} \cdot \left(\frac{1000}{72,9} - 9\right)^{0,7} \cdot \frac{1}{\sqrt{i}}$ |
| Méthode par estimation directe | $T_c = \frac{1}{3600} \cdot \left(\sum \frac{L_k}{1,4 \cdot i_k^{0,5}} + \sum \frac{L_k}{K \cdot i_k^{0,5} R_h^{\frac{2}{3}}} \right)$ |

Tableau 18 : Formules empiriques pour le calcul du temps de concentration

- Avec T_c temps de concentration, en h S surface, en km²
- L chemin hydraulique, en m K Coefficient de Strickler m^{1/3}/s
- i pente pondérée, en m/m R_h Rayon hydraulique en m

Le premier terme de la méthode par estimation directe correspond au temps de concentration pour les écoulements en nappe (versants par exemple) tandis que le second terme correspond au temps de concentration pour les écoulements concentrés de l'eau (cours d'eau par exemple).

Les temps de concentration calculés par bassins versants sont fournis en ANNEXE 9, Par la suite, le temps de concentration permettant le meilleur calage du modèle hydrologique est retenu.

3.6.3 CONSTRUCTION DU MODELE HYDROLOGIQUE

3.6.3.1 Eléments structurels

Un modèle hydrologique est défini grâce à différents éléments structurels :

- Un nœud est défini au droit de chaque station hydrométrique, à l'exutoire des bassins versants. Le modèle calcule un hydrogramme de crue au droit de chaque nœud. Les nœuds sont représentés par des étoiles sur la Figure 32.
- Un bassin versant est le lieu de la transformation pluie-débit. Ils sont tracés en rouge sur la Figure 32. Le modèle de bassin utilisé dans le cadre de l'étude est de type GR4J, il est caractérisé par différents paramètres :
 - Sa surface en km² ;
 - Deux paramètres (A et B) caractéristiques de la hauteur de stockage ;
 - Le temps de montée de l'hydrogramme (C, en heures) ;
 - Le coefficient d'échange avec la nappe (D);
 - Le taux de remplissage initial du terrain (S0/a).
- Les biefs propagent l'hydrogramme d'un nœud amont à un nœud aval. Ils sont représentés en cyan sur la Figure 32. Le modèle de propagation utilisé est celui de Muskingum-Cunge, avec des profils à 8 points. Ce type de section permet de distinguer le lit mineur du lit majeur. Un bief est défini par :
 - Le nœud amont et le nœud aval ;
 - Sa longueur ;
 - Sa section type;

- Sa pente (en m/m) ;
- Les coefficients de frottement de Strickler dans le lit mineur, le lit majeur gauche et le lit majeur droit.

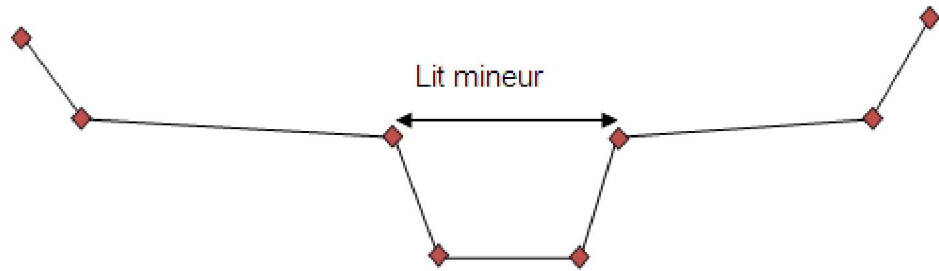


Figure 31 : Profil type d'un bief

- L'hydrogramme de crue de la Loire à Villerest, issu de données observées ou calculées qui est injecté au nœud amont du modèle.

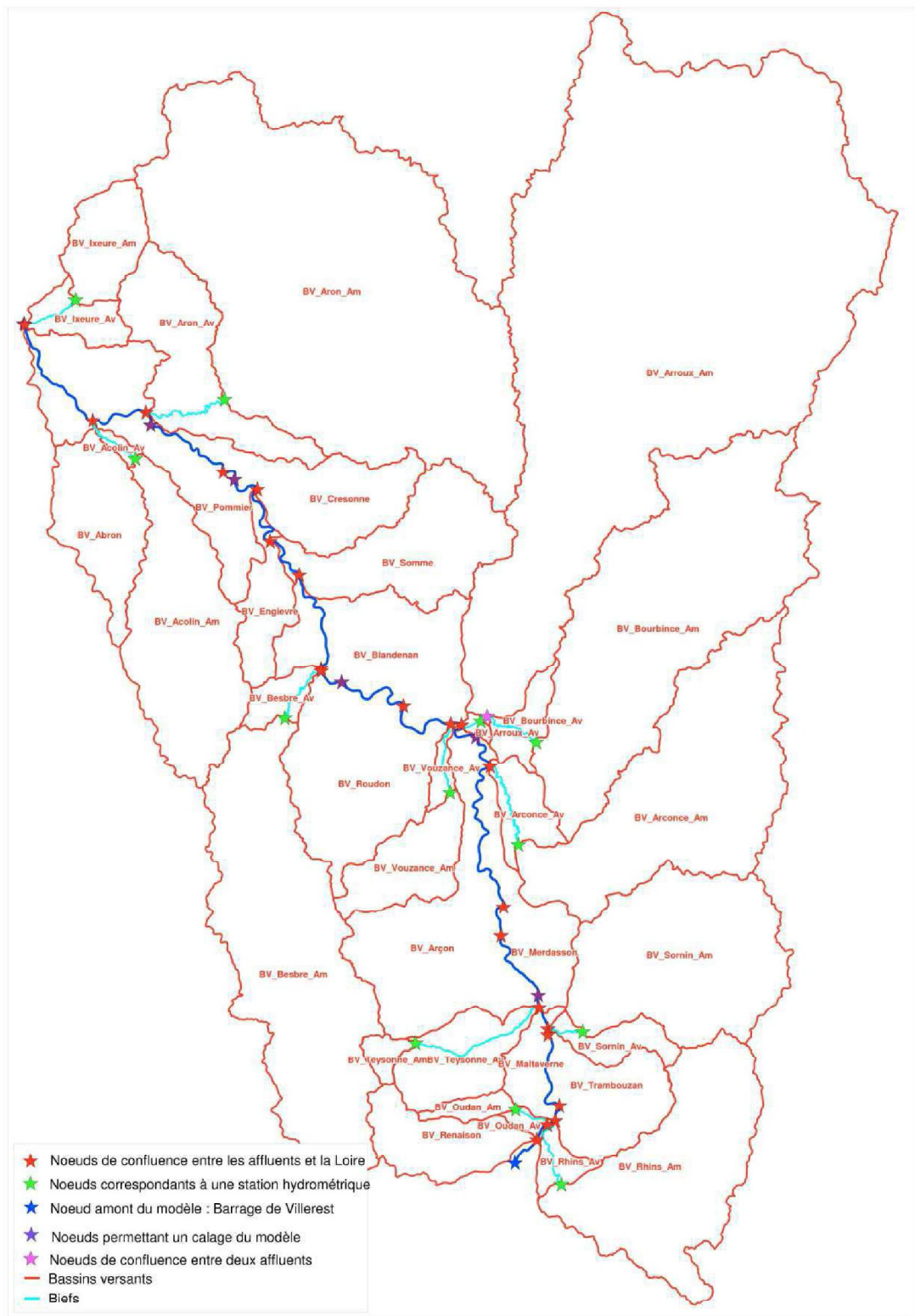


Figure 32 : Eléments structurels du modèle hydrologique

3.6.3.2 Eléments non-structurels

Ces éléments sont de deux ordres :

- éléments caractéristiques des conditions climatiques. Les données pluviométriques étudiées précédemment sont appelées par le logiciel GESRES_{ISL}. Pour chaque bassin versant, l'utilisateur indique la répartition des pluies provenant des différentes stations. Cette répartition est calculée grâce aux polygones de Thiessen ;
- éléments représentatifs des observations. Les hydrogrammes observés aux stations hydrométriques lors de l'évènement. Ces derniers permettent de caler les paramètres des bassins versants et des biefs.

3.6.4 DETERMINATION DES HYDROGRAMMES DES CRUES DE NOVEMBRE 2008 ET DECEMBRE 2003

3.6.4.1 Calage des crues de novembre 2008 et décembre 2003

Lors de l'étude hydraulique, il est prévu de réaliser une simulation hydraulique de ces deux crues. Le calage est réalisé de la manière suivante :

- calage des paramètres (A, B, C, D et S0/a) des bassins intermédiaires jaugés pour la crue de novembre 2008 (crue pour laquelle nous avons le plus de mesures de débits),
- affectation par voisinage de ces paramètres aux bassins intermédiaires non jaugés,
- comparaison des hydrogrammes de crue calculés et mesurés de la Loire et modification des coefficients de Strickler pour améliorer le calage du modèle en propagation. Si besoin est, les paramètres de calage des bassins intermédiaires non jaugés sont modifiés.
- vérification des paramètres de calage pour la crue de décembre 2003.

Il s'avère, après vérification, que les paramètres de calage utilisés pour la crue de 2008 ont du être modifiés pour retrouver les hydrogrammes mesurés de la Loire lors de la crue de 2003.

3.6.4.2 Crue de novembre 2008

Les paramètres de calage retenus permettent d'obtenir, au droit des stations de Digoin et de Gilly-sur-Loire, des hydrogrammes calculés (courbes bleues sur les figures ci-dessous) proches des hydrogrammes de crue observés (courbes vertes), à la fois en débits de pointe et en volumes.

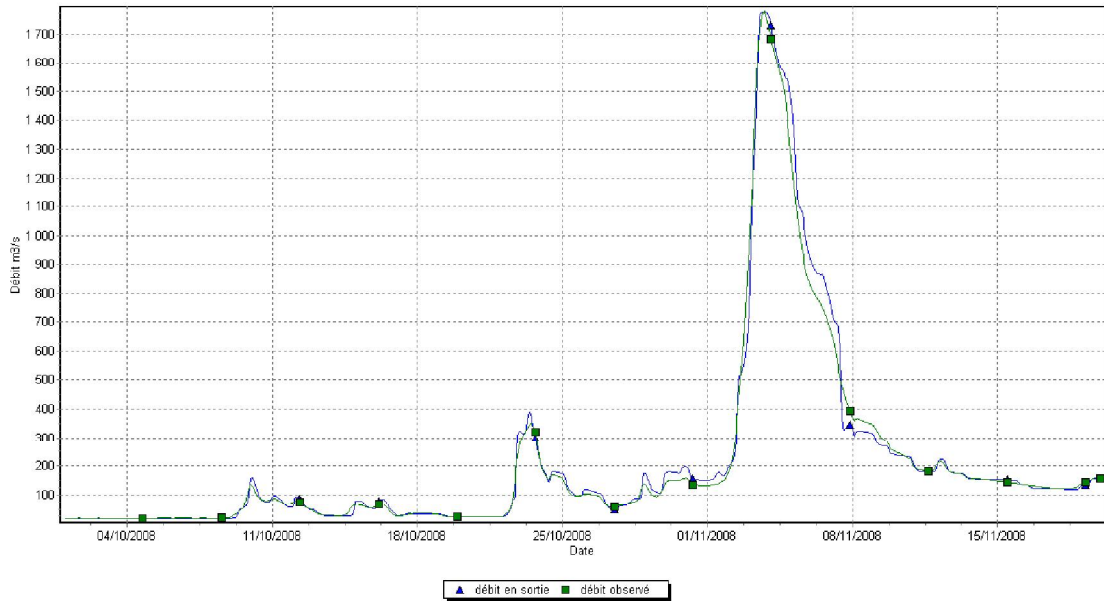


Figure 33 : Hydrographes observé et calculé au droit de Digoin – crue de 2008

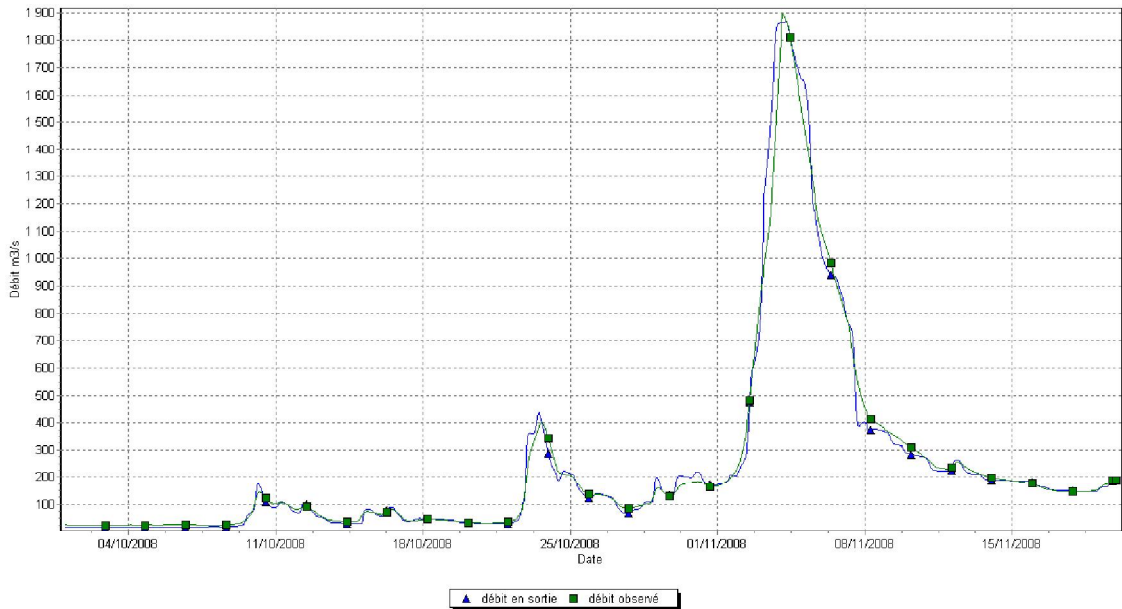


Figure 34 : Hydrographes observé et calculé au droit de Gilly-sur-Loire – crue de 2008

Les hydrographes des affluents sont fournis en ANNEXE 10.

Les petits affluents présents sur le secteur d'étude (Arçon, Merdasson, Vouzance, Blandenan, Roudon, Somme, Engièvre et Cresonne) n'ont pour ainsi dire aucun impact sur la pointe de la crue de la Loire puisque leur débit de pointe reste faible par rapport celui de la Loire et parce que leur pic de crue arrive bien avant celui de la Loire (24 à 48 heures de déphasage). L'ensemble de ces apports peut cependant avoir un impact sur le volume de la crue et donc sur la forme de l'hydrogramme de la Loire à la montée.

L'impact sur la pointe de la crue de la Loire est plus marqué pour les affluents plus importants comme la Besbre, l'Arconce et surtout l'Arroux et son affluent la Bourbince.

Le déphasage des pointes de crue est plus réduit (moins de 24 h) et les débits de pointe sont plus importants.

3.6.4.3 Crue de décembre 2003

De même que pour la crue de novembre 2008, le calage réalisé pour la crue de décembre 2003 permet de retrouver des hydrogrammes calculés proches de ceux observés aux stations de Digoin et Gilly-sur-Loire.

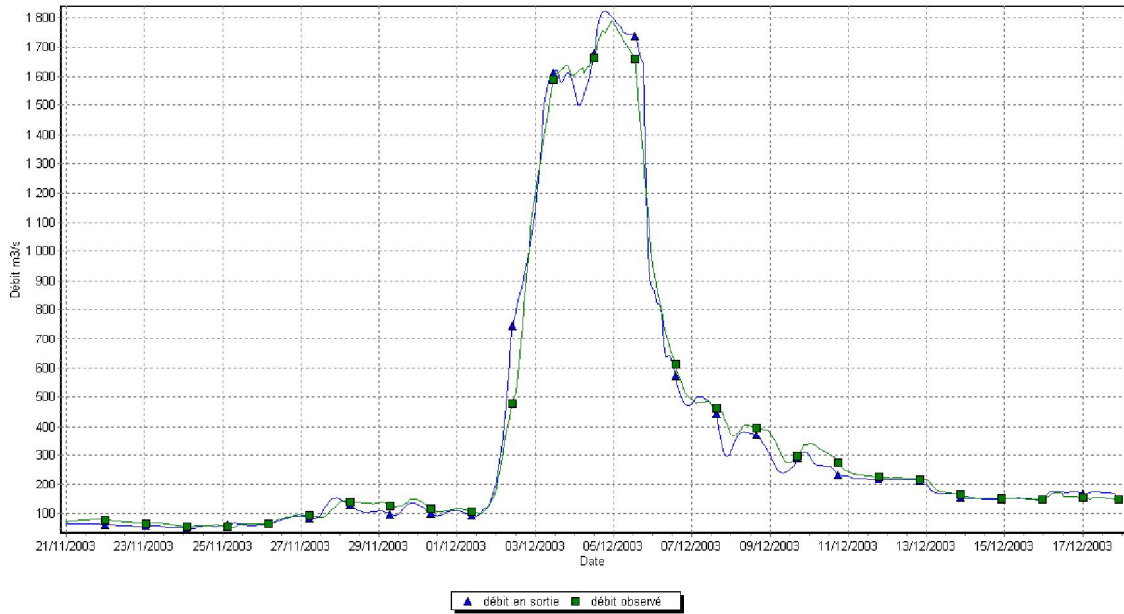


Figure 35 : Hydrogrammes observé et calculé au droit de Digoin – crue de 2003

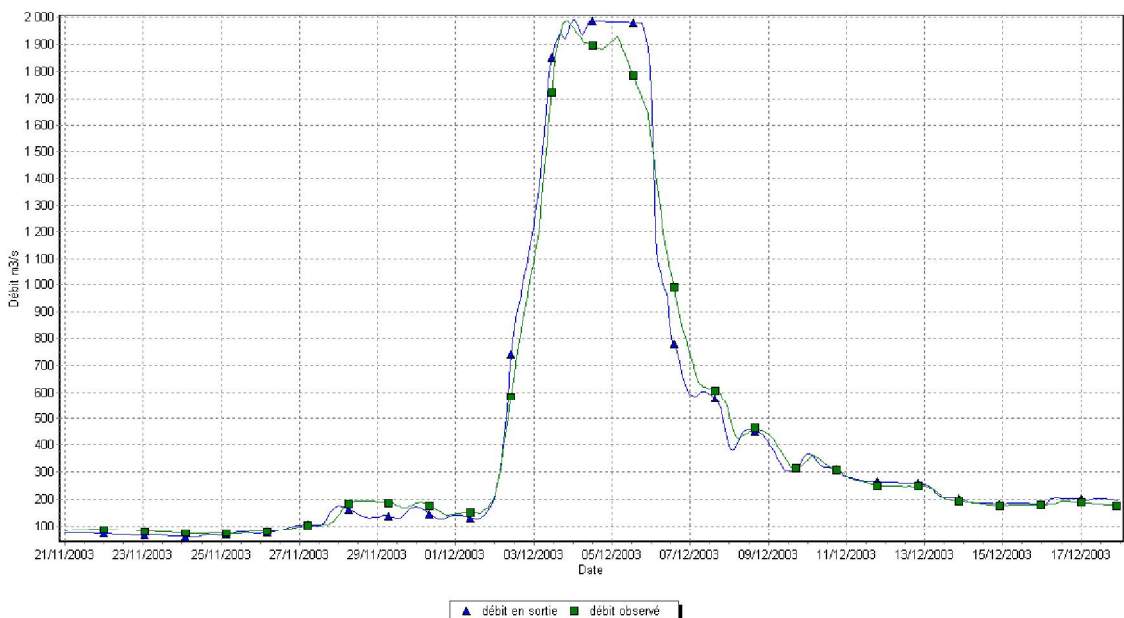


Figure 36 : Hydrogrammes observé et calculé au droit de Gilly-sur-Loire – crue de 2003

Les hydrogrammes des affluents sont fournis en ANNEXE 10.

De manière générale, les remarques concernant la concomitance de la crue de la Loire et de ses affluents faites pour la crue de 2008 sont valables pour la crue de 2003. On

notera cependant que les apports intermédiaires étaient plus importants, notamment en provenance du massif du Morvan où les pluies étaient plus conséquentes qu'en 2008. Le déphasage du pic de crue avec celui des trois principaux affluents était par ailleurs de quelques heures uniquement.

3.6.5 ANALYSE DE L'INFLUENCE DES PRINCIPAUX AFFLUENTS DE LA LOIRE SUR LE SECTEUR D'ETUDE

3.6.5.1 Préambule

L'objectif est de reconstituer sommairement les principales crues de la Loire sur la période 2001-2012 sur le secteur d'étude par un modèle de propagation et de quantifier l'influence de principaux affluents sur les débits de pointe de la Loire. Les hydrogrammes observés au droit des stations hydrométriques sont directement injectés dans le modèle hydrologique pluie-débit réalisé sans passer par une transformation pluie-débit. Les plus petits affluents ne sont pas pris en compte dans l'analyse. Le tableau ci-dessous liste, d'amont en aval, les stations hydrométriques utilisées pour l'analyse :

| Code station | Nom |
|--------------|--|
| K0910010 | La Loire à Villerest |
| K0983010 | Le Rhins à Saint-Cyr-de-Favières [Pont Mordon] |
| K1063020 | Le Sornin à Charlieu |
| K1173210 | L'Arconce à Montceaux-l'Étoile |
| K1180010 | La Loire à Digoïn |
| K1391810 | L'Arroux à Digoïn |
| K1414010 | La Vouzance à Saint-Léger-sur-Vouzance |
| K1440010 | La Loire à Gilly-sur-Loire |
| K1563020 | La Besbre à Saint-Pourçain-sur-Besbre |

Tableau 19 : Stations hydrométriques utilisées pour l'analyse de l'influence des affluents

L'étude ne porte que sur les fortes crues de la Loire ; la figure ci-après spécifie les crues retenues.

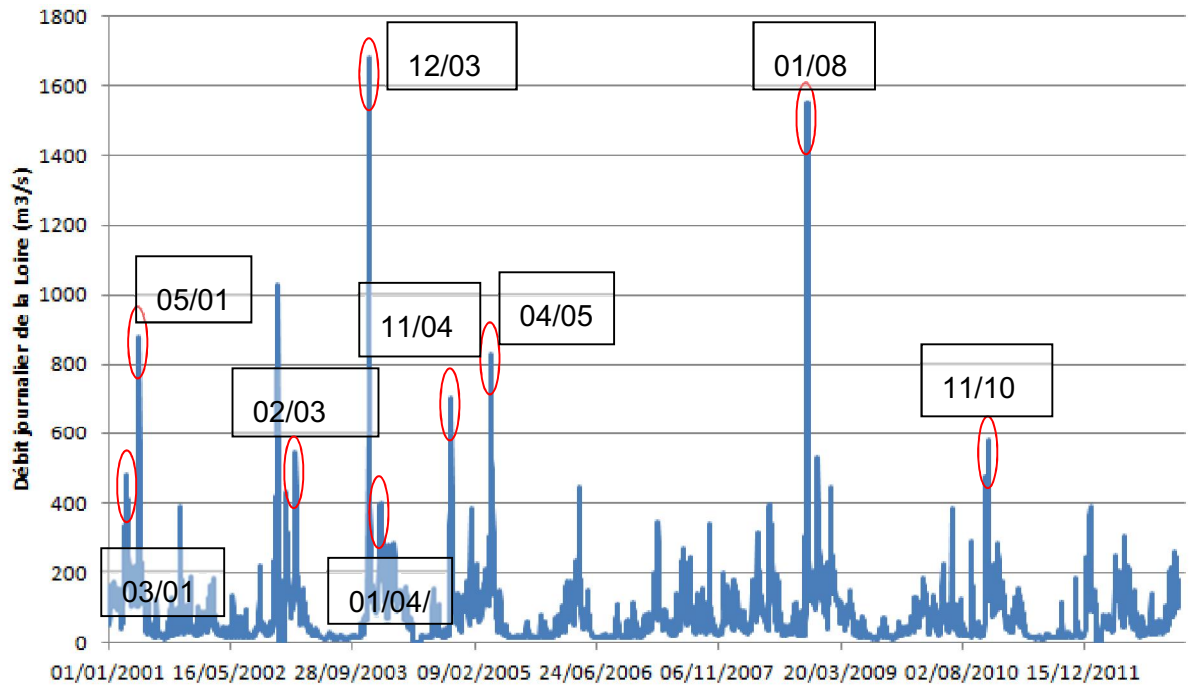


Figure 37 : Crues de la Loire étudiées pour l'analyse de l'influence des affluents (chronique à Digoin)

Les calculs ont été réalisés à un pas de temps de 3h. Pour les crues de décembre 2003 et novembre 2008, l'analyse est menée sans prise en compte de l'influence du barrage de Villerest.

Pour chaque crue, trois paramètres sont retenus pour l'analyse :

- Le décalage temporel entre le pic de crue de la Loire et le pic de crue de l'affluent,
- le ratio entre le débit de pointe de la Loire ($Q_{\max, \text{Loire}}$) et le débit de l'affluent (Q_{affluent}),
- le ratio entre le débit de la Loire (Q_{loire}) et le débit de pointe de l'affluent ($Q_{\max, \text{affluent}}$).

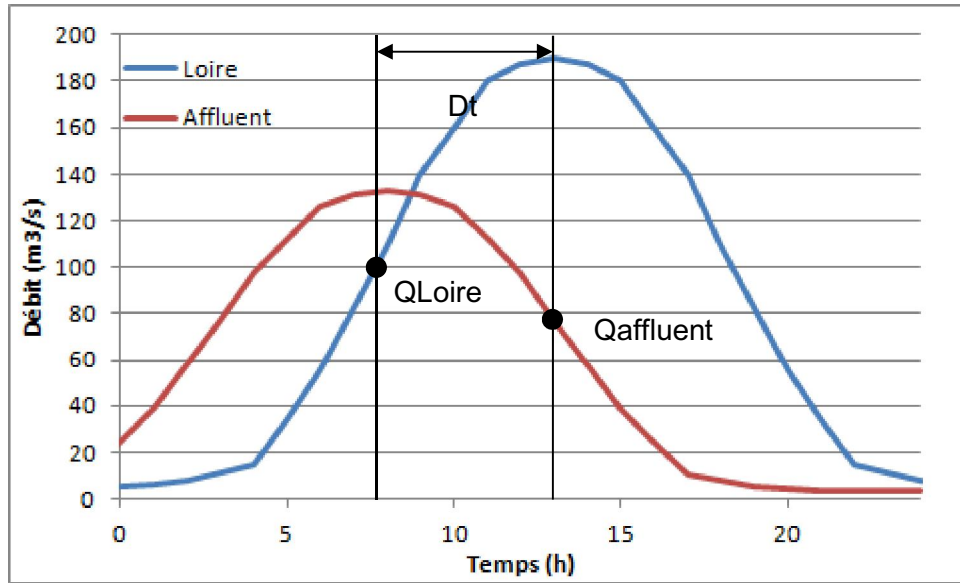


Figure 38 : Paramètres retenus pour l'analyse de l'influence des affluents de la Loire

3.6.5.2 Influence du Rhins

Le tableau ci-dessous synthétise pour chaque crue les différents résultats pour le Rhins :

| Crue | Q _{max, Loire} (m ³ /s) | Q _{max, affluent} (m ³ /s) | Q _{affluent} (m ³ /s) | Q _{Loire} (m ³ /s) | Q _{max, Loire} / Q _{affluent} | Q _{Loire} / Q _{max, affluent} | Dt (h) |
|----------|---|--|---|--|---|---|--------|
| mars-01 | 415 | 37 | 37 | 415 | 11,2 | 11,2 | 0 |
| mai-01 | 554 | 73 | 42 | 539 | 13,2 | 7,4 | 24 |
| nov-02 | 917 | 54 | 54 | 917 | 17,0 | 17,0 | 0 |
| févr.-03 | 371 | 39 | 39 | 371 | 9,6 | 9,6 | 0 |
| déc.-03 | 2882 | 120 | 50 | 2450 | 57 | 49 | 24 |
| janv.-04 | 200 | 19 | 19 | 200 | 10,4 | 10,4 | 0 |
| nov.-04 | 628 | 62 | 62 | 628 | 10,1 | 10,1 | 0 |
| avr.-05 | 565 | 126 | 126 | 565 | 4,5 | 4,5 | 0 |
| nov.-08 | 2608 | 113 | 52 | 2363 | 50 | 20,9 | 24 |
| nov.-10 | 419 | 50 | 41 | 219 | 10,3 | 4,4 | 24 |

Tableau 20 : Analyse de l'influence du Rhins

Pour l'ensemble des crues étudiées le déphasage est faible, la plupart sont même concomitantes. Les crues du Rhins contribuent à une augmentation du débit de pointe de la Loire de 5 à 10% environ. On note cependant que la contribution est inférieure à 2% pour les plus fortes crues (décembre 2003 et novembre 2008)

3.6.5.3 Influence du Sornin

La station n'est ouverte que depuis 2005, l'analyse se fait donc que sur les trois crues les plus récentes : 2005, 2008 et 2010. Le tableau ci-dessous synthétise les différents résultats pour le Sornin :

| Crue | $Q_{\max, \text{Loire}}$ (m^3/s) | $Q_{\max, \text{affluent}}$ (m^3/s) | Q_{affluent} (m^3/s) | Q_{Loire} (m^3/s) | $Q_{\max, \text{Loire}}/$ Q_{affluent} | $Q_{\text{Loire}}/$ $Q_{\max, \text{affluent}}$ | Dt (h) |
|---------|---|--|--|--|--|--|--------|
| avr.-05 | 691 | 112 | 112 | 691 | 6,2 | 6,2 | 0 |
| nov.-08 | 2659 | 75 | 41 | 2476 | 65 | 33 | 24 |
| nov.-10 | 459 | 62 | 46 | 269 | 10,1 | 4,3 | 24 |

Tableau 21 : Analyse de l'influence du Sornin

Il est délicat de conclure sur l'influence du Sornin à partir de trois crues. La situation du bassin versant et ses caractéristiques laissent cependant envisager des conclusions sur son influence similaires à celles du Rhins. Pour les trois crues observées, on retrouve par ailleurs des paramètres proches de ceux du Rhins.

3.6.5.4 Influence de la l'Arconce

Le tableau ci-dessous synthétise pour chaque crue les différents résultats pour l'Arconce :

| Crue | $Q_{\max, \text{Loire}}$ (m^3/s) | $Q_{\max, \text{affluent}}$ (m^3/s) | Q_{affluent} (m^3/s) | Q_{Loire} (m^3/s) | $Q_{\max, \text{Loire}}/$ Q_{affluent} | $Q_{\text{Loire}}/$ $Q_{\max, \text{affluent}}$ | Dt (h) |
|----------|---|--|--|--|--|--|--------|
| mars-01 | 421 | 44 | 44 | 421 | 9,7 | 9,7 | 0 |
| mai-01 | 582 | 68 | 68 | 582 | 8,5 | 8,5 | 0 |
| nov.-02 | 921 | 38 | 38 | 921 | 24,5 | 24,5 | 0 |
| févr.-03 | 372 | 60 | 60 | 372 | 6,2 | 6,2 | 0 |
| déc.-03 | 2740 | 103 | 63 | 1968 | 43,5 | 19 | 48 |
| janv.-04 | 208 | 49 | 49 | 208 | 4,3 | 4,3 | 0 |
| nov.-04 | 651 | 89 | 89 | 651 | 7,3 | 7,3 | 0 |
| avr.-05 | 744 | 70 | 69 | 657 | 10,7 | 9,4 | -24 |
| nov.-08 | 2610 | 50 | 50 | 2610 | 52,2 | 52,2 | 0 |
| nov.-10 | 474 | 47 | 47 | 474 | 10,1 | 10,1 | 0 |

Tableau 22 : Analyse de l'influence de l'Arconce

Hormis pour la crue de décembre 2003, le déphasage est faible entre pics de crue. De même que pour les affluents amont la contribution sur la pointe de l'hydrogramme de la Loire reste marginale pour les fortes crues.

3.6.5.5 Influence de l'Arroux

Le Tableau ci-dessous synthétise pour chaque crue les différents résultats pour l'Arroux :

| Crue | $Q_{\max, \text{Loire}}$ (m^3/s) | $Q_{\max, \text{affluent}}$ (m^3/s) | Q_{affluent} (m^3/s) | Q_{Loire} (m^3/s) | $Q_{\max, \text{Loire}}/$ Q_{affluent} | $Q_{\text{Loire}}/$ $Q_{\max, \text{affluent}}$ | Dt (h) |
|----------|---|--|--|--|--|--|--------|
| mars-01 | 501 | 289 | 256 | 385 | 2 | 1,3 | -30 |
| mai-01 | 979 | 276 | 271 | 927 | 3,6 | 3,4 | 3 |
| févr.-03 | 634 | 321 | 321 | 634 | 2 | 2 | 0 |

| Crue | $Q_{\max, Loire}$ (m ³ /s) | $Q_{\max, affluent}$ (m ³ /s) | Q_{affluent} (m ³ /s) | Q_{Loire} (m ³ /s) | $Q_{\max, Loire} / Q_{\text{affluent}}$ | $Q_{\text{Loire}} / Q_{\max, affluent}$ | Dt (h) |
|----------|---------------------------------------|--|---|--|---|---|--------|
| déc.-03 | 3091 | 354 | 294 | 2905 | 10,5 | 8,2 | 36 |
| janv.-04 | 408 | 340 | 334 | 398 | 1,2 | 1,2 | -6 |
| janv.-04 | 413 | 299 | 289 | 411 | 1,4 | 1,4 | 3 |
| nov.-04 | 839 | 247 | 244 | 801 | 3,4 | 3,2 | 6 |
| avr.-05 | 1030 | 199 | 199 | 1030 | 5,2 | 5,2 | 0 |
| nov.-08 | 2895 | 203 | 201 | 2871 | 14,4 | 14,1 | 3 |
| nov.-10 | 600 | 305 | 281 | 565 | 2,1 | 1,9 | -9 |

Tableau 23 : Analyse de l'influence de l'Arroux

L'Arroux a un impact non négligeable sur les hydrogrammes de crue de la Loire. Pour les deux plus fortes crues, 2003 et 2008, il contribue notamment à une augmentation du débit de pointe compris entre 5 et 10 %. Pour les petites crues de la Loire, l'Arroux peut parfois doubler la valeur du débit de pointe. Les pics de l'Arroux arrivent régulièrement en même temps que ceux de la Loire, ce qui se confirme par des valeurs voisines des ratios $Q_{\max, Loire} / Q_{\text{affluent}}$ et $Q_{\text{Loire}} / Q_{\max, affluent}$ pour chaque crue.

Les figures ci-après illustrent graphiquement les ratios $Q_{\max, Loire} / Q_{\text{affluent}}$ et $Q_{\text{Loire}} / Q_{\max, affluent}$ en fonction du débit de pointe de la Loire.

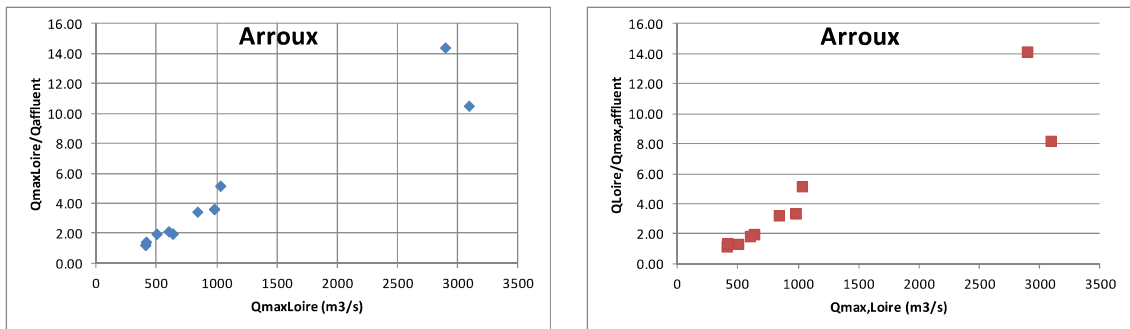


Figure 39 : $Q_{\max, Loire} / Q_{\text{affluent}}$ et $Q_{\text{Loire}} / Q_{\max, affluent}$ en fonction du débit de pointe de la Loire

3.6.5.6 Influence de la Vouzance

Le tableau ci-dessous synthétise pour chaque crue les différents résultats pour la Vouzance :

| Crue | $Q_{\max, Loire}$ (m ³ /s) | $Q_{\max, affluent}$ (m ³ /s) | Q_{affluent} (m ³ /s) | Q_{Loire} (m ³ /s) | $Q_{\max, Loire} / Q_{\text{affluent}}$ | $Q_{\text{Loire}} / Q_{\max, affluent}$ | Dt (h) |
|----------|---------------------------------------|--|---|--|---|---|--------|
| mars-01 | 757 | 6 | 2 | 595 | 337,4 | 107,1 | 30 |
| mai-01 | 1247 | 10 | 5 | 714 | 260,5 | 69,5 | 21 |
| févr.-03 | 954 | 14 | 7 | 560 | 133,4 | 39,4 | 21 |
| déc.-03 | 3100 | 26 | 6 | 2400 | 517 | 92 | 54 |
| janv.-04 | 745 | 14 | 6 | 535 | 129 | 38 | 27 |

| Crue | $Q_{\max, \text{Loire}}$ (m^3/s) | $Q_{\max, \text{affluent}}$ (m^3/s) | Q_{affluent} (m^3/s) | Q_{Loire} (m^3/s) | $Q_{\max, \text{Loire}}/$ Q_{affluent} | $Q_{\text{Loire}}/$ $Q_{\max, \text{affluent}}$ | Dt (h) |
|----------|---|--|--|--|--|--|--------|
| janv.-04 | 710 | 23 | 11 | 595 | 65 | 26 | 18 |
| nov.-04 | 1082 | 23 | 6 | 587 | 186 | 25 | 30 |
| avr.-05 | 1227 | 38 | 13 | 627 | 94,5 | 16,4 | 21 |
| nov.-08 | 2900 | 14 | 5 | 2206 | 580 | 158 | 18 |
| nov.-10 | 881 | 29 | 6 | 570 | 141 | 20 | 24 |

Figure 40 : Analyse de l'influence de la Vouzance

Les débits de la Vouzance sont faibles comparés à ceux de la Loire d'autant plus que le déphasage entre les pointes des crues des deux cours d'eau est généralement supérieur à 24 h.

3.6.5.7 Influence de la Besbre

Le tableau ci-dessous synthétise pour chaque crue les différents résultats pour la Besbre :

| Crue | $Q_{\max, \text{Loire}}$ (m^3/s) | $Q_{\max, \text{affluent}}$ (m^3/s) | Q_{affluent} (m^3/s) | Q_{Loire} (m^3/s) | $Q_{\max, \text{Loire}}/$ Q_{affluent} | $Q_{\text{Loire}}/$ $Q_{\max, \text{affluent}}$ | Dt (h) |
|----------|---|--|--|--|--|--|--------|
| mars-01 | 851 | 54 | 43 | 679 | 19,9 | 12,6 | 24 |
| mai-01 | 1220 | 112 | 92 | 1009 | 13,3 | 9,0 | 18 |
| févr.-03 | 1072 | 82 | 74 | 941 | 14,6 | 11,4 | 12 |
| déc.-03 | 3297 | 98 | 92 | 3208 | 35,8 | 32,7 | 6 |
| janv.-04 | 866 | 40 | 35 | 591 | 24,4 | 14,6 | 27 |
| janv.-04 | 789 | 71 | 59 | 657 | 13,3 | 9,3 | 15 |
| nov.-04 | 1056 | 80 | 41 | 672 | 26,0 | 8,4 | 33 |
| avr.-05 | 1132 | 100 | 98 | 1094 | 11,5 | 11,0 | 3 |
| nov.-08 | 3018 | 37 | 24 | 2025 | 125,8 | 54,7 | 24 |
| nov.-10 | 815 | 34 | 26 | 724 | 31,7 | 21,4 | 21 |

Figure 41 : Analyse de l'influence de la Besbre

Le déphasage moyen entre les pics de crue de la Besbre et de la Loire varie de quelques heures à plus de 24 h. L'influence de la Besbre sur le débit de pointe de la Loire est variable selon le type d'évènement avec une augmentation variant de moins de 1% à environ 8%.

3.6.5.8 Conclusion sur l'influence des affluents de la Loire

Bien que le déphasage soit généralement faible, les crues des affluents compris entre Villerest et Digoin (Rhins, Sornin, Arconce) ont un impact de moins de 10% sur le débit de pointe de la Loire. Cet impact semble d'ailleurs moindre pour les crues importantes de la Loire. Sur ce tronçon, les apports intermédiaires ne compensent pas l'écêtement dans la vallée des crues débordantes de la Loire, ce qui se retrouve d'ailleurs dans les

quantiles de débits calculés aux stations hydrométriques de Villerest et de Digoin (diminution des valeurs).

A l'aval immédiat de Digoin, l'Arroux et son affluent la Bourbince, constituent les principaux apports de la Loire sur le secteur d'étude. Les apports sont non négligeables pour certaines grosses crues de la Loire et les pics de crue peuvent être rapprochés. Les apports de la Vouzance sont faibles par rapport aux débits de la Loire et le déphasage entre les crues est important. L'augmentation des valeurs de quantiles de débits calculées entre les stations hydrométriques de Digoin et Gilly-sur-Loire est bien liée aux apports de l'Arroux.

A l'aval de Gilly-sur-Loire, la Besbre est le principal affluent de la Loire sur le secteur d'étude. L'importance du déphasage avec les crues de la Loire limite cependant son impact.

3.6.6 DETERMINATION DES HYDROGRAMMES DE CRUE

3.6.6.1 Préambule

Dans la suite de l'étude, le régime de la Loire est considéré comme non influencé par le barrage de Villerest.

Le modèle hydrologique est utilisé pour simuler différentes crues de la Loire et obtenir différents hydrogrammes sur le secteur d'étude utilisés par la suite pour les modélisations hydrauliques et la réalisation de cartographie.

En concertation avec la DDT, il a été décidé de simuler les crues suivantes :

- **Simulation 1** : débit de pointe à Villerest de 2 600 m³/s, 2 550 m³/s à la station de Digoin, 2 580 m³/s à la station de Gilly-sur-Loire.
- **Simulation 2** : débit de pointe à Villerest de 3 300 m³/s, 3 230 m³/s à la station de Digoin, 3 270 m³/s à la station de Gilly-sur-Loire,
- **Simulation 3** : débit de pointe à Villerest de 3 600 m³/s, 3 520 m³/s à la station de Digoin, 3 540 m³/s à la station de Gilly-sur-Loire,
- **Simulation 4** : débit de pointe à Villerest de 4 000 m³/s, 3 950 m³/s à la station de Digoin, 3 970 m³/s à la station de Gilly-sur-Loire.

Les paramètres du modèle hydrologique sont adaptés de façon à retrouver ces débits de pointe.

3.6.6.2 Hydrogramme à Villerest

L'hydrogramme d'entrée à Villerest est basé sur la crue type considérée par l'EPL pour ses principes d'élaboration des consignes de lâchures (cf. Figure 42).

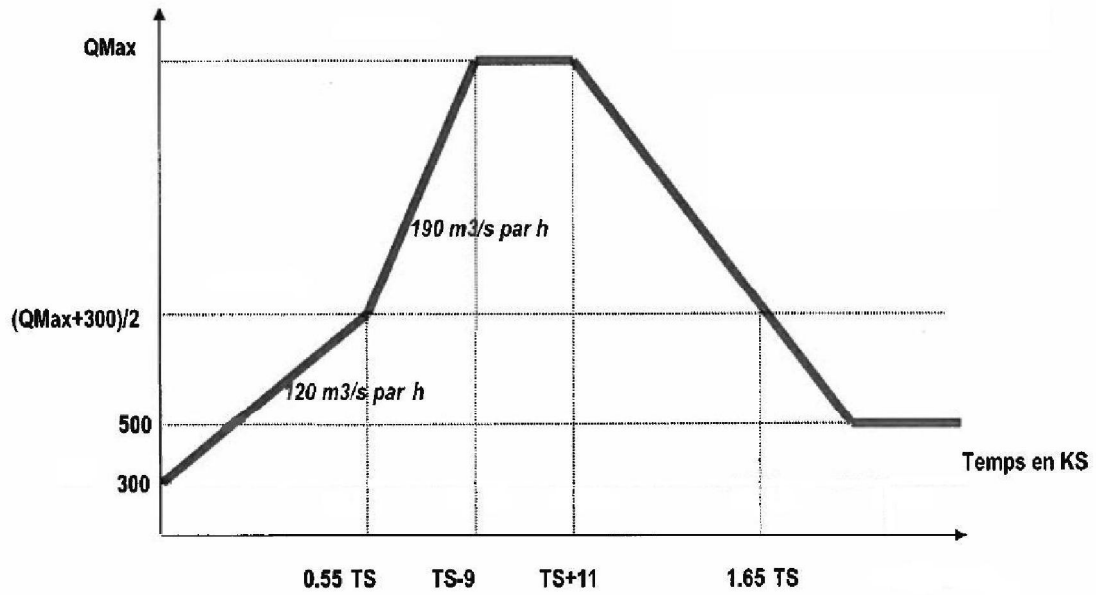


Figure 42 : Hydrogramme type à Villerest

L'unité de temps est exprimée en kilo seconde, avec :

$$TS = \max\left[28 \text{ heures} ; 84 + 4 * \frac{Q_{\max}}{1000} \right]$$

Ainsi, pour les crues ayant un débit de pointe inférieur à 4 000 m³/s, l'étalement temporel de l'hydrogramme reste identique.

3.6.6.3 Pluviométrie sur les bassins versants intermédiaires

Les pluies de projet sont de type double triangle et de durée 24h. La valeur de la pluie de chacun des sous bassins versants a été obtenue par découpage en polygones de Thiessen à l'aide des quatre stations de référence (Montagny, Mont Saint Vincent, Montsauche et Decize).

| | Bassin versant | Surface BV (km ²) | Pluviométrie (en mm) | | | |
|------|---------------------|-------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | | | Simulation 1 : P10 | Simulation 2 : P30 | Simulation 3 : P50 | Simulation 4 : P100 |
| BV1 | Renaison Confluence | 137 | 76,9 | 92,2 | 99,2 | 108,7 |
| BV2 | Oudan Station | 26,35 | 76,9 | 92,2 | 99,2 | 108,7 |
| BV3 | Oudam Confluence | 12,99 | 76,9 | 92,2 | 99,2 | 108,7 |
| BV4 | Rhins Confluence | 33,48 | 76,9 | 92,2 | 99,2 | 108,7 |
| BV5 | Rhins Station | 433,8 | 76,9 | 92,2 | 99,2 | 108,7 |
| BV6 | Teysonne Confluence | 139,6 | 76,9 | 92,2 | 99,2 | 108,7 |
| BV7 | Teysonne Station | 22,78 | 76,9 | 92,2 | 99,2 | 108,7 |
| BV8 | Sornin Confluence | 55,86 | 76,9 | 92,2 | 99,2 | 108,7 |
| BV9 | Sornin Station | 461,5 | 76,8 | 92,1 | 99,1 | 108,5 |
| BV10 | Arconce Station | 593,3 | 72,3 | 86,7 | 93,2 | 102,1 |

| | Bassin versant | Surface BV (km ²) | Pluviométrie (en mm) | | | |
|------|-----------------------|-------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | | | Simulation 1 : P10 | Simulation 2 : P30 | Simulation 3 : P50 | Simulation 4 : P100 |
| BV11 | Arconce Confluence | 68,69 | 76,9 | 92,2 | 99,2 | 108,7 |
| BV12 | Vouzance Station | 131,6 | 76,9 | 92,2 | 99,2 | 108,7 |
| BV13 | Vouzance Confluence | 19,59 | 76,9 | 92,2 | 99,2 | 108,7 |
| BV14 | Besbre Station | 725,1 | 68,2 | 80,4 | 86,1 | 93,7 |
| BV15 | Besbre Confluence | 41,52 | 56,1 | 64,2 | 67,9 | 72,9 |
| BV16 | Aron Station | 1468 | 64,3 | 73,8 | 78,1 | 84,0 |
| BV17 | Aron Confluence | 246,4 | 61,6 | 71,1 | 75,5 | 81,4 |
| BV18 | Engièvre Confluence | 93,23 | 56,1 | 64,2 | 67,9 | 72,9 |
| BV19 | Somme Confluence | 264,9 | 56,1 | 64,2 | 67,9 | 72,9 |
| BV20 | Arroux Confluence | 7,518 | 72,3 | 86,7 | 93,2 | 102,1 |
| BV21 | Arroux Station | 2292 | 72,9 | 85,5 | 91,3 | 99,0 |
| BV22 | Abron Confluence | 186 | 56,1 | 64,2 | 67,9 | 72,9 |
| BV23 | Ixeure Station | 113,6 | 56,1 | 64,2 | 67,9 | 72,9 |
| BV24 | Ixeure Confluence | 60,68 | 56,1 | 64,2 | 67,9 | 72,9 |
| BV25 | Bourbince Confluence | 52,01 | 71,3 | 85,4 | 91,9 | 100,6 |
| BV26 | Bourbince Station | 823,4 | 70,8 | 84,8 | 91,2 | 99,9 |
| BV27 | Maltaverne Confluence | 55,99 | 76,9 | 92,2 | 99,2 | 108,7 |
| BV28 | Trambouzan Confluence | 171,5 | 76,9 | 92,2 | 99,2 | 108,7 |
| BV29 | Merdasson Confluence | 144,1 | 76,9 | 92,2 | 99,2 | 108,7 |
| BV30 | Arçon Confluence | 355,7 | 76,9 | 92,2 | 99,2 | 108,7 |
| BV31 | Roudon Confluence | 371,9 | 60,9 | 70,6 | 75,1 | 81,1 |
| BV32 | Blandenan Confluence | 234,2 | 58,3 | 67,3 | 71,4 | 76,9 |
| BV33 | Pommier Confluence | 182,5 | 56,1 | 64,2 | 67,9 | 72,9 |
| BV35 | Acolin Confluence | 10,7 | 56,1 | 64,2 | 67,9 | 72,9 |
| BV36 | Acolin Station | 387,5 | 56,1 | 64,2 | 67,9 | 72,9 |
| BV37 | Cressonne Confluence | 330 | 56,1 | 64,2 | 67,9 | 72,9 |

Tableau 24 : Pluie de projet cumulées sur 24 h utilisées pour le modèle hydrologique (en mm)

3.6.6.4 Hydrogrammes de la Loire

Les figures ci-après présentent les hydrogrammes des crues de la Loire obtenus par modélisation hydrologique à Villerest, Iguerande, Digoin et Gilly-sur-Loire.

De petites instabilités, liées au modèle de propagation (formule de Muskingum) peuvent s'observer en fin de crue. Elles n'auront cependant pas d'impact sur les futures simulations hydrauliques puisque la fin de décrue n'est pas étudiée.

Les hydrogrammes des affluents sont présentés en ANNEXE 10

Simulation 1

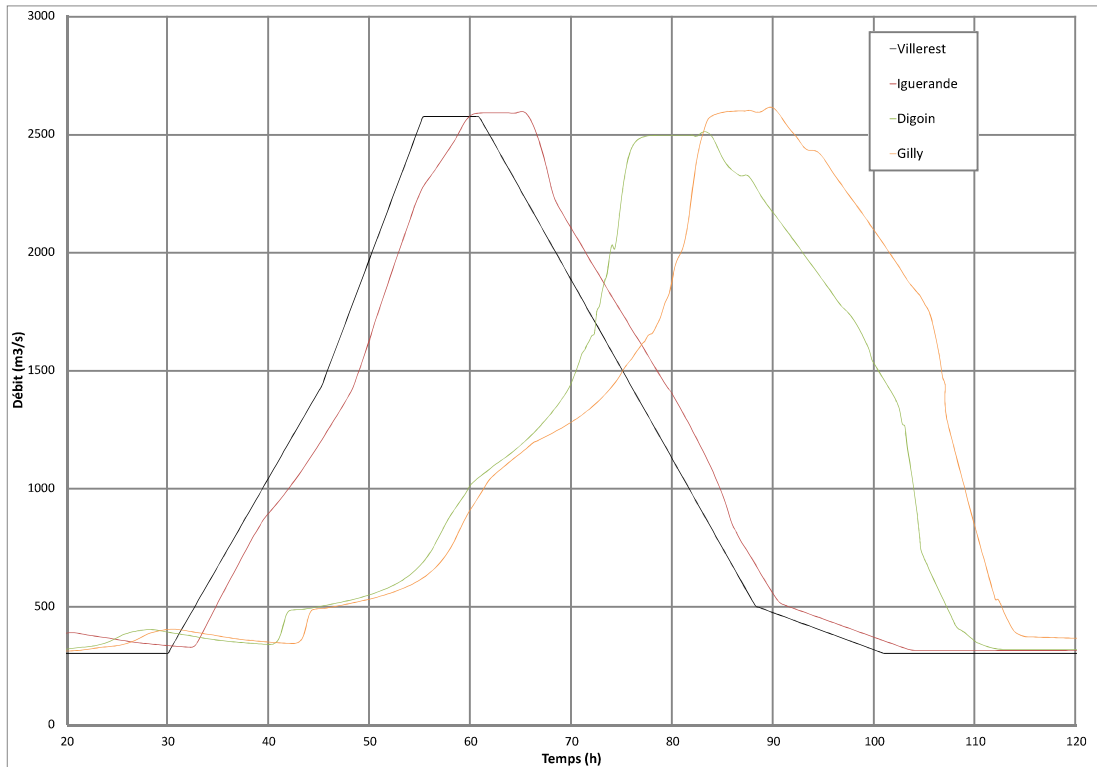


Figure 43 : Hydrographes de la Loire pour la simulation hydrologique 1

Simulation 2

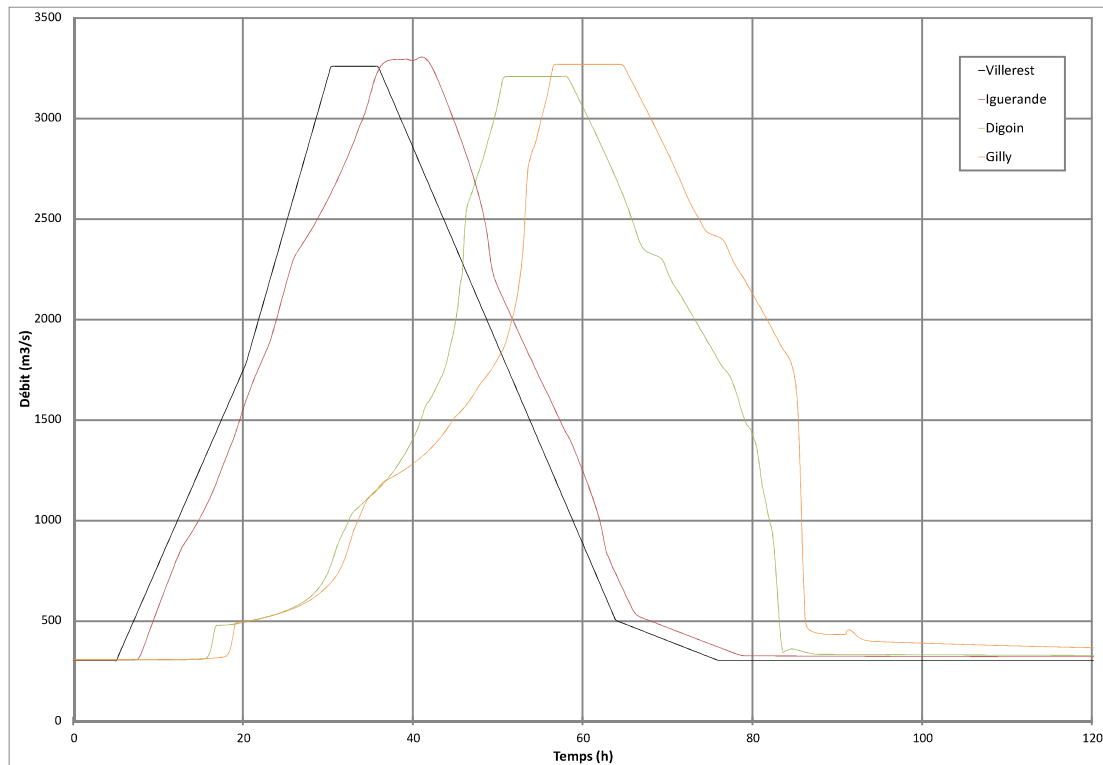


Figure 44 : Hydrographes de la Loire pour la simulation hydrologique 2

Simulation 3

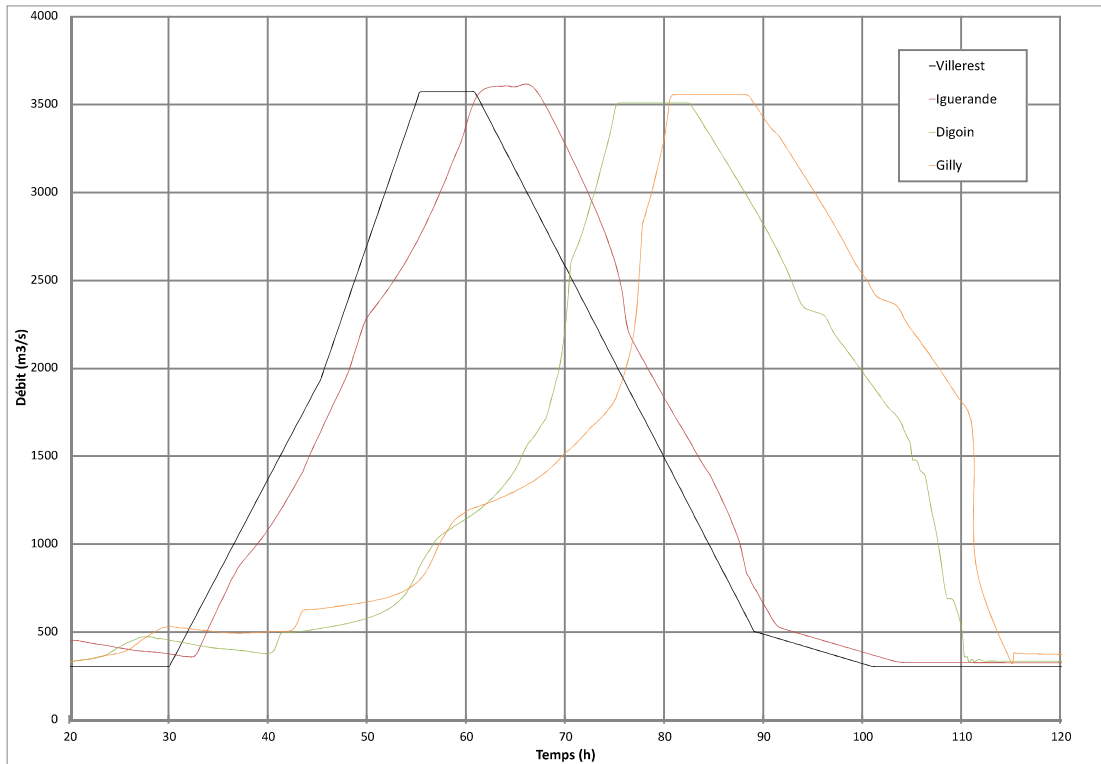


Figure 45 : Hydrographes de la Loire pour la simulation hydrologique 3

Simulation 4

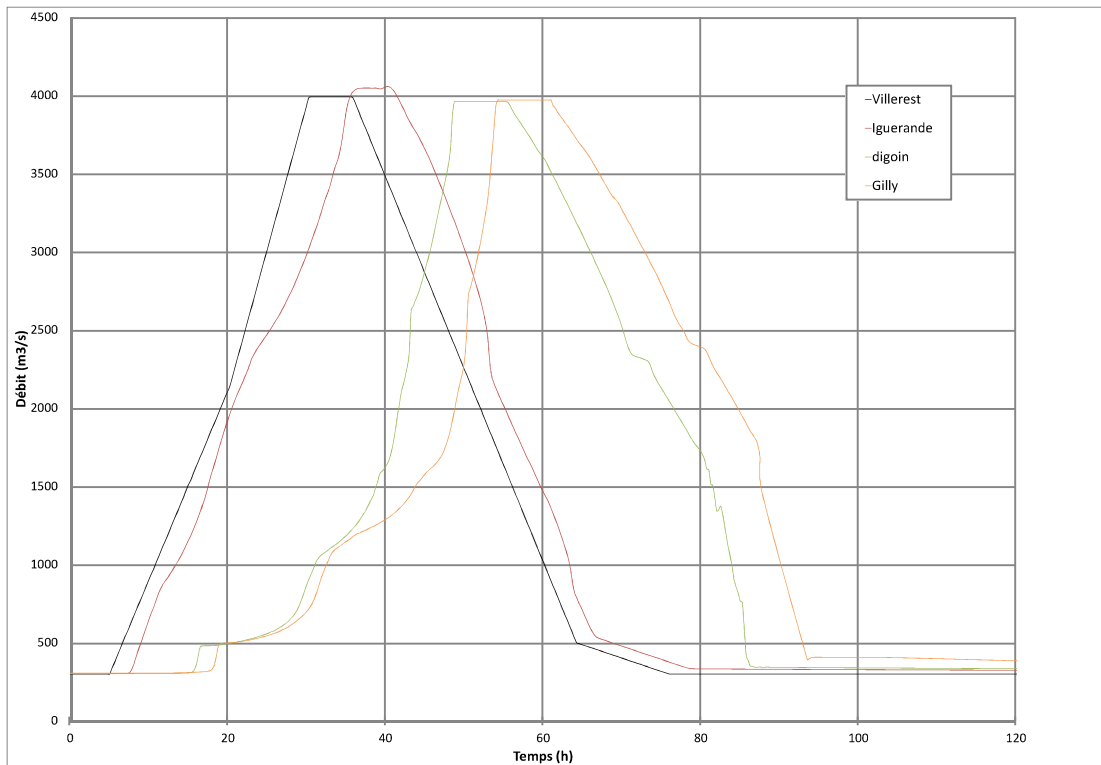


Figure 46 : Hydrographes de la Loire pour la simulation hydrologique 4

4 SYNTHÈSE

Des tableaux de synthèse et une carte informative précisent les différents repères de crue, débits caractéristiques et éléments structurants les écoulements sur le secteur d'étude obtenus à partir des études existantes, des visites de terrain et des questionnaires d'enquêtes en communes.

L'analyse hydrologique débute par un rappel des principales caractéristiques des trois grandes crues historiques qu'a connu la Loire dans la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle (1846, 1856, 1866). Les hydrogrammes de ces trois crues issus d'une précédente étude [6] sont par ailleurs redonnés.

Une étude pluviométrique permet de définir les pluies journalières caractéristiques sur les bassins des affluents de la Loire compris entre Villerest et Décize.

Une analyse statistique des chroniques de débits aux différentes stations hydrométriques présentes sur le linéaire d'étude (Villerest, Digoin et Gilly-sur-Loire) a permis de calculer les débits de crue caractéristiques de la Loire pour différentes périodes de retour. Les chroniques de débits à ces trois stations ont préalablement été allongées pour y intégrer la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle et la première moitié du XX^{ème} siècle.

Les débits de pointe caractéristiques de la Loire sont calculés sans prendre en compte l'influence du barrage de Villerest. Un tel scénario pourrait éventuellement survenir en cas de défaillance de la chaîne de gestion et en considérant l'arrivée d'une crue à plusieurs pointes.

L'analyse de l'influence des principaux affluents de la Loire sur le secteur d'étude montre que seul l'Arroux et son affluent la Bourbince, à l'aval immédiat de Digoin, peuvent avoir un impact conséquent sur la pointe des hydrogrammes de crue de la Loire : faible déphasage et apports conséquents en provenance du massif du Morvan.

Un modèle hydrologique a ensuite été construit de façon à reconstituer d'une part les hydrogrammes de la Loire pour les crues de décembre 2003 et novembre 2008, et d'autre part, pour calculer les hydrogrammes de la Loire pour différents scénarios hydrologiques. Chacune de ces crues fera par la suite de l'étude l'objet d'une simulation hydraulique bidimensionnelle.

Le modèle hydrologique s'étend depuis l'aval du barrage de Villerest (où les hydrogrammes des crues de 2003, 2008 sont connus) jusqu'à Décize. Le bassin versant correspondant est découpé en sous bassins versants sur lesquels s'effectue une transformation pluie-débit. Des nœuds de calcul sont définis dans le modèle aux endroits où l'on souhaite obtenir des hydrogrammes.

Pour les crues récentes de 2003 et 2008, les pluies mesurées aux différentes stations pluviométriques sont renseignées comme données d'entrée. Les paramètres de calage du modèle sont ensuite ajustés de façon à retrouver les différents hydrogrammes mesurés aux stations hydrométriques de la Loire et de ses affluents. Pour les bassins non jaugés, les paramètres de calage des bassins voisins jaugés sont retenus.

La crue de référence, retenue pour l'étude et la cartographie des aléas, est la crue historique la plus forte connue à savoir la crue de 1846. La bathymétrie et la topographie du lit de la Loire ayant fortement changé depuis cette crue, on ne cherchera pas à caler le modèle hydraulique sur les repères de crue de l'époque. Le calage sera réalisé sur les crues récentes de 2003 et 2008.