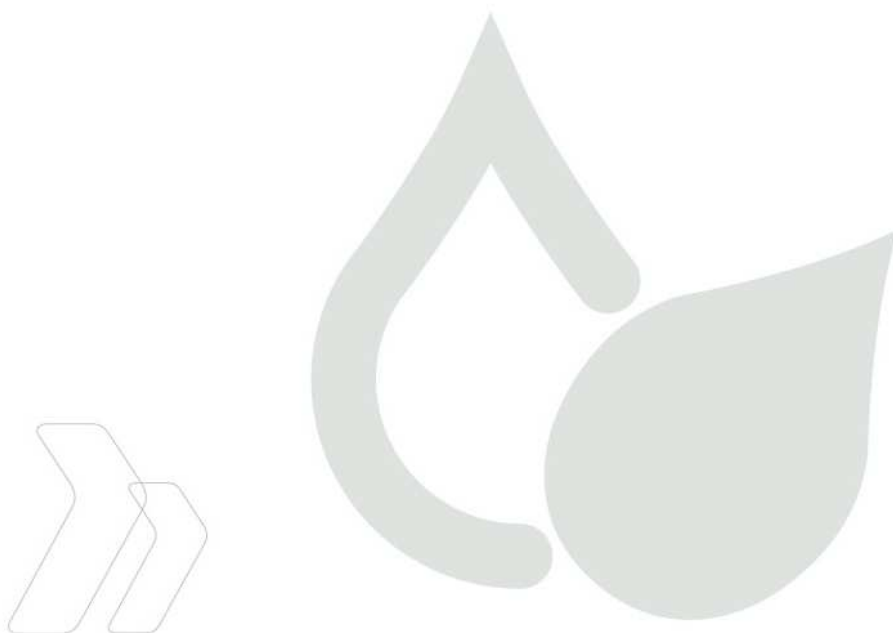


Eau
Environnement



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

Rapport des tranches conditionnelles 1, 2, 3 :
Etude hydraulique et cartographie de l'aléa



DIRECTION
DEPARTEMENTALE
DES TERRITOIRES DE
L'ALLIER

Rapport n° : RL0332
Révision n° : 5
Date : 12/12/2014

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	24/01/2013	B. Seurot (Chef de projet) 	G. Chevallet (superviseur) 
1	08/04/2013	B. Seurot (Chef de projet) 	G. Chevallet (superviseur) 
2	07/08/2013	B. Seurot (Chef de projet) 	G. Chevallet (superviseur) 
3	20/01/2014	B. Seurot (Chef de projet) 	G. Chevallet (superviseur) 
4	04/09/2014	B. Seurot (Chef de projet) 	G. Chevallet (superviseur) 
5	12/12/2014	B. Seurot (Chef de projet) 	G. Chevallet (superviseur) 

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	1
1.1	CONTEXTE	1
1.2	DOMAINE D'ETUDE	2
1.3	OBJECTIFS	3
2	ETUDE HYDRAULIQUE	4
2.1	MODELE NUMERIQUE EXPLOITE	4
2.2	EMPRISE DES MODELES HYDRAULIQUES BIDIMENSIONNELS	4
2.3	CONSTRUCTION DES MODELES HYDRAULIQUES BIDIMENSIONNELS	5
2.3.1	DONNEES TOPOGRAPHIQUES ET BATHYMETRIQUES EXPLOITEES	5
2.3.2	CONSTRUCTION DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN (MNT)	5
2.3.3	CREATION DES MAILLAGES ET DEFINITION DES COTES DE NOEUDS	6
2.3.4	HYPOTHESES DE MODELISATION ET CONDITIONS LIMITES	7
2.4	CALAGE DES MODELES HYDRAULIQUES	12
2.4.1	COMPARAISON DES HYDROGRAMMES DE CRUE CALCULES ET MESURES	12
2.4.2	LIGNES D'EAU CALCULEES ET REPERES DE CRUE	13
2.4.3	CARTOGRAPHIE RELATIVE AU CALAGE DU MODELE HYDRAULIQUE	19
3	CARTOGRAPHIE DE L'ALEA	20
3.1	PREAMBULE	20
3.2	TABLEAU DE SYNTHESE DES DEBITS ET HAUTEURS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES	21
3.3	CARTOGRAPHIE	22
3.3.1	CARTOGRAPHIE DES HAUTEURS D'EAU	22
3.3.2	CARTOGRAPHIE DES VITESSES	22
3.3.3	CARTOGRAPHIE DE L'ALEA	22

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du secteur d'étude, la Loire entre Iguerande et Gannay-sur-Loire	2
Figure 2 : Emprise des modèles hydrauliques bidimensionnels amont et aval	4

Figure 3 : Représentation 3D du Modèle Numérique de Terrain (MNT)	5
Figure 4 : Définition sous MAPINFO des éléments structurant du relief (zoom sur le secteur de Digoin)	6
Figure 5 : Création du maillage bidimensionnel sous Blue Kenue avec densification de certaines zones (zoom sur le secteur de Digoin)	6
Figure 6 : Maillage ajusté en altimétrie (modèle aval)	7
Figure 7 : Hydrogrammes de crue de décembre 2003	8
Figure 8 : Hydrogrammes de crue de novembre 2008	9
Figure 9 : Hydrogrammes de crue de novembre 2010	9
Figure 10 : Niveaux d'eau en amont et en aval du pont canal de Digoin pour les trois crues historiques de 1846, 1856 et 1866 (source : Pont canal de Digoin, plan et élévation générale, dressé par l'ingénieur Renardier le 13 juillet 1889)	10
Figure 11 : Remblais et piles de pont sur le secteur de Digoin (modèle 2D)	11
Figure 12 : Ligne d'eau maximale calculée de la crue de décembre 2003 et repères de crue – modèle amont	14
Figure 13 : Ligne d'eau calculée maximale de la crue de décembre 2003 et repères de crue – modèle aval	15
Figure 14 : Ligne d'eau maximale calculée de la crue de novembre 2008 et repères de crue – modèle amont	16
Figure 15 : Ligne d'eau calculée maximale de la crue de novembre 2008 et repères de crue – modèle aval	17
Figure 16 : Ligne d'eau maximale calculée de la crue de novembre 2010 et repères de crue – modèle amont	18
Figure 17 : Ligne d'eau calculée maximale de la crue de novembre 2010 et repères de crue – modèle aval	18
Figure 18 : Grille d'aléa	23

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Grille des coefficients de Strickler utilisés	10
Tableau 2 : Comparaison des hydrogrammes mesurés et calculés à Digoin et Gilly-sur-Loire pour les crues de 2003 et 2008	12

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Dans le cadre du projet de révision du Plan de Prévention des Risques Inondation (PPRI) du fleuve 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) a souhaité 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), la définition des zones inondables s'est basée sur un modèle hydraulique (HEC2) en régime permanent interpolant les lignes d'eau entre les repères de crues relevés lors de la crue historique de 1846.
- **entre Iguerande et Digoin** (avril 1998), la définition des zones inondables s'est également basée sur un modèle hydraulique (MIKE 11) en régime permanent interpolant les lignes d'eau entre les repères de crues relevés lors de la crue historique de 1846.

Ce Plan de Prévention des Risques présente un certain nombre de lacunes et d'imprécisions notamment relatives à 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 dans une moindre mesure, en 2003, apportent un nouvel éclairage sur la connaissance de l'aléa inondation de la Loire. 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 du fleuve Loire. Cette étude fait l'objet du présent marché.

Le fleuve Loire matérialisant la frontière entre les départements de l'Allier et de la Saône et Loire, la DDT71 est associée et les études sont menées conjointement.

Cette étude doit permettre 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.

1.2 DOMAINE D'ETUDE

L'étude concerne le fleuve 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 110 km de cours d'eau principal.

Ainsi, 34 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,
- 22 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, Baugy, Chambilly, Marcigny, Saint-Martin-du-Lac, Artaix, Melay et Iguerande.

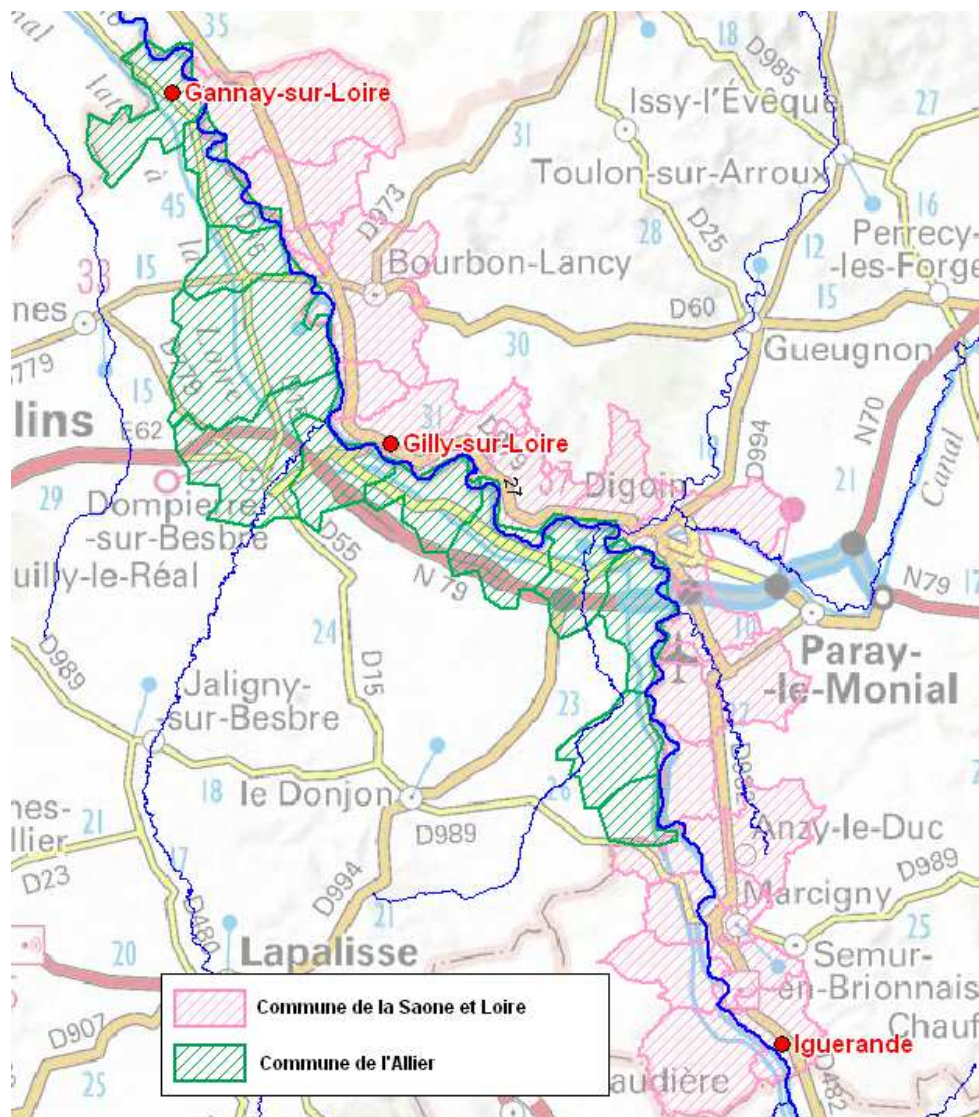


Figure 1 : Localisation du secteur d'étude, la Loire entre Iguerande et Gannay-sur-Loire

1.3 OBJECTIFS

L'étude comprend la modélisation de la Loire traversant les 34 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 les principaux :

- 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 (crue 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 crise 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 (rapport RL0268, rév2, du 08/10/2012)**
 - Bibliographie et terrain
 - Analyse hydrologique
2. **Tranche conditionnelle 1 (TC1) et 2 (TC2)¹ : Etude hydraulique**
 - Construction et calage des modèles hydrauliques
 - Exploitation des modèles
3. **Tranche conditionnelle 3 (TC3) : Cartographie de l'aléa**

Le présent rapport concerne l'ensemble des tranches conditionnelles.

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 ETUDE HYDRAULIQUE

2.1 MODELE NUMERIQUE EXPLOITE

La modélisation hydraulique a été réalisée à l'aide du logiciel TELEMAC2D. Le logiciel TELEMAC-2D résout les équations de Barré de Saint-Venant à deux dimensions d'espace horizontales. Ses résultats principaux sont, en chaque point du maillage de résolution, la hauteur d'eau et la vitesse moyenne sur la verticale. TELEMAC-2D trouve ses applications en hydraulique à surface libre, maritime ou fluviale.

2.2 EMPRISE DES MODELES HYDRAULIQUES BIDIMENSIONNELS

La Figure 2 présente l'emprise des deux secteurs ayant fait l'objet d'une modélisation hydraulique bidimensionnelle.

Le modèle hydraulique bidimensionnel amont (Tranche conditionnelle 1) concerne le tronçon de la Loire située entre Iguerande au sud et celle de Gilly-sur-Loire au nord, soit un linéaire de cours d'eau d'environ 71 km.

Le modèle hydraulique bidimensionnel aval (Tranche conditionnelle 2) concerne quant à lui le tronçon de la Loire située entre Gilly-sur-Loire au sud et celle de Gannay-sur-Loire au nord, soit un linéaire de cours d'eau d'environ 39 km.

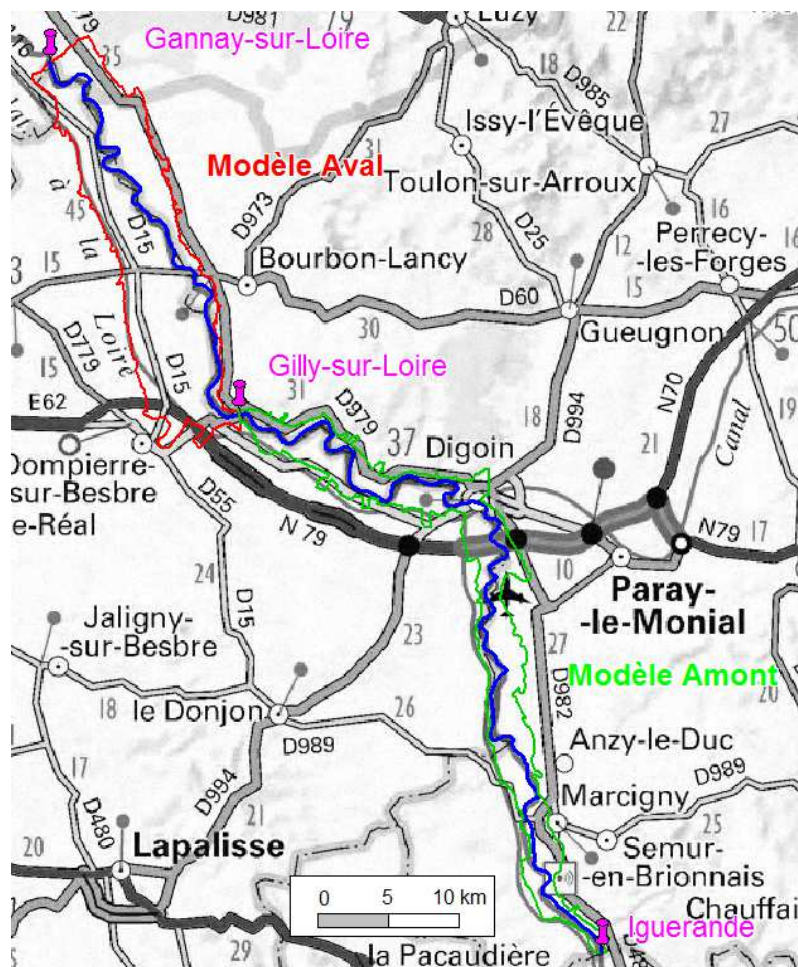


Figure 2 : Emprise des modèles hydrauliques bidimensionnels amont et aval

2.3 CONSTRUCTION DES MODELES HYDRAULIQUES BIDIMENSIONNELS

2.3.1 DONNEES TOPOGRAPHIQUES ET BATHYMETRIQUES EXPLOITEES

La topographie, disponible dans le cadre de la présente étude et utilisée pour les modélisations hydrauliques bidimensionnelles, est composée des éléments suivants :

- le levé LIDAR de la DREAL Centre réalisé en mars 2009 ; ils se présentent sous la forme de dalle de 1 km², de densité 1 point tous les mètres et couvre l'ensemble du secteur d'étude ; la précision altimétrique est d'environ 5 cm,
- les profils bathymétriques de la Loire et de ses affluents de la DREAL Centre réalisés en avril 2010 par France Ingénierie Topographie ; les profils sont levés tous les kilomètres et comprennent également les levés des ouvrages de franchissement hydraulique,
- les plans des ouvrages de franchissement de la Loire fournis par la DDT03.

2.3.2 CONSTRUCTION DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN (MNT)

A partir des données topographiques disponibles, trois MNT ont été créés. Les deux premiers permettent de couvrir le linéaire du modèle amont tandis que le troisième couvre le linéaire du modèle aval.

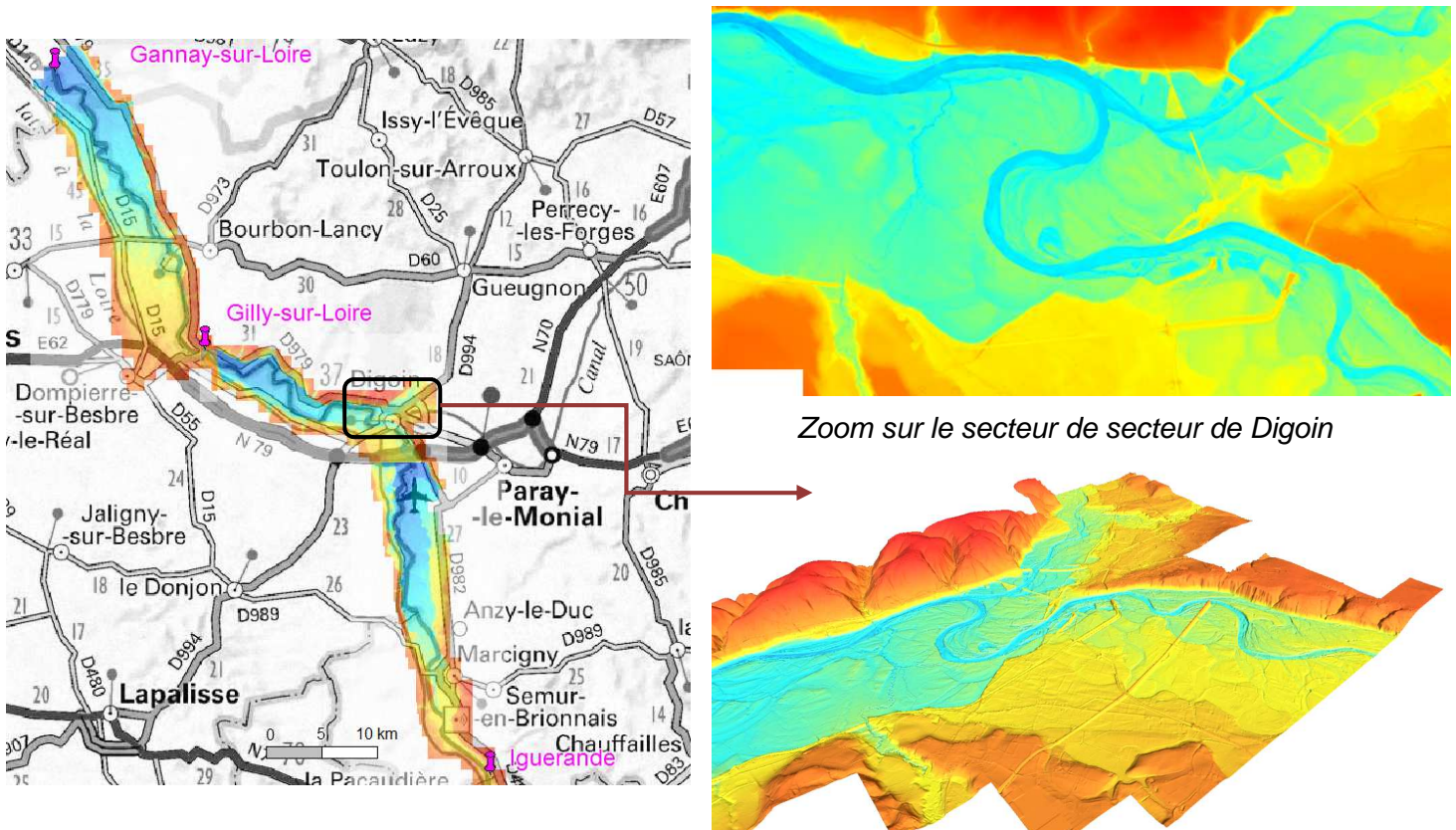


Figure 3 : Représentation 3D du Modèle Numérique de Terrain (MNT)

2.3.3 CREATION DES MAILLAGES ET DEFINITION DES COTES DE NOEUDS

Dans un premier temps, les différents éléments structurants du relief et de la modélisation composant le secteur d'étude (enveloppe, lits mineurs, zones fortement urbanisées, remblais ...) sont saisis sous MAPINFO.

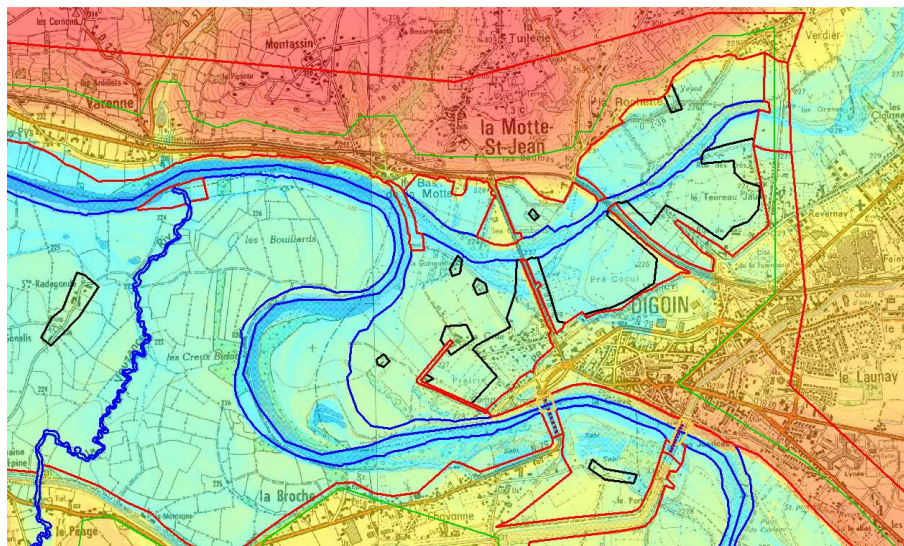


Figure 4 : Définition sous MAPINFO des éléments structurant du relief (zoom sur le secteur de Digoin)

Ces éléments sont ensuite importés sous le logiciel Blue Kenue qui permet de définir un maillage par zone : la densité du maillage est précisée pour chacun des éléments importés. Sur les secteurs à enjeux (villes, village), les remblais, et les cours d'eau, le maillage est affiné avec une taille de maille n'excédant pas 10 m.

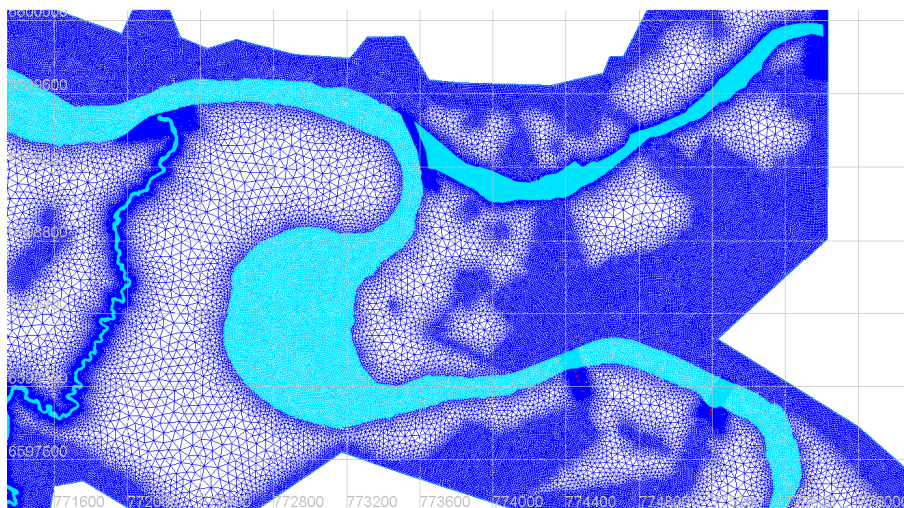


Figure 5 : Création du maillage bidimensionnel sous Blue Kenue avec densification de certaines zones (zoom sur le secteur de Digoin)

Pour les modèles amont et aval, les maillages ainsi réalisés comprennent respectivement près de 745 000 et 290 000 nœuds de calcul avec des tailles de maille variant de quelques mètres en lit mineur à 10-60 m en lit majeur.

L'altimétrie des nœuds du maillage est renseignée, sous Blue Kenue, à partir du MNT préalablement exporté au format ASCII depuis Mapinfo.

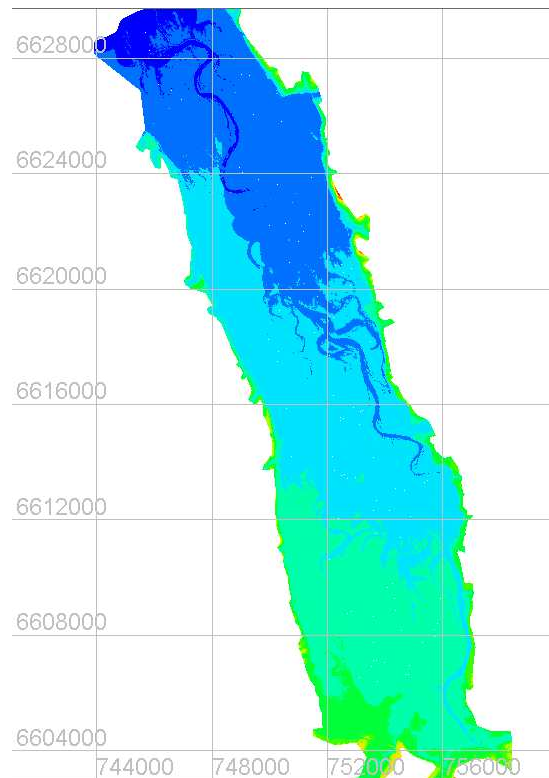


Figure 6 : Maillage ajusté en altimétrie (modèle aval)

2.3.4 HYPOTHESES DE MODELISATION ET CONDITIONS LIMITES

2.3.4.1 Conditions aux limites

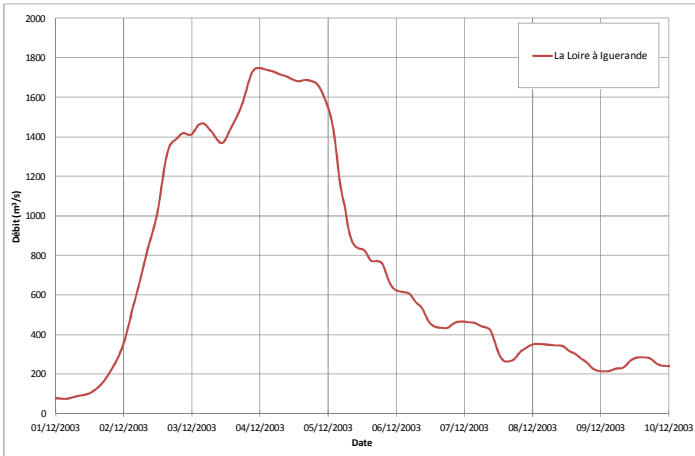
Les hydrogrammes des crues de décembre 2003 et novembre 2008 de la Loire à Iguerande, déterminés lors de l'étude hydrologique, ont été injectés en amont du modèle hydraulique amont.

Les hydrogrammes des crues de décembre 2003 et novembre 2008 de la Loire à Gilly-sur-Loire imposés en amont du modèle aval sont ceux mesurés par la station hydrométrique du pont de Diou.

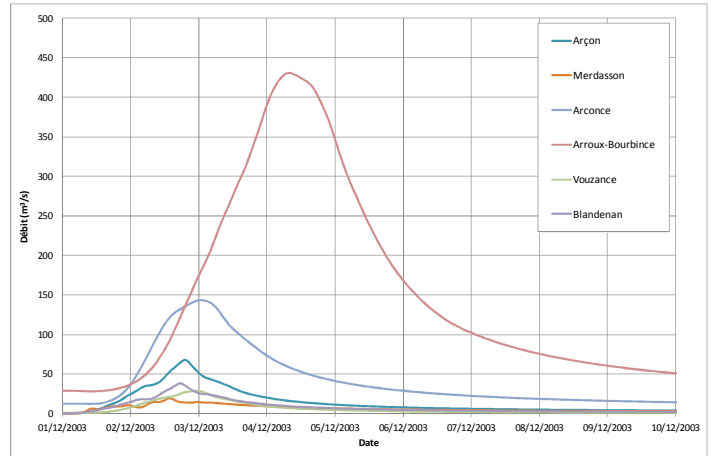
Les hydrogrammes de 2003 et 2008 des affluents, injectés en amont des modèles hydrauliques, sont ceux déterminés lors de l'étude hydrologique.

L'étude hydrologique ne prévoyant pas la reconstitution de la crue de novembre 2010, les hydrogrammes de la Loire et de ses affluents ont été demandés auprès de la DREAL Centre qui réalise actuellement un modèle hydraulique filaire à casiers de prévision des crues englobant le secteur d'étude.

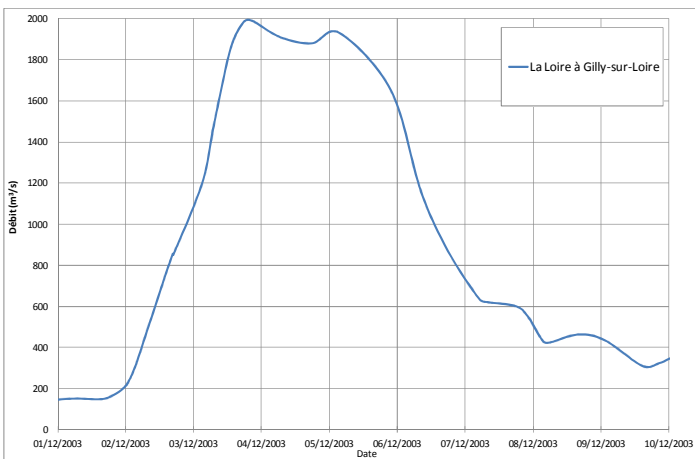
Le régime uniforme est imposé en condition limite aval des modèles.



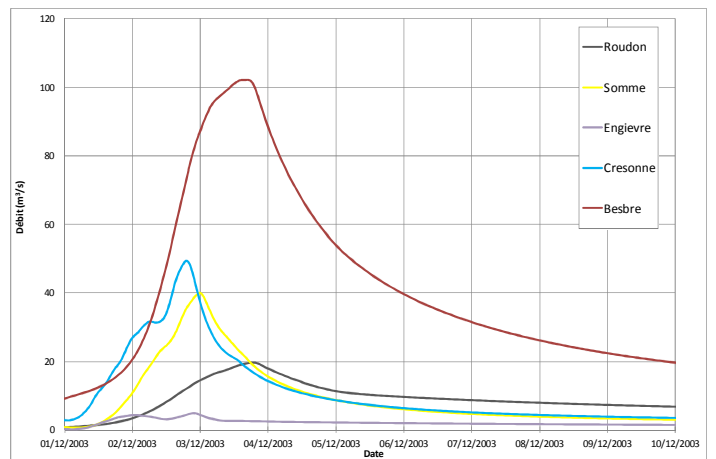
Modèle amont - La Loire à Iguerande



Modèle amont – Apport des affluents

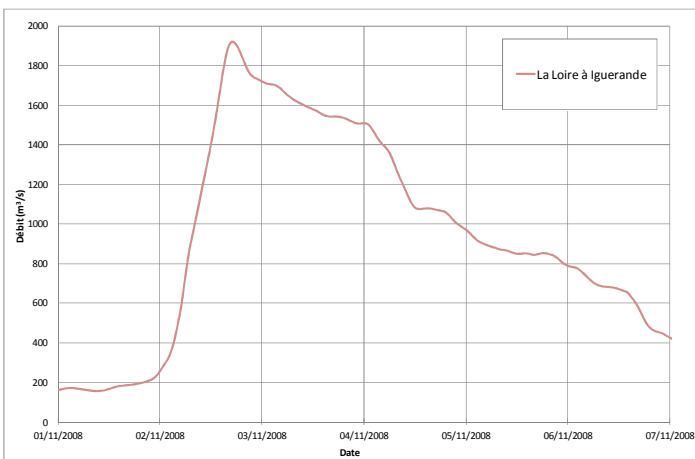


Modèle amont - La Loire à Gilly-sur-Loire

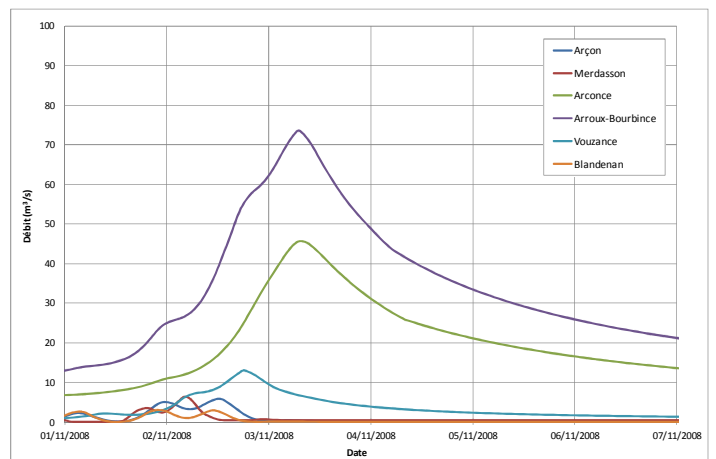


Modèle aval - Apport des affluents

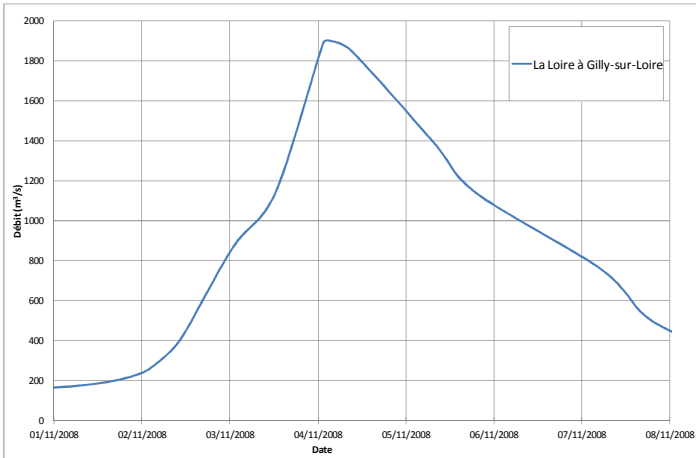
Figure 7 : Hydrogrammes de crue de décembre 2003



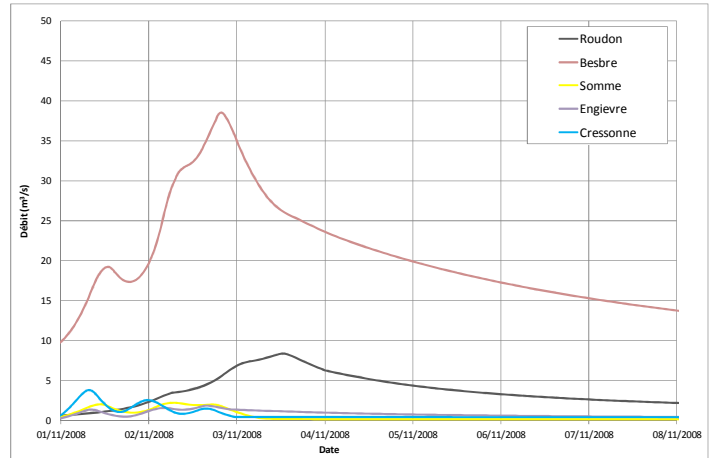
Modèle amont - La Loire à Iguerande



Modèle amont – Apport des affluents

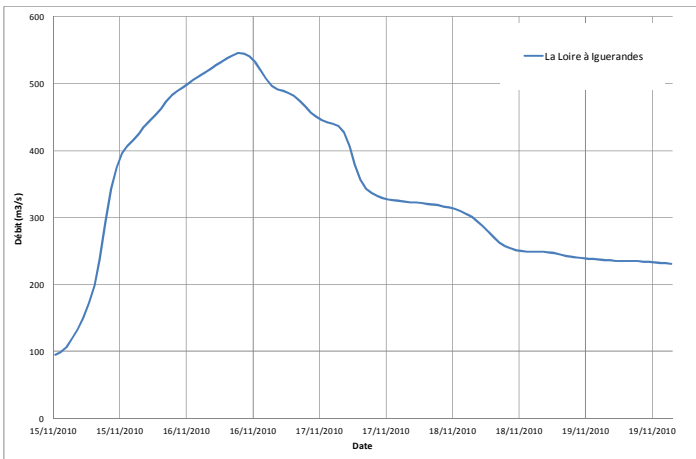


Modèle amont - La Loire à Gilly-sur-Loire

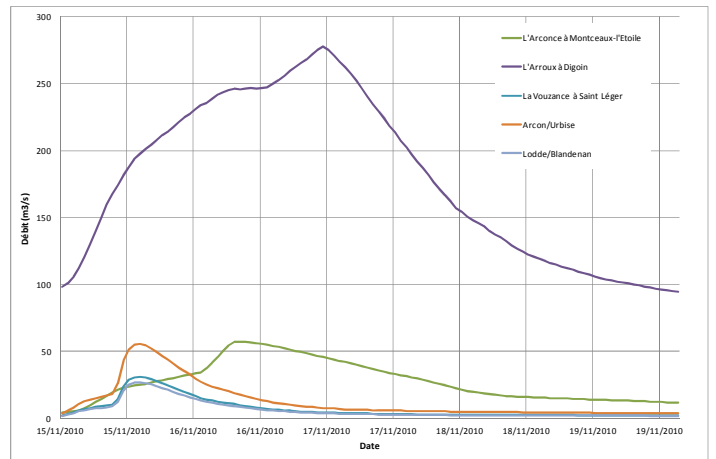


Modèle aval - Apport des affluents

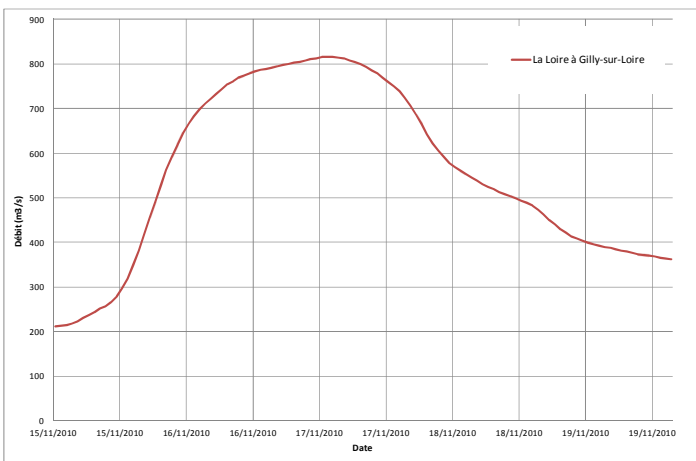
Figure 8 : Hydrogrammes de crue de novembre 2008



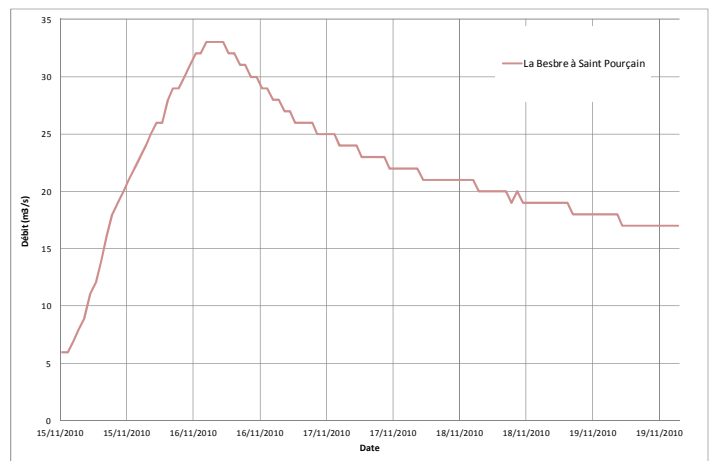
Modèle amont - La Loire à Iguerande



Modèle amont - Apport des affluents



Modèle amont - La Loire à Gilly-sur-Loire



Modèle aval - Apport des affluents

Figure 9 : Hydrogrammes de crue de novembre 2010

2.3.4.2 Coefficients de frottement

Les coefficients de Strickler ont été déterminés par calage sur la crue de décembre 2003 et vérifiés sur les crues de novembre 2008 et novembre 2010, crues pour lesquelles des repères de crue et les hydrogrammes sont disponibles. L'évolution rapide et continue du lit de la Loire implique par ailleurs un calage sur des crues récentes. La grille des coefficients de rugosité utilisés est la suivante :

Situation de l'écoulement et occupation des sols	Coefficient de Strickler
Lit majeur en prairie	K=28
Lit majeur en zone d'habitat groupé	K=10
Lit majeur en zone boisée	K=10
Lit mineur	K=40

Tableau 1 : Grille des coefficients de Strickler utilisés

Les îlots présents en lit mineur sont directement intégrés à l'altimétrie du modèle. S'ils sont boisés, un coefficient de Strickler de 10 est appliqué.

2.3.4.3 Hypothèses relatives aux infrastructures de la vallée

Les remblais routiers, les digues et tout autre élément susceptible de structurer les écoulements en crue sont directement intégrés à l'altimétrie du modèle. Les piles de pont sont également modélisées : l'emprise correspondant à la section des piles est soustraite du modèle. Pour les crues simulées, les ponts de la Loire ne rentrent pas en charge (tablier non atteint), ce qui ne nécessite pas la mise en place de lois d'orifice qui d'ailleurs ont tendance à mal fonctionner pour de faibles charges. On notera simplement que pour la crue de 1846, le tablier du pont Canal à Digoïn était tout juste atteint par le niveau de la Loire pour une perte de charge occasionnée de 57 cm (cf. figure ci-dessous). Le modèle donne pour cette même situation une perte de charge de 45 cm environ, plus faible donc d'une dizaine de centimètres, probablement du fait que l'élargissement progressif des piles de ponts ne peut être pris en compte dans la modélisation.

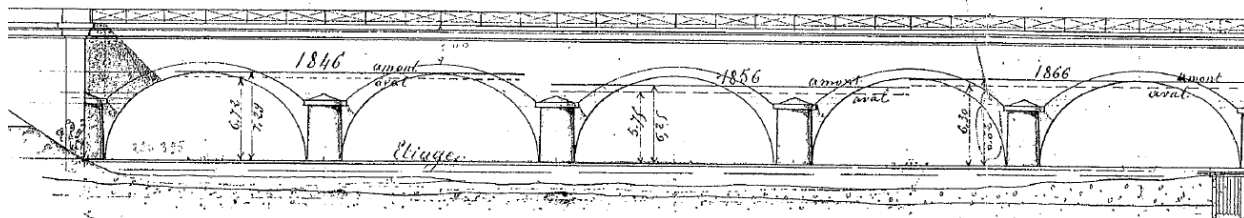


Figure 10 : Niveaux d'eau en amont et en aval du pont canal de Digoïn pour les trois crues historiques de 1846, 1856 et 1866 (source : Pont canal de Digoïn, plan et élévation générale, dressé par l'ingénieur Renardier le 13 juillet 1889)

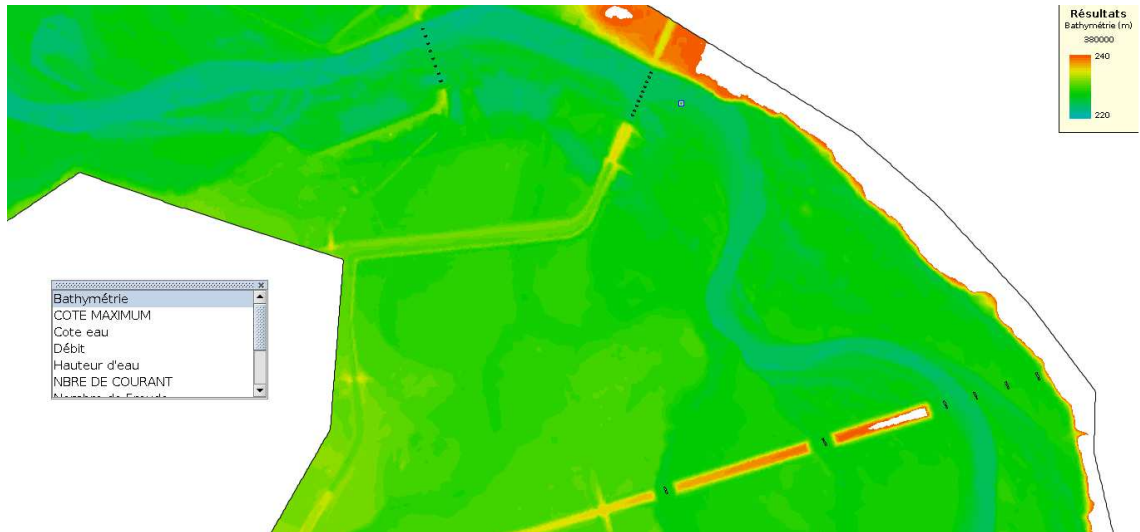


Figure 11 : Remblais et piles de pont sur le secteur de Digoin (modèle 2D)

2.4 CALAGE DES MODELES HYDRAULIQUES

2.4.1 COMPARAISON DES HYDROGRAMMES DE CRUE CALCULES ET MESURES

Le Tableau 2 présente les hydrogrammes mesurés et calculés aux stations hydrométriques de Digoin et Gilly-sur-Loire pour les crues de décembre 2003 et novembre 2008.

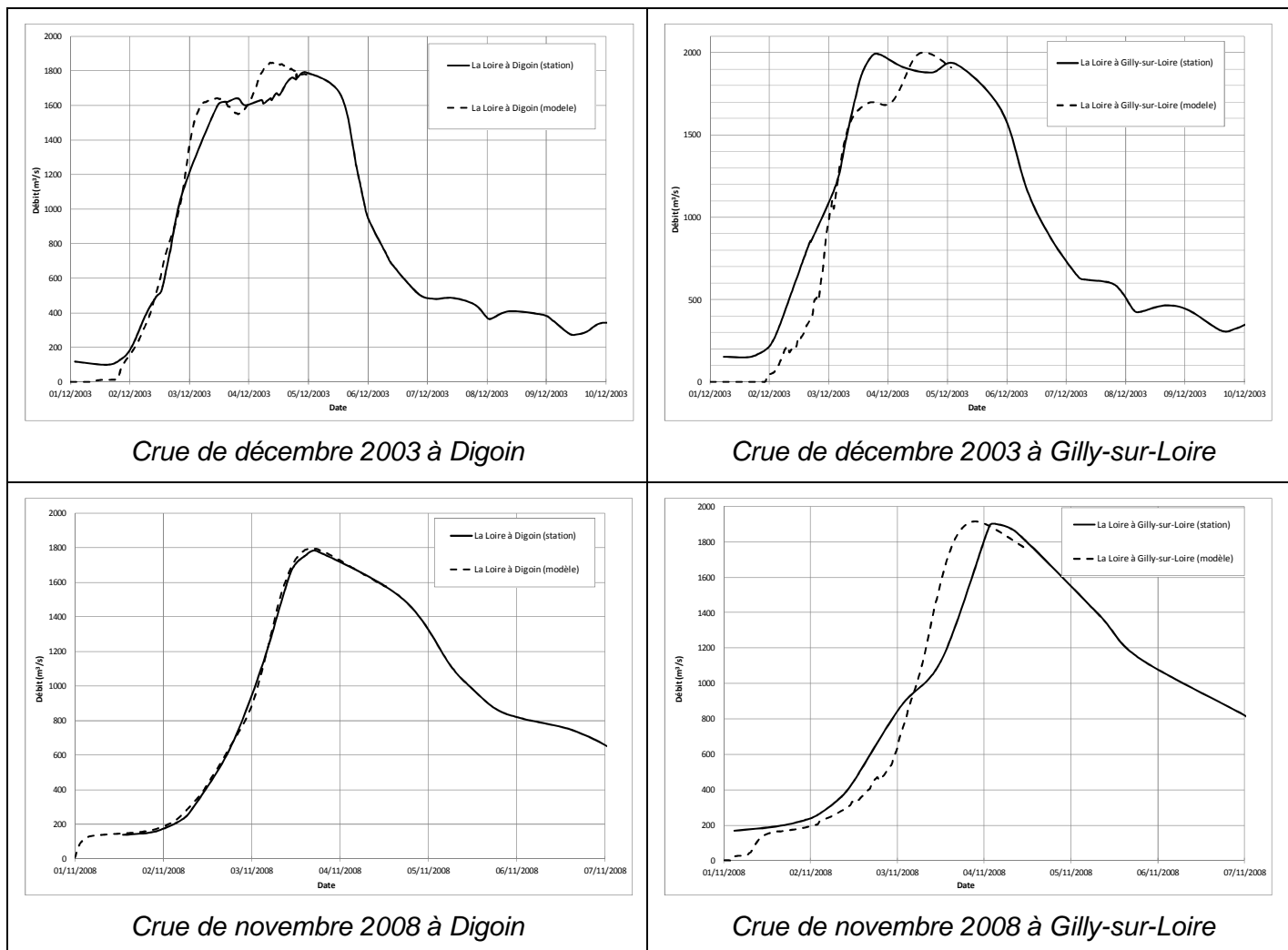


Tableau 2 : Comparaison des hydrogrammes mesurés et calculés à Digoin et Gilly-sur-Loire pour les crues de 2003 et 2008

Bien qu'un déphasage puisse s'observer sur les pics de crue calculés et mesurés, les débits de pointe sont cohérents, ce qui ne remet pas en cause le calage du modèle pour les besoins de l'étude. Le modèle n'a en effet pas vocation à être utilisé pour de la prévision de crue.

2.4.2 LIGNES D'EAU CALCULEES ET REPERES DE CRUE

2.4.2.1 Préambule

Les repères de crue et les valeurs calculées par le modèle sont consignés dans des tableaux en annexe 2. Ils contiennent :

- une **première colonne** avec les **identifiants du repère** et permettant une localisation aisée sur les planches cartographiques fournies en annexe 3.
- une **seconde colonne** précisant la **distance en kilomètres** le long de la Loire entre le point de départ de la modélisation, c'est-à-dire le pont d'Iguerande, et le repère de crue considéré,
- une **troisième colonne** avec les **cotes relevées par la DREAL Centre** pendant l'épisode de crue. Il s'agit de valeurs plus ou moins proches du pic de crue et sont donc susceptibles d'être éloignées des valeurs maximales atteintes,
- une **quatrième colonne** avec les **cotes d'eau maximales atteintes estimées par la DREAL Centre** à partir des cotes relevées sur le terrain et des limnigrammes fournis par les stations hydrométriques présentes. Cette méthode consiste dans un premier temps à estimer le déphasage entre l'heure du relevé et le pic de crue, puis de considérer l'écart de cote correspondant à la station hydrométrique la plus proche. Cet écart est alors additionné à la valeur relevée pour obtenir la cote maximale. Lorsqu'une valeur relevée sur le terrain est jugée douteuse ou bien lorsque les déphasages entre l'heure du relevé et du pic de crue est trop important, la cote maximale atteinte n'a pas été calculée par la DREAL. Cette approche peut présenter des incertitudes lorsque les caractéristiques géométriques de la vallée au droit de la station hydrométrique sont différentes de celles de la vallée où se situent les repères,
- une **cinquième colonne** précisant les **cotes maximales atteintes au droit des stations de mesure**,
- une **sixième colonne** donnant les **repères de crue relevés lors des visites de terrain** et correspondant à des niveaux atteints lors du pic de crue,
- une **septième colonne** listant les **repères de crue retenus pour le calage** parmi les quatre colonnes précédentes. Les repères fournis par les stations et relevés lors des visites de terrain sont systématiquement retenus. Les cotes maximales données par la DREAL sont également retenues mais peuvent toutefois présenter des incertitudes liées à la méthode d'estimation qui seront d'autant plus importantes que le déphasage entre mesure et pic de crue l'est aussi,
- une **huitième colonne**, précisant les **cotes maximales calculées par le modèle** hydraulique,
- une **neuvième colonne** avec les **écarts entre cotes calculées et cotes observées** retenues.

2.4.2.2 Crue de décembre 2003

Le calage du modèle est dans un premier temps effectué sur la crue de décembre 2003, crue récente présentant le plus de repères de crue valables et suffisamment importante pour que le calage soit valide pour la simulation des crues statistiques (crues de période de retour supérieures à 10 ans).

Le meilleur calage est obtenu pour les coefficients de Strickler donnés dans le Tableau 1.

La Figure 12 et la Figure 13 présentent respectivement, pour le modèle amont et le modèle aval, les lignes d'eau calculées² de la crue de décembre 2003 ainsi que les repères de crue retenus.

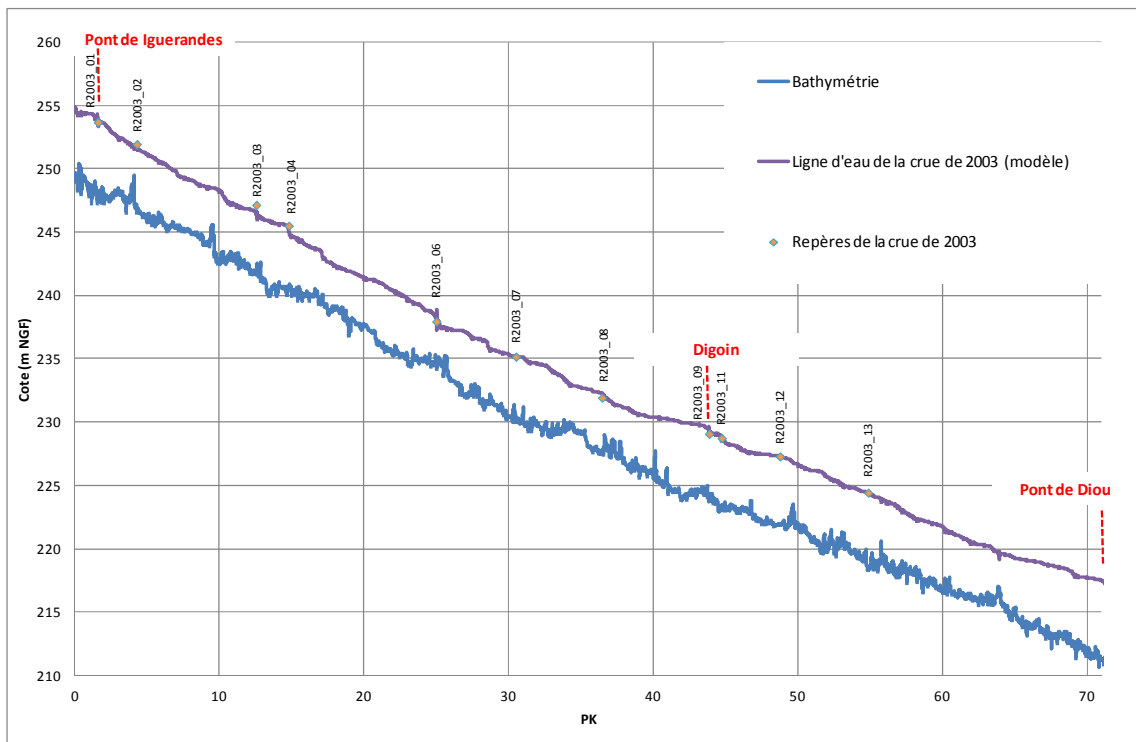


Figure 12 : Ligne d'eau maximale calculée de la crue de décembre 2003 et repères de crue – modèle amont

² Les lignes d'eau calculées sont établies dans le lit mineur de la Loire

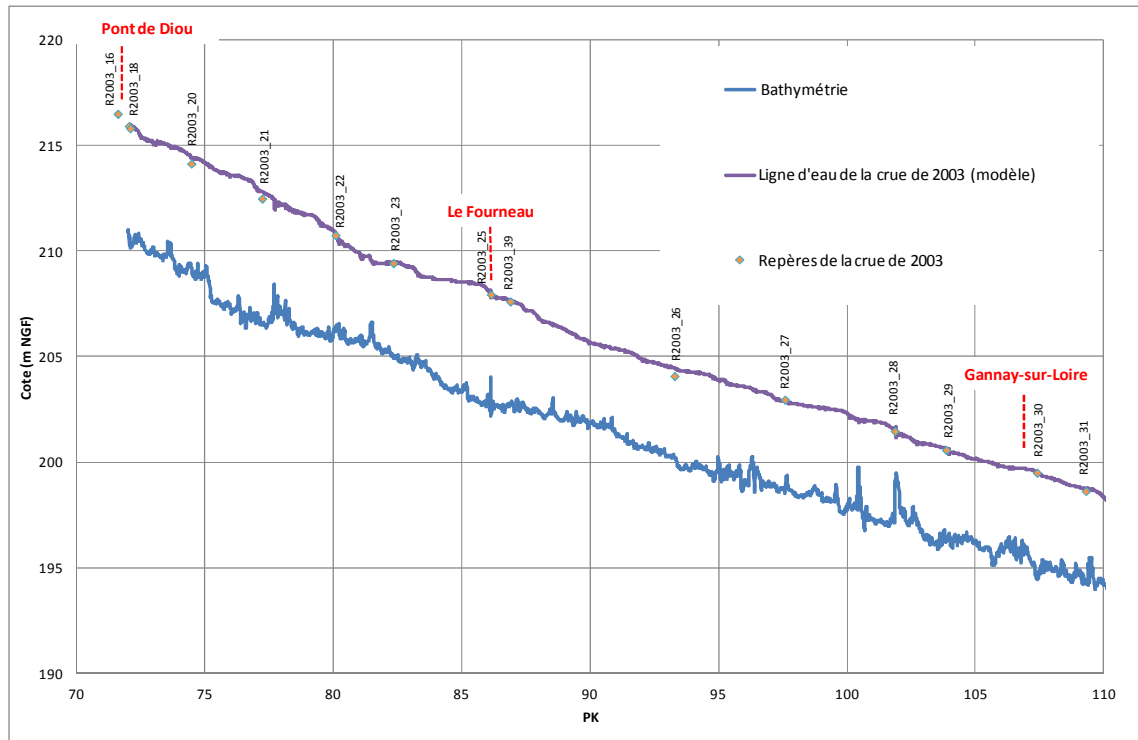


Figure 13 : Ligne d'eau calculée maximale de la crue de décembre 2003 et repères de crue – modèle aval

Plus de 75 % des cotes calculées par le modèle sont situées à ± 25 cm des valeurs observées pour la crue de décembre 2003. Les écarts supérieurs à ± 25 cm sont notamment liés à des imprécisions relatives à la cote des repères, ainsi :

- les cotes des repères **R2003_02**, **R2003_03** et **R2003_04** sont probablement surestimées. Ces trois repères résultent d'une estimation où le déphasage temporel entre cote relevée et pic de crue est conséquent. De plus, la méthode d'estimation, s'appuyant sur l'écart de niveau d'eau à la station hydrométrique la plus proche, fait abstraction de la largeur d'étalement de la crue qui peut être très différente entre celle de la station et celle du point de mesure. Par ailleurs, un repère de la crue de 1856, $Z=246,93$ m NGF, est présent à proximité du repère R2003_03, $Z = 247,14$ m NGF. Le repère estimé pour la crue de 2003 est supérieur à celui de la crue de 1856 alors que cette dernière présentait un débit supérieur de plus de $500 \text{ m}^3/\text{s}$. C'est pourquoi la valeur calculée par le modèle, $Z = 246,55$ m NGF, semble plus pertinente,
- les cotes des repères **R2003_20**, **R2003_21** sont probablement légèrement sous-estimées. Les valeurs de ces deux repères, comme toutes celles des repères situés à l'aval de Gilly-sur-Loire, correspondent aux valeurs relevées par la DREAL pendant la crue. Ces valeurs n'ont pas été corrigées pour le pic de crue du fait du faible déphasage entre l'heure des relevés et celui du pic.

2.4.2.3 Crue de novembre 2008

La crue de novembre 2008 de la Loire a atteint sur le secteur d'étude des débits de pointe comparables à ceux de la crue de décembre 2003. Bien que comptant moins de repères jugés fiables, elle permet de bien vérifier le calage des modèles sur des secteurs ne comprenant pas de repères en 2003.

La Figure 14 et la Figure 15 présentent respectivement, pour le modèle amont et le modèle aval, les lignes d'eau calculées de la crue de novembre 2008 ainsi que les repères de crue retenus.

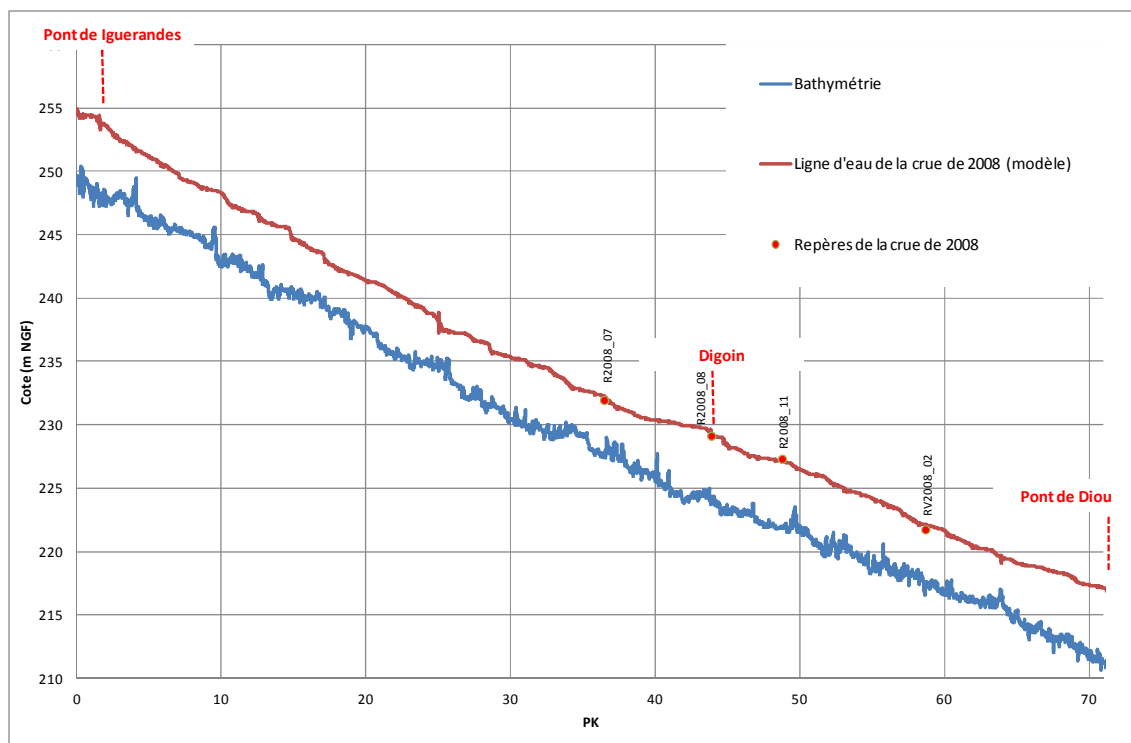


Figure 14 : Ligne d'eau maximale calculée de la crue de novembre 2008 et repères de crue – modèle amont

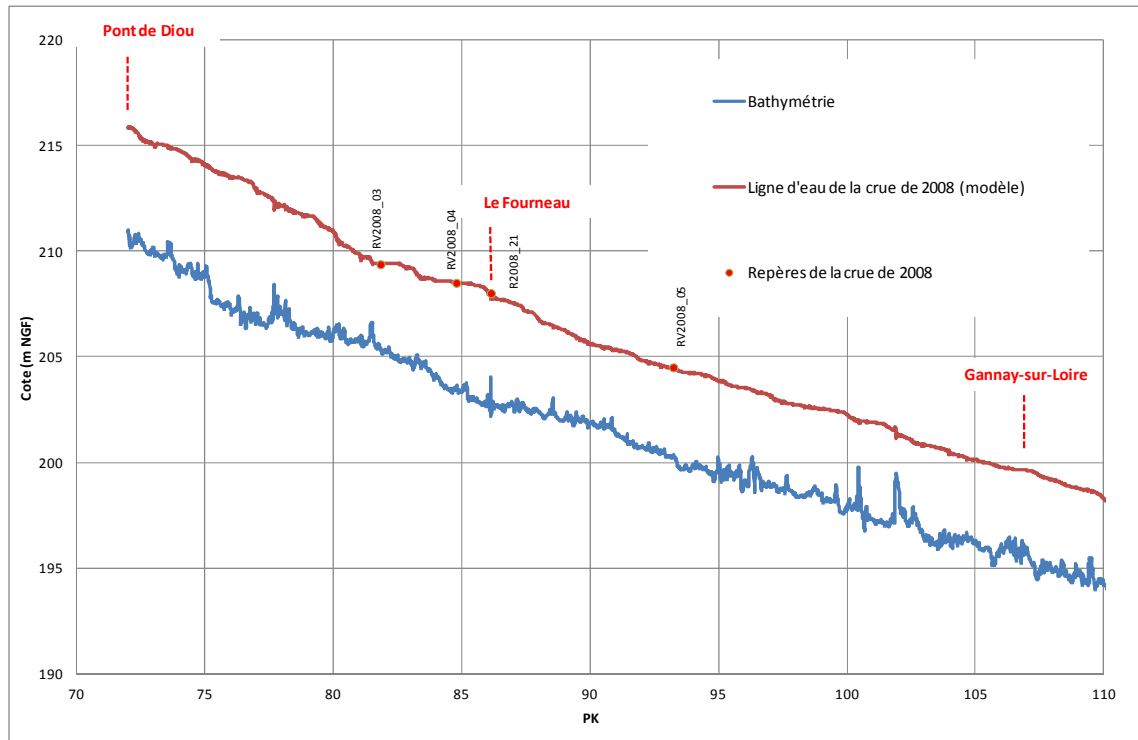


Figure 15 : Ligne d'eau calculée maximale de la crue de novembre 2008 et repères de crue – modèle aval

L'ensemble des cotes calculées par le modèle sont situées à ± 25 cm des valeurs observées pour la crue de novembre 2008.

Le calage est de ce fait considéré satisfaisant pour les deux modèles, amont et aval, ainsi que pour les deux crues de calage.

2.4.2.4 Crue de novembre 2010

Cette crue, bien moins importante que les deux autres et de période l'ordre de 2 ans, est réputée faiblement débordante et vise à analyser le comportement du modèle pour des petites crues.

La Figure 16 et la Figure 17 présentent respectivement, pour le modèle amont et le modèle aval, les lignes d'eau calculées de la crue de novembre 2010 ainsi que les repères de crue retenus.

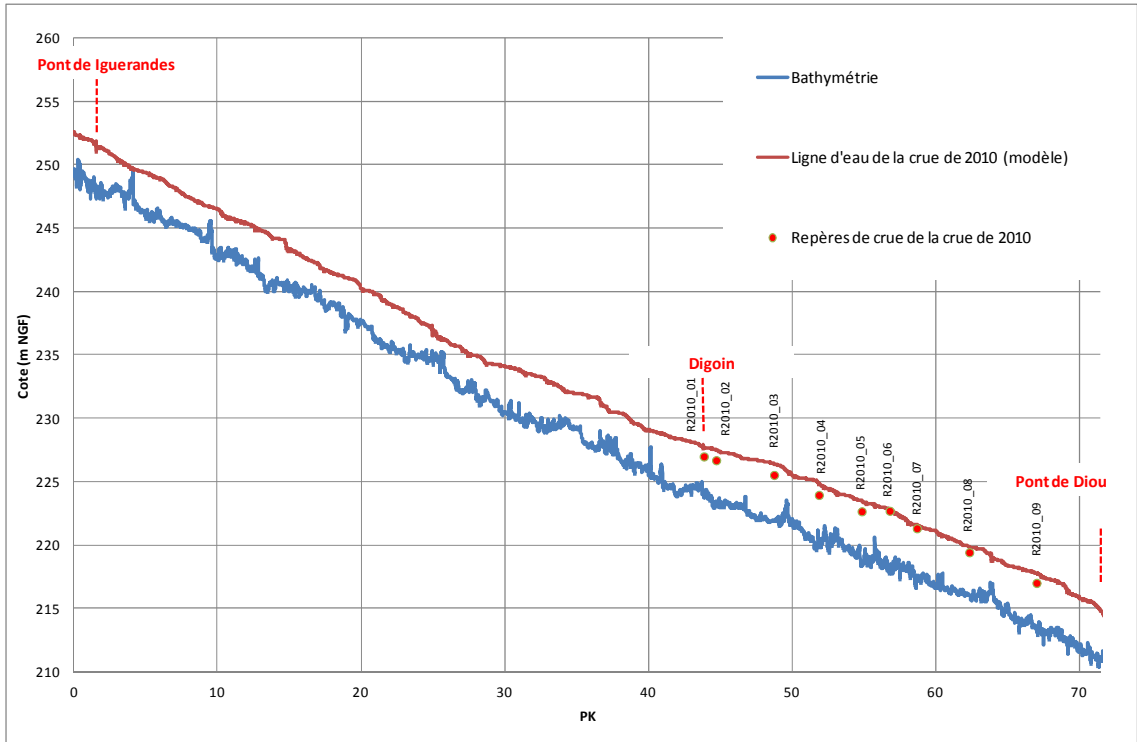


Figure 16 : Ligne d'eau maximale calculée de la crue de novembre 2010 et repères de crue – modèle amont

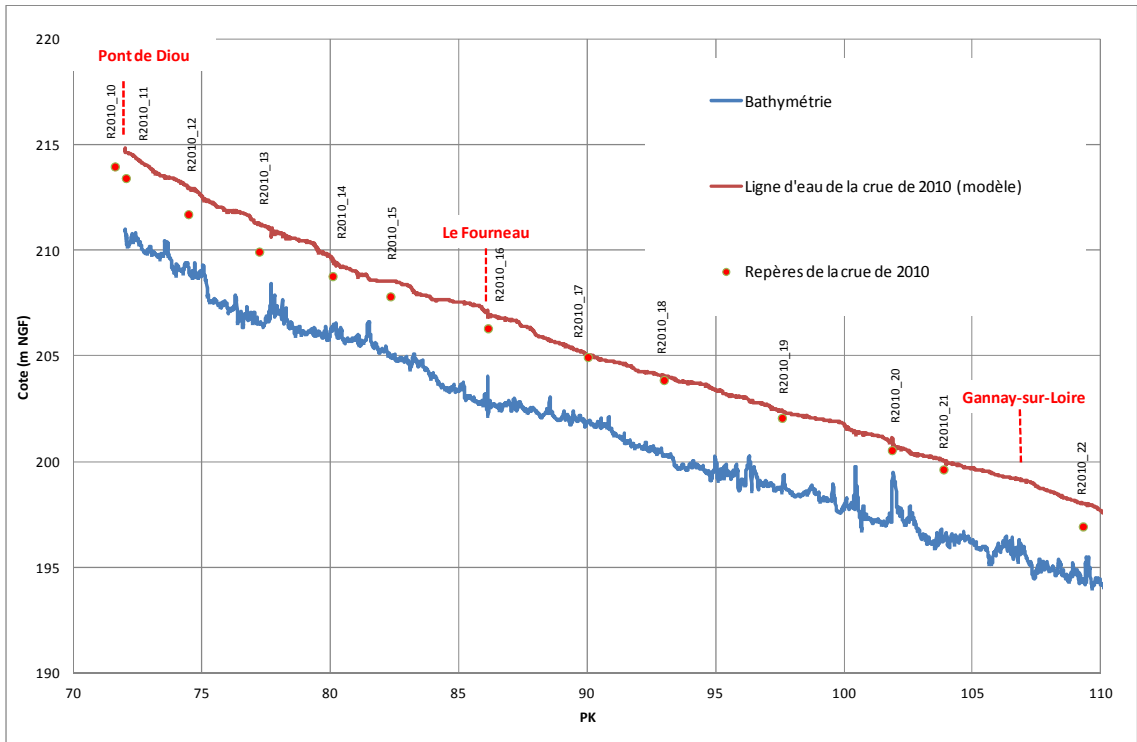


Figure 17 : Ligne d'eau calculée maximale de la crue de novembre 2010 et repères de crue – modèle aval

On constate, de manière générale, un écart important d'en moyenne 50 cm supérieur entre la ligne d'eau maximale calculée et les repères de crue. Sur certains repères cet écart peut probablement être réduit de 10 à 20 cm puisque les repères levés par la DREAL n'ont pas été mesurés exactement au pic de crue et conservés tels quels pour le calage.

Pour la modélisation hydraulique bidimensionnelle mise en œuvre dans le cadre de la présente étude, le fond du lit mineur est défini par interpolation de la bathymétrie entre deux profils en travers. Ces derniers étant espacés d'1 km en moyenne, la représentation du lit mineur est de ce fait entachée d'une incertitude bien plus grande que pour la représentation du lit majeur.

Si ces incertitudes relatives à la définition du lit mineur ont une faible incidence sur les crues courantes (type décembre 2003 et novembre 2008 qui ont pu faire l'objet d'un calage sans difficultés), elles revêtent une incidence accrue pour les crues fréquentes faiblement débordantes comme celle de novembre 2010 dont la période de retour a été estimée de l'ordre de 2 ans.

De ce fait, le modèle répond bien aux objectifs de la mission qui est d'étudier les crues courantes à fréquentes (périodes de retour de 10 à 100 ans) mais peut être considéré comme moins pertinent pour des crues fréquentes de la Loire (périodes de retour 2 à 5 ans). Cette situation est extrêmement classique pour les modélisations hydrauliques.

Pour mieux étudier les crues fréquentes, donc non débordantes, il serait nécessaire :

- de disposer de levés bathymétriques plus denses pour une modélisation hydraulique 2D,
- ou de mettre en œuvre une modélisation 1D, qui pourrait aisément être réalisée sur la base des profils en travers existants mais qui apporterait moins d'information qu'une modélisation 2D (notamment sur la répartition des vitesses et des hauteurs en lit majeur).

2.4.3 CARTOGRAPHIE RELATIVE AU CALAGE DU MODELE HYDRAULIQUE

La cartographie en **annexe 3** présente pour chacune des trois crues de calage :

- les repères de crue retenus,
- la cote d'eau maximale calculée au droit des repères,
- l'écart cote calculée - cote observée,
- l'enveloppe de zone inondable.

L'enveloppe calculée de la crue de novembre 2008 est cohérente avec l'enveloppe de zone inondée tracée à partir des témoignages des communes dans le cadre du retour d'expérience de la crue [1]³ réalisé par l'Etablissement Public Loire.

Sur la base de ce calage, d'autres crues de la Loire ont été simulées (cf. paragraphe 3.1).

La cartographie en **annexe 4** présente les enveloppes de zone inondable des ces crues au 1/250 000 sur fond de plan SCAN25 de l'IGN.

³ Les numéros entre crochets [X] renvoient à la bibliographie en annexe 1.

3 CARTOGRAPHIE DE L'ALEA

3.1 PREAMBULE

Une fois calés, les modèles hydrauliques sont exploités pour 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,
- **Simulation 5** : Crue de type 1846 (crue de référence)

La crue de 1846, plus forte crue connue et de période de retour supérieure à 100 ans, est choisie comme crue de référence.

A la demande du Maître d'Ouvrage, **une sixième simulation** a été réalisée par la suite dans le but de réaliser une cartographie des hauteurs d'eau pour des débits de pointe de la Loire de 1 250 m³/s à la station de Digoin et 1 400 m³/s à celle de Gilly-sur-Loire.

3.2 TABLEAU DE SYNTHÈSE DES DÉBITS ET HAUTEURS AU DROIT DES STATIONS HYDROMÉTRIQUES

Pour chaque scénario de crue simulée, le tableau ci-dessous synthétise les débits de pointe et cotes maximales atteintes donnés par le modèle au droit des stations hydrométriques présentes sur le secteur d'étude. La hauteur d'eau à l'échelle correspondante est également indiquée.

Lieu : Station de Digoïn									
Crue :	Type 2010	Type 2003	Type 2008	Simulation 1	Simulation 2	Simulation 3	Simulation 4	Simulation 6	Type 1846
Débit (m ³ /s) :	615	1 815	1 800	2 550	3 230	3 520	3 950	1 250	4 690
Zmax (m NGF) :	227,7	229,25	229,21	229,9	230,45	230,64	230,9	228,55	231,3
H échelle (m) :	3,51	5,06	5,02	5,71	6,26	6,45	6,71	4,36	7,11
Lieu : Station de Gilly-sur-Loire									
Crue :	Type 2010	Type 2003	Type 2008	Simulation 1	Simulation 2	Simulation 3	Simulation 4	Simulation 6	Type 1846
Débit (m ³ /s) :	845	2 270	1 920	2 580	3 270	3 540	3 970	1 400	5 300
Zmax (m NGF) :	214,55	216,55	216,3	216,9	217,80	217,95	218,2	215,52	219,3
H échelle (m) :	4,94	6,94	6,69	7,29	8,19	8,34	8,59	5,91	9,69
Lieu : Station du Fourneau									
Crue :	Type 2010	Type 2003	Type 2008	Simulation 1	Simulation 2	Simulation 3	Simulation 4	Simulation 6	Type 1846
Débit (m ³ /s) :	860	1 975	1 970	2 560	3 240	3 530	3 930	1 400	5 500
Zmax (m NGF) :	206,65	207,95	207,95	208,2	208,45	208,51	208,61	207,55	209
H échelle (m) :	2,35	3,65	3,65	3,9	4,15	4,21	4,31	3,25	4,7

3.3 CARTOGRAPHIE

La cartographie comprend :

- des cartes hauteurs d'eau (simulations 1, 2, 3, 4, 6, crues de 2003, de 2008, crue de référence),
- des cartes des vitesses d'écoulement (crue de référence),
- des cartes d'aléa (crue de référence).

Pour chacune des communes concernées par l'étude, les cartes sont réalisées à l'aide du logiciel MAPINFO sur fond de plan cadastral au 1/5°000 au format A0.

Remarques :

- La cartographie de la zone inondable sur les affluents correspond à la remontée de la crue de la Loire et ne préjuge pas d'une crue de l'affluent,
- Pour la simulation 4 et pour la crue de référence (crue type 1846), les hauteurs d'eau, les vitesses et l'aléa hydraulique des zones protégées par des digues sont également représentés mais différenciés par un hachurage. Pour ce faire, une simulation supplémentaire a été menée avec effacement des digues concernées. La cartographie des secteurs impactés (en amont et en aval des digues) a été réalisée en considérant les caractéristiques hydrauliques les plus pénalisantes données par les deux simulations (avec et sans effacement de digue).

3.3.1 CARTOGRAPHIE DES HAUTEURS D'EAU

Les cartes des hauteurs d'eau sont établies en considérant les classes suivantes :

- $H < 0,5$ m,
- $0,5 \text{ m} < H < 1\text{m}$,
- $H > 1$ m.

Pour la crue de référence, les isocotes sont également représentées tous les 0,25 m NGF.

3.3.2 CARTOGRAPHIE DES VITESSES

Pour l'évènement de référence, les cartes des vitesses d'écoulement sont établies en considérant les classes suivantes :

Les classes de vitesses sont :

- $V < 0,2$ m/s,
- $0,2 \text{ m/s} < V < 0,5 \text{ m/s}$,
- $V > 0,5 \text{ m/s}$.

Les isocotes sont également représentées tous les 0,25 m NGF.

3.3.3 CARTOGRAPHIE DE L'ALEA

L'aléa est déterminé, pour l'évènement de référence, par croisement des classes d'hauteurs d'eau et celles des vitesses selon la grille définie ci-après :

GRILLE D'ALEA

	Vitesse faible	Vitesse moyenne	Vitesse forte
Hauteur < 0,5 m	Faible	Moyen	Fort
0,5 m < Hauteur < 1 m	Moyen	Moyen	Fort
Hauteur > 1 m	Fort	Fort	Très fort

Figure 18 : Grille d'aléa

Les isocotes sont également représentées tous les 0,25 m NGF.

ANNEXE 1 : BIBLIOGRAPHIE

[1] « Retour d'expérience de la crue de la Loire et de l'Allier de début novembre 2008 », bureau HYDRATEC, octobre 2009, pour l'Etablissement Public Loire

ANNEXE 2 : REPERES DE CRUE ET VALEURS CALCULEES

Crue de décembre 2003

Identifiant du repère	PK (km)	Cote relevée par la DREAL à un instant t de la crue (m NGF)	Cote calculée par la DREAL au pic de crue (m NGF)	Cote maximale mesurée par une station (m NGF)	Repères levés lors des visites de terrain (m NGF)	Cote repère retenue pour le calage du modèle (m NGF)	Cote calculée par le modèle (m NGF)	Δ = cote calculée - cote repère (m)
R2003_01	1,6	252,85	253,68			253,68	253,70	0,02
R2003_02	4,3	251,11	251,94			251,94	251,60	-0,34
R2003_03	12,55	246,31	247,14			247,14	246,55	-0,59
R2003_04	14,8	244,67	245,50			245,50	245,18	-0,32
R2003_05	17,35	242,77	Ecarté				242,80	
R2003_06	25	237,77	237,94			237,94	238,00	0,06
R2003_07	30,5	234,99	235,16			235,16	235,16	0,00
R2003_08	36,45	231,75	231,92			231,92	232,20	0,28
R2003_09	43,86	228,90	229,08	229,07		229,07	229,25	0,18
R2003_11	44,72	228,55	228,73			228,73	228,75	0,02
R2003_12	48,75	227,11	227,29			227,29	227,30	0,01
R2003_13	54,85	224,24	224,43			224,43	224,40	-0,03
R2003_14	57,45	222,65	Ecarté				223,03	
R2003_15	65,2	219,74	Ecarté				219,85	
R2003_16	71,6	216,32	216,52	216,50		216,50	216,55	0,05
R2003_18	72,03	215,92	215,92			215,92	215,93	0,01
R2003_19	72,08	215,81	215,81			215,81	215,93	0,12
R2003_20	74,46	214,14	214,14			214,14	214,40	0,26
R2003_21	77,22	212,48	212,48			212,48	212,80	0,32
R2003_22	80,08	210,75	210,75			210,75	210,80	0,05
R2003_23	82,33	209,43	209,43			209,43	209,43	0,00
R2003_25	86,13	208,08	208,08	207,94		207,94	207,95	0,01
R2003_39	86,88	207,61	207,61			207,61	207,65	0,04
R2003_26	93,28	204,08	204,08			204,08	204,08	0,00
R2003_27	97,58	202,96	202,96			202,96	202,92	-0,04
R2003_28	101,86	201,47	201,47			201,47	201,55	0,08
R2003_29	103,86	200,58	200,58			200,58	200,59	0,01
R2003_30	107,4	199,50	199,50			199,50	199,70	0,20
R2003_31	109,3	198,63	198,63			198,63	198,70	0,07

Crue de novembre 2008

Identifiant du repère	PK (km)	Cote relevée par la DREAL à un instant t de la crue (m NGF)	Cote calculée par la DREAL au pic de crue (m NGF)	Cote maximale mesurée par une station (m NGF)	Repères levés lors des visites de terrain (m NGF)	Cote repère retenue pour le calage du modèle (m NGF)	Cote calculée par le modèle (m NGF)	Δ = cote calculée - cote repère (m)
R2008_01	1,6	253,16	Ecarté				253,75	
R2008_02	4,3	251,42	Ecarté				251,60	
R2008_03	12,55	247,39	Ecarté				246,55	
R2008_04	14,8	245,01	Ecarté				245,10	
R2008_05	17,35	242,89	Ecarté				242,85	
R2008_06	21,85	241,30	Ecarté				240,45	
R2008_07	36,45	231,96	231,96			231,96	232,00	0,04
R2008_08	43,86	229,10	229,12	229,14		229,14	229,21	0,07
R2008_11	48,75	227,10	227,32			227,32	227,15	-0,17
R2008_12	54,85	224,22	Ecarté				224,25	
RV2008_02	58,66				221,75	221,75	222,00	0,25
R2008_13	71,6	215,13	216,34	216,32	216,34	216,32	216,32	0
R2008_16	72,03	214,78	Ecarté				215,84	
R2008_15	72,08	214,97	Ecarté				215,84	
R2008_17	74,46	213,06	Ecarté				214,33	
R2008_18	77,22	211,29	Ecarté				212,77	
R2008_19	80,08	209,77	Ecarté				210,75	
RV2008_03	81,83				209,00	209,00	209,00	0
R2008_20	82,33	208,72	Ecarté				209,40	
RV2008_04	84,78				208,50	208,50	208,50	0
R2008_21	86,13	207,17	Ecarté	208,01		208,01	207,95	-0,06
R2008_35	90,02	205,67	Ecarté				205,60	
R2008_23	92,98	204,45	Ecarté				204,50	
RV2008_05	93,23				204,50	204,50	204,45	-0,05
R2008_24	93,28	204,23	Ecarté				204,05	
R2008_25	97,58	203,05	Ecarté				202,88	
R2008_26	101,86	201,54	Ecarté				201,55	
R2008_27	107,4	199,50	Ecarté				199,64	
R2008_28	109,3	198,41	Ecarté				198,64	

Crue de novembre 2010

Identifiant du repère	PK (km)	Cote relevée par la DREAL à un instant t de la crue (m NGF)	Cote calculée par la DREAL au pic de crue (m NGF)	Cote maximale mesurée par une station (m NGF)	Repères levés lors des visites de terrain (m NGF)	Cote repère retenue pour le calage du modèle (m NGF)	Cote calculée par le modèle (m NGF)	Δ = cote calculée - cote repère (m)
R2010_01	43,86	226,70	226,98	226,98		226,98	227,70	0,72
R2010_02	44,72	226,41	226,68			226,68	227,45	0,77
R2010_03	48,75	225,27	225,52			225,52	226,47	0,95
R2010_04	51,87	223,71	223,94			223,94	224,95	1,01
R2010_05	54,85	222,44	222,65			222,65	223,50	0,85
R2010_06	56,8	222,50	222,69			222,69	222,85	0,16
R2010_07	58,69	221,13	221,31			221,31	221,60	0,29
R2010_08	62,34	219,27	219,42			219,42	219,85	0,43
R2010_09	67,02	216,88	217,00			217,00	217,75	0,75
R2010_10	71,6	213,88	213,97	213,97		213,97	214,55	0,58
R2010_11	72,03	213,42	213,42			213,42	214,65	1,23
R2010_12	74,46	211,71	211,71			211,71	212,88	1,17
R2010_13	77,22	209,94	209,94			209,94	211,26	1,32
R2010_14	80,08	208,78	208,78			208,78	209,53	0,75
R2010_15	82,33	207,82	207,82			207,82	208,50	0,68
R2010_16	86,13	206,31	206,31			206,31	206,95	0,64
R2010_17	90,02	204,95	204,95			204,95	205,00	0,05
R2010_18	92,98	203,86	203,86			203,86	204,08	0,22
R2010_19	97,58	202,07	202,07			202,07	202,40	0,33
R2010_20	101,86	200,54	200,54			200,54	201,00	0,46
R2010_21	103,87	199,63	199,63			199,63	199,95	0,32
R2010_22	109,3	196,93	196,93			196,93	197,8	0,87

ANNEXE 3 : CARTOGRAPHIE RELATIVE AU CALAGE DES MODELES HYDRAULIQUES

ANNEXE 4 : CARTOGRAPHIE DE LA ZONE INONDABLE DES CRUES SIMULEES