

Figure 3-9 : Liaison gravière actuelle – ancienne gravière (2 \varnothing 1500mm sur L13)

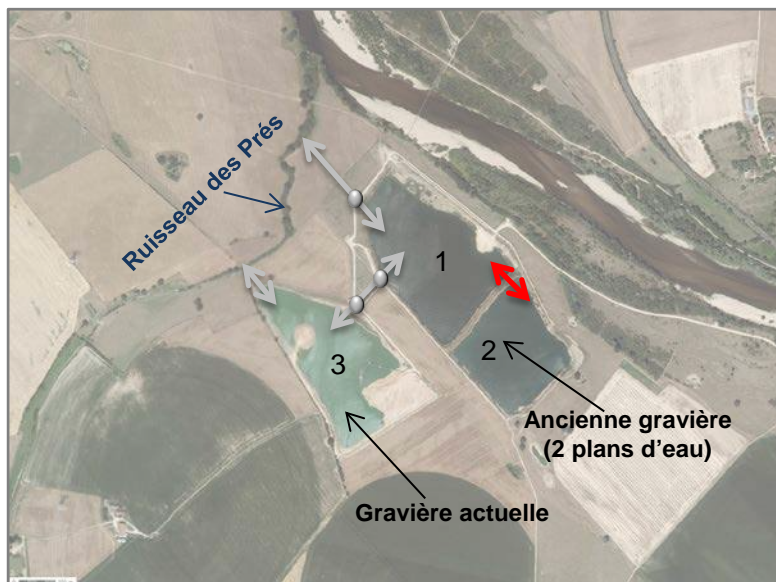


Figure 3-10 : Liaison entre les 2 plans d'eau de l'ancienne gravière (déversoir L12)

3.2 CONSTRUCTION DU MODELE HYDRAULIQUE DE SIMULATION

3.2.1 Présentation du logiciel HydraRiv

HydraRiv est un progiciel de modélisation hydrologique, hydraulique et de la qualité des cours d'eau et des espaces fluviaux.

Il est conçu pour intégrer dans un même modèle des schémas de représentation contrastés, tels que la schématisation filaire, les casiers et les maillages bidimensionnels. Cette souplesse permet d'adapter au mieux la modélisation à la spécificité des configurations rencontrées dans le domaine fluvial et aux objectifs de modélisation poursuivis.

HydraRiv est une application totalement autonome, gérant tout à la fois la génération et l'édition des modèles via une interface graphique dédiée, le pilotage des calculs et l'exploitation des résultats. Elle est organisée autour d'un module de pilotage développé en VB6 et d'une base de données spécifique, interne à l'application : aucune licence externe n'est requise.

Le noyau de calcul est constitué par le logiciel HYDRA, développé et exploité par Hydratec depuis près de 30 ans. Ce noyau englobe des algorithmes généraux intéressant les écoulements superficiels ; il est utilisé dans plusieurs domaines d'intervention, dont l'hydraulique fluviale. La chaîne de simulation HYDRA est totalement transparente à l'utilisateur car elle est pilotée par l'interface d'HydraRiv.

HydraRiv, développé par hydratec, est commercialisé ; les établissements tels que la DREAL Centre, l'Entente Oise Aisne, le Service de Prévision des crues Oise-Aisne (SNS) ou le Syndicat mixte de l'Orge Aval (SIVOA), ont acquis ce logiciel. Des informations complémentaires sur le logiciel HydraRiv sont accessibles sur le site internet : www.hydratec-software.com.

HydraRiv a été conçu dès le départ comme un outil de simulation dédié au domaine fluvial. La formulation sous-jacente reflète cette spécificité.

- Modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique fait partie intégrante de la chaîne de modélisation disponible sous HydraRiv, proposant des formulations spécifiques adaptées à la diversité des bassins versants étudiés.

- Modélisation hydraulique

Les très nombreuses observations disponibles sur les écoulements de crues dans les vallées inondables témoignent de la grande complexité des phénomènes hydrauliques à l'échelle locale : chenaux préférentiels d'écoulement induits par la micro-topographie, zones d'accumulation, lois d'échanges conditionnées par la topographie, mais aussi les nombreux obstacles implantés dans le lit majeur : routes, voies SNCF, levées de terres, remblaiements, gravières, etc.

Ces phénomènes ne peuvent être appréhendés que par une démarche simplificatrice mais cependant cohérente par rapport aux objectifs assignés au modèle et aussi à la précision des données disponibles : une schématisation bidimensionnelle convient si on s'intéresse à l'impact d'un ouvrage sur les vitesses locales et les surélévations des niveaux d'eau des zones avoisinantes, elle devient plutôt inappropriée dans le cas d'une étude de la propagation sur de longues distances ; dans ce cas, une modélisation multifilaire s'avère beaucoup plus justifiée.

Par ailleurs, même pour une étude locale de zone inondable, une modélisation bidimensionnelle doit souvent intégrer des représentations filaires d'écoulements préférentiels le long de thalwegs présentant une topographie locale peu accidentée.

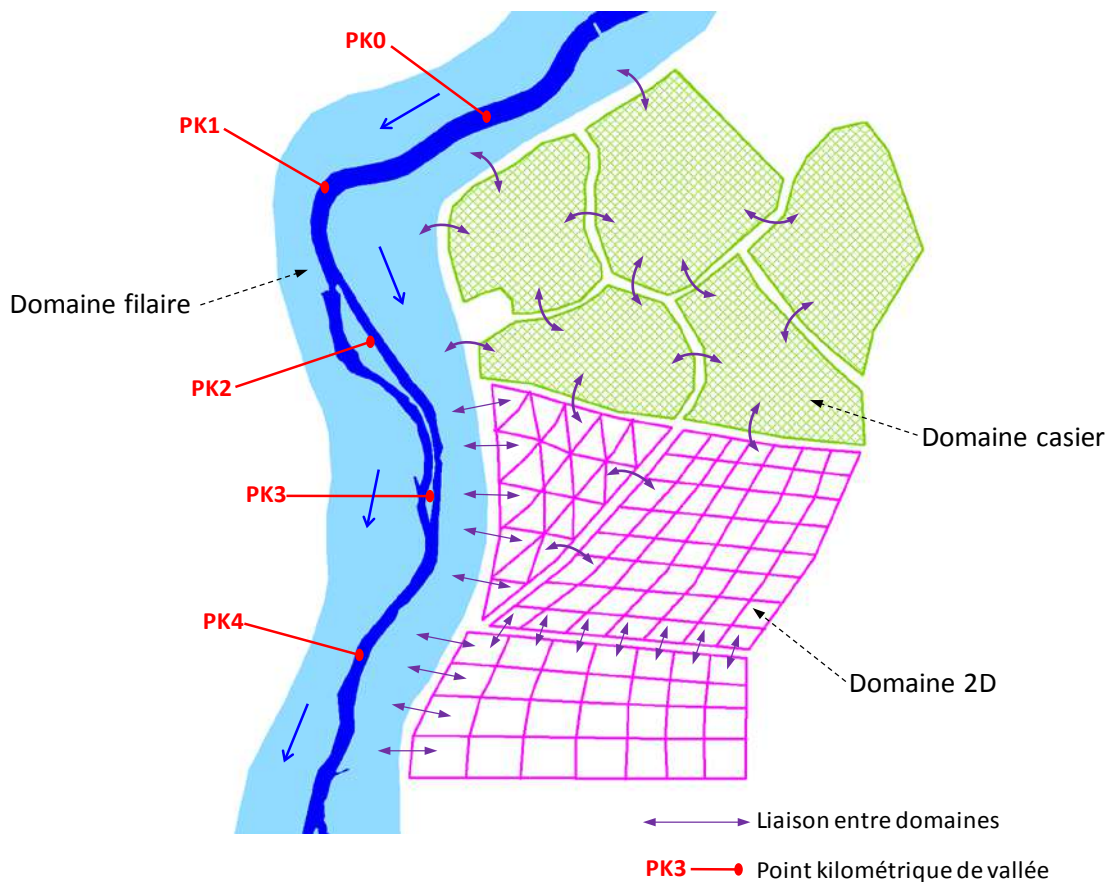


Figure 3-11 : Schémas de modélisation d'HydraRiv

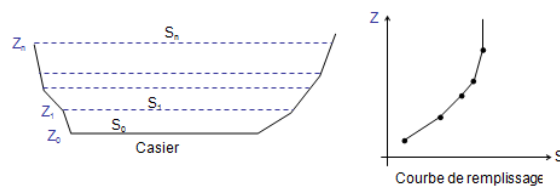
Pour concilier toutes ces exigences, HydraRiv offre quatre représentations d'écoulement adaptées aux applications fluviales :

- la **schématisation filaire** repose sur la résolution des équations de Barré de Saint Venant à lits composés, avec des lois de partage entre les différents lits qui sont conçues pour reproduire au mieux les cotes d'eau dans le lit mineur, les temps de propagation et la déformation des ondes de crue influencées par l'action de laminage joué par le lit majeur. A chaque nœud de calcul sont associées plusieurs variables : la cote d'eau dans la section composée et les débits longitudinaux dans chaque lit. Outre les équations des tronçons de vallée, HydraRiv propose un large choix de singularités spécialement adaptées aux types d'ouvrages et d'obstacles rencontrés dans les vallées fluviales.
- la **modélisation bidimensionnelle** repose sur la résolution des équations de Barré de Saint Venant à deux dimensions à l'aide d'une méthode de volumes finis : les inconnues sont la cote d'eau et la composante de la vitesse dans chaque direction, calculées au centroïde de la maille. Le schéma numérique de résolution à chaque pas de temps repose sur une méthode originale en deux étapes :
 - dans l'étape 1 on calcule la cote et les débits d'échange à travers les facettes de chaque maille à l'aide de l'équation de continuité, en supposant connue la direction locale du champ de vitesse,

- dans l'étape 2 les composantes du vecteur vitesse sont calculées au centroïde de chaque maille par intégration locale des équations de quantité de mouvement.

Cette méthode intègre tous les termes intervenant dans les équations de Barré de Saint Venant, y compris les termes convectifs qui peuvent influencer les cotes des lignes d'eau dans les zones à fort gradient de vitesse, ainsi que la structure du champ de vitesse.

- La **modélisation en casiers** constitue une simplification de la modélisation du domaine bidimensionnel : chaque casier est assimilé à un plan d'eau local dont le niveau varie en fonction de lois d'échange avec les autres entités surfaciques via des liaisons latérales. Dans cette formulation, l'inconnue est la cote d'eau du casier, les débits d'échange sont fonction de la nature de la liaison et de la différence des cotes d'eau avec les casiers adjacents. Les casiers sont définis par une loi de remplissage : surface en fonction de la cote altimétrique.



- Enfin la **modélisation « ZUI »** prend en compte les axes préférentiels d'écoulement joués par les rues dans les modélisations de zones urbaines inondables.

3.2.2 Présentation des modèles existants sur le secteur de Nevers

Plusieurs études ont été conduites sur le secteur de Nevers pour caractériser les crues de la Loire. Les principales études permettant de qualifier le risque d'inondation sont :

- L'étude de la propagation des crues et des risques d'inondation en Loire moyenne conduite par l'équipe pluridisciplinaire du plan Loire Grandeur Nature entre 1999 et 2003.
Elle est à l'origine d'un modèle d'écoulement des eaux de la Loire entre Nevers et la confluence de la Maine intégrant la topographie du lit et des vals de 1998. Son architecture repose entre les digues sur un modèle filaire (1D) construit sur des profils en travers relevés environ tous les kilomètres et, dans les vals, sur un modèle à casiers combinant des surfaces d'environ 2 km². Cet outil a été exploité pour des débits de crues de période de retour de 50 ans à 500 ans, en prenant pour hypothèse la résistance des digues jusqu'à leur surverse.
- L'Etude Globale du Risque Inondation sur l'Agglomération de Nevers (EGRIAN) a été menée entre 2008 et 2013 pour le compte de l'Agglomération de Nevers (ADN). Elle avait pour objectif de proposer une stratégie globale et cohérente de réduction du risque d'inondation.
Cette stratégie repose en particulier sur l'évaluation de l'aléa qui a été réalisée à l'aide de deux modèles de simulation numérique de la propagation des crues de la Loire et de l'Allier :
 - le modèle global ADN2008 qui place l'Agglomération de Nevers dans un contexte hydraulique étendu depuis Decize et Moulins à l'amont jusqu'à Saint-Satur à l'aval.

- le modèle local bidimensionnel de l'agglomération qui affine l'étude à l'échelle du quartier de ville.

La modélisation hydraulique a permis :

- en phase I, d'obtenir un diagnostic global de l'aléa inondation dans la disposition actuelle du système d'endiguement, ainsi qu'en cas de submersion des vals à la suite de rupture de digues.
- en phase II, de proposer et d'étudier des aménagements visant à réduire cet aléa d'inondation.

3.2.3 Modèle ADN2008

C'est le modèle global ADN2008, issu de l'étude EGRIAN, qui est utilisé dans la présente étude. Ce modèle de la Loire, de l'Allier et de la Nièvre a été construit grâce au logiciel HydraRiv développé par hydratec. Il s'étend de Decize sur la Loire et de Moulins sur l'Allier, à l'amont, jusqu'à Saint-Satur, à l'aval.

Le périmètre d'étude modélisé comprend environ 200 km de cours d'eau, décomposé comme suit :

- 38 km de Loire en amont du Bec d'Allier,
- 55 km de Loire en aval du Bec d'Allier,
- 60 km d'Allier,
- 10 km de Nièvre et son canal de dérivation,
- 39 km de ruisseaux dans les vals ou la plaine inondable.

L'architecture du modèle est présentée sur la figure en page suivante.

Un schéma mixte de modélisation a été choisi, comprenant :

- la schématisation « filaire » des lits mineurs ainsi que des lits majeurs de la Loire, de l'Allier et de la Nièvre à l'exception de leur zone de confluence au niveau d'Agglomération de Nevers,
- une schématisation « casiers » de l'Agglomération de Nevers et des vals de Loire situés en aval du Bec d'Allier,
- des singularités multiples représentant des ouvrages hydrauliques particuliers.

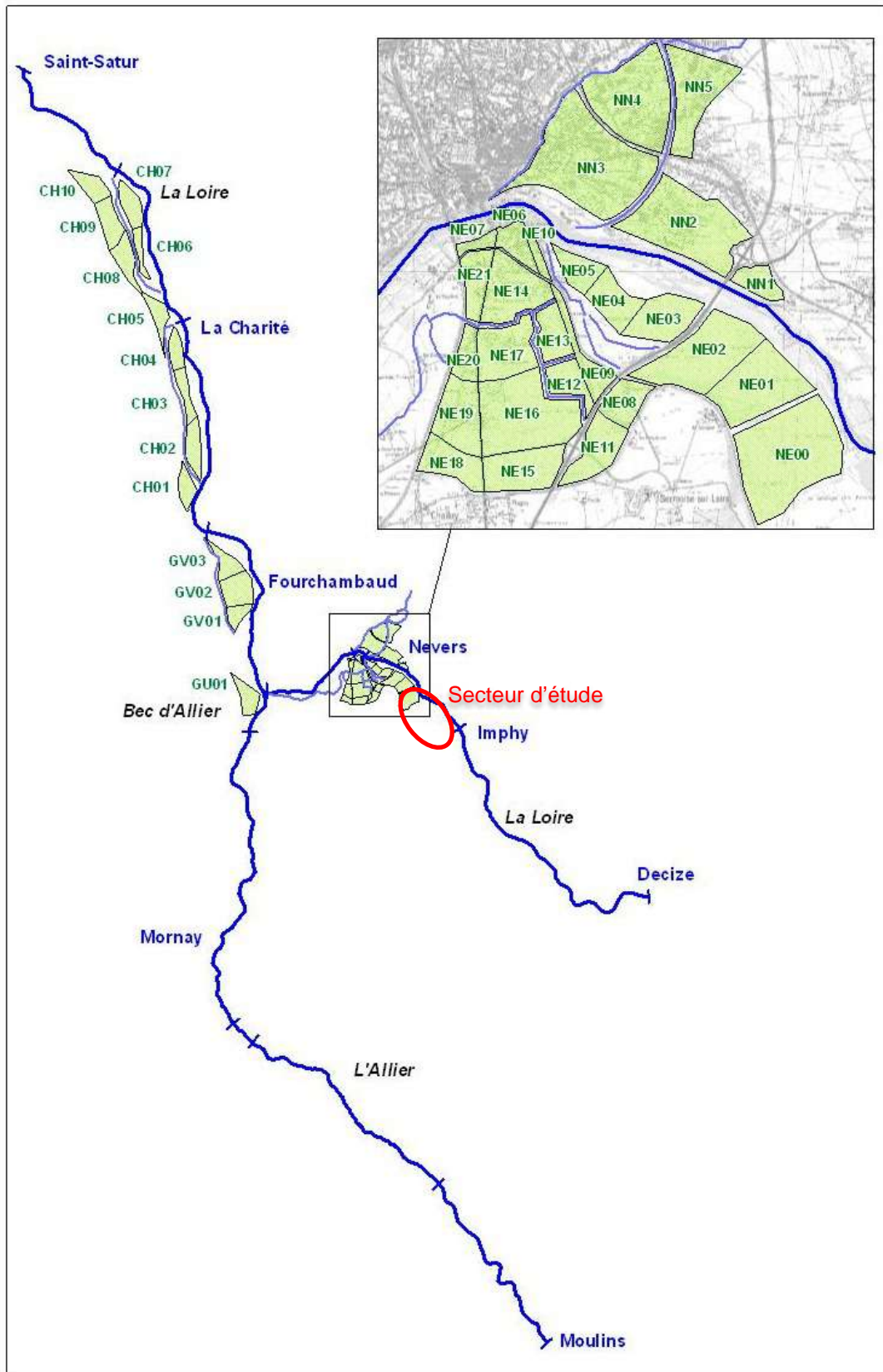


Figure 3-12 : Architecture du modèle ADN2008

3.2.4 Schématisation détaillée du secteur d'étude

Le secteur d'étude, situé dans le lit majeur en rive gauche de la Loire, est délimité à l'amont par la RD200, à l'Ouest par le canal latéral et à l'aval par le pré de Savigny.

Afin d'affiner le modèle ADN2008 sur ce secteur, une campagne de relevé topographique a été réalisée.

Le semi de points levé par le géomètre est présenté sur la figure suivante.

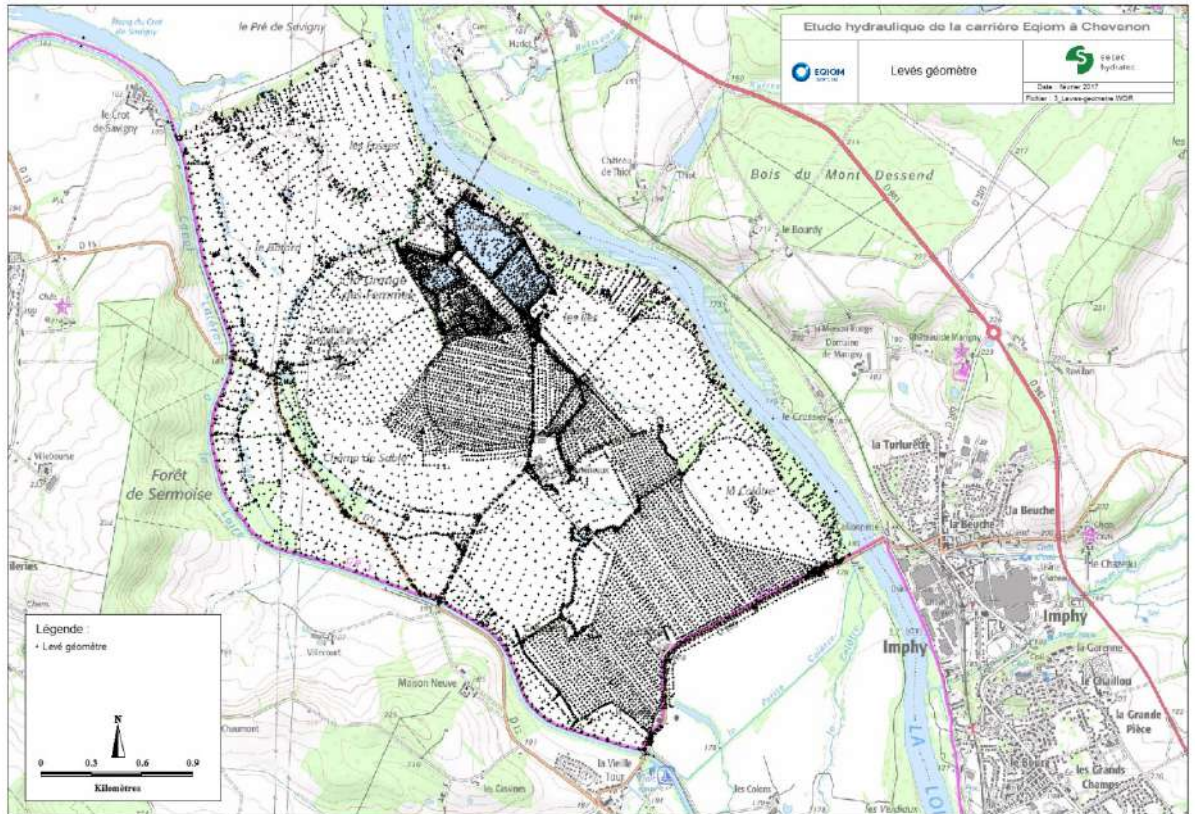


Figure 3-13 : Levés de points du géomètre sur le secteur d'étude

La topographie sur le secteur d'étude, issue de cette campagne de mesures, est présentée sur la figure suivante.

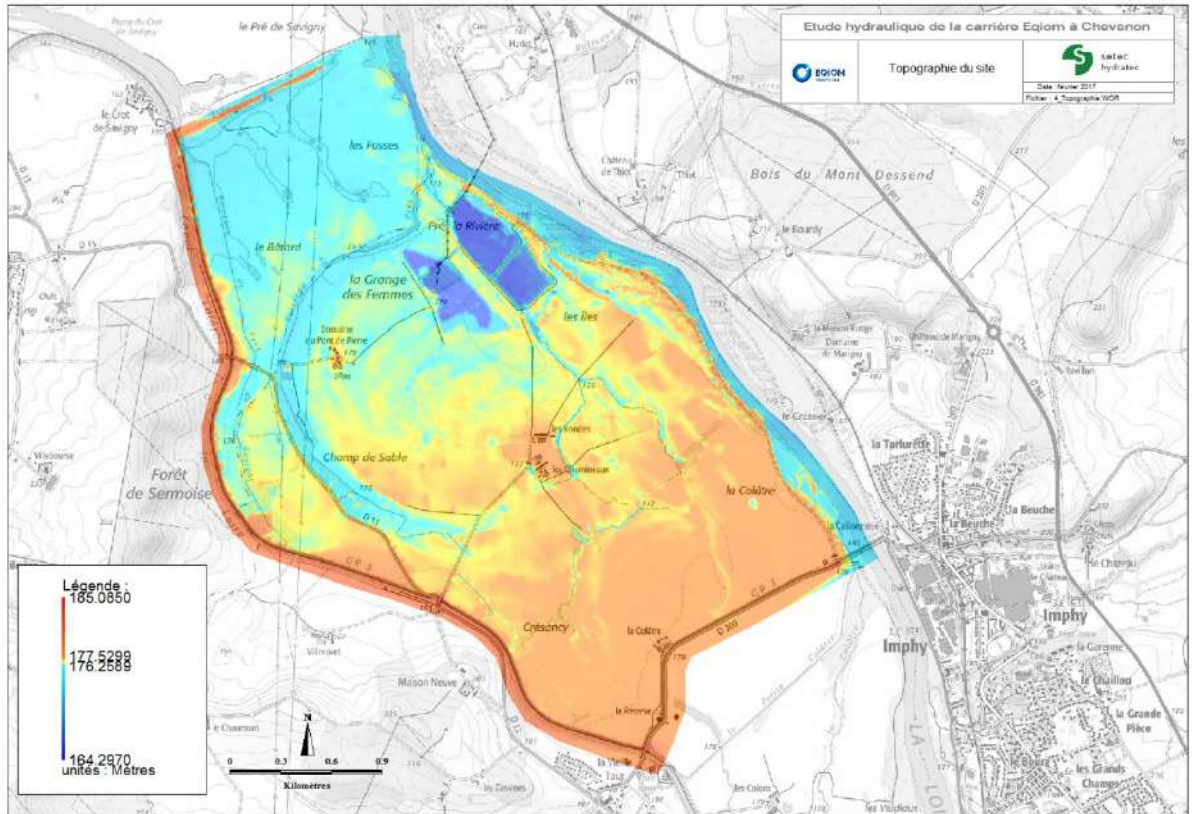


Figure 3-14 : Topographie du secteur d'étude

Grâce aux nouvelles données topographiques, le modèle ADN2008, à l'origine majoritairement filaire sur le secteur d'étude, a été modifié afin de décrire plus finement les écoulements et de mieux représenter les mécanismes d'inondation.

La schématisation filaire et le casier NE00 en rive gauche, ont été remplacés par 53 casiers, de surface moyenne de 17 ha. La surface totale couverte par les nouveaux casiers est de 810 ha.

Cette schématisation plus détaillée du secteur d'étude est adaptée pour représenter le site de la carrière en situation initiale comme en situation future.

De plus, en période de crue dans la situation actuelle, les gravières se remplissent grâce aux liaisons qu'elles possèdent avec le ruisseau des Prés à l'aval du site.

Afin d'assurer la bonne représentativité des mécanismes de remplissage des gravières, le ruisseau des Prés a été modélisé par un bief filaire. Ce bief filaire, d'un linéaire d'environ 3 800 m, est caractérisé par 11 profils en travers levés par le géomètre.

Les liaisons suivantes, observées sur le terrain, ont également été modélisées en situation actuelle :

- le seuil entre les deux plans d'eau de l'ancienne gravière (L12),
- le fossé entre le ruisseau des Prés et l'ancienne gravière (Lr1),
- les 2 buses de diamètre 1500mm présentes à l'exutoire de ce fossé dans la gravière (2 \varnothing 1500mm sur Lr1),
- le fossé entre le ruisseau des Prés et la gravière en cours d'exploitation (Lr3),
- le fossé entre l'ancienne gravière et la gravière en cours d'exploitation (L13),
- les 2 buses de diamètre 1500mm présentes à l'exutoire de ce fossé dans l'ancienne gravière (2 \varnothing 1500mm sur L13),
- les 2 buses de diamètre 1500mm présentes à l'exutoire de ce fossé dans la gravière en cours d'exploitation (2 \varnothing 1500mm sur L13).

Les paramètres caractéristiques de ces liaisons sont présentés dans les deux tableaux suivants.

Liaison	Cote seuil Zs mNGF	Largeur B m	Cote seuil Zs2 mNGF	Largeur B2 m	Longueur m	Strickler
Lr1	174.81	4	175.81	6	205	20
Lr3	174.52	4	175.52	6	65	25
L12	174.78	10	-	-	25	20
L13	174.40	4	175.40	6	125	20

Tableau 3-1 : Paramètres des liaisons de type fossé/seuil en situation actuelle

Liaison	Cote radier mNGF	Cote voute mNGF	Largeur m
2 \varnothing 1500mm sur Lr1	174.41	175.91	2.356
2 \varnothing 1500mm sur L13	174.40	175.90	2.356
2 \varnothing 1500mm sur L13	174.40	175.90	2.356

Tableau 3-2 : Paramètres des liaisons de type buse/orifice en situation actuelle

En prévision de l'éventuelle analyse des impacts cumulés des projets d'extension des carrières d'Eqiom et de Lafarge, 6 casiers supplémentaires ont été ajoutés en rive gauche de la Loire à l'amont de la RD200, sur le site du projet de carrière Lafarge. Cette schématisation permet de représenter l'état actuel et aurait pu servir à simuler l'état aménagé projeté par Lafarge.

Toutefois, l'analyse des impacts cumulés n'a finalement pas été menée suite à l'AP de refus du projet Lafarge en date du 29/08/2014. Le modèle hydraulique avait été quant à lui construit avant cette date.

La structure du modèle sur le secteur d'étude, après les modifications explicitées précédemment, est présentée sur la figure en page suivante.

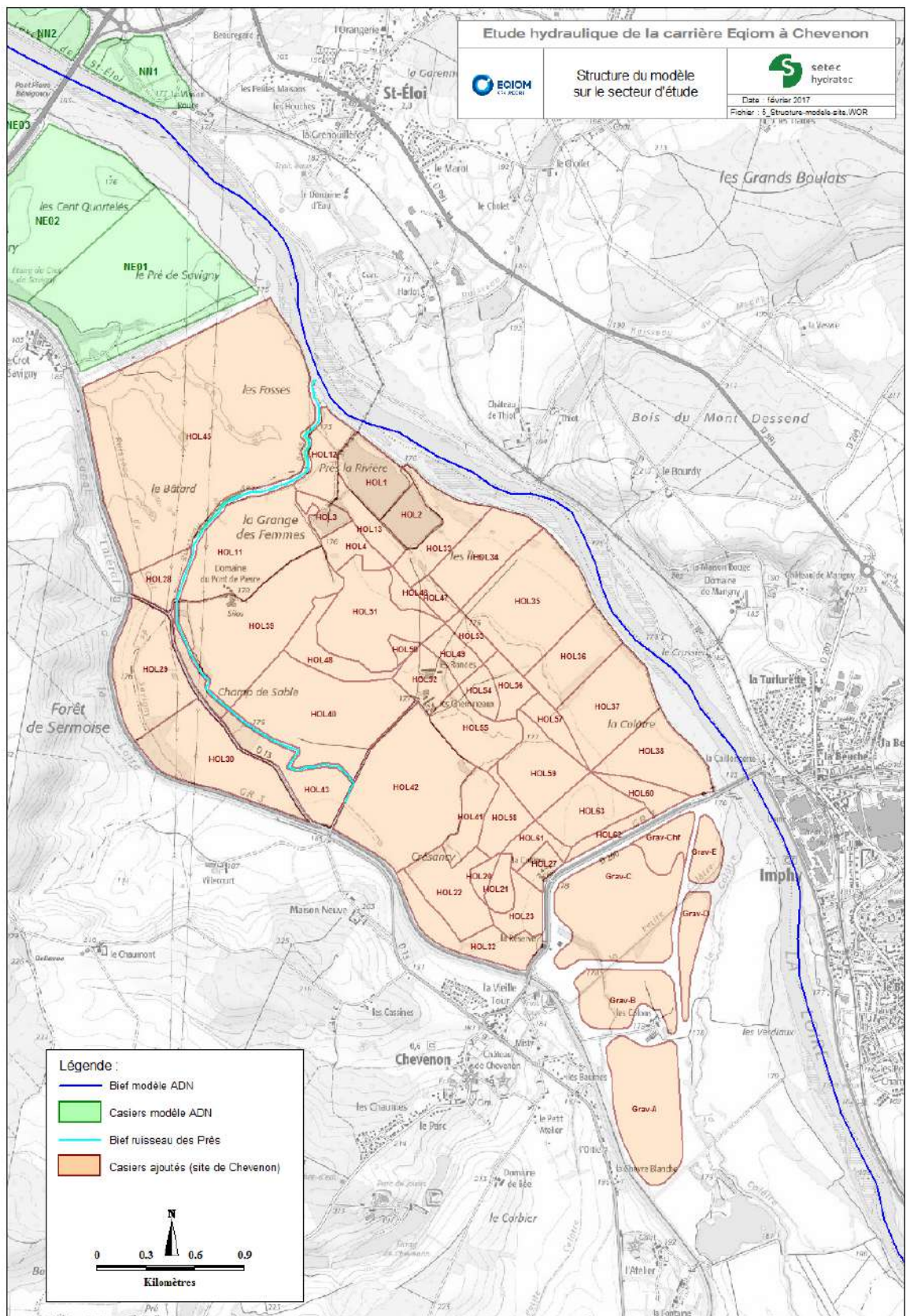


Figure 3-15 : Structure du modèle sur le secteur d'étude

3.2.5 Hydrologie

L'hydrologie présentée dans la présente étude est reprise de l'étude « EGRIAN Hydrologie de la Loire et de l'Allier : Mise en cohérence avec les hypothèses hydrologiques de l'étude Loire moyenne » réalisée par hydratec en 2007.

a) Formation des crues

Les crues de la Loire peuvent être regroupées en trois familles :

➤ Les crues océaniques (1)

Ce sont les plus fréquentes (type 1982, 1995, 1998). Elles ont lieu surtout en hiver et sont provoquées par des fronts pluvieux venant de l'océan.

Dues à de longues périodes de pluies océaniques, elles s'installent surtout à l'Ouest et au Nord du bassin versant. A l'origine, une suite de dépressions vient de l'Atlantique. En passant au Sud, elle provoque une crue sur la Vienne, puis le Cher comme en décembre 1982.

Elle peut aller jusqu'à l'Allier puis la Loire. Pour ce type d'évènements, la pointe de crue de la Loire passe après celle de la Vienne.

En Loire moyenne, du Bec d'Allier au Bec de Vienne, les débits de ces crues océaniques sont toujours inférieurs à ceux que peuvent contenir les levées.

➤ Les crues cévenoles (2)

Ce sont les plus brutales (type 1980, 1996, 2003). Elles résultent de précipitations orageuses d'origine méditerranéenne qui surviennent en général à l'automne (septembre-octobre-novembre) ou plus rarement au printemps (mai-juin) sur les hauts bassins de la Loire et de l'Allier.

Des masses d'air chaud franchissent la Méditerranée et se gorgent d'eau. Elles viennent butter sur les Cévennes. Elles dépassent les Cévennes et restent bloquées par les Alpes. Il tombe 200 à 600 mm de pluie en 48 heures. Toutefois, c'est une crue faible qui arrive en Loire moyenne.

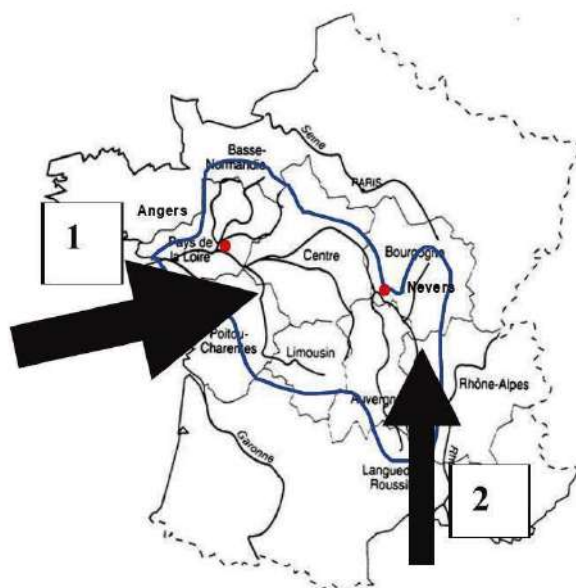


Figure 3-16 : Représentation des crues océaniques et cévenoles

➤ Les crues mixtes (1+2)

Ce sont les crues les plus fortes en Loire moyenne (type 1846, 1856, 1866, 1907). Elles proviennent de la conjonction des deux types d'événements. Elles ont lieu en mai-juin ou en octobre - novembre, voire exceptionnellement fin septembre.

Des pluies océaniques touchent tout le bassin, y compris le Nord du haut-bassin. Une petite crue océanique généralisée apparaît. Un orage cévenol survient sur le haut-bassin et provoque une crue qui « surfe » sur la crue océanique.

Pour ces événements forts, les crues de l'Allier et de la Loire au Bec d'Allier sont généralement concomitantes à quelques 10 heures près.

b) Hydrogrammes injectés en tête du modèle ADN2008

L'étude hydrologique "Loire moyenne", réalisée par Hydratec pour le compte de l'Etat, de l'Epala et de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, s'appuie sur de nombreuses études menées depuis des décennies sur la Loire entre autre par le Service Hydrologique Centralisateur et sur de multiples résultats concernant les crues historiques de 1856, 1866 et 1907. Cette démarche de définition des apports a été validée par un groupe d'experts en hydrologie mis en place par le Comité Technique de l'étude Loire moyenne. Le groupe d'experts a validé la quantification des débits variables en fonction du temps injectés dans le modèle de façon à disposer de scénarios cohérents avec les scénarios déjà utilisés dans les études antérieures, principalement ceux représentant la crue de 1866 en tenant compte aussi des particularités de la crue de 1866, et de décliner ces scénarios en fonction de la période de retour.

L'étude "Loire moyenne" a ainsi permis de définir l'apport de la Loire à Nevers et celui de l'Allier au pont SNCF du Guétin, points d'entrée du modèle "Loire moyenne". Il s'agit d'une série d'hydrogrammes correspondant à des crues théoriques de période de retour 50, 70, 100, 170, 200 et 500 ans de type mixte (océanique + cévenol).

Les points d'entrée du modèle hydraulique ADN 2008, utilisé pour la présente étude, sont Decize sur la Loire et Moulins sur l'Allier.

Les hydrogrammes ont donc été repris et adaptés pour les utiliser comme hydrogrammes d'injection du modèle, afin d'assurer une cohérence avec l'étude "Loire moyenne" :

- Un décalage dans le temps a été effectué (de l'ordre d'une vingtaine d'heures)
- Un débit de base aux hydrogrammes d'entrée sur la Loire et sur l'Allier a été ajouté, afin de tenir compte de l'écrêtement en ligne.

Les débits de la Loire à Nevers et au Bec d'Allier, pour les 6 crues de projet, sont présentés dans le tableau suivant.

Période de retour	Débit de la Loire à Nevers (en m ³ /s)		Débit naturel de l'Allier (en m ³ /s)	Débit de la Loire au Bec d'Allier (en m ³ /s)	
	naturel	écrêté par le barrage de Villerest		naturel	écrêté par le barrage de Villerest
50 ans	3 300	2 300	2 100	5 200	4 200
70 ans	3 620	2 620	2 500	6 000	5 000
100 ans	4 280	3 280	2 800	7 000	6 000
170 ans	4 500	3 500	3 100	7 500	6 500
200 ans	4 900	3 900	3 300	8 000	7 000
500 ans	5 500	4 500	4 100	9 500	8 500

Tableau 3-3 : Débits de la Loire à Nevers et au Bec d'Allier pour les crues de projet

Les crues de projet simulées dans la présente étude tiennent compte de l'écèlement du barrage de Villerest.

Les différents hydrogrammes injectés en tête du modèle sont présentés sur les deux figures en page suivante.

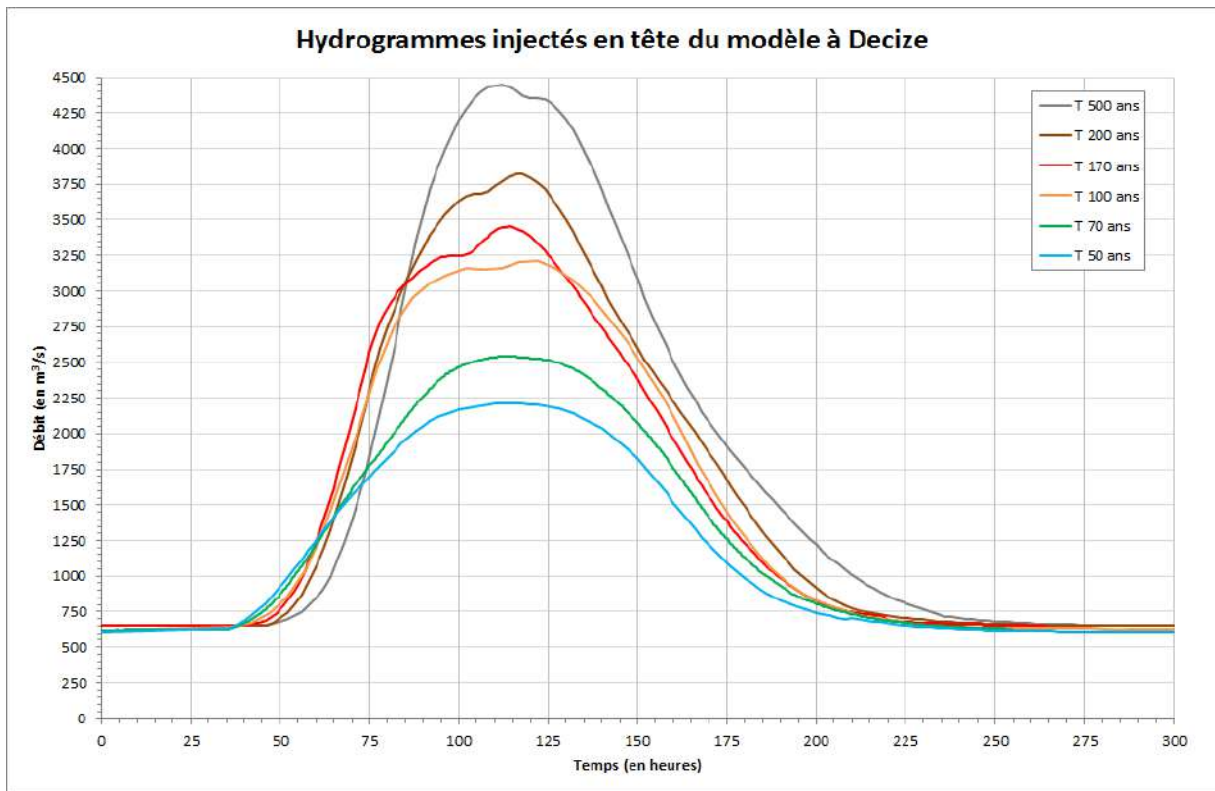


Figure 3-17 : Hydrogrammes de la Loire injectés en tête du modèle à Decize

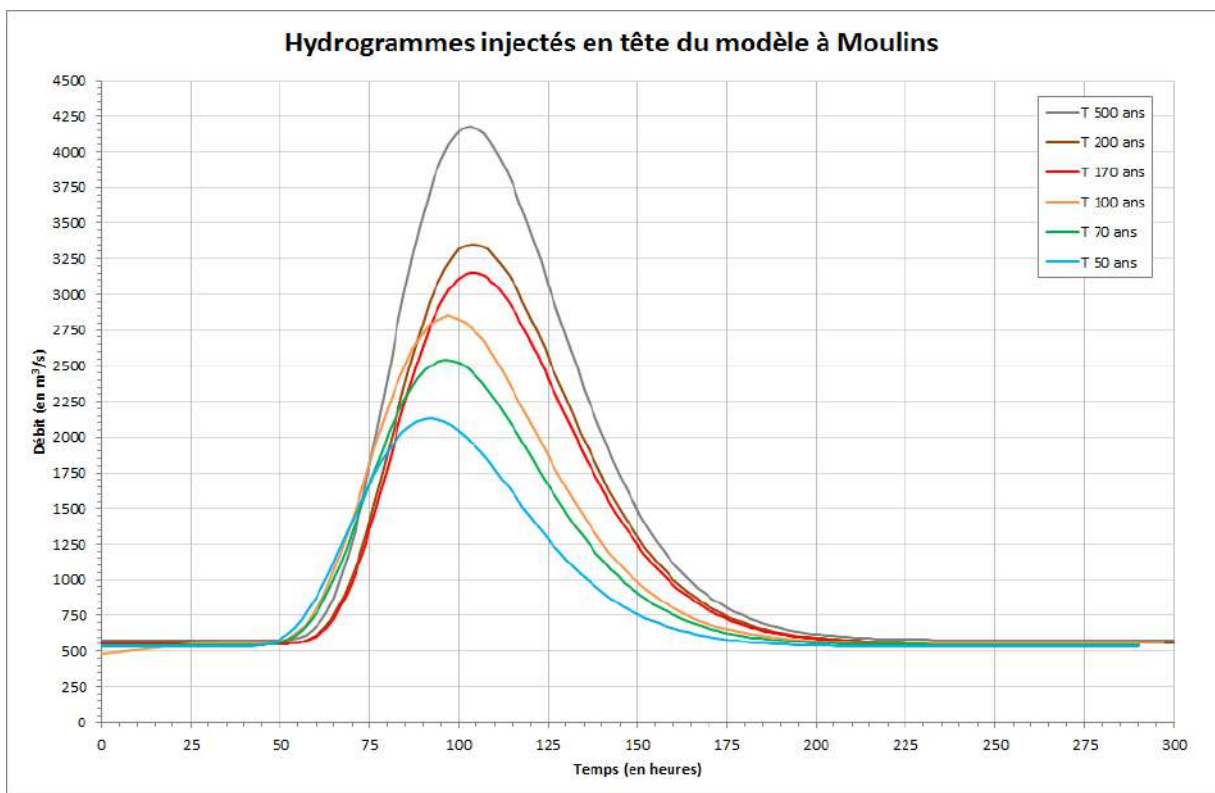


Figure 3-18 : Hydrogrammes de l'Allier injectés en tête du modèle à Moulins

3.2.6 Calage du modèle hydraulique

a) Préambule

Principes du calage

Avant d'utiliser le modèle pour étudier le passage des crues dans la situation actuelle, puis, dans différentes configurations d'aménagement en situation future, il convient de procéder à la vérification de sa représentativité.

Le calage du modèle hydraulique consiste à faire varier les coefficients de Strickler décrivant la rugosité caractérisant les berges et le fond de la Loire autour des valeurs classiques représentatives de ce type de rivière jusqu'à retrouver, par le calcul, les cotes observées pour la crue dite "crue de calage".

Le modèle ADN2008 a été calé dans le cadre de l'étude EGRIAN. Comme son architecture a été modifiée sur le secteur d'étude, il convient de vérifier la représentativité du modèle, notamment sur ce secteur.

Présentation de la crue de calage

La crue de calage est la crue de décembre 2003, qui, est une crue cévenole. Cette crue apparaît comme cinquantennale à l'amont du Bec d'Allier et entre vicennale et cinquantennale après la confluence.

Crue	Q Loire à Nevers	Q Allier à Moulins	Q Nièvre	Q Loire à Givry
Décembre 2003	2 180 m ³ /s	1 580 m ³ /s	27 m ³ /s	3 400 m ³ /s

Tableau 3-4 : Présentation de la crue de calage

Hydrogrammes injectés en tête de modèle

Etant donné qu'il existe une station hydrométrique à Decize mais non jaugée, l'hydrogramme injecté à Decize, en tête du modèle sur la Loire, a été déterminé de sorte de retrouver le débit observé aux stations d'Imphy et surtout de Nevers.

Il correspond ainsi à l'hydrogramme observé à la station d'Imphy pour la crue de 2003, celle-ci ayant été jaugée. L'hydrogramme a bien évidemment été décalé dans le temps afin de prendre en compte les temps de propagation.

L'hydrogramme injecté à Moulins, en tête de modèle sur l'Allier, correspond à l'hydrogramme observé à la station hydrométrique de Moulins.

L'hydrogramme injecté à Pont-Saint-Ours, en tête de modèle sur la Nièvre, correspond à une estimation de débits basée sur l'hydrogramme observé à la station de la Nièvre d'Arzembouy à Poiseux [Poisson], multiplié par le rapport des surfaces des bassins versants à la puissance 0.8. Le bassin versant à Poiseux étant de 224 km², et de 594 km² à Pont-Saint-Ours.

Les hydrogrammes des apports intermédiaires, à savoir La Queune, la Burge et la Bieudre sur l'Allier et l'Acolin sur la Loire amont sont issus des données de la Banque HYDRO.

Les hydrogrammes injectés dans le modèle pour la crue de décembre 2003 sont présentés sur les figures suivantes.

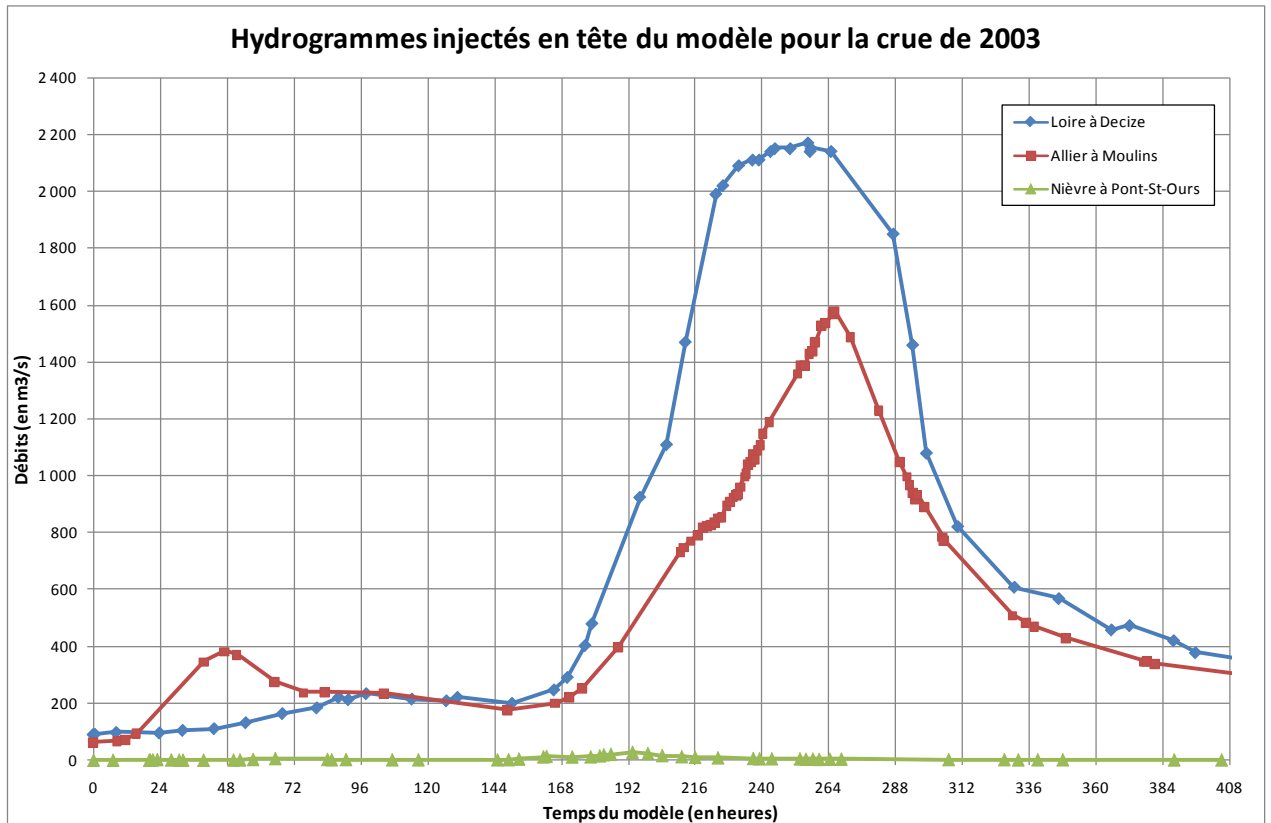


Figure 3-19 : Hydrogrammes injectés en tête du modèle pour la crue de décembre 2003

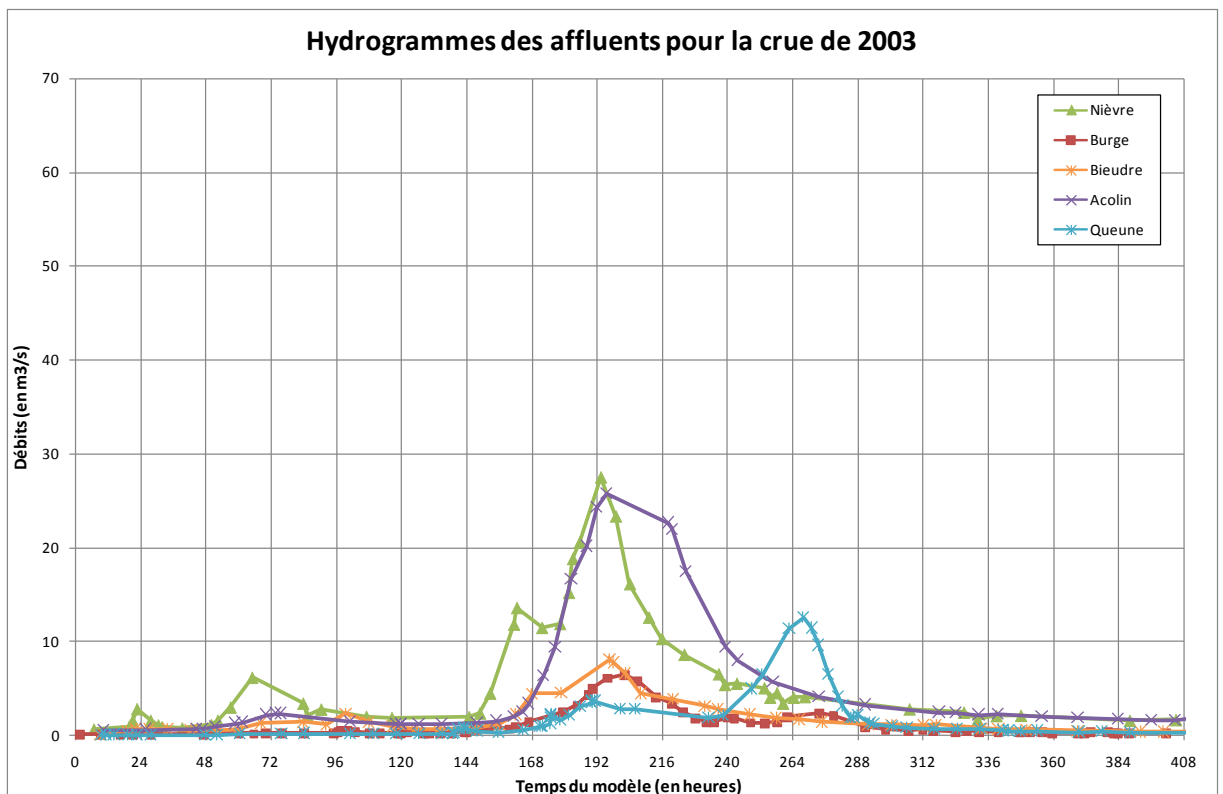


Figure 3-20 : Hydrogrammes des affluents pour la crue de décembre 2003

Données de calage

Les données utilisées pour le calage du modèle hydraulique sont :

- les hydrogrammes et les limnigrammes aux stations de Imphy, Nevers et Givry sur la Loire (source : DIREN),
- les hydrogrammes et les limnigrammes aux stations de Moulins, Veudre et Cuffy sur l'Allier (source : DIREN),
- les repères de crue sur la Loire et l'Allier (source : DIREN).

Précision du calage

Les incertitudes sur la connaissance des débits de crue écoulés, sur le moment de lecture et sur la lecture elle-même des échelles de crue du fait de conditions expérimentales difficiles, font que le calage n'est jamais parfait.

Les incertitudes engendrent les imprécisions suivantes :

- l'incertitude sur l'hydrologie : la reconstitution des débits aux échelles à partir des observations de niveaux par l'intermédiaire des courbes de tarage engendre des imprécisions sur les débits injectés dans le modèle.
- l'incertitude sur le moment de la lecture (la lecture de l'échelle n'a pas lieu au moment du passage du maximum) induit une imprécision pouvant aller jusqu'à une dizaine de centimètres sur les niveaux mesurés, en particulier lors d'une crue « pointue ».
- la difficulté de lecture (vagues ou batillage, nuit, accessibilité de l'échelle...) induit une imprécision de 1 à 2 cm sur les niveaux mesurés.
- l'incertitude liée à la position de l'échelle : les échelles situées dans l'extrados d'une courbe ou dans le remous d'un pont induisent une surcote de quelques centimètres qui n'est pas prise en compte dans le modèle.

Il n'est donc pas nécessaire de chercher à caler le modèle avec une précision plus fine que l'intervalle [+15 cm ; -15 cm]. Cela reflèterait une précision illusoire qui ne correspond pas à la réalité.

b) Résultats du calage

Propagation des hydrogrammes et limnigrammes

Les graphiques ci-après superposent les hydrogrammes mesurés aux stations (courbes bleues) aux hydrogrammes calculés par le modèle (courbes rouges) ainsi que les limnigrammes mesurés aux stations (courbes bleues) aux limnigrammes calculés par le modèle (courbes rouges), pour la crue de calage de décembre 2003.

LOIRE

Hydrogrammes

Limnigrammes

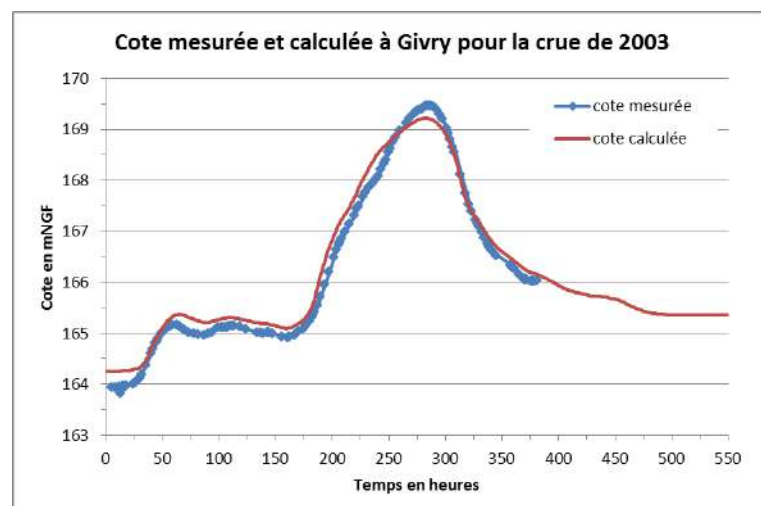
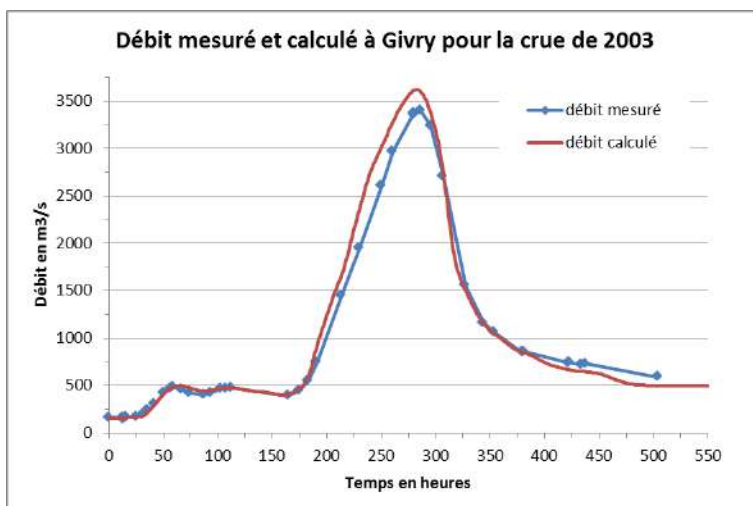
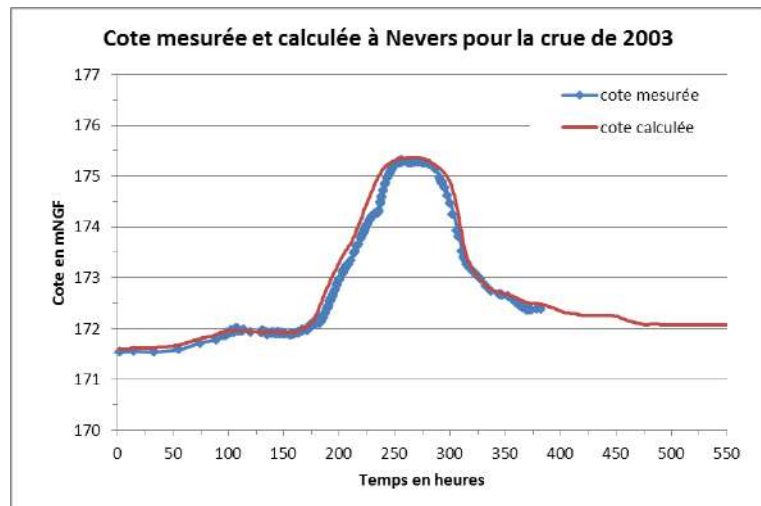
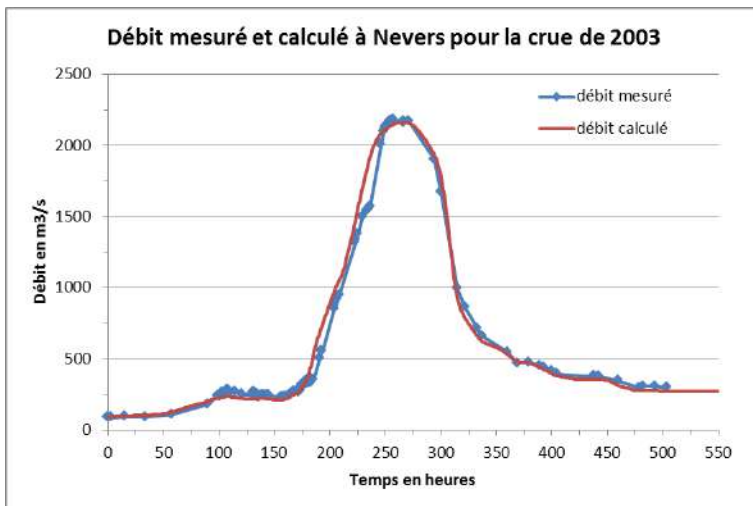
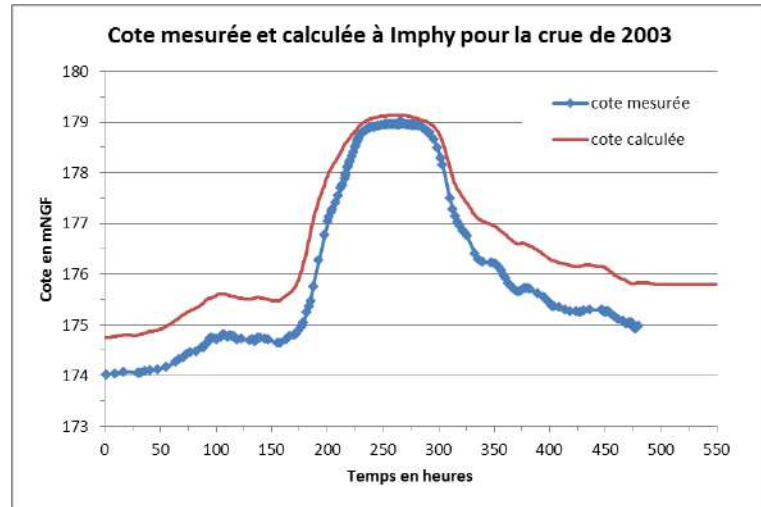
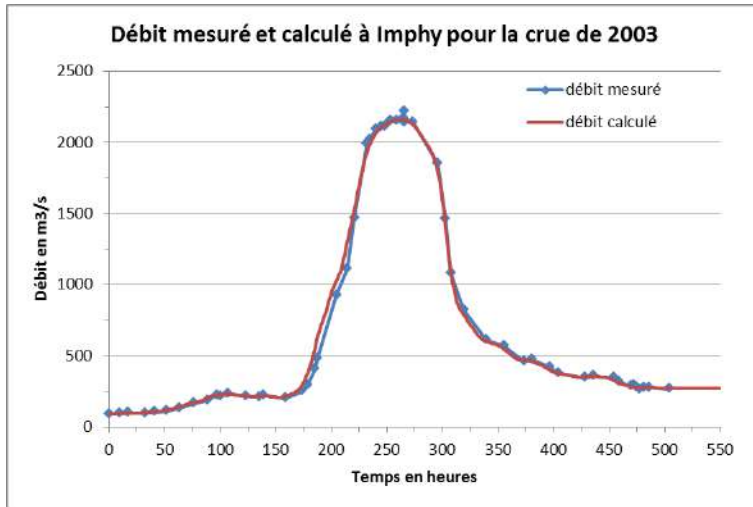


Figure 3-21 : Comparaison des hydrogrammes et limnigrammes aux stations de mesures sur la Loire pour la crue de décembre 2003

ALLIER

Hydrogrammes

Limnigrammes

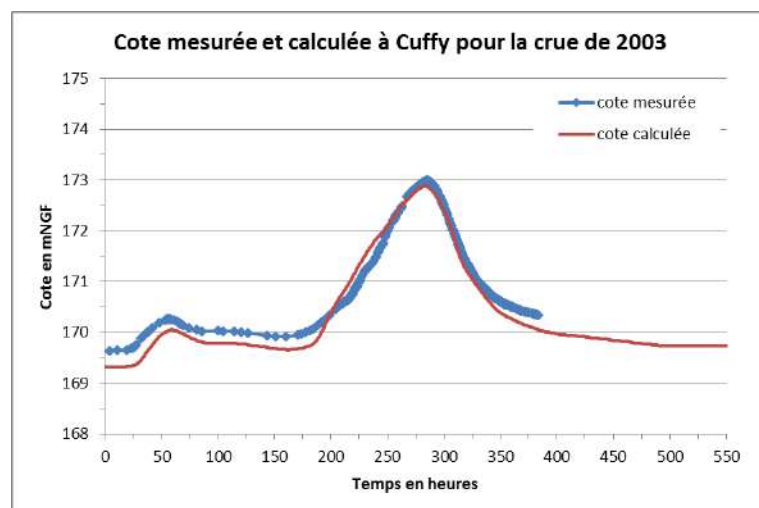
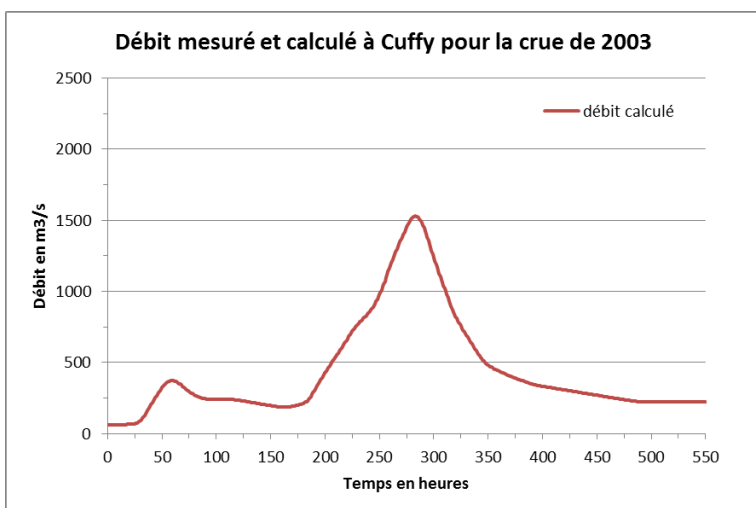
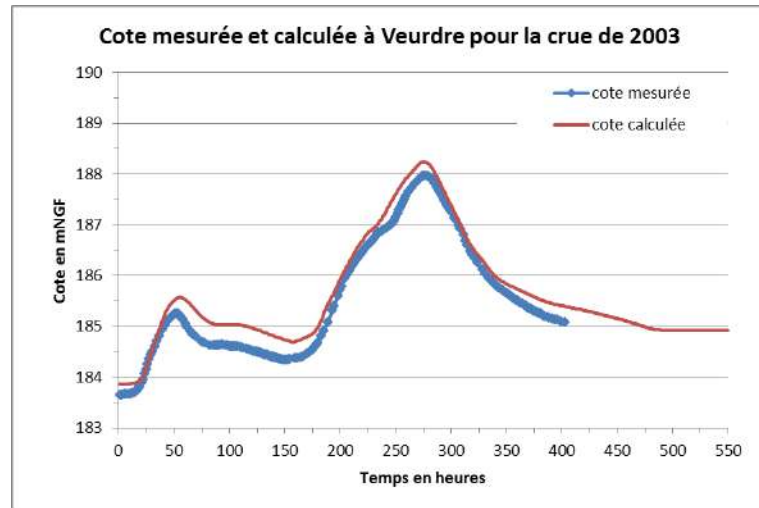
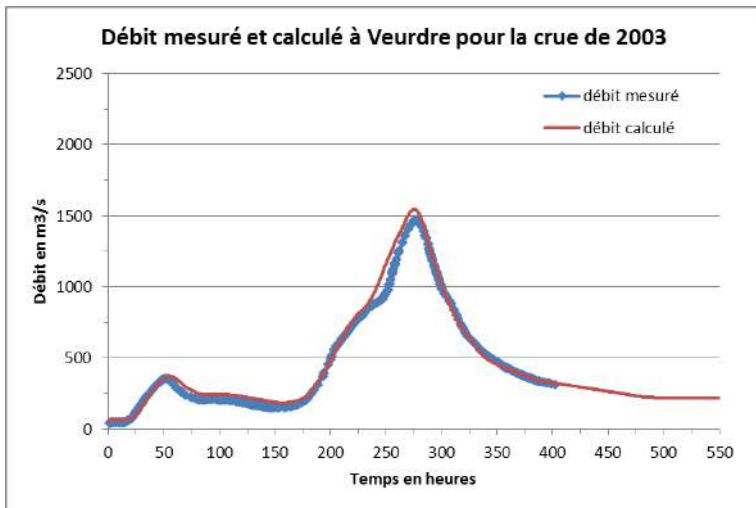
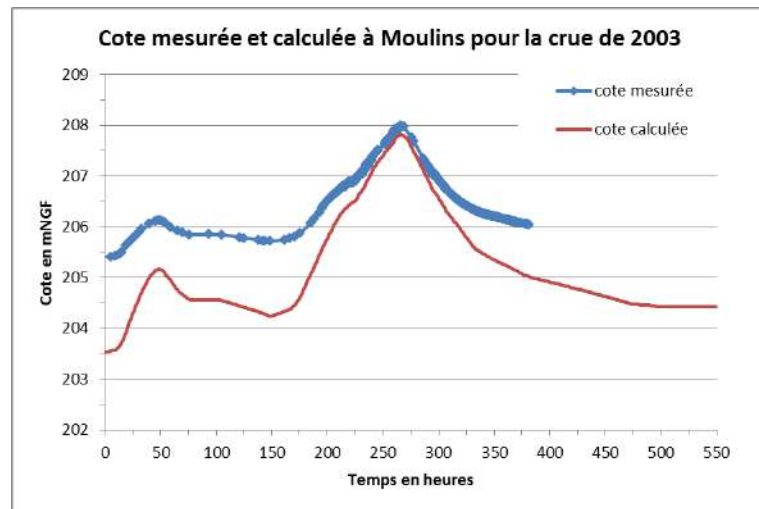
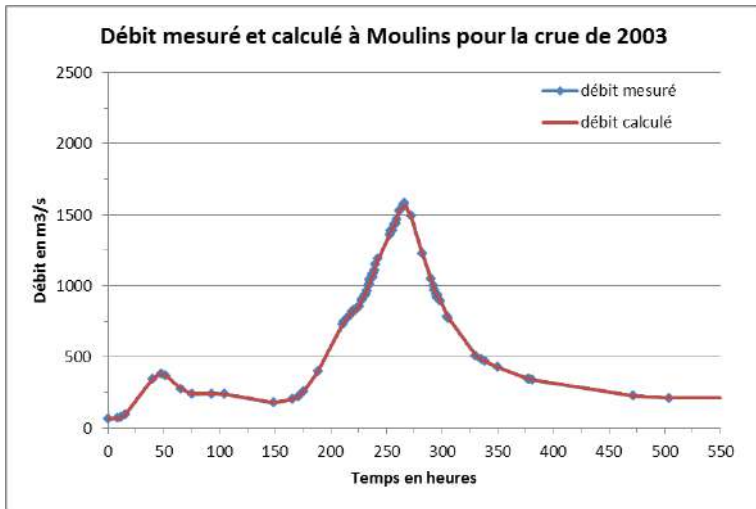


Figure 3-22 : Comparaison des hydrogrammes et limnigrammes aux stations de mesures sur l'Allier pour la crue de décembre 2003

Ces graphiques permettent d'apprécier la bonne propagation des hydrogrammes depuis Moulins et Decize jusqu'à Saint-Satur :

- tant d'un point de vue quantitatif : les débits de pointe sont sensiblement les mêmes :

		Débit maximum en m ³ /s		
		Mesuré Qm	Calculé Qc	Ecart (Qc - Qm)/Qm
Allier	Moulins	1 580	1 567	-1%
	Veurdre	1 470	1 546	5%
	Cuffy	-	1 530	0%
Loire	Imphy	2 220	2 161	-3%
	Nevers	2 180	2 162	-1%
	Givry	3 400	3 620	6%

Tableau 3-5 : Comparaison des débits maximums aux stations de mesures pour la crue de décembre 2003

- que d'un point de vue temporel : les deux courbes se superposent, il n'y a pas de décalage.

On vérifie que le débit injecté à Decize en tête de modèle et propagé en particulier jusqu'à Imphy et Nevers correspond bien au débit mesuré à ces stations.

Ainsi, le modèle assure une bonne propagation des hydrogrammes : le calage en débits s'avère satisfaisant.

Comme précédemment pour les hydrogrammes, ces graphiques permettent d'apprécier la superposition des limnigrammes calculés et mesurés aux différentes stations depuis Moulins et Decize jusqu'à Saint-Satur :

- tant d'un point de vue quantitatif : les cotes maximales sont sensiblement les mêmes :

		Cote maximum en mNGF		
		Mesuré Zm	Calculé Zc	Ecart Zc - Zm
Allier	Moulins	207.99	207.82	-0.17 m
	Veurdre	187.97	188.24	0.27 m
	Cuffy	172.99	172.88	-0.11 m
Loire	Imphy	179.03	179.14	0.11 m
	Nevers	175.30	175.36	0.06 m
	Givry	169.47	169.22	-0.25 m

Tableau 3-6 : Comparaison des cotes maximums aux stations de mesures pour la crue de décembre 2003

- que d'un point de vue temporel : les deux courbes se superposent, il n'y a pas de décalage.

Profils en long des lignes d'eau maximales

Le tableau suivant compare les cotes maximales de la Loire calculées par le modèle hydraulique lors de la simulation de la crue de calage de décembre 2003 avec les cotes observées aux différents repères de crue.

	Localisation du repère de crue	Emplacement dans le modèle	Zc = Z max calculé (mNGF)	Zm = Z repère de crue (mNGF)	Δz = Zc – Zm (m)
LOIRE	Sougy	NOD_161	187.19	187.15	0.04
	Druy-Parigny	NOD_542	185.39	185.36	0.03
	Béard	NOD_24	183.79	183.72	0.07
	St-Ouen	NOD_167	182.37	182.38	-0.01
	Imphy "Plauts"	NOD_170	180.63	180.42	0.21
	Imphy "Tour"	NOD_527	180.02	180.04	-0.02
	Imphy "Station"	NOD_450	179.14	179.2	-0.06
	Imphy "Pont"	NOD_23	178.96	179.04	-0.08
	Sauvigny "Thiot"	NOD_86	177.99	177.96	0.03
	St-Eloi "Maison rouge"	NOD_262	176.64	176.65	-0.01
	Nevers "pont déviation"	NOD_331	176.36	176.34	0.02
	Nevers "Levée St-Eloi"	NOD_265	176.1	176.08	0.01
	Nevers "Jonction"	NOD_451	175.36	175.3	0.06
	Nevers "Ecluse"	NOD_272	175.15	175.02	0.13
	Nevers "pont RN7"	NOD_41	174.87	174.91	-0.04
	Nevers "pont SNCF av"	NOD_283	174.53	174.59	-0.06
	Nevers "La Pisserotte"	NOD_290	173.68	173.65	0.03
	Marzy "La Fossaie"	NOD_297	172.77	172.62	0.15
	Marzy "Villa Bruno"	NOD_528	172.14	171.89	0.25
	Marzy "Corcelles"	NOD_414	170.12	170.28	-0.16
	Cours-les-Barres "Givry"	NOD_182	169.22	169.47	-0.25
	Fourchambault	NOD_529	168.92	168.96	-0.04
	Garchizy	NOD_417	168.27	168.29	-0.02
	Cours-les-Barres "Chaume"	NOD_186	167.81	167.84	-0.03
	Soulangy "bourg"	NOD_189	166.78	166.9	-0.12
	Jouet s/ Aubeis "Canche"	NOD_2	166.02	165.98	0.04
	"Poids de Fer"	NOD_431	165.92	166.04	-0.12
	"Confluence de l'Aubeis"	NOD_192	165.38	165.37	0.01
	Marseille "Sablière"	NOD_462	165.1	165.14	-0.04
	Beffes	NOD_463	164.13	164.25	-0.12
	Tronsanges	NOD_464	162.73	162.79	-0.06
	La Marche	NOD_198	161.64	161.73	-0.09
	Argenvières	NOD_201	160.44	160.58	-0.14
	La Charité "service eaux"	NOD_203	159.91	160.03	-0.12
	La Chapelle-Montlinard	NOD_203	159.91	160.13	-0.22
	La Charité "pont"	NOD_205	159.45	159.52	-0.07
	La Charité "pont"	NOD_205	159.45	159.47	-0.02
	Moyenne des Δz en valeurs absolues (en m)				0.08
	Ecart-type des Δz (en m)				0.10

Tableau 3-7 : Comparaison des cotes calculées par le modèle aux cotes des repères de crue pour la crue de décembre 2003 – sur la Loire

Le tableau suivant compare les cotes maximales de l'Allier calculées par le modèle hydraulique lors de la simulation de la crue de calage de décembre 2003 avec les cotes observées aux différents repères de crue.

	Localisation du repère de crue	Emplacement dans le modèle	Zc = Z max calculé (mNGF)	Zm = Z repère de crue (mNGF)	$\Delta z = Zc - Zm$ (m)
ALLIER	Moulins "pont Regemorte"	NOD_43	207.88	207.8	0.08
	Villeneuve "pont"	NOD_44	199.24	199.23	0.01
	Livry "pont du Veurdre"	NOD_31	188.24	188.17	0.07
	Mornay s/ Allier "pont"	NOD_338	183.46	183.43	0.03
	Mars s/ Allier "Oliveau"	NOD_155	181.16	181.17	-0.01
	Neuvy le Barrois "St-Caprais"	NOD_531	180.86	180.9	-0.04
	Mars s/ Allier "Bourg"	NOD_96	179.38	179.49	-0.11
	Apremont "Bourg"	NOD_534	176.38	176.42	-0.03
	Barrage des Lorrains aval	NOD_276	174.5	174.82	-0.31
	Cuffy "pont canal amont"	NOD_279	172.88	172.99	-0.11
	Cuffy "Bec d'Allier"	NOD_26	172	172.32	-0.32
	Moyenne des Δz en valeurs absolues (en m)				0.10
	Ecart-type des Δz (en m)				0.13

Tableau 3-8 : Comparaison des cotes calculées par le modèle aux cotes des repères de crue pour la crue de décembre 2003 – sur l'Allier

Ainsi, le modèle restitue pour la crue de calage de décembre 2003 :

- à ± 10 cm près, 67% des 48 cotes observées,
- à ± 15 cm près, 85% des 48 cotes observées.

Cette analyse nous permet de considérer le calage obtenu comme acceptable, compte tenu des incertitudes demeurant sur certaines cotes observées, et des variations inférieures à 10-15 cm pour la plupart des cotes observées.

Le modèle, calé sur une crue de période de retour 50 ans, est utilisé dans la suite de l'étude pour des crues plus importantes. L'hypothèse du caractère invariable des paramètres de calage pour toutes les crues est une hypothèse forte, mais allant dans le sens de la sécurité : en effet, quand le rayon hydraulique, le coefficient de Strickler augmente également. Ainsi, conserver les paramètres de calage pour une crue moyenne surestime légèrement les lignes d'eau calculées pour des crues plus importantes.

Les figures en page suivante présentent le profil en long de la ligne d'eau maximale en Loire calculée par le modèle hydraulique pour la crue de calage de décembre 2003.

A cette ligne d'eau, les cotes des repères de crue ont été superposées afin de juger de la qualité du calage.

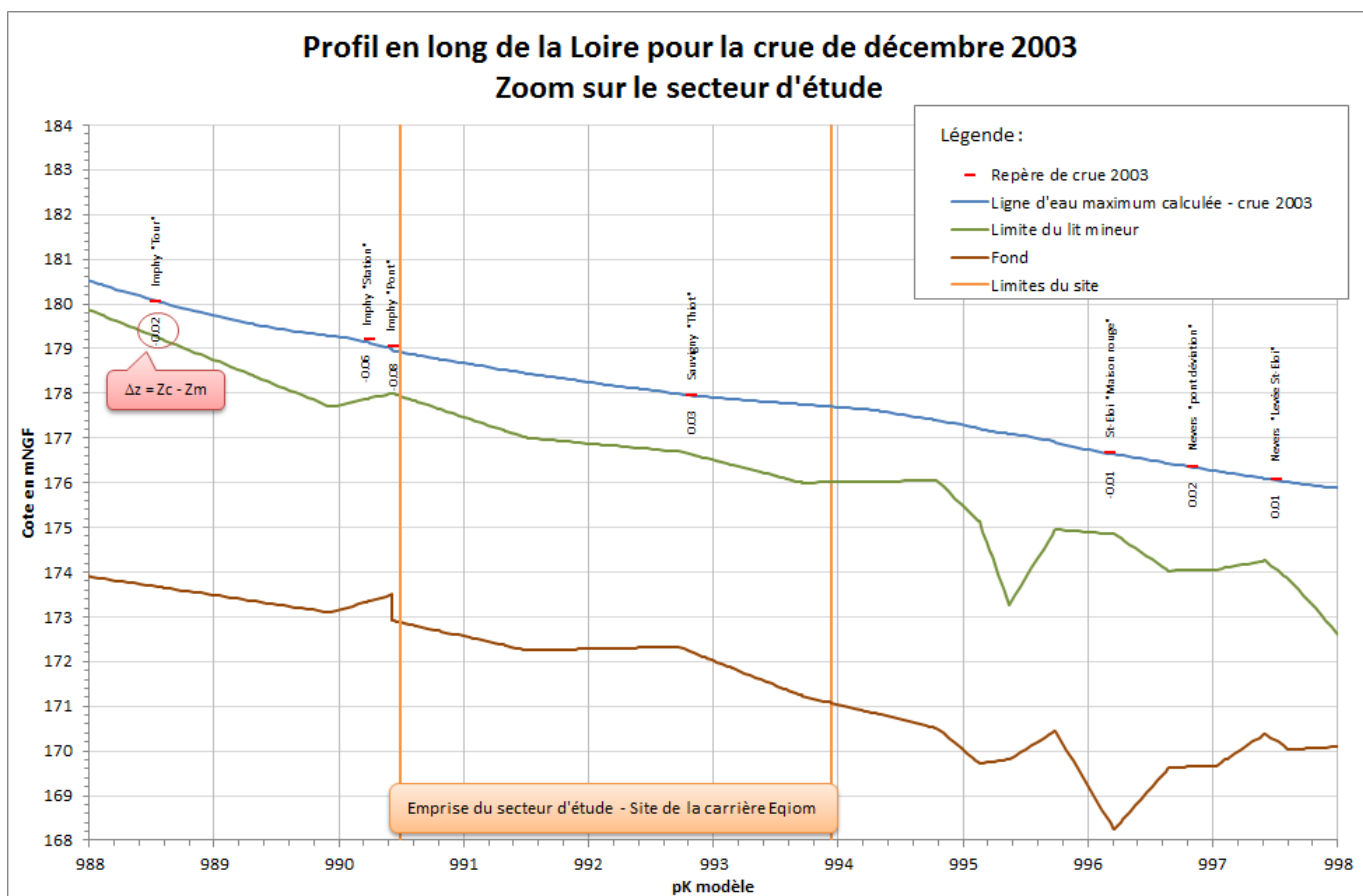
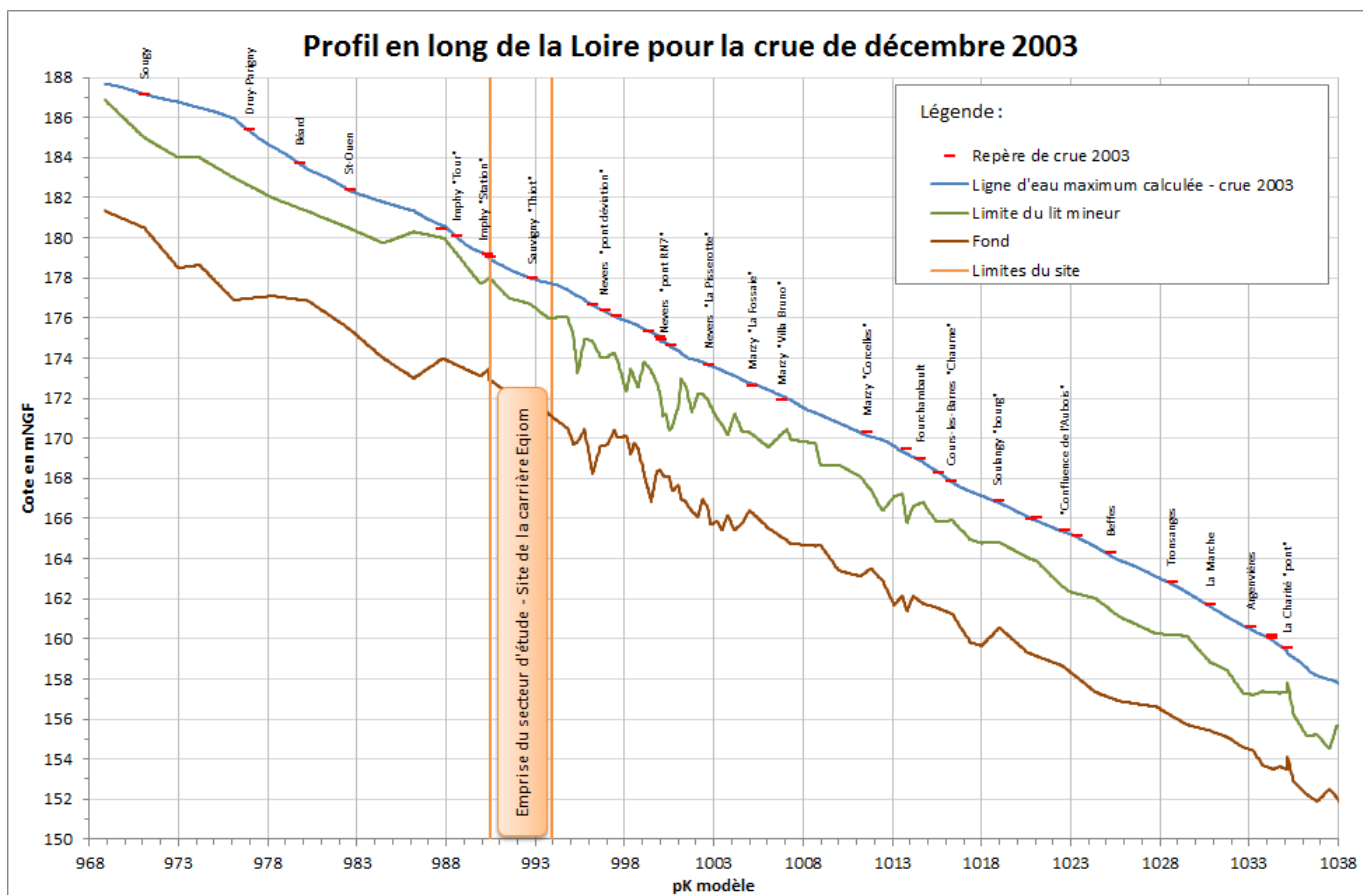


Figure 3-23 : Profils en long de la Loire pour la crue de décembre 2003

Dans le cadre de la présente étude, le calage a porté sur les coefficients de Strickler de la Loire en amont de Nevers, dans le but d'améliorer la représentativité du modèle ADN2008 sur le secteur étudié.

Les coefficients de Strickler obtenus sont présentés dans le tableau suivant.

pK	ID profil en travers	Modèle Eqiom (ADN2008 affiné)		Modèle ADN2008	
		K lit mineur	K lit majeur	K lit mineur	K lit majeur
973.000	P105	36	9	35	9
974.190	P106	36	9	35	9
976.110	P107	22	9	21	9
978.250	P108	21	12	20	12
980.290	P109	31	15	30	15
982.520	P110	45	20	45	20
984.470	P111	45	20	45	20
986.200	P112	34	6	33	6
987.750	P113	27	16	28	18
989.940	P114	20	10	28	18
990.430	L01	24	16	28	18
991.510	L02	26	18	27	15
992.720	L03	26	21	26	21
993.715	L04	26	21	26	21

Tableau 3-9 : Comparaison des coefficients de Strickler avant et après calage sur le secteur étudié

Pour information, les valeurs du coefficient de Strickler K utilisées pour le calage sur l'ensemble du modèle ADN2008 sont les suivantes :

	K lit mineur	K lit majeur
Loire	19-45	6-28
Allier	20-38	8-40
Nièvre et affluents	20-30	10-15

Tableau 3-10 : Coefficients de Strickler utilisés lors du calage du modèle ADN2008

Ces valeurs sont en moyenne représentatives de la rugosité des différents biefs, les écarts à la moyenne étant nécessaires pour le calage fin de l'outil de calcul.

En particulier en amont d'Imphy, pour les besoins du calage, le coefficient de rugosité a été évalué à 45, ce qui est élevé ; toutefois, cela n'a pas d'incidence sur le reste du modèle.

3.3 RESULTATS DE LA MODELISATION

Une fois le modèle détaillé localement et calé sur la crue de décembre 2003 pour s'assurer de sa représentativité, les simulations suivantes sont réalisées :

- crue de période de retour 50ans,
- crue de période de retour 70ans,
- crue de période de retour 100ans,
- crue de période de retour 170ans,
- crue de période de retour 200ans,
- crue de période de retour 500ans.

Au début de la simulation, les niveaux d'eau dans les gravières actuelles sont fixés à 173m NGF. Pour mémoire, le niveau moyen mesuré des plans d'eau est d'environ 173,50m NGF entre 2000 et 2013.

De plus, les simulations réalisées ne prennent pas en compte les mouvements de nappe qui peuvent se produire lors des crues et qui affectent positivement les niveaux d'eau dans les gravières.

3.3.1 Profils en long de la ligne d'eau en Loire

Les profils en long de la ligne d'eau maximale en Loire pour les différentes crues sont présentés sur la Figure 3-24 en page suivante.

A noter que les cotes PHEC sur le secteur d'étude varient de 180,50 m NGF à l'amont à 179,50 m NGF à l'aval.¹

¹ Cotes PHEC reconstituées issues du *PPRi Loire secteur compris entre Nevers et Saint-Léger-des-Vignes*, approuvé en date du 05 mars 2003 et modifié en date du 29 septembre 2014

Profils en long de la Loire en crue en situation actuelle Zoom sur le secteur d'étude

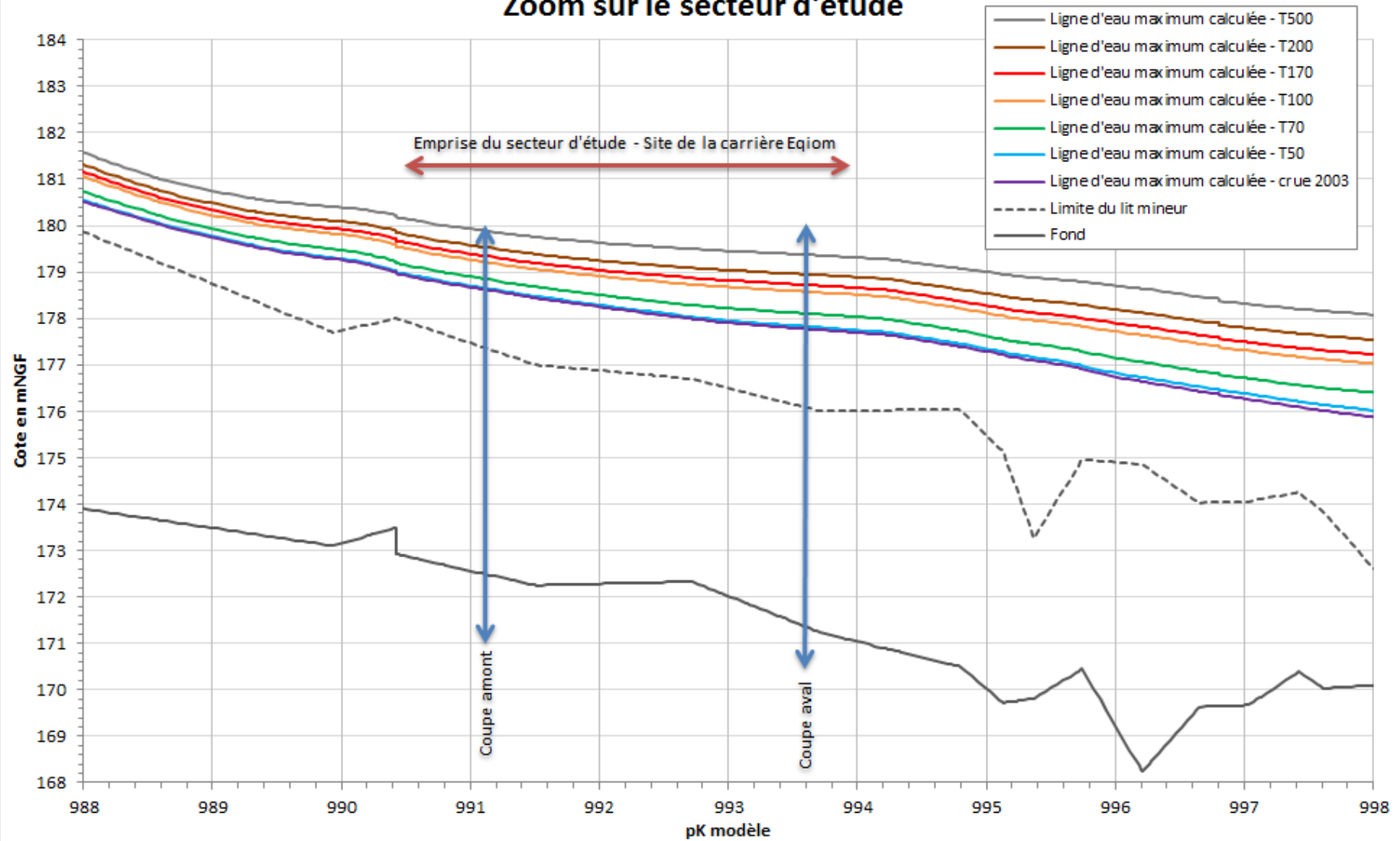


Figure 3-24 : Profils en long de la ligne d'eau maximale en Loire pour les crues étudiées en situation actuelle

3.3.2 Sollicitation hydraulique du site - hauteurs de submersion

Afin de quantifier la sollicitation hydraulique du secteur étudié, les niveaux d'eau maximums en Loire pour les différentes crues ont été projetés sur deux coupes :

- une coupe à l'amont du secteur étudié,
- une coupe à l'aval du secteur étudié.

Ces deux coupes sont localisées sur la Figure 3-25 et présentées sur la Figure 3-26.

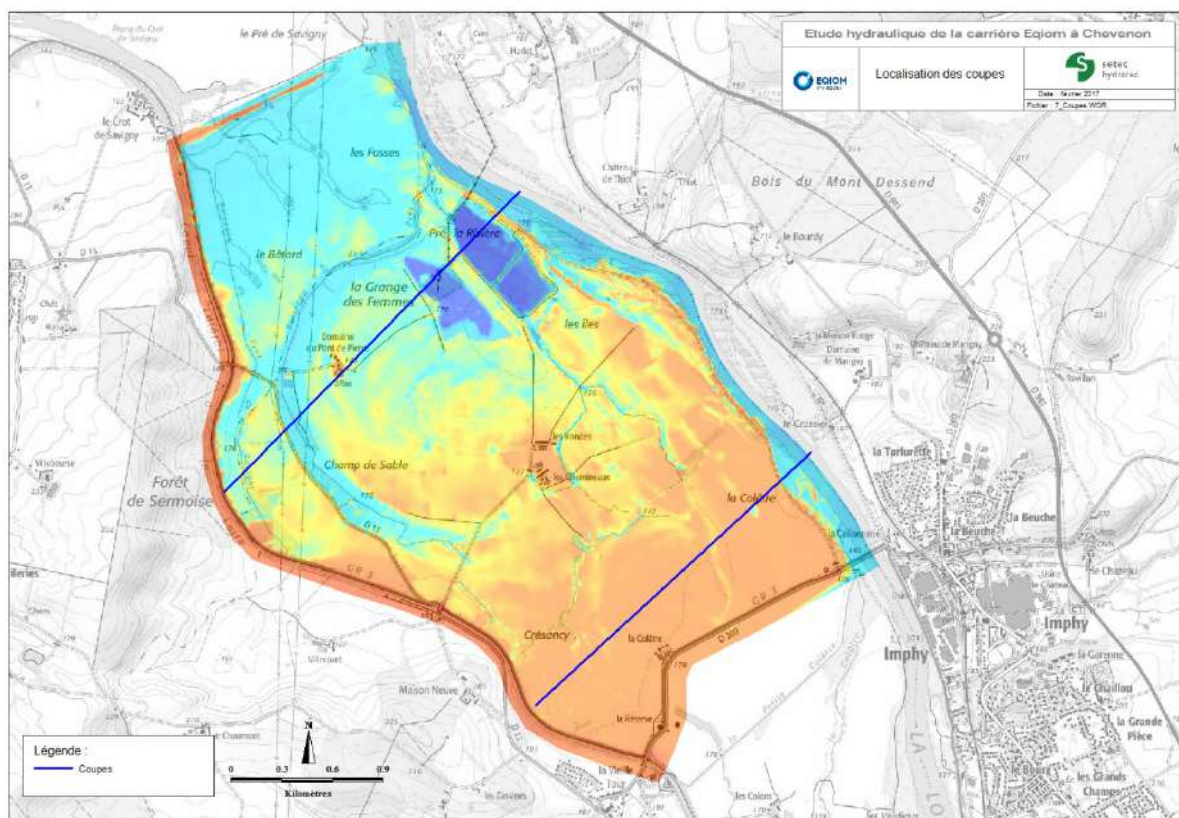


Figure 3-25 : Position des traits de coupe

Pour une même crue, l'aval du site est plus sollicité que l'amont : pour la crue de décembre 2003, on observe une hauteur de submersion moyenne d'environ 80cm à l'amont du site pour une hauteur de submersion moyenne d'environ 1m à l'aval du site.

Par ailleurs, on observe une différence de niveau en Loire entre l'amont et l'aval du site :

- de l'ordre de 85cm pour la crue de décembre 2003,
- de l'ordre de 60cm pour la crue de période de retour 170ans.

Ces différences sont ici observées à la pointe de crue et peuvent varier au cours de la crue.

Sollicitation hydraulique du site en situation actuelle

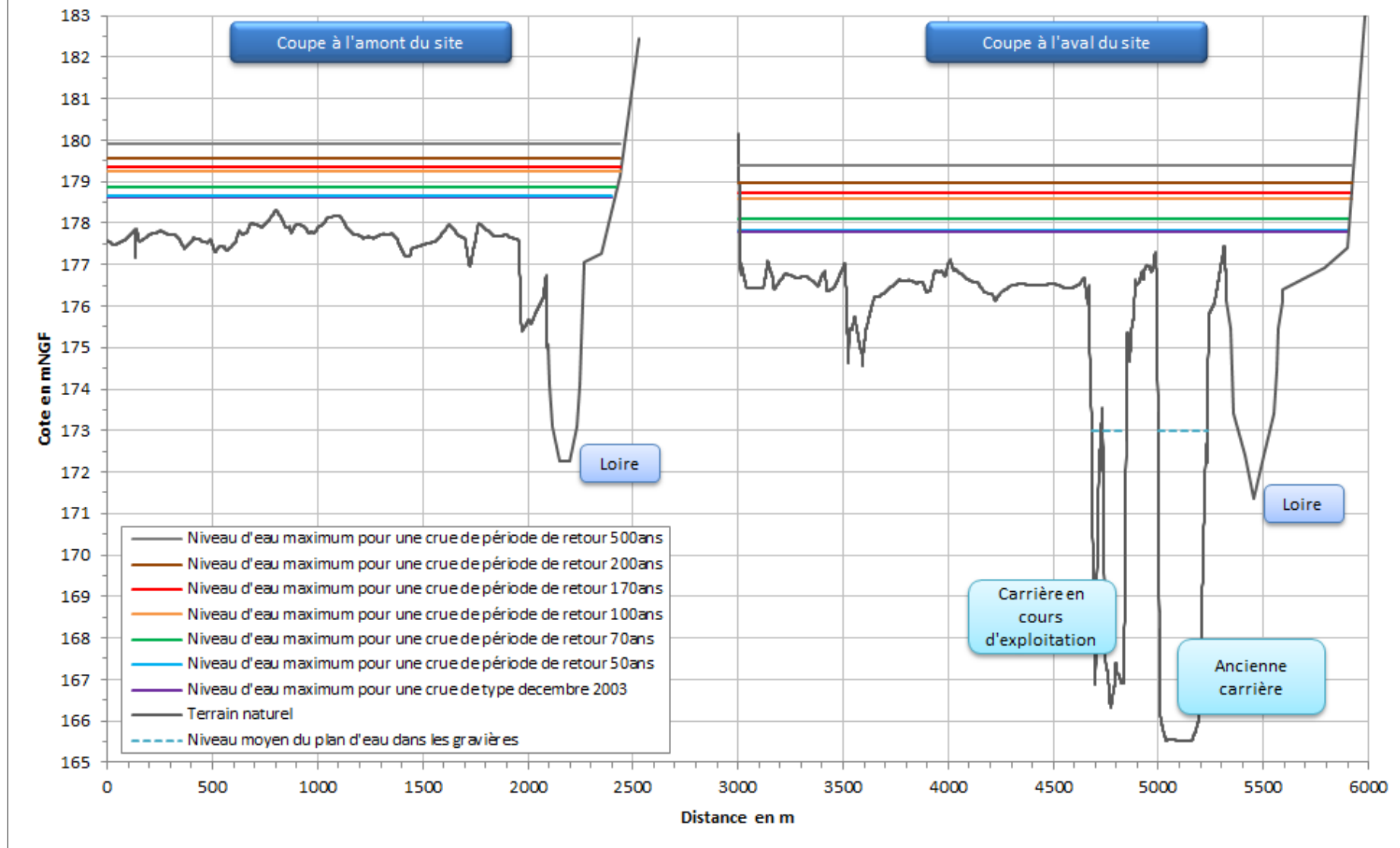


Figure 3-26 : Sollicitation hydraulique du site en situation actuelle

Les cartes suivantes présentent les hauteurs de submersion maximales sur le secteur étudié pour les différentes crues.

Les résultats cartographiques ne sont présentés que sur le secteur étudié délimité par :

- la Loire à l'Est,
- la RD 200 au Sud,
- le canal latéral à l'Ouest,
- le pré de Savigny au Nord.

Cela signifie que les hauteurs d'eau sur les secteurs alentours ne sont pas représentées.

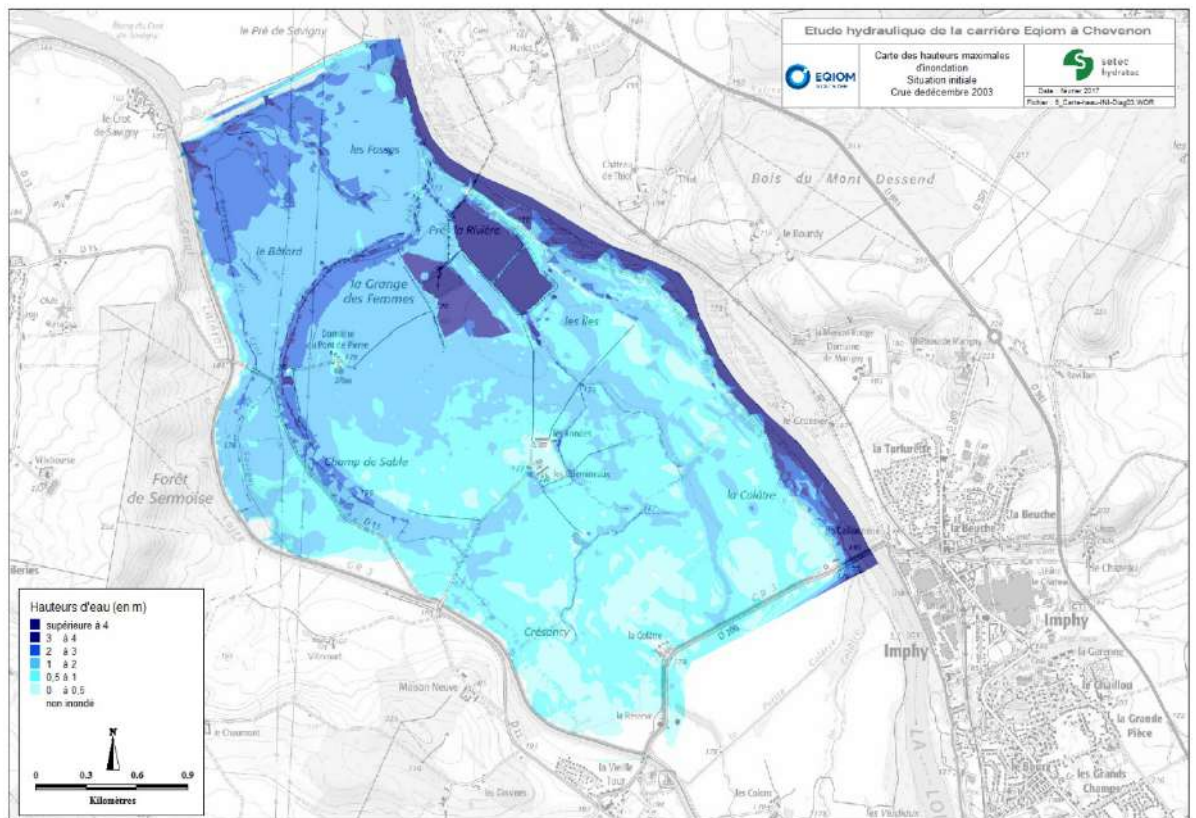


Figure 3-27 : Carte des hauteurs de submersion en situation actuelle pour la crue de dec 2003

Le site est entièrement inondé dès la crue de décembre 2003 avec des hauteurs d'eau atteignant les 2 mètres au niveau des gravières.

L'annexe 1 présente les résultats de la simulation de la crue de décembre 2003 à différents instants entre $t=184h$ et $t=351h$ (temps des premiers débordements jusqu'au début de la décrue). On constate que le site est, dans un premier temps, inondé par remous sur sa partie aval par l'intermédiaire du ruisseau des Prés, et dans un deuxième temps, par des surverses en amont du site en rive gauche de la Loire et sur la RD200.

Les gravières existantes sont donc noyées par l'aval avant l'arrivée des premières surverses submergeant le site. Par ailleurs, elles sont également pré-remplies lors de la montée de la crue grâce aux liaisons entre elles et le ruisseau des Prés. Pour mémoire, ces liaisons ont été présentées au paragraphe 3.1.

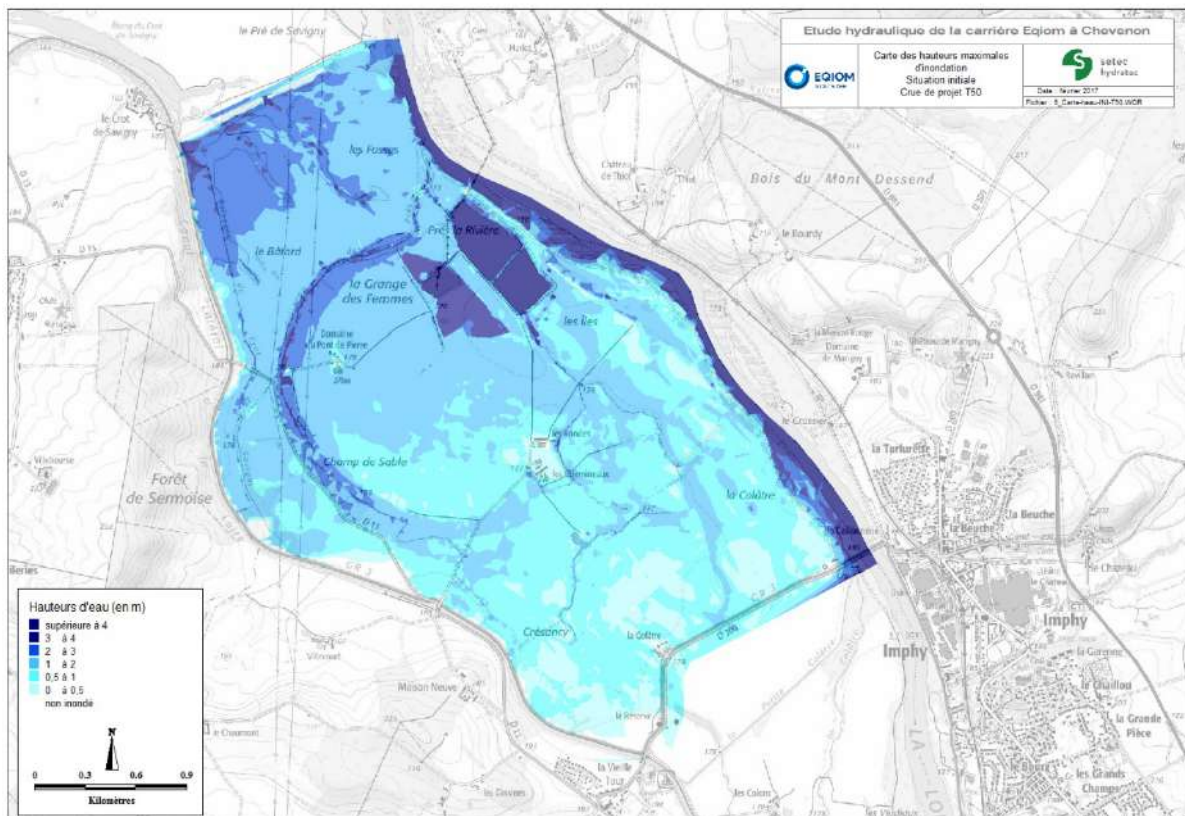


Figure 3-28 : Carte des hauteurs de submersion en situation actuelle pour la crue T50ans

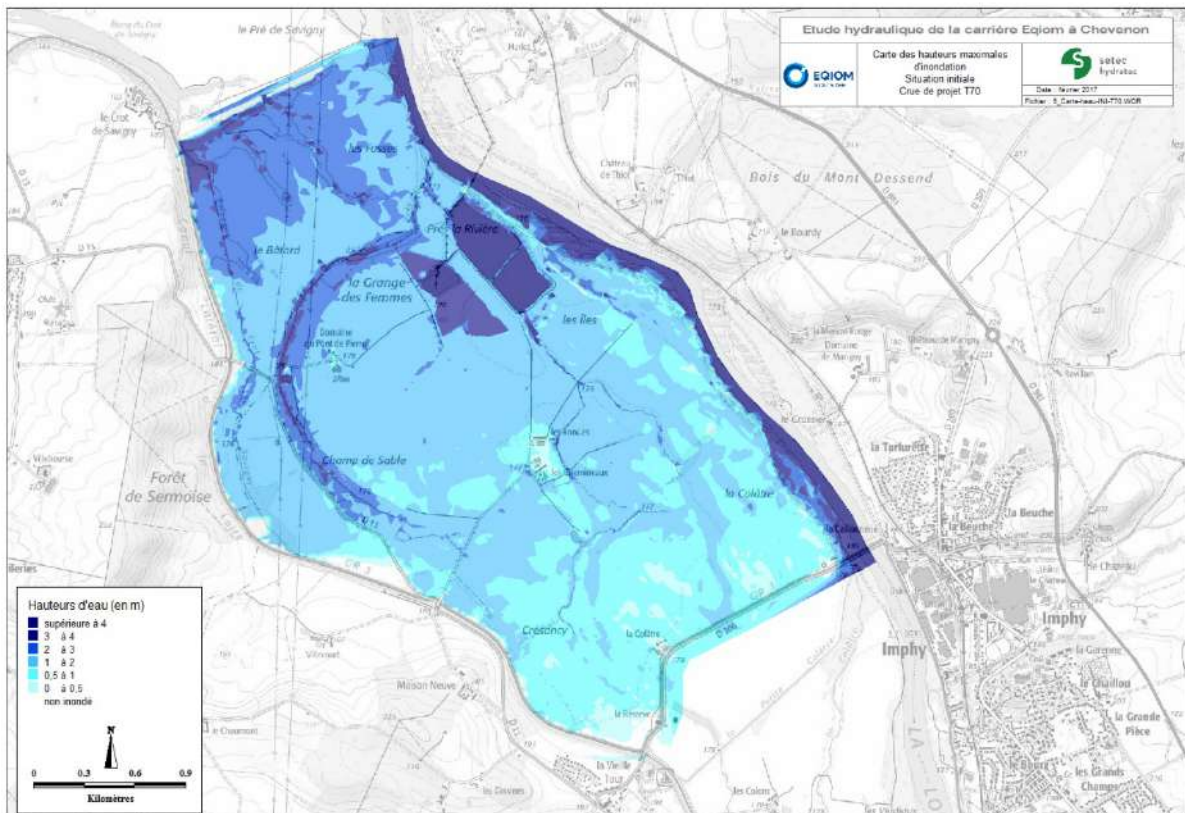


Figure 3-29 : Carte des hauteurs de submersion en situation actuelle pour la crue T70ans

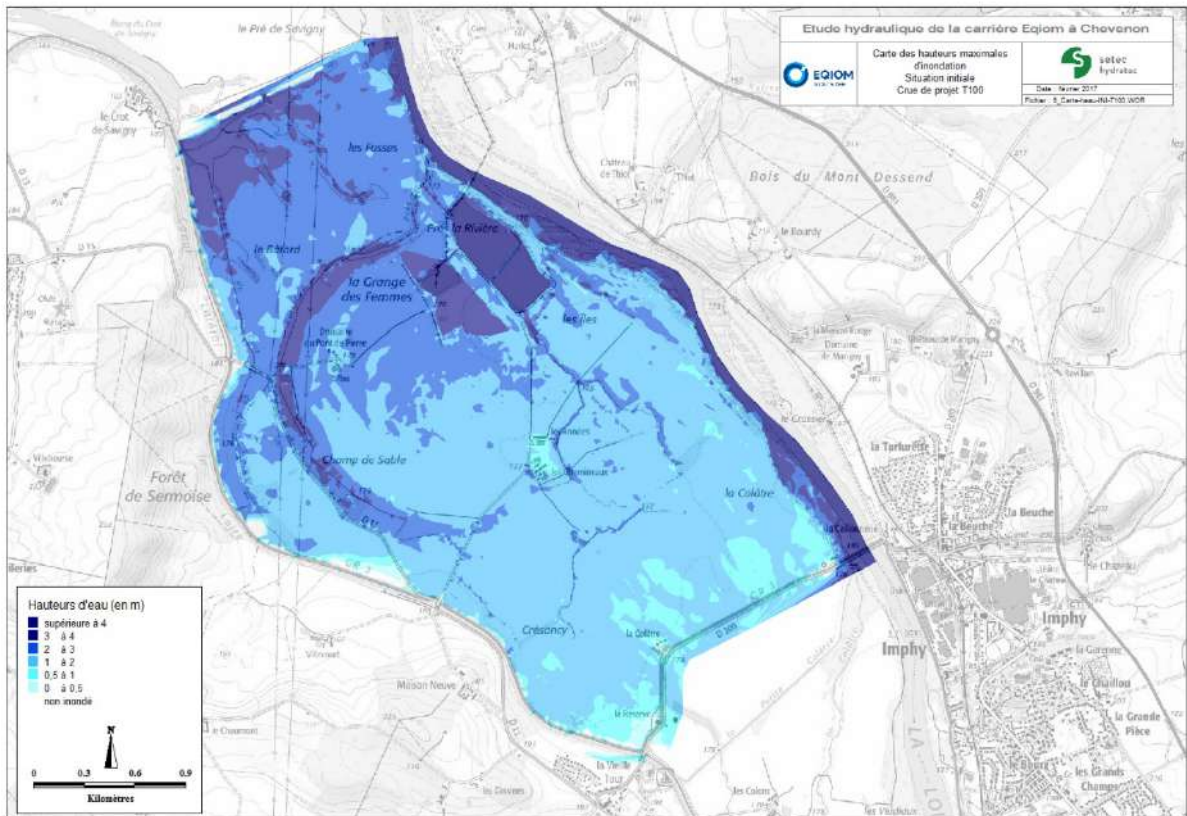


Figure 3-30 : Carte des hauteurs de submersion en situation actuelle pour la crue T100ans

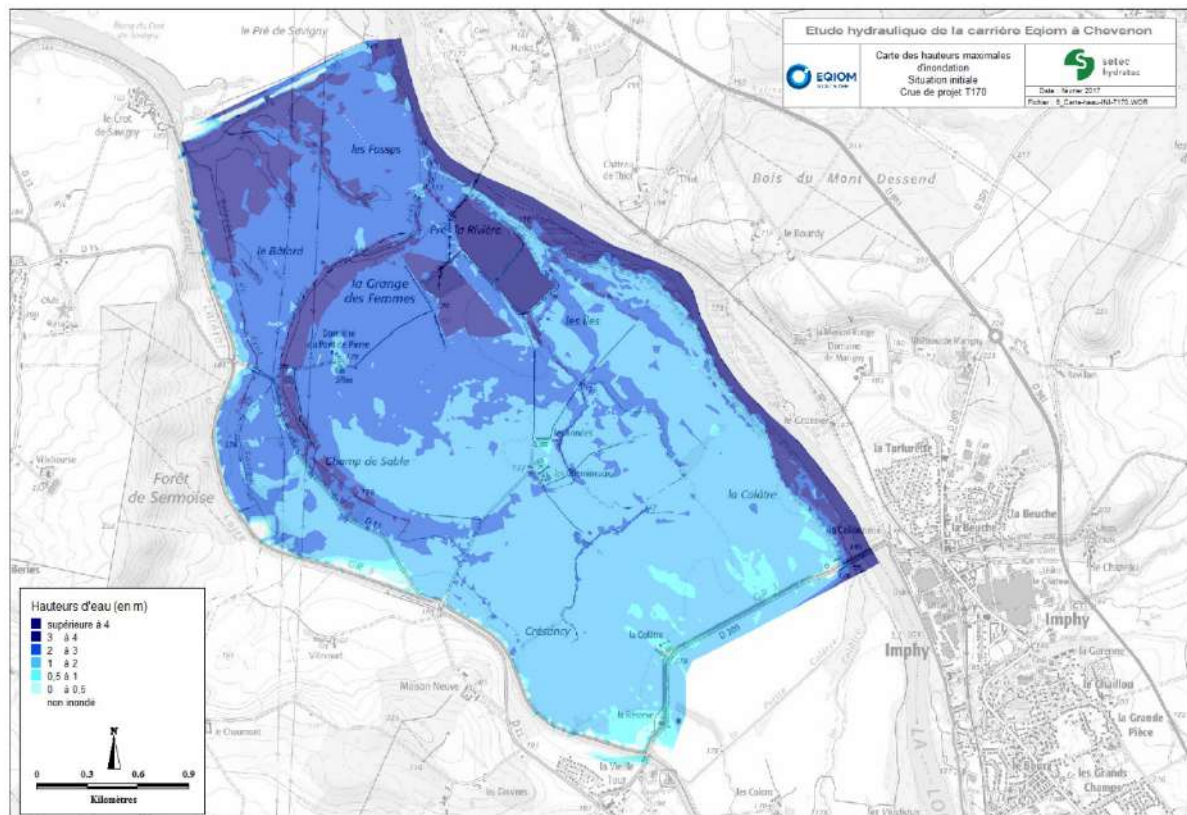


Figure 3-31 : Carte des hauteurs de submersion en situation actuelle pour la crue T170ans

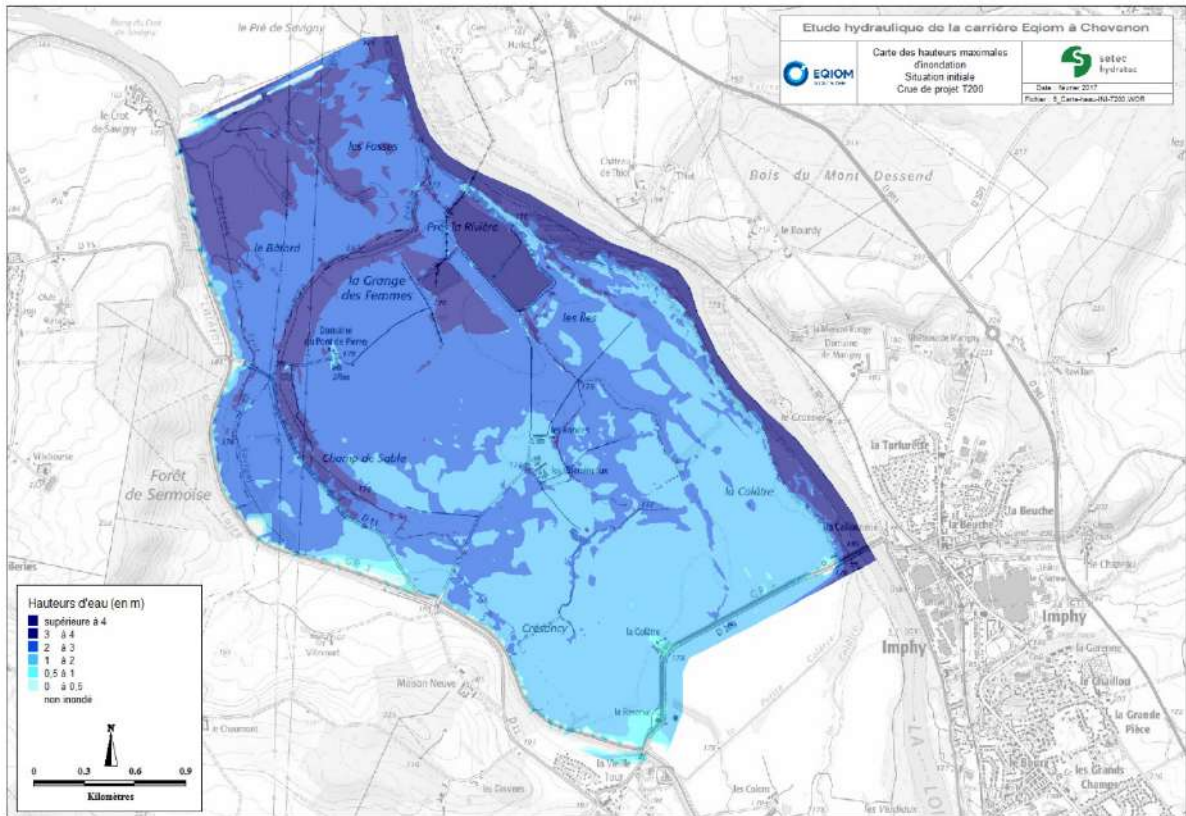


Figure 3-32 : Carte des hauteurs de submersion en situation actuelle pour la crue T200ans

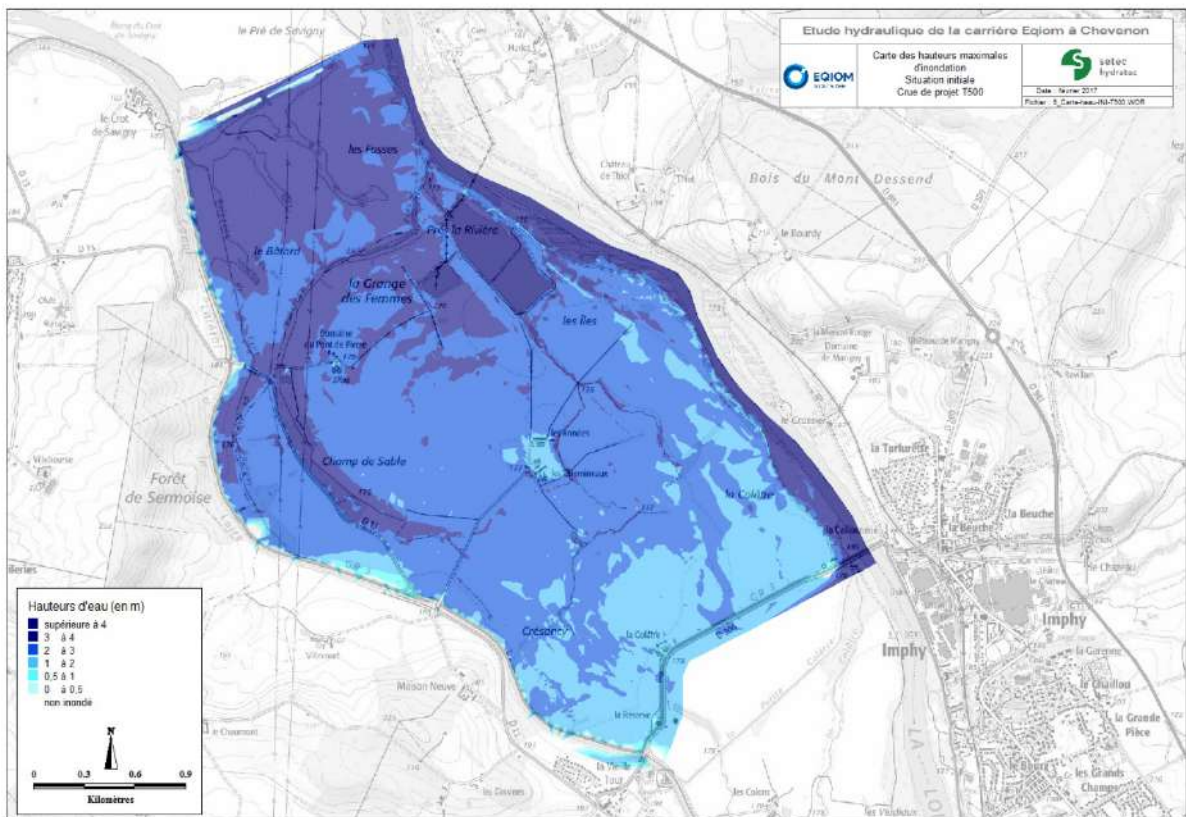


Figure 3-33 : Carte des hauteurs de submersion en situation actuelle pour la crue T500ans

Les mécanismes d'inondation pour les crues de période de retour 50ans à 500ans sont similaires à ceux de la crue de décembre 2003.

Pour les crues de période de retour supérieure à 100ans, les hauteurs d'eau atteignent les 3 mètres au niveau des gravières.

Pour les crues de période de retour supérieure à 200ans, les hauteurs d'eau atteignent les 2 mètres dans le lit majeur inondable.

3.3.3 Répartition des débits

Le tableau suivant présente les débits maximums à l'amont et à l'aval du secteur étudié en distinguant le lit majeur rive gauche du lit mineur et du lit majeur rive droite.

Etat actuel	Débits maximums à l'amont du site (m ³ /s)		Débits maximums à l'aval du site (m ³ /s)	
	Lit mineur + lit majeur RD Q1a	Lit majeur RG Q2a	Lit mineur + lit majeur RD Q1v	Lit majeur RG Q2v
Dec 2003	1 799	363	1 999	161
T 50ans	1 826	385	2 038	176
T 70 ans	1 993	543	2 284	253
T 100 ans	2 283	917	2 697	506
T 170 ans	2 372	1 052	2 820	600
T 200 ans	2 505	1 287	3 022	765
T 500 ans	2 710	1 703	3 332	1 070

Figure 3-34 : Répartition des débits à l'amont et à l'aval du site dans l'état actuel pour les 5 crues étudiées

Le débit Q1a correspond au débit transitant dans le lit mineur de la Loire et en rive droite au droit du pont d'Imphy. Le débit Q2a correspond au débit des écoulements sur la RD200.

Le débit Q2v correspond au débit transitant dans le lit majeur rive gauche à l'aval du site, c'est-à-dire, qui s'écoule sur le chemin du pont des Américains. Le débit Q1v correspond au débit transitant dans le lit mineur de la Loire et en rive droite dans la continuité de ce chemin.

4 ETUDE DE FAISABILITE HYDROGEOLOGIQUE

4.1 DONNEES UTILISEES

La démarche s'est appuyée sur la consultation de la bibliographie existante :

- Cartes géologiques, source BRGM ;
- Données sur le sous-sol, source Banque de données du sous-sol ;
- Etude hydrogéologique et hydraulique de la carrière de Chevenon réalisée par le bureau d'étude Projetec Environnement.
- Un rapport de reconnaissance de sondages (Saint Eloi) – compte rendu d'investigation – Hydrogéotechnique est et centre, 2002 ;
- Des relevés piézométriques mensuels réalisés par Eqiom sur les 9 piézomètres de la carrière depuis septembre 2009 ;
- Les coupes lithologiques des sondages réalisés sur les sites d'exploitation ;
- Les levés piézométriques réalisés par Eqiom en juillet-août 2013.

Par ailleurs, une campagne piézométrique a été réalisée le 25/11/2013 sur les piézomètres de la carrière, des puits privés et sur les piézomètres Lafarge.

4.2 CONTEXTE GEOLOGIQUE

4.2.1 Contexte géologique général

D'après les extraits des cartes géologiques au 1/50 000 de Decize (n°549) et de Sancoins (n°548) (cf. Figure 4-1), le secteur d'étude se situe sur une des larges vallées alluvionnaires de la Loire.

La plaine alluviale est délimitée par l'encaissant essentiellement mésozoïque (aire secondaire). Celui-ci peut s'apparenter à un horst (terme géologique désignant un compartiment soulevé par un ensemble de failles normales conjuguées) délimité par des failles normales orientées NNE-SSW.

A l'ouest de la Loire et au droit du projet, les terrains du secondaire à l'affleurement (du plus ancien au plus récent) sont indiqués ci-dessous avec leurs faciès principaux :

- Toarcien- Aalénien inférieur (**I7-9**) – Jurassique inférieur : couche constituée de marnes et argiles grises d'une épaisseur de 60 m.
- Aalénien supérieur et Bajocien inférieur et moyen (**I9-j1a**) - Jurassique moyen : calcaire dure à « poches argileuses » d'une épaisseur de 5 à 9 m.
- Bajocien supérieur (**j1b**) - Jurassique moyen : niveau constitué d'une alternance de calcaire et de marnes d'une épaisseur de 20 à 30 m.
- Bathonien (**j2**) – Jurassique moyen : Le Bathonien inférieur et moyen est essentiellement marneux. Le Bathonien supérieur débute par des calcaires argileux à qui font suite des marnes bleues (substratum des alluvions au droit du projet). L'épaisseur de la série est estimée à 60 m au moins.

Les hauts versants sont surmontés à certains endroits par la formation des sables et argiles du Bourbonnais (**FL**) composée de sables grossiers, de sables argileux et d'argiles sableuses. Ces dépôts ont une origine fluviale et sont disposés en nappes perchées par rapport à la Loire.

Le secteur d'étude est situé sur la plaine alluviale de la Loire qui est constituée de 3 types de formations alluvionnaires distinctes :

- Les alluvions de terrasses fluviales très anciennes (**Fw**) composées de galets, de graviers et de sables à chailles. Elles constituent, en rive gauche de la Loire, un liseré discontinu qui entaille les sables et argiles du Bourbonnais. Ces terrasses perchées proviennent d'ailleurs du remaniement de la formation des sables et des argiles du Bourbonnais.
- Les alluvions des terrasses fluviales anciennes (**Fx**) composées elles aussi de galets, de graviers et de sables à chailles. Ces terrasses intermédiaires dominent d'une dizaine de mètres le lit actuel du fleuve et sont principalement localisées en rive gauche de la Loire.
- Les alluvions modernes (**Fy-z**) composées de sables graveleux. Cette formation occupe le lit mineur du fleuve et se distingue du lit majeur de par sa composition. Ce faciès meuble, sans matrice argileuse, est constitué de sables principalement siliceux, parfois silicatés.

Le substratum des alluvions est constitué par les marnes du Jurassique moyen.

Des colluvions de versants alimentés par les formations qui composent les coteaux viennent recouvrir par endroits les alluvions anciennes. Ils sont localisés sur les flancs en bas de versants et en bordure des talwegs. Leur composition étant variée, la structure de ces formations est hétérogène.

La coupe géologique en Figure 4-2 intègre les différentes formations présentées ci-dessus, dans un profil ouest-est.

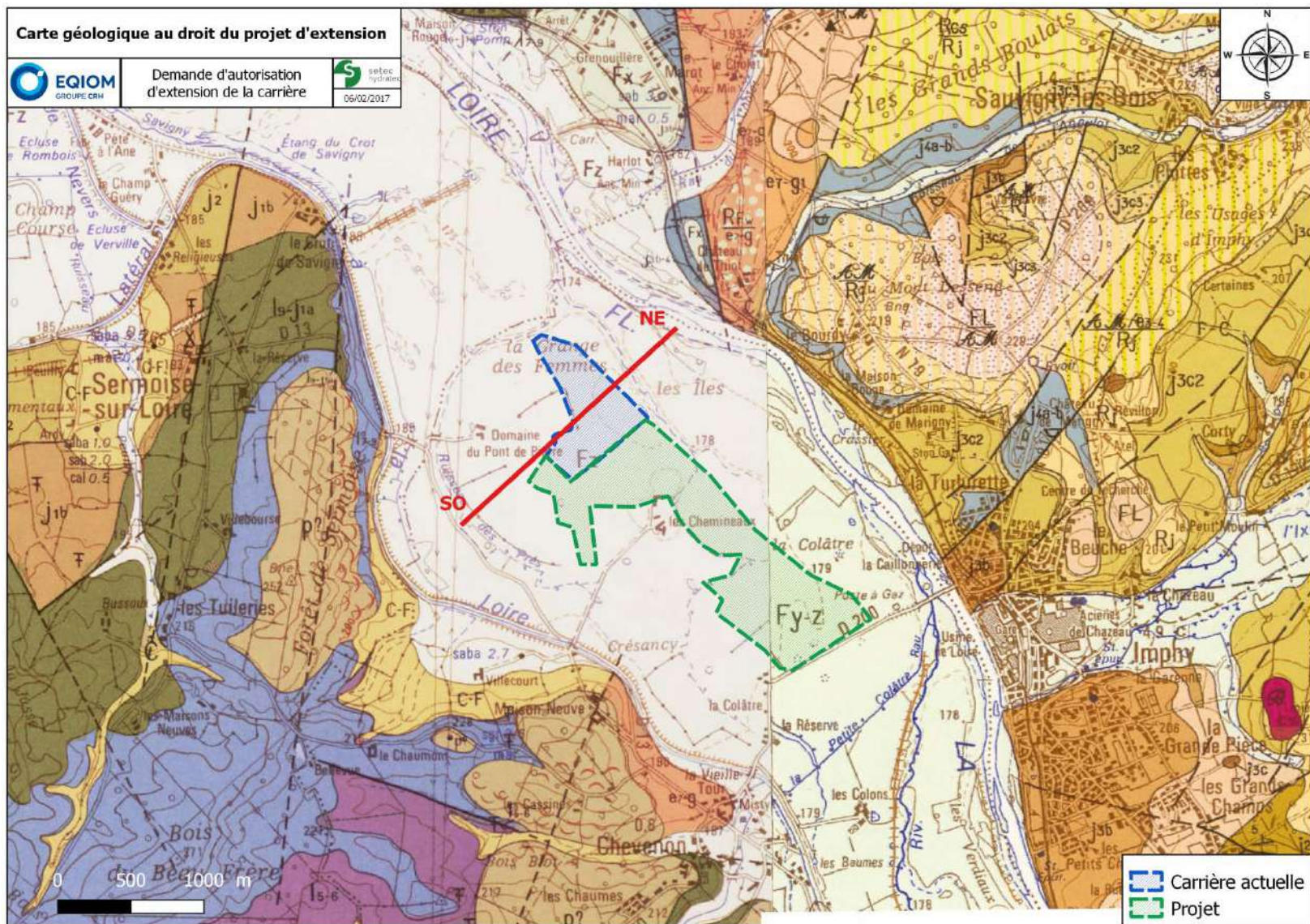


Figure 4-1 : Extraits des cartes géologiques au 1/50000 de Sancoins (n°548) et Decize (n°549) et emplacement de la coupe géologique

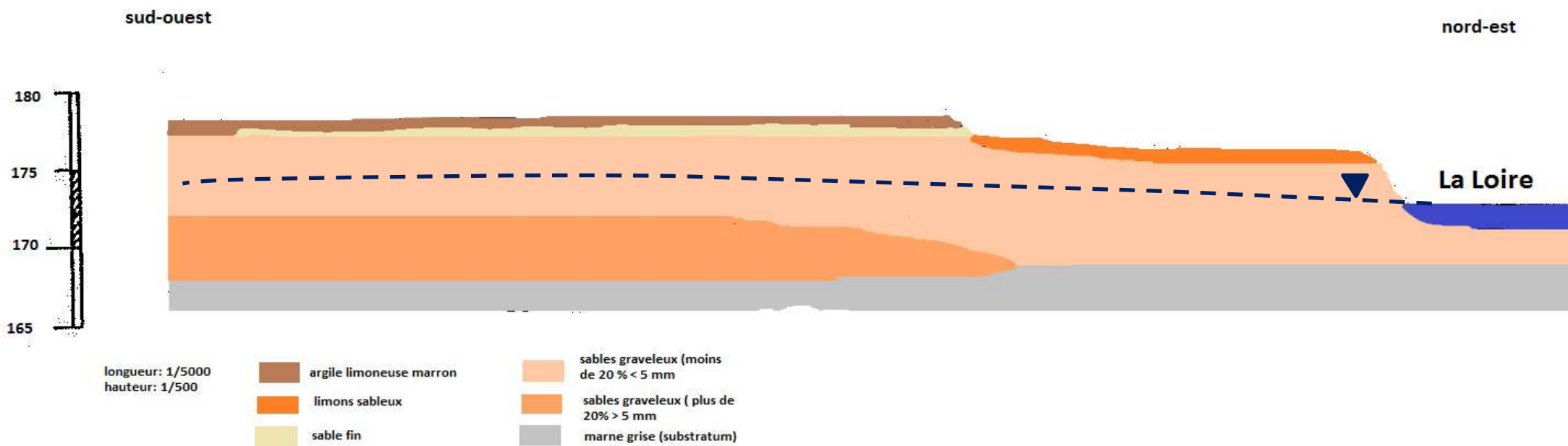


Figure 4-2 : Coupe hydrogéologique schématique

4.2.2 Contexte géologique local

Des sondages d'investigation ont été réalisés par Eqiom sur la carrière actuelle (en 2002) et sur la zone du projet d'étude (en 2012 et 2014). Ces sondages seront utilisés dans le cadre de la modélisation hydrogéologique.

La position des sondages est présentée sur la Figure 4-3.

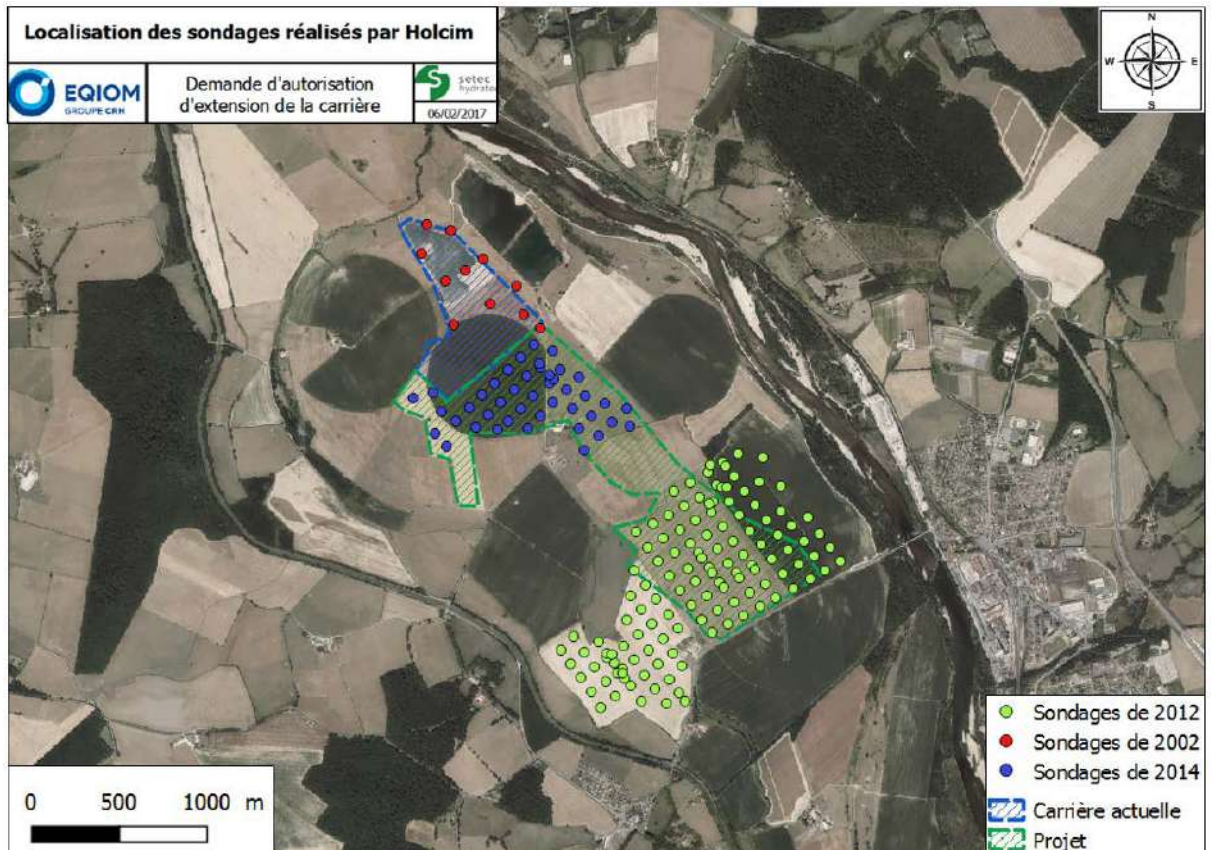


Figure 4-3 : Localisation des sondages

Sur la carrière actuelle, les coupes lithologiques des sondages indiquent de haut en bas :

- un niveau limono-argileux,
- une couche de sables fins à moyens,
- une formation de sables et graviers,
- un substratum marneux.

La découverte a une épaisseur qui varie entre 0.2 et 5.2 m dans la zone sud (sondages 2010).

Une cartographie du toit des alluvions (cf. Figure 4-4) est réalisée à partir :

- des sondages réalisés par Eqiom,
- des sondages issus de la BSS.

Elle permet de déduire les observations suivantes :

- L'altitude du gisement diminue en direction du sud-est vers le nord-ouest ;
- L'altitude moyenne du toit des alluvions au droit du projet est de + 176 m NGF ;
- L'altitude maximale du toit des alluvions se situe entre + 176 et + 178 m NGF dans la zone d'étude au sud-est ;

Une cartographie de l'épaisseur du gisement est ensuite réalisée (cf. Figure 4-5).

Sur l'ensemble de la plaine alluviale du secteur d'étude, deux zones montrent des épaisseurs maximales en alluvions supérieures à 10 m : zone sud-est du projet et zone « carrière actuelle ».

L'épaisseur alluviale moyenne au droit du projet est de 10 m.

La zone où l'épaisseur alluvionnaire minimale est retrouvée (environ 8 m) est située au sud-ouest du projet.

L'épaisseur alluviale est plus importante en bordure de Loire, à l'est, qu'en bordure des coteaux, au sud-ouest (10 m contre environ 5m).

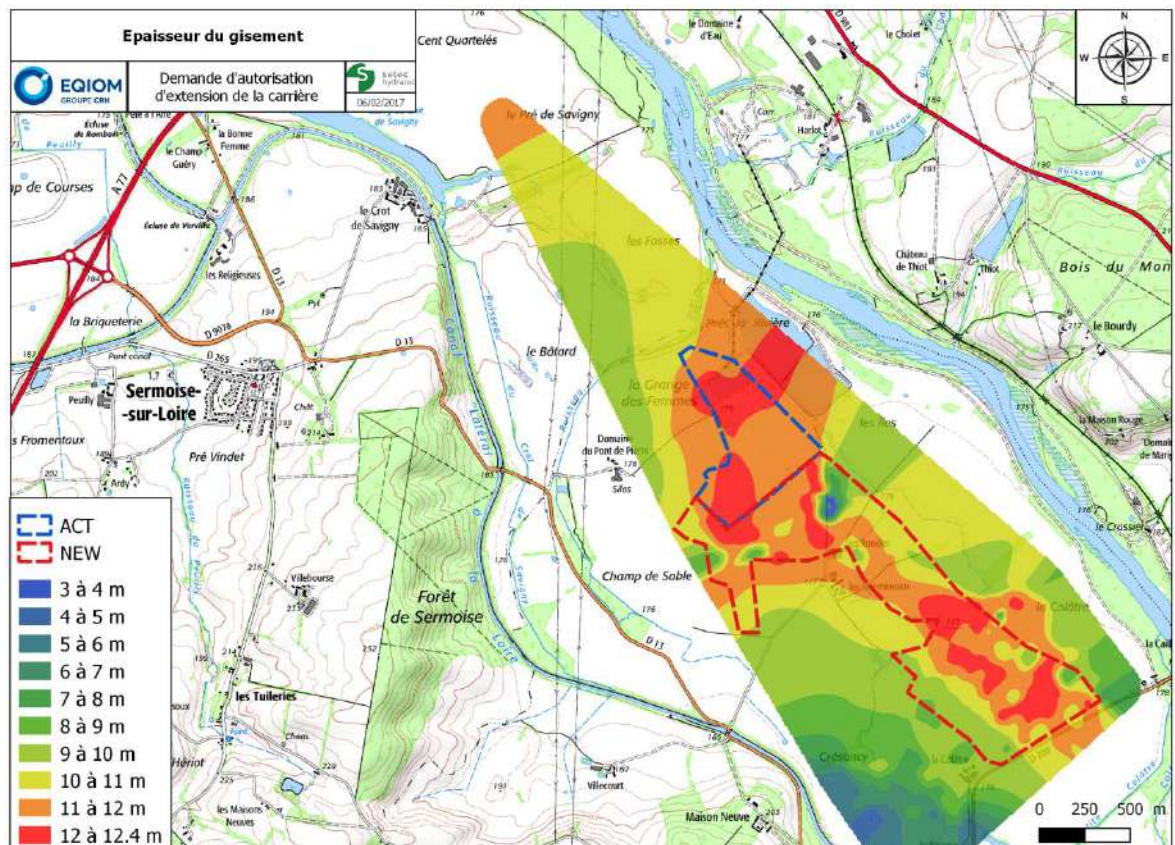


Figure 4-5 : Epaisseur du gisement (en m)

4.3 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

4.3.1 Présentation des masses d'eau

La cartographie des masses d'eau de la Directive Cadre sur l'Eau est présentée ci-dessous.

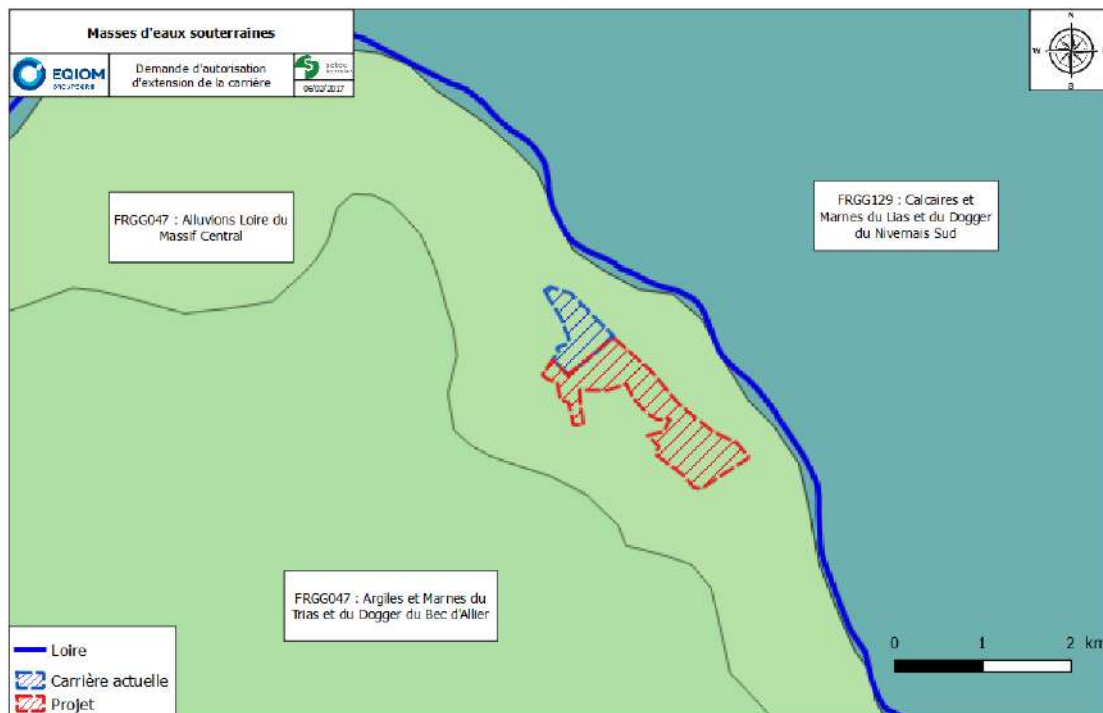


Figure 4-6 - Carte des masses d'eaux souterraines dans notre secteur d'étude

D'après ce référentiel, les masses d'eau au droit du secteur d'étude sont :

- Alluvions Loire du Massif Central (FRGG047)
- Calcaires, argiles et marnes du Trias et Lias du Bec d'Allier (FRGG059)
- Calcaires et marnes du Lias et Dogger du Nivernais Sud (FRGG129)

4.3.2 Données piézométriques générales

Les données piézométriques issues de la bibliographie sont présentées ci-après.

- **Réseau patrimonial national de suivi quantitatif des eaux souterraines (RNESP)**

Le RNESP possède un réseau piézométrique réparti de façon homogène sur le territoire français et permet un suivi piézométrique des différentes masses d'eau.

A l'aide du réseau des piézomètres équipés par le RNESP, il est possible de :

- Connaître les variations piézométriques de la nappe au cours du temps,
- Déterminer le battement moyen de la nappe,
- Distinguer les années humides, les années sèches et les années moyennes et définir les périodes de retour associées.

Le piézomètre du RNESP le plus proche du projet et ayant une chronique piézométrique complète est numéroté 05765X0013/S par la BSS.

Il est situé sur la commune de Vitry-sur-Loire (71) et appartient, d'après le site internet ADES, à la masse d'eau des alluvions de la Loire (FRGG047). Le piézomètre affiche une chronique piézométrique de 1981 jusqu'à ce jour. A noter qu'il n'y a pas eu de mesures entre octobre 1993 et Septembre 2007.

Grâce à cette chronique piézométrique, des courbes statistiques de basses eaux, de hautes eaux et de moyennes eaux peuvent être créées.

Il est ainsi possible de définir le régime hydrométrique de l'année piézométrique dans son ensemble.

En année moyenne le mois d'étiage se produit en août, les hautes eaux ayant lieu en janvier. En année sèche, la période d'étiage s'étale plutôt de juin à juillet. L'amplitude des variations annuelles est de 1.50 m, ce qui correspond à une nappe connectée à sa vallée. La variation maximale du niveau interannuel est 3.50 m.

Ainsi, d'après la Figure 4-7, l'année 1991 peut être considérée comme une année moyenne sur l'ensemble de son cycle (hautes eaux et basses eaux).

L'année 2013, année de référence pour la présente étude, est considérée comme une année humide sur l'ensemble de son cycle.

Enfin, à titre de comparaison, l'année 2011, correspond à une année sèche.

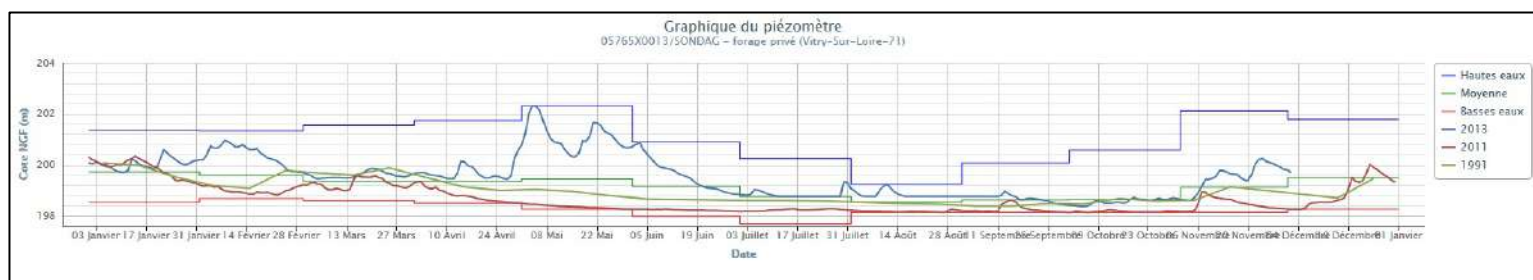


Figure 4-7 : Courbes statistiques du piézomètre 05765X0013/S

Un indicateur BSH permet de définir les périodes de retour des situations hydrogéologiques. Il est calculé à partir des données validées ou en cours de validation pour une période minimale de 10 ans.

supérieur à 10 ans sec		entre 2.5 et 10 ans sec		entre 2.5 ans sec et 2.5 ans humide	entre 2.5 et 10 ans humide		supérieur à 10 ans humide	
supérieur à 20 ans sec	entre 10 et 20 ans sec	entre 5 et 10 ans sec	entre 2.5 et 5 ans sec	entre 2.5 ans sec et 2.5 ans humide	entre 2.5 et 5 ans humide	entre 5 et 10 ans humide	entre 10 et 20 ans humide	supérieur à 20 ans humide

Tableau 4-1 : Codes couleurs de l'indicateur BSH

La fréquence d'occurrence de calcul de l'indicateur pour le mois de novembre 2013 est **entre 2.5 et 10 ans humide**, d'après le Tableau 4-2 et la Figure 4-8.

Par ailleurs, la nappe alluviale en novembre 2013 est **61 cm au-dessus** de la courbe médiane (cf. Figure 4-8).

Code BSS	Libellé	Commune	Date de la 1ère mesure prise en compte pour le calcul	Dernière mesure prise en compte pour le calcul	Nombre de mesure du mois 11/2013	Moyenne du mois 11/2013	Code couleur BSH
02605X0062/M4	Forage privé VITRY-SUR-LOIRE	VITRY-SUR-LOIRE	25/10/1981	30/11/2013	30	199.52	

Tableau 4-2: Indicateur BSH pour le mois de novembre 2013

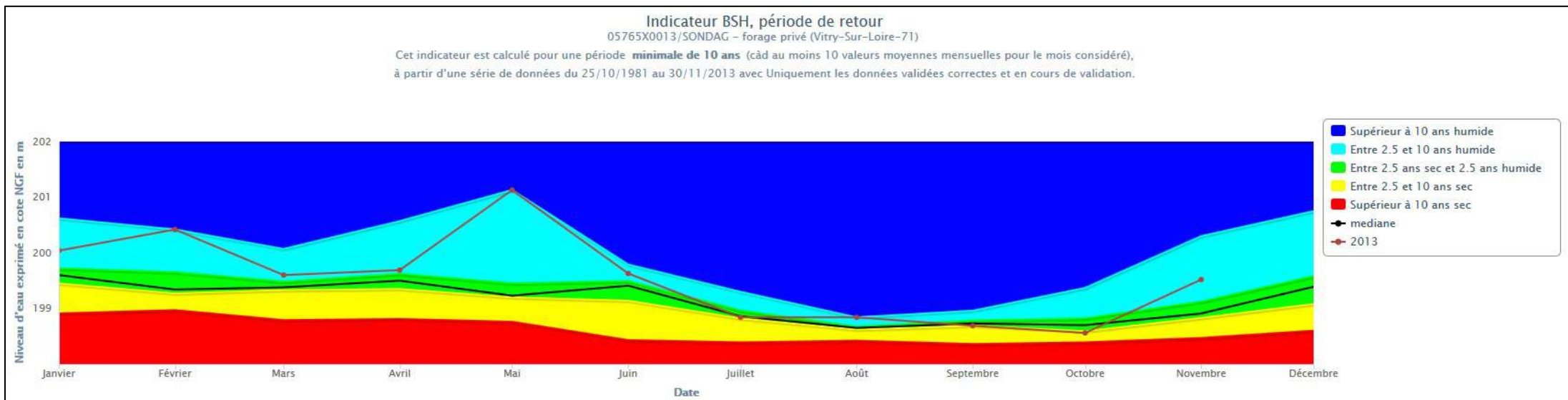


Figure 4-8 - Comparaison des niveaux d'eau entre l'année 2013 et la médiane

4.3.3 Piézométrie de la nappe au droit du projet

Une campagne piézométrique a été réalisée par hydratec en fin de basses eaux (novembre 2013), sur les points suivants:

- les ouvrages de particuliers présents sur les communes de Chevenon et de Sermoise-sur-Loire,
- les piézomètres installés par Lafarge,
- les neuf ouvrages de Eqiom,
- les étangs, les ruisseaux, le canal et la Seine.

Les points de contrôle de la piézométrie et la carte piézométrique réalisée sont présentés en Figure 4-9.

La nappe des alluvions de la Loire est fortement influencée par la présence des plans d'eau existants. Au droit de la carrière actuelle, ceux-ci ont un effet drainant marqué, ce qui signifie que les plans d'eau baissent le niveau de la nappe.

En aval de la carrière actuelle, l'écoulement de la nappe est orienté selon une direction SE-NO, parallèlement à l'écoulement de la Loire.

La nappe au droit du projet est à une altitude comprise entre + 174.5 m NGF et + 175.5 m NFG. La nappe est située à environ 2 m en dessous du terrain naturel.

Des niveaux d'eau ont également été levés sur le canal. Il apparaît que le canal est perché, donc déconnecté de la nappe alluviale. A titre justificatif, sa cote en basses eaux est de + 180.28 m NGF tandis que les interpolations piézométriques de la nappe alluviale dans le même secteur donnent une cote de + 176.14 m NGF.

Par ailleurs, des ouvrages ont été relevés le long de la Loire afin d'établir ou non une relation entre la nappe et la rivière. La cote piézométrique sur PZ9 s'élève à + 175.34 m NGF en novembre 2013. Cette mesure s'apparente à celle relevée non loin de là en bordure de Loire (+ 175.26 m NGF). La nappe est donc en relation directe avec la Loire.

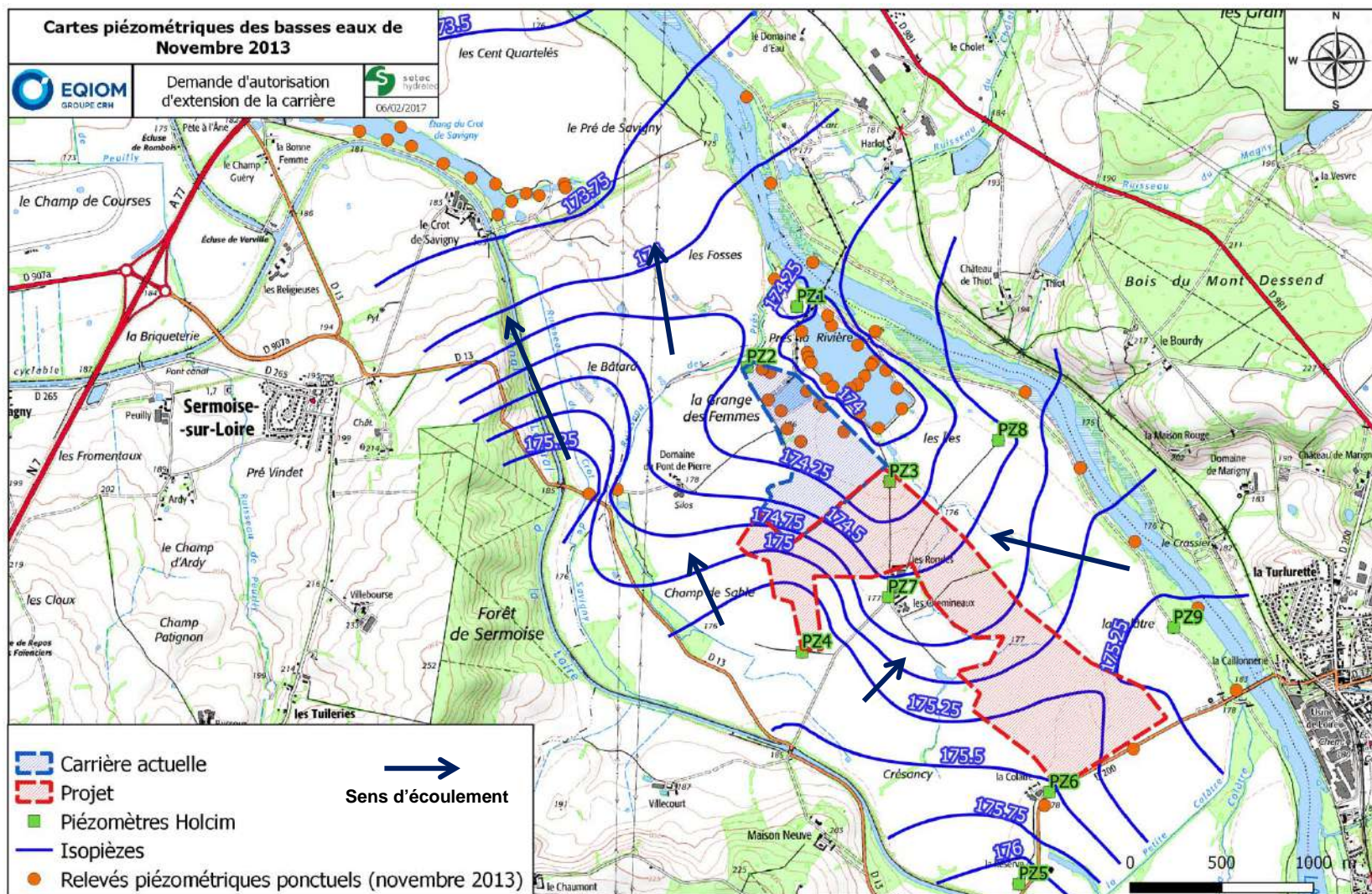


Figure 4-9 : Carte piézométrique de basses eaux 2013 interprétée

4.3.4 Variations piézométriques

Initialement, trois piézomètres ont été implantés en 2009 dans une zone proche de la carrière actuelle. Seuls les PZ2 (aval) et PZ3 (amont) ont fait l'objet d'un suivi irrégulier, pour un total de 22 mesures de septembre 2009 à novembre 2013.

En mars 2013, 6 nouveaux piézomètres ont été installés en amont de la carrière actuelle. Pour ces 6 ouvrages, un suivi régulier a été mis en place (cf. Figure 4-10).

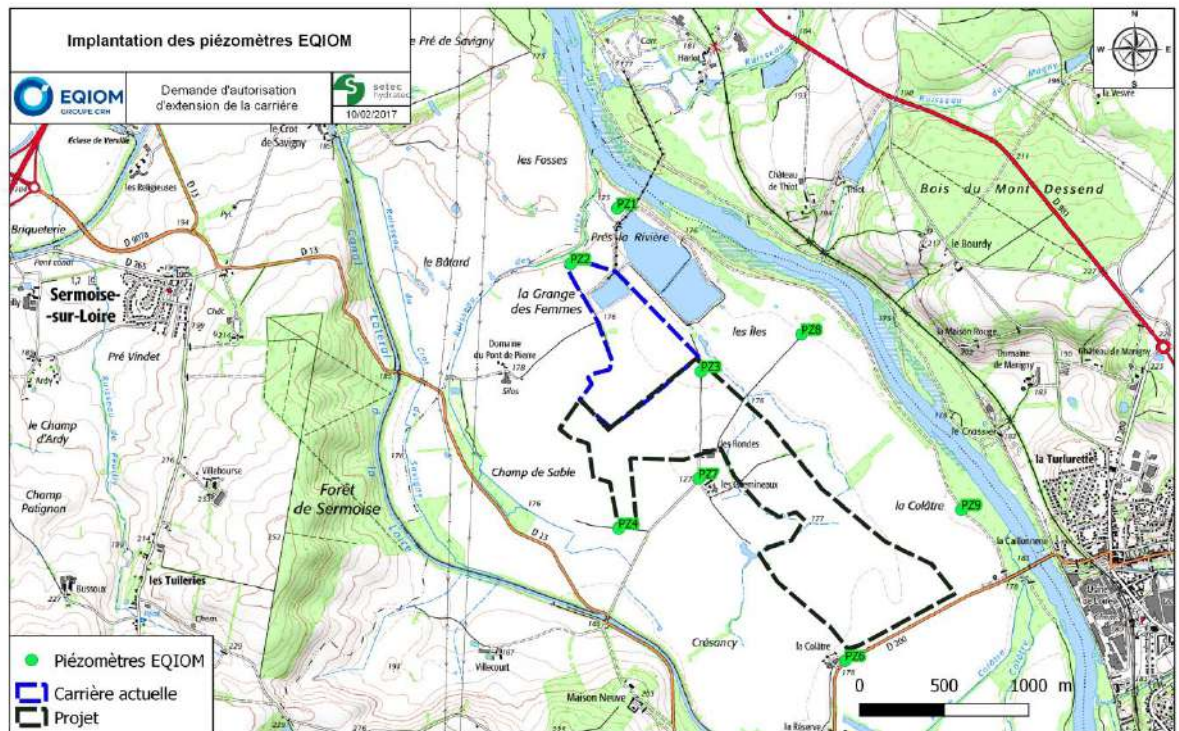


Figure 4-10 - Localisation des piézomètres Eqiom

Le graphique ci-après présente les mesures effectuées par Eqiom sur les piézomètres PZ2 et PZ3. L'irrégularité des mesures ne permet pas de distinguer clairement des périodes hydrogéologiques distinctes.

Cependant, le niveau des piézomètres est nettement à la hausse sur l'ensemble de la période. La hausse est de 2.55 m entre le début et la fin de la chronique pour le PZ2 et de 1.31 m pour le PZ3 : la nappe est en cours de recharge interannuelle.

La variabilité interannuelle de la recharge est très dépendante de la variabilité interannuelle des pluies dans le cas d'une nappe superficielle.

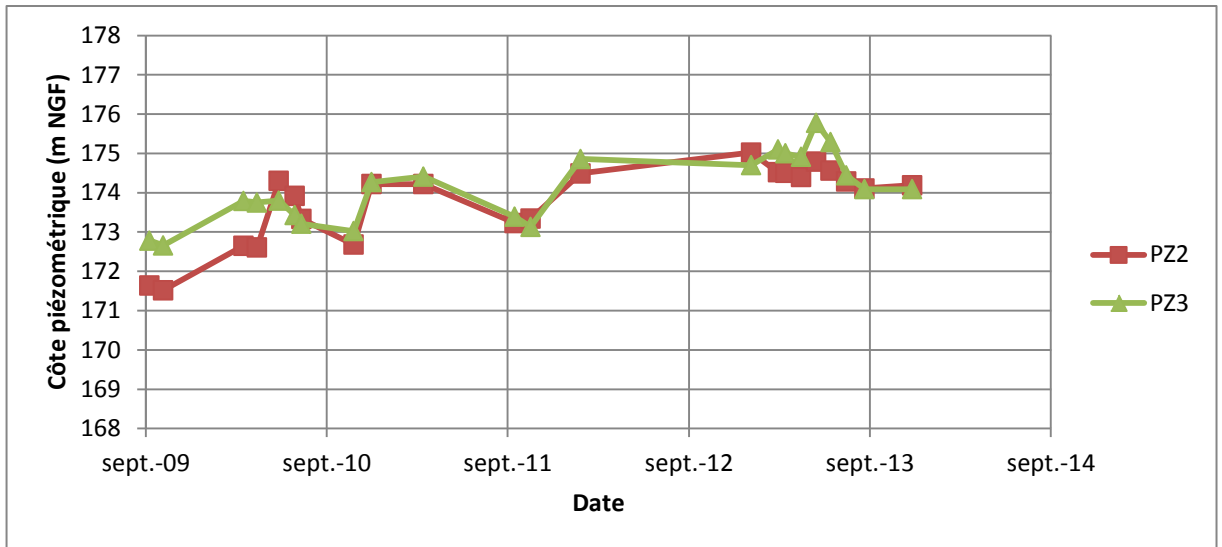


Figure 4-11 - Chronique piézométrique des PZ2 et PZ3

4.3.5 Qualité de la nappe alluviale

Conformément à l'arrêté préfectoral du 23 mars 2006 portant sur le renouvellement d'exploiter la carrière de Chevenon, des analyses d'eau sur la nappe sont réalisées au moins 2 fois par an.

Les 9 piézomètres implantés dans le cadre du projet ont fait l'objet d'analyse d'eau en avril 2014 pour établir un état des lieux initial de la nappe.

Les concentrations obtenues sont comparées aux seuils fixés par l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine.

Les résultats issus des analyses d'eau sont présentés dans le tableau ci-après. Ils sont conformes aux seuils de potabilité.

	PZ1	PZ2	PZ3	PZ4	PZ5	PZ6	PZ7	PZ8	PZ9
PH	7	6.9	7.2	6.6	7.8	7.3	7.1	7.5	7.9
Indice hydrocarbure (mg/l)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
DCO (mgO2/l)	<9	<9	<9	<9	<9	<9	<9	<9	<9
Conductivité (µS/cm)	227	196	625	320	525	433	339	505	642
DBO5 (mgO2/l)	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
MES (mg/l)	<2	<2	<2	/	/	/	/	/	/
Aluminium (mg/l)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.125	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Arsenic (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Cadmium (mg/l)	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Chrome (mg/l)	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Cuivre (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Fer (mg/l)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.1	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Manganèse (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	0.185	0.032	0.016	<0.01	0.01	<0.01
Nickel (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Plomb (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Zinc (Zn)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Sulfates (SO₄²⁻)	15	13	34	22	37	24	22	22	35
Résultats conformes à l'arrêté du 11 janvier 2007									

Tableau 4-3 : Résultats des analyses d'eau de nappe (avril 2014)