

Exploitation des potentialités en termes de champs d'expansion des crues

Zone de Francueil – phase 2 : modélisation

Novembre 2023

Références FISH-PASS

Titre court :	Exploitation des potentialités en termes de champs d'expansion des crues - PHASE 1 Modèles de crues – ZEC de Graçay
Référencement étude :	CEC2022AF05_ZEC-Cher_EPTB Loire

Modifications et mises à jour

Indice d'évolution	Date de version	Chef de projet	Rédaction	Relecture
V1	11/11/2023	Guillaume Goodwin Julien Pineau	Guillaume Goodwin	

Citation

FISH-PASS (2022). Exploitation des potentialités en termes de champs d'expansion des crues - PHASE 2 MODELES DE CRUES – ZEC DE FRANCOUEIL. 35 p.
--

Références client :

Maître d'ouvrage de l'étude :	EPTB Loire
Personne ressource :	Lulla GLACET

Sommaire

Table des matières

Sommaire	3
Table des figures	4
Table des tableaux	5
1 Introduction	6
2 Préambule	7
2.1 ZEC – Définition et cadre réglementaire	7
2.2 Contexte de l'étude.....	8
2.3 Localisation du site d'étude	9
3 Hydrologie pertinente à la modélisation	10
3.1 Contexte hydrologique.....	10
3.2 Chroniques et statistiques de débit.....	11
3.3 Synthèse des événements de crue	14
3.3.1 2014/02/13.....	15
3.3.2 2015/09/18.....	18
3.3.3 2016/05/31.....	19
3.3.4 2020/03/05.....	21
4 Topographie	23
4.1 Données existantes à l'échelle nationale	23
4.2 Campagne de terrain complémentaire pour l'acquisition de données topographiques	25
4.3 Modèle topographique corrigé	27
5 Description du modèle	28
5.1 Géométrie	28
5.2 Données d'entrée	29
5.3 Calage du modèle	30
5.4 Correspondance aux événements de crue.....	31
6 Simulations	32
6.1 Ecrêtement des crues	32
6.2 Cartes de profondeurs d'eau maximales	33
6.2.1 Crue biennale	33
6.2.2 Crue quinquennale – Crue 2014.....	33
6.2.3 Crue décennale – Crue 2016	33
6.2.4 Crue vicennale	34
6.2.5 Crue cinquantennale	34
6.2.6 Crue centennale	34
7 Synthèse	35

Table des figures

Figure 1 : Carte positionnement contextuel ZEC Francueil et ZEC de l'axe Cher	8
Figure 2 : Carte localisation de la zone d'étude	9
Figure 3. Localisation du bassin versant du ruisseau de Francueil au sein du bassin versant du Cher	10
Figure 4. Localisation des stations météorologiques, hydrométriques et piézométriques	11
Figure 5. Chronique de débit sur l'Echandon à Saint-Branches	12
Figure 6. Calcul des débits de crue statistiques (FishPass) et points de donnée observés (HydroPortail)	13
Figure 7. Carte des photographies liées aux crues du ruisseau de Francueil	14
Figure 8. Synthèse hydrologique de l'événement de crue du 13/02/2014	15
Figure 9. et	16
Figure 10. Photographies 1 et 2	16
Figure 11. et	16
Figure 12. Photographies 3 et 4	16
Figure 13. et	16
Figure 14. Photographies 5 et 6	16
Figure 15. et	16
Figure 16. Photographies 7 et 8	16
Figure 17. et	17
Figure 18. Photographies 9 et 10	17
Figure 19. et	17
Figure 20. Photographies 11 et 12	17
Figure 21. et	17
Figure 22. Photographies 13 et 14	17
Figure 23. et	17
Figure 24. Photographies 15 et 16	17
Figure 25. Synthèse hydrologique de l'événement de crue du 18/09/2015	18
Figure 26. et	18
Figure 27. Photographies 17 et 18	18
Figure 28.	18
Figure 29. Photographies 19 et 20	18
Figure 30. Synthèse hydrologique de l'événement de crue du 31/05/2016	19
Figure 31. et	19
Figure 32. Photographies 25 et 27	19
Figure 33. et	20
Figure 34. Photographies 26 et 28	20
Figure 35.	20
Figure 36. Photographies 23 et 24	20
Figure 37. et	20
Figure 38. Photographies 22 et 21	20
Figure 39. Photographie 29 (hors-carte) - D80 vers le Cher	20
Figure 40. Synthèse hydrologique de l'événement de crue du 05/03/2020	21
Figure 41. et	21
Figure 42. Photographies 35 et 34	21
Figure 43.	22
Figure 44. Photographies 33 et 32	22
Figure 45. et	22
Figure 46. Photographies 31 et 30	22
Figure 47. Photographie 36	22
Figure 48: Capteurs ayant servi à l'acquisition des données topographiques	23
Figure 49. Topographie du bassin versant selon le RGEAlt (source IGN)	24
Figure 50. Cartographie des points acquis lors des levés topographiques de terrain	25
Figure 51. Détail des points acquis à la dérivation du ruisseau	26
Figure 52. Détail des points acquis sur le Moulin de Francueil	26
Figure 53. Comparaison du MNT IGN brut (gauche) et du MNT corrigé par les levés de terrain (droite)	27

- Table des tableaux -

Figure 54. Maillage du modèle sur Francueil Les couleurs indiquent l'altitude	28
Figure 55. Résultats de calage des modèles – erreur moyenne = 9cm	30
Figure 56. Correspondance des cotes pour la crue de 2016.....	31
Figure 57. Correspondance des cotes pour la crue de 2020.....	31
Figure 58. Ecrêtement des crues à la sortie du modèle	32

Table des tableaux

Tableau 1. Débits utilisés lors des simulations. Les débits sont exprimés en m ³ /s et représentent, pour les crues, le débit de pointe. Les débits de calage ont été mesurés en février 2023. *La crue de février 2014 correspond à un événement quinquennal et sera donc utilisée lieu et place de ceux-ci. . *La crue de mai 2016 correspond à un événement décennal et sera donc utilisée lieu et place de ceux-ci.	29
---	----

1 Introduction

L'étude porte sur une zone d'expansion de crue (ZEC) située sur la commune de Francueil, dans le département d'Indre-et-Loire (37). Elle vise à fournir aux acteurs locaux des éléments de décision pour la gestion de ce périmètre.

L'étude est séquencée en trois phases :

- Phase 1 : état des lieux et description de la ZEC potentielle ;
- Phase 2 : analyse de la fonctionnalité de la ZEC par une modélisation hydraulique ;
- Phase 3 : proposition des scénarios d'aménagement.

Ce rapport présente les conclusions de la phase 2. Il analyse le fonctionnement actuel de la ZEC à partir d'une modélisation hydraulique.

2 Préambule

2.1 ZEC – Définition et cadre réglementaire

La circulaire du 24 janvier 1994 relative à la définition des inondations et à la gestion des zones inondables définit la notion de « Zones d'Expansion de Crues » (ZEC). Il s'agit de « *secteurs non ou peu urbanisés et peu aménagés, et où la crue peut stocker un volume d'eau important, comme les zones naturelles, les terres agricoles, les espaces verts urbains et périurbains, les terrains de sports, les parcs de stationnement...* ». Ces zones « *jouent un rôle déterminant en réduisant momentanément le débit à l'aval, mais en allongeant la durée de l'écoulement. Les crues peuvent ainsi dissiper leur énergie au prix de risques limités pour les vies humaines et les biens. Ces zones d'expansion jouent aussi le plus souvent un rôle important dans la structuration du paysage et l'équilibre des écosystèmes [...]. Il faut aussi éviter tout endiguement ou remblaiement nouveau qui ne serait pas justifié par la protection de lieux fortement urbanisés. Ces aménagements sont susceptibles d'aggraver les risques en amont et en aval.* »

L'enjeu de préservation des zones d'expansion de crue est reconnu comme prioritaire dans les documents suivants :

- Le SDAGE Loire-Bretagne 2022-2027, à travers son orientation fondamentale « *Préserver les capacités d'écoulement des crues ainsi que les zones d'expansion des crues et des submersions marines* ». Le concept de ZEC est l'un des éléments du SDAGE visant à la gestion équilibré et durable de la ressource en eau, tout en prenant en compte les adaptations nécessaires au changement climatique.
- Le Plan de Gestion du Risque Inondation (PGRI) Loire-Bretagne 2016-2021, à travers son objectif de « *préservation des capacités d'écoulement des crues ainsi que des zones d'expansion des crues* ».
- Le Programme Opérationnel Interrégional (POI) FEDER Bassin de la Loire 2014-2020, qui précise que la préservation, la reconquête et la gestion des ZEC relèvent d'une action interrégionale de première importance, au nom de la solidarité amont-aval.

Par ailleurs, la Commission Locale de l'Eau (CLE) du SAGE Cher aval, à travers son Plan d'Aménagement et de Gestion Durable (PAGD), préconise l'identification, la protection et la gestion des ZEC (disposition 16).

2.2 Contexte de l'étude

De septembre 2016 à mars 2018, l'Établissement public Loire a conduit, à l'échelle du bassin de la Loire, une analyse des potentialités en termes de champs d'expansion de crues, dans une optique de réduction du risque inondation. L'analyse a permis d'identifier 6 300 ZEC potentielles.

Dans la continuité de ces travaux, l'Établissement a réalisé des études « zooms », afin d'apprécier localement le potentiel et la faisabilité d'aménagement des ZEC pré-identifiées. La ZEC de Francueil n'est pas concernée par l'un de ces « zoom ». Toutefois, la zone d'étude constitue un espace d'expansion de crue, avec une capacité de stockage au sein d'un espace naturel. Ce site peut améliorer la situation localement, en amont immédiat du bourg de Francueil, exposé à plusieurs reprises à des épisodes de crues. Plus largement, il peut contribuer à limiter le risque inondation sur l'axe Cher (proximité de l'étang de Brosse, de Chenonceau et de l'agglomération de Tours).

Cette étude localisée est motivée par :

- L'occurrence de plusieurs épisodes de crues ayant causé des inondations dans le bourg de Francueil ;
- La présence d'un complexe hydraulique et de la ramification du réseau hydrographique du Moulin neuf (bief et bras de décharges), ainsi que l'existence d'un plan d'eau communal ;
- Le classement Espace Naturel Sensible (ENS) de la zone, et la prédominance d'espaces humides ;
- La volonté de préservation et de mise en valeur de cet espace naturel (sentier pédagogique, protection de la biodiversité).
- Le projet de réaménagement à des fins de restauration des fonctionnalités du réseau hydrographique et de la zone humide.

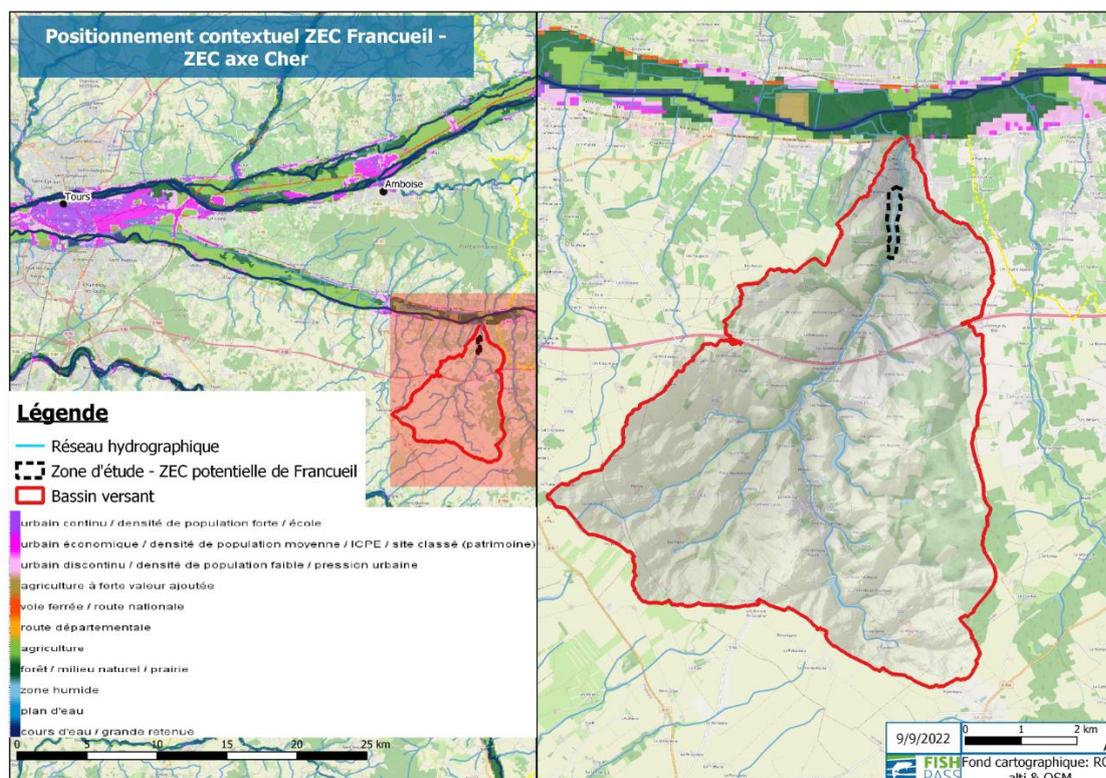


Figure 1 : Carte positionnement contextuel ZEC Francueil et ZEC de l'axe Cher.

2.3 Localisation du site d'étude

La zone d'étude correspond à la pré-localisation de la ZEC. Le périmètre est entièrement compris au sein de la commune de Francueil. Sa superficie est de 22 hectares.

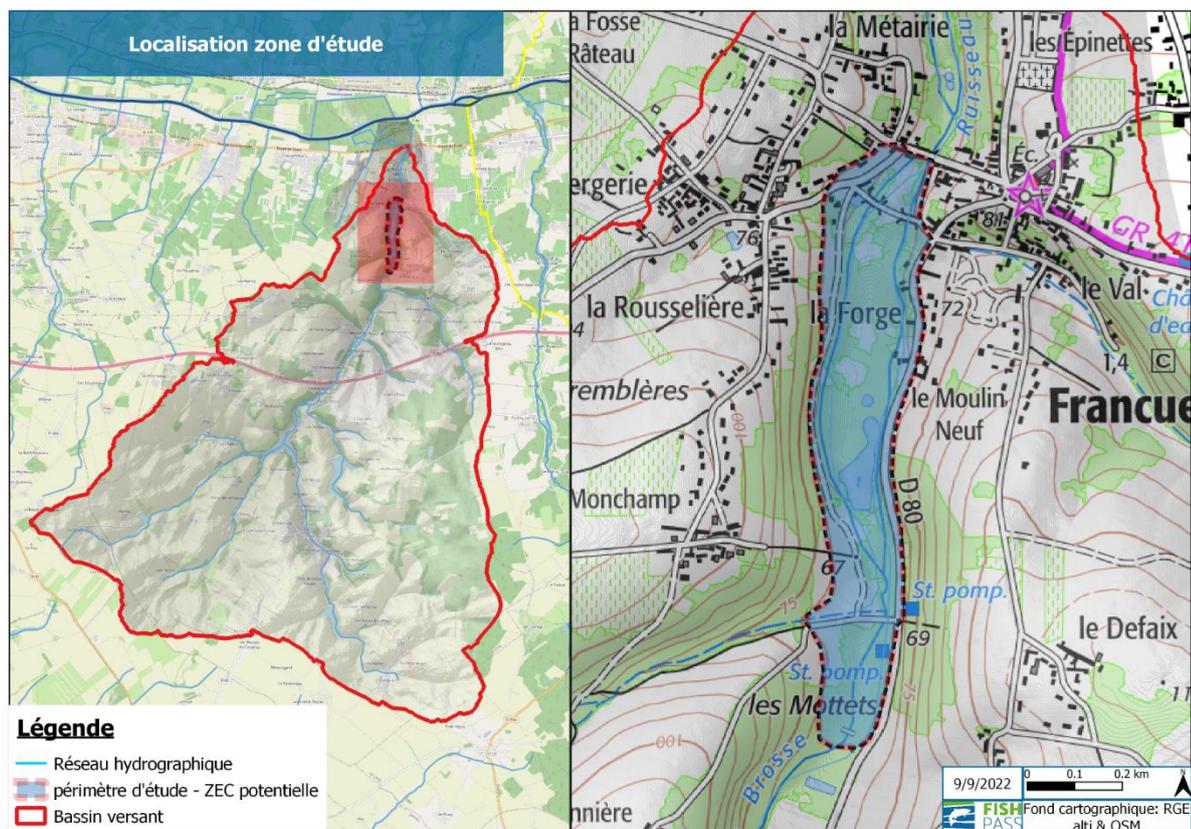


Figure 2 : Carte localisation de la zone d'étude.

3 Hydrologie pertinente à la modélisation

3.1 Contexte hydrologique

Le ruisseau de Francueil est un affluent direct du Cher dans sa partie aval (Figure 3). Son bassin versant a une superficie d'environ 45 km².

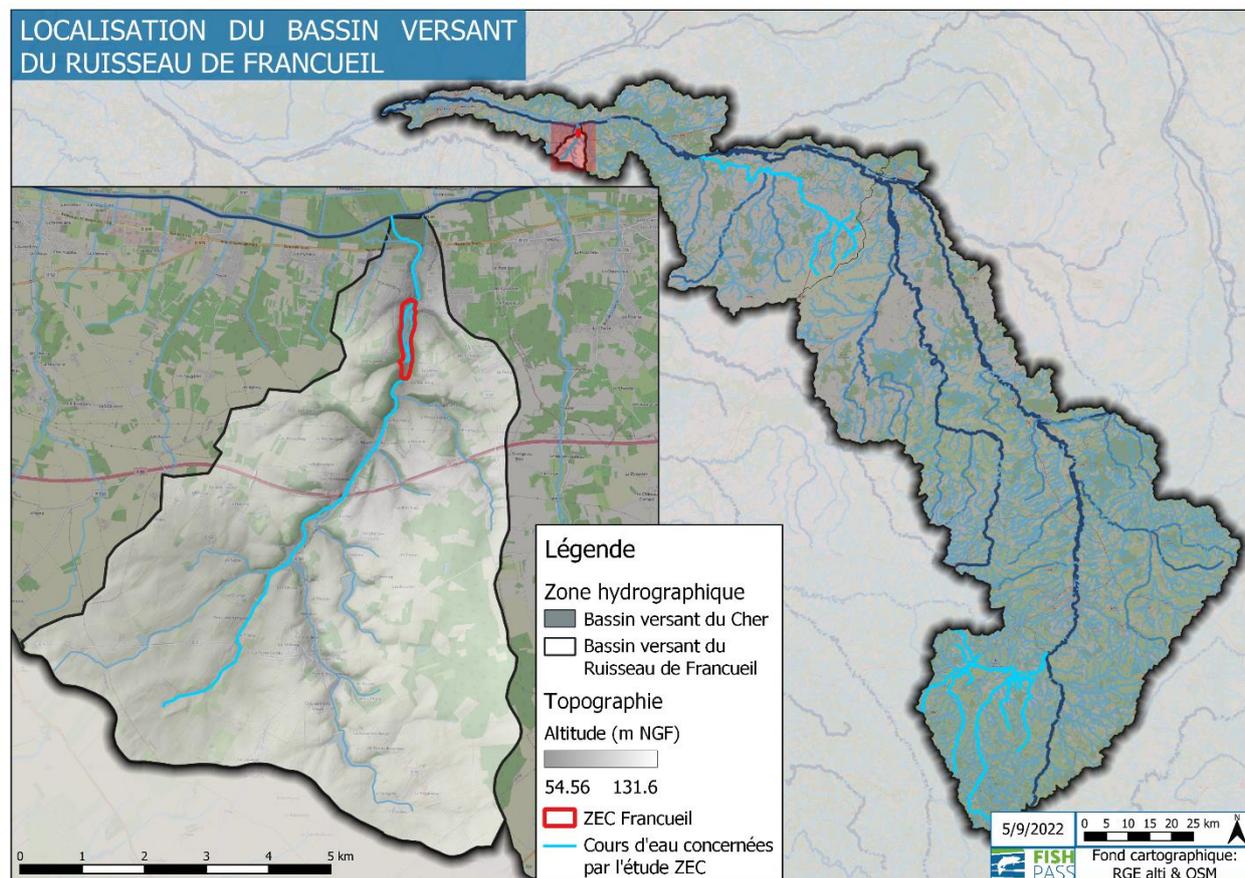


Figure 3. Localisation du bassin versant du ruisseau de Francueil au sein du bassin versant du Cher

3.2 Chroniques et statistiques de débit

Le ruisseau de Francueil, ne présente aucune instrumentation utile à la détermination de sa réponse hydrologique (chroniques de pluies, de hauteurs d'eau ou de débits).

Les chroniques pertinentes ont donc été collectées au niveau de stations de mesures à proximité (Figure 4) :

- Chroniques de débits mesurés à la station hydrométrique de l'Echandon à Saint-Branchs. Les données proviennent d'HydroPortail. L'Echandon, malgré son bassin versant de plus grande taille (127km² à la station), est le plus proche du ruisseau de Francueil présentant une géométrie similaire : il est donc le plus susceptible de recevoir des précipitations comparables et d'y réagir, à son échelle, de façon similaire.
- Chroniques de débits simulés : données LOIEAU le long du bassin du ruisseau de Francueil. La méthodologie utilisée est disponible en ligne (<https://doi.org/10.1051/lhb/2020034>).

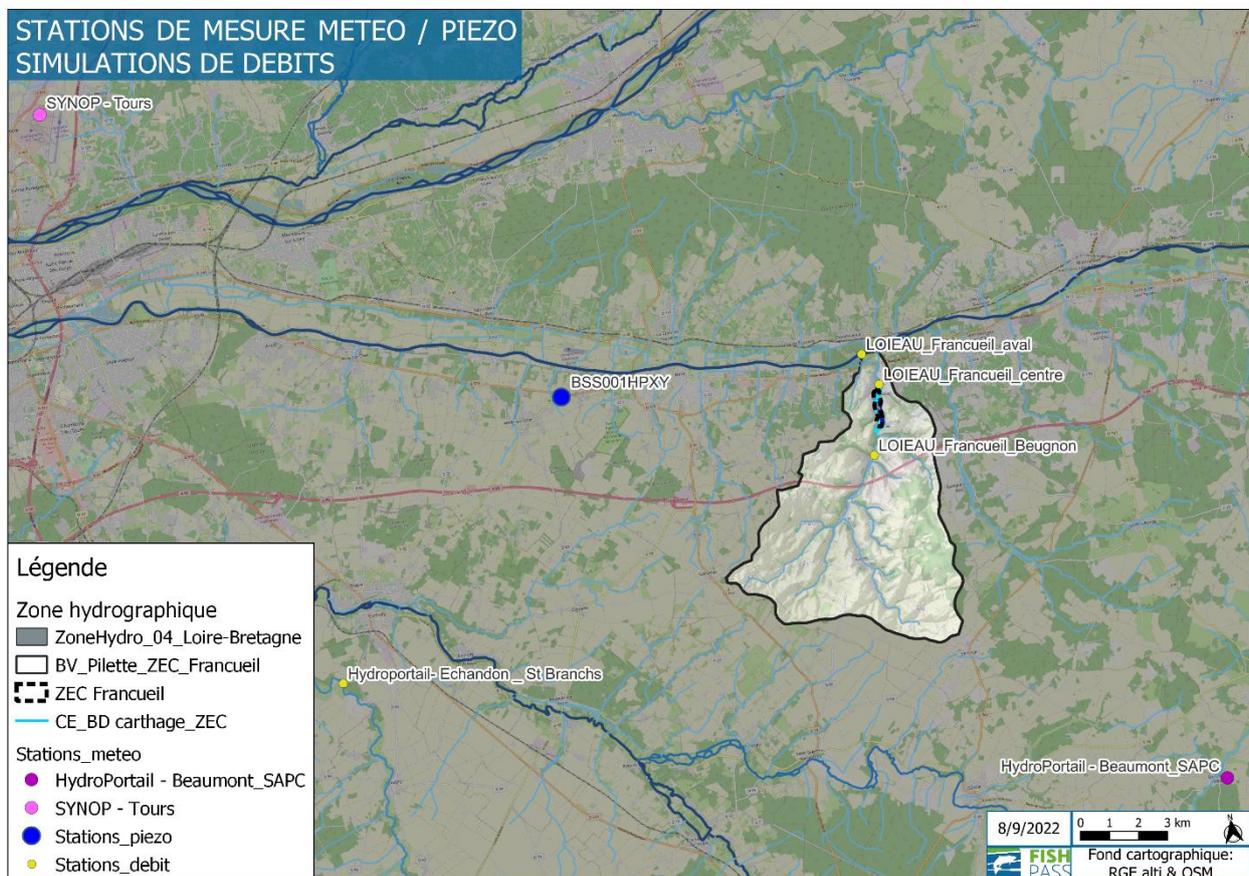


Figure 4. Localisation des stations météorologiques, hydrométriques et piézométriques

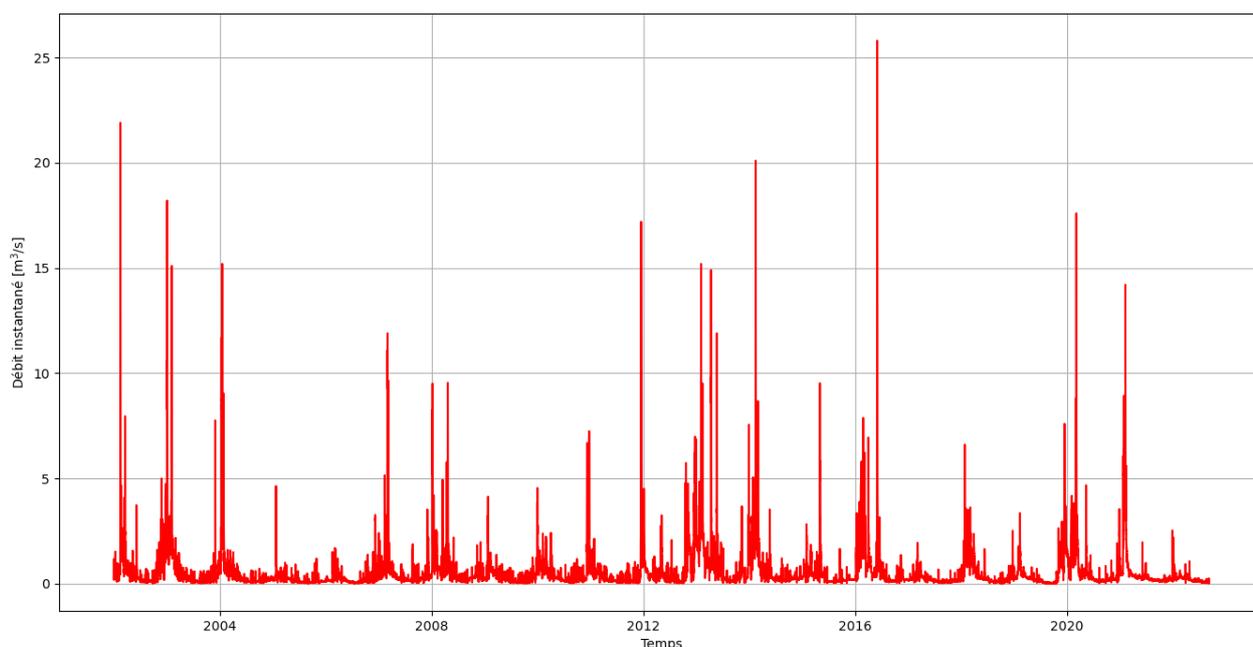


Figure 5. Chronique de débit sur l'Echandon à Saint-Branchs

Les débits mensuels associés sont les suivants pour l'Echandon :

	QmM Débit moyen mensuel (en m ³ /s)	Qsp Débit spécifique (en l/s/km ²)
Janvier	1,14	9,0
Février	1,39	10,9
Mars	1	7,9
Avril	0,72	5,7
Mai	0,593	4,7
Juin	0,318	2,5
Juillet	0,224	1,8
Août	0,144	1,1
Septembre	0,186	1,5
Octobre	0,3	2,4
Novembre	0,438	3,4
Décembre	0,732	5,8
Année	0,595	4,7

Les débits de crue statistiques sont les suivants :

(51 points de donnée)	Débits HydroPortail (m3/s)	Débits calculés FishPass (m3/s)
Biennale (médiane)	10,9	10.805
	[8,62 ; 13,5]	[8.08 ; 13.8]
Quinquennale	19,5	19.44
	[15,6 ; 23,8]	[14.6 ; 24.7]
Décennale	25,1	25.137
	[20,4 ; 30,7]	[19 ; 31.9]
Vicennale	30,6	30.6
	[24,6 ; 37,5]	[21.2 ; 38.8]
Cinquantennale	37,7	37.668
	[30,1 ; 46,3]	[28.6 ; 47.6]
Centennale	n/a	42.964
		[32.5 ; 54.4]

Ces débits sont calculés avec les méthodes de Gumbel et Gringorten, avec un coefficient A = 0.44. Dans le cadre de la modélisation, les valeurs calculées par FishPass sont utilisées comme débits de crue de pointe. Le calcul du débit de pointe de crue centennale est réalisé moyennant une conversion liée à la surface du bassin versant (cf. débits d'entrée).

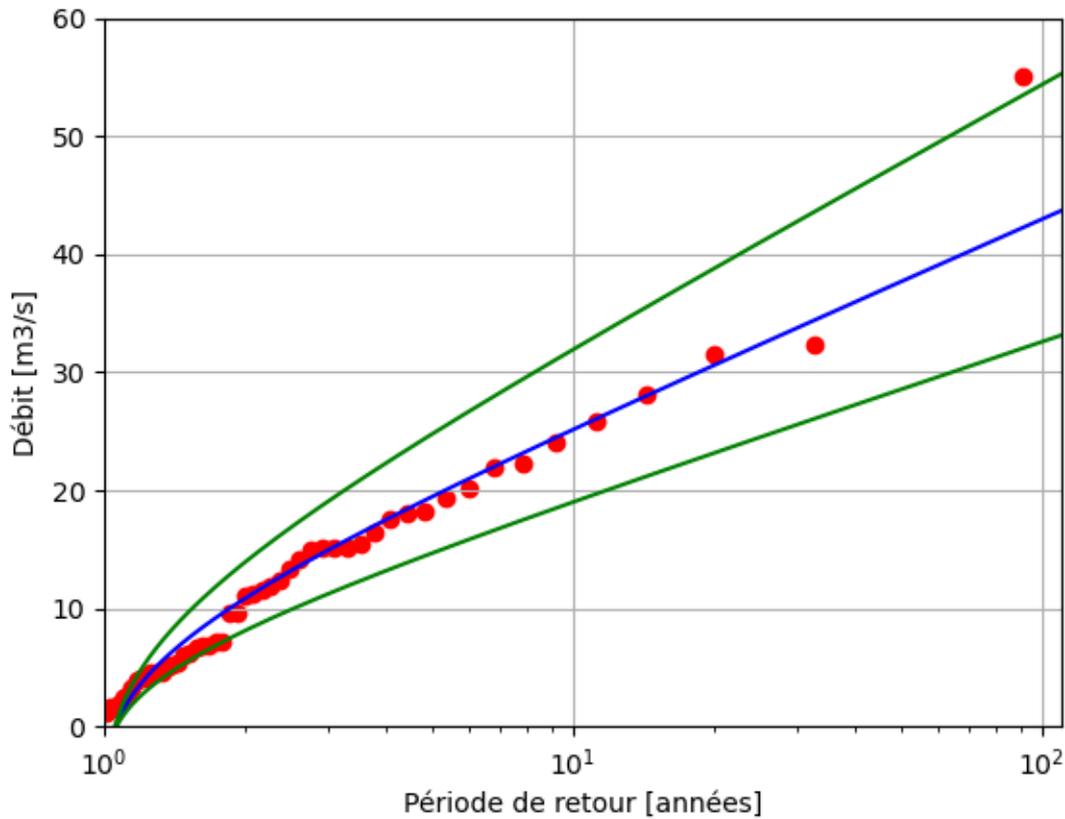


Figure 6. Calcul des débits de crue statistiques (FishPass) et points de donnée observés (HydroPortail)

3.3 Synthèse des événements de crue

Afin de faire fonctionner un modèle hydraulique, il est nécessaire de le calibrer avec des données réelles, constatées lors d'épisodes de crues. A cet effet, les repères de crue et des photographies permettent de collecter certaines informations utiles :

- Niveau d'eau sur une infrastructure pouvant faire l'objet d'un levé topographique ;
- Niveau d'eau dans un cours d'eau pouvant faire l'objet d'un levé topographique / montrant le non-débordement pour un événement donné ;
- Étendue d'eau non ou peu courante permettant de cartographier une étendue inondée ;
- Conditions d'écoulement (embâcles, rupture d'ouvrage...).

La Figure 7 recense les photographies fournies par les services techniques de la mairie de Francueil concernant les événements de crue marquants.

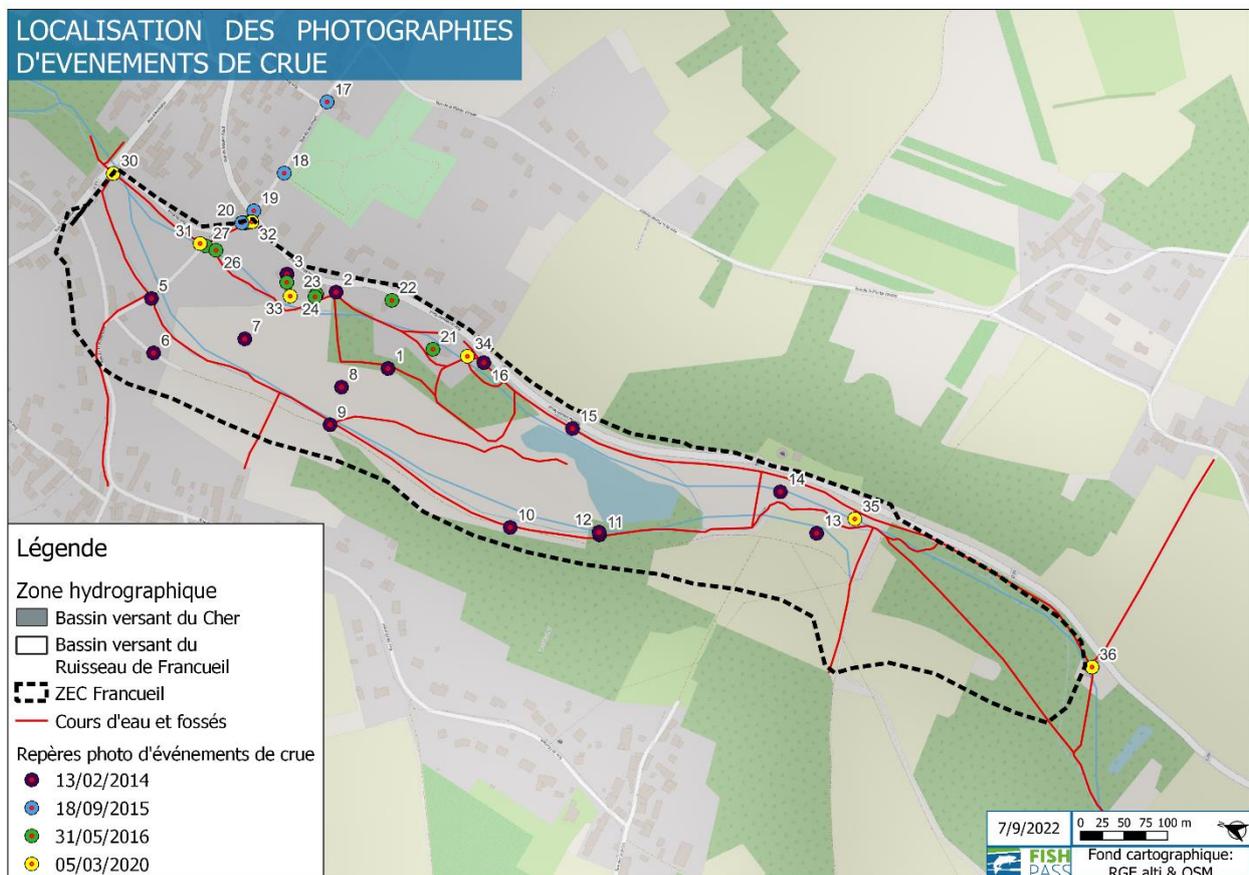


Figure 7. Carte des photographies liées aux crues du ruisseau de Francueil

3.3.1 2014/02/13

La crue du 13/02/2014 est caractérisée par de forts débits de pointe : autour de $10\text{m}^3/\text{s}$ sur le ruisseau de Francueil à l'aval de la ZEC (Figure 8). Cet événement correspond à des niveaux de nappes hauts (45m NGF). Des précipitations de plus de 4 heures, avec un cumul de précipitation horaire avoisinant 10mm à l'aéroport de Tours, ont probablement donné lieu au pic de crue. La décrue a été retardée par un événement pluvieux de plus de 25mm. Le retour à un débit légèrement supérieur au débit moyen mensuel ($0.52\text{m}^3/\text{s}$, voir fiche LOIEAU BNBV_LO11837) a lieu près de 4 jours plus tard. Cette crue présente une documentation photographique particulièrement fournie et couvrant l'intégralité de la ZEC (Figure 7). A ce titre, cet événement sera utilisé pour calibrer le modèle hydraulique.

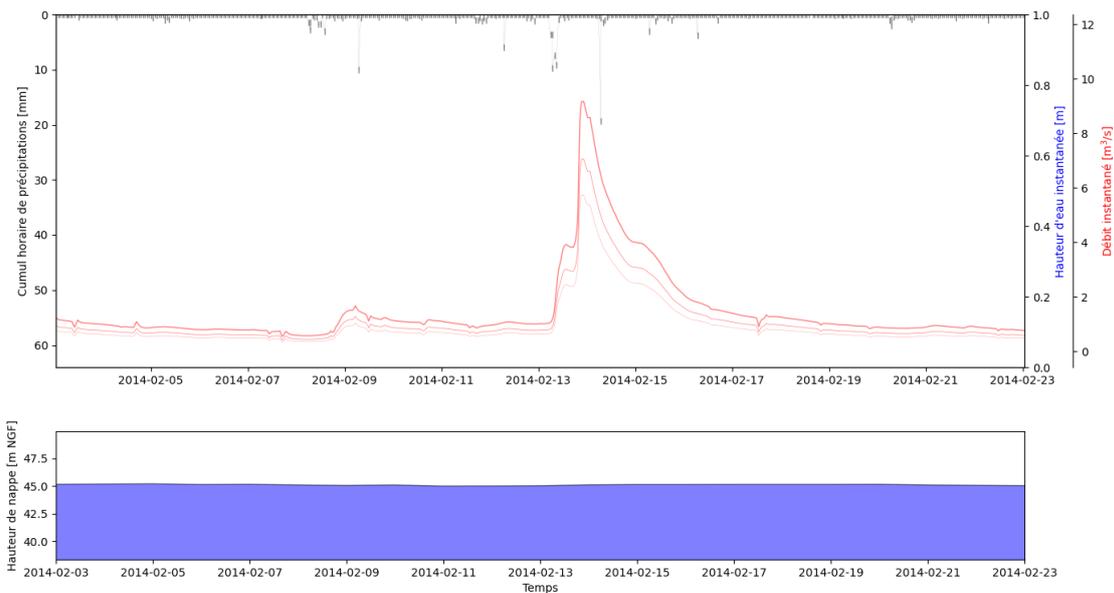


Figure 8. Synthèse hydrologique de l'événement de crue du 13/02/2014

- Hydrologie pertinente à la modélisation -



Figure 9. et Figure 10. Photographies 1 et 2



Figure 11. et Figure 12. Photographies 3 et 4



Figure 13. et Figure 14. Photographies 5 et 6



Figure 15. et Figure 16. Photographies 7 et 8

- Hydrologie pertinente à la modélisation -



Figure 17. et Figure 18. Photographies 9 et 10



Figure 19. et Figure 20. Photographies 11 et 12



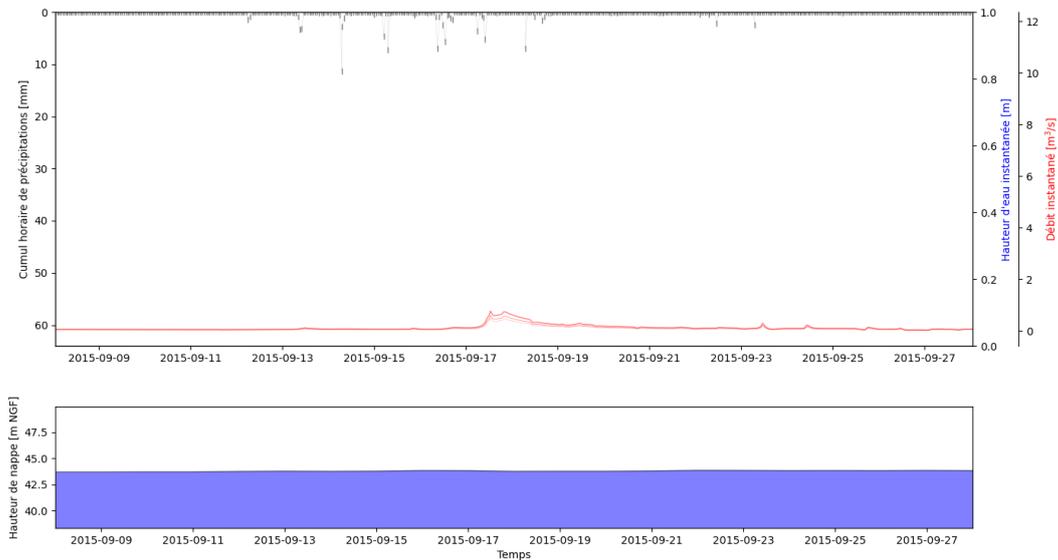
Figure 21. et Figure 22. Photographies 13 et 14



Figure 23. et Figure 24. Photographies 15 et 16

3.3.2 2015/09/18

La crue du 18/09/2015 est caractérisée par de faibles débits de pointe : à peine supérieurs à $1\text{m}^3/\text{s}$ sur le ruisseau de Francueil à l'aval de la ZEC (Figure 25). Cet événement correspond à des niveaux de nappes plus bas qu'en 2014 (43,5m NGF). De multiples faibles événements pluvieux à Tours (inférieurs à $10\text{mm}/\text{h}$ sur 2 ou 3 heures) mènent à de faibles débits et une décrue rapide. Les photographies montrent des écoulements torrentiels sur la rue du Val Fleuri, pentue et topographiquement plus élevée que le ruisseau de Francueil, et laissent supposer des inondations pluviales dues à la concentration du ruissellement dans les fossés.



3.3.3 2016/05/31

La crue du 31/05/2016 est caractérisée par de forts débits de pointe : autour de $12\text{m}^3/\text{s}$ sur le ruisseau de Francueil à l'aval de la ZEC (Figure 30). Cet événement correspond à des niveaux de nappes hauts (45m NGF). Le pic de crue est probablement due à des précipitations sur plus de 10 heures, avec un cumul de précipitation horaire avoisinant 5mm, précédés par plusieurs événements pluvieux le 29/05 (10mm à l'aéroport de Tours). Le retour à un débit légèrement supérieur au débit moyen mensuel ($0.52\text{m}^3/\text{s}$, voir fiche LOIEAU BNBV_LO11837) a lieu près de 9 jours plus tard. Contrairement à la crue de 2014, l'événement n'est pas accentué par une décrue retardée. Cette crue demeure localement mémorable par son ampleur, mais son couvert photographique est plus réduit (concentré sur la route du Moulin Neuf). Cet événement sera utilisé pour valider le modèle hydraulique.

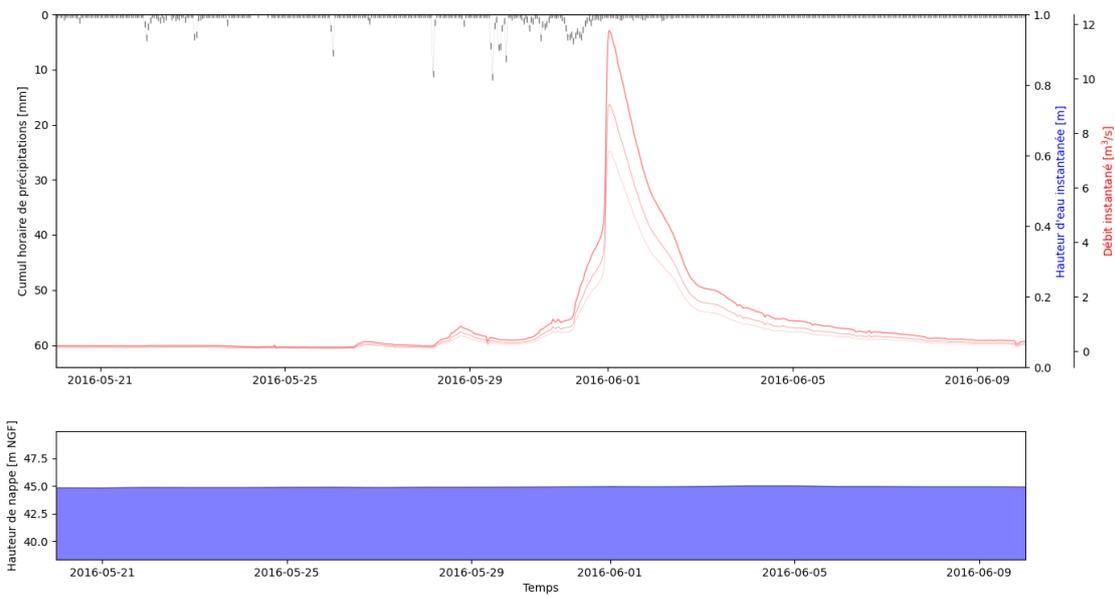


Figure 30. Synthèse hydrologique de l'événement de crue du 31/05/2016



Figure 31. et Figure 32. Photographies 25 et 27



Figure 33. et Figure 34. Photographies 26 et 28



Figure 35. et Figure 36. Photographies 23 et 24



Figure 37. et Figure 38. Photographies 22 et 21



Figure 39. Photographie 29 (hors-carte) - D80 vers le Cher

3.3.4 2020/03/05

La crue du 05/03/2020 est caractérisée par deux débits de pointe, autour de 4,5 et 8,5m³/s sur le ruisseau de Francueil à l'aval de la ZEC (

Figure 40). Les pics observés sur l'Echandon ne correspondent pas à la date de crue à Francueil, ce qui laisse supposer que ces débits ne sont pas représentatifs, d'autant que les événements pluvieux observés à Tours sont faibles en comparaison des débits observés. Cet événement correspond à des niveaux de nappes relativement bas pour la saison (43,5m NGF). Cette crue présente néanmoins un couvert photographique intéressant, notamment à l'amont de la ZEC. A ce titre, cet événement sera utilisé pour cadrer le comportement du modèle hydraulique à l'amont de la ZEC.

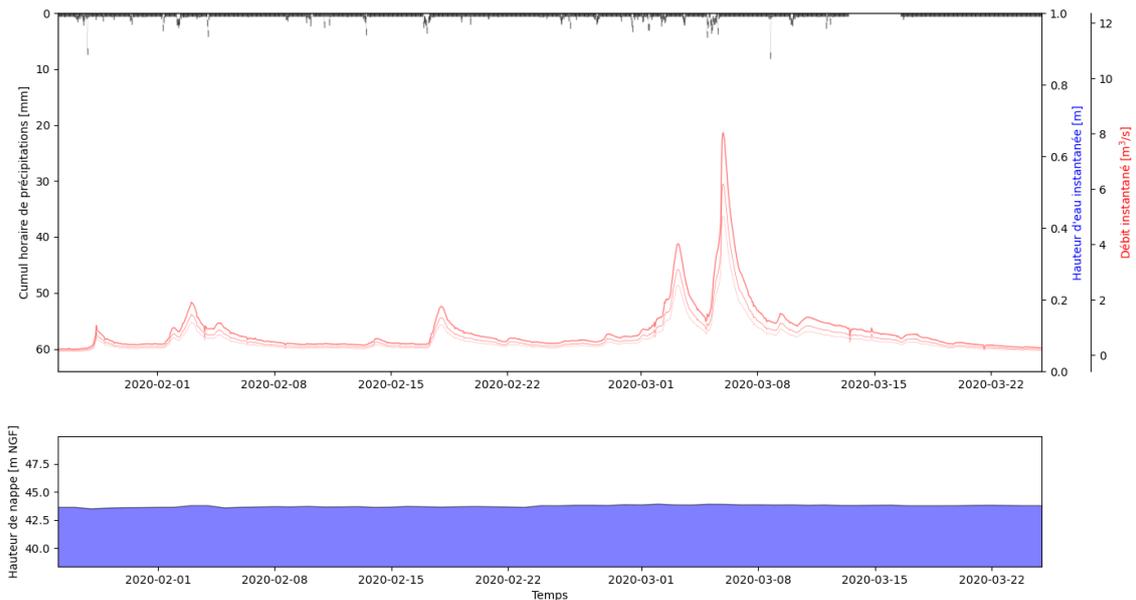


Figure 40. Synthèse hydrologique de l'événement de crue du 05/03/2020



Figure 41. et Figure 42. Photographies 35 et 34



Figure 43. et Figure 44. Photographies 33 et 32



Figure 45. et Figure 46. Photographies 31 et 30



Figure 47. Photographie 36

4 Topographie

4.1 Données existantes à l'échelle nationale

L'élaboration du modèle nécessite de disposer de données topographiques, c'est-à-dire de connaître précisément l'altitude du sol, des berges, et la profondeur du lit du cours d'eau sur la zone d'étude. Ces données sont généralement représentées sous la forme d'un « modèle numérique de terrain » (MNT).

Des données topographiques existent à l'échelle nationale : il s'agit des modèles numériques de terrain RGEAlti produits par l'IGN. La résolution spatiale affichée est de 1 mètre, par souci d'homogénéité sur le territoire français. Cependant, les capteurs utilisés (Figure 48) ne permettent pas d'obtenir cette résolution à la source. La résolution des données disponibles est inférieure à celle affichée. Par ailleurs, la prise en compte de la végétation dans le RGEAlti peut donner lieu à des imprécisions locales de l'altimétrie. En conclusion, la topographie des berges et du lit des cours d'eau peut très rarement être déterminée par le simple emploi du RGEAlti.

La consultation des acteurs locaux n'a pas permis de collecter de données topographiques complémentaires. Il était donc nécessaire d'intégrer à la prestation une campagne de terrain afin de réaliser des mesures de l'altitude du sol, des berges, et de la profondeur du lit.

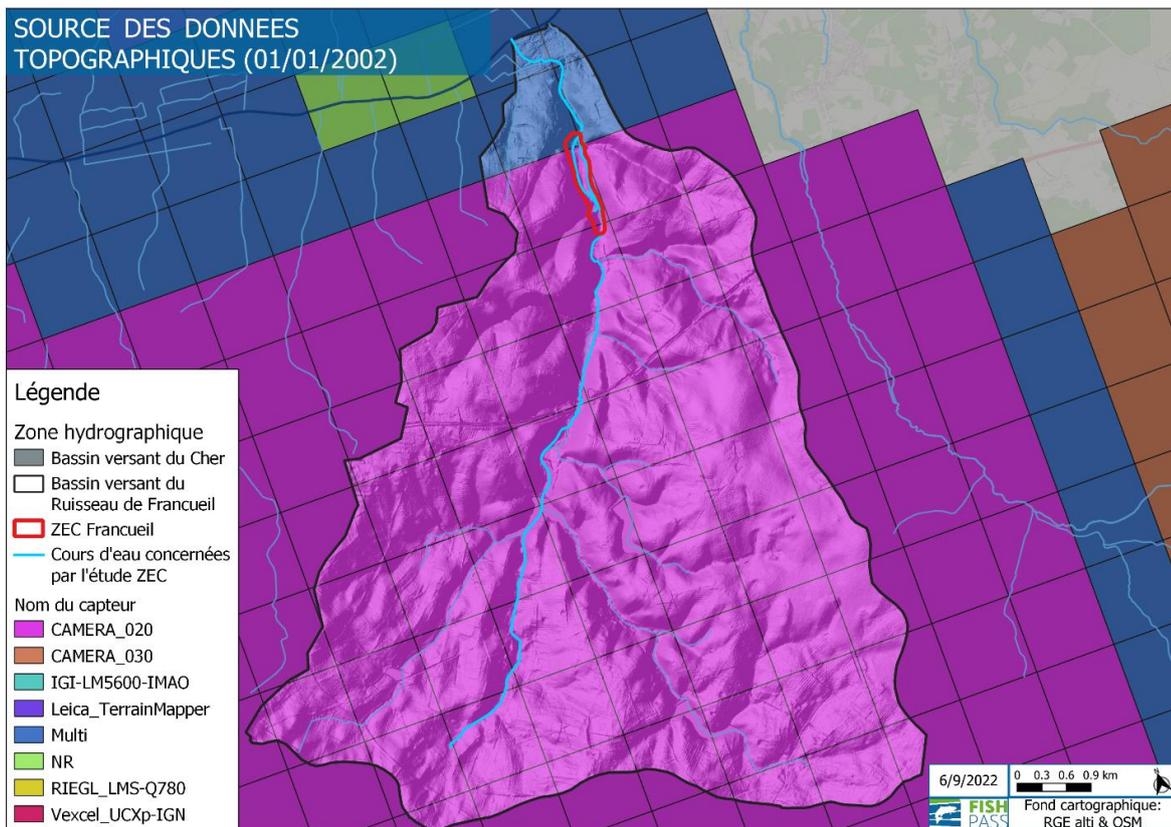


Figure 48: Capteurs ayant servi à l'acquisition des données topographiques

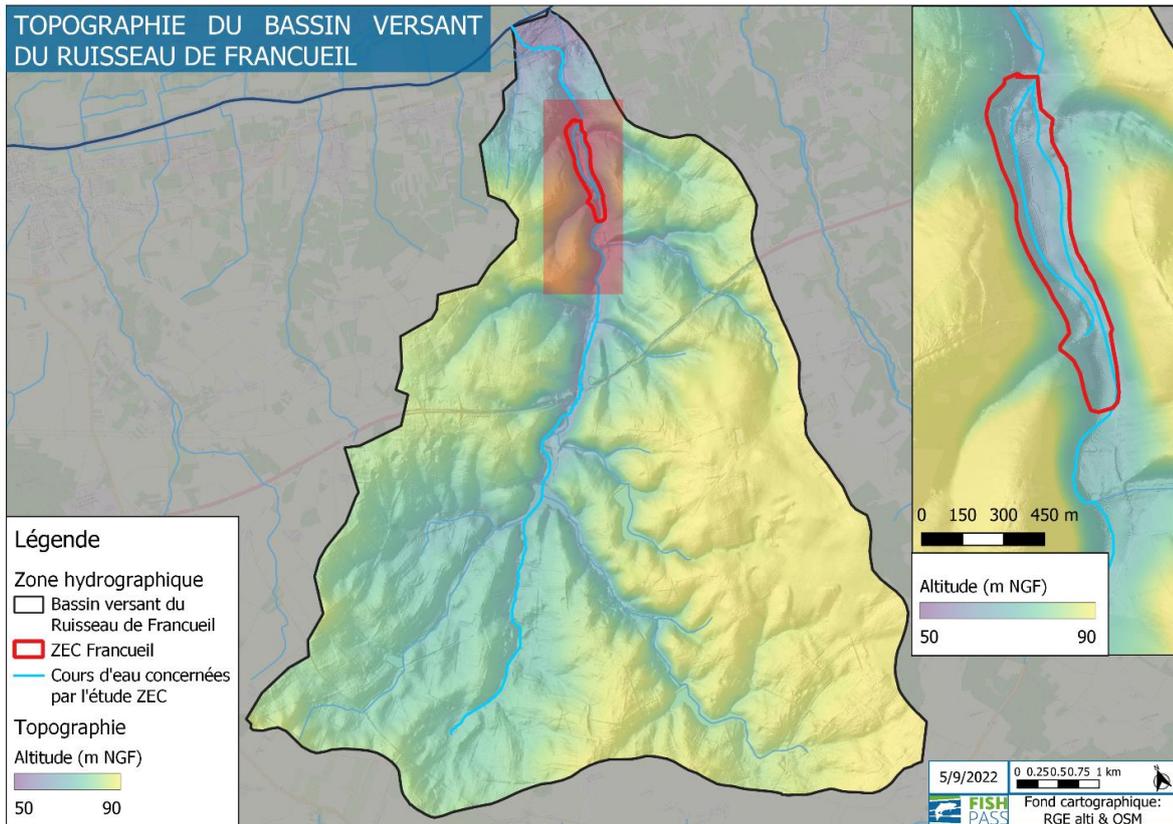


Figure 49. Topographie du bassin versant selon le RGEAltI (source IGN)

4.2 Campagne de terrain complémentaire pour l'acquisition de données topographiques

Du 5 au 6 mars 2023, FishPass a mené une campagne de terrain mobilisant 2 opérateurs et une station GNSS Trimble R12 (munie d'un RTK) permettant de lever des points topographiques avec une précision centimétrique. La campagne a permis de lever 1958 points topographiques, localisés en Figure 50. Les points ont été levés à la fois dans le lit des cours d'eau ou sur les ouvrages hydrauliques (ponts et seuils) (Figure 51 et Figure 52).

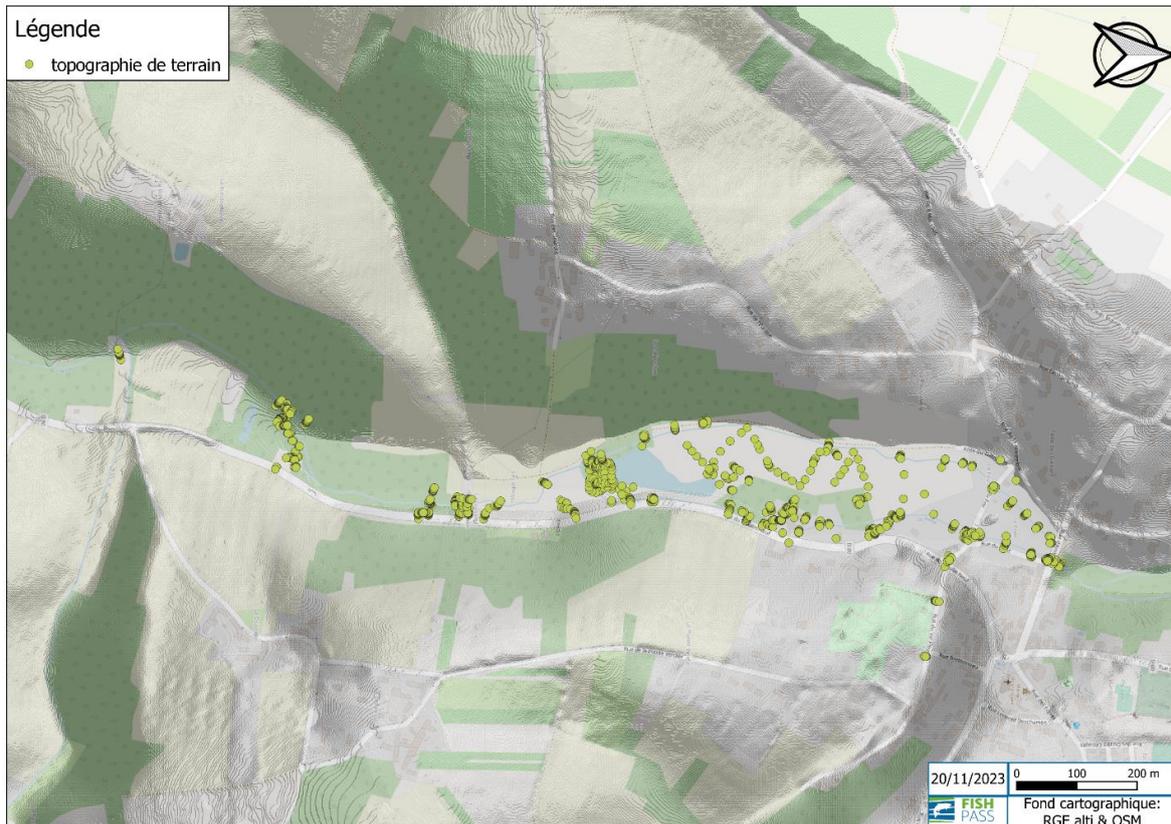


Figure 50. Cartographie des points acquis lors des levés topographiques de terrain

- Topographie -



Figure 51. Détail des points acquis à la dérivation du ruisseau



Figure 52. Détail des points acquis sur le Moulin de Francueil

4.3 Modèle topographique corrigé

La Figure 53 présente une comparaison entre le modèle numérique de terrain issu des données à l'échelle nationale (RGEAlti de l'IGN), et sa version corrigée grâce à l'acquisition de données sur le terrain.

Le modèle topographique corrigé sert de base à la modélisation du fonctionnement de la ZEC.

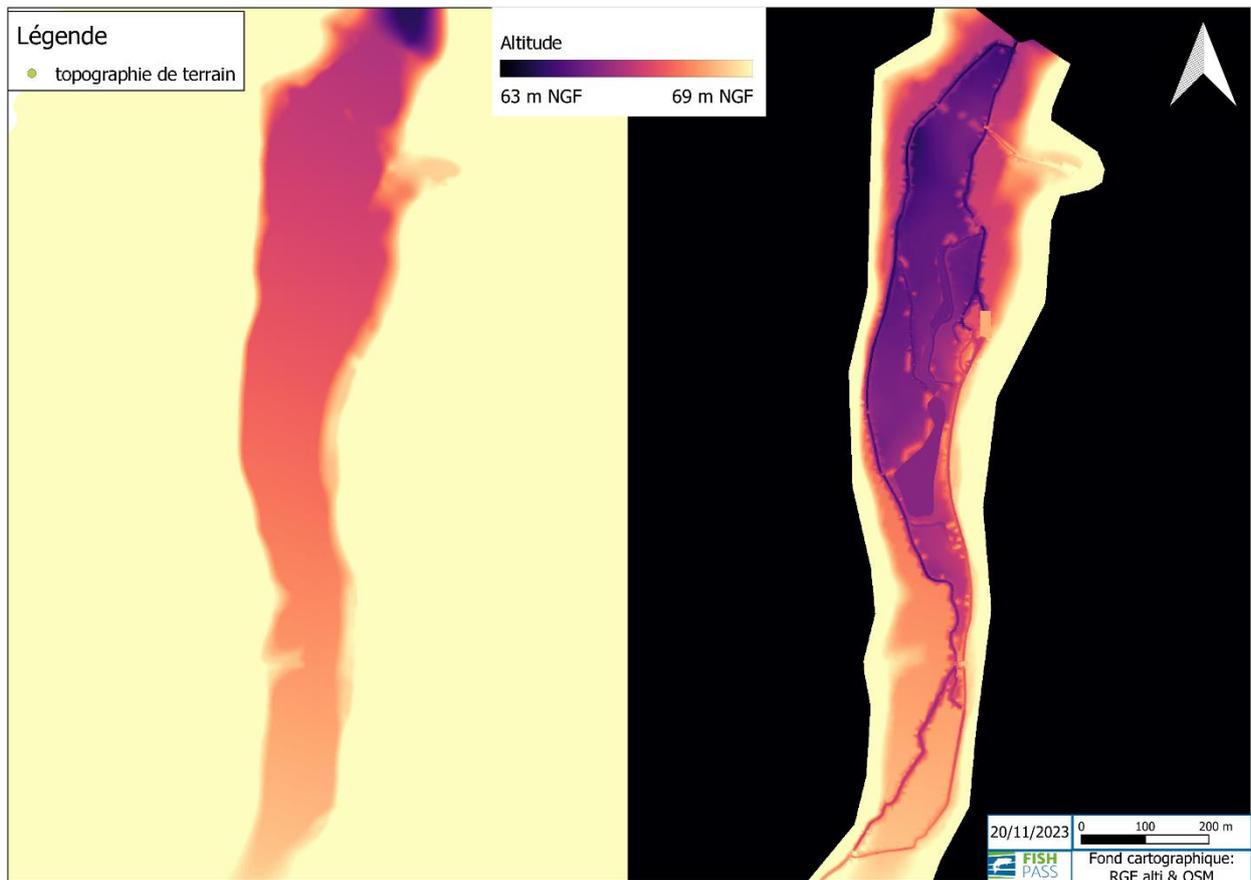


Figure 53. Comparaison du MNT IGN brut (gauche) et du MNT corrigé par les levés de terrain (droite)

5 Description du modèle

Il existe plusieurs logiciels de modélisation hydraulique à même de simuler les écoulements. Du fait de la complexité des écoulements et du système de distribution des débits, le logiciel TELEMAC (2D) a été favorisé à HEC-RAS (1D+casiers) pour la présente étude. Ce choix permet de mieux mettre en évidence les échanges de flux entre les divers canaux et organes de répartition.

Le modèle agit comme une sorte de « maquette » numérique du terrain. Il prend en donnée d'entrée le débit de crue du ruisseau de Francueil et des affluents, puis permet, en tout point de son domaine, d'apprécier les hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement, ainsi que les débits d'entrée et sortie.

A noter : le modèle ne prend pas en compte l'apport des nappes de surface. En crue, les échanges d'eau peuvent induire des remontées de nappe de longue durée et causer des inondations, notamment par les caves d'habitations, particulièrement là où se trouvent d'anciens puits. Ces inondations par les nappes ne peuvent être simulées par un modèle d'hydraulique à surface libre.

5.1 Géométrie

Les éléments ci-après servent à la visualisation, et non à l'analyse de la géométrie du modèle, qui à cette échelle est difficile. Les fichiers bruts peuvent être lus sous QGIS au moyen du plugin PostTelemac (gratuit). Les figures suivantes montrent les géométries respectives de chaque modèle, ainsi que leurs conditions aux limites, qui sont :

- Un débit pour les limites liquides amont (le Ruisseau de Francueil et ses affluents) ;
- Un cote altimétrique pour les limites liquides aval (la « sortie » de chaque modèle).

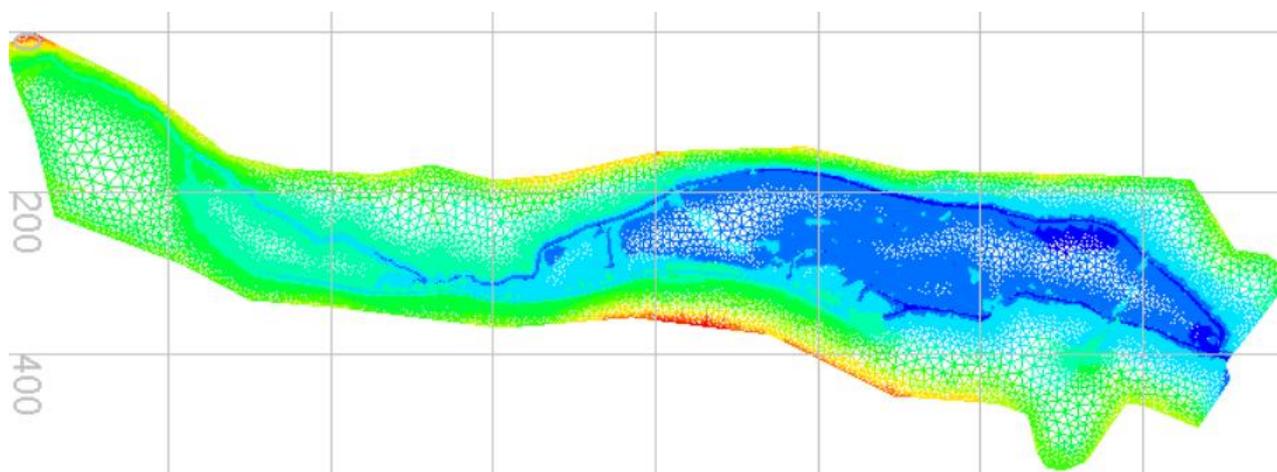


Figure 54. Maillage du modèle sur Francueil Les couleurs indiquent l'altitude

5.2 Données d'entrée

Pour faire fonctionner le modèle et simuler une crue, il est nécessaire de fournir, en données d'entrée, des valeurs de débit pour le Fouzon et ses affluents à l'extrémité amont du modèle. Comme il n'existe pas de station de mesure au niveau de la zone d'étude, ces débits sont calculés à partir des débits de crue de l'Échandon, en se basant sur le rapport mathématique entre débits et surfaces de bassin (méthode de transfert de Myer). Ainsi, pour des bassins versants morphologiquement similaires : $Q_{BV2} = Q_{BV1} * (S_{BV2}/S_{BV1})^\alpha$

Avec : Q le débit, S la surface du bassin versant, $BV1$ le bassin versant de l'Échandon, $BV2$ le bassin du versant étudié, et α un coefficient dont la valeur est issue de la bibliographie ($\alpha=0.8$ en période de crue).

Le tableau ci-dessous présente les valeurs de superficie des bassins versants de chaque affluent simulé, et les débits utilisés pour le calage du modèle.

	Echandon (St-Branchs)	Ruisseau de Francueil (amont)	Fossé 1	Fossé 2	Ruisseau de Francueil (aval)
Superficie (km ²)	127	36	5	10	44
Qcal étiage (m3/s)	n/a	0.053	0.000	0.000	0.053
Qcal 02/14 (m3/s)	20.1	7.332*	1.511	2.631	8.608
Qcal 09/15 (m3/s)	1.4	0.511	0.105	0.183	0.600
Qcal 05/16 (m3/s)	25	9.119**	1.880	3.273	10.707
Qcal 03/20 (m3/s)	17.4	6.347	1.308	2.278	7.452
Q2	10.8	3.939	0.812	1.414	4.625
Q5	19.44	7.091*	1.462	2.545	8.326
Q10	25.14	9.170**	1.890	3.291	10.767
Q20	30.6	11.161	2.301	4.006	13.105
Q50	37.7	13.751	2.834	4.935	16.146
Q100	42.9	15.648	3.225	5.616	18.373

Tableau 1. Débits utilisés lors des simulations. Les débits sont exprimés en m3/s et représentent, pour les crues, le débit de pointe. Les débits de calage ont été mesurés en février 2023. *La crue de février 2014 correspond à un événement quinquennal et sera donc utilisée lieu et place de ceux-ci. **La crue de mai 2016 correspond à un événement décennal et sera donc utilisée lieu et place de ceux-ci.

Sur l'Échandon, la crue dure environ 12h pour presque 18h de décrue. Cette même durée est utilisée ici.

NOTE : Les calculs de débits entrants statistiques supposent l'absence d'écêtement des crues par les retenues d'eau à l'amont. En effet, à notre connaissance, ces retenues ne sont pas gérées spécifiquement pour la prévention des crues et ne peuvent pas être considérées comme des écrêteurs de crue fiables. Le comportement d'écêtement pourra être intégré comme proposition de gestion en phase 3.

5.3 Calage du modèle

Pour s'assurer du bon fonctionnement du modèle, il est nécessaire de le « caler ». Ce calage consiste à entrer dans le modèle des valeurs pour lesquelles une donnée de sortie est connue, grâce à des mesures de terrain. Une campagne de terrain a donc été effectuée du 6 au 7 février au sein de la ZEC, afin de mesurer les données d'entrée (débits du Fouzon et des affluents à l'amont) et une donnée de sortie (la hauteur de la ligne d'eau). Une comparaison est réalisée entre les hauteurs d'eau mesurées et les hauteurs d'eau modélisées. Pour parvenir à une adéquation entre les deux, il est possible de modifier un paramètre de calage : la rugosité du lit majeur et mineur. La comparaison permet ainsi de déterminer si les valeurs de rugosité choisies sont acceptables.

Lors de la campagne de terrain, les conditions hydrologiques correspondaient à des valeurs de débit de fréquence de non-dépassement de 3 %. En cela, elles n'ont permis de caler les coefficients de rugosité que dans le lit mineur : le calage a permis de confirmer l'utilisation du coefficient de rugosité de Manning ($n = 1/20$). En l'absence de calage sur le lit majeur, nous retenons $n = 1/20$. Les résultats des simulations sur les crues observées seront comparés aux photographies existantes.

Les résultats du calage sont présentés dans les graphes suivants, avec en abscisses les niveaux d'eau mesurés (station GNSS) et en ordonnées les niveaux d'eau simulés :

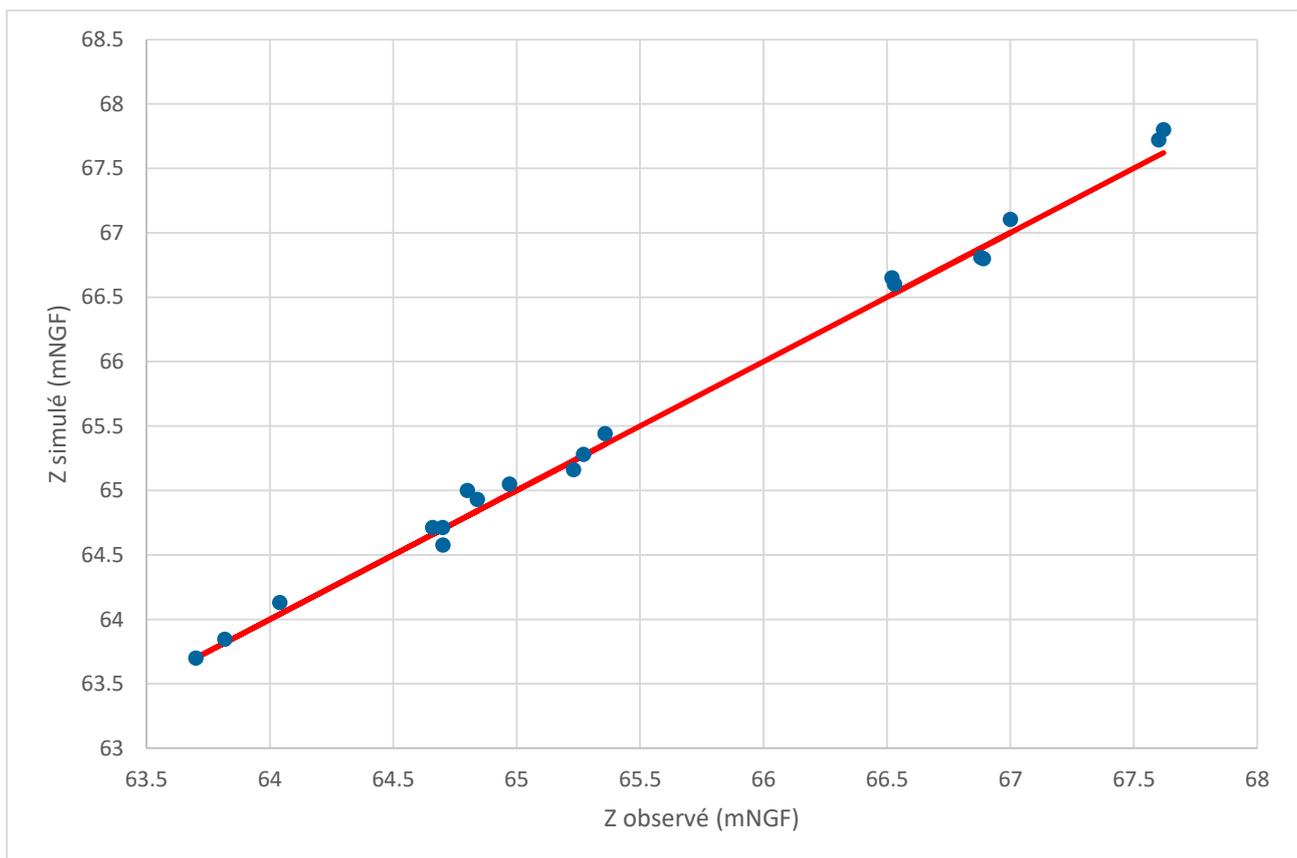


Figure 55. Résultats de calage des modèles – erreur moyenne = 9cm

- Description du modèle -

5.4 Correspondance aux événements de crue

Les références photographiques ont permis d'établir des repères de crue. En ces points, l'altitude a été mesurée au GPS lors de la campagne de terrain. Les illustrations ci-dessous comparent les altitudes des repères de crue avec le résultat des simulations. Il s'avère que le modèle produit des valeurs généralement plus élevées que les repères. Cette erreur est le fruit combiné de 1) l'imprécision du modèle, 2) l'imprécision des mesures de terrain et 3) le fait que les photographies ne sont pas nécessairement prises au pic de la crue.

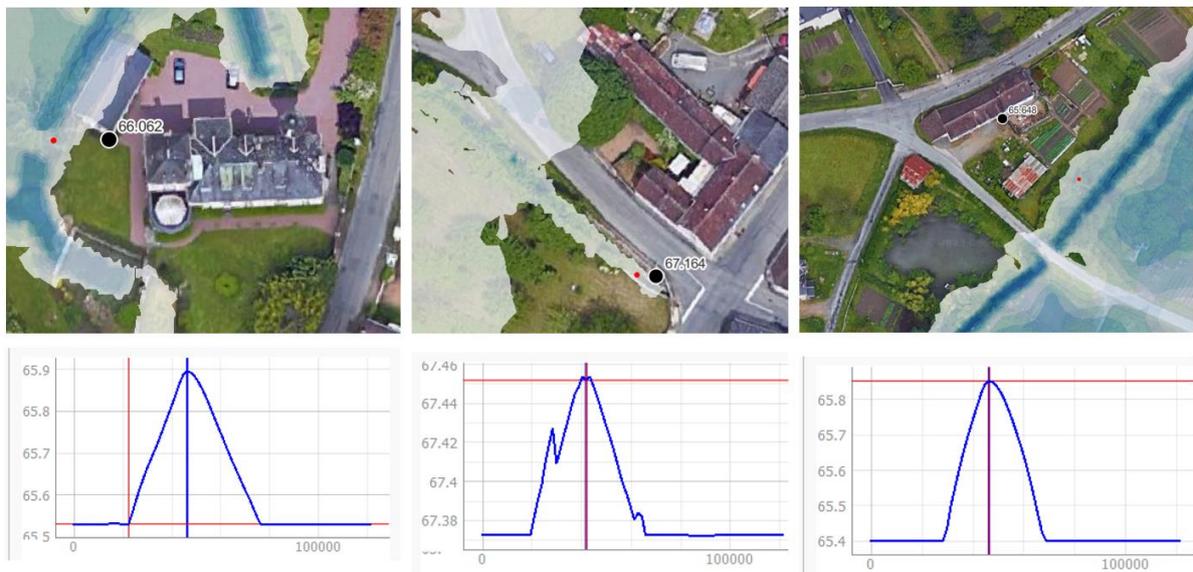


Figure 56. Correspondance des cotes pour la crue de 2016

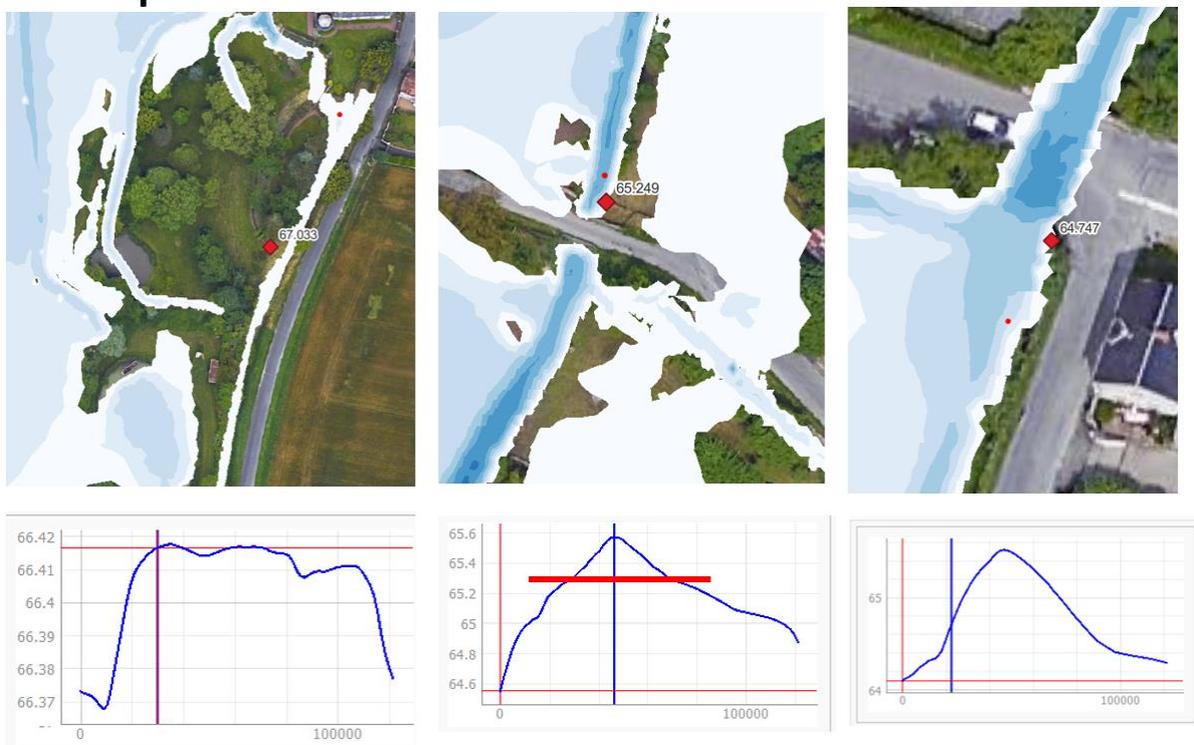


Figure 57. Correspondance des cotes pour la crue de 2020

6 Simulations

6.1 Ecrêtement des crues

L'écrêtement de crue correspond à la limitation du débit maximum (débit de pointe) de la crue.

Les graphiques suivants montrent la variation du débit en fonction du temps (hydrogrammes de crue). Les courbes en pointillées correspondent au débit à l'extrémité amont du périmètre d'étude, les courbes en trait plein correspondent au débit à l'extrémité aval du périmètre modélisé. Les différentes couleurs représentent l'intensité de la crue : d'une crue biennale (qui a 50 % de risque de survenir pour une année donnée), jusqu'à une crue centennale (qui a 1 % de risque de survenir pour une année donnée).

Ces graphiques illustrent donc l'écrêtement des crues permis par la zone modélisée, c'est-à-dire la réduction du débit permise par le débordement dans cette zone.

La zone d'étude réduit le pic de débit de 12 à 24,5%. L'écrêtement croissant avec l'intensité de la crue.

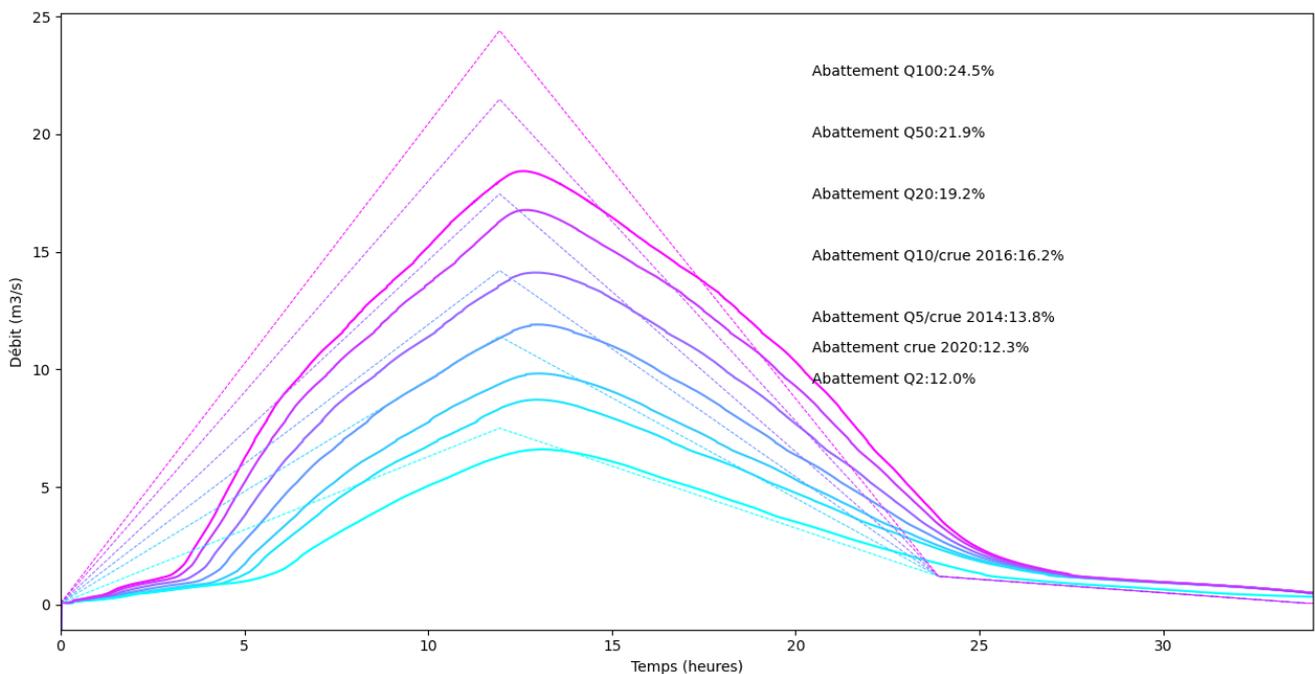


Figure 58. Ecrêtement des crues à la sortie du modèle

6.2 Cartes de profondeurs d'eau maximales

6.2.1 Crue biennale



6.2.2 Crue quinquennale – Crue 2014



6.2.3 Crue décennale – Crue 2016



- Simulations -

6.2.4 Crue vicennale



6.2.5 Crue cinquantennale



6.2.6 Crue centennale



7 Synthèse

Cette seconde phase d'étude a permis la modélisation de crue sur les secteurs pré-identifiés de ZEC, en amont et dans le bas du bourg de Francueil. Les données de terrain (topographie, jaugeages) ont informé la géométrie du modèle et les simulations de calage, lesquelles donnent des résultats suffisants pour juger de l'effet des ZEC. Les simulations portent sur des crues fictives de différentes intensités (Q2, Q20, Q50 et Q100) ainsi que sur la reproduction de crues réelles (2014-équivalent Q5, 2016-équivalent Q10, et 2020) via un hydrogramme simplifié. Les hypothèses sur la gestion des ouvrages supposent l'absence d'opération et l'absence d'écrêtement des crues par les retenues d'eau de la Brosse et du lieu-dit Lavignon.

Le **fonctionnement actuel** de la zone étudiée est le suivant :

- La ZEC permet de **réduire le débit de point de la crue de 12 % (Q2) à 24,5% (Q100)**, et induit un décalage de ce pic d'environ 30 minutes. Cet effet d'atténuation du pic de crue est le signe du fonctionnement correct de la ZEC en l'état actuel : par débordement en amont, elle réduit les aléas à l'aval.
- La **zone humide** située entre le Moulin de Francueil et le bas du bourg (rue du Feu), qui abrite également l'ancien lit supposé du ruisseau, est la **première zone inondée**.
- La plupart des zones inondées sont proches des enjeux : en ce sens, le fonctionnement des ZEC pourrait être amélioré.

Au vu des résultats observés, **la ZEC du ruisseau de Francueil permet effectivement le débordement, et donc la réduction du pic de crue. Elle peut être optimisée.**

Voici quelques **solutions possibles** pour augmenter l'écrêtement des crues :

- Etendre la ZEC existante autour de la zone humide :
 - o En abaissant ponctuellement les berges actuellement au-dessus du niveau de la zone humide ;
 - o En reconnectant le lit ancien au lit actuel ;
 - o En envisageant la transformation de l'étang en zone humide autour du lit ancien.
- Faciliter les débordements plus à l'amont du bourg, en amont même de la station de pompage AEP, en favorisant l'écoulement vers le bief en période de crue (mais pas en période d'étiage) afin d'entraîner son débordement.
- Prévenir les débits de crue en dehors du périmètre de la zone étudiée, en utilisant l'étang de Brosse et l'étang du lieu-dit Lavignon comme écrêteurs de crue, au besoin en les convertissant en zones humides.

Ces scénarios seront précisés et évalués en phase 3 de l'étude.