# Aménagement de la promenade des berges de la Savoureuse

## Pièce 3a. Dossier de demande d'autorisation unique

## DOSSIER HYDRAULIQUE – Incidence du projet

# Informations qualité

## Contrôle qualité

| Version | Date | Rédigé par | Visé par : |
|---|---|---|---|
| Version 0 | Janvier 2017 | T. JEANNE et S. HEUZE | R. CROIX |
| Version 1 | Février 2017 | T. JEANNE et S. HEUZE | R. CROIX |
| Version 2 | Juin 2017 | T. JEANNE et S. HEUZE | R. CROIX |

Cette étude a été réalisée avec le concours financier de l'Agence de l'Eau.

# Table des matières


1. Préambule ..... 1
1.1 Contexte ..... 1
1.2 Périmètre d'étude ..... 1
1.3 Méthodologie de travail et articulation avec la conception du projet ..... 3
1.4 Déroulement et contenu des études conduites ..... 3
1.5 Objet du rapport ..... 4
2. Présentation du secteur d'étude et hydrologie de la rivière ..... 5
2.1 Le bassin versant de la Savoureuse ..... 5
2.2 Réseau hydrographique et ouvrages hydrauliques ..... 5
2.3 Hydrologie ..... 6
2.3.1 Localisation des stations hydrométriques sur la Savoureuse ..... 6
2.3.2 Débits caractéristiques ..... 7
2.3.3 Les crues ..... 10
3. Construction et calage des modèles ..... 12
3.1 Modélisations mises en œuvre ..... 12
3.1.1 Préambule ..... 12
3.1.2 Le logiciel ..... 12
3.1.3 Construction du modèle 1D/2D ..... 13
3.1.4 Construction du modèle 2D/2D ..... 14
3.1.5 Comparaison des données bathymétriques PPRI et 2015 ..... 17
3.1.6 Paramètres de calage ..... 19
3.2 Calage en basses eaux ..... 20
3.2.1 Données disponibles ..... 20
3.2.2 Hypothèses de géométrie des seuils retenues ..... 20
3.2.3 Méthode de calage ..... 21
3.2.4 Résultats du calage en basses eaux ..... 22
3.3 Calages en hautes eaux ..... 23
3.3.1 Données disponibles ..... 23
3.3.1.1 Plan de Prévention des risques d'Inondation de la Savoureuse, du Rhôme et de la Rosemontoise ..... 23
3.3.1.2 Photographies de crue en février 1990 ..... 25
3.3.1.3 Données de la station hydrométrique de Belfort ..... 28
3.3.1.4 Synthèse sur le choix des évènements hydrologiques utilisés pour le calage du modèle ..... 29
3.3.2 Paramètres du calage ..... 29

3.4 Etude paramétrique de calage en crue ..... 30
3.4.1 Tests de calage des coefficients de rugosité pour les débits issus de la banque HYDRO ..... 30
3.4.2 Test de calage sur une hydrologie modificative Q = 165m³/s ..... 32
3.4.3 Tests complémentaires sur les coefficients de rugosité pour le débit – banque HYDRO de 209 m³/s ..... 41
3.4.4 Hypothèse de révision de la relation de tarage de la station ..... 42
3.5 Elaboration de 3 modèles de crue de référence ..... 43

4. Fonctionnement hydraulique du secteur d'étude en l'état actuel .... 49
4.1 Préambule ..... 49
4.2 Zones inondables lors de la simulation de la crue de février 1990 ..... 49
4.3 Niveaux d'eau et vitesses d'écoulements caractéristiques ..... 53
4.4 Analyse détaillée des écoulements sous les ponts et au niveau des seuils ..... 56

5. Etude d'incidence hydraulique du projet en période de crue ..... 64
5.1 Préambule ..... 64
5.2 Description du projet ..... 64
5.2.1 Les intentions générales et enjeux du projet ..... 64
5.2.2 Contraintes de dimensionnement ..... 66
5.2.3 Le projet retenu à l'issue de l'avant-projet ..... 67
5.2.4 Adaptations du projet pour la limitation des impacts hydrauliques ..... 71
5.3 Incidence du projet sur la ligne d'eau en crue ..... 73
5.4 Incidence sur la section mouillée ..... 77
5.5 Dimensionnement hydraulique des nouvelles passerelles ..... 81

6. Simulation d'une crue extrême ..... 83
6.1 Hypothèse et méthodologie ..... 83
6.2 Analyse des résultats ..... 83

7. Synthèse ..... 89

Annexe 1 – Fiche technique de la station HYDRO de Belfort ..... 90

Annexe 2 – Courbe de tarage actuelle de la station HDYRO avec identification du jaugeage réalisé pendant la crue de février 1990 .. 96

Annexe 3 – Notice du logiciel de modélisation hydraulique - ICM ..... 98

# Liste des figures

Figure 1 : Carte du secteur d'étude et des seuils présents dans la traversée de Belfort..... 2

Figure 2 : Identification du bassin versant de la Savoureuse et localisation des stations hydrométriques ..... 7

Figure 3 : Localisation de l'ancien emplacement de la station HYDRO et de la station actuelle . 8

Figure 4 : Ecoulements mensuels de la Savoureuse à Belfort..... 9

Figure 5 : Courbe de tarage en vigueur au niveau de la station HYDRO de Belfort ..... 9

Figure 6 : Chronique des crues annuelles enregistrées depuis 50 ans ..... 10

Figure 7 : Ajustement statistique des débits de crues annuelles et intervalle de confiance à 95% – loi de Gumbel ..... 11

Figure 8 : Débits caractéristiques des crues à la station et intervalle de confiance à 95% ..... 11

Figure 9 : Aperçus du modèle 1D / 2D ..... 14

Figure 10 : Zoom sur des transects de rivière disponibles sur le plan bathymétrique ..... 14

Figure 11 : Aperçu général du modèle 2D ..... 15

Figure 12 : Aperçus du modèle 2D – zoom sur le pont Clémenceau..... 16

Figure 13 : Comparaison entre la répartition spatiale des profils en travers (en rouge à g.) et des levés bathymétriques (à dr.) ..... 17

Figure 14 : Comparaison des profils en long de la Savoureuse construit sur la base des profils en travers et de la bathymétrie ..... 18

Figure 15 : Représentation schématique en coupe d'un seuil bien profilé et de la lame d'eau déversante en période normale d'écoulement..... 19

Figure 16 : Seuil des Lettres et seuil des Arts le 7 juillet 2015..... 20

Figure 17 : Seuil Denfert-Rochereau et seuil Gambetta le 3 septembre 2015 ..... 20

Figure 18 : Seuil Richelieu le 3 septembre 2015 ..... 21

Figure 19 : Cartes réglementaires du PPRi ..... 24

Figure 20 : Vues rue de Valdoie et rue Jean Moulin – en amont du secteur d'étude..... 25

Figure 21 : Vue amont de la passerelle des Lettres - à la limite de monter en charge ..... 25

Figure 22 : Quai Vallet - pas de débordements sur les quais..... 26

Figure 23 : Vue amont du pont Carnot - à la limite de monter en charge ..... 26

Figure 24 : Passerelle des Arts – en charge..... 26

Figure 25 : Vue de la place des Arts..... 27

Figure 26 : Vue du seuil Gambetta depuis le quai Keller – pas de débordement..... 27

Figure 27 : Vue amont du pont Denfert-Rochereau – pas de débordement ..... 27

Figure 28 : Vue amont du pont Richelieu - à la limite de monter en charge ..... 28

Figure 29 : Zones inondables simulées pour la crue de 1990 (209 m3/s) et les paramètres de calage en basses eaux..... 31

**Figure 30 : Profils en long de la ligne d'eau simulée pour les différents tests de calage au niveau de la station HYDRO ..... 32**

**Figure 31 : Vue amont de la passerelle des Lettres - à la limite de monter en charge ..... 33**

**Figure 32 : Vue amont du pont Carnot - à la limite de monter en charge ..... 34**

**Figure 33 : Passerelle des Arts – en charge ..... 35**

**Figure 34 : Vue amont du pont Denfert-Rochereau – pas de débordement ..... 36**

**Figure 35 : Vue amont du pont Richelieu - à la limite de monter en charge ..... 37**

**Figure 36 : Vue du seuil Gambetta depuis le quai Keller – pas de débordement..... 38**

**Figure 37 : Profils en long de la ligne d'eau simulée pour la crue de février 1990 – modèle calé pour un débit de pointe de 165 m3/s ..... 39**

**Figure 38 : Cartographie des zones inondables pour la simulation de la crue de 1990 – débit réduit à 165 $m^3$/s ..... 40**

**Figure 39 : Profil en long des lignes d'eau simulées pour des coefficients de Strickler très élevés – Crue de 1990 à 209 m3/s ..... 41**

**Figure 40 : Proposition de révision de la courbe de tarage de la station HYDRO ..... 42**

**Figure 41 : Profil en long des lignes des trois configurations de calage - état actuel..... 44**

**Figure 42 : Profils en travers au droit des échelles 1,2 et 3 – Etat actuel ..... 46**

**Figure 43 : Profils en travers au droit des échelles 4, 5 et 6 – Etat actuel ..... 47**

**Figure 44 : Profils en travers au droit de l'échelle 7 – Etat actuel..... 48**

**Figure 45 : Cartographie des zones inondables lors de la crue de 1990 – Etat actuel – Calage A ..... 50**

**Figure 46 : Cartographie des zones inondables lors de la crue de 1990 – Etat actuel – Calage B ..... 51**

**Figure 47 : Cartographie des zones inondables lors de la crue de 1990 – Etat actuel – Calage C ..... 52**

**Figure 48 : Profil en long des lignes d'eau caractéristiques sur la Savoureuse ..... 53**

**Figure 49 : Profil en long des vitesses caractéristiques d'écoulement sur la Savoureuse ..... 54**

**Figure 50 : Extrait du modèle - Pont du Magasin - Module ..... 56**

**Figure 51 : Extrait du modèle - Clémenceau - Module..... 57**

**Figure 52 : Extrait du modèle - Passerelle des Lettres - Module..... 59**

**Figure 53 : Extrait du modèle (Module) et vue aval du pont Carnot ..... 60**

**Figure 54 : Extrait du modèle - Passerelle des Arts - Module ..... 61**

**Figure 55 : Extrait du modèle (Module) et vue aval du pont Denfert-Rochereau ..... 62**

**Figure 56 : Extrait du modèle - Passerelle Gambetta - Module ..... 63**

**Figure 57 : Extrait du modèle - Pont Richelieu - Module..... 63**

**Figure 58 : Vue en plan du projet – promenade amont du pont du Magasin au pont Carnot ..... 68**

**Figure 59 : Vue en plan du projet – promenade aval des Arts à la passerelle Gambetta ..... 69**

**Figure 60 : Vue en plan du projet – promenade aval de la passerelle Gambetta au pont C. De Gaulle ..... 70**

**Figure 61 : Incidence du projet sur la ligne d'eau – Calage A ..... 74**

**Figure 62 : Incidence du projet sur la ligne d'eau – Calage B ..... 75**

**Figure 63 : Incidence du projet sur la ligne d'eau – Calage C ..... 76**

**Figure 64 : Comparaison des profils en travers état actuel et état projet – échelles 1, 2 et 5 .... 79**

**Figure 65 : Incidence du projet sur la ligne d'eau pour la Q1000 – Calage B ..... 84**

**Figure 66 : Incidence du projet sur la ligne d'eau pour la Q1000 – Calage C ..... 85**

**Figure 67 : Incidence du projet sur les zones inondées pour la Q1000 – Calage B ..... 86**

**Figure 68 : Incidence du projet sur les zones inondées pour la Q1000 – Calage C ..... 87**

**Figure 69 : Cartographie extraite de l'atlas des surfaces inondables du Doubs, de l'Allan et de la Savoureuse du TRI de Belfort-Montbéliard ..... 88**

# Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des singularités hydrauliques présentes dans le périmètre rapproché du projet ..... 6
Tableau 2 : Liste des stations HYDRO présentes sur la Savoureuse ..... 6
Tableau 3 : Coordonnées géographiques de la station ..... 7
Tableau 4 : Débits caractéristiques de la station ..... 8
Tableau 5 : Modèles hydrauliques mis en œuvre ..... 12
Tableau 6 : Exemples de valeur du coefficient de Strickler ..... 19
Tableau 7 : Caractéristiques des seuils et de leurs déversoirs en fonction des débits simulés 21
Tableau 8 : Analyse du calage du modèle en basses eaux ..... 22
Tableau 9 : Cotes de référence calculées par modèle mathématique ..... 23
Tableau 10 : Données de validation du modèle hydraulique en période de crue ..... 29
Tableau 11 : Les trois scénarios de calage retenus ..... 43
Tableau 12 : Localisation des 7 échelles ..... 45
Tableau 13 : Résultats de simulation au niveau des 7 échelles pour les 3 calages retenus ..... 45
Tableau 14 : Résultats au niveau des ouvrages transversaux des simulations hydrauliques ... 55
Tableau 15 : Débit capable des ouvrages d'art ..... 55
Tableau 16 : Adaptations du projet ..... 72
Tableau 17 : Résultats de simulation au niveau des 7 échelles pour les 3 calages retenus ..... 73
Tableau 18 : Estimation de la section mouillée sous la cote de la crue de 1990 au droit des 7 repères ..... 78
Tableau 19 : Estimation des volumes de déblai et de remblai en lit mineur induit par le projet 80
Tableau 20 : Cotes d'eau en état projet et revanche sous les futures passerelles – crue de 1990 ..... 81
Tableau 21 : Cotes de référence du PPRi au droit des nouvelles passerelles ..... 81

# 1. Préambule

## 1.1 Contexte

La Savoureuse, craint à une époque de par ses caprices hydrauliques, a été maîtrisée, domptée et remise dans le « droit » chemin dans la traversée de la ville de Belfort. Les aménagements de la Savoureuse, hérités du 19ème siècle, ont non seulement fait apparaître des seuils ne permettant plus la circulation naturelle de certaines espèces mais la population s'est vue privée petit à petit de son accès. Aujourd'hui, la Savoureuse ne semble plus être un lien, un liant, une couture mais au contraire un « couloir de rupture ».
Malgré un milieu appauvri et artificialisé, malgré une humeur torrentielle voire traumatisante pour les ouvrages qui l'enjambent ou qui la guident, la Savoureuse reste un formidable vecteur d'animation et d'attractivité pour le centre de Belfort.
Par ailleurs, le cours d'eau a été classé en liste 2 au titre de l'article L 214-17 du Code de l'Environnement. Ainsi, les cinq seuils présents le long de la traversée de Belfort et formant des obstacles à la circulation piscicole et aux transports solides devront être mis en conformité d'ici 2018.

La Ville de Belfort (90) a ainsi confié au groupement Egis associé à L'attitude 90, la mission de maîtrise d'œuvre complète pour l'aménagement des berges de la Savoureuse et la restauration écologique du cours d'eau. Cette opération est l'opportunité pour Belfort de ramener la biodiversité au cœur de ville et d'y proposer une réelle déambulation.

## 1.2 Périmètre d'étude

Le projet d'aménagement du lit de la Savoureuse s'étend de l'exutoire de l'étang des Forges au pont Charles De Gaulle à l'aval, soit un linéaire d'environ 1,5 km.

Toutefois, pour évaluer les effets hydrauliques à l'amont et à l'aval de l'aménagement, le secteur pris en compte pour les études hydrauliques est plus vaste :

- du bassin versant de la Savoureuse pour l'étude hydrologique
- du barrage de l'Arsot jusqu'au pont de Danjoutin à l'aval, soit un linéaire de 5,5 km pour l'étude hydraulique.

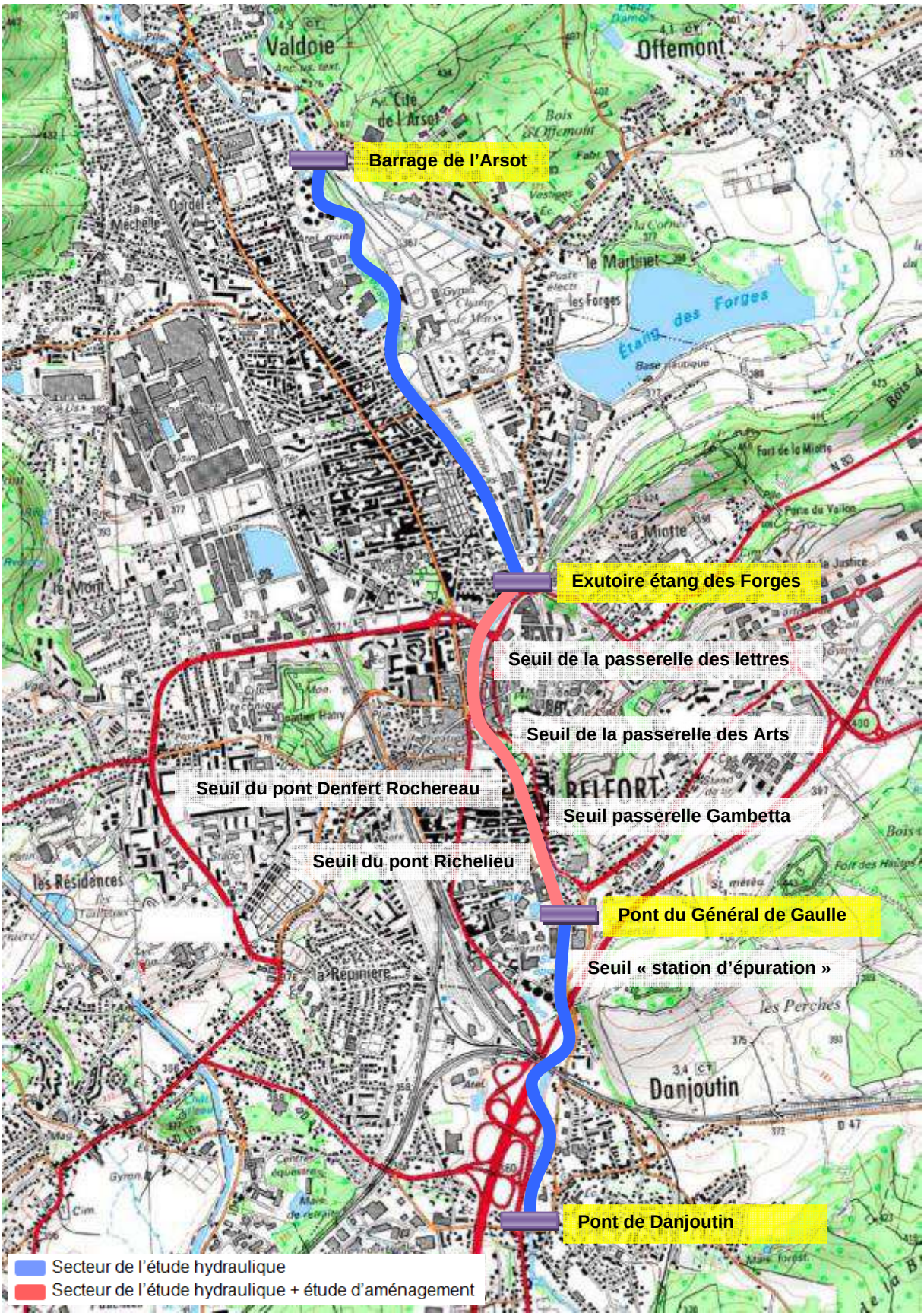



**Figure 1 : Carte du secteur d'étude et des seuils présents dans la traversée de Belfort**

## 1.3 Méthodologie de travail et articulation avec la conception du projet

Le projet est composé de travaux en lit mineur visant le rétablissement de la continuité écologique, la restauration du lit de la Savoureuse et la création d'une promenade.

**L'étude hydraulique du projet a été conduite concomitamment à la définition du projet au stade diagnostic, orientations d'aménagement puis définition du projet stade Avant-projet.**
**A chaque étape, l'incidence du projet a été testée sur modèle. Les résultats ont progressivement guidé la conception des ouvrages urbains et de restauration écologique dans l'objectif d'éviter, réduire ou à défaut compenser les impacts.**

Le modèle hydraulique a ainsi permis :

- **En phase diagnostic,** de déterminer les principales caractéristiques hydrauliques actuelles de la Savoureuse dans la traversée de Belfort pour différentes situations hydrologiques,
- **En phase orientations d'aménagement,** de quantifier l'impact hydraulique du projet d'aménagement promenade en lit mineur, et d'interventions sur les seuils notamment. Il a été vérifié la neutralité hydraulique du projet : les ouvrages ne conduisent à aucun exhaussement de la ligne d'eau en crue. Le niveau de la promenade a également été calé au niveau d'eau du module.
- **En phase AVP, d'affiner les impacts du projet.**
  La promenade basse sur le secteur du quai Vauban initialement implantée en lit mineur a notamment été décalée au-delà du mur du quai actuel afin de réduire les remblais en lit mineur et les impacts.
  Le calage altimétrique des ponts reconstruits a été également réalisé sur la base des résultats du modèle.
  La restauration du lit et des berges sur le secteur Richelieu-de Gaulle a été aussi testé sur modèle pour vérifier sa neutralité hydraulique.

Le modèle hydraulique 2D a également été utilisé pour

- Le dimensionnement piscicole des nouvelles rampes remplaçant les seuils,
- La simulation des lignes d'eau de basses eaux et la détermination des impacts sur les niveaux d'étiage et de débit moyen en lien avec les ouvrages de diversification.

*Ces points ont été traités dans la notice sur les ouvrages en rivière.*

## 1.4 Déroulement et contenu des études conduites

Le projet d'aménagement de la Savoureuse a fait l'objet d'études hydrauliques détaillées.

- Le **1er élément** de la mission hydraulique **en phase diagnostic** a consisté en :
  - la prise de connaissance du contexte hydraulique et environnemental de la mission,
  - l'étude du fonctionnement hydraulique de la situation actuelle ainsi que de l'incidence des cinq seuils transversaux par la mise en œuvre d'un modèle hydraulique en une dimension (sur la base des données topographiques disponibles – les mêmes que celles utilisées dans le cadre du PPRi) : hauteur d'eau et vitesses moyennes pour une gamme de débit allant de l'étiage à la crue de référence,
  - la qualification de l'état morphologique de la rivière et l'analyse du transport sédimentaire, l'étude de l'incidence des seuils sur la continuité écologique,

- l'identification des contraintes hydrauliques d'aménagement au niveau des seuils, des ouvrages d'arts (ponts et quais) ainsi que des rejets en rivière,
- l'étude des textes réglementaires en vigueur, notamment le PPRi.

- La **2nde partie** de la mission **en phase orientations d'aménagement** a consisté à proposer des solutions d'aménagement afin de rétablir la continuité écologique sur la Savoureuse dans la traversée de Belfort au niveau des seuils transversaux. Les incidences des scénarios d'aménagement sur la ligne d'eau dans différentes configurations hydrologiques ont été quantifiées par simulations hydrauliques.

Un scenario d'aménagement d'une promenade basse a été proposé.

- La **3ème phase** de la mission **en phase AVP** a consisté à affiner le dimensionnement du projet par la mise en œuvre d'une simulation plus détaillée des aménagements par la modification de l'outil de modélisation hydraulique des écoulements. En utilisant une bathymétrie récente (été 2015), un modèle en deux dimensions a été construit.

Un modèle 2D intégral a été déployé pour dimensionner les ouvrages en rivières et vérifier leur fonctionnement hydraulique

- Franchissabilité piscicole des rampes remplaçant les seuils.
- Fonctionnement à l'étiage et en débit moyen, identification des écoulements et atterrissements
- Calage de la promenade basse.

*Ces points ont été traités dans la notice sur les ouvrages en rivière.*

Un modèle 1D en lit mineur avec une série de profils resserrée issue de la bathymétrie 2015 et 2D en lit majeur a été déployé pour l'étude de l'incidence du projet en crue.

En l'absence de données de calage dans la traversée de la Belfort et face aux incertitudes liées aux entrants fournis sur les débits et cotes mesurées durant la crue de 1990, le modèle 2D a fait l'objet d'une **étude paramétrique détaillée** des paramètres de calage.

Ce travail a abouti à la définition de 3 modèles correspondant à 3 calages différents.
Le projet a enfin été testé sur ces 3 modèles pour en déterminer les incidences et d'affranchir des incertitudes liées à la crue de 1990.

Enfin, suite au dépôt du dossier réglementaire des remarques ont été émises par les services de l'Etat. Afin de prendre en considération ces retours, le projet a été modifié sur la section comprise entre les ponts Richelieu et Charles De Gaulle.

## 1.5 Objet du rapport

Le présent document reprend de manière exhaustive l'ensemble des missions hydrauliques menées depuis l'étude de faisabilité jusqu'à l'AVP.

Les étapes suivantes sont décrites par la suite :

1. La présentation générale du secteur d'étude et l'hydrologie,
2. La présentation des moyens mis en œuvre pour l'étude du fonctionnement hydraulique,
3. L'étude de la sensibilité du modèle aux coefficients de calage,
4. L'analyse du fonctionnement hydraulique actuel de la rivière,
5. L'étude d'incidence hydraulique du projet d'aménagement,
6. La synthèse des incidences du projet.

# 2. Présentation du secteur d'étude et hydrologie de la rivière

## 2.1 Le bassin versant de la Savoureuse

Le bassin versant de la Savoureuse s'étend du pied du Ballon d'Alsace dans le massif des Vosges jusqu'à Sochaux dans le Nord du département du Doubs. Le bassin versant comprend 3 ensembles distincts qui diffèrent par leur forme, leur altitude et leur pente :

- la zone montagneuse au nord, au-dessus de 500 m, constituée du socle (ensemble de terrains granitiques ou schisteux anciens, souvent recouverts de sédiments) et de terrains volcaniques très peu perméables, d'une pente moyenne de 8,4%,
- la zone des collines sous-vosgiennes au centre, jusqu'à une altitude de 370 m, formée de terrains permiens, grès et marnes peu perméables, d'une pente moyenne de 0,9%,
- les plaines des vallées alluviales au sud, creusées dans des terrains tertiaires et secondaires de perméabilité variable, d'une pente moyenne de 0,3%.

La présence humaine est localisée dans les vallées de montagne au nord et le long des cours d'eau et des axes routiers dans la zone des collines et des plaines au sud.

L'urbanisation est fortement développée, en particulier aux abords de Belfort et de Sochaux. La forêt occupe de grandes étendues, particulièrement dans la zone montagneuse. L'espace naturel situé sur les flancs des Vosges est resté inchangé. Cependant, les zones naturelles et les espaces agricoles des deux autres secteurs ont fortement évolué. Seuls, les sols riches sont toujours en culture ouverte.

Le bassin versant de la Savoureuse, depuis le Ballon d'Alsace jusqu'à la confluence avec l'Allan, a une superficie de 225 km². Sa forme très allongée peut être comparée à un rectangle de longueur de 40,4 km et largeur de 5,6 km.

## 2.2 Réseau hydrographique et ouvrages hydrauliques

La Savoureuse prend sa source à 1 248 mètres d'altitude. C'est d'abord un torrent de montagne qui dévale les pentes raides et boisées du Ballon d'Alsace. A partir de Giromagny, elle passe progressivement d'un régime torrentiel à un régime fluvial. Elle s'engage dans la vaste plaine alluviale de Chaux formée d'alluvions récentes. Elle y reçoit ses deux principaux affluents, le Rhôme en rive droite (à l'amont de Valdoie) et la Rosemontoise en rive gauche (dans Valdoie) à une distance de seulement 3 km l'un de l'autre. La rivière est ensuite canalisée dans la traversée de l'agglomération belfortaine. A la sortie de Belfort, elle coule dans une plaine alluviale où l'intégrité du lit majeur est fortement perturbée par des remblais. Au pied du rocher de Bermont, elle reçoit un troisième affluent, la Douce. Après la traversée de Chatenois-les-Forges, la vallée s'élargit jusqu'à 1 km. Cette plaine, fortement urbanisée, est marquée par l'extraction intensive de granulats qui a laissé de nombreuses gravières. A Nommay, la Savoureuse quitte le Territoire de Belfort et entre dans le département du Doubs. A partir de Vieux-Charmont, le cours d'eau est rectifié pour emprunter l'ancien méandre de l'Allan et se jette dans ce dernier à Sochaux, à 317 mètres d'altitude après un parcours de 40km.
Le réseau hydrographique de la Savoureuse est composé non seulement de rivières mais également de nombreux étangs. En effet, la densité en étangs de ce secteur est l'une des plus élevées de France.
La Savoureuse entre dans Belfort par le barrage de l'Arsot, alimentant l'étang des Forges à Offemont. La rivière parcourt environ 2 500 mètres avant d'atteindre le pont dit du Magasin. A partir de ce niveau, elle est endiguée et traverse le centre-ville jusqu'à la sortie de Belfort, soit sur environ

1 900 mètres. Le lit majeur est aménagé de six seuils fixes, permettant de maintenir une ligne d'eau haute en étiage et probablement de limiter les érosions de berge dans la traversée de Belfort.

**Tableau 1 : Liste des singularités hydrauliques présentes dans le périmètre rapproché du projet**

| Type | Repère métrique | Dénomination | Seuils | | | Ponts et passerelles | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Hauteur des seuils (m) | Largeur des seuils (m) | Altitude de la crête des seuils (mNGF) | Nombre de pile en rivière | Cote haute des tabliers (mNGF) |
| Pont | 0 | Pont du Magasin | | | | 1 | 359.26 |
| Pont | 170 | Pont Clémenceau (RD83) | | | | 2 | 358.93 |
| Seuil | 381 | Seuil de la passerelle des Lettres | 0.80 | 29,70 | 356.53 | | - |
| Pont | 396 | Passerelle des Lettres | | | | 1 | 358.55 |
| Pont | 556 | Pont Carnot | | | | 2 | 358.52 |
| Seuil | 681 | Seuil de la passerelle des Arts | 1.40 | 29,90 | 355.94 | | - |
| Pont | 724 | Passerelle des Arts | | | | - | 356.56 |
| Seuil | 970 | Seuil du pont Denfert-Rochereau | 0.65 | 20,25 | 354.76 | | - |
| Pont | 1004 | Pont Denfert-Rochereau | | | | 1 | 357.98 |
| Pont | 1169 | Passerelle Gambetta | | | | - | 357.02 |
| Seuil | 1188 | Seuil passerelle Gambetta | 0,75 (+0,90) | 20,70 | 354.57 | | - |
| Seuil | 1328 | Seuil du pont Richelieu | 1.50 | 24,70 | 353.57 | | - |
| Pont | 1344 | Pont Richelieu | | | | - | 355.59 |
| Pont | 1656 | Pont du Général de Gaulle | | | | - | 353.68 |

La pente du profil longitudinal de la Savoureuse est de l'ordre de 0,3% dans la traversée de Belfort. Dans les années 30, le lit majeur de la Savoureuse était utilisé comme piège à sédiments. Des matériaux étaient extraits pour les besoins de l'armée qui construisait de nombreux forts. C'est pourquoi il existe un déséquilibre du transport de matériaux solides entre l'amont et l'aval de la Savoureuse le long de la traversée de Belfort : érosion régressive à l'aval et sédimentation à l'amont.

## 2.3 Hydrologie

### 2.3.1 Localisation des stations hydrométriques sur la Savoureuse

Le bassin versant de la Savoureuse est jaugé par l'intermédiaire de trois stations hydrométriques en service depuis plus de 30 ans, voire 50 ans pour la plus ancienne station.

**Tableau 2 : Liste des stations HYDRO présentes sur la Savoureuse**

| Code de la station | Localisation de la station | Département de localisation de la station | Surface du bassin versant (Km²) | Hauteurs Données disponibles | Débits Données disponibles |
|---|---|---|---|---|---|
| **U2345020** | Giromagny | Territoire de Belfort (90) | 30.5 | 1976 - 2016 | 1974 - 2016 |
| **U2345030** | Belfort | Territoire de Belfort (90) | 141 | 1976 - 2016 | 1965 - 2016 |
| **U2345040** | Vieux-Charmont | Doubs (25) | 235 | 1986 - 2016 | 1986 - 2016 |

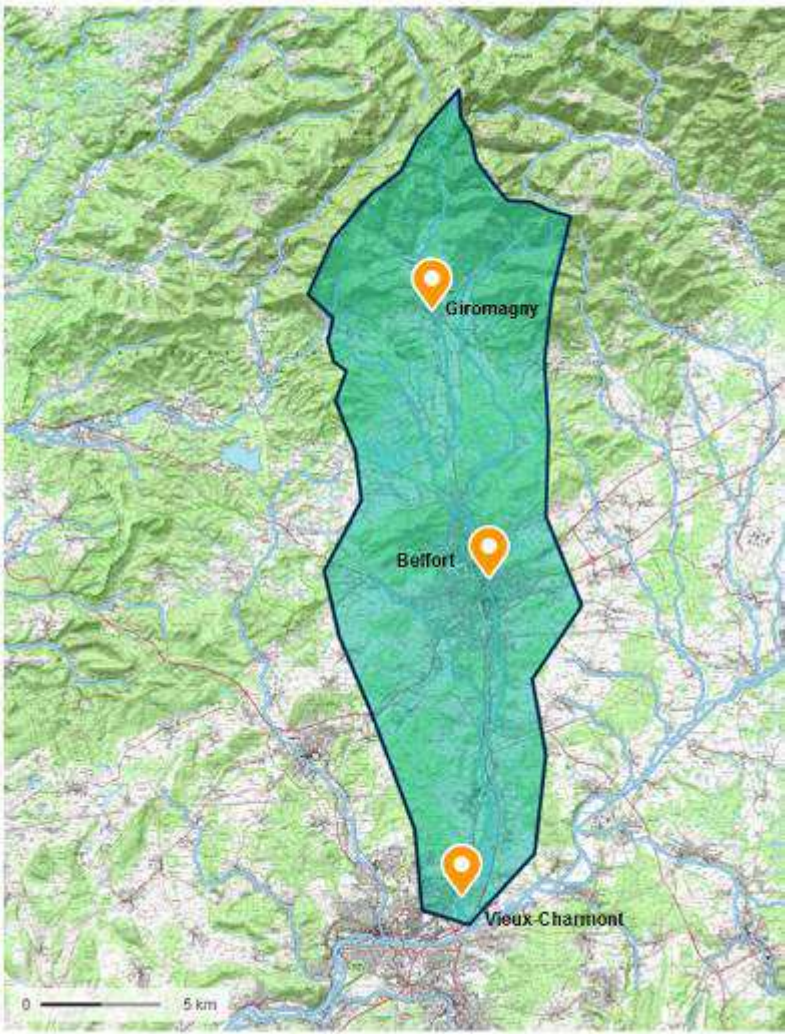



**Figure 2 : Identification du bassin versant de la Savoureuse et localisation des stations hydrométriques**

La station Hydro de Belfort est située sur le périmètre d'étude au niveau du pont Clémenceau.

### 2.3.2 Débits caractéristiques

Sur le périmètre d'étude, la station hydrométrique se situe au niveau du pont Clémenceau. Le bassin versant drainé au droit de la station s'étend sur 141 Km². La qualité globale des mesures est jugée bonne en basses eaux, moyennes eaux comme en hautes eaux.
La station a été déplacée en 1991. La station actuelle se situe env. 128 ml en amont de l'ancienne station. Une copie de la fiche technique fournie par la DDT90 est disponible en annexe.

**Tableau 3 : Coordonnées géographiques de la station**

| Coordonnées de l'ancienne station (Lambert 2 zone centrale) | | | Coordonnées de la station actuelle (Lambert 2 Carto) | | | Distance entre les 2 stations (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **X** | Y | zéro de l'échelle (mNGF) | X | Y | zéro de l'échelle (mNGF) | |
| **939.625** | 303.125 | 356.19 | 939651 | 2303250 | 356.55 | 128 |

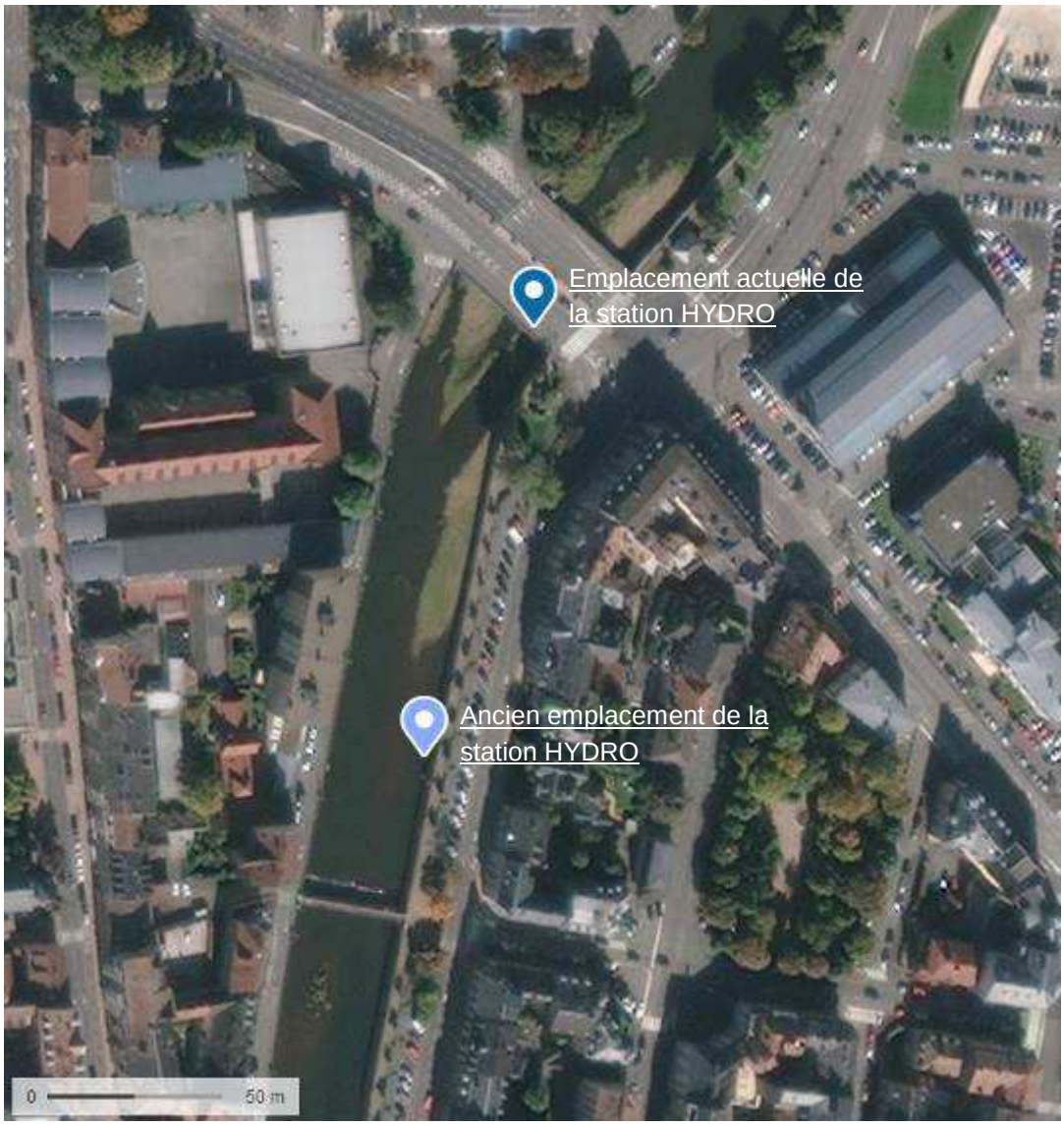



**Figure 3 : Localisation de l'ancien emplacement de la station HYDRO et de la station actuelle**

**Tableau 4 : Débits caractéristiques de la station**

| | Débit instantané ($m^3/s$) | Remarques |
|---|---|---|
| **QMNA5** | 0,25 | |
| **Module** | 4,29 | |
| **Crue biennale (Q2)** | 64 | |
| **Crue quinquennale (Q5)** | 92 | |
| **Crue décennale (Q10)** | 110 | |
| **Crue vicennale (Q20)** | 130 | |
| **Crue cinquantennale (Q50)** | 150 | |
| **Maximum connu** | 209<br>(15/02/1990 12:18) | Hauteur d'eau à la station : 236 cm<br>• Zéro de l'échelle en 1990 : 356,19 mNGF IGN69<br>• Zéro de l'échelle depuis avril 1991 : 356,55 mNGF IGN69 |

*Source : Banque HYDRO*

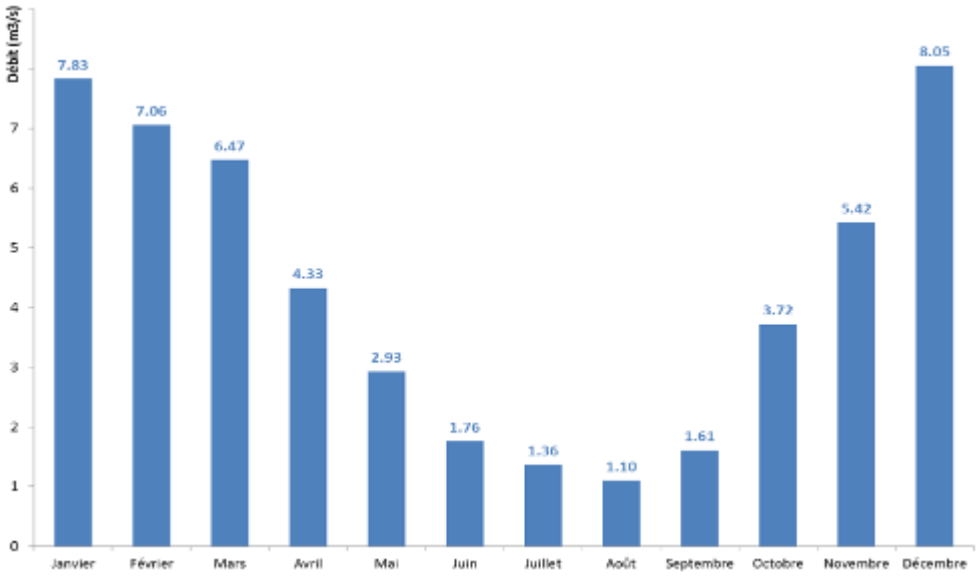



**Figure 4 : Ecoulements mensuels de la Savoureuse à Belfort**
*Source : Banque HYDRO*

La courbe de tarage de la station HYDRO en vigueur est établie depuis 2012.

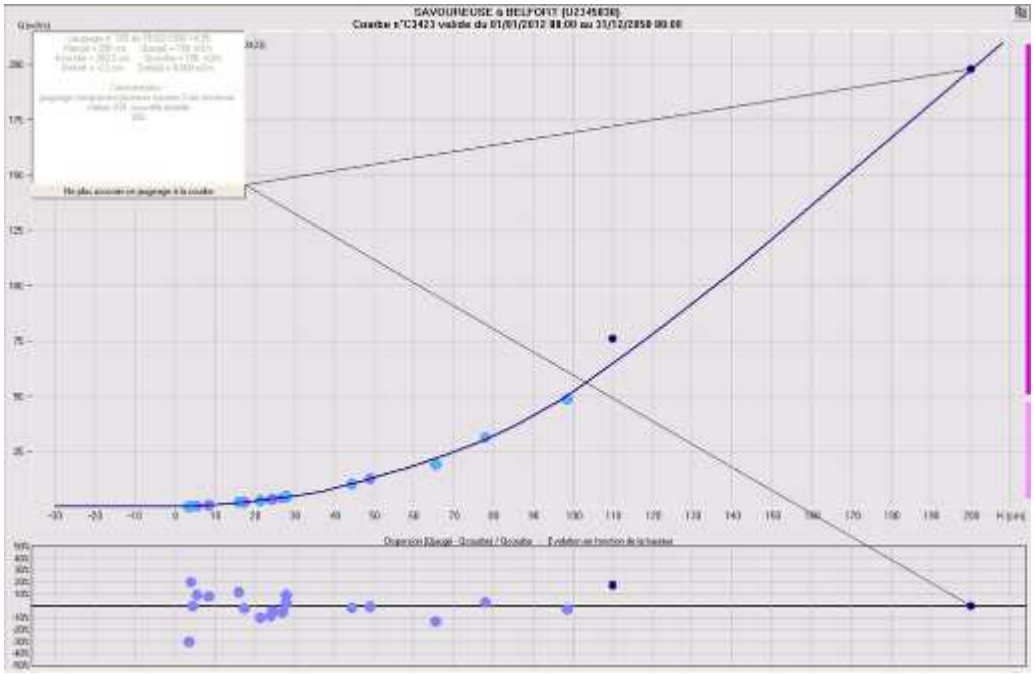


**Figure 5 : Courbe de tarage en vigueur au niveau de la station HYDRO de Belfort**

### 2.3.3 Les crues

**Historique des crues et inondations**

Les crues annuelles enregistrées à la station HYDRO de Belfort sont reprises dans le graphique suivant.

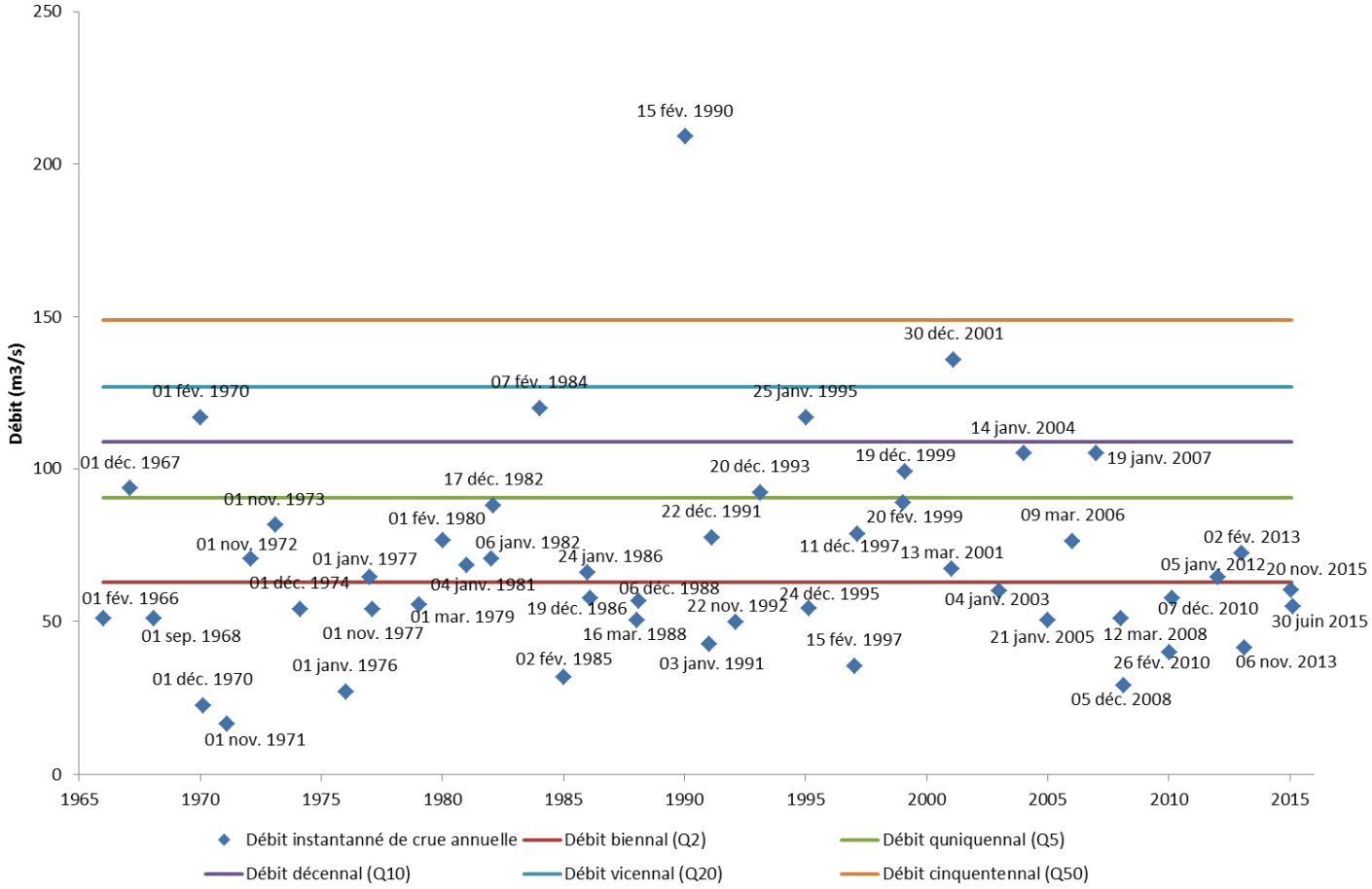



**Figure 6 : Chronique des crues annuelles enregistrées depuis 50 ans**
*Source : CRUCAL - Banque HYDRO*

La crue classée historique qui reste en mémoire des habitants de la vallée de la Savoureuse est la crue des **15 et 16 février 1990.** La Savoureuse fut en crue avec un caractère tout aussi exceptionnel le **24 décembre 1919**. Ces deux crues ont eu des causes semblables : pluies exceptionnelles et persistantes sur les Vosges conjuguées à une fonte des neiges provoquée par le radoucissement des températures en pleine période hivernale.

Sur le Territoire de Belfort, Valdoie, située au confluent de la Rosemontoise et de la Savoureuse fut la commune la plus touchée. Lors des deux crues, le pont du Magasin à Belfort fut fortement touché. En 1990 il s'effondra. Il en fut de même du pont de la RD 19 à Andelnans.
Les dégâts importants provoqués par les débordements de rivières sont en partie dû à la construction en lit majeur des cours d'eau, donc dans des zones naturellement exposées aux inondations. De plus, l'augmentation des surfaces imperméables accroît le ruissellement et diminue les capacités d'infiltration des sols.
Les dégâts occasionnés lors de la crue de la Savoureuse des 15 et 16 février 1990 ont été estimés à 30 millions de francs dans le Territoire de Belfort.

Le graphique suivant montre l'ajustement Gumbel réalisé sur les débits maximaux instantanés de crue sur la période 1965 -2015 par année hydrologique (1er septembre – 31 aout).

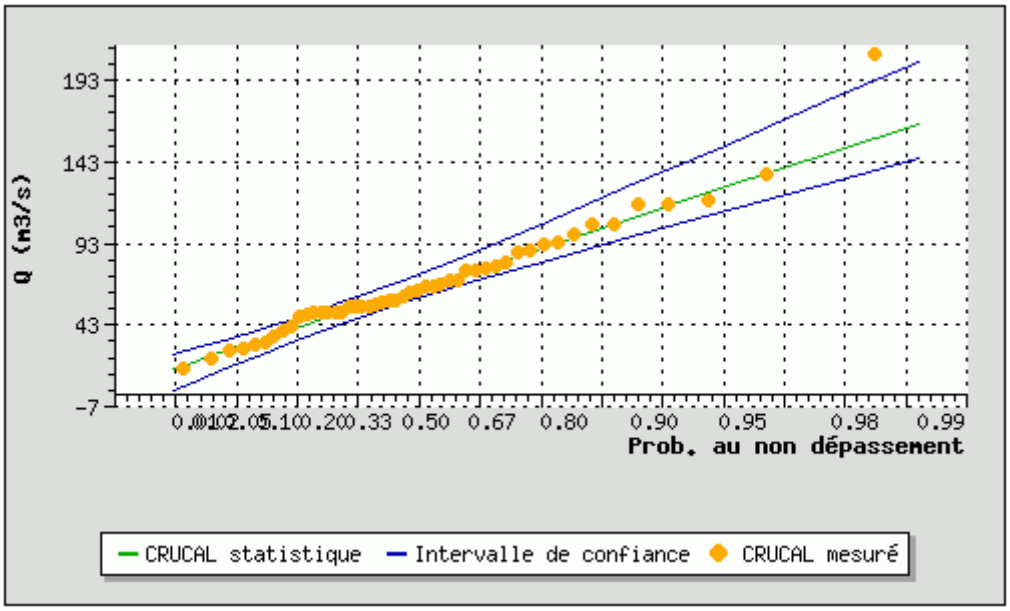



**Figure 7 : Ajustement statistique des débits de crues annuelles et intervalle de confiance à 95% – loi de Gumbel**
*Source : CRUCAL - Banque HYDRO*

La droite d'ajustement traduit de manière relativement correcte les débits instantanés de crue annuelle, à l'exception de la crue de 1990 dont le débit (209 $m^3/s$) semble avoir été surestimé.

| | | |
|---|---|---|
| Cinquantennale | 149.000 | [131.000 ; 182.000] |
| Vicennale | 127.000 | [112.000 ; 152.000] |
| Décennale | 109.000 | [97.500 ; 129.000] |
| Quinquennale | 90.600 | [81.900 ; 105.000] |
| Biennale | 62.900 | [56.800 ; 70.600] |

**Figure 8 : Débits caractéristiques des crues à la station et intervalle de confiance à 95%**
*Source : CRUCAL - Banque HYDRO consultée le 23/01/2017*

**<u>Types de crue du bassin versant de la Savoureuse</u>**

Toutes les rivières sont amenées à déborder en cas de crue pour occuper le lit majeur, zone d'inondation naturelle des cours d'eau. Ce phénomène permet la fertilisation des vallées alluviales et le ralentissement de la propagation de la crue.

Les conditions hydrologiques les plus redoutées dans le bassin versant de la Savoureuse sont la conjugaison de fortes pluies ou de pluies de longue durée sur un sol gelé et enneigé au niveau des Vosges et notamment du Ballon d'Alsace. Le redoux entraîne la fonte des neiges et le sol n'est pas toujours capable d'assimiler ce surplus de ruissellement. De plus, les surfaces imperméabilisées artificiellement sont concentrées en fond de vallées au bord de la Savoureuse et de ses affluents. S'y ajoutent un entretien insuffisant des rivières et parfois des aménagements ponctuels mal conçus.

Six stations hydrométriques enregistrent en continu les débits de la Savoureuse (Giromagny, Belfort, Vieux-Charmont), du Rhôme (Lachapelle-sous-Chaux) et de la Rosemontoise (Rosemont, Chaux). Le débit de pointe de la Savoureuse enregistré le 15 février 1990 à Belfort a été de 209 $m^3/s$.

La propagation des crues est très rapide. Entre Belfort et Sochaux, à l'aval de la confluence avec l'Allan, il a été enregistré un temps de propagation de 7h30 en février 1990. La station limnimétrique de Giromagny dans le Territoire de Belfort est considérée comme la plus fiable pour déclencher l'alerte. Le battement est de 10 h entre Giromagny et les usines Peugeot de Sochaux, soit une vitesse pour l'onde de crue de 0,8 m/s.

# 3. Construction et calage des modèles

## 3.1 Modélisations mises en œuvre

### 3.1.1 Préambule

La première étude hydraulique, lors de la mission MH 1 « Etude préalable hydraulique », a permis de cerner les contraintes liées au régime hydraulique de la Savoureuse et fixer des orientations d'aménagement permettant de répondre aux objectifs de rétablissement de la continuité biologique, de diversification des habitats, de création d'une promenade rivulaire et de neutralité hydraulique du projet en période de crue.

Si l'établissement des orientations d'aménagement, lors de la mission MH1 « Etude préalable hydraulique », a pu être mené sur la base d'un modèle hydraulique 1D, déterminant des caractéristiques hydrauliques moyennes sur la largeur de la Savoureuse, la validation technique des ouvrages, notamment pour démontrer la continuité biologique et la diversification des écoulements en basses et moyennes eaux, a demandé des données plus fines. Ainsi, la mission MH2 « Validation hydraulique de l'avant-projet » avait pour objectifs :

- D'établir un modèle hydraulique 2D du lit mineur de la Savoureuse,
- De valider la faisabilité hydraulique de l'avant-projet, d'affiner le dimensionnement des aménagements visant une amélioration écologique du fonctionnement de la rivière (ouvrages hydrauliques, actions dans le lit mineur et de diversification des écoulements) et de caler l'altimétrie de la promenade,
- D'évaluer les conditions d'exploitation des futurs aménagements, notamment la promenade et installations piétonnes.

Ainsi, 2 modèles hydrauliques ont été mis en œuvre pour des finalités différentes.

**Tableau 5 : Modèles hydrauliques mis en œuvre**

| Finalité | Modélisation du lit mineur | Modélisation du lit majeur | Situations hydrologiques associées |
|---|---|---|---|
| Etude de l'incidence du projet en crue | 1D (profils en travers issus de la bathymétrie 2015) | 2D (LIDAR) | Q2, Q10 et crue de 1990 |
| Dimensionnement hydroécologique du projet (rétablissement de la continuité écologique au niveau des seuils transversaux et diversification des écoulements) | 2D (bathymétrie levée en été 2015) | 2D (LIDAR) | Etiage, module, débit moyen minimal mensuel (aout) et débit moyen maximal mensuel (décembre) |

Hormis la structure dans le lit mineur, les modèles sont similaires : structure des ponts et des seuils, modélisation du lit majeur en 2D et un unique point d'injection en amont du modèle.

### 3.1.2 Le logiciel

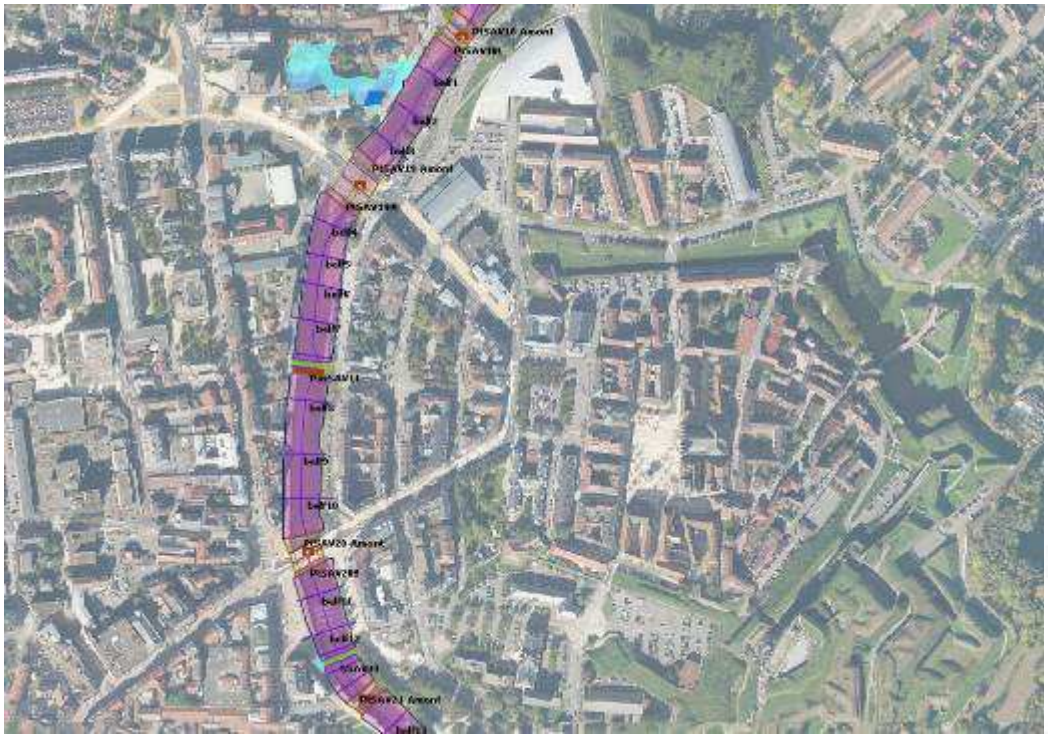
Le logiciel utilisé est INFOWORKS ICM, développé par Innovyze. INFOWORKS ICM est un modèle complet de simulation hydrologique et hydraulique des écoulements. Il permet de modéliser de manière fidèle des cours d'eau en régime permanent ou transitoire, de déterminer les caractéristiques hydrauliques en chaque nœud de calcul – profils en travers, ouvrages et mailles (hauteur, vitesse et débit).

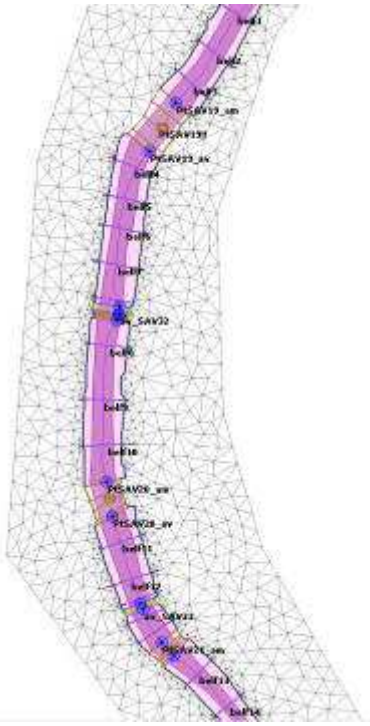
La présentation du logiciel est proposée en annexe.

### 3.1.3 Construction du modèle 1D/2D

Le modèle est construit à partir :

- D'une quarantaine de profils en travers de la Savoureuse, des levés d'ouvrages d'art et des seuils (données PPRi – Avril 2008 et profils en travers reconstitués sur la base du levé bathymétrique de 2015),
- du LIDAR du lit majeur (octobre 2009). Le maillage est composé d'environ 30 000 mailles d'une surface comprise entre 25 et 60 m².
- des profils de berges issus du plan de masse.





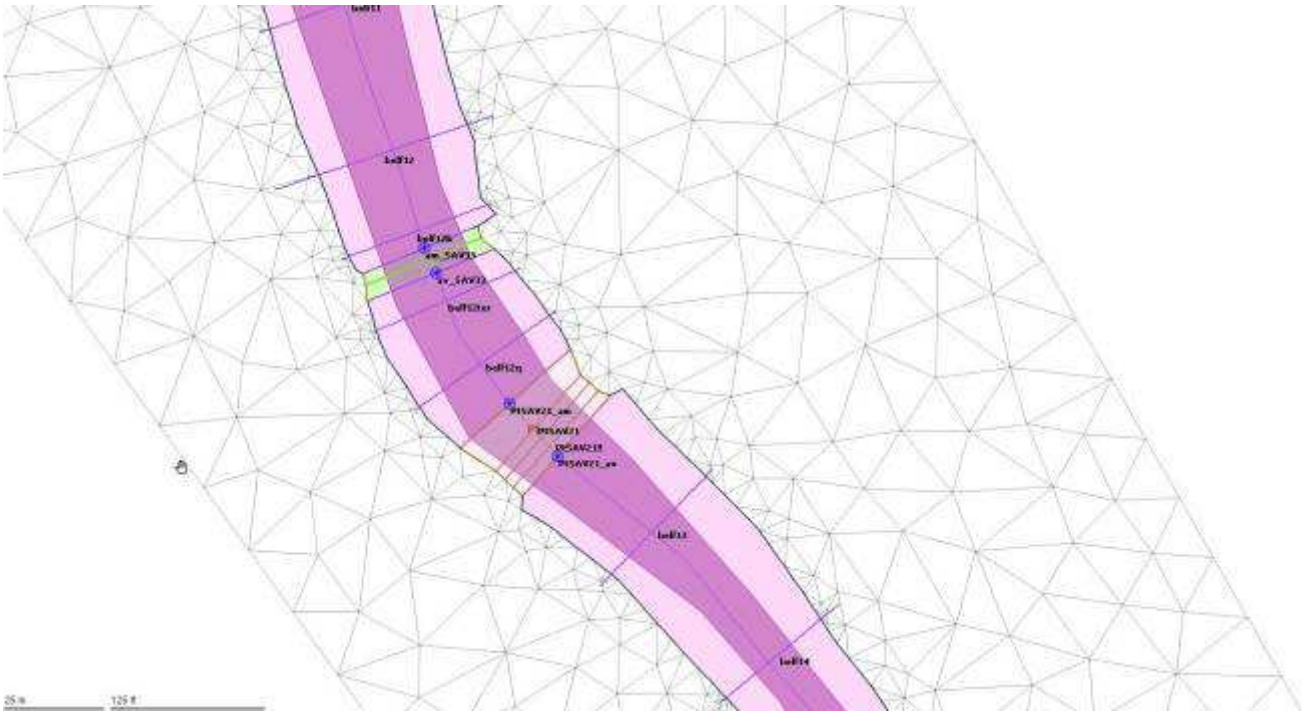


Figure 9 : Aperçus du modèle 1D / 2D

### 3.1.4 Construction du modèle 2D/2D

Afin de comprendre et de quantifier les écoulements de la Savoureuse au niveau du projet d'aménagement d'une promenade en berge, une modélisation hydraulique en 2D de la rivière et des simulations de différentes conditions hydrologiques ont été réalisées dans le cadre de cette mission.
Le modèle 2D a été construit sur la base :

- de la bathymétrie de la Savoureuse de l'amont du pont du Magasin jusqu'à l'aval du pont Charles De Gaule (date du relevé bathymétrique : été 2015). Des transects de la rivière ont été levés tous les 5 m environ le long de la Savoureuse. Chaque transect comporte, en largeur, 1 point tous les 2 m env. Les accidents bathymétriques ont été cartographiés (seuils, fosse de dissipation, atterrissement, …)

Figure 10 : Zoom sur des transects de rivière disponibles sur le plan bathymétrique

- du LIDAR du lit majeur (octobre 2009). Le maillage est composé d'environ 30 000 mailles d'une surface comprise entre 25 et 60 m².
- Sur les secteurs situés en amont et en aval des levés bathymétriques, le modèle 1D a été repris.

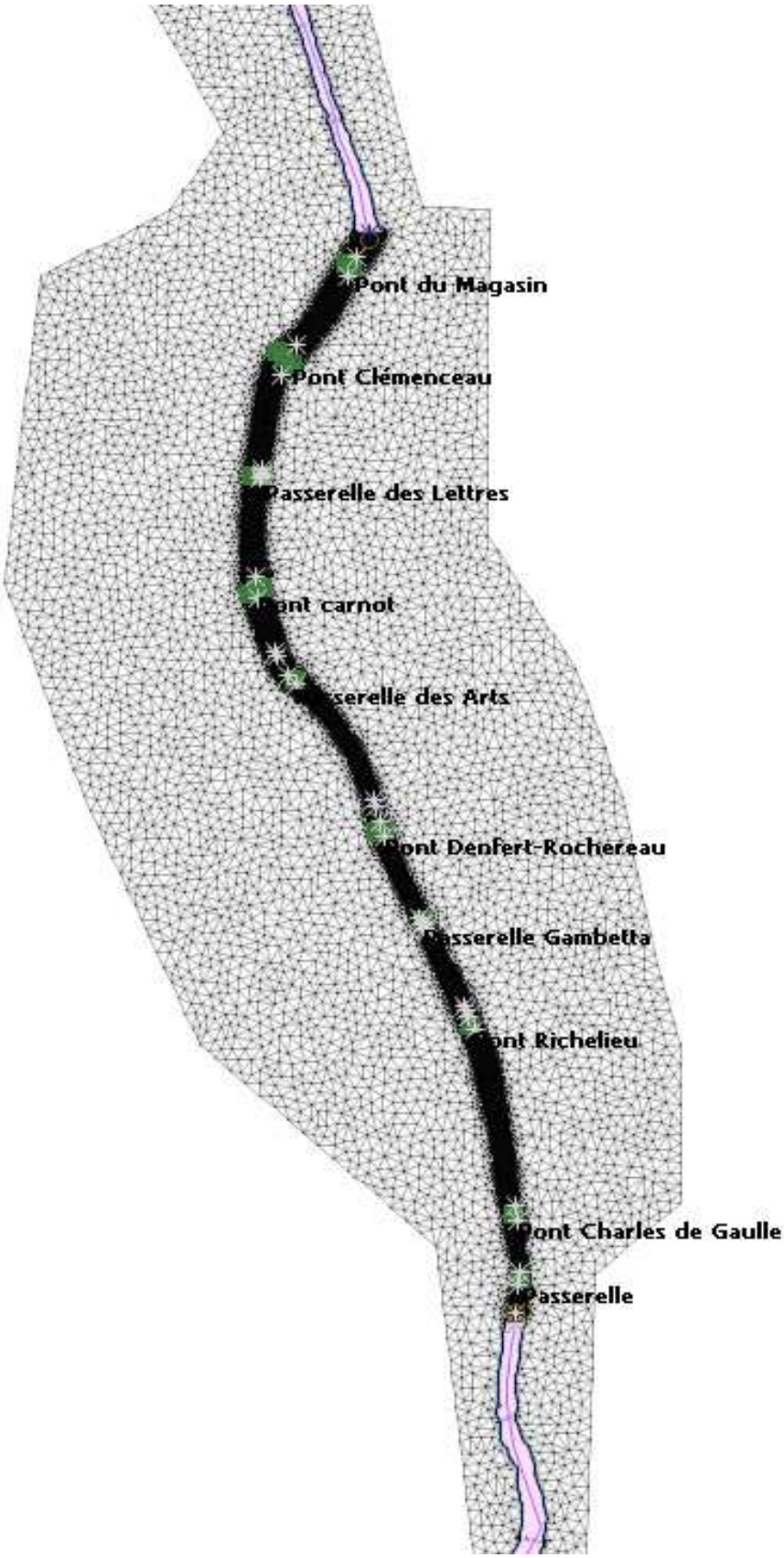
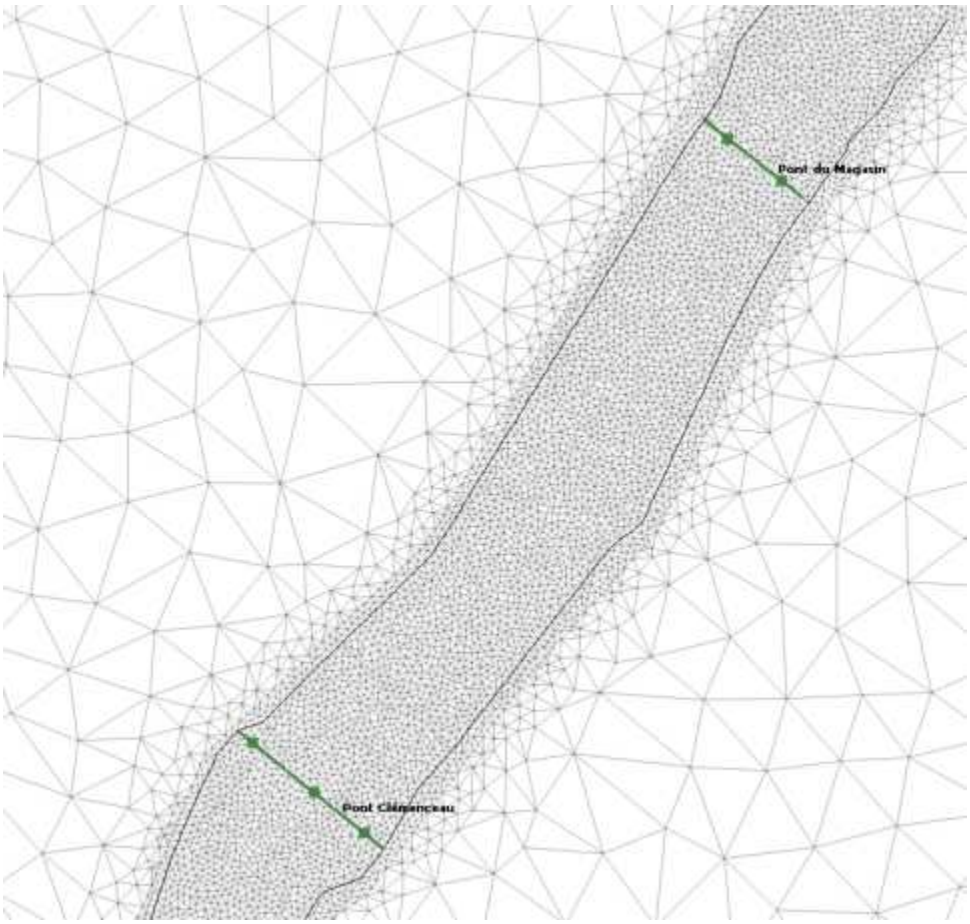



**Figure 11 : Aperçu général du modèle 2D**



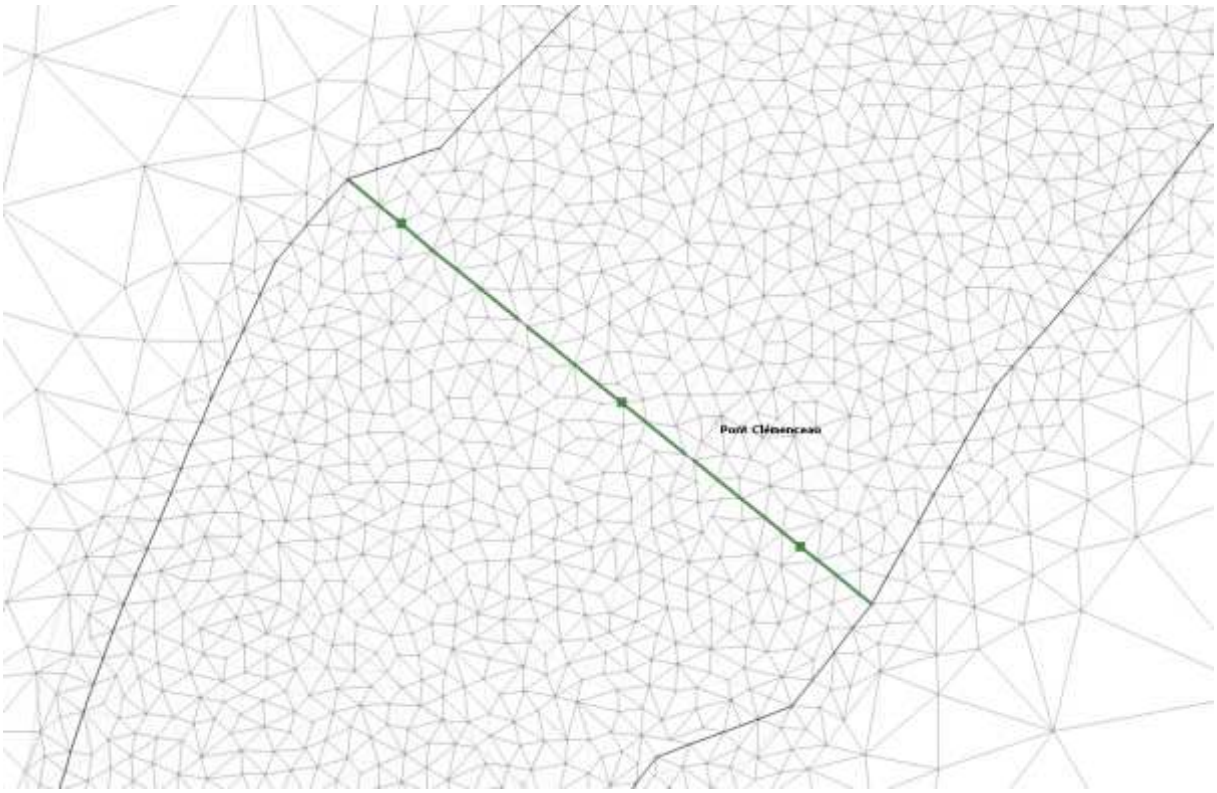




**Figure 12 : Aperçus du modèle 2D – zoom sur le pont Clémenceau**

### 3.1.5 Comparaison des données bathymétriques PPRI et 2015

Les profils en travers issus des données PPRi (localisés sur la figure suivante) se situent au niveau des singularités hydrauliques à savoir :

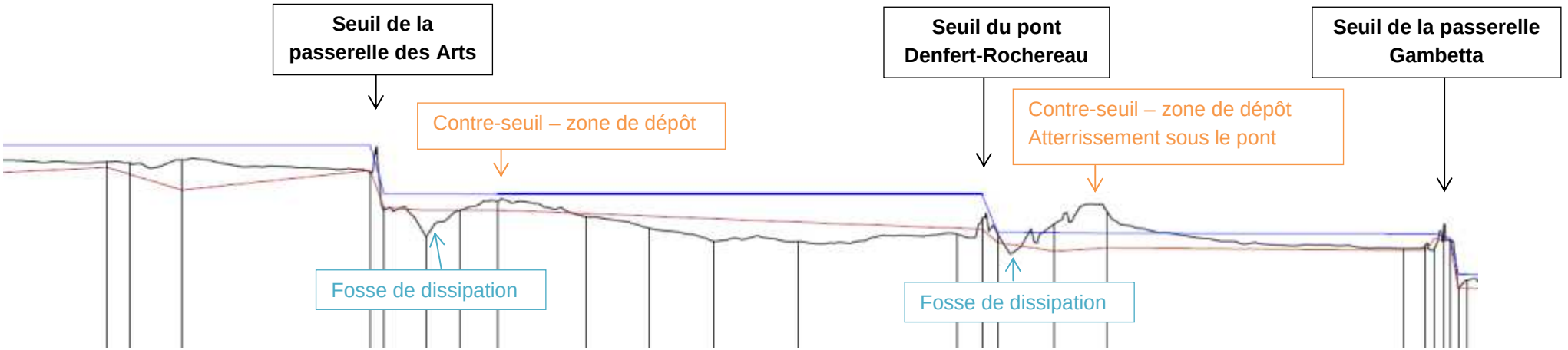
- En amont et en aval des ponts
- En amont et en aval des seuils

Il n'a pas été levé de profils en travers de rivière entre les différentes singularités.

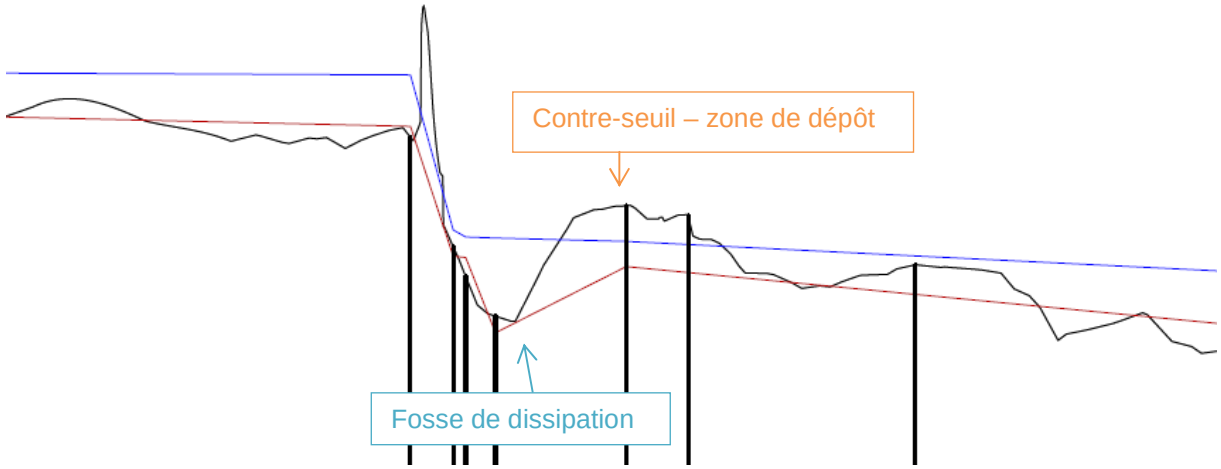
Le levé bathymétrique de 2015 est bien plus précis que les profils en travers puisqu'il permet de décrire :

- Les cotes altimétrique du fond du lit de la Savoureuse entre les ouvrages hydrauliques
- Les différences altimétriques liées aux seuils avec présence :
  - de zones de dépôts en amont des seuils,
  - en aval, d'une fosse de dissipation et d'un contre seuil (atterrissement).

**Figure 13 : Comparaison entre la répartition spatiale des profils en travers (en rouge à g.) et des levés bathymétriques (à dr.)**




*Entre l'amont du seuil de la passerelle des Arts et le seuil Gambetta*




*Seuil Richelieu*

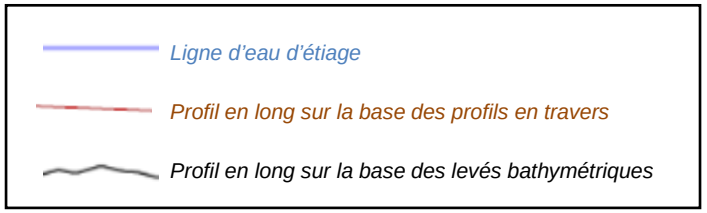



**Figure 14 : Comparaison des profils en long de la Savoureuse construit sur la base des profils en travers et de la bathymétrie**

### 3.1.6 Paramètres de calage

Le calage du modèle consiste à ajuster les différents paramètres du modèle afin que les valeurs calculées (hauteur, débit et temps de propagation de la crue) soient aussi proches que possible des mesures disponibles (mesures aux stations, photographies de crue et laisses de crues).

Les variables d'ajustement sont les suivantes :

- Les coefficients des ouvrages hydrauliques (seuils).

Le coefficient du débit du seuil varie usuellement entre 0.32 (seuil non profilé) et 0.5 (seuil profilé).
Pour améliorer au mieux l'écoulement et éviter des dépressions entre la lame d'eau et le béton, un seuil profilé, comme c'est le cas des seuils étudiés, a la forme de la surface libre de la lame déversante.

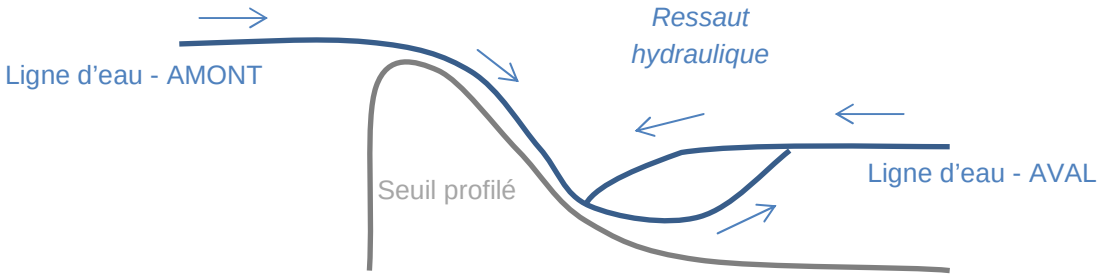



**Figure 15 : Représentation schématique en coupe d'un seuil bien profilé et de la lame d'eau déversante en période normale d'écoulement**

Un coefficient de débit de 0.5 a été affecté à chacun des 5 seuils profilés du secteur d'étude.

- Les coefficients de Strickler relatif à la rugosité du lit mineur et du lit majeur.

Voici quelques ordres de grandeur du coefficient de Strickler :

**Tableau 6 : Exemples de valeur du coefficient de Strickler**

| Nature des parois | Valeur de $K$ en $m^{1/3}/s$ |
|---|---|
| Béton lisse | 75-90 |
| Canal en terre, non enherbé | 60 |
| Canal en terre, enherbé | 50 |
| Rivière de plaine, sans végétation arbustive | 35-40 |
| Rivière de plaine, large, végétation peu dense | 30 |
| Rivière à berges étroites très végétalisées | 10-15 |
| Lit majeur en prairie | 20-30 |
| Lit majeur en vigne ou taillis | 10-15 |
| Lit majeur urbanisé | 10-15 |
| Lit majeur en forêt | <10 |

## 3.2 Calage en basses eaux

### 3.2.1 Données disponibles

Les levers bathymétriques ont été accompagnés de mesures des niveaux d'eau sur les mois d'août et septembre 2015. Les débits à la station HYDRO de Belfort ont été extraits pour les jours de levers.

### 3.2.2 Hypothèses de géométrie des seuils retenues

Avant de simuler les différents débits de la Savoureuse correspondant aux dates de levés des cotes du géomètre, il a fallu définir la géométrie détaillée des déversoirs. En effet, selon la saison et le débit, les batardeaux sont supprimés ou fixés à des cotes différentes.

Les campagnes de terrain menées à l'été 2015 ont permis d'identifier la présence ou non de batardeau pour les 5 seuils.

**Figure 16 : Seuil des Lettres et seuil des Arts le 7 juillet 2015**

**Figure 17 : Seuil Denfert-Rochereau et seuil Gambetta le 3 septembre 2015**

Figure 18 : Seuil Richelieu le 3 septembre 2015

Le récapitulatif des caractéristiques géométriques retenues pour chaque seuil est consigné dans le tableau suivant.

Tableau 7 : Caractéristiques des seuils et de leurs déversoirs en fonction des débits simulés

| | Débit (m3/s) | Niveau sous l'influence d'un seuil | Cote de la crête du seuil (m NGF) | Présence d'un batardeau | Cote déversoir (m NGF) |
|---|---|---|---|---|---|
| en amont du pont du Magasin | 0,17 | Aucune | - | - | - |
| en amont du pont Clémenceau près de l'atterrissement au milieu du lit | 0,17 | Aucune | - | - | - |
| en aval du pont Clémenceau (à l'aval de l'atterrissement en rive gauche) | 0,17 | Lettres | 356,53 | Oui | 356,53 |
| en aval du seuil des lettres (en amont de l'atterrissement) | 0,17 | Arts | 355,94 | Oui | 355,79 |
| en aval du pont Carnot (rive gauche) | 0,17 | Arts | 355,94 | Oui | 355,79 |
| en aval du seuil des Arts | 0,37 | Denfert | 354,76 | Oui | 354,46 |
| en aval de la passerelle des Arts (rive gauche) | 0,37 | Denfert | 354,76 | Oui | 354,46 |
| en aval de la passerelle des Arts (rive gauche) | 0,37 | Denfert | 354,76 | Oui | 354,46 |
| entre la passerelle des Arts et le pont Denfert-Rochereau | 0,27 | Denfert | 354,76 | Oui | 354,46 |
| en amont du seuil Denfert-Rochereau (rive gauche) | 0,37 | Denfert | 354,76 | Oui | 354,46 |
| en amont du seuil Gambetta | 0,37 | Gambetta | 354,57 | Non | 353,72 |
| en aval du seuil Gambetta | 0,37 | Richelieu | 353,57 | Oui | 352,80 |
| en aval du seuil Richelieu | 0,37 | Aucune | - | - | - |
| entre le seuil et le pont Richelieu | 0,18 | Aucune | - | - | - |
| en aval du pont Richelieu | 0,18 | Aucune | - | - | - |

### 3.2.3 Méthode de calage

Le calage a consisté à simuler les débits sur le modèle 2D et à ajuster les coefficients d'ouvrage et de rugosité de façon à ce que la ligne d'eau simulée retranscrive au plus juste la ligne d'eau observée.

Il est apparu que les coefficients de rugosité n'avaient que peu d'influence sur la ligne d'eau d'étiage. La ligne d'eau est en effet principalement tenue par les seuils qui fonctionnent en régime dénoyé.
Le calage du modèle d'étiage est ainsi quasi indépendant des coefficients de rugosité. Mais il a permis de vérifier la bonne validation des structures et de la géométrie du modèle.

### 3.2.4 Résultats du calage en basses eaux

Les écarts entre la ligne d'eau relevée par le géomètre en été 2015 et la ligne d'eau simulée par le modèle ont été étudiés. Les écarts moyens sont d'environ 1 cm et varient de -6 cm à +9 cm.

Les débits retenus sont :

- de 0,17 $m^3/s$ en août et
- 0,18 à 0,37 $m^3/s$ en septembre.

**Tableau 8 : Analyse du calage du modèle en basses eaux**

| | Date | Cote relevées par le géomètre (mNGF) | Cote simulée (mNGF) | Ecart (m) |
|---|---|---|---|---|
| en amont du pont du Magasin | 11/08/2015 10h | 356,74 | 356,74 | 0,00 |
| en amont du pont Clémenceau près de l'atterrissement au milieu du lit | 12/08/2015 11h05 | 356,63 | 356,72 | 0,09 |
| en aval du pont Clémenceau (à l'aval de l'atterrissement en rive gauche) | 12/08/2015 17h20 | 356,55 | 356,54 | -0,01 |
| en aval du seuil des lettres (en amont de l'atterrissement) | 13/08/2015 15h05 | 355,85 | 355,86 | 0,01 |
| en aval du pont Carnot (rive gauche) | 14/08/2015 | 355,83 | 355,86 | 0,03 |
| en aval du seuil des Arts | 16/09/2015 15h | 354,72 | 354,70 | -0,02 |
| en aval de la passerelle des Arts (rive gauche) | 16/09/2015 15h05 | 354,63 | 354,65 | 0,02 |
| en aval de la passerelle des Arts (rive gauche) | 16/09/2015 15h15 | 354,62 | 354,65 | 0,03 |
| entre la passerelle des Arts et le pont Denfert-Rochereau | 26/08/2015 14h30 | 354,55 | 354,61 | 0,06 |
| en amont du seuil Denfert-Rochereau (rive gauche) | 16/09/2015 15h30 | 354,64 | 354,65 | 0,01 |
| en amont du seuil Gambetta | 16/09/2015 16h | 353,97 | 353,98 | 0,01 |
| en aval du seuil Gambetta | 16/09/2015 16h05 | 353,00 | 352,94 | -0,06 |
| en aval du seuil Richelieu | 16/09/2015 16h45 | 351,90 | 351,85 | -0,05 |
| entre le seuil et le pont Richelieu | 03/09/2015 10h35 | 351,85 | 351,82 | -0,03 |
| en aval du pont Richelieu | 03/09/2015 10h30 | 351,39 | 351,40 | 0,01 |

# 3.3 Calages en hautes eaux

## 3.3.1 Données disponibles

### 3.3.1.1 Plan de Prévention des risques d'Inondation de la Savoureuse, du Rhôme et de la Rosemontoise

- Crue de référence

Les cartes réglementaires sont basées sur une crue de référence théorique. Elle est constituée des plus hautes eaux obtenues par la superposition des zones inondées lors de la crue de février 1990 et de la crue centennale modélisée.

*N.B. La crue de février 1990 n'était pas homogène sur l'ensemble du bassin versant et de plus, les champs d'inondation ont été modifiés depuis par des travaux de remblaiements et une certaine imperméabilisation dans le lit majeur.* Lors de la crue de 1990, la rivière n'est pas sortie de son lit dans Belfort sur le secteur d'étude sauf au niveau du pont du Magasin et en amont du pont Clémenceau.

- Cartographie règlementaire du PPRi

Bien que la valeur des cotes du PPRi fasse l'objet de discussions auprès des services de l'Etat, la cartographie du PPRi est un document en vigueur imposable.

**Tableau 9 : Cotes de référence calculées par modèle mathématique**

| Numéro des profils | Cote de référence rattachée au NGF | |
|---|---|---|
| P23 | 369,90 | |
| Pont 24 amont | 369,30 | |
| Pont 24 aval | 368,60 | |
| P26 | 365,80 | |
| P27 | 364,70 | |
| P28 | 364,55 | |
| P29 | 364,30 | |
| P30 | 364,25 | |
| P31 | 363,65 | |
| P32 | 362,90 | |
| Pont 33 amont | 362,55 | |
| **Pont 33 aval** | *362,90* | 362,15 |
| **P34** | *362,65* | 361,90 |
| **P36** | *362,05* | 361,65 |
| **P37** | *361,60* | 361,20 |
| **P38** | *361,10* | 360,70 |
| **P39** | *361,00* | 360,60 |
| Pont 40 amont | 360,55 | |

| Numéro des profils | Cote de référence rattachée au NGF |
|---|---|
| Pont 40 aval | 360,40 |
| P42 | 360,37 |
| Passerelle 43 amont | 360,35 |
| Passerelle 43 amont | 360,10 |
| P44 aval | 359,45 |
| P45 | 359,30 |
| Pont 46 amont | 359,35 |
| Pont 46 aval | 358,85 |
| P48 | 358,45 |
| Pont 49 amont | 358,50 |
| Pont 49 aval | 357,05 |
| P51 | 356,26 |
| P53 | 355,85 |
| P54 | 355,25 |
| P55 | 354,60 |
| P57 | 353,95 |
| P58 | 353,85 |
| P59 | 353,05 |

*Le PPRI précise que la crue modélisée ne prend pas en compte les surverses d'étangs, rejets des réseaux d'eaux pluviales et autres apports secondaires. De même, elle ne prend pas en compte toutes les modifications sur l'ensemble du bassin versant (aménagements des rivières, remblais, étangs...), effectuées depuis la crue de février 1990 et depuis le levé photogrammétrique de janvier 1995.*

*Aux profils indiqués en gras, les cotes de référence en italique correspondent aux niveaux d'eau observés lors de la crue historique de février 1990.*

*Source : Annexe du PPRi*

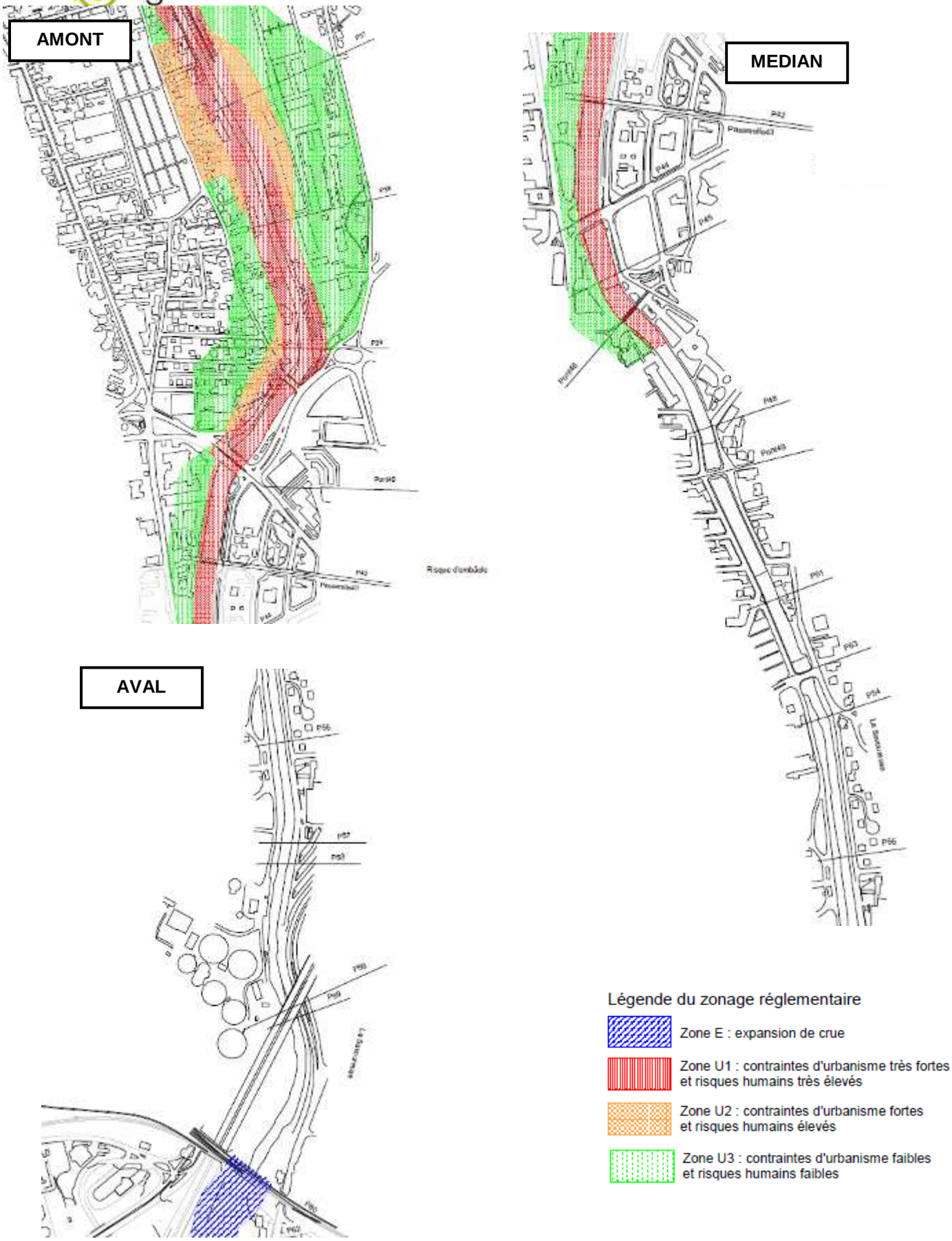



**Figure 19 : Cartes réglementaires du PPRi**

### 3.3.1.2 Photographies de crue en février 1990

Des photos ont été prises lors de la crue de 1990. Elles sont relativement explicites pour être facilement localisables. Ces photos renseignent sur le niveau au moins atteint par la crue. Il est toutefois possible que la crue soit allée au-delà des cotes visibles sur les photos. En complément l'absence de débordement indique que la cote maximale atteinte ne dépasse pas les cotes de quai. Ces deux données permettent ainsi de définir une fourchette de cote de calage sur plusieurs points de la traversée de Belfort.

Les photos suivantes sont issues du site internet : *http://www.pbase.com/rollerboy/innondations90* et de la DDT90.

Les figures suivantes présentent des exemples de photographies.

**Figure 20 : Vues rue de Valdoie et rue Jean Moulin – en amont du secteur d'étude**
*Source : DDT90*

**Figure 21 : Vue amont de la passerelle des Lettres - à la limite de monter en charge**
*Credit photo : © Copyright Marc BERNARD*

**Figure 22 : Quai Vallet - pas de débordements sur les quais**
*Credit photo : © Copyright Marc BERNARD*

**Figure 23 : Vue amont du pont Carnot - à la limite de monter en charge**
*Credit photo : © Copyright Marc BERNARD*

**Figure 24 : Passerelle des Arts – en charge**
*Credit photo : © Copyright Marc BERNARD*

**Figure 25 : Vue de la place des Arts**
*Source : DDT90*

**Figure 26 : Vue du seuil Gambetta depuis le quai Keller – pas de débordement**

**Figure 27 : Vue amont du pont Denfert-Rochereau – pas de débordement**
*Credit photo : © Copyright Marc BERNARD et http://www.cancoillotte.net/spip.php?article979*

**Figure 28 : Vue amont du pont Richelieu - à la limite de monter en charge**
*Credit photo : © Copyright Marc BERNARD*

### 3.3.1.3 Données de la station hydrométrique de Belfort

En 1990, la station HYDRO située dans Belfort était située 128 ml en aval du pont Clémenceau. Le niveau d'eau maximal enregistré par la station est 2.36 m le zéro de l'échelle étant à 356,19 mNGF (cote du zéro de l'échelle en février 1990), soit 358,55 mNGF observé à 12h18 le 15 février 1990. En 1990 aucun pont ne franchissait la rivière en ce point. Pendant la crue, l'échelle aurait été arrachée.
Un jaugeage a été réalisé le 15 février 1990 à 14h35 (soit environ 2h30 après le pic de crue). Le débit mesuré lors de ce jaugeage est de 198 $m^3/s$.

Depuis 1990, la configuration actuelle du réseau hydrographique, des seuils et des ponts n'a pas changé, à l'exception du pont du Magasin qui a été reconstruit et de la passerelle Gambetta qui date de 2006.

Depuis la mise en service de la station de Belfort (1965), les cotes d'eaux observées sont disponibles via le site de la banque HYDRO. Ainsi les limnigrammes de crue ainsi que les hydrogrammes retranscrits à l'aide de la courbe de tarage de la station sont exploitables.
En complément, les hydrogrammes et cotes enregistrés à la station HYDRO pour les crues récentes du 18 janvier 2007 et du 9 mars 2006 ont été exploités pour disposer de crues de validation du calage du modèle en période de crue.

#### 3.3.1.4 Synthèse sur le choix des évènements hydrologiques utilisés pour le calage du modèle

Les cotes figurant au PPRI sont largement supérieures aux cotes de débordement des quais alors que les débordements sont très limités sur la carte d'aléa.
Il est rappelé que lors de la crue de 1990, la rivière n'est pas ou peu sortie de son lit dans Belfort sur le secteur d'étude sauf au niveau du pont du Magasin et en amont du pont Clémenceau.

En aval du pont Clémenceau, la banque HYDRO a enregistré une hauteur d'eau de 358,55 mNGF lors du pic de la crue de février 1990. La cote de référence indiquée dans le PPRi, issue d'une simulation d'une crue centennale, est de 360,40 mNGF, soit environ 1,90 m au-dessus de la cote enregistrée par la station.

Les cotes PPRI issues d'une simulation sur modèle de la crue de 1990 sont largement au-dessus des cotes observées en février 1990. Ces cotes présentent donc une incohérence et ne sont pas retenues pour le calage.

Les données retenues pour le calage sont :

**Tableau 10 : Données de validation du modèle hydraulique en période de crue**

| Dates | Hauteur d'eau enregistrée (m) | Cote observée (mNGF) | Débit (m3/s) (d'après la banque HYDRO) |
|---|---|---|---|
| **15/02/1990** | 2.36 (ancienne station) | 358.55 (ancienne station) | 209 |
| **18/01/2007** | 1.34 | 357.89 | 105 |
| **09/03/2006** | 1.12 | 357.67 | 76.3 |

En complément, il est vérifié pour 1990 que les niveaux au droit des zones où les photos sont prises atteignent ou dépassent les niveaux figurant sur les photos sans débordement significatif.

### 3.3.2 Paramètres du calage

Le calage en hautes eaux consiste à vérifier que :

- la zone inondable observée lors de la crue de 1990 est bien représentée,
- les niveaux d'eau photographiés lors de la crue soit au minimum atteints,
- la cote d'eau enregistrée et le débit jaugé au niveau de la station hydro soit proche de la cote d'eau et du débit simulés.

## 3.4 Etude paramétrique de calage en crue

### 3.4.1 Tests de calage des coefficients de rugosité pour les débits issus de la banque HYDRO

L'hydrogramme de la crue de février 1990 indiqué par la banque HYDRO au niveau de la station située 128 ml sous le pont Clémenceau à Belfort (débit de pointe de 209 $m^3/s$) a été simulé.
Etant donné la configuration du profil en travers de la Savoureuse, les coefficients de rugosité du lit, dit coefficient de Strickler (Ks), suivants ont été testés :

| Ks en lit mineur | Ks sur les murs et talus de berge | Ks en lit majeur | Remarques |
|---|---|---|---|
| 30* | 50 | 15 | Tests sur la rugosité du fond du lit |
| 40 | 50 | 15 | |
| 50 | 50 | 15 | |
| 40 | 60 | 15 | Tests sur l'incidence de la rugosité des murets |
| 50 | 60 | 15 | |
| 100 | 100 | 15 | Coefficients n'ayant pas de signification physique (parois très lisses…) mais testés afin d'obtenir la ligne d'eau observée |
| 170 | 170 | 15 | |
| 200 | 200 | 15 | |

* Il s'agit du coefficient de calage en basses eaux

Le tableau suivant présente les cotes simulées pour les différents tests de calage sur la rugosité du fond du lit et des berges. La crue de 2007 a aussi été simulée pour validation.

| Coefficients de rugosité testés | Débit simulé | Cotes simulées (mNGF) | | *Ecart entre la cote simulée et la cote observée (m)* |
|---|---|---|---|---|
| | | Emplacement actuel de la station HYDRO - Pont Clémenceau (aval) | Ancien emplacement de la station HYDRO - 128 ml en aval du pont Clémenceau | |
| Ks lit mineur/mur : 30/50 | fev90 - 209 m3/s | 359.23 | 359.11 | *0.56* |
| Ks lit mineur/mur : 40/50 | fev90 - 209 m3/s | 359.14 | 359.04 | *0.49* |
| Ks lit mineur/mur : 50/50 | fev90 - 209 m3/s | 359.06 | 358.98 | *0.43* |
| Ks lit mineur/mur : 40/60 | fev90 - 209 m3/s | 359.04 | 358.96 | *0.41* |
| Ks lit mineur/mur : 50/60 | fev90 - 209 m3/s | 359.02 | 358.94 | *0.39* |
| Ks lit mineur/mur : 30/50 | janv2007 - 105 m3/s | 358.18 | 358.08 | *0.29* |
| Ks lit mineur/mur : 40/50 | janv2007 - 105 m3/s | 358.14 | 358.07 | *0.25* |
| Ks lit mineur/mur : 50/50 | janv2007 - 105 m3/s | 358.11 | 358.07 | *0.22* |
| Ks lit mineur/mur : 40/60 | janv2007 - 105 m3/s | 358.11 | 358.07 | *0.22* |

Les résultats de simulation avec les paramètres calés en basses eaux montrent que la zone inondable est trop étendue pour être représentative de l'épisode de crue de 1990. Les niveaux d'eau simulés sont trop hauts.

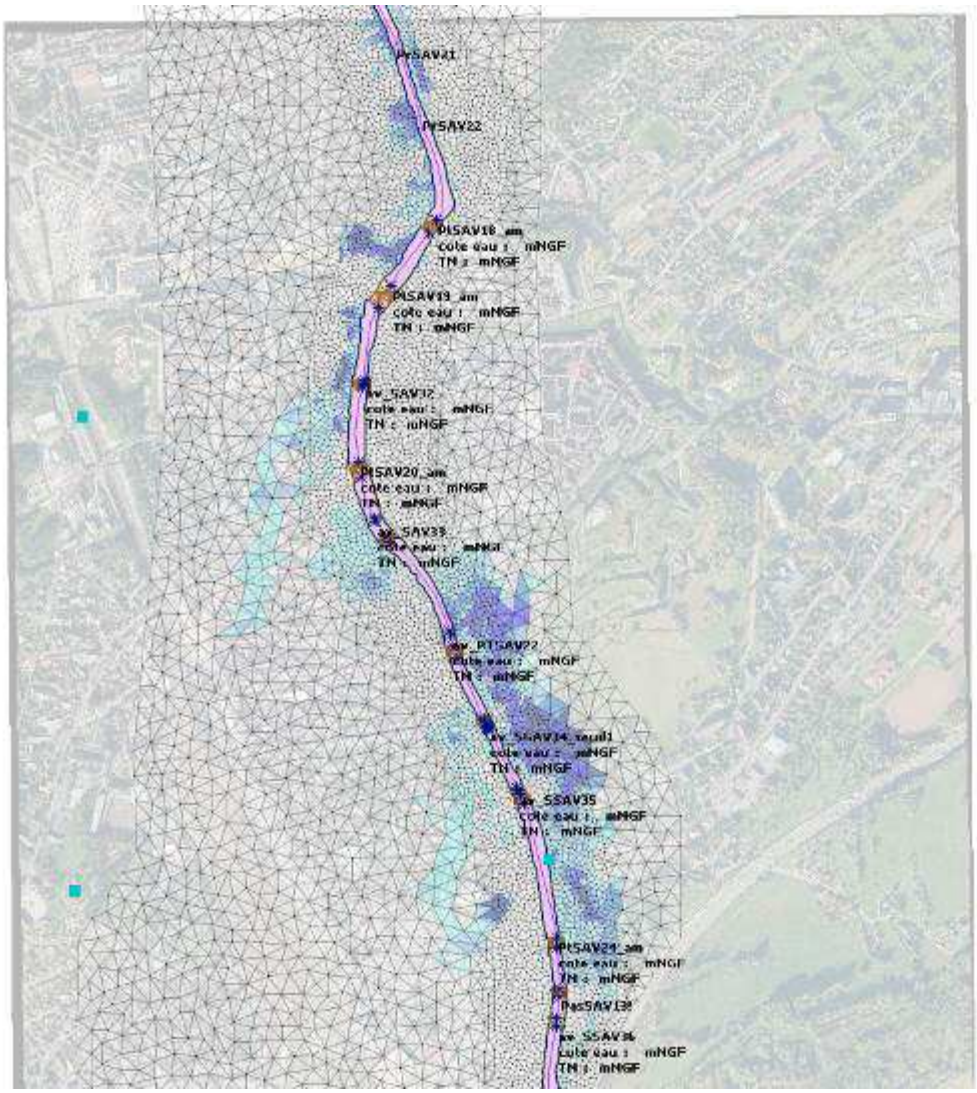



**Figure 29 : Zones inondables simulées pour la crue de 1990 (209 m3/s) et les paramètres de calage en basses eaux**

Les cotes d'eau simulées pour le débit de crue de février 1990 sont plus 40 cm au-dessus de la cote d'eau observée à la station. Elles sont de l'ordre de 20-30 cm au-dessus de la cote observée lors de la crue de 2007.
A noter que le coefficient de rugosité affecté aux murs maçonnés, a une légère incidence sur le niveau d'eau pour la crue de 1990 mais ne participe pas significativement aux calculs de ligne d'eau.

Après plusieurs tests sur les variables d'ajustement (coefficients de rugosité des berges, du lit mineur et du lit majeur), il est avéré qu'avec le couple - hauteur d'eau observée ; débit de pointe issus de la relation de tarage - proposé par la banque HYDRO pour les crues de février 1990 et janvier 2007, les évènements observés ne peuvent pas être décrits fidèlement par le modèle en restant dans les plages de variations usuelles des coefficients de calage.

Ainsi, étant donné la difficulté de retrouver ce couple hauteur d'eau / débit, Egis Eau a opté pour caler le modèle en hautes eaux sur les deux données indépendantes :

1. La cote de la crue de 1990,
2. Le débit proposé par la banque HYDRO.

### 3.4.2 Test de calage sur une hydrologie modificative Q = 165m³/s

Egis Eau a réalisé les tests de calage précédents en simulant l'hydrogramme de la crue de février 1990 avec un débit de pointe réduit à 165 $m^3/s$. Les résultats sont les suivants :

| Coefficients de rugosité testés | Débit simulé | Cotes simulées (mNGF) | | *Ecart entre la cote simulée et la cote observée (m)* |
|---|---|---|---|---|
| | | Emplacement actuel de la station HYDRO - Pont Clémenceau (aval) | Ancien emplacement de la station HYDRO - 128 ml en aval du pont Clémenceau | |
| Ks lit mineur/mur : 30/50 | fev90 - 165 m3/s | 358.79 | 358.68 | *0.13* |
| Ks lit mineur/mur : 40/50 | fev90 - 165 m3/s | 358.70 | 358.62 | *0.07* |
| Ks lit mineur/mur : 50/50 | fev90 - 165 m3/s | 358.67 | 358.62 | *0.07* |
| Ks lit mineur/mur : 40/60 | fev90 - 165 m3/s | 358.68 | 358.61 | *0.06* |
| Ks lit mineur/mur : 50/60 | fev90 - 165 m3/s | 358.68 | 358.61 | *0.06* |

Les niveaux d'eau simulés sont proches de la cote d'eau observée. Le test à 50/60 prouve qu'en augmentant le coefficient de rugosité des berges et du lit, l'effet sur la ligne d'eau simulée est quasiment nulle (inférieure au cm). Le test de calage proposant un coefficient de rugosité de Strickler de 40 en fond de lit et 60 le long des berges verticales maçonnées est le plus satisfaisant.
Ces paramètres de calage semblent relativement réalistes et correspondant à des valeurs plausibles de rugosité du lit.

Il convient par ailleurs de noter que pour des coefficients de Strickler élevés, les pertes de charge singulières induites par les seuils sont prépondérantes par rapport aux pertes de charges linéaires de frottement.

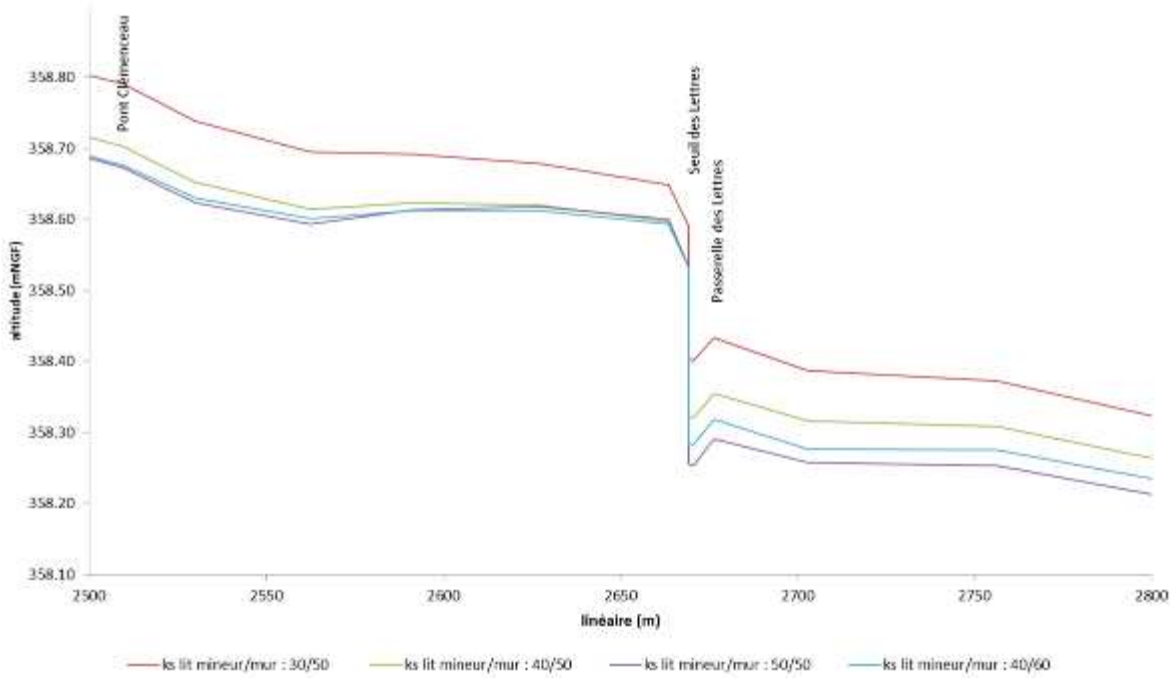



**Figure 30 : Profils en long de la ligne d'eau simulée pour les différents tests de calage au niveau de la station HYDRO**

Les photos de crue associées aux résultats de la simulation hydraulique (profil en travers) sont présentées ci-après de l'amont vers l'aval. Ces dernières illustrent l'importance des inondations du 15 février 1990 de la Savoureuse dans le centre-ville de Belfort.
Parce que l'heure de la prise de vue n'est pas indiquée sur les photographies, il est rappelé que les niveaux d'eau sur les photos ne présentent pas forcément le pic de crue mais donnent une indication sur la cote d'eau minimale atteinte.
Les photos de crue sont issues du site internet : *http://www.pbase.com/rollerboy/innondations90*.

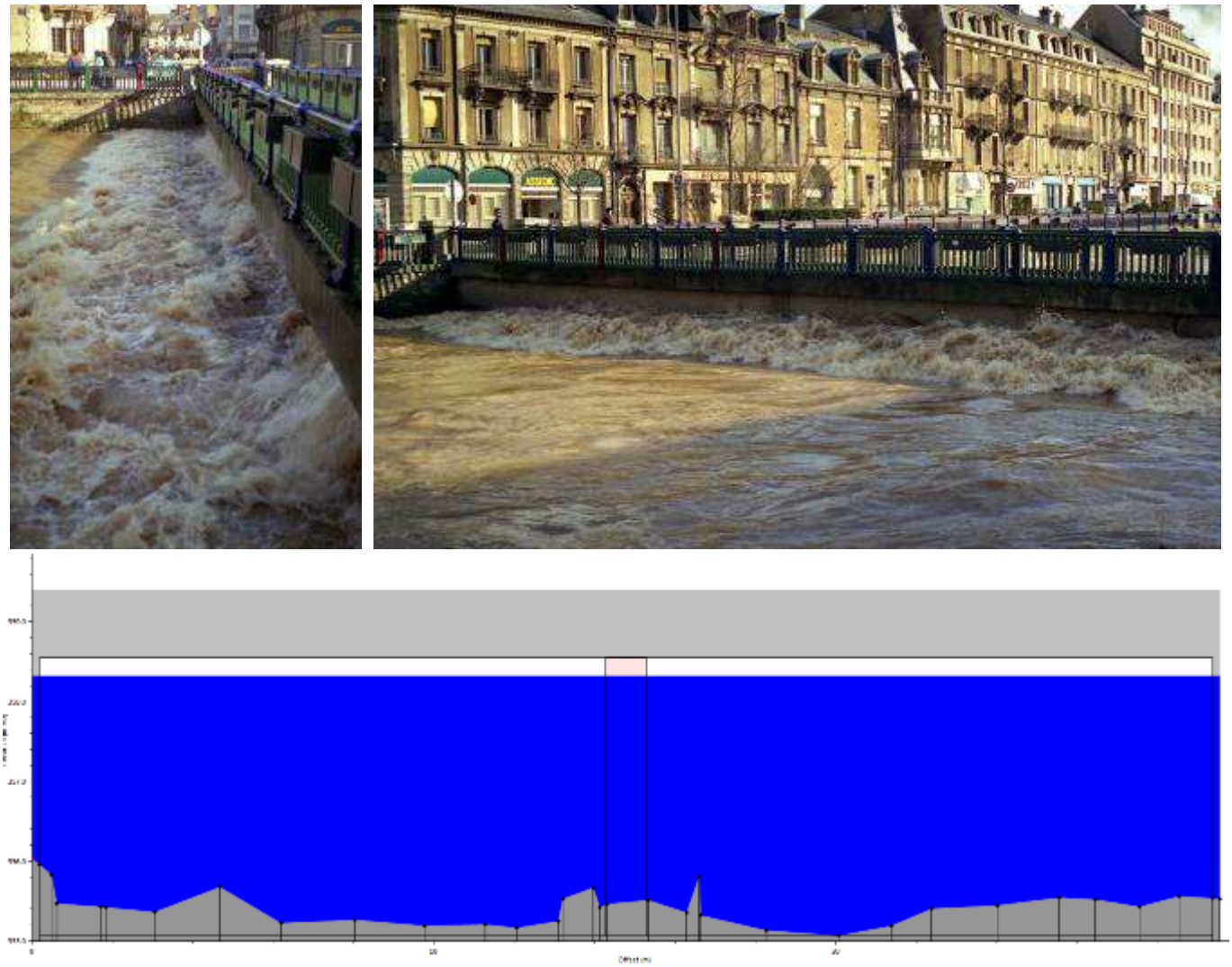


**Figure 31 : Vue amont de la passerelle des Lettres - à la limite de monter en charge**
*Credit photo : © Copyright Marc BERNARD*

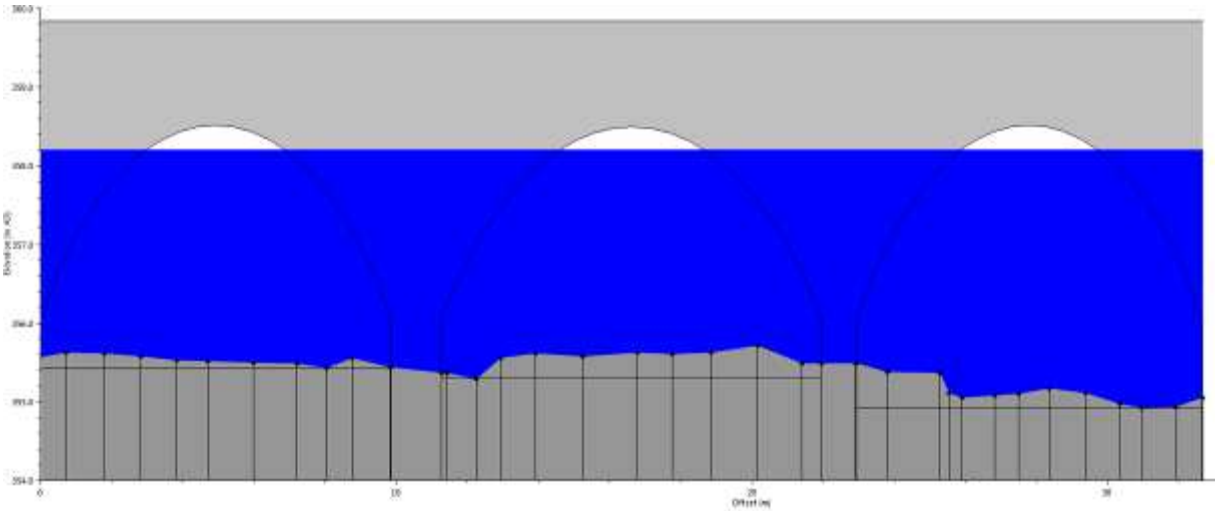


**Figure 32 : Vue amont du pont Carnot - à la limite de monter en charge**
*Credit photo : © Copyright Marc BERNARD*

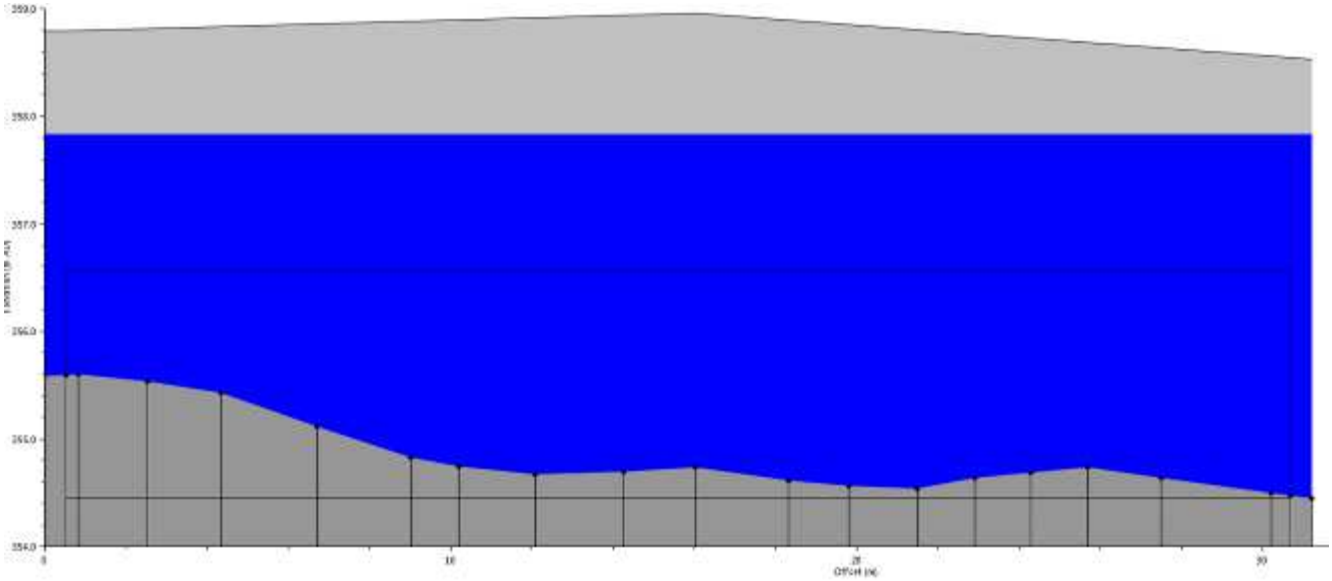


**Figure 33 : Passerelle des Arts – en charge**
*Credit photo : © Copyright Marc BERNARD*

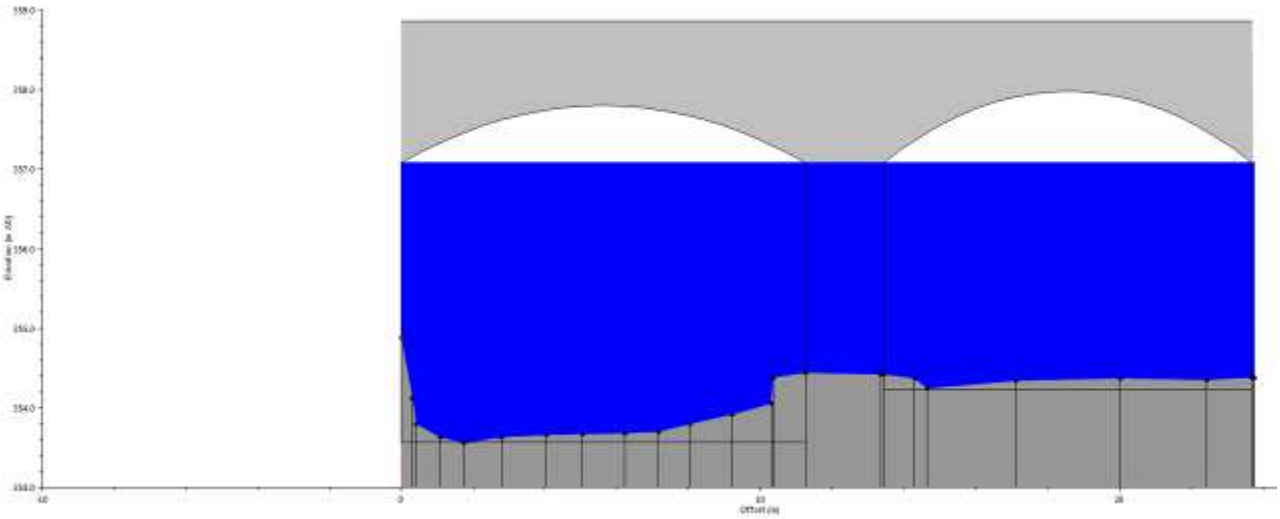


**Figure 34 : Vue amont du pont Denfert-Rochereau – pas de débordement**
*Credit photo : © Copyright Marc BERNARD et http://www.cancoillotte.net/spip.php?article979*

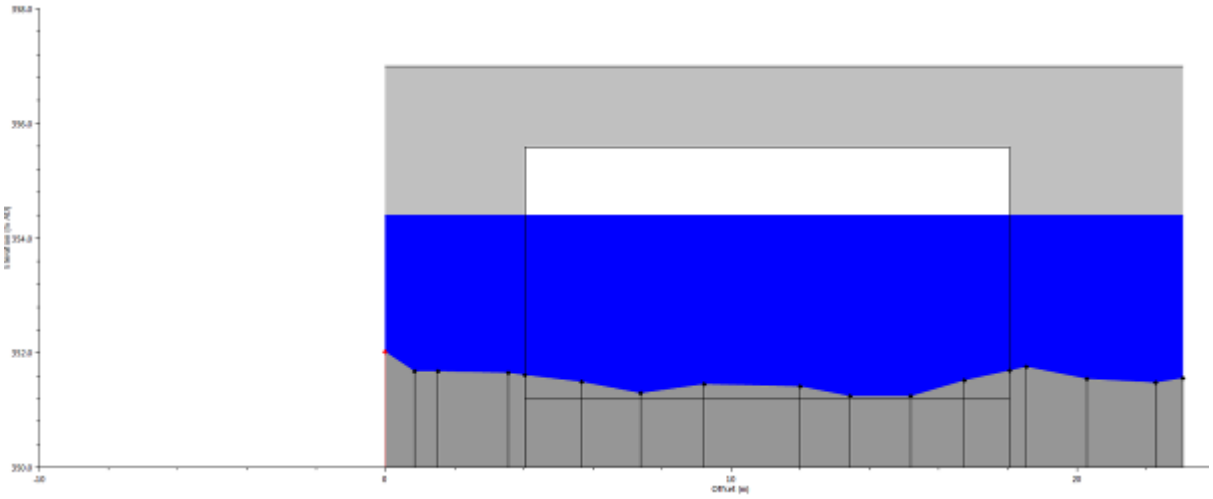


**Figure 35 : Vue amont du pont Richelieu - à la limite de monter en charge**
*Credit photo : © Copyright Marc BERNARD*

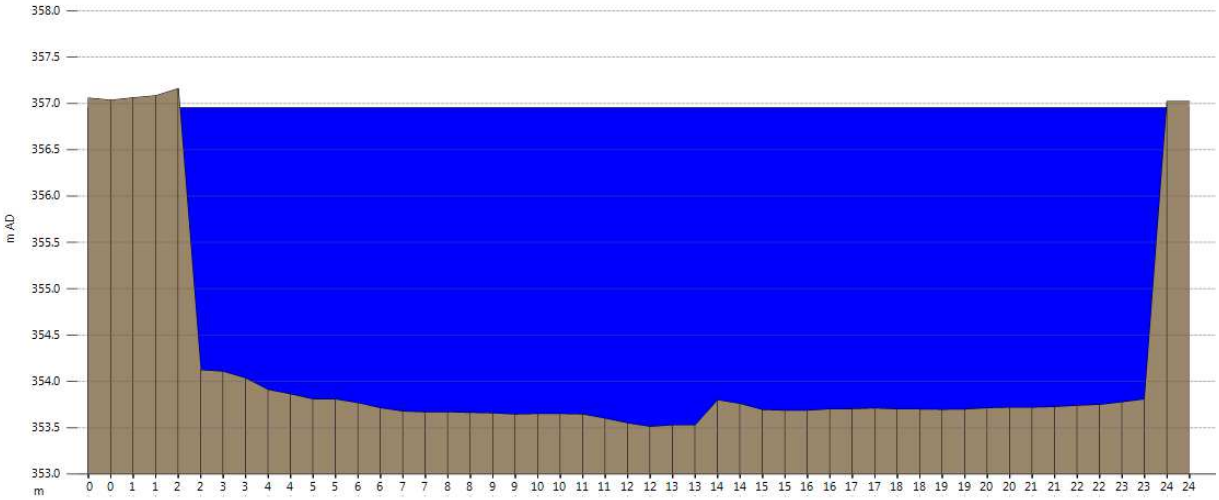



**Figure 36 : Vue du seuil Gambetta depuis le quai Keller – pas de débordement**

Ainsi, il est considéré que le modèle reproduit assez fidèlement les écoulements de la crue de février 1990 pour un débit ramené à 165 m³/s et des coefficients de rugosité de 40 et 60.

La figure suivante reprend le profil en long de la Savoureuse et les résultats de calcul de la ligne d'eau calée sur la crue de 1990 – débit réduit à 165 $m^3$/s.
La ligne d'eau simulée pour le débit simulé à 209 $m^3$/s est présentée pour comparaison.

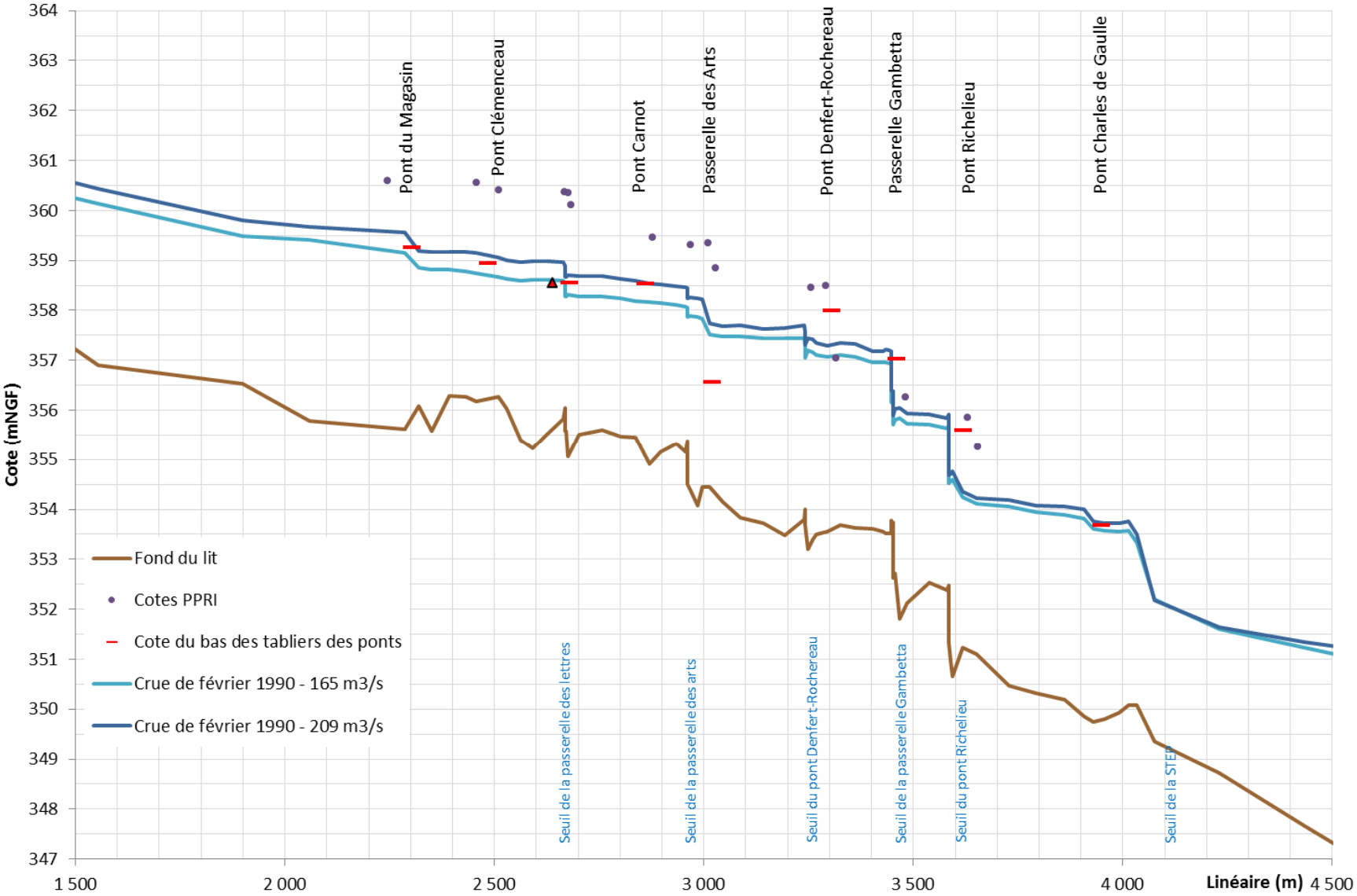



**Figure 37 : Profils en long de la ligne d'eau simulée pour la crue de février 1990 – modèle calé pour un débit de pointe de 165 m3/s**

Les zones inondables en amont du pont Clémenceau sont représentatives des zones inondées observées en 1990.
Concernant les ponts, la passerelle des Arts avec son tablier épais et en charge de plus 1,50 m d'eau est l'ouvrage qui présente la plus grande perte de charge lors de la simulation de la crue de février 1990. La passerelle des Lettres, les ponts Richelieu et Charles De Gaulle sont presque en charge ; ce qui est cohérent avec les hauteurs d'eau visibles sur les photographies (bien que ces dernières ont pu être prises avant ou après le pic de crue).

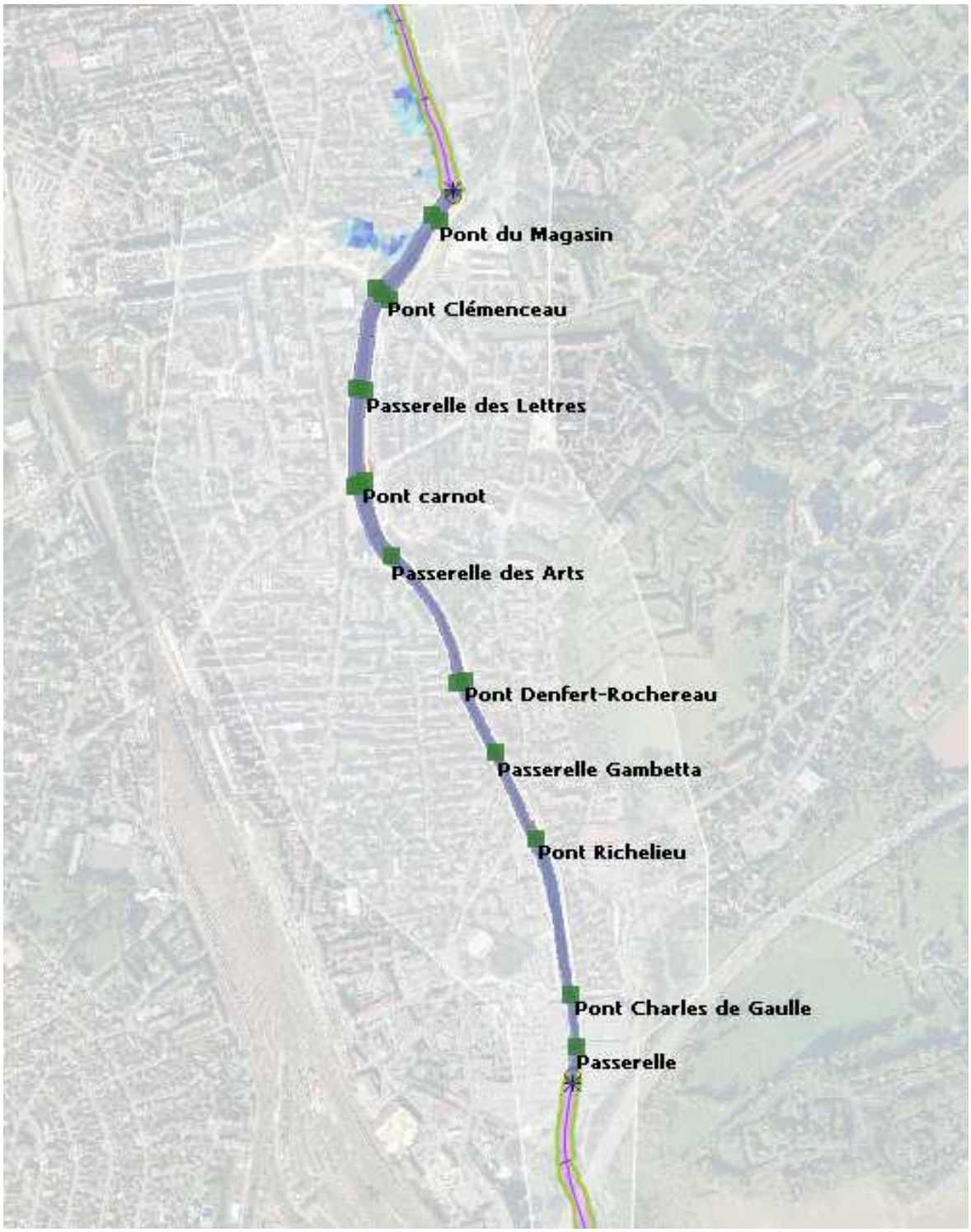



**Figure 38 : Cartographie des zones inondables pour la simulation de la crue de 1990 – débit réduit à 165 $m^3/s$**

### 3.4.3 Tests complémentaires sur les coefficients de rugosité pour le débit – banque HYDRO de 209 m³/s

En supposant le débit de 209 m³/s validé, le coefficient de frottement en lit mineur (fond du lit) et sur les berges a été augmenté afin de réduire l'écart entre la cote observée et la cote simulée. Le tableau suivant présente les résultats.

Il s'avère qu'augmenter le coefficient de Manning-Strickler revient à éliminer la perte de charge linéaire dans la formule de calcul de ligne d'eau. Ainsi, la ligne d'eau devient principalement dépendante des pertes de charges singulières au niveau des seuils et des ouvrages de franchissement.

| Coefficients de rugosité testés | Débit simulé | Cotes simulées (mNGF) | | *Ecart entre la cote simulée et la cote observée (m)* |
|---|---|---|---|---|
| | | Emplacement actuel de la station HYDRO - Pont Clémenceau (aval) | Ancien emplacement de la station HYDRO - 128 ml en aval du pont Clémenceau | |
| Ks lit mineur/mur : 100/100 | fev90 - 209 m3/s | 358.92 | 358.93 | *0.38* |
| Ks lit mineur/mur : 170/170 | fev90 - 209 m3/s | 358.90 | 358.93 | *0.38* |
| Ks lit mineur/mur : 200/200 | fev90 - 209 m3/s | 358.90 | 358.93 | *0.38* |

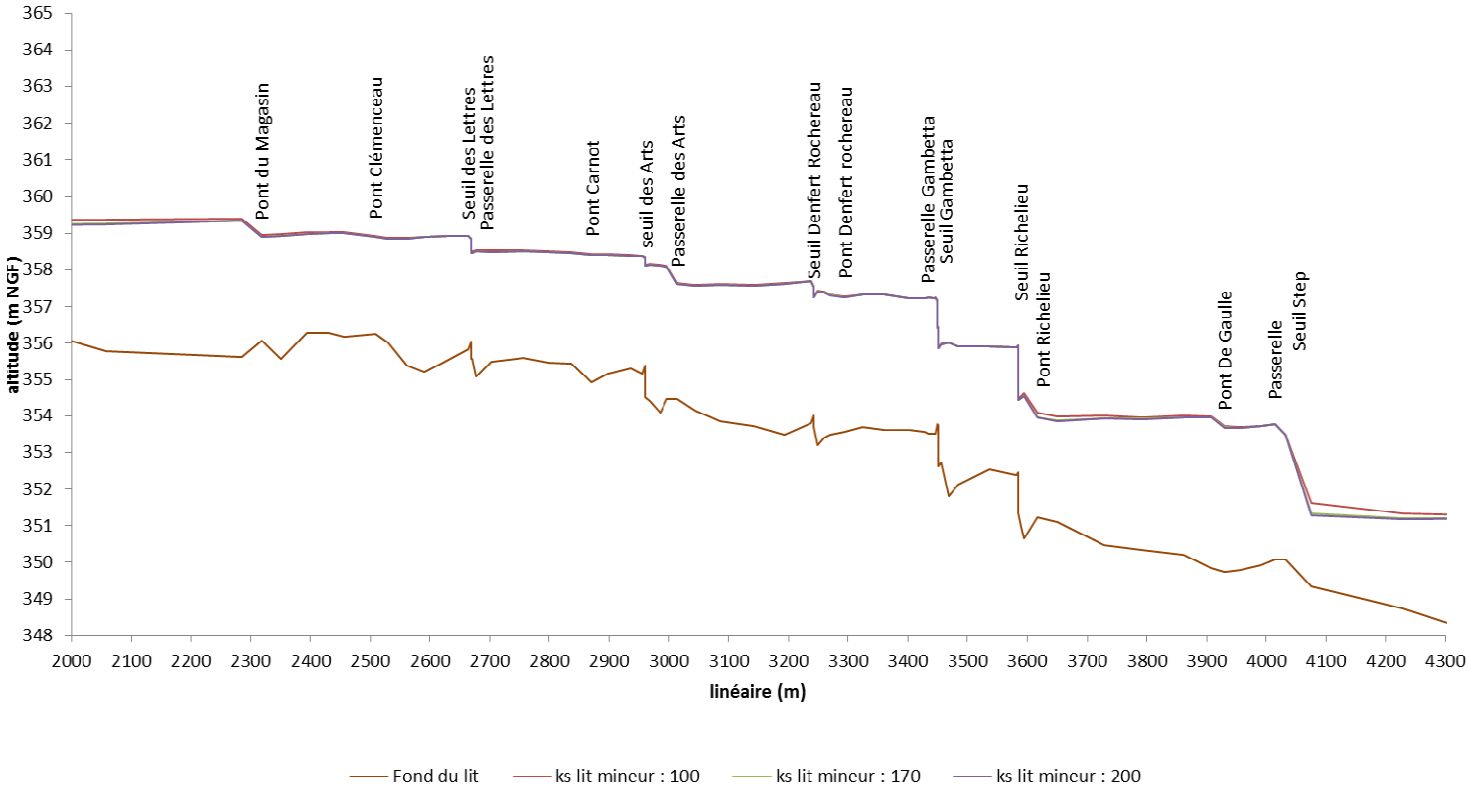



**Figure 39 : Profil en long des lignes d'eau simulées pour des coefficients de Strickler très élevés – Crue de 1990 à 209 m3/s**

Malgré des coefficients supprimant toute perte de charge linéaire et sortant des domaines de validité (coefficients sans signification physique), le modèle ne peut reproduire la cote observée à l'échelle pour le débit de 209 m³/s et reste au-dessus du niveau observé.

### 3.4.4 Hypothèse de révision de la relation de tarage de la station

D'après les calculs hydrauliques, une des hypothèses est une surestimation du débit de pointe de la crue de février 1990 au niveau de la station HYDRO.
A noter que cette station :

- aurait été arrachée lors de la crue de 1990,
- a fait l'objet d'un déplacement en 1991 pour « les besoins de l'annonce de crue ».
- Le pont du magasin a été emporté lors de la crue sans indication pour savoir si ceci s'est produit avant ou après le jaugeage ni sans possibilité d'estimer un éventuel effet sur le jaugeage.

La figure suivante présente la courbe de tarage utilisée depuis 2012 par la banque HYDRO.
Sur cette courbe, Egis Eau a placé le débit de la crue de 1990 révisé à 165 $m^3/s$ et tracé la relation de tarage correspondante.
Cette révision conduirait aussi à revoir à la baisse le débit supposé des crues de 2007 et 2006.

Afin de valider le calage du modèle, les crues de janvier 2007 et mars 2006 ont été simulées dans le modèle hydraulique sur la base de la courbe de tarage révisée. Les débits de pointes de ces deux crues ont été respectivement revus à 90 et 65 $m^3/s$.

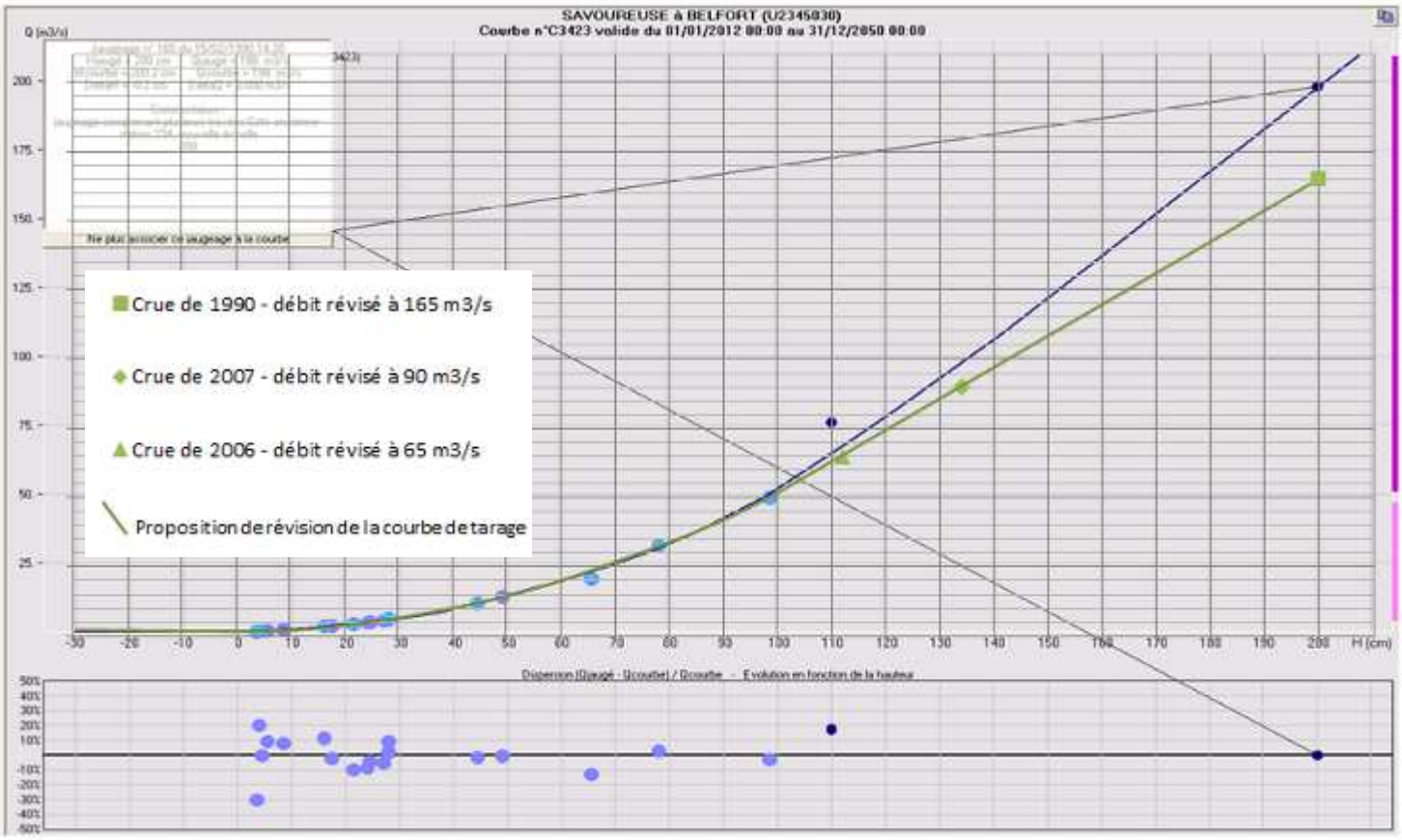



**Figure 40 : Proposition de révision de la courbe de tarage de la station HYDRO**
*Source de la relation de tarage de la station HYDRO : DDT90*

Considérant les paramètres de calage retenu pour la crue de 1990, soient :

- Ks du lit mineur à 40,
- Ks sur les berges maçonnées à 60,
- Ks en lit majeur à 15,

Les crues de janvier 2007 et mars 2006 ont été simulées afin de valider le modèle en période de crue.

Le tableau suivant présente les cotes d'eau simulées au droit de la station HYDRO.

| Débit simulé | Cote observée (mNGF) | Cote simulée (mNGF) | Ecart entre la cote simulée et la cote observée (m) |
|---|---|---|---|
| Février 90 - 165 m3/s | 358.55 | 358.61 | *0.06* |
| Janvier 2007 - 90 m3/s | 357.89 | 357.96 | *0.07* |
| Mars 2006 - 65 m3/s | 357.67 | 357.68 | *0.01* |

Les écarts entre les lignes d'eau simulées et les cotes observées sont relativement faibles.
Le modèle est considéré comme calé sur la cote de la crue de 1990 et validé sur les crues de 2007 et 2006.

## 3.5 Elaboration de 3 modèles de crue de référence

Suite à plusieurs réunions d'échanges avec la ville de Belfort et la DDT90, il a été décidé de retenir 3 calages différents afin de s'affranchir des incertitudes.

Tableau 11 : Les trois scénarios de calage retenus

| Scénario de calage | Cote retenue pour la crue de février 1990 à la station HYDRO | Débit retenu | Coefficient de rugosité (Strickler) retenu lit mineur /mur | Coefficient de seuil retenu | Commentaire |
|---|---|---|---|---|---|
| **Calage A** | 358.55 mNGF | 165 m³/s | Ks = 40/60 | µ = 0.4 | cote fiable et coefficients usuels |
| **Calage B** | 358.55 mNGF | 200 m³/s | Ks = 40/60 | µ = 1.4 | cote fiable, débit fiable, coefficients de seuil élevés |
| **Calage C** | 359.02 mNGF | 200 m³/s | Ks = 40/60 | µ = 0.4 | débit fiable, coefficients usuels |

Le calage A représente un scénario où le jaugeage n'est pas fiable mais où la cote mesurée en 1990 est considérée fiable.
Le scénario B représente un scénario où les débits et la cote sont jugés fiables et où les paramètres de calage sortent des abaques usuels.
Le scénario C représente un scénario où le débit jaugé est considéré fiable mais où la cote mesurée est jugée non fiable. Les cotes de fond du lit de la Savoureuse sont également susceptibles d'avoir évolué suite à cette crue majeure de 1990. Cette situation représentait alors la simulation de la crue de 1990 avec les conditions actuelles d'écoulement.

Les lignes d'eau simulées pour ces trois configurations de calage sont représentées sur la figure suivante.
Pour l'ensemble des trois calages, des débordements ont lieu en rive droite entre le pont du Magasin et le pont Clémenceau : ce qui est cohérent avec les observations de février 1990.
Le calage C présente la ligne d'eau la plus haute des trois simulations avec des débordements en rive droite en amont du seuil des Lettres et aux abords de la passerelle des Arts et des débordements en rive gauche en amont du pont Denfert-Rochereau et de la passerelle Gambetta. Pour mémoire la passerelle Gambetta n'existait pas en 1990 ; elle a été construite en 2006.
Par la suite, pour chacun de ces calages, la ligne d'eau état actuel a été comparée à la ligne d'eau en état projet.

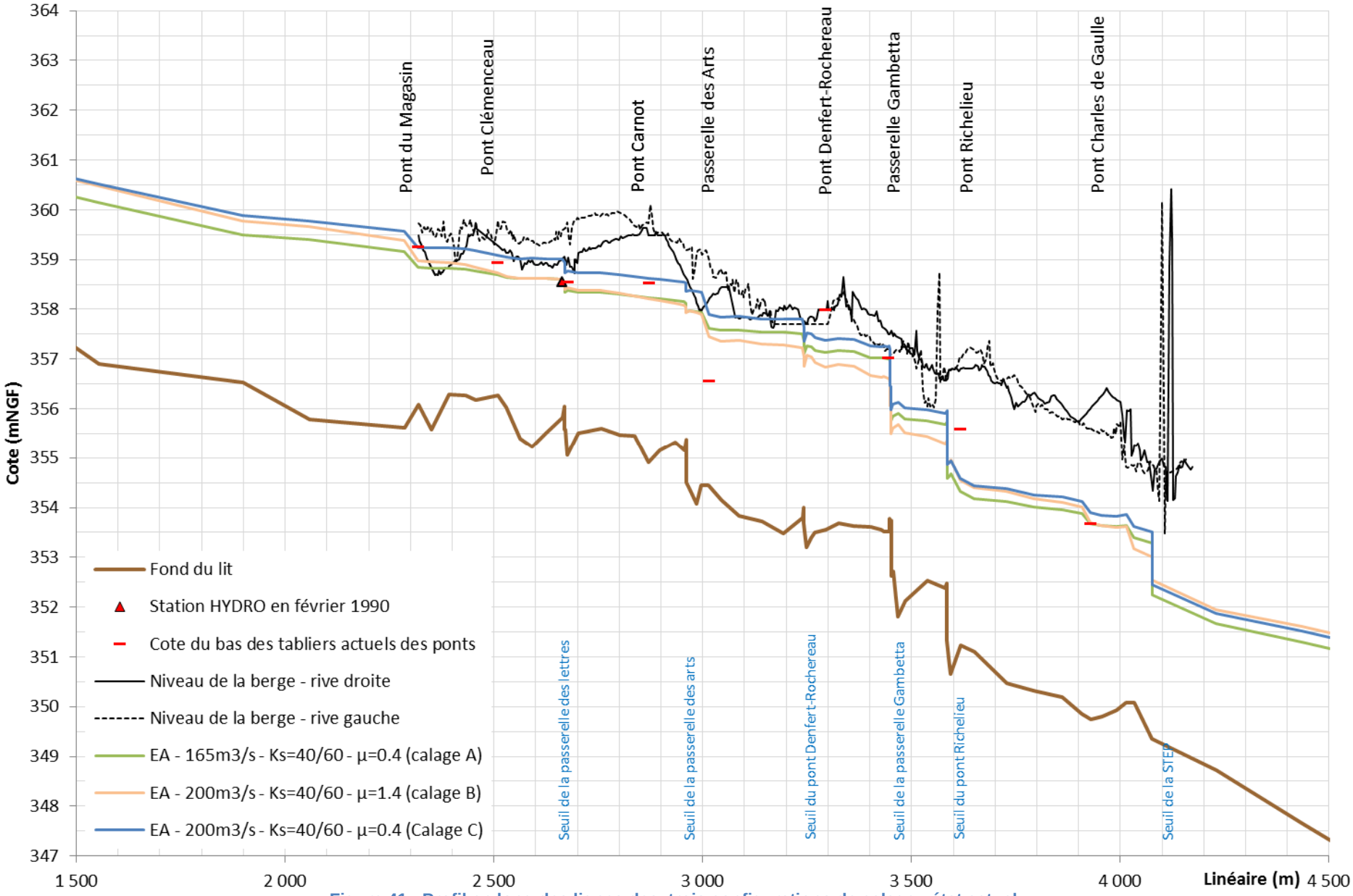



**Figure 41 : Profil en long des lignes des trois configurations de calage - état actuel**

Les tableaux suivants présentent les résultats de calages pour les 3 configurations retenues au niveau de 7 « échelles » - tout au long de la Savoureuse sur l'ensemble du linéaire d'étude.

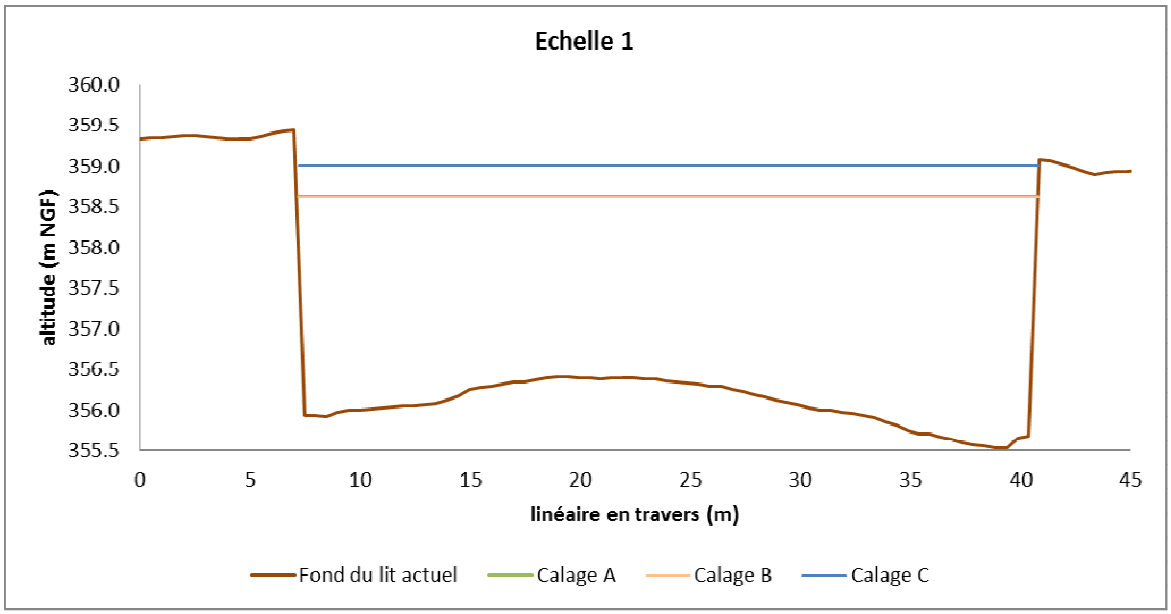
**Tableau 12 : Localisation des 7 échelles**

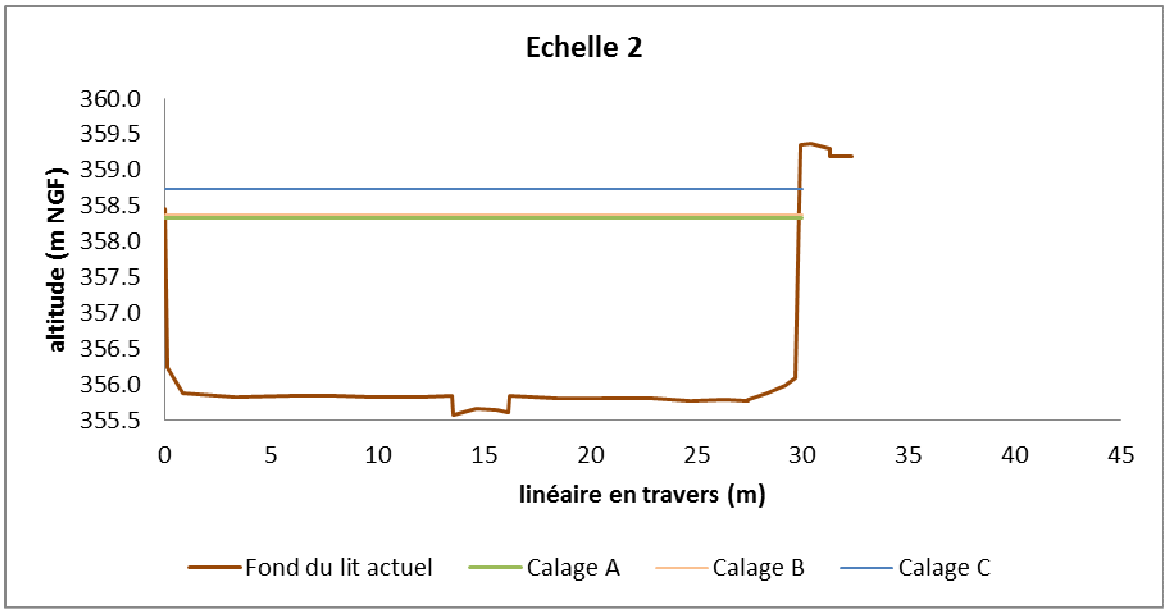
| n° | Localisation | Cote de référence mNGF | | Bief |
|---|---|---|---|---|
| **échelle 1** | Station HYDRO à proximité du pont Clémenceau de 1990 | 358.55 mNGF | Cote observée en 1990 | En amont du seuil des Lettres |
| **échelle 2** | En amont immédiat de la passerelle des Lettres | | Projet de reconstruction de la passerelle des Lettres | Seuil des Lettres – Seuil des Arts |
| **échelle 3** | En aval du pont Carnot | | | Seuil des Lettres – Seuil des Arts |
| **échelle 4** | En amont immédiat de la passerelle des arts | | Projet de reconstruction de la passerelle des Arts | Seuil des Art – Seuil Denfert |
| **échelle 5** | En aval immédiat du pont Denfert | | | Seuil Denfert – Seuil Gambetta |
| **échelle 6** | En amont du seuil Richelieu | | | Seuil Gambetta – Seuil Richelieu |
| **échelle 7** | Au niveau de la rue du foyer (aval du pont Richelieu) | 356.70 mNGF | Seuil de débordement | Seuil Richelieu – Pont C. De Gaulle |

**Tableau 13 : Résultats de simulation au niveau des 7 échelles pour les 3 calages retenus**

| **Crue de 1990** | | échelle 1 | échelle 2 | échelle 3 | échelle 4 | échelle 5 | échelle 6 | échelle 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 358.55 | | | | | | 356.7 |
| calage A | 165 m³/s | 358.62 | 358.34 | 358.23 | 357.93 | 357.14 | 355.68 | 354.17 |
| calage B | 200 m³/s | 358.62 | 358.38 | 358.20 | 357.90 | 356.85 | 355.29 | 354.39 |
| calage C | 200 m³/s | 359.01 | 358.73 | 358.61 | 358.33 | 357.38 | 355.90 | 354.43 |

Les profils en travers suivants présentent les lignes d'eau de calage au droit des 7 échelles.



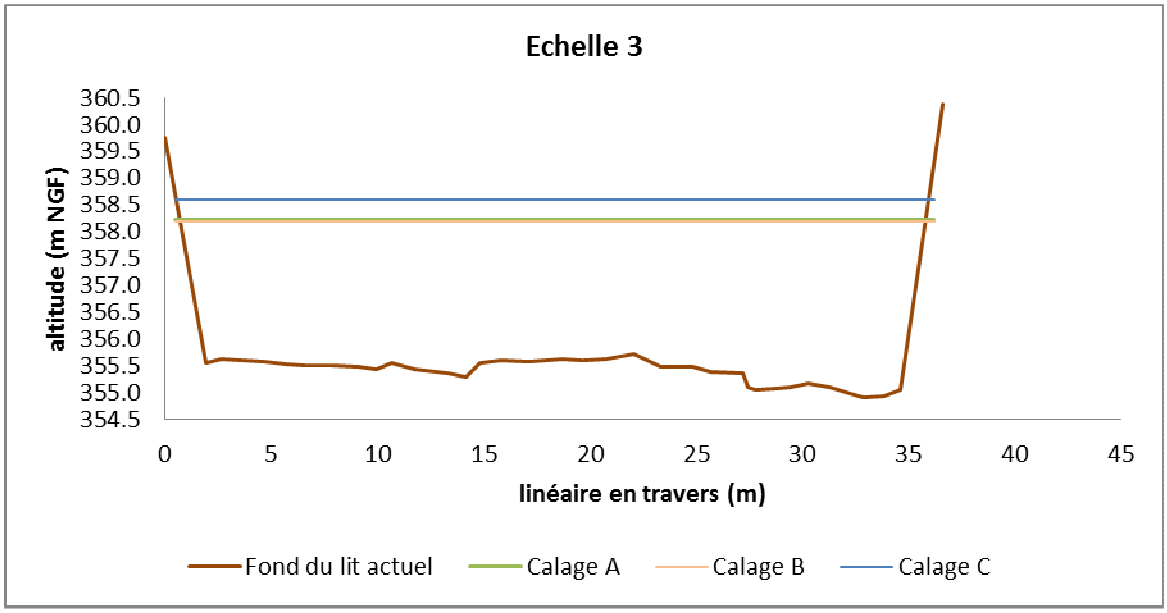
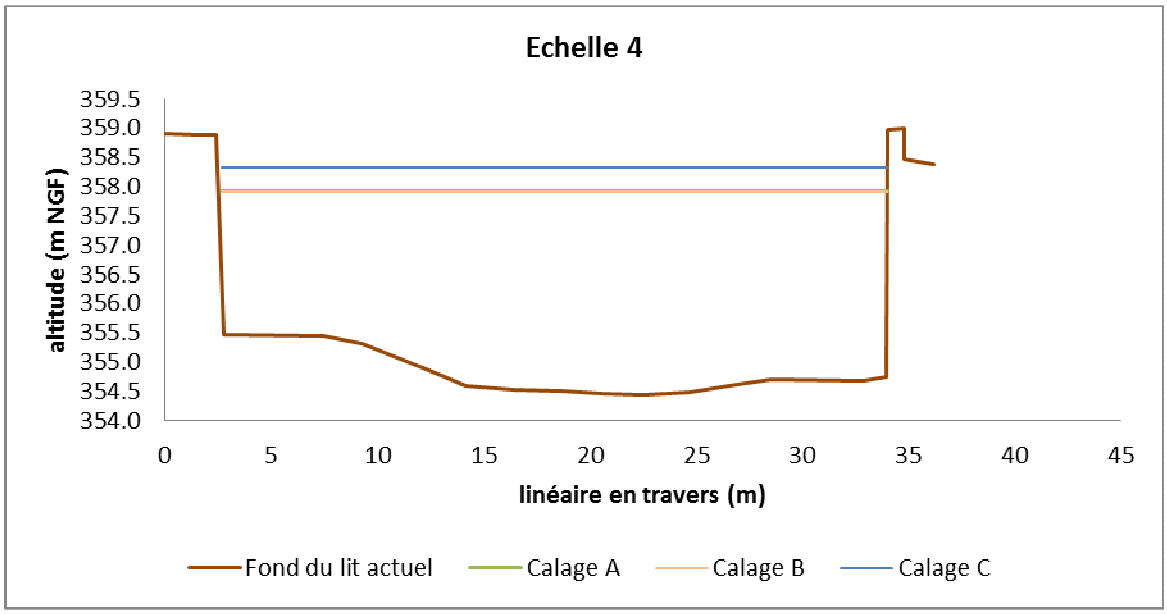
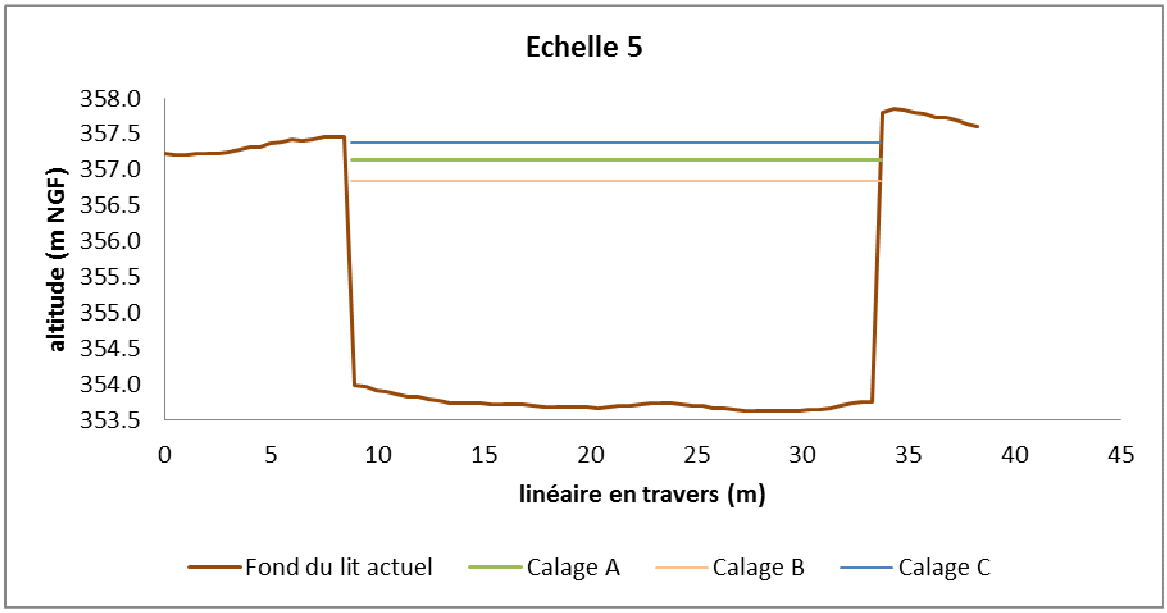




**Figure 42 : Profils en travers au droit des échelles 1,2 et 3 – Etat actuel**



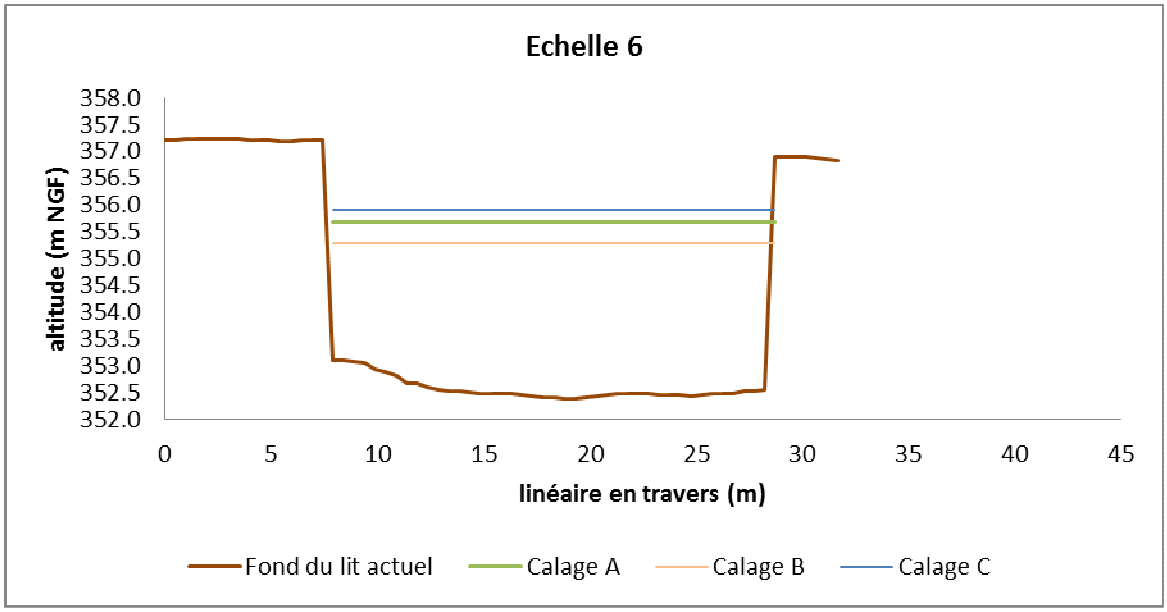




**Figure 43 : Profils en travers au droit des échelles 4, 5 et 6 – Etat actuel**

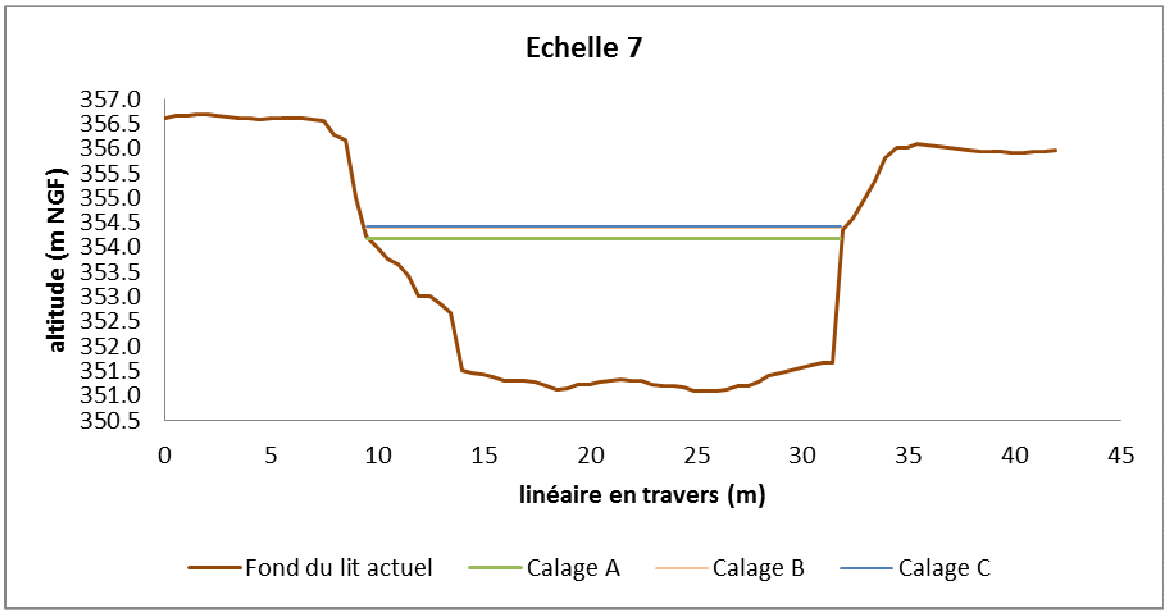



**Figure 44 : Profils en travers au droit de l'échelle 7 – Etat actuel**

# 4. Fonctionnement hydraulique du secteur d'étude en l'état actuel

## 4.1 Préambule

Une fois le modèle calé, le fonctionnement hydraulique du linéaire d'étude a été étudié au travers les simulations d'une gamme étendue de débit :

- Situation d'étiage – très basses eaux,
- Situation normale d'écoulement – moyennes eaux,
- Crue biennale – limite théorique d'écoulement dans le lit mineur,
- Crue décennal – hautes eaux
- Crue historique de février 1990 – très hautes eaux.

## 4.2 Zones inondables lors de la simulation de la crue de février 1990

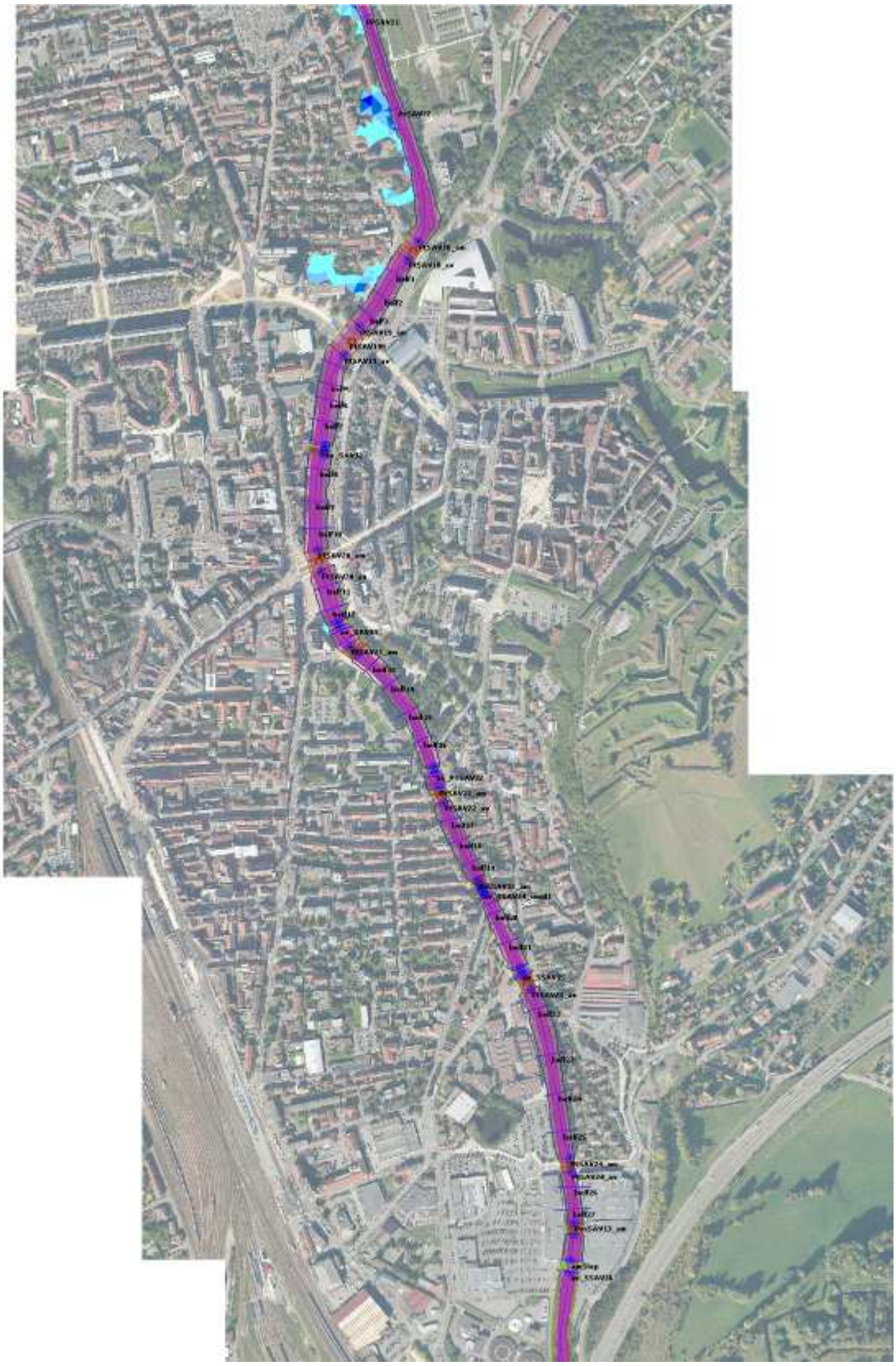


**Figure 45 : Cartographie des zones inondables lors de la crue de 1990 – Etat actuel – Calage A**

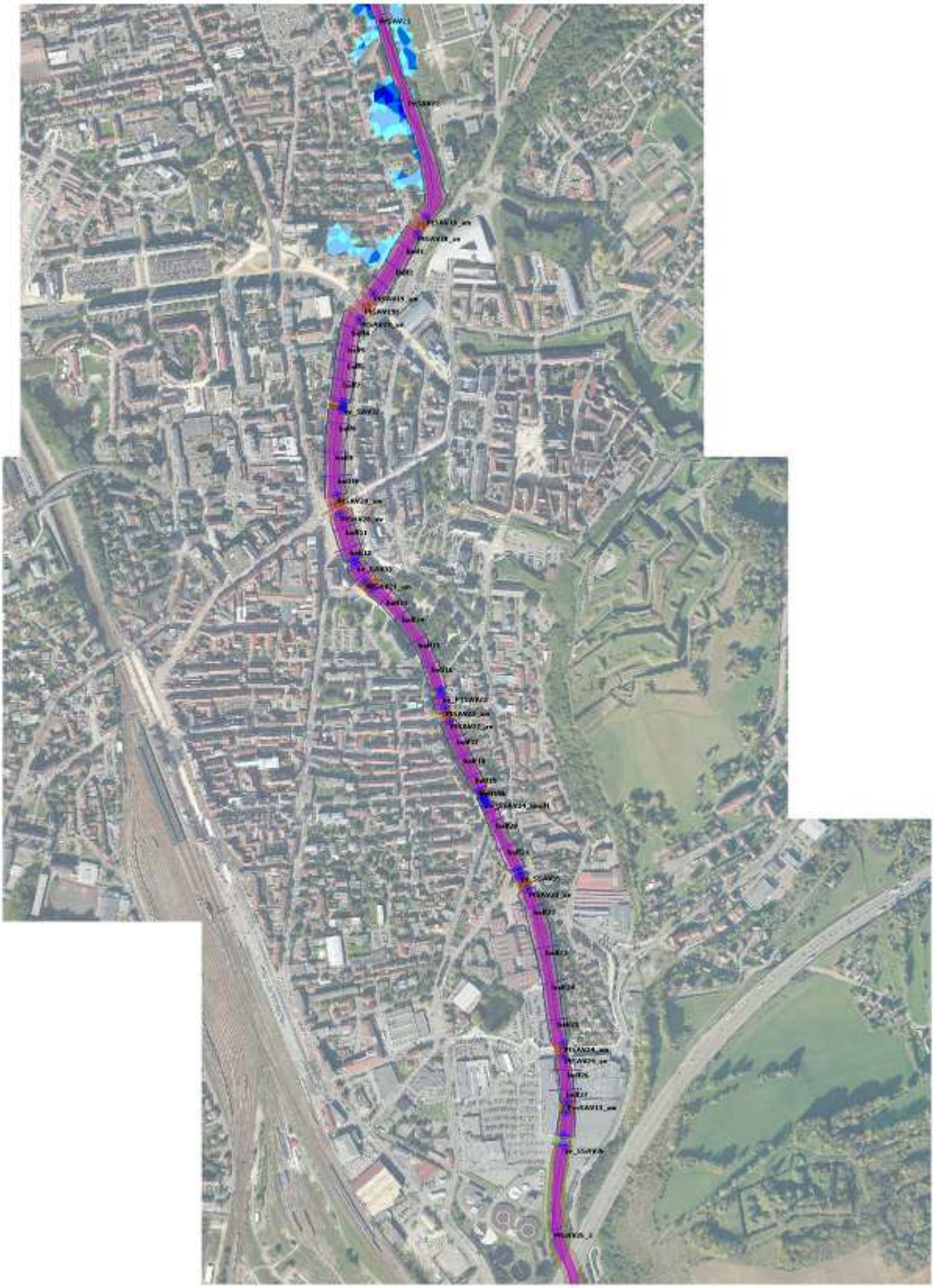


**Figure 46 : Cartographie des zones inondables lors de la crue de 1990 – Etat actuel – Calage B**

Les zones inondables en amont du pont Clémenceau sont représentatives des zones inondées observées en 1990.

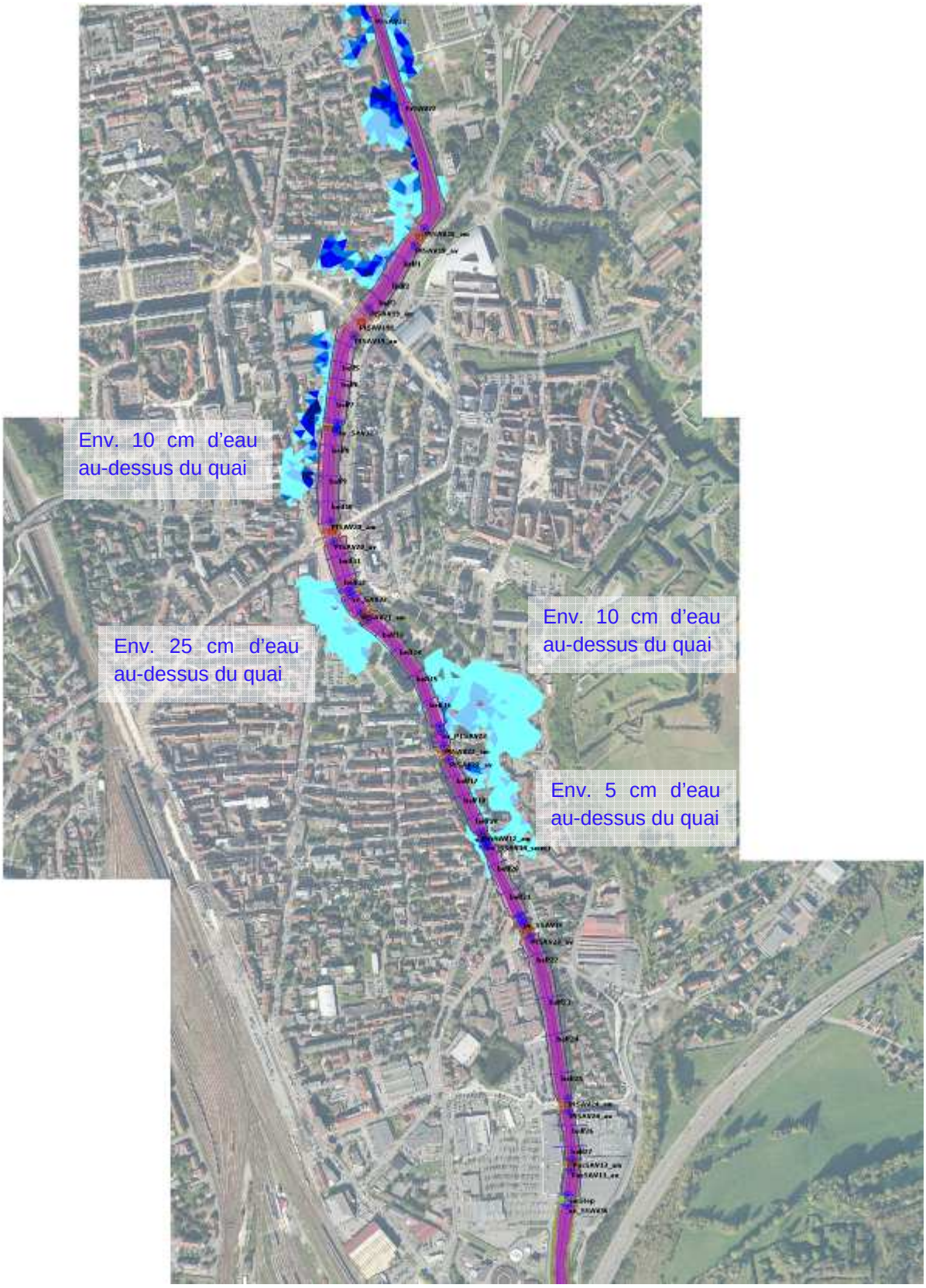



**Figure 47 : Cartographie des zones inondables lors de la crue de 1990 – Etat actuel – Calage C**

Le calage C est celui qui présente la ligne d'eau la plus haute et des débordements localisés en aval du pont Clémenceau. **Ce calage a été retenu par les services de l'état.**

## 4.3 Niveaux d'eau et vitesses d'écoulements caractéristiques

Les profils en long de la ligne d'eau et des vitesses d'écoulements pour chacun des évènements hydrologiques simulés figurent sur les graphiques suivants. Un test d'effacement des seuils a été réalisé de manière à étudier l'incidence des seuils sur les lignes d'eau et les vitesses d'écoulement.

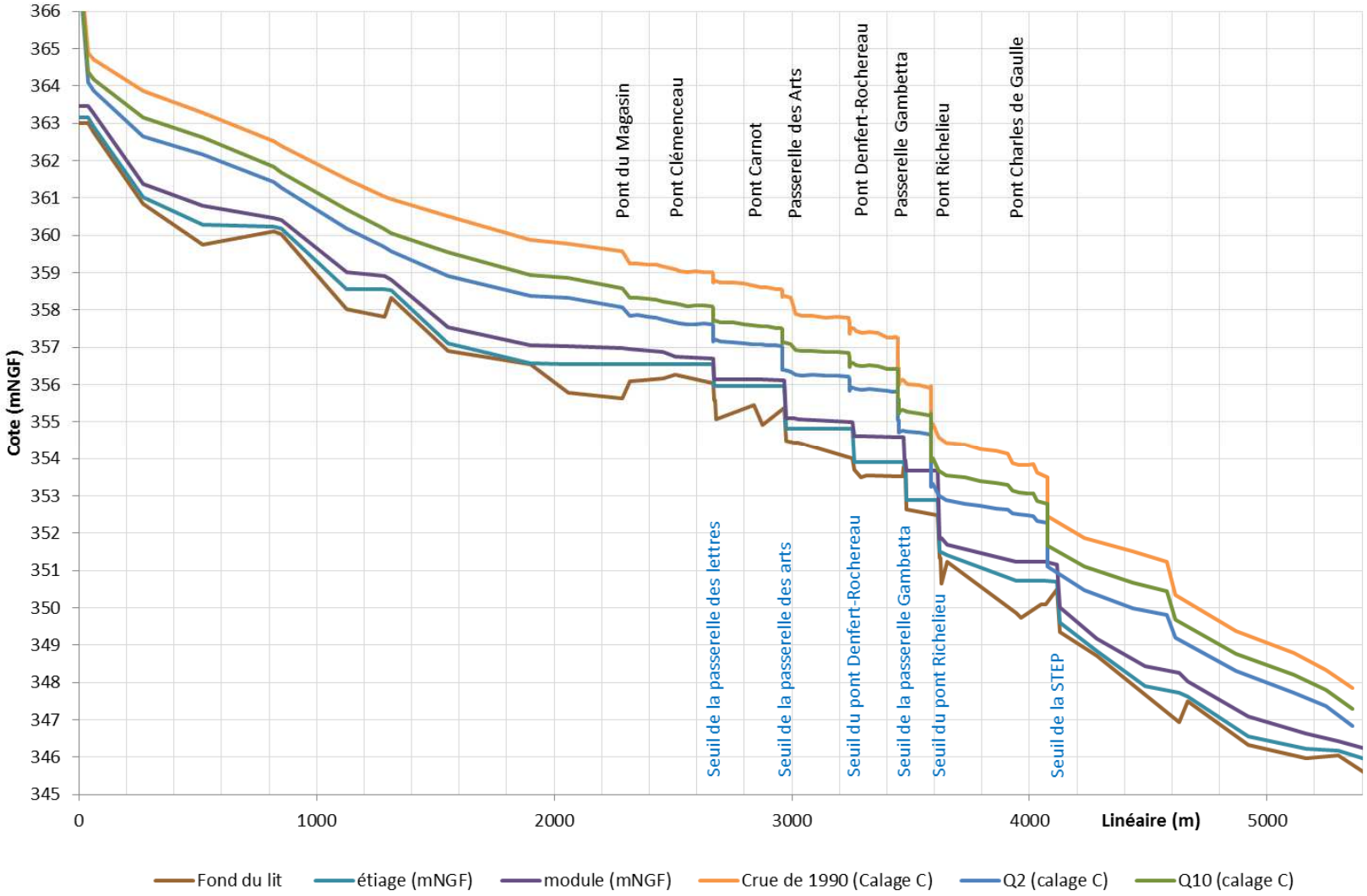



**Figure 48 : Profil en long des lignes d'eau caractéristiques sur la Savoureuse**

Sur le profil en long de la ligne d'eau, l'influence des seuils est marquée par un profil en escalier où chaque seuil influence la ligne d'eau jusqu'au seuil situé en amont. En période de hautes eaux, les trois seuils amont sont quasiment noyés : les seuils de la passerelle Gambetta et du pont Richelieu sont les plus influents. Les chutes au niveau des seuils Richelieu (env. 1,25 m) et Gambetta (env. 1,05 m) sont les plus marquées.
Le remous induit par le seuil de la passerelle des Lettres s'étend sur 700 à 1350 mètres linéaires en amont.

Concernant les vitesses moyennes d'écoulements le long du linéaire d'étude (cf. figure suivante), dès la crue biennale, les vitesses sont fortes (supérieures à 1m/s – valeur limite de déplacement debout d'un enfant). Au-dessus de 1,25 m/s (et 25 cm d'eau), un adulte sportif ne peut se déplacer sans être emporté. Les chutes au niveau des seuils induisent logiquement une accélération des écoulements quel que soit le scénario hydrologique simulé.
La vitesse du courant justifie l'implantation des seuils et l'installation de berges maçonnées en centre-ville.

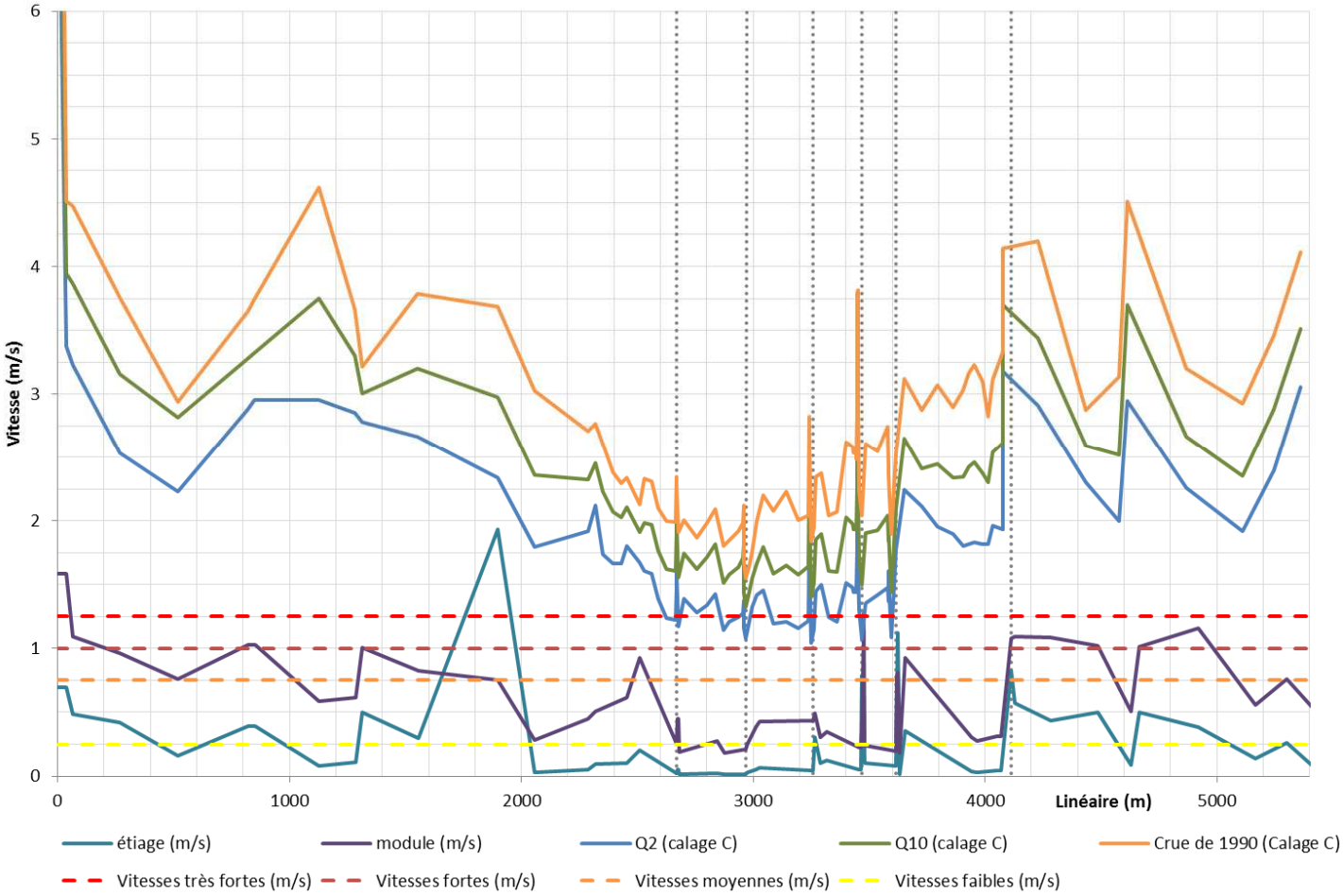



**Figure 49 : Profil en long des vitesses caractéristiques d'écoulement sur la Savoureuse**

Les principaux résultats de simulations sont repris dans les tableaux suivants.

Concernant les ponts, la passerelle des Arts avec son tablier épais et en charge de plus 1,50 m d'eau et le pont du Général de Gaulle, sont les ouvrages qui présentent la plus de perte de charge lors de la simulation de la crue de février 1990. **La passerelle des Arts est en charge dès la crue décennale (débit capable estimé à 80 m$^3$/s).** Les passerelles Gambetta et des Lettres ainsi que les ponts du Magasin, Clémenceau et Carnot sont légèrement en charge ou à la limite de l'être (suivant le calage); ce qui est cohérent avec les hauteurs d'eau visible sur les photographies (bien que ces dernières ont pu être prises avant ou après le pic de crue).

| Type d'ouvrage | Dénomination | Altitude crête des seuils (m NGF) | Altitude échancrure (m NGF) | Cote haute des tabliers (m NGF) | Localisation | Cote d'eau (m NGF) | | | | | Tirant d'air sous tablier - crue 1990 (m) | Vitesse d'écoulements (m/s) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Etiage | Module | Q2 | Q10 | Crue 1990 | | Etiage | Module | Q2 | Q10 | Crue 1990 |
| Pont | Pont du magasin | | | 359.26 | Amont | 356.75 | 357.08 | 358.07 | 358.59 | 359.58 | -0.31 | 0.10 | 0.71 | 1.92 | 2.33 | 2.71 |
| | | | | - | Aval | 356.75 | 357.06 | 357.85 | 358.33 | 359.23 | | 0.14 | 1.19 | 2.13 | 2.46 | 2.77 |
| Pont | Pont Clémenceau | | | 358.93 | Amont | 356.57 | 356.88 | 357.74 | 358.22 | 359.18 | -0.25 | 0.34 | 0.93 | 1.80 | 2.10 | 2.34 |
| | | | | - | Aval | 356.56 | 356.87 | 357.66 | 358.17 | 359.09 | | 0.08 | 0.37 | 1.67 | 1.91 | 2.13 |
| Seuil | Seuil des lettres | 356.53 | 356.43 | - | Amont | 356.54 | 356.62 | 357.17 | 357.68 | 358.74 | | 0.18 | 0.46 | 1.59 | 1.98 | 2.26 |
| Pont | Passerelle des Lettres | | | 358.55 | Amont | 355.89 | 356.12 | 357.17 | 357.68 | 358.74 | -0.19 | 0.07 | 0.33 | 1.60 | 1.99 | 2.27 |
| | | | | - | Aval | 355.89 | 356.12 | 357.20 | 357.72 | 358.77 | | 0.09 | 0.33 | 1.17 | 1.56 | 1.91 |
| Pont | Pont Carnot | | | 358.52 | Amont | 355.89 | 356.04 | 357.08 | 357.59 | 358.67 | -0.15 | 0.50 | 1.03 | 1.42 | 1.82 | 2.10 |
| | | | | - | Aval | 355.89 | 356.04 | 357.08 | 357.58 | 358.62 | | 0.04 | 0.25 | 1.15 | 1.51 | 1.81 |
| Seuil | Seuil des Arts | 355.94 | 355.84 | - | Amont | 355.89 | 356.02 | 357.02 | 357.48 | 358.53 | | 0.08 | 0.36 | 1.38 | 1.83 | 2.12 |
| | | | | - | Aval | 354.68 | 355.01 | 356.39 | 357.11 | 358.36 | | 0.20 | 0.65 | 1.16 | 1.43 | 1.68 |
| Pont | Passerelle des Arts | | | 356.56 | Amont | 354.66 | 354.95 | 356.36 | 357.08 | 358.34 | -1.78 | 0.24 | 0.83 | 1.33 | 1.55 | 1.76 |
| | | | | - | Aval | 354.60 | 354.94 | 356.28 | 356.93 | 357.91 | | 0.42 | 0.84 | 1.42 | 1.67 | 2.00 |
| Seuil | Seuil Denfert-Rochereau | 354.76 | 354.56 | - | Amont | 354.57 | 354.87 | 356.14 | 356.73 | 357.64 | | 0.08 | 0.46 | 1.85 | 2.31 | 2.83 |
| | | | | - | Aval | 354.10 | 354.65 | 355.85 | 356.48 | 357.36 | | 0.08 | 0.63 | 1.75 | 2.16 | 2.68 |
| Pont | Pont Denfert-Rochereau | | | 357.98 | Amont | 354.10 | 354.66 | 355.89 | 356.52 | 357.43 | 0.55 | 0.19 | 0.64 | 1.45 | 1.85 | 2.34 |
| | | | | - | Aval | 354.10 | 354.65 | 355.86 | 356.49 | 357.38 | | 0.08 | 0.63 | 1.50 | 1.89 | 2.38 |
| Pont | Passerelle Gambetta | | | 357.02 | Amont | 353.89 | 354.63 | 355.82 | 356.42 | 357.27 | -0.25 | 0.20 | 0.66 | 1.44 | 1.93 | 2.54 |
| | | | | - | Aval | 353.89 | 354.63 | 355.81 | 356.41 | 357.25 | | 0.10 | 0.44 | 1.44 | 1.94 | 2.55 |
| Seuil | Seuil Gambetta | 354.57 | 353.72 | - | Aval | 352.88 | 353.60 | 355.05 | 355.63 | 356.46 | | 0.16 | 0.91 | 2.71 | 3.20 | 3.80 |
| Seuil | Seuil Richelieu | 353.57 | 353.17 | - | Amont | 352.88 | 353.59 | 354.69 | 355.21 | 355.97 | | 0.09 | 0.33 | 1.37 | 1.84 | 2.41 |
| | | | | - | Aval | 351.83 | 352.06 | 353.25 | 353.94 | 354.87 | | 0.55 | 1.86 | 1.61 | 1.93 | 2.36 |
| Pont | Pont Richelieu | | | 355.59 | Amont | 351.83 | 352.13 | 353.31 | 354.00 | 354.94 | 0.65 | 0.06 | 0.73 | 1.09 | 1.44 | 1.90 |
| | | | | - | Aval | 351.81 | 352.00 | 353.01 | 353.68 | 354.58 | | 0.35 | 1.19 | 1.77 | 2.09 | 2.53 |
| Pont | Pont du Général De Gaulle | | | 353.68 | Amont | 350.39 | 350.86 | 352.64 | 353.29 | 354.13 | -0.44 | 0.16 | 0.75 | 1.80 | 2.35 | 3.03 |
| | | | | - | Aval | 350.39 | 350.84 | 352.53 | 353.13 | 353.89 | | 0.32 | 0.86 | 1.82 | 2.43 | 3.17 |

359.58 Pont en charge

1.85 Très forte vitesse
1.07 Forte vitesse

*N.B. Les données en hautes eaux (Q2, Q10 et crue 1990) sont issues du calage C.*

**Tableau 14 : Résultats au niveau des ouvrages transversaux des simulations hydrauliques**

| Pont du Magasin | Pont Clémenceau | Passerelle des Lettres | Pont Carnot | Passerelle des Arts | Pont Denfert Rochereau | Passerelle Gambetta | Pont Richelieu | Pont C. de Gaulle |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 170 | 180 | 180 | 180 | 80 | >200 (~250/280) | 160 | >200 (300/310) | 145 |

**Tableau 15 : Débit capable des ouvrages d'art**

## 4.4 Analyse détaillée des écoulements sous les ponts et au niveau des seuils

Au niveau de chaque ouvrage d'art, les conditions d'écoulement ont été analysées :

**Pont du Magasin**

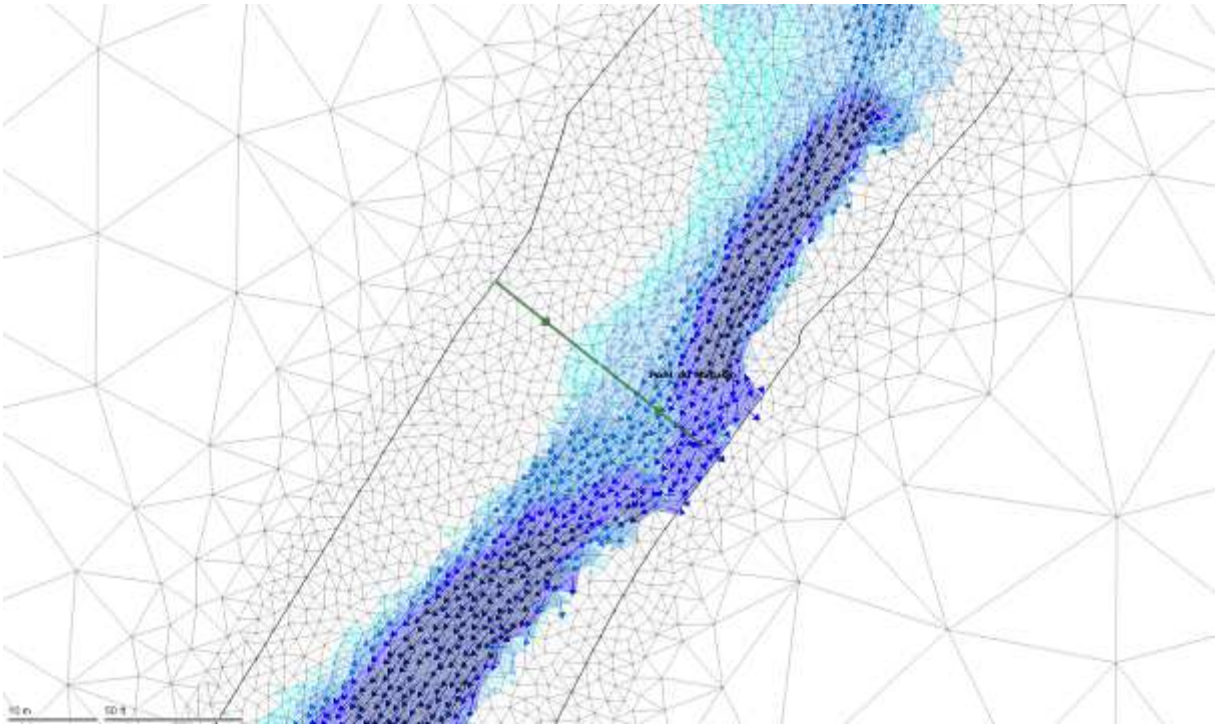


Figure 50 : Extrait du modèle - Pont du Magasin - Module

| | | Pont du magasin | |
|---|---|---|---|
| | | *Passe de gauche* | *Passe de droite* |
| Etiage | $m^3/s$ | 0.25 | 0.00 |
| | % | 100% | 0% |
| Module | $m^3/s$ | 4.27 | 0.02 |
| | % | 100% | 0% |
| Q2 | $m^3/s$ | 39 | 26 |
| | % | 60% | 40% |
| Q10 | $m^3/s$ | 62 | 48 |
| | % | 57% | 43% |
| Crue 1990 | $m^3/s$ | 104 | 76 |
| | % | 58% | 42% |

*Vue amont du pont du Magasin*

La passe de gauche du pont est celle où transitent majoritairement les écoulements en période de moyennes et basses eaux.

**Pont Clémenceau**

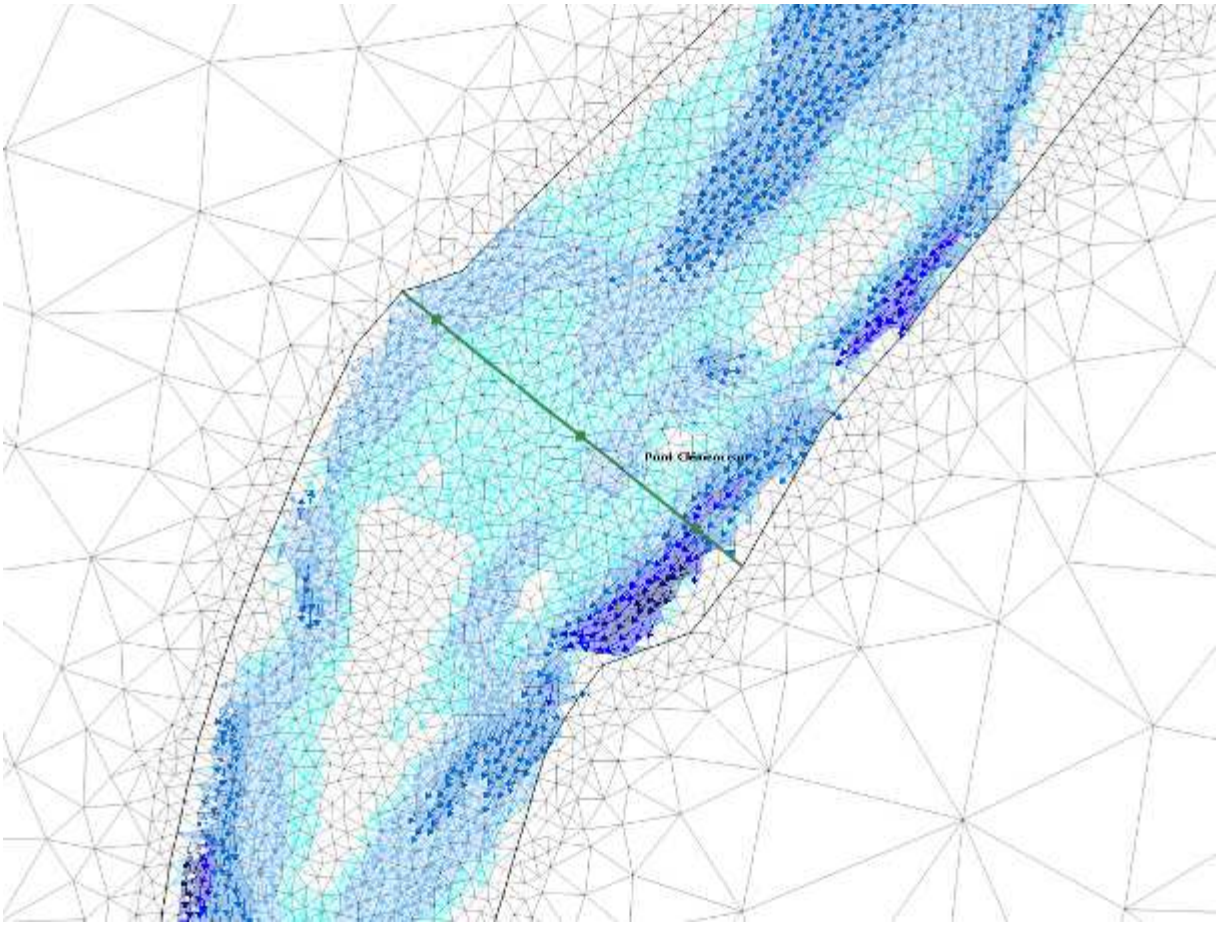


Figure 51 : Extrait du modèle - Clémenceau - Module

| | | Pont Clémenceau | | |
|---|---|---|---|---|
| | | *Passe de gauche* | *Passe du milieu* | *Passe de droite* |
| Etiage | $m^3/s$ | 0.19 | 0.01 | 0.05 |
| | % | 76% | 4% | 20% |
| Module | $m^3/s$ | 1.9 | 1.23 | 1.16 |
| | % | 44% | 29% | 27% |
| Q2 | $m^3/s$ | 25 | 22 | 17 |
| | % | 39% | 34% | 27% |
| Q10 | $m^3/s$ | 40 | 39 | 30 |
| | % | 37% | 36% | 28% |
| Crue 1990 | $m^3/s$ | 58 | 69 | 53 |
| | % | 32% | 38% | 29% |

La passe de gauche du pont est celle où transitent majoritairement les écoulements en période de moyennes et basses eaux.

*Vue amont du pont Clémenceau*

*Déviation des écoulements sur la rive gauche de la Savoureuse*

**Seuil et passerelle des Lettres**

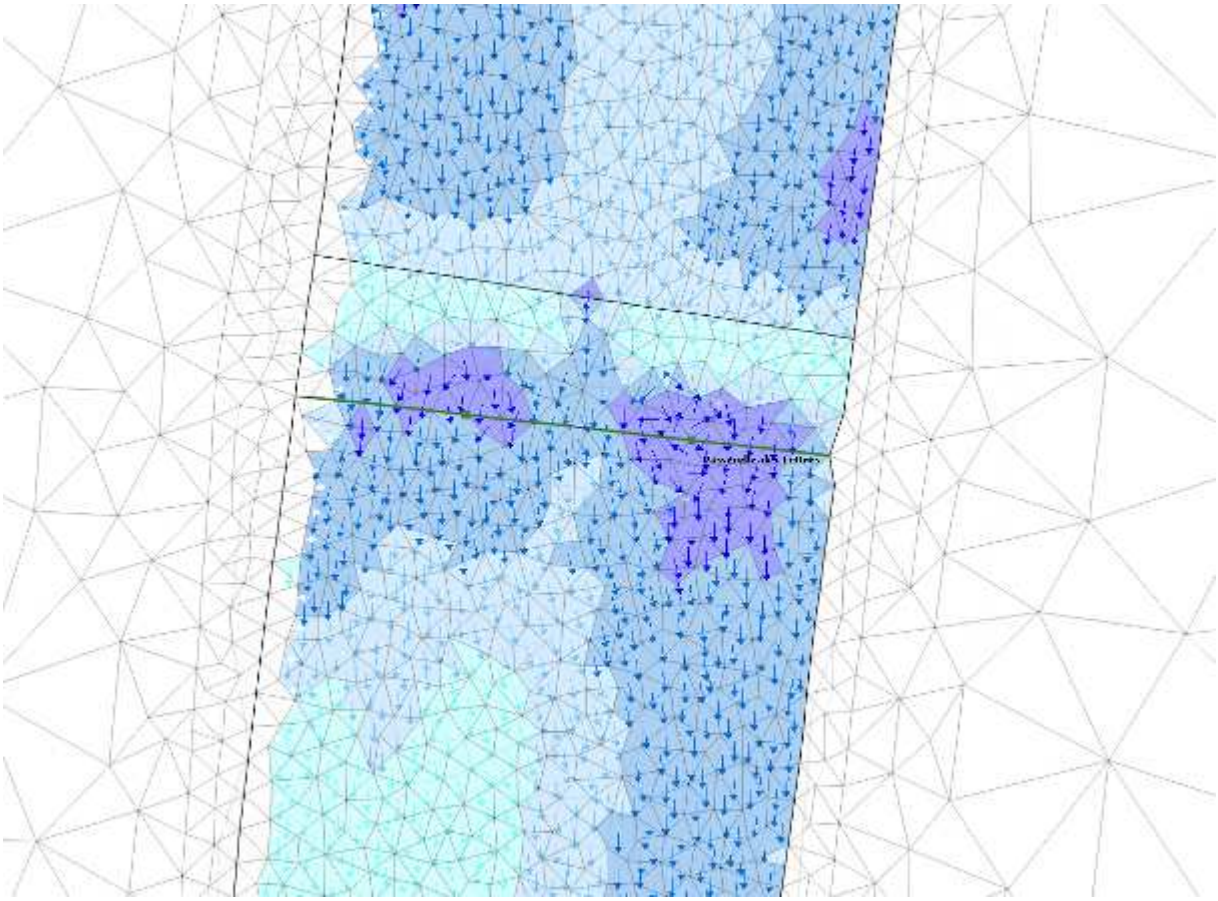


Figure 52 : Extrait du modèle - Passerelle des Lettres - Module

| | | Passerelle des Lettres | |
|---|---|---|---|
| | | *Passe de gauche* | *Passe de droite* |
| Etiage | $m^3/s$ | 0.15 | 0.10 |
| | % | 60% | 40% |
| Module | $m^3/s$ | 2.2 | 2.09 |
| | % | 51% | 49% |
| Q2 | $m^3/s$ | 34 | 30 |
| | % | 53% | 47% |
| Q10 | $m^3/s$ | 58 | 52 |
| | % | 53% | 47% |
| Crue 1990 | $m^3/s$ | 92 | 88 |
| | % | 51% | 49% |

**Pont Carnot**

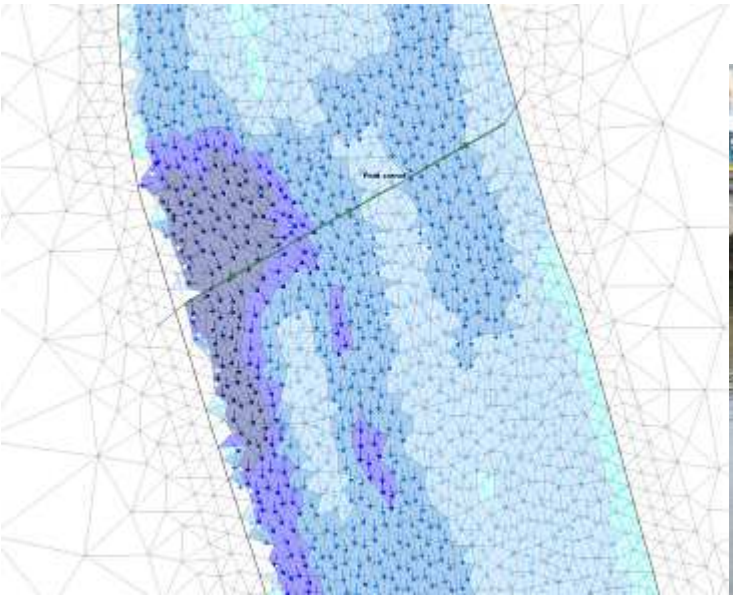


Figure 53 : Extrait du modèle (Module) et vue aval du pont Carnot

| | | Pont Carnot | | |
|---|---|---|---|---|
| | | *Passe de gauche* | *Passe du milieu* | *Passe de droite* |
| Etiage | $m^3/s$ | 0.13 | 0.11 | 0.01 |
| | % | 52% | 44% | 4% |
| Module | $m^3/s$ | 2.08 | 1.77 | 0.44 |
| | % | 48% | 41% | 10% |
| Q2 | $m^3/s$ | 24 | 22 | 17 |
| | % | 38% | 35% | 27% |
| Q10 | $m^3/s$ | 38 | 41 | 31 |
| | % | 35% | 37% | 29% |
| Crue 1990 | $m^3/s$ | 63 | 68 | 49 |
| | % | 35% | 38% | 27% |

Contrairement à ce qu'indique la représentation des profondeurs d'eau sur l'extrait de la simulation du module sur la figure ci-dessus, c'est bien les passes de gauche et du milieu du pont Carnot qui permettent de transiter l'essentiel du débit en périodes de moyennes et basses eaux.

**Seuil et passerelle des Arts**

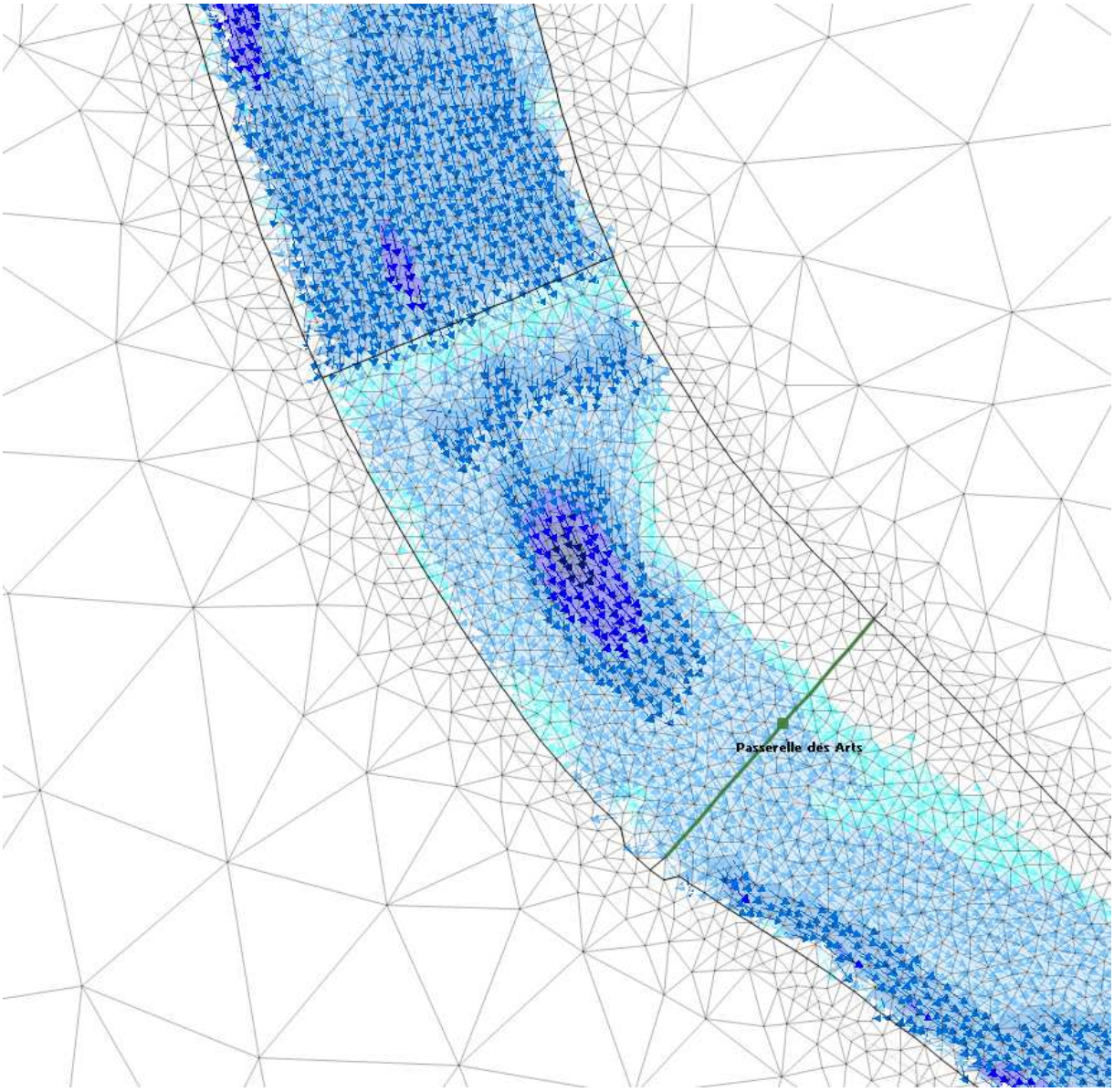



**Figure 54 : Extrait du modèle - Passerelle des Arts - Module**

*Vue amont de la passerelle des Arts – atterrissement aussi visible en hiver*

**Pont et seuil Denfert-Rochereau**

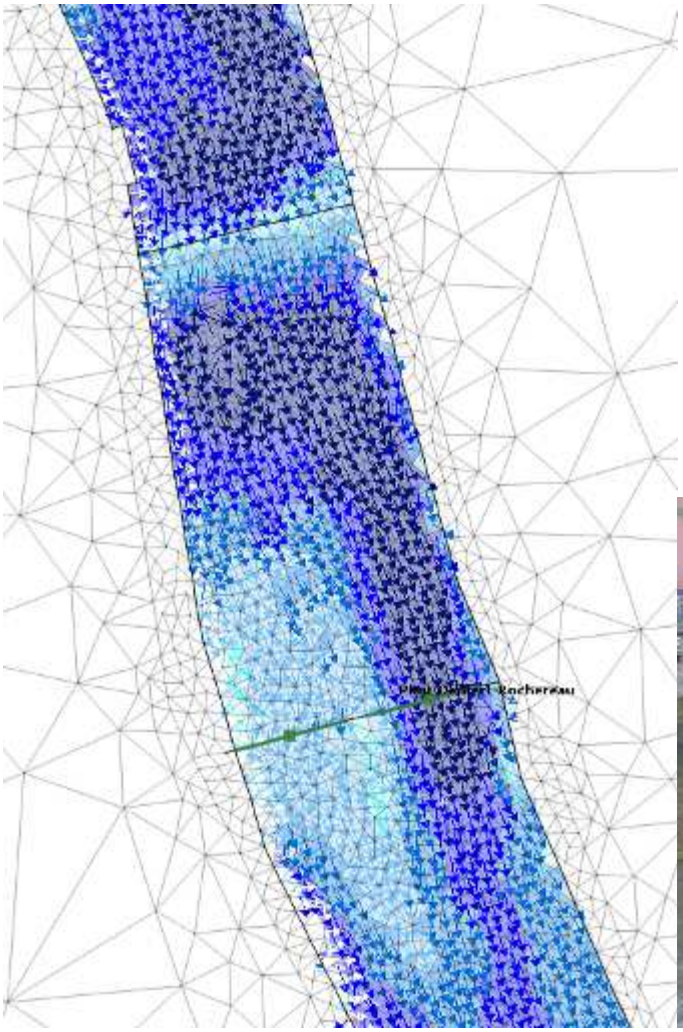


Figure 55 : Extrait du modèle (Module) et vue aval du pont Denfert-Rochereau

| | | Pont Denfert-Rochereau | |
|---|---|---|---|
| | | *Passe de gauche* | *Passe de droite* |
| Etiage | $m^3/s$ | 0.25 | 0.00 |
| | % | 100% | 0% |
| Module | $m^3/s$ | 3.46 | 0.83 |
| | % | 81% | 19% |
| Q2 | $m^3/s$ | 41 | 23 |
| | % | 64% | 36% |
| Q10 | $m^3/s$ | 67 | 43 |
| | % | 61% | 39% |
| Crue 1990 | $m^3/s$ | 107 | 73 |
| | % | 59% | 41% |

La passe de droite du pont est faiblement sollicitée. Elle est l'objet d'un atterrissement.

**Seuil Gambetta**

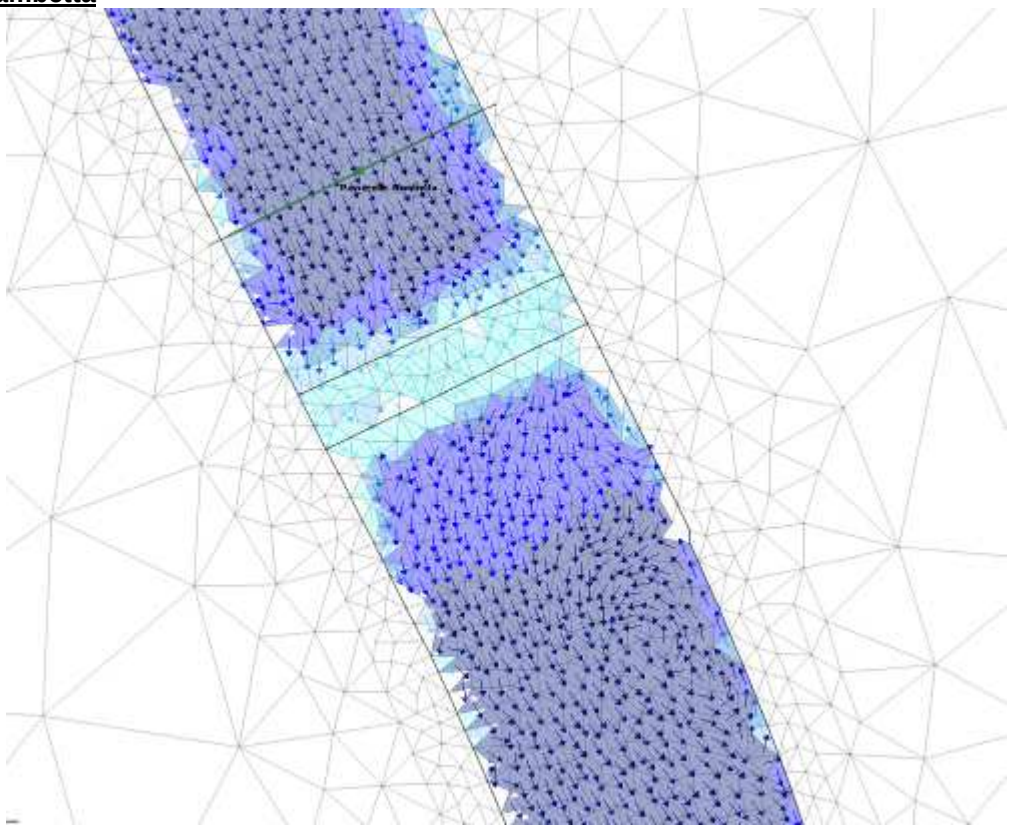


Figure 56 : Extrait du modèle - Passerelle Gambetta - Module

**Seuil Richelieu**

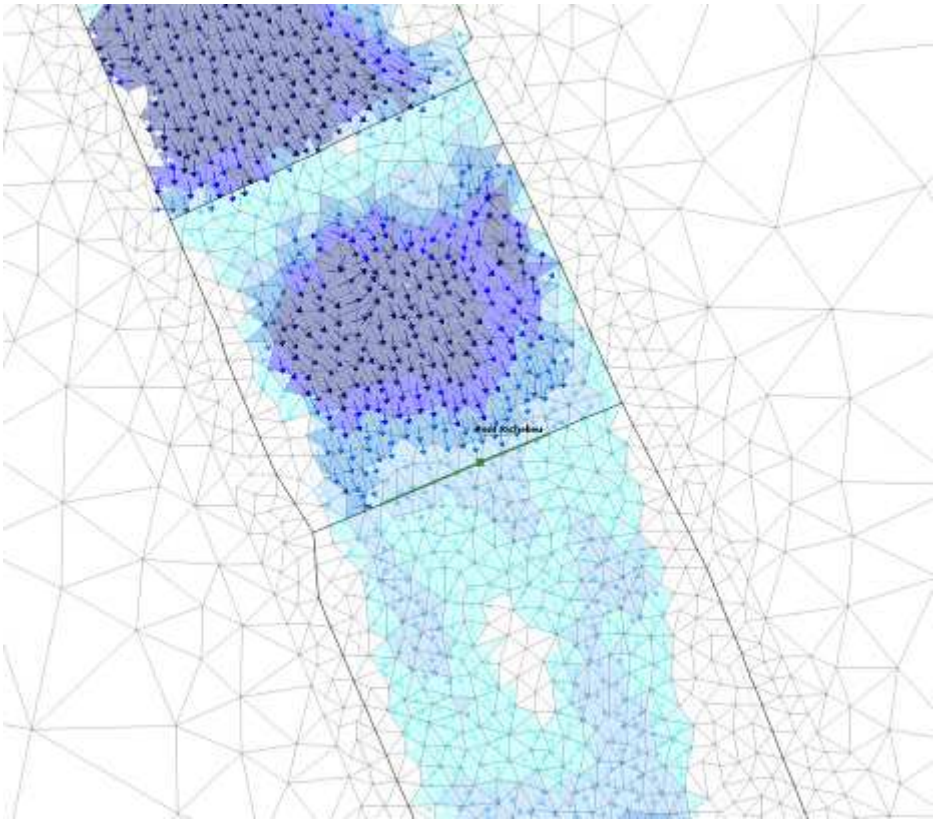


Figure 57 : Extrait du modèle - Pont Richelieu - Module

# 5. Etude d'incidence hydraulique du projet en période de crue

## 5.1 Préambule

A titre informatif et pour rappel, le modèle hydraulique a été mis en œuvre afin de vérifier l'incidence du projet sur la ligne d'eau en crue. Il convient de repréciser que c'est l'écart entre la ligne d'eau en état actuel par rapport à la ligne d'eau en état projet qui permettra de traduire cette incidence.
Le projet sera conçu et adapté pour qu'au minimum son incidence soit nulle (la ligne d'eau en état actuel est confondu avec la ligne d'eau en état projet) ou positive (la ligne d'eau en état projet est inférieure à la ligne d'eau en état projet).

## 5.2 Description du projet

### 5.2.1 Les intentions générales et enjeux du projet

De sa source jusqu'au Parc des Ballons, la Savoureuse conserve en partie son caractère naturel (bien qu'elle est subit quelques remaniements d'origine anthropique). En entrée de ville, au niveau du pont du Magasin, la Savoureuse et ses berges « se canalisent ». Des berges maçonnées s'érigent. Le projet doit proposer une transition au Nord mais aussi en aval de la séquence urbaine, des berges naturelles de la Savoureuse jusqu'à la centralité urbaine plus minérale. Il est ainsi recherché une déambulation diversifiée et continue du Pont du Magasin au Pont Charles de Gaulle. La promenade peut emprunter tour à tour des sections nouvellement crées, des sections existantes réaménagées ou conservées.

Au-delà de l'obligation réglementaire que représente le rétablissement de la continuité écologique de la Savoureuse, cette prescription constitue une opportunité pour l'amélioration de la qualité écologique et paysagère de la rivière. Il est ainsi recherché la création d'une promenade dite « promenade de berges », dans le lit mineur de la Savoureuse. Cette promenade ouverte au public, constituera une voie d'accès pour entretenir la rivière, notamment au droit des seuils transversaux. Son implantation au fil de l'eau et en retrait des voies de circulation routières constitue un attrait majeur pour la flânerie.

Les cinq seuils de la Savoureuse entre le pont du Magasin et le pont Charles de Gaulle sont infranchissables pour les espèces cibles. Leur mise en conformité nécessite des aménagements spécifiques : effacement, arasement partiel localisé ou généralisé à toute la largeur du seuil, fractionnement, etc. Pour chaque seuil, les options d'aménagement répondent aux objectifs de libre

circulation piscicole et tiennent compte du risque pour les infrastructures environnantes à savoir la tenue des ponts et des quais. Des orientations ont été définies par ouvrages et ont fait l'objet d'échange avec les services concernées notamment la DDT90, l'AERMC et l'ONEMA.

De telles dispositions (promenade de berges, arasement ou effacement de seuils, etc.) présentent des incidences potentielles sur le cours d'eau : ses niveaux d'eau caractéristiques (module, crues) et son profil en long. D'un côté, il est intéressant de constituer un lit d'étiage actif avec une lame d'eau minimale pour les faibles débits. De l'autre, il est essentiel que le projet soit neutre vis-à-vis de l'écoulement de la Savoureuse en crue. Il est visé que la ligne d'eau en état projet atteigne des cotes inférieures ou égales aux cotes de l'état actuel. La crue de référence est la crue de février 1990.

L'arasement ou l'effacement de seuils menacent tout particulièrement la stabilité des ouvrages d'art avoisinants.
Excepté la passerelle des Lettres et la passerelle des Arts, les franchissements supérieurs de la Savoureuse sont en état structurel corrects.
Les quais dont la section de quai Vauban date du 19ème siècle sont en état relativement bon ; ils présentent cependant des conditions de stabilité ne pouvant répondre aux normes en vigueur.
Ainsi plus largement, la modification du profil de certains ouvrages d'art et l'ajout d'une promenade basse au pied des murs historiques en particulier constituent également des améliorations de l'état actuel : amélioration des conditions d'écoulement et confortement des structures de quais.

Enfin, la variation des niveaux d'eau de référence de la Savoureuse ainsi que l'implantation physique d'une promenade basse dans la Savoureuse sont susceptibles de modifier le comportement des ouvrages d'assainissement qui disposent d'un rejet dans le cours d'eau naturel. Il s'agit des rejets de déversoir d'orage du cœur de ville et dans une moindre mesure des rejets d'eau pluviale de voirie. Le projet doit garantir le bon fonctionnement de ces installations. Rappelons à ce titre que la révision du Schéma Directeur d'Assainissement de la ville de Belfort s'effectue conjointement à la présente opération, ce qui permet d'anticiper au mieux ces incidences.

### 5.2.2 Contraintes de dimensionnement

Les contraintes hydrauliques à considérer dans le dimensionnement du projet de restauration de la continuité écologique et de création d'une promenade le long de la rivière sont décrites dans les points suivants.

- La rivière est encaissée dans la traversée de Belfort à tel point qu'elle n'a pas ou peu débordée lors de la crue historique de février 1990. Les aménagements ne devront pas aggraver le risque inondation par débordement de cours d'eau. Le principe de neutralité hydraulique doit être retenu pour la conception du projet : recherche systématique de l'impact résiduel le plus faible possible, voire nul pour la crue de référence. Pour cela, il sera pleinement intégrer dans la définition du projet la démarche progressive et itérative de recherche de mesures d'évitement / réduction / compensation des éventuels impacts.
- Les vitesses d'écoulements sont importantes en état actuel et peuvent être dangereusement fortes en période de crue. Associée à l'urbanisation du lit majeur de la rivière, le risque d'érosion explique l'implantation de quais en berge et de seuils en lit mineur. La présence de piles dans le lit de la rivière conduit à la formation d'un tourbillon responsable d'une érosion locale du lit. Le projet d'aménagement devra considérer les risques d'affouillement de pieds de quai et de piles de ponts.
- La Savoureuse présente une dynamique fluviale marquée avec observation de secteur d'engraissement de son lit mineur et des secteurs sensibles à l'érosion. Le diagnostic hydromorphologique du territoire a conduit à l'identification d'un exhaussement d'1,50 m du lit mineur entre le pont du Magasin et le seuil Richelieu ainsi que l'observation d'un affleurement du substratum en aval du pont Richelieu.
- Les projets devront contribuer à restaurer la continuité écologique sur la Savoureuse au droit des cinq seuils, à savoir, le rétablissement du transit sédimentaire et la libre circulation des espèces piscicoles.
- En cas d'effacement de seuils, une remise en mouvement de la charge sédimentaire bloquée ainsi que le risque d'érosion régressive sont à anticiper en amont des seuils. Du fait du transport solide et de l'augmentation des vitesses de courant, si aucun travaux de reprise en sous-œuvre ne sont entrepris, les sédiments charriés par la rivière perdront leurs propriétés mécaniques et ne concourront plus à la portance des ouvrages qui y sont implantés.

Le linéaire d'aménagement est naturellement rythmé par les ponts implantés au droit d'artères de circulation stratégiques (parfois historiques) de la Ville de Belfort. Ainsi, le site d'aménagement est soumis à d'autres contraintes :

- Les contraintes d'usage sur les quais de la Savoureuse sont multiples, entre les différents modes de circulation (piéton, cycles, voitures, bus publics) et les zones de stationnement,
- Les contraintes réseaux sont importantes pour ce projet situé en cœur de ville (gaz, assainissement unitaire, éclairage public, etc.).
- La configuration géotechnique du site présente des risques potentiels pour les ouvrages existants et futurs (risque de karstification, substratum profond sous une couche importante de matériaux compressibles), ce qui peut peser sur l'économie globale du projet.
- L'emprise disponible en berge est limitée en zone urbaine. Une section de berge est non accessible en raison de l'implantation de murs de propriété en bordure de cours d'eau en rive gauche, entre la passerelle Gambetta et le pont Richelieu.

Enfin, le contexte urbain lié au patrimoine historique et architectural représente un enjeu majeur pour le projet. La zone d'étude est largement intégrée aux périmètres de protection des différents bâtiments classés et inscrits de Belfort, notamment le site classé du parc du Souvenir implanté en rive gauche de la Savoureuse entre la passerelle des Arts et la rue Degombert.

### 5.2.3 Le projet retenu à l'issue de l'avant-projet

Le projet proposé est composé de plusieurs éléments :

**Projet en rivière**

Rétablissement de la continuité piscicole au niveau des cinq seuils transversaux :

- Echancrure dans le seuil des lettres
- Arasement partiel du seuil des Arts et restitution d'une rampe en enrochements
- Arasement du seuil Denfert
- Démolition et reconstruction de seuils franchissables sur les seuils Gambetta et Richelieu

Aménagements hydro-écologiques dans le lit de la Savoureuse liés à l'abaissement des seuils transversaux et visant une amélioration des conditions d'écoulement en basses eaux : reprises ponctuelles de la bathymétrie sous le pont Clémenceau et en amont des seuils transversaux, implantation d'épis déflecteurs et de blocs abri pour la faune aquatique.

Entretien de la ripisylve et recharge ponctuelle du lit entre le pont Richelieu jusqu'au pont De Gaulle.

**Projet urbain**

Implantation d'une promenade rive gauche :

- du pont de l'aval du pont du Magasin à l'amont du pont Carnot sur env. 480 ml :
  - L'accès à cette promenade s'effectue depuis le talus enherbé, en aval du pont du Magasin, par le biais d'une rampe (entrée de la section de promenade basse amont).
  - La promenade de berges se poursuit sous le pont Clémenceau,
  - Elle sera intégrée dans le quai Vauban restructuré (promenade hors lit mineur)
- depuis l'amont de la passerelle des Arts jusqu'au pont Richelieu sur env. 620 ml :
  - L'accès à la promenade s'effectue par une zone de gradin aménagée dans le quai en amont de la passerelle des Arts.
  - La promenade de berges se poursuit sous le pont Denfert-Rochereau et la passerelle Gambetta.
  - Une rampe permet aux piétons de remonter le long de la berge en amont du pont Richelieu.

En option, il est prévu une zone de gradin en rive droite en aval de la passerelle des Arts.

Reconstruction des passerelles des Lettres et des Arts.

**Confortement des ouvrages existants**

Consolidation des piles des ponts exposés : Magasin, Clémenceau, Carnot et Denfert-Rochereau.

Consolidation de pieds de quai

**Éléments complémentaires**

Le balisage lumineux de la promenade basse.

Maintenance de parties d'ouvrage (quai, éclairage, …)

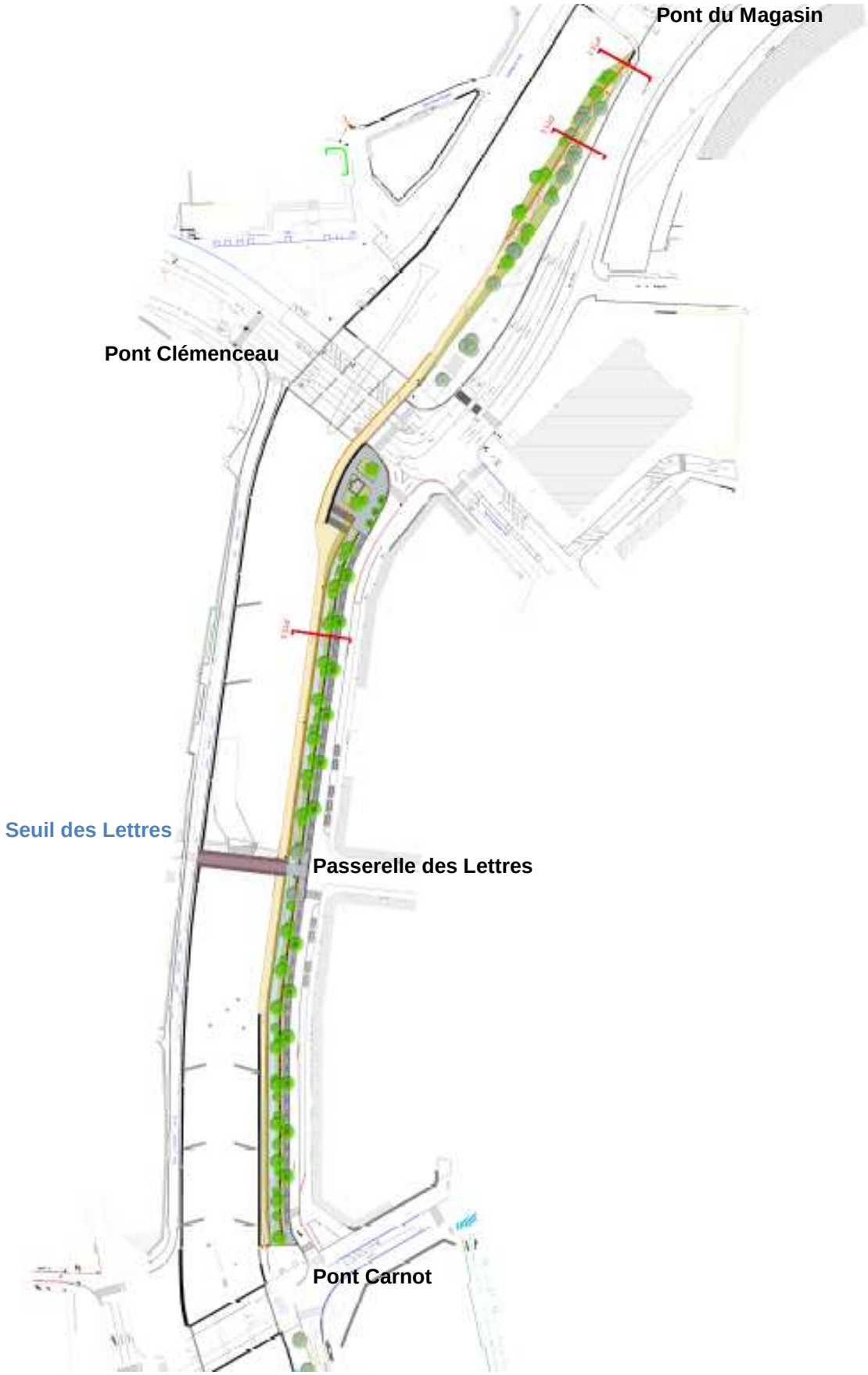



**Figure 58 : Vue en plan du projet – promenade amont du pont du Magasin au pont Carnot**

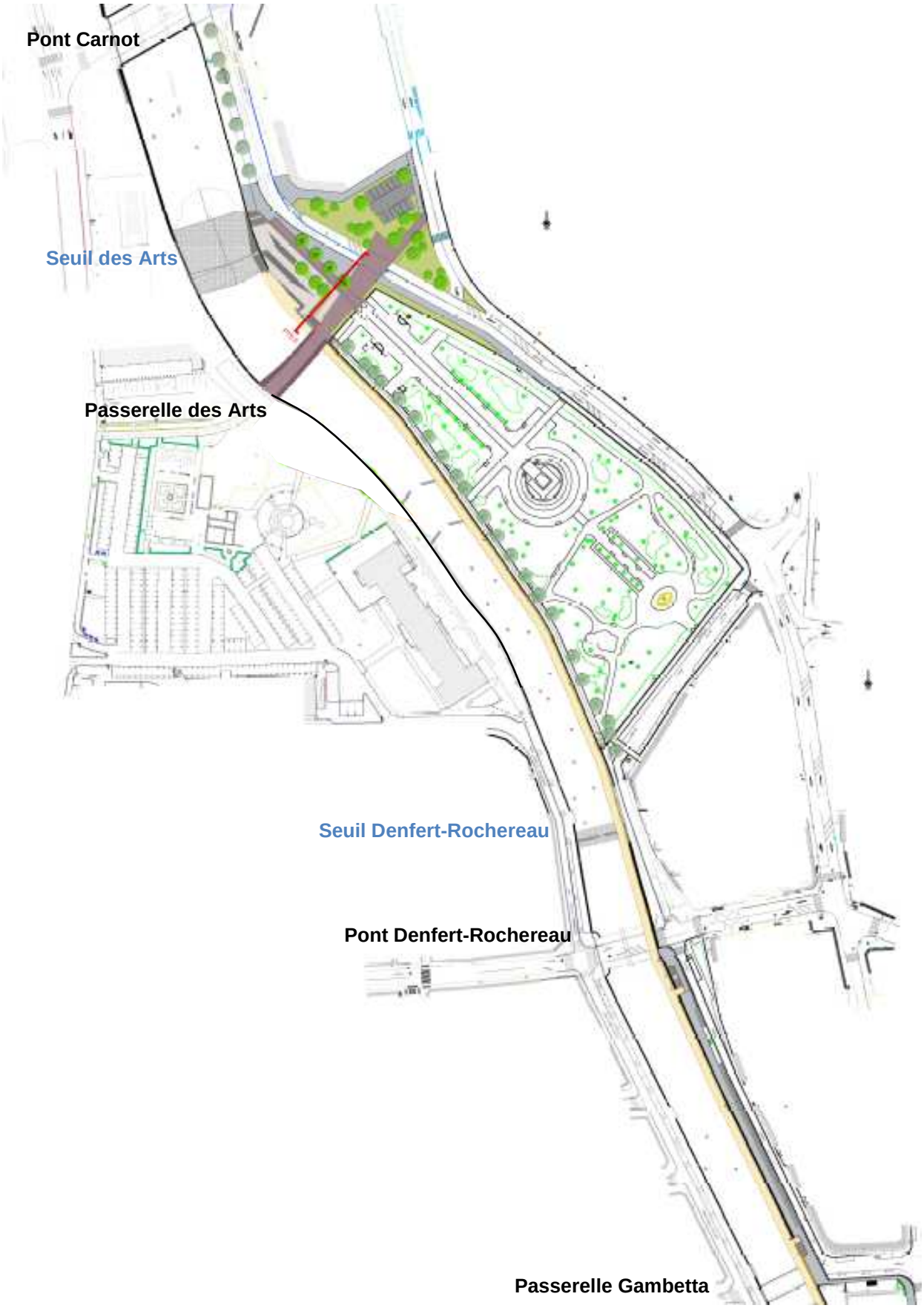



**Figure 59 : Vue en plan du projet – promenade aval des Arts à la passerelle Gambetta**

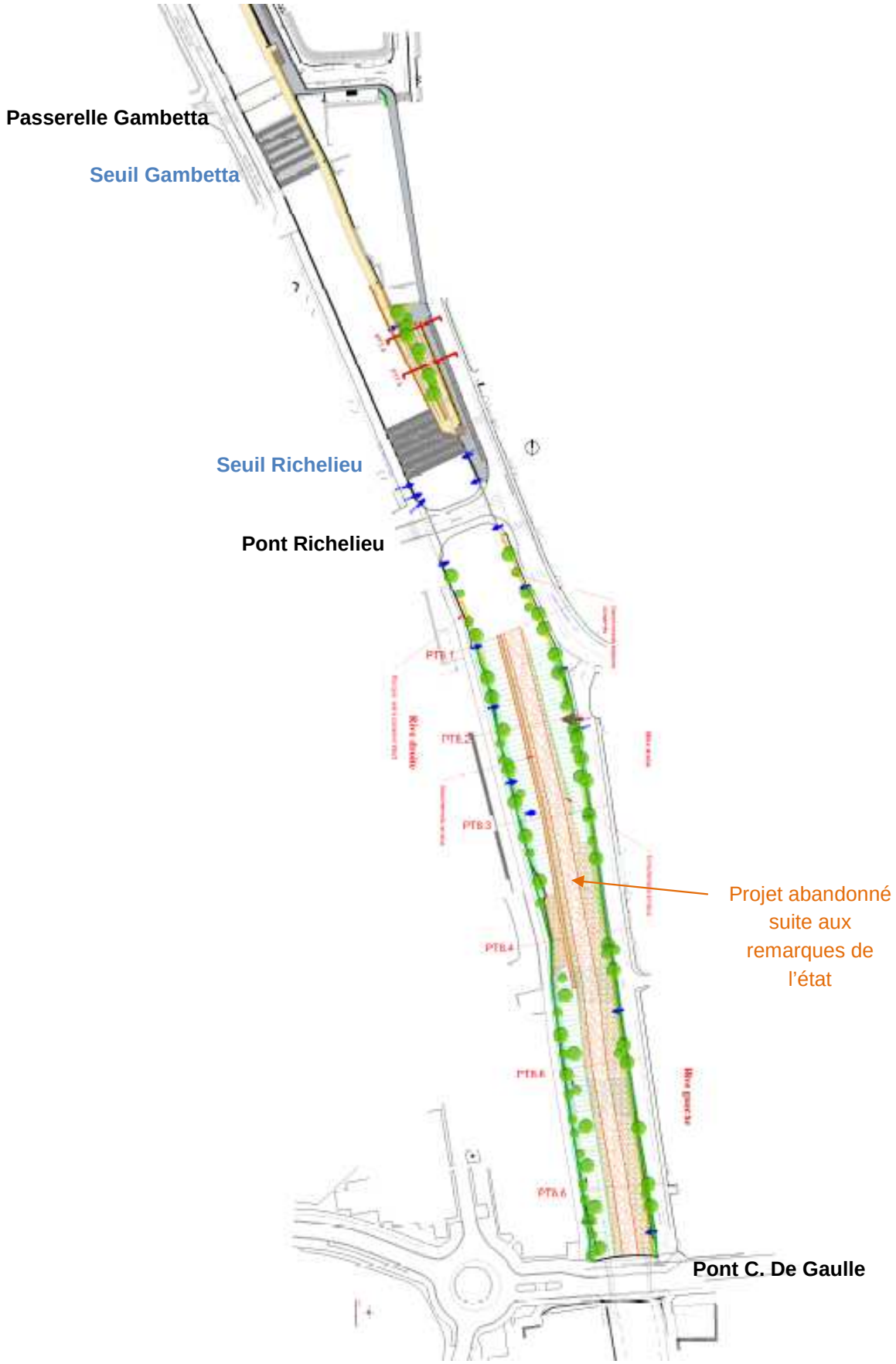



**Figure 60 : Vue en plan du projet – promenade aval de la passerelle Gambetta au pont C. De Gaulle**

### 5.2.4 Adaptations du projet pour la limitation des impacts hydrauliques

La démarche itérative entre la conception du projet et l'étude hydraulique de ces incidences a conduit à plusieurs adaptations ou révision du projet au fil de la conception. Le tableau suivant récapitule les révisions effectuées de façon à éviter ou réduire des impacts.

**Tableau 16 : Adaptations du projet**

<table>
<tr><th>Projet initial</th><th>Projet révisé</th><th>Commentaires</th><th>Impacts évités ou réduits</th></tr>
<tr><td>La promenade en lit mineur continue depuis le pont du Magasin jusqu'au pont Richelieu.</td><td>Scindement de la promenade en deux parties au stade orientation d'aménagement :<br>- De l'aval du pont du Magasin à l'amont du pont Carnot<br>- De l'amont de la passerelle des Arts à l'amont du pont Richelieu</td><td>- Tirant d'air entre la promenade et le tablier de certains ouvrages d'art<br>- Restriction de section mouillée et accélération de vitesses d'écoulement sous certaines passes de pont notamment du pont Carnot<br>- Incidence locale négative du projet sur la ligne d'eau en crue</td><td>- Limitation des impacts hydraulique en crue<br>- Limitation des risques d'affouillement au niveau du pont Carnot<br>- Limitation des remblais en lit mineur</td></tr>
<tr><td>Promenade en lit mineur au niveau du quai Vauban</td><td>Promenade sortie du lit mineur</td><td></td><td>- Limitation des remblais en lit mineur conformément aux exigences du PPRi<br>- Limitation du rehaussement de la ligne d'eau en crue</td></tr>
<tr><td>Cote altimétrique de la promenade à module + 20 cm</td><td>Calage altimétrique de la promenade sur la ligne d'eau de module</td><td>La promenade est calée plus bas. Sa période d'utilisation diminue mais ce calage permet une meilleure insertion et permet le passage d'engins sous le pont Clémenceau pour l'entretien.</td><td>- Limitation des remblais en lit mineur conformément aux exigences du PPRi<br>Limitation du rehaussement de la ligne d'eau en crue</td></tr>
<tr><td>Cote des seuils Gambetta et Richelieu</td><td>Réduction de la cote déversante du seuil<br><table><tr><th></th><th>Seuil Gambetta</th><th>Seuil Richelieu</th></tr><tr><td>Etat actuel</td><td>354.57</td><td>353.57</td></tr><tr><td>Etat projet version 1</td><td>354.37</td><td>353.57</td></tr><tr><td>Etat projet version 2</td><td>354.27</td><td>353.29</td></tr><tr><td>Abaissement final</td><td>-30 cm</td><td>-28 cm</td></tr></table></td><td></td><td>- Réduction de l'incidence du projet sur la ligne d'eau en période de crue au niveau d'un secteur où la largeur de la rivière est rétrécie (env. 20m au lieu de 30 m en amont du linéaire d'étude)<br>- Abaissement de la hauteur de chute pour la faune piscicole tout en maintenant le profil en long de la Savoureuse</td></tr>
<tr><td>Aménagements des berges entre les ponts Richelieu et De Gaulle</td><td>Abandon du projet de stabilisation des berges en faveur de confortements ponctuels, d'un traitement sélectif de la végétation et d'une recharge sédimentaire</td><td>L'érosion de berge sur ce linéaire est tolérée.</td><td>- Effet hydraulique neutre du projet pour la crue de référence</td></tr>
</table>

## 5.3 Incidence du projet sur la ligne d'eau en crue

L'incidence du projet a été étudiée pour les 3 configurations de calage. Les figures en pages suivantes présentent une comparaison entre les lignes d'eau en état actuel et en état projet.

Le tableau suivant propose une comparaison des cotes d'eau au droit des 7 échelles prédéfinies.

**Tableau 17 : Résultats de simulation au niveau des 7 échelles pour les 3 calages retenus**

| **crue de 1990** | | échelle 1 | échelle 2 | échelle 3 | échelle 4 | échelle 5 | échelle 6 | échelle 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 358.55 | 359.00 | | 358.00 | | | 356.70 |
| | | Cote 1990 | Cote projet de la passerelle | | Cote projet de la passerelle | | | seuil de débordement |
| calage A | état actuel | 358.62 | 358.34 | 358.23 | 357.93 | 357.14 | 355.68 | 354.17 |
| calage A | état projet | 358.44 | 358.28 | 358.08 | 357.14 | 356.82 | 355.60 | 354.17 |
| *EP -EA* | *écart (cm)* | *-18* | *-6* | *-15* | *-79* | *-32* | *-8* | *0* |
| calage B | état actuel | 358.62 | 358.38 | 358.20 | 357.90 | 356.85 | 355.29 | 354.39 |
| calage B | état projet | 358.23 | 358.12 | 357.65 | 357.15 | 356.53 | 355.21 | 354.39 |
| *EP-EA* | *écart (cm)* | *-39* | *-26* | *-55* | *-75* | *-32* | *-8* | *0* |
| calage C | état actuel | 359.01 | 358.73 | 358.61 | 358.33 | 357.38 | 355.90 | 354.43 |
| calage C | état projet | 358.75 | 358.58 | 358.35 | 357.52 | 357.17 | 355.90 | 354.43 |
| *EP-EA* | *écart (cm)* | *-26* | *-15* | *-26* | *-81* | *-21* | *0* | *0* |

** Cote projet du bas du tablier des futures passerelles*

Quelle que soit la configuration de calage, la ligne d'eau en état projet est inférieure à la ligne d'eau en état actuel. Le projet a une incidence globale nettement positive sur la situation de crue dans la mesure où il contribue à abaisser le niveau d'eau pour la crue de référence.
Entre les seuils Gambetta et Richelieu, l'incidence du projet est moins marquée puisque la largeur de la rivière est plus restreinte et le rôle des seuils sur la stabilité du profil en long de la rivière n'a pas permis d'abaisser significativement leur cote déversante (abaissement de -10 à -20 cm).

A noter qu'un débordement en état actuel comme en état projet a lieu en rive droite de la Savoureuse entre le pont du Magasin et le pont Clémenceau. Ce dernier est localisé et l'ensemble du débit de crue retourne dans la rivière.

En aval du secteur d'étude, l'écart entre l'état actuel et l'état projet est nul. Le projet n'a pas d'incidence sur les écoulements.

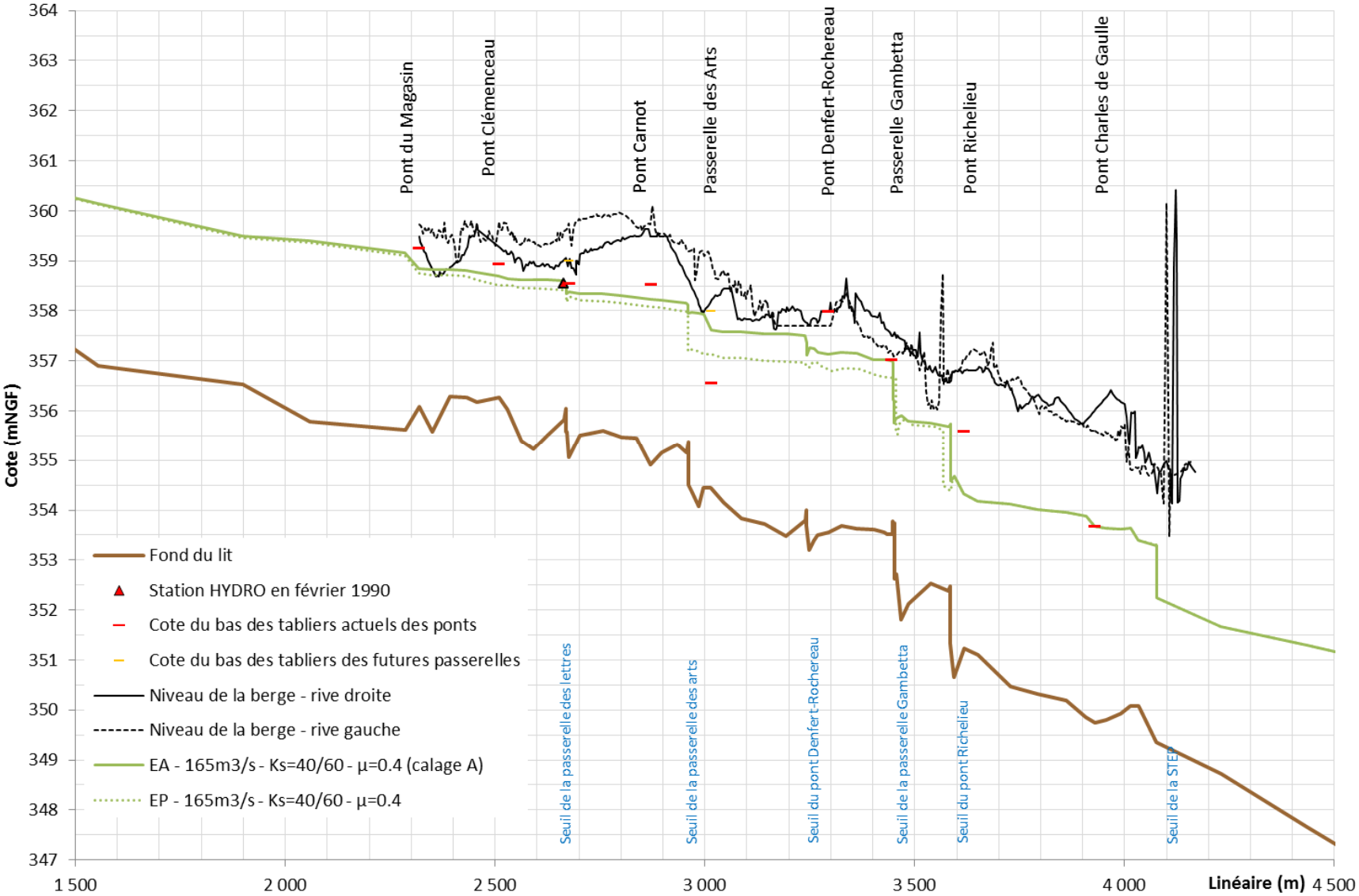



**Figure 61 : Incidence du projet sur la ligne d'eau – Calage A**

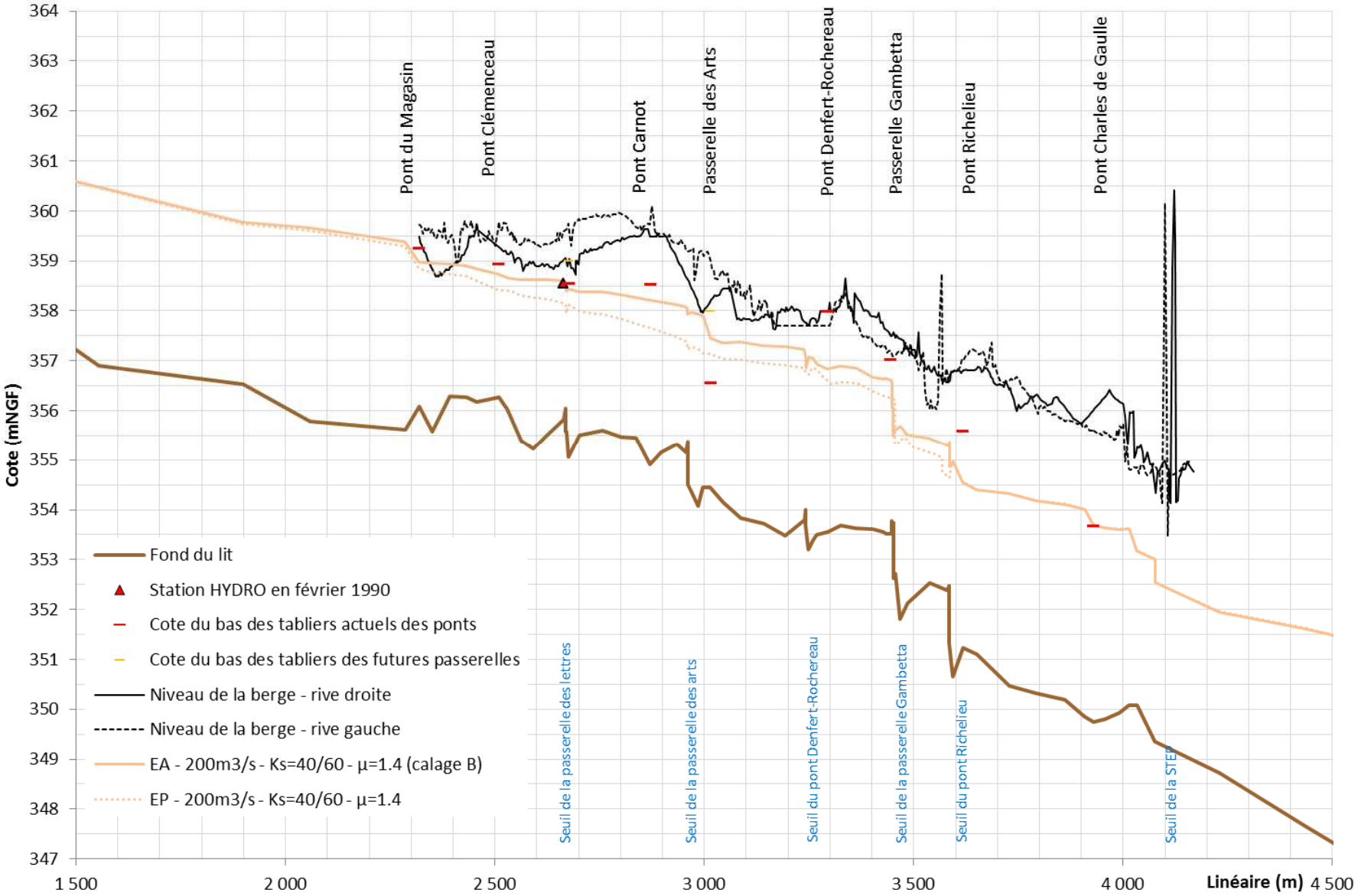



**Figure 62 : Incidence du projet sur la ligne d'eau – Calage B**

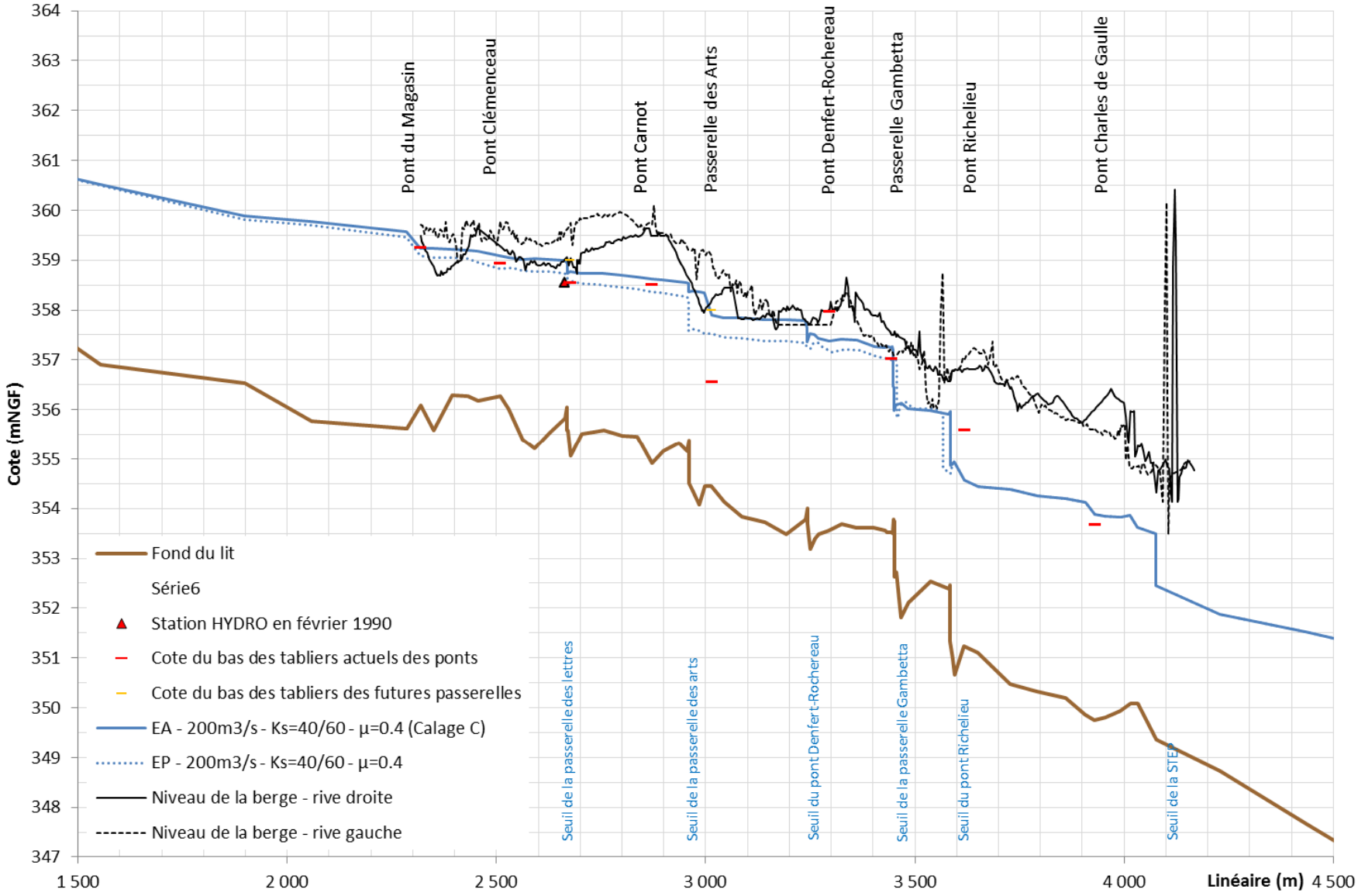



**Figure 63 : Incidence du projet sur la ligne d'eau – Calage C**

## 5.4 Incidence sur la section mouillée

L'incidence du projet sur la section mouillée de la Savoureuse a été quantifiée de deux manières :

1. Etude de la restriction de section engendrée par l'implantation de la promenade
2. Estimation du volume de remblai (et de déblai) induit par l'implantation de la promenade et les travaux hydroécologiques.

La section mouillée au droit de 7 échelles a été déterminée sous la cote de la crue de 1990 en état actuel.
Globalement, étant donné la restructuration du quai Vauban (et l'abaissement des seuils des Lettres et des Arts), la section mouillée en crue est augmentée par le projet sur la partie amont du périmètre d'étude. L'abaissement des seuils transversaux, notamment l'arasement du seuil Denfert-Rochereau et l'abaissement des seuils Gambetta et Richelieu contribuent à compenser la promenade située en remblai dans le lit mineur.

Les profils en travers état actuel et état projet sont comparés sur les figures suivantes.

**Tableau 18 : Estimation de la section mouillée sous la cote de la crue de 1990 au droit des 7 repères**

| Crue 1990 | | Section mouillé sous la cote de crue état actuel - en état actuel (m²) | | | Section mouillée sous la cote de crue état actuel -état projet (m²) | | | Variation de la section mouillée (%) | | | Ecart sur la ligne d'eau (état projet-état actuel) (cm) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **n°** | **Localisation** | **Calage A** | **Calage B** | **Calage C** | **Calage A** | **Calage B** | **Calage C** | **Calage A** | **Calage B** | **Calage C** | **Calage A** | **Calage B** | **Calage C** |
| **échelle 1** | Station HYDRO à proximité du pont Clémenceau de 1990 | 85 | 85 | 98 | 83 | 83 | 98 | -2% | -2% | 0% | -0.18 | -0.39 | -0.26 |
| **échelle 2** | En amont immédiat de la passerelle des Lettres | 75 | 76 | 87 | 84 | 85 | 98 | +12% | +12% | +14% | -0.06 | -0.26 | -0.15 |
| **échelle 3** | En aval du pont Carnot | 94 | 93 | 108 | 94 | 93 | 108 | 0% | 0% | 0% | -0.15 | -0.55 | -0.26 |
| **échelle 4** | En amont immédiat de la passerelle des arts | 98 | 97 | 110 | 98 | 97 | 110 | 0% | 0% | 0% | -0.79 | -0.75 | -0.81 |
| **échelle 5** | En aval immédiat du pont Denfert | 85 | 77 | 91 | 85 | 78 | 92 | +1% | +1% | +1% | -0.32 | -0.32 | -0.21 |
| **échelle 6** | En amont du seuil Richelieu | 64 | 56 | 69 | 67 | 57 | 72 | +4% | +1% | +6% | -0.08 | -0.08 | 0.00 |
| **échelle 7** | Au niveau de la rue du foyer (aval du pont Richelieu) | 55 | 60 | 61 | 55 | 60 | 61 | 0% | 0% | 0% | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

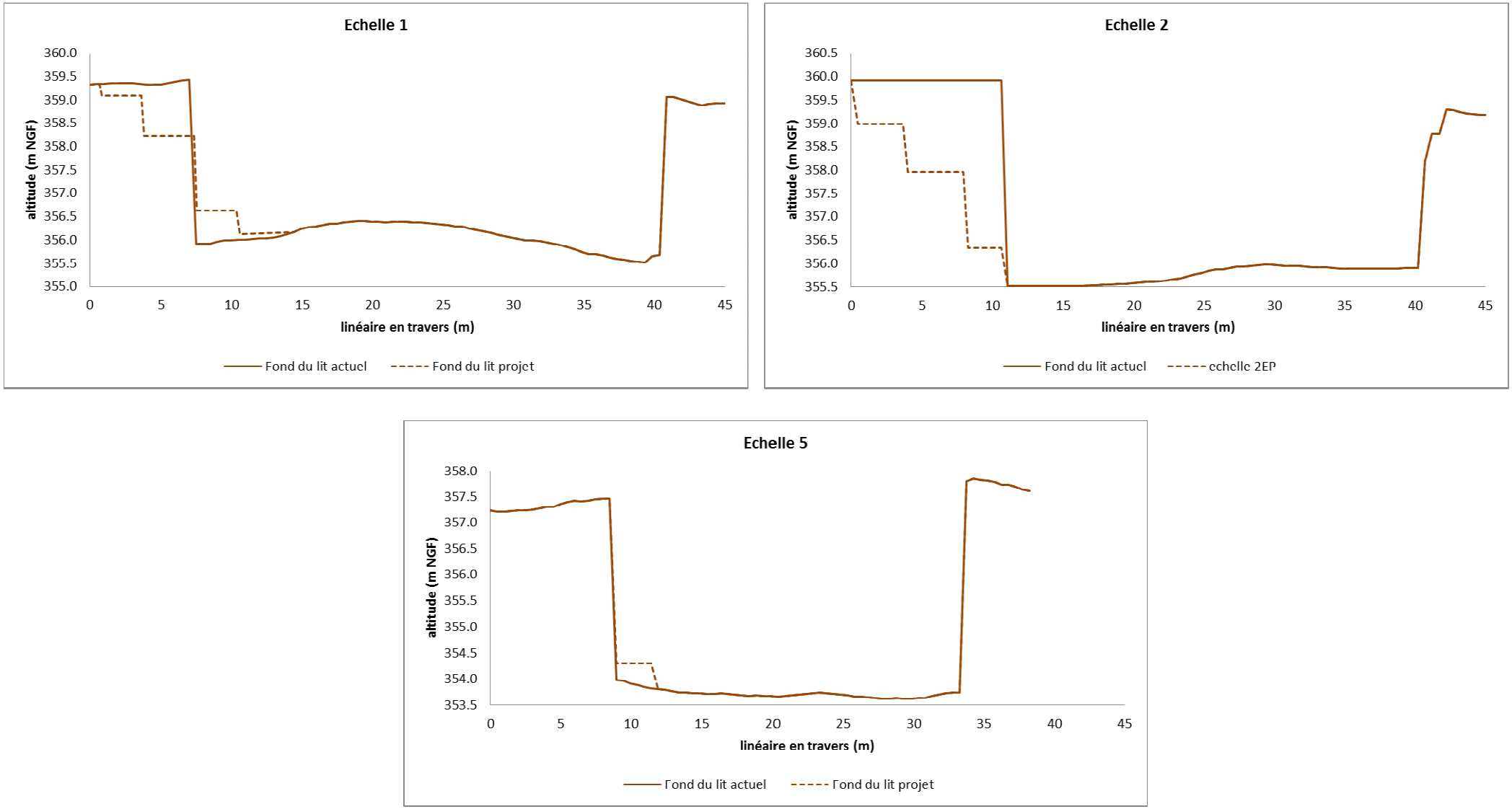



**Figure 64 : Comparaison des profils en travers état actuel et état projet – échelles 1, 2 et 5**

**Tableau 19 : Estimation des volumes de déblai et de remblai en lit mineur induit par le projet**

| Volume en m3 | | Déblais | | | | Remblais fixes | | | Remblais mobiles |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Biefs | | seuil | chenaux | atterrissements | Estimation incision du lit | promenade + rampe | épis | seuil | atterrissement |
| 1-2 | Magasin - Lettres (seuil inclus) | -20 | 0 | -150 | 0 à 0.9m | 260 | 10 | 0 | 0 |
| 2-3 | Lettres (exclu) - Arts limite PPRI (seuil inclus) | -710 | 0 | -210 | 0 à 0.9 m | 80 | 30 | 20 | 0 |
| **TOTAL intermédiaire (Zone rouge du PPRi)** | | **-1550** | | | | **400** | | | **0** |
| **Equilibre Déblai/Remblai (Zone rouge du PPRi)** | | **-1150** | | | | | | | **0** |
| 3-4 | Arts limite PPRI - Denfert-Rochereau (seuil inclus) | -110 | -10 | -10 | 0 à 1 m | 520 | 10 | 0 | 0 |
| 4-5 | Denfert Rochereau - Gambetta (seuil inclus) | -100 | -20 | -60 | 0 à 1 m | 270 | 0 | 40 | 0 |
| 5-6 | Gambetta - Richelieu (seuil inclus) | -300 | -30 | -340 | Baisse modérée non estimée | 210 | 0 | 60 | 0 |
| 6-7 | Richelieu - De Gaulle | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 680 |
| **TOTAL - Toutes zones** | | **-2530** | | | | **1510** | | | **680** |
| **Equilibre Déblai/Remblai - Toutes zones** | | **-1020** | | | | | | | **680** |

Les volumes de déblai sont excédentaires. Les volumes de déblais et de remblais sont quasiment à l'équilibre en lit mineur.
Comme le montre ce tableau le bilan global remblai-déblai est en faveur des déblais. Pour le seul lit mineur, le projet prévoit :

- 2530 m³ de déblai dont 1550 m³ en zone rouge du PPRI
- 1510 m³ de remblai dont 400 m³ en zone rouge du PPRI

En complément 680 m³ de remblai dit mobiles sur le secteur Richelieu - De Gaulle c'est-à-dire ayant vocation à contribuer au transport sédimentaire et à être mobilisables en crue.
En complément 6400m³ environ de déblai en lit majeur pour la réalisation des aménagements du quai Vauban et du secteur des Arts.

## 5.5 Dimensionnement hydraulique des nouvelles passerelles

Les passerelles des Lettres et des Arts seront reconstruites. La cote du tablier des passerelles a été calée pour que ces dernières ne montent pas en charge pour la crue de référence. Une revanche sur les lignes d'eau simulées en état projet a été prise.

**Tableau 20 : Cotes d'eau en état projet et revanche sous les futures passerelles – crue de 1990**

| crue 1990 | | échelle 2 | échelle 4 |
|---|---|---|---|
| | | amont immédiat passerelle des Lettres | amont immédiat passerelle des arts |
| Ligne d'eau (mNGF) | Calage A | 358.28 | 357.14 |
| | Calage B | 358.12 | 357.15 |
| | Calage C | 358.58 | 357.52 |
| Tirant d'air sous le tablier (m) | Calage A | 0.72 | 0.86 |
| | Calage B | 0.88 | 0.85 |
| | Calage C | 0.42 | 0.48 |

Les cotes de référence du PPRi au droit des passerelles ainsi que les cotes des nouvelles passerelles sont les suivantes :

**Tableau 21 : Cotes de référence du PPRi au droit des nouvelles passerelles**

| | Passerelle des Lettres | Passerelle des Arts |
|---|---|---|
| **Cote de référence du PPRi en amont des passerelles** | 360.37 mNGF (Profil PPRi P42) | 359.35 mNGF (Profil PPRi Pont46) |
| **Cote du bas du tablier de la nouvelle passerelle** | 359.00 mNGF | 358.00 mNGF |

Les cotes des nouvelles passerelles sont calées au-dessous de la cote de référence du PPRi.
A noter que les cotes de référence du PPRi présentent des incohérences par rapport à la cartographie des aléas du PPRi.

- Au droit de la passerelle des Lettres, le niveau du terrain naturel en rive droite est à 359.20 mNGF et en rive gauche à 359.50 mNGF. La carte d'aléa du PPRi indique qu'il n'y a pas eu d'inondation alors que la cote de référence est 360.37 mNGF, soit 0.90 à 1.2 m au-dessus de la cote de la chaussée.
- Au droit de la passerelle des Arts, le niveau du terrain naturel en rive droite est à 358.40 mNGF et en rive gauche à 358.90 mNGF. La carte d'aléa du PPRi indique qu'il n'y a pas eu d'inondation alors que la cote de référence est 359.35 mNGF, soit 0.45 à 0.95 m au-dessus de la cote de la chaussée.

Pour ces deux exemples, il y a une incohérence entre la cartographie des zones inondables et les cotes de référence indiquées dans le règlement du PPRi.
Ainsi, la cote considérée pour le calage des passerelles est la cote issue de la modélisation de l'état actuel – calage C validé par les services de l'état.

Le projet de reconstruction de passerelle est inclus :

- En lit mineur dans la zone rouge du PPRi (Zone U1),
- En rive droite dans la zone verte du PPRi (Zone U3),
- En rive gauche hors zonage du PPRi.

La zone U1 correspond aux secteurs urbanisés ou les risques potentiels pour les vies humaines sont les plus élevés (hauteur d'eau supérieure à 1 m pour la crue de référence, vitesses élevées du courant). Les prescriptions sur cette zone visent à protéger les personnes et à ne pas aggraver les conditions d'écoulement.
Le risque est faible en zone U3 (hauteur d'eau inférieure à 0,5 m). Aussi, sur ce secteur déjà urbanisé (ou en cours d'urbanisation) les constructions suivant leur nature sont autorisées sous réserve de l'observation de dispositions particulières propres à chaque zone, visant à protéger les personnes et à ne pas aggraver les conditions d'écoulement.

Le règlement du PPRi (chapitre 2 - Article 1.3) autorise exceptionnellement l'implantation d'infrastructure de transports (route, pont) sous réserve que les nouvelles opérations répondent aux conditions suivantes :

- le parti retenu (gabarit, tracé en plan, profils en long et en travers, ouvrages hydrauliques) parmi les différentes solutions doit représenter le meilleur compromis technique, économique et environnemental. Il convient :
    - d'éviter le franchissement en remblai dans les zones E et U1 et dans le franc-bord de 5 m non inondable le long de la rivière,
    - de limiter l'emprise des ouvrages dans la zone E afin de préserver sa capacité de stockage.
- toutes les mesures de limitation du risque, doivent être prises.

Compte tenu des contraintes hydrauliques et techniques présentes sur le périmètre d'étude :

- Le projet ne prévoit pas de remblais en lit mineur.
- Les infrastructures ne comprendront pas de piles en rivière.
- La transparence hydraulique a été recherchée dans la conception même des passerelles. Leur structure et leur capotage ont été ajourés de manière à ce qu'en cas de très forte crue, l'eau s'écoule sur leur tablier sans rehausses significatives de la ligne d'eau.
- Une revanche sur les lignes d'eau simulées en état projet a été prise pour caler le bas du tablier des passerelles.

# 6. Simulation d'une crue extrême

## 6.1 Hypothèse et méthodologie

En complément, l'incidence hydraulique du projet a été testée sur une crue extrême, la crue millénale. L'hydrologie de cette crue a été estimée lors des études antérieures à partir de la méthode du Gradex (cf. étude de faisabilité de la restauration de la continuité biologique de la Savoureuse en centre-ville de Belfort, 2012). Le débit de pointe de la crue exceptionnelle de période de retour 1 000 ans a été évalué à 330 $m^3/s$. Cette valeur a été retenue pour les simulations.

Les profils en long des lignes d'eau simulées en état actuel et état projet sont représentés sur les figures suivantes. Les deux configurations de calage ont été testés, à savoir :

- Calage C - coefficients de singularité usuels au niveau des seuils
- Calage B - coefficients de singularité élevés au niveau des seuils

Les zones inondées et les hydrogrammes de crue extraits en aval du modèle sont présentés ensuite.

Au-delà des incertitudes liées à la caractérisation de l'hydrologie de cet évènement extrême, c'est l'écart entre les simulations en état actuel et en état projet qui a été étudié.

## 6.2 Analyse des résultats

La ligne d'eau état projet est inférieure à la ligne d'eau état actuel sur la partie amont du projet jusqu'au seuil Richelieu.

Sur la partie aval, la ligne d'eau état projet est supérieure à la ligne d'eau état actuel. Ceci s'explique par les débordements ayant lieu en lit majeur. En effet, les débits transitant en lit majeur sont plus importants en état actuel qu'en état projet ; le projet contribuant à abaisser la ligne d'eau dans la traversée de Belfort (comme démontré précédemment).
Ainsi en aval du secteur d'étude, la totalité du débit de pointe de la crue millénale ne retourne pas dans le lit mineur. En rive droite, le remblai SNCF perturbe les écoulements de la rivière en lit majeur au point de ne pas permettre un retour des eaux en lit mineur immédiatement après le pic de crue.
Au pic de crue en aval du secteur d'étude, l'écart de débit entre l'état actuel et l'état projet est de l'ordre de 30 $m^3/s$ pour le calage C et de 5 $m^3/s$ pour le calage B.

En tout état de cause, l'étendue des zones inondables simulées en état projet est inférieure à l'étendue des zones inondables simulées en état actuel. Sur la partie aval du secteur modélisé, la rivière reste contenue dans son lit mineur. **La vulnérabilité du territoire vis-à-vis du risque inondation par débordement de la Savoureuse n'est pas aggravée.**

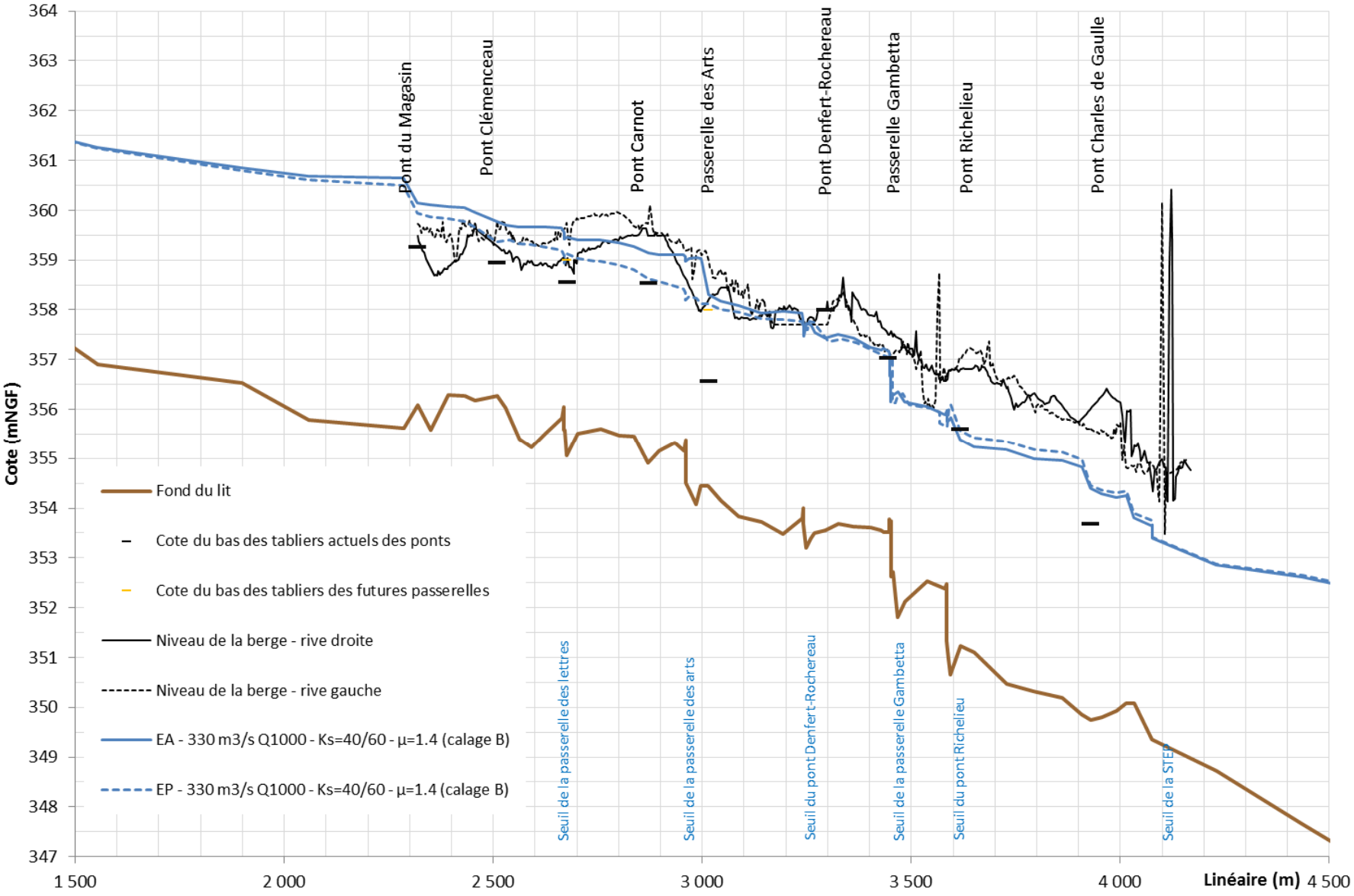



**Figure 65 : Incidence du projet sur la ligne d'eau pour la Q1000 – Calage B**

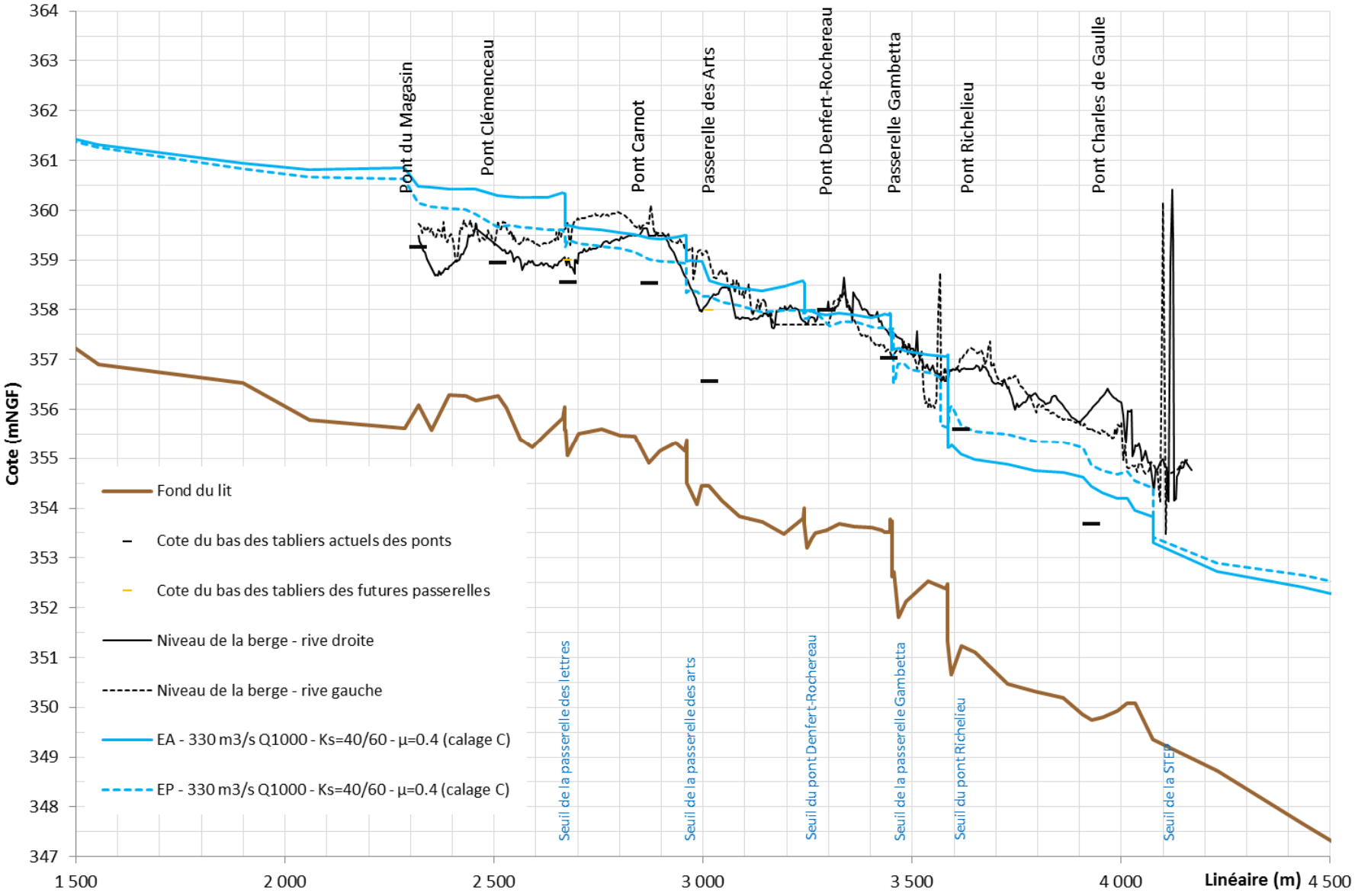



**Figure 66 : Incidence du projet sur la ligne d'eau pour la Q1000 – Calage C**

Figure 67 : Incidence du projet sur les zones inondées pour la Q1000 – Calage B

Figure 68 : Incidence du projet sur les zones inondées pour la Q1000 – Calage C

A titre informatif uniquement, l'étendue des zones inondées a été comparée au surfaces inondables issues de la carte du TRI de Belfort-Montbéliard. L'hydrologie de l'évènement extrême pris en compte tout comme la méthodologie considérée dans la modélisation hydraulique et la topographie utilisée ne sont pas précisées. Cette carte constitue la seule référence disponible sur une crue extrême.
Si en rive droite les surfaces en eau sont plus contenues sur la cartographie du TRI, en rive gauche les étendues d'eau sont comparables.

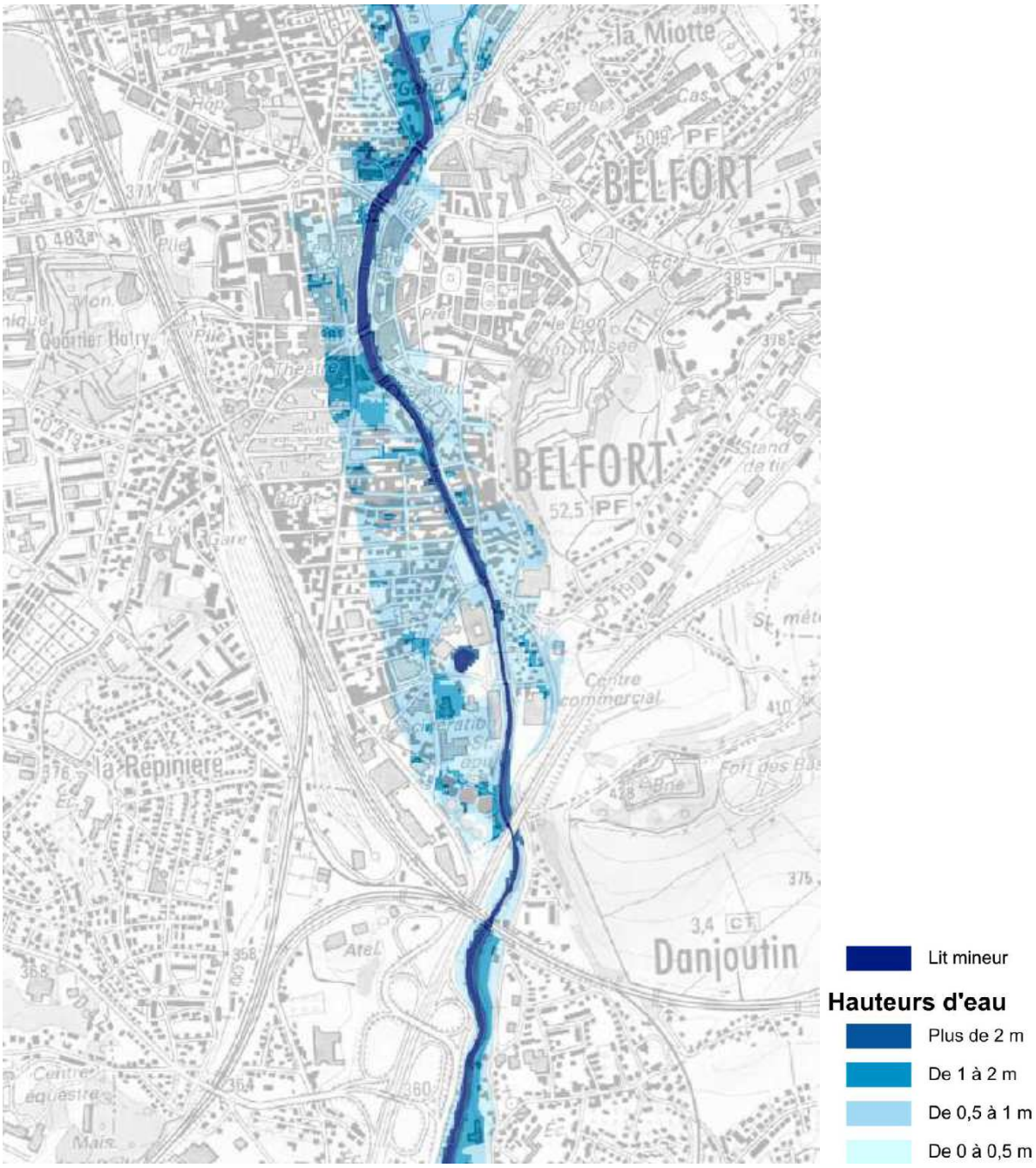



**Figure 69 : Cartographie extraite de l'atlas des surfaces inondables du Doubs, de l'Allan et de la Savoureuse du TRI de Belfort-Montbéliard**

# 7. Synthèse

La neutralité hydraulique du projet d'aménagement des seuils et de la promenade au bord de l'eau est recherchée pour la crue de référence (crue historique de février 1990). Le risque d'inondation par débordement de la rivière ne doit pas être aggravé.

Etant donné le contraste entre les situations de basses et hautes eaux, deux modélisations hydrauliques ont été mises en œuvre afin d'étudier l'impact du projet :

- Une modélisation en 1D des écoulements en lit mineur de la Savoureuse pour les simulations en crues – fond du lit totalement en eau / un unique axe d'écoulement,
- Une modélisation en 2D des écoulements en lit mineur afin d'étudier finement les écoulements en situation normale et à l'étiage – fond du lit partiellement en eau / différents axes d'écoulement.

Des tests de sensibilité des modèles hydrauliques ont été effectués afin de vérifier la robustesse des résultats de simulation. Suite à des incertitudes liées à la crue historique de février 1990, trois configurations de calage ont été retenues pour étudier l'incidence du projet d'aménagement.
Le calage C est celui qui a été retenu par les services de l'état.

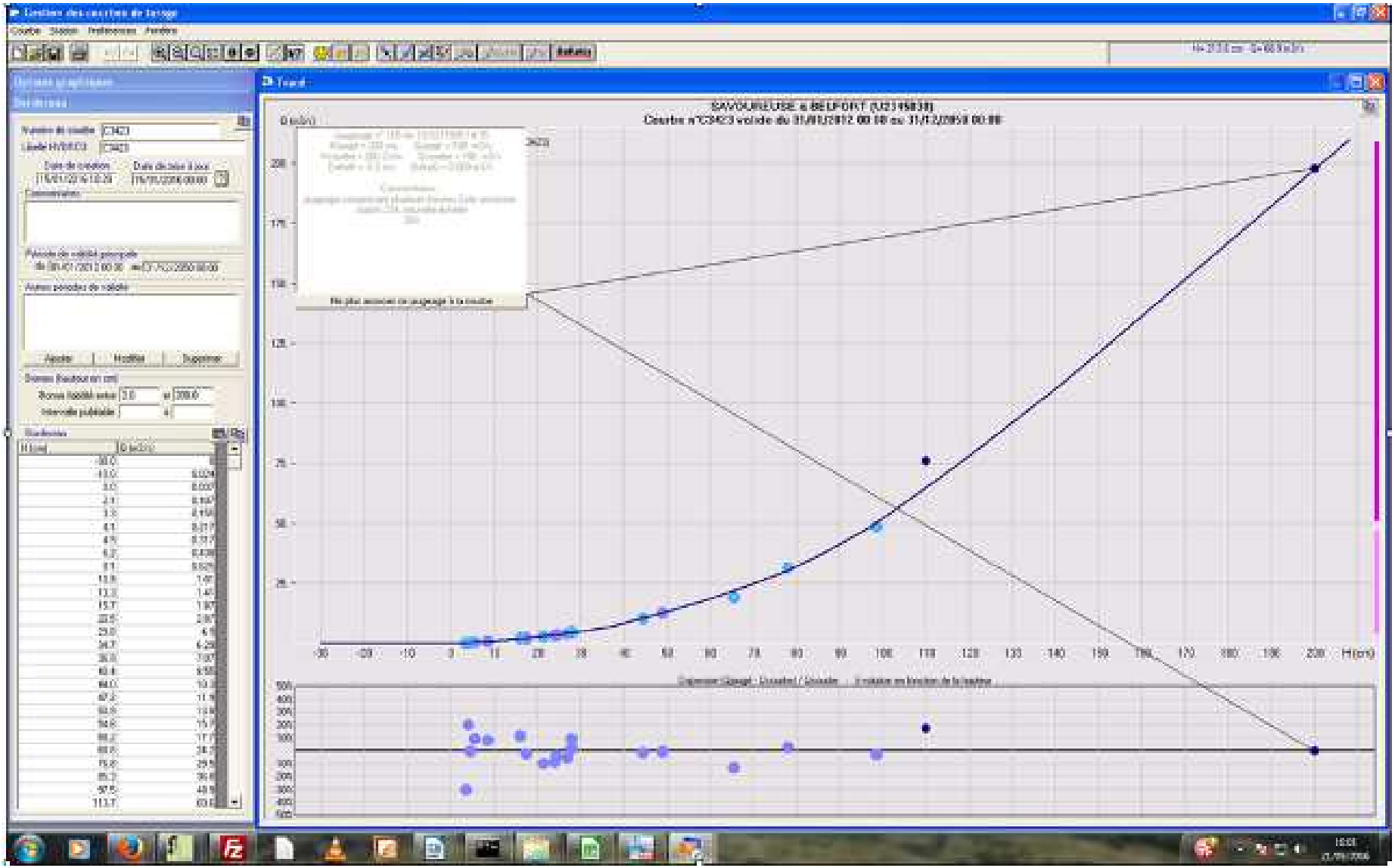
L'incidence du projet a été appréhendée durant les différentes étapes de conception. Certains éléments de projet ont été adaptés pour répondre à des contraintes de faisabilité technique et notamment pour répondre à l'exigence de neutralité hydraulique du projet. Au stade d'avant-projet, l'incidence du projet pour la crue de référence est la suivante :

- En amont du pont Richelieu, dans la traversée de Belfort, il a été démontré que la cote modélisée en état projet est strictement inférieure à la cote modélisée en état actuel pour la crue de référence.
  Dans la traversée de Belfort entre le pont du Magasin et la passerelle Gambetta, le projet d'aménagement contribue à diminuer sensiblement le niveau d'eau pour la crue de référence : son incidence est positive.
- La neutralité hydraulique est atteinte sur la portion de rivière étroite située entre la passerelle Gambetta et le pont Richelieu.

Outre l'étude de la ligne d'eau en crue, l'impact du projet en basses eaux a été appréhendé et des aménagements hydroécologiques proposés afin d'assurer une diversité des milieux et une lame d'eau suffisante en moyenne et basses eaux pour la faune aquatique et semi-aquatique. L'incidence du projet en rivière fait l'objet d'un rapport annexe.

# Annexe 1 – Fiche technique de la station HYDRO de Belfort

# Annexe 2 – Courbe de tarage actuelle de la station HDYRO avec identification du jaugeage réalisé pendant la crue de février 1990


SAVOUREUSE à BELFORT
Courbe n°C3423 valide du 01/01/2012 00:00 au 31/12/2999 00:00
H(cm)

# Annexe 3 – Notice du logiciel de modélisation hydraulique - ICM