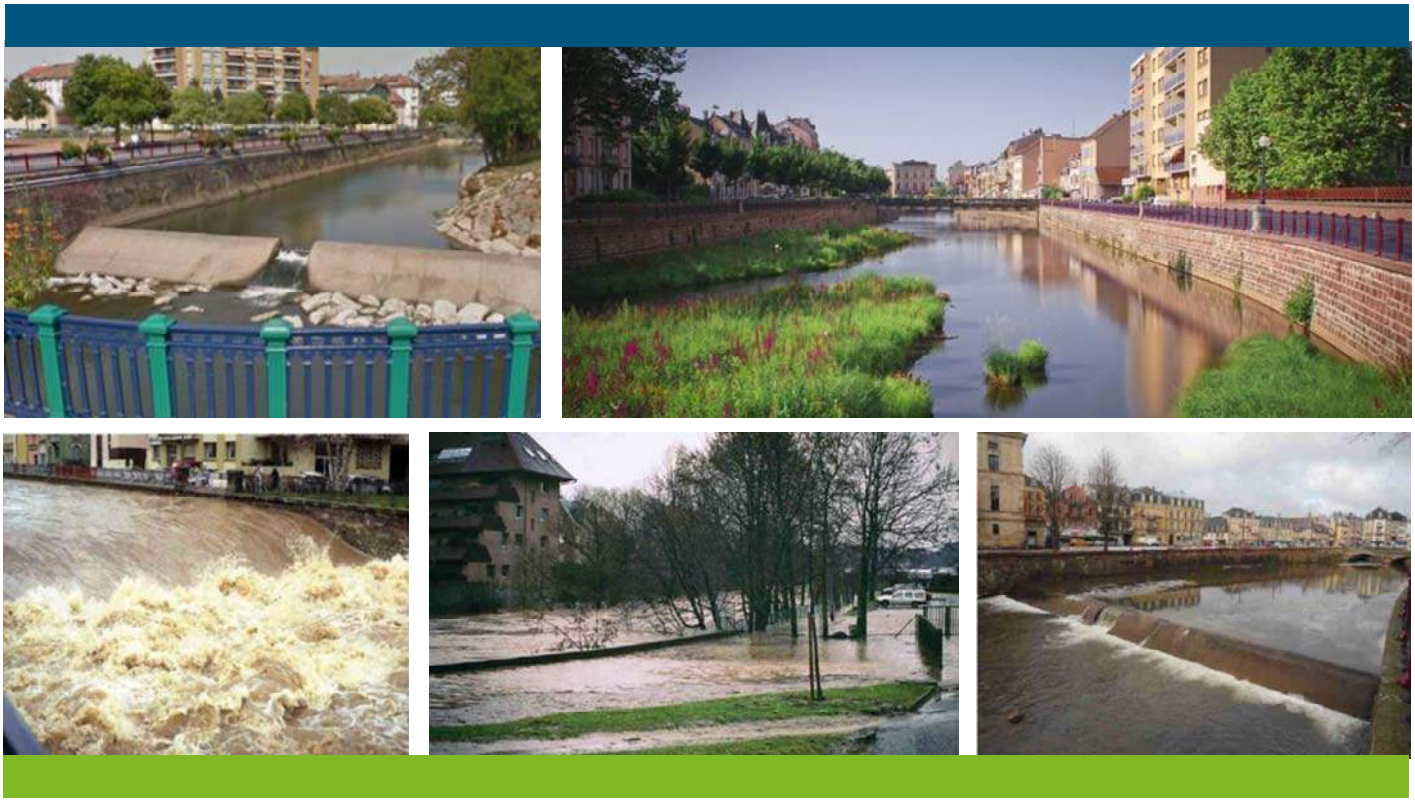
# Aménagement de la promenade des berges de la Savoureuse

## MISSION HYDRAULIQUE 2 – Validation hydraulique du projet

Version 3



FLG 42333D

Mai 2016

# Informations qualité

## Contrôle qualité

| Version | Date | Rédigé par | Visé par : |
|---|---|---|---|
| Version 1 | Mars 2016 | Soizic Heuzé, Victor Robic et Jérémy Magnier<br>Egis Eau | Rémy Croix - Egis Eau |
| Version 2 | Mai 2016 | Soizic Heuzé et Victor Robic<br>Egis Eau | Rémy Croix - Egis Eau |
| Version 3 | Juin 2016 | Soizic Heuzé et Victor Robic<br>Egis Eau<br>Ingénierie Etudes et Travaux Fluviaux<br>15, Avenue du Centre<br>CS 20538 Guyancourt<br>78286 Saint-Quentin-en-Yvelines Cedex<br>soizic.heuze@egis.fr | Rémy Croix - Egis Eau |

## Destinataires

| Envoyé à : | | |
|---|---|---|
| **Nom** | **Organisme** | **Envoyé le :** |
| F. BINOUX-REMY<br>G. GANDON<br>C. SILVESTRE | VILLE DE BELFORT<br>Hôtel de Ville et de la Communauté d'Agglomération<br>Place d'Armes<br>90 020 Belfort Cedex | Juin 2016 |
| | | |
| | | |

# Table des matières


1. Préambule ..... 1
   1.1 Contexte ..... 1
   1.2 Périmètre d'étude ..... 1
   1.3 Objet de la mission hydraulique 2 ..... 3
   1.4 Objet du rapport ..... 3
2. Fonctionnement hydraulique du secteur d'étude en état actuel ..... 4
   2.1 Rappel des débits caractéristiques de la Savoureuse à Belfort ..... 4
   2.2 Modélisation hydraulique de l'état actuel ..... 5
      2.2.1 Objectif ..... 5
      2.2.2 Construction du modèle 2D ..... 5
      2.2.3 Analyse des données bathymétriques ..... 8
   2.3 Calage du modèle ..... 10
      2.3.1 Données disponibles ..... 10
         2.3.1.1 Plan de Prévention des risques d'Inondation de la Savoureuse, du Rhôme et de la Rosemontoise ..... 10
         2.3.1.2 Cote enregistrée à la station HYDRO ..... 12
         2.3.1.3 Photographies de crue ..... 12
         2.3.1.4 Niveaux d'eau levés par le géomètre ..... 15
         2.3.1.5 Synthèse sur le choix des évènements hydrologiques utilisés pour le calage du modèle ..... 15
      2.3.2 Calage en hautes eaux ..... 15
         2.3.2.1 Simulation de la crue de 1990 – débit de pointe de 209 $m^3/s$ ..... 15
         2.3.2.2 Proposition de révision du débit de pointe de la crue de 1990 ..... 16
      2.3.3 Calage en basses eaux ..... 20
   2.4 Niveaux d'eau et vitesses d'écoulement caractéristiques en état actuel ..... 23
3. Modélisation du projet ..... 24
   3.1 Projets simulés ..... 24
      3.1.1 Préambule ..... 24
      3.1.2 Description de l'EP0 : Aménagement de la continuité écologique au droit des 5 seuils transversaux ..... 24
      3.1.4 Implantation de la promenade basse – EP3 et EP4 ..... 27
   3.2 Incidence des projets EP0, EP3 et EP4 ..... 28

3.2.1 Incidence hydraulique ..... 28
3.2.2 Calcul de la restriction de section mouillée due au projet ..... 31
3.2.3 Altimétrie de la promenade ..... 32
4. Synthèse ..... 33

# Liste des figures

Figure 1 : Carte du secteur d'étude et des seuils présents dans la traversée de Belfort ..... 2
Figure 2 : Ecoulements mensuels de la Savoureuse à Belfort ..... 4
Figure 3 : Zoom sur des transects de rivière disponibles sur le plan bathymétrique ..... 5
Figure 4 : Aperçu général du modèle 2D ..... 6
Figure 5 : Aperçus du maillage du modèle 2D ..... 7
Figure 6 : Comparaison entre la répartition spatiale des profils en travers (en rouge à g.) et des levés bathymétriques (à dr.) ..... 8
Figure 7 : Comparaison des profils en long de la Savoureuse construit sur la base des profils en travers et de la bathymétrie ..... 9
Figure 8 : Cartes réglementaires du PPRi ..... 11
Figure 9 : Vue amont de la passerelle des Lettres - à la limite de monter en charge ..... 12
Figure 10 : Quai Vallet - pas de débordements sur les quais ..... 12
Figure 11 : Vue amont du pont Carnot - à la limite de monter en charge ..... 13
Figure 12 : Passerelle des Arts – en charge ..... 13
Figure 13 : Vue du seuil Gambetta depuis le quai Keller – pas de débordement ..... 13
Figure 14 : Vue amont du pont Denfert-Rochereau – pas de débordement ..... 14
Figure 15 : Vue amont du pont Richelieu - à la limite de monter en charge ..... 14
Figure 16 : Zone inondable simulée pour la crue de 1990 – avant révision de son hydrologie .. 16
Figure 17 : Ajustement de Gumbel à la station HYDRO ..... 17
Figure 18 : Hydrogrammes de crue de 1990 testés ..... 17
Figure 19 : Profil en long de la ligne d'eau pour différentes valeurs de débit - crue de 1990 ..... 18
Figure 20 : Cartographie des zones inondables pour la simulation de la crue de 1990 ..... 19
Figure 21 : Seuil des Lettres et seuil des Arts le 7 juillet 2015 ..... 21
Figure 22 : Seuil Denfert-Rochereau et seuil Gambetta le 3 septembre 2015 ..... 21
Figure 23 : Seuil Richelieu le 3 septembre 2015 ..... 21
Figure 24 : Seuil des Arts – Rangée périodique amont en enrochement ..... 25
Figure 25 : Seuil Gambetta – Rangée périodique amont en enrochement ..... 25
Figure 26 : Seuil Richelieu – Rangée périodique amont en enrochement ..... 26
Figure 27 : Implantation d'une promenade en rive gauche sous le pont Clémenceau (EP3 et EP4) ..... 27
Figure 28 : Zones inondables pour la crue de 1990 – EP4 ..... 28
Figure 29 : Profil en long des lignes d'eau simulées en état actuel, EP0, EP3 et EP4 pour la crue de 1990 ..... 29

Figure 30 : Zoom sur le profil en long des lignes d'eau simulées en état actuel, EP0, EP3 et EP4 pour la crue de 1990 ..... 30

Figure 31 : Promenade entre le pont Clémenceau et la passerelle des lettres ..... 31

Figure 32 : Profil en long de la promenade basse (calée au niveau du module – état actuel) par rapport au terrain naturel actuel ..... 32

# Liste des tableaux

Tableau 1 : Cotes de référence calculées par modèle mathématique ..... 10

Tableau 2 : Analyse du calage du modèle en basses eaux ..... 20

Tableau 3 : Caractéristiques des seuils et de leurs déversoirs en fonction des débits simulés 22

Tableau 4 : Cotes et vitesses au niveau des ouvrages transversaux en état actuel ..... 23

Tableau 5 : Synthèse du projet d'aménagement des seuils ..... 26

Tableau 6 : Cote de la promenade rive gauche sous les ponts et passerelles ..... 27

Tableau 7 : Estimation de la section mouillée sous la cote de la crue de 1990 au droit de 5 profils en travers ..... 31

# 1. Préambule

## 1.1 Contexte

La Ville de Belfort est traversée par la Savoureuse. Ce cours d'eau est classé en liste 2 au titre de l'article L 214-17 du Code de l'Environnement. Ainsi, les six seuils présents le long de la traversée de Belfort et formant des obstacles à la circulation piscicole et au transport solides devront être mis en conformité d'ici 2017.
Dans la traversée de Belfort, la requalification de la Savoureuse et l'urbanisation de son lit majeur contraignent les projets de restauration fonctionnelle de tous les compartiments de l'hydrosystème que constituent le fond du lit de la rivière, ses berges et son lit majeur.

Des études hydrauliques, hydromorphologiques, réalisation de modèles,… sont nécessaires et indispensables pour mener à bien le rétablissement de la circulation piscicole et la diversification des habitats dans les biefs artificialisés.

## 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 à l'amont et à l'aval de l'aménagement, le secteur pris en compte pour les études hydrauliques est plus vaste : du barrage de l'Arsot jusqu'au pont de Danjoutin à l'aval, soit un linéaire de 5,5 km.

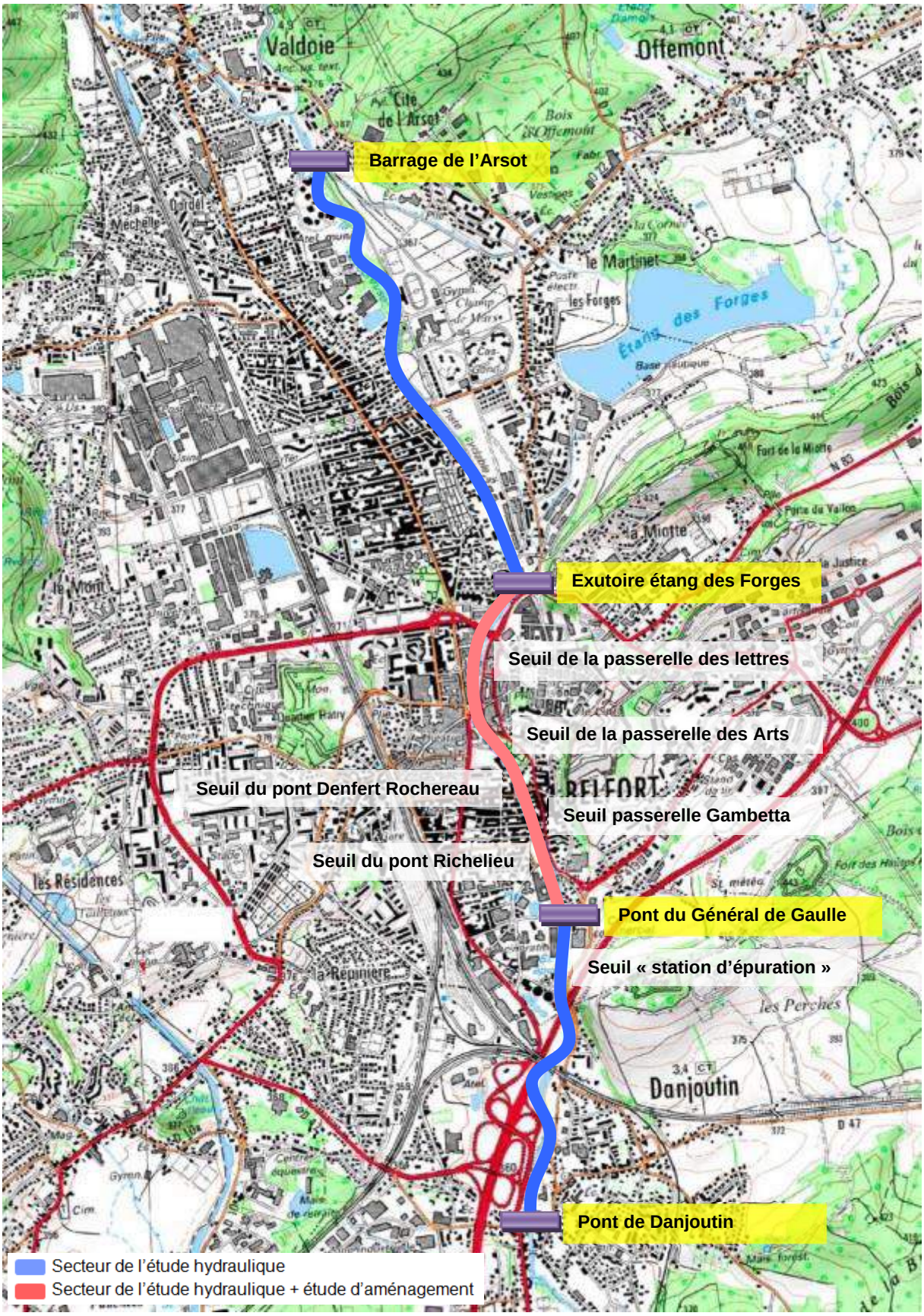



**Figure 1 : Carte du secteur d'étude et des seuils présents dans la traversée de Belfort**

## 1.3 Objet de la mission hydraulique 2

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 et de création d'une promenade rivulaire.

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 neutralité hydraulique aux crues et la continuité biologique, demande des données plus fines. Ainsi, la MH2 « Validation hydraulique de l'avant-projet » a pour objectifs :

- D'établir un modèle hydraulique 2D du lit mineur de la Savoureuse permettant de déterminer les principales caractéristiques (vitesse, hauteur d'eau, répartition des débits, forces tractrices, …) en fonction du débit,
- De valider la faisabilité hydraulique de l'avant-projet et les caractéristiques des aménagements proposés,
- D'évaluer les conditions d'exploitation des futurs aménagements.

## 1.4 Objet du rapport

Le présent document correspond au rendu de la Mission Hydraulique 2 « Validation hydraulique du projet ».

1. Révision du calage du modèle sur la crue de 1990 et mise à jour de l'état actuel,
2. Modélisation du projet sur la base de l'aménagement retenu au stade d'étude préliminaire.

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

## 2.1 Rappel des débits caractéristiques de la Savoureuse à Belfort

Le bassin versant de la Savoureuse est jaugé depuis décembre 1965. La station hydrométrique se situe à Belfort, en amont du secteur d'étude 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.

| | Débit instantané ($m^3/s$) | Remarques |
|---|---|---|
| **QMNA5 - étiage** | 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 : 356,55 mNGF IGN69 |

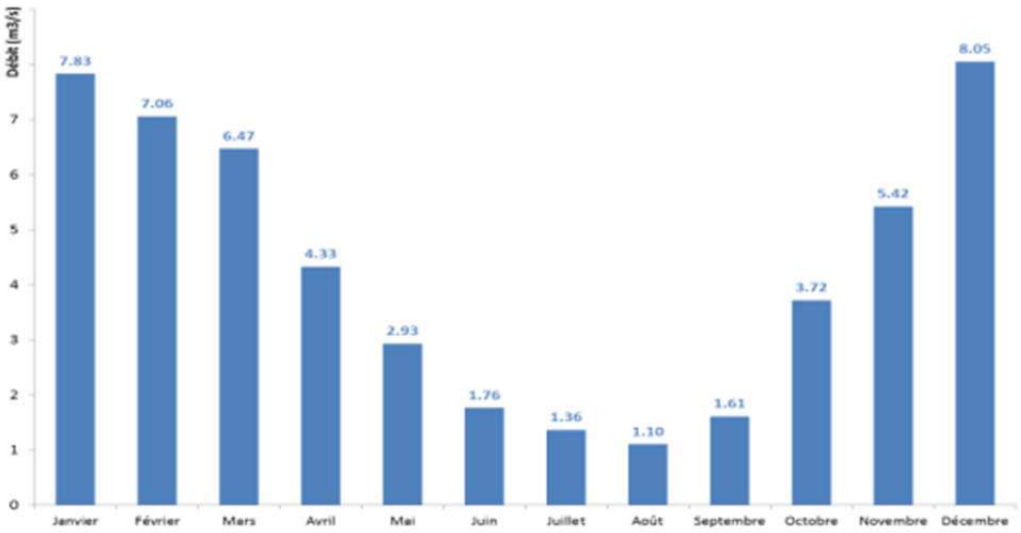



**Figure 2 : Ecoulements mensuels de la Savoureuse à Belfort**
*Source : Banque HYDRO*

Le fonctionnement hydraulique du linéaire d'étude a été étudié à travers les simulations d'une gamme étendue de débit : situation d'étiage – très basses eaux, situation normale d'écoulement – moyennes eaux, débit moyen mensuel minimum (août) – 1.10 $m^3/s$ et débit moyen mensuel maximum (décembre) – 8.05 $m^3/s$, Crues biennale et décennale ainsi que la crue historique de février 1990 – crue de calage.

## 2.2 Modélisation hydraulique de l'état actuel

### 2.2.1 Objectif

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 2 D de la rivière et des simulations de différentes conditions hydrologiques ont été réalisées dans le cadre de cette mission.

### 2.2.2 Construction du modèle 2D

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 (hauteur, vitesse, débit). Un nouveau 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 : septembre 2015). Des transects de la rivière ont été levées 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 3 : 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.

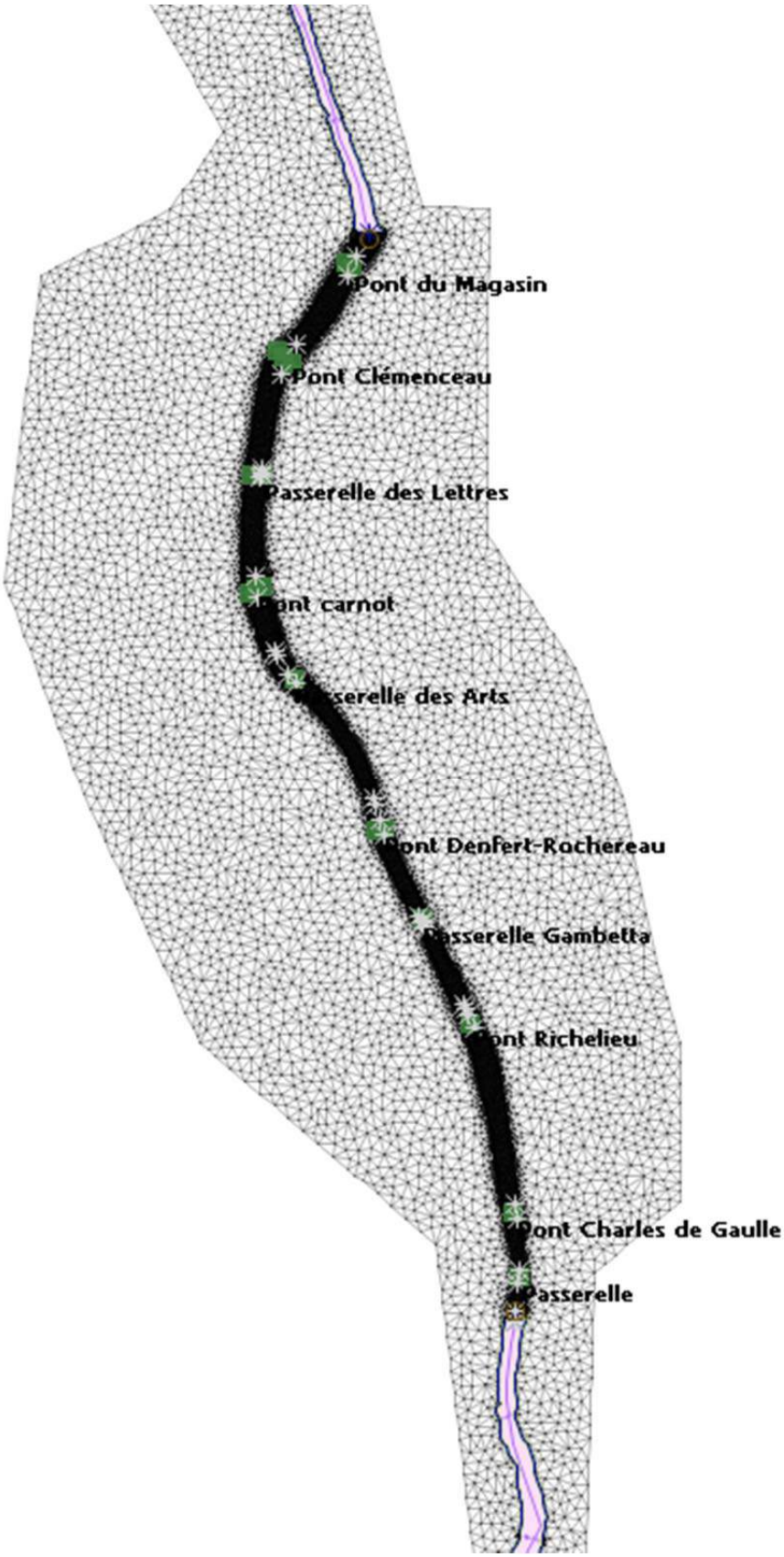



**Figure 4 : Aperçu général du modèle 2D**

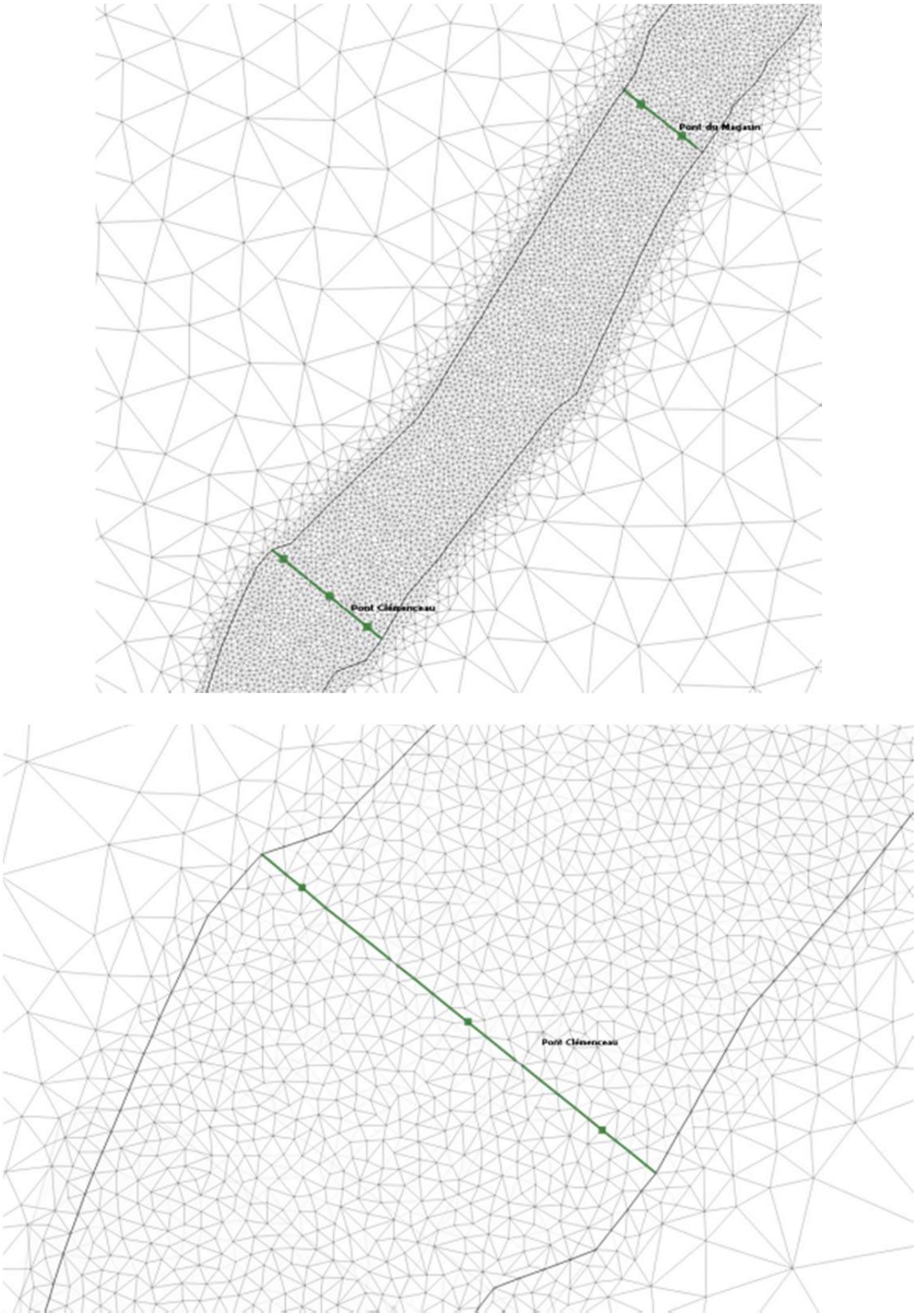



**Figure 5 : Aperçus du maillage du modèle 2D**

### 2.2.3 Analyse des données bathymétriques

Les profils en travers disponibles ayant servis à la construction du modèle 1D (cf. 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 6 : Comparaison entre la répartition spatiale des profils en travers (en rouge à g.) et des levés bathymétriques (à dr.)**

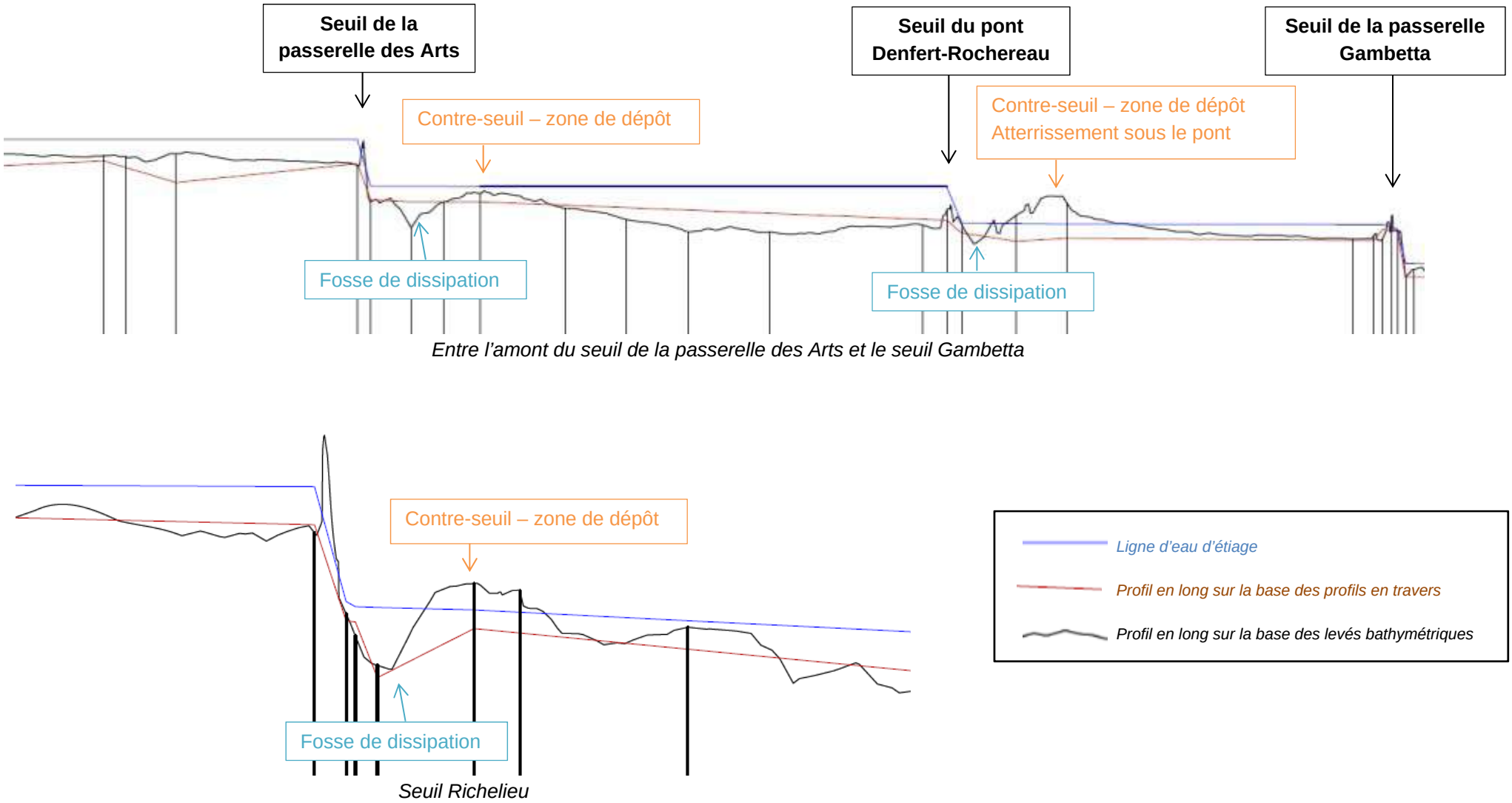



**Figure 7 : Comparaison des profils en long de la Savoureuse construit sur la base des profils en travers et de la bathymétrie**

# 2.3 Calage du modèle

## 2.3.1 Données disponibles

### 2.3.1.1 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.

La crue de 1990 ne prend pas en compte les bassins d'écrêtage que le département a réalisé.

- **Cartographie règlementaire du PPRi**

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

| 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 |

*Il est à préciser 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.*

**Tableau 1 : Cotes de référence calculées par modèle mathématique**

*Source : Annexe du PPRi*

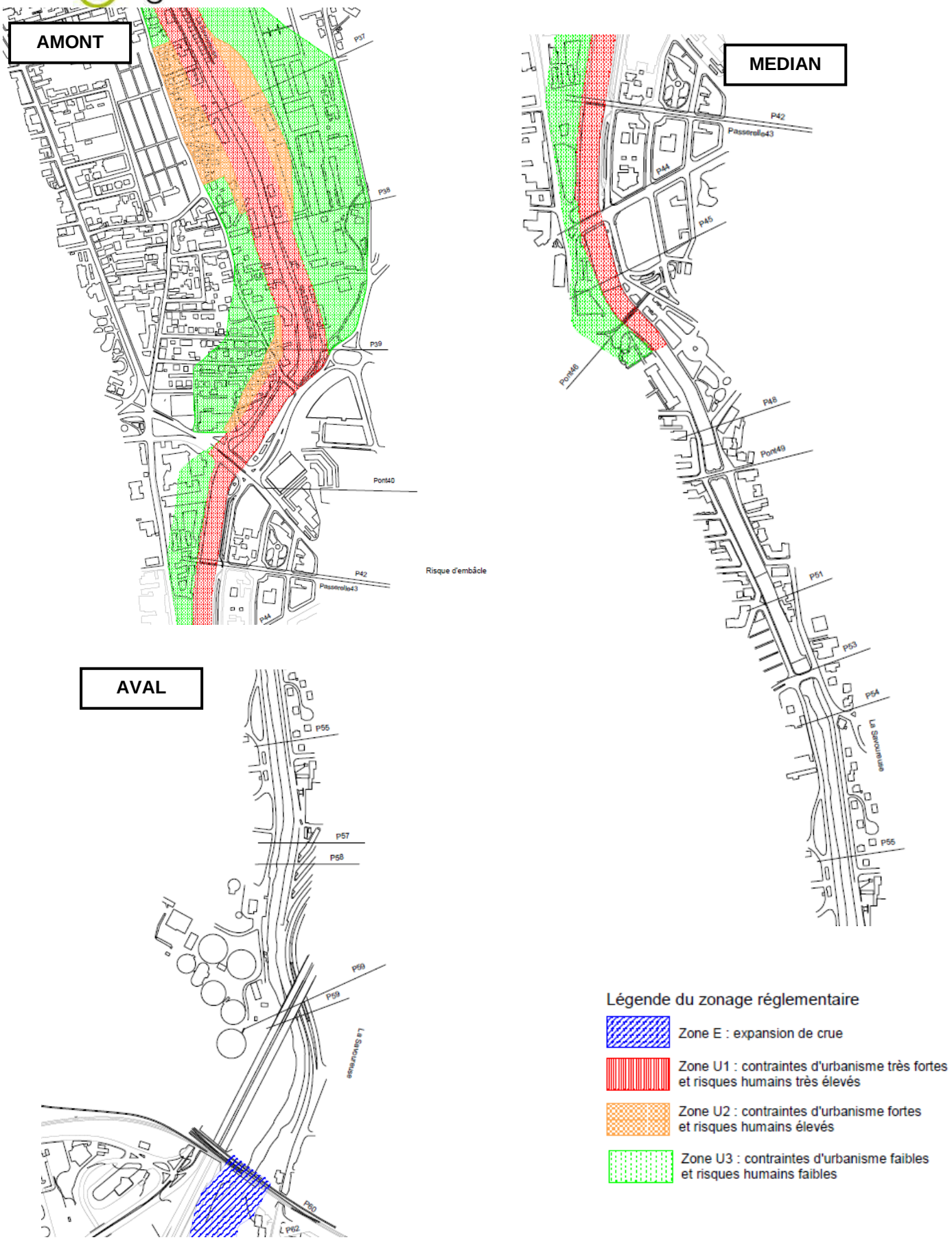



**Figure 8 : Cartes réglementaires du PPRi**

#### 2.3.1.2 Cote enregistrée à la station HYDRO

Au niveau du pont Clémenceau, le niveau d'eau maximal enregistré par la station HYDRO est 2.36 m (+356,55 mNGF, la cote du zéro de l'échelle), soit 358,91 mNGF le 15 février 1990 à 12h18.
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.

#### 2.3.1.3 Photographies de crue

Des photos ont été prises lors de la crue de 1990. Elles sont relativement explicites pour être facilement localisable. Lors des prises de vue, il est possible que le plus haut niveau de crue ne soit pas encore atteint.
Ces photos sont issues du site internet : *http://www.pbase.com/rollerboy/innondations90*.
Les figures suivantes présentent des exemples de photographies.

**Figure 9 : Vue amont de la passerelle des Lettres - à la limite de monter en charge**
*Credit photo : © Copyright Marc BERNARD*

**Figure 10 : Quai Vallet - pas de débordements sur les quais**
*Credit photo : © Copyright Marc BERNARD*

**Figure 11 : Vue amont du pont Carnot - à la limite de monter en charge**

*Credit photo : © Copyright Marc BERNARD*

**Figure 12 : Passerelle des Arts – en charge**

*Credit photo : © Copyright Marc BERNARD*

**Figure 13 : Vue du seuil Gambetta depuis le quai Keller – pas de débordement**

**Figure 14 : Vue amont du pont Denfert-Rochereau – pas de débordement**
*Credit photo : © Copyright Marc BERNARD et http://www.cancoillotte.net/spip.php?article979*

**Figure 15 : Vue amont du pont Richelieu - à la limite de monter en charge**
*Credit photo : © Copyright Marc BERNARD*

#### 2.3.1.4 Niveaux d'eau levés par le géomètre

En aout et septembre 2015, un géomètre expert a levé la bathymétrie de la rivière ainsi que certains niveaux d'eau.

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

Evènement hydrologique récent, relativement bien connu et important sur le bassin versant de la Savoureuse, la crue de février 1990 a été choisie comme crue de calage du modèle hydraulique.
Les données disponibles au niveau de la station hydrométrique située sous le pont Clémenceau ainsi que les photos de la crue ont été utilisées. Cette crue faiblement débordante a permis le calage des coefficients de Strickler du lit mineur.
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.

A noter qu'à la demande des services techniques de la ville de Belfort, étant donné les discussions en cours par les services de l'état sur l'hydrologie et les débordements de la Savoureuse sont à l'étude dans le cadre de démarches TRI et PAPI, les cotes de crue du PPRi font l'objet de discussion et n'ont pas été retenues pour le calage.
*A titre d'exemple en aval du pont Clémenceau, la banque HYDRO a enregistré une hauteur d'eau de 358,91 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 env. 1,50 m au-dessus de la cote de la crue de février 1990.*

En basses eaux, les débits calculés à la station HYDRO les jours où le géomètre a levé une cote en été 2015 ont été simulés.

### 2.3.2 Calage en hautes eaux

Le calage en hautes eaux consiste à vérifier que :

- la zone inondable observée lors de la crue de 1990 et cartographiée dans le PPRi est bien représentée
- la cote d'eau enregistrée au niveau de la station hydro implantée sur une pile du pont Clémenceau soit proche de la cote d'eau simulée.

#### 2.3.2.1 Simulation de la crue de 1990 – débit de pointe de 209 $m^3/s$

L'hydrogramme de la crue de février 1990 indiqué par la banque HYDRO au niveau de la station située sous le pont Clémenceau à Belfort (débit de pointe de 209 m3/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 appliqués :

- Lit mineur d'étiage, Ks = 30
- Berges maçonnées et quais, Ks = 60
- Lit majeur urbanisé, Ks = 15

Les résultats de simulation montrent que la zone inondable est trop étendue pour être représentative de l'épisode de crue de 1990.
Après plusieurs tests sur les variables d'ajustement (coefficients de rugosité des berges, du lit mineur et du lit majeur / coefficient de pertes de charge au niveau des ponts et des seuils), il s'est avéré qu'avec l'hydrogramme proposé par la banque HYDRO, les évènements observés ne peuvent pas être décrits fidèlement par le modèle (cf. figure suivante).

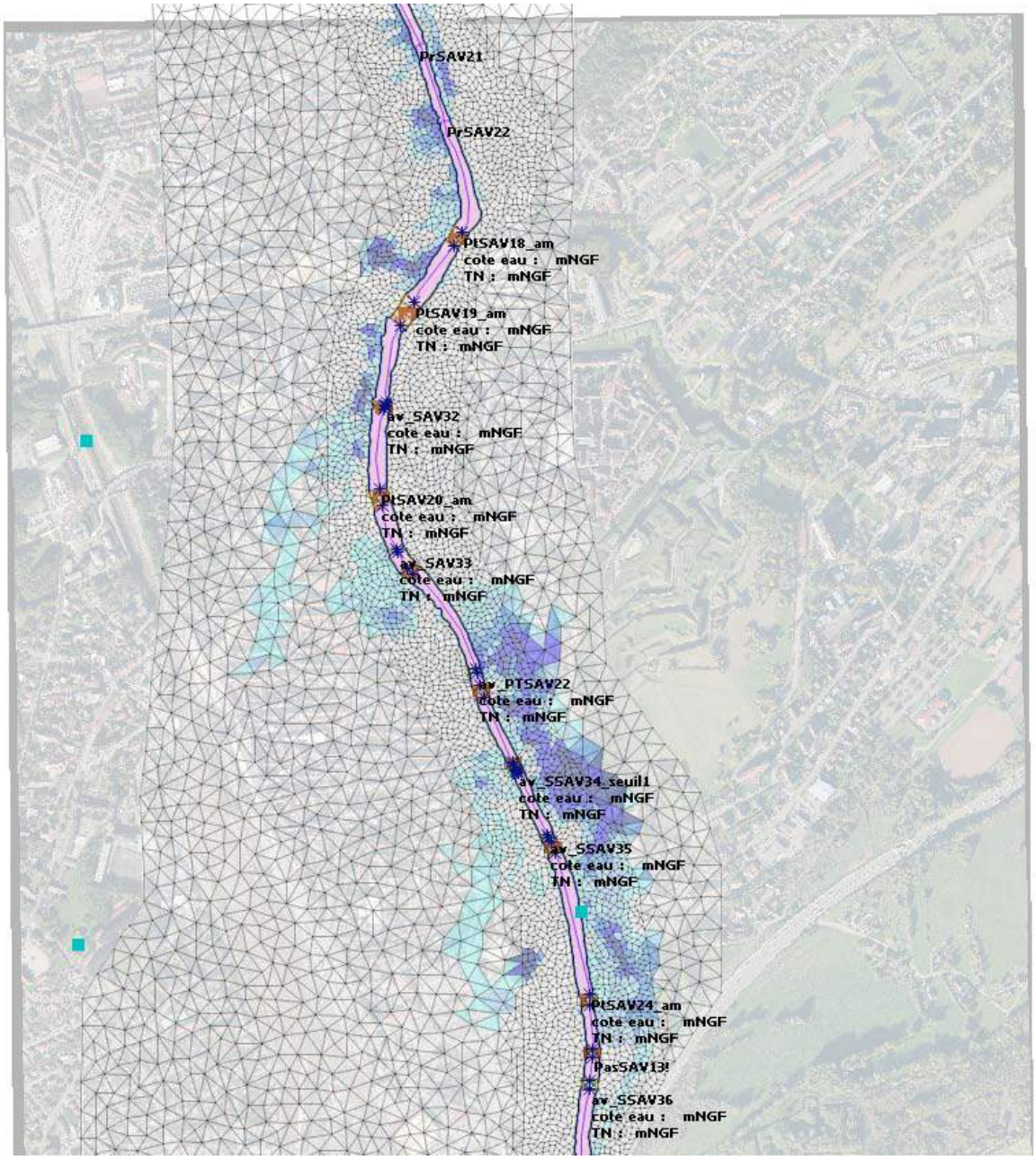



**Figure 16 : Zone inondable simulée pour la crue de 1990 – avant révision de son hydrologie**

Ainsi, étant donné l'incertitude existant sur l'estimation du débit de la crue de 1990, Egis Eau s'est fié à la cote de crue à la station HYDRO et non à l'hydrogramme de crue.

#### 2.3.2.2 Proposition de révision du débit de pointe de la crue de 1990

D'après l'ajustement statistique de la banque HYDRO, le débit de la crue de 1990 est situé sur la partie supérieure de l'intervalle de confiance calculé via la loi de Gumbel (cf. figure suivante).

D'après l'ajustement Gumbel, le débit de crue est surévalué et s'approcherait plus de 160-170 $m^3/s$ que de 209 $m^3/s$. Afin de caler le modèle sur la cote de crue enregistrée à la station, plusieurs valeurs de débit de pointe ont été considérées et simulées.

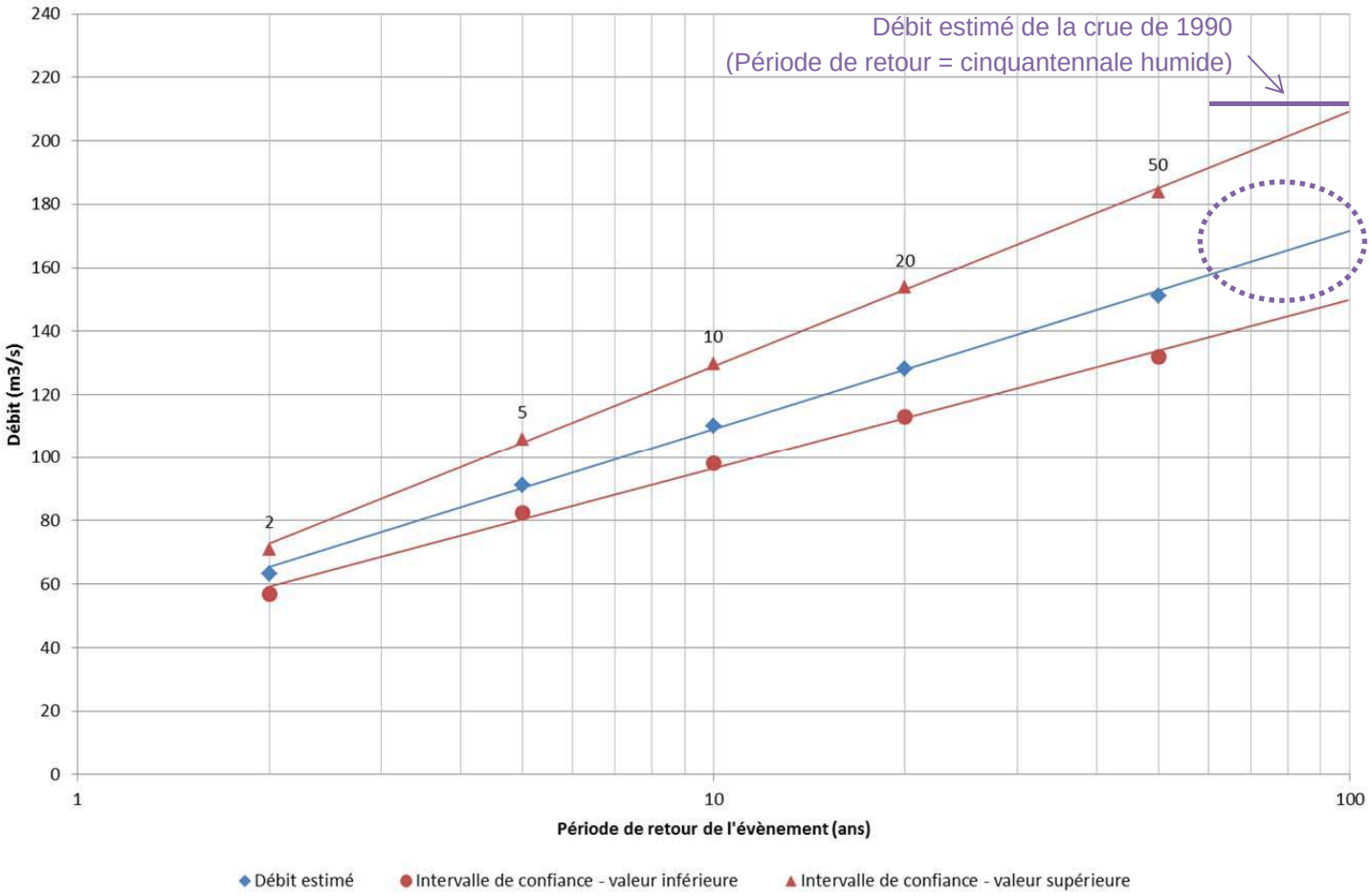



Figure 17 : Ajustement de Gumbel à la station HYDRO

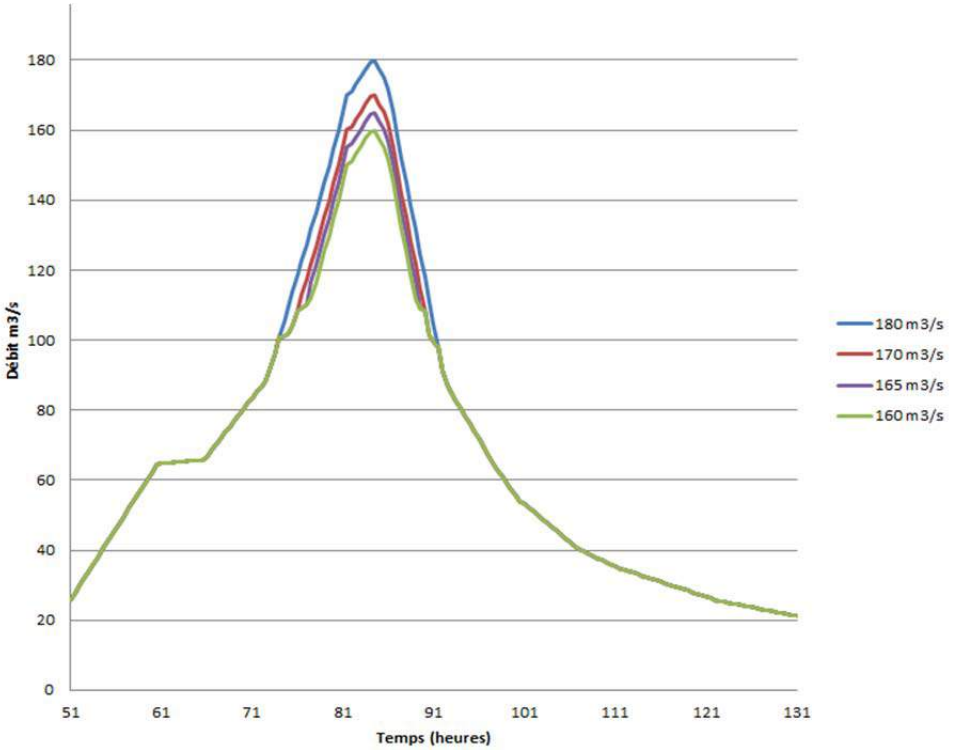



Figure 18 : Hydrogrammes de crue de 1990 testés

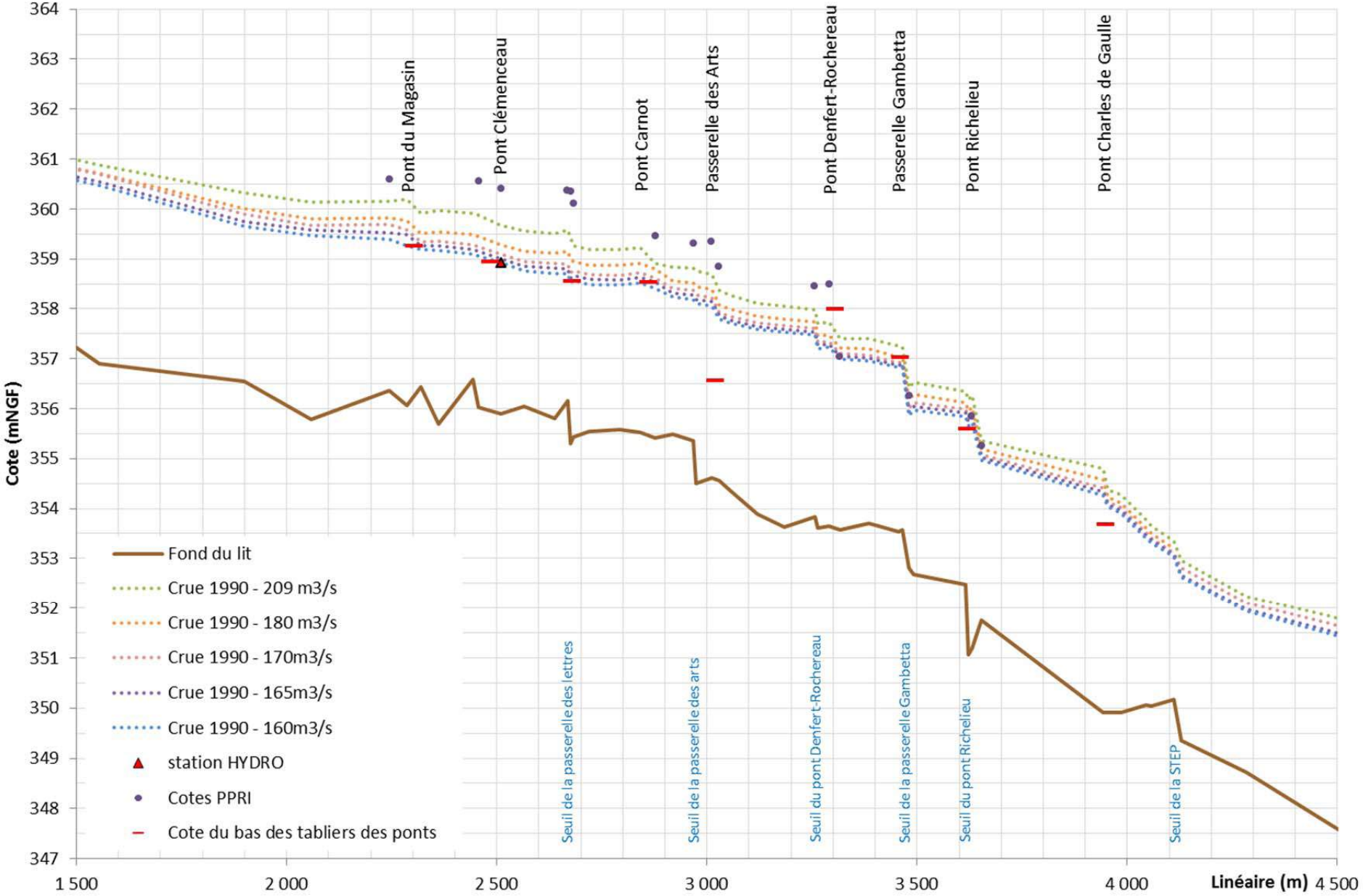



**Figure 19 : Profil en long de la ligne d'eau pour différentes valeurs de débit - crue de 1990**

**Figure 20 : Cartographie des zones inondables pour la simulation de la crue de 1990**

La valeur de 165 $m^3/s$ est celle qui se rapproche le plus des photographies de crue (ponts en charge ou non) et de la cote enregistrée à la station.

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

Au niveau du pont Clémenceau, le niveau d'eau enregistré par la station HYDRO en 1990 est 2.36 m (+356,55 mNGF la cote du zéro de l'échelle), soit 358,91 mNGF. **La cote d'eau simulée est 359.01 mNGF.**

En aval du pont Denfert-Rochereau les cotes du PPRi et celles simulées sont cohérentes. En amont du secteur d'étude, les cotes du PPRi sont bien au-dessus des cotes simulées. Au niveau de la station HYDRO, la cote du PPRi (360.37 mNGF) est env. 1.5 m au-dessus de la cote observée.

### 2.3.3 Calage en basses eaux

Le levé de la bathymétrie a été réalisé par un géomètre en août et septembre 2015, le débit de la Savoureuse était relativement bas de l'ordre de 0,17 $m^3$/s en août et 0,18 à 0,37 $m^3$/s en septembre.
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.

**Tableau 2 : 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 |

Avant de simuler les différents débits de la Savoureuse correspondant aux dates de levés des cotes du géomètre, il a fallu ajuster les cotes des déversoirs. En effet, selon la saison et le débit, les batardeaux sont supprimés ou fixés à des cotes différentes.
Afin de représenter avec le plus d'exactitude possible la cote du batardeau, les photos prises lors des réunions en juillet et septembre 2015 confrontées au plan bathymétrique ont permis de caler la cote des seuils.

**Figure 21 : Seuil des Lettres et seuil des Arts le 7 juillet 2015**

**Figure 22 : Seuil Denfert-Rochereau et seuil Gambetta le 3 septembre 2015**

**Figure 23 : Seuil Richelieu le 3 septembre 2015**

Le récapitulatif des caractéristiques de chaque seuil est consigné dans le tableau 3.

**Tableau 3 : 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 | - | - | - |

.

## 2.4 Niveaux d'eau et vitesses d'écoulement caractéristiques en état actuel

**Tableau 4 : Cotes et vitesses au niveau des ouvrages transversaux en état actuel**

| 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 | 356,74 | 357,08 | 358,21 | 358,68 | 359,48 | -0,22 | 0,09 | 0,73 | 1,47 | 1,90 | 2,30 |
| | | | | - | Aval | 356,74 | 357,06 | 358,15 | 358,61 | 359,27 | | 0,12 | 1,20 | 1,77 | 2,23 | 2,61 |
| Pont | Pont Clémenceau | | | 358,93 | Amont | 356,54 | 356,89 | 357,87 | 358,36 | 359,16 | -0,22 | 0,33 | 0,94 | 1,22 | 1,44 | 1,51 |
| | | | | - | Aval | 356,54 | 356,87 | 357,72 | 358,24 | 359,01 | | 0,08 | 0,40 | 1,66 | 1,88 | 1,93 |
| Seuil | Seuil des lettres | 356,53 | 356,43 | - | Amont | 356,51 | 356,61 | 357,35 | 357,92 | 358,80 | | 0,18 | 0,46 | 1,88 | 2,16 | 2,22 |
| Pont | Passerelle des Lettres | | | 358,55 | Amont | 355,94 | 356,12 | 356,97 | 357,66 | 358,62 | -0,07 | 0,11 | 0,23 | 1,74 | 1,91 | 1,96 |
| | | | | - | Aval | 355,95 | 356,13 | 357,08 | 357,75 | 358,67 | | 0,09 | 0,26 | 1,50 | 1,65 | 1,72 |
| Pont | Pont Carnot | | | 358,52 | Amont | 355,94 | 356,05 | 356,90 | 357,61 | 358,62 | -0,10 | 0,48 | 0,99 | 1,48 | 1,73 | 1,84 |
| | | | | - | Aval | 355,94 | 356,04 | 356,80 | 357,49 | 358,53 | | 0,08 | 0,44 | 1,85 | 2,13 | 2,67 |
| Seuil | Seuil des Arts | 355,94 | 355,84 | - | Amont | 355,94 | 356,02 | 356,69 | 357,41 | 358,28 | | 0,08 | 0,38 | 1,73 | 1,91 | 2,03 |
| | | | | - | Aval | 354,72 | 355,01 | 356,37 | 357,31 | 358,18 | | 0,27 | 0,59 | 1,03 | 1,43 | 1,71 |
| Pont | Passerelle des Arts | | | 356,56 | Amont | 354,71 | 354,96 | 356,35 | 357,27 | 358,14 | -1,58 | 0,23 | 0,81 | 1,48 | 1,50 | 1,71 |
| | | | | - | Aval | 354,71 | 354,94 | 356,33 | 357,12 | 357,86 | | 0,46 | 0,87 | 1,53 | 1,67 | 1,86 |
| Seuil | Seuil Denfert-Rochereau | 354,76 | 354,56 | - | Amont | 354,71 | 354,89 | 356,16 | 356,87 | 357,54 | | 0,10 | 0,49 | 1,61 | 2,09 | 2,52 |
| | | | | - | Aval | 354,45 | 354,74 | 355,86 | 356,49 | 357,05 | | 0,10 | 0,64 | 1,95 | 2,45 | 2,97 |
| Pont | Pont Denfert-Rochereau | | | 357,98 | Amont | 354,45 | 354,74 | 355,96 | 356,64 | 357,29 | 0,69 | 0,21 | 0,64 | 1,60 | 1,98 | 2,35 |
| | | | | - | Aval | 354,45 | 354,74 | 355,86 | 356,49 | 357,05 | | 0,10 | 0,64 | 1,95 | 2,45 | 2,97 |
| Pont | Passerelle Gambetta | | | 357,02 | Amont | 354,44 | 354,72 | 355,79 | 356,37 | 356,87 | 0,15 | 0,23 | 0,68 | 1,67 | 2,25 | 2,84 |
| | | | | - | Aval | 354,44 | 354,72 | 355,80 | 356,39 | 356,90 | | 0,04 | 0,37 | 1,66 | 2,22 | 2,77 |
| Seuil | Seuil Gambetta | 354,57 | 353,72 | - | Aval | 353,30 | 353,65 | 354,42 | 355,14 | 356,05 | | 0,26 | 1,31 | 2,45 | 2,99 | 2,85 |
| Seuil | Seuil Richelieu | 353,57 | 353,17 | - | Amont | 353,30 | 353,64 | 354,41 | 355,09 | 355,91 | | 0,06 | 0,41 | 1,77 | 2,27 | 2,59 |
| | | | | - | Aval | 351,86 | 352,14 | 353,81 | 354,83 | 355,73 | | 0,67 | 1,85 | 1,19 | 1,44 | 1,72 |
| Pont | Pont Richelieu | | | 355,59 | Amont | 351,86 | 352,14 | 353,90 | 354,90 | 355,82 | -0,23 | 0,05 | 0,52 | 1,14 | 1,52 | 1,80 |
| | | | | - | Aval | 351,82 | 352,00 | 353,45 | 354,32 | 355,02 | | 0,49 | 1,26 | 2,86 | 3,01 | 3,50 |
| Pont | Pont du Général De Gaulle | | | 353,68 | Amont | 350,43 | 350,87 | 352,67 | 353,51 | 354,34 | -0,66 | 0,22 | 1,01 | 2,12 | 2,59 | 2,92 |
| | | | | - | Aval | 350,42 | 350,85 | 352,65 | 353,44 | 354,08 | | 0,35 | 1,11 | 2,17 | 2,78 | 3,49 |

| | |
|---|---|
| 359,58 | Pont en charge |
| -0,03 | Pont en charge de moins de 0.10 m pour la crue de 1990 |

| | |
|---|---|
| 1,85 | Très forte vitesse (> 1.25 m/s) |
| 1,07 | Forte vitesse (> 1.00 m/s) |

# 3. Modélisation du projet

## 3.1 Projets simulés

### 3.1.1 Préambule

Les différents états simulés sont :

- **EA : Etat actuel**

- **EP0 : Aménagement pour le rétablissement de la continuité écologique au droit des 5 seuils transversaux** :
  - Seuil des Lettres : échancrure centrale
  - Seuil des Arts : seuil fractionné (rampe en enrochements)
  - Seuil Denfert Rochereau : arasement du seuil
  - Seuil Gambetta : seuil fractionné (rampe en enrochements)
  - Seuil Richelieu : seuil fractionné (rampe en enrochements)

- **EP3** : EP0 + **Aménagement d'une promenade dans le lit de la Savoureuse en rive gauche** de l'aval du pont du Magasin à l'amont du pont Carnot et de l'aval de la passerelle des Arts jusqu'à l'amont du pont Richelieu. *Il s'agit du projet retenu à l'issue de la réunion du 10/03/2016.*
  - Cote altimétrique de la promenade : niveau d'eau moyen interannuel (module) + 0.20 m
  - Largeur de la promenade : 3.50 m
  - Implantation d'une rampe en Z de 3.50 m de large en amont du pont Richelieu (pente de 4%, longueur d'environ 40 m pour chacune deux rampes)

- **EP4** : EP0 + **Aménagement d'une promenade dans le lit de la Savoureuse en rive gauche** de l'aval du pont du Magasin à l'amont du pont Carnot et de l'aval de la passerelle des Arts jusqu'à l'amont du pont Richelieu. *Il s'agit du projet EP3 dont la promenade basse est calée à la cote du module (et non module + 0.20 m).*
  - Cote altimétrique de la promenade : niveau d'eau moyen interannuel (module)
  - Largeur de la promenade : 3.50 m
  - Implantation d'une rampe en Z de 3.50 m de large en amont du pont Richelieu (pente de 4%, longueur d'environ 40 m pour chacune deux rampes).

### 3.1.2 Description de l'EP0 : Aménagement de la continuité écologique au droit des 5 seuils transversaux

- Seuil des Lettres : échancrure centrale

La cote actuelle de la crête du seuil des Lettres est à 356,53 m NGF. La cote a été abaissée à 355,72 m NGF sur une largeur d'environ 10 m sur le tiers central du seuil.

- Seuil des Arts : seuil fractionné (rampe en enrochements)

La crête du seuil amont des Arts est à 355,69 m NGF. Le déversoir a une cote de 354,99 m NGF. La cote intermédiaire des échancrures de part et d'autre du déversoir est à 355,29 m NGF.

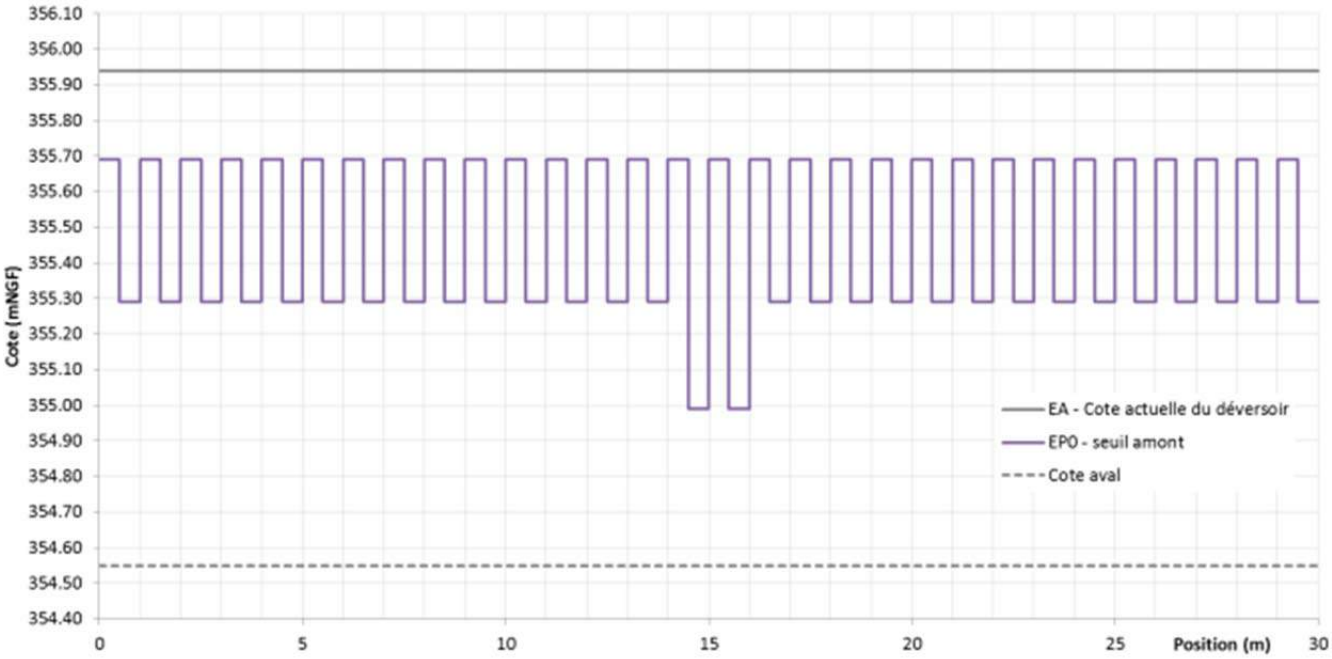



Figure 24 : Seuil des Arts – Rangée périodique amont en enrochement

- Seuil Denfert Rochereau : arasement du seuil

Le seuil est effacé. La cote du fond retenue est 354,00 m NGF.

- Seuil Gambetta : seuil fractionné (rampe en enrochements)

La crête du seuil amont de Gambetta est à la cote 354,42 m NGF. Le déversoir est à une cote de 353,72 m NGF et les cotes intermédiaires des échancrures de part et d'autres du déversoir sont à 354,02 m NGF.

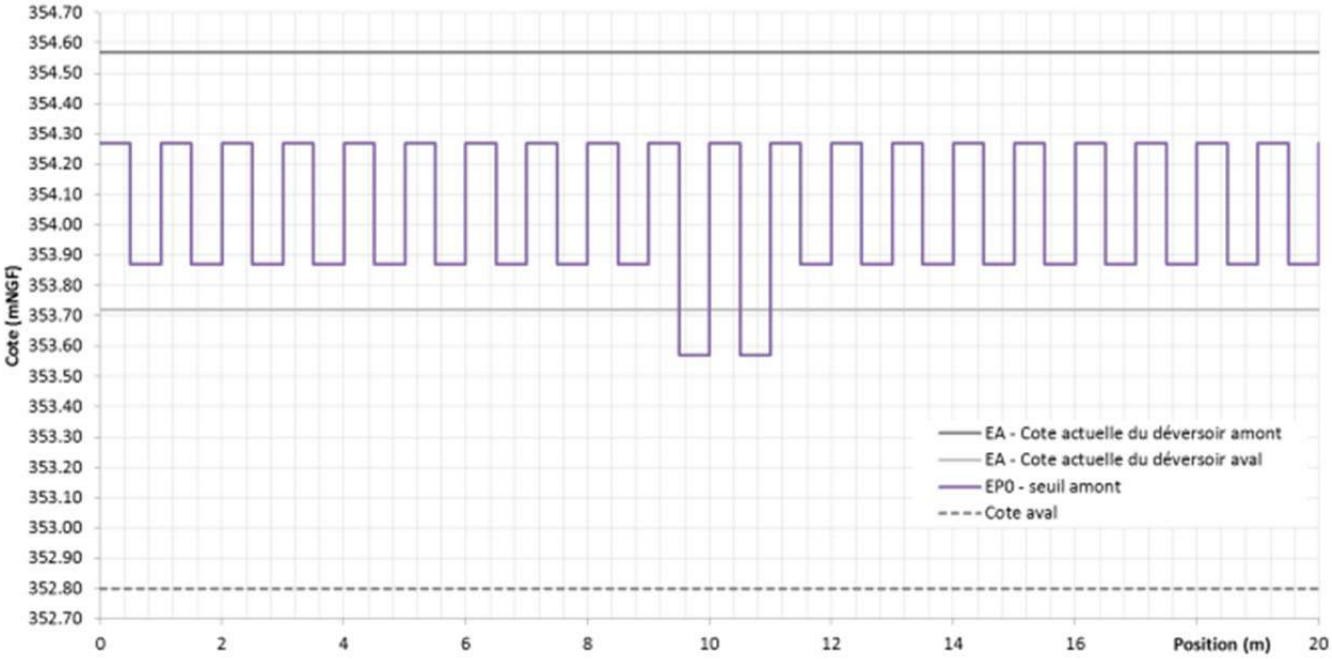



Figure 25 : Seuil Gambetta – Rangée périodique amont en enrochement

- Seuil Richelieu : seuil fractionné (rampe en enrochements)

Le seuil amont Richelieu de l'état projet EP0 est situé environ 24 m en amont du seuil actuel de Richelieu. La cote de la crête est à 353,57 m NGF. Le déversoir est à 352,87 m NGF. Les cotes intermédiaires des échancrures sont à 353,17 m NGF.

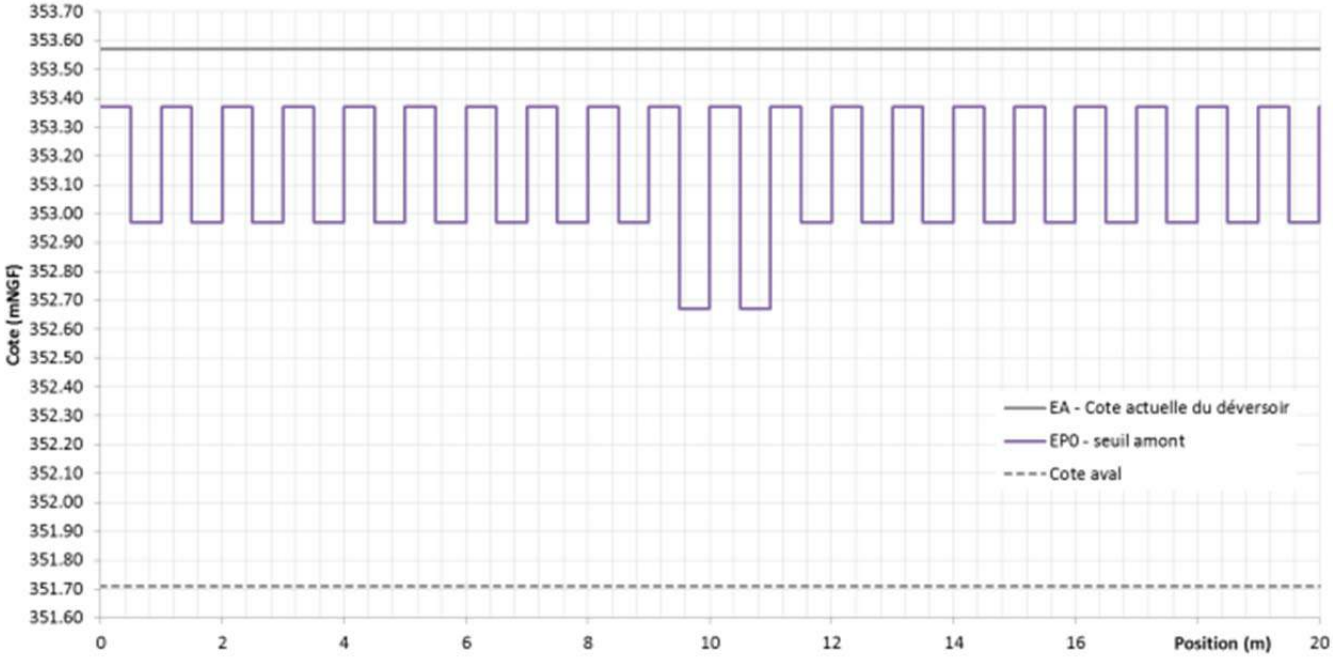



**Figure 26 : Seuil Richelieu – Rangée périodique amont en enrochement**

- Synthèse du projet d'aménagement des seuils

**Tableau 5 : Synthèse du projet d'aménagement des seuils**

| | Actuel | | Projet | |
|---|---|---|---|---|
| | Cote du seuil (m NGF) | Cote de l'échancrure (m NGF) | Cote du seuil (m NGF) | Cote de l'échancrure (m NGF) |
| Seuil des Lettres | 356,53 | 356,43 | 356,53 | 355,72 |
| Seuil des Arts | 355,94 | 355,84 | 355,69 | 354,99 |
| Seuil Denfert-Rochereau | 354,76 | 354,56 | arasé à la cote 354,00 | |
| Seuil Gambetta | 354,57 | 353,72 | 354,42 | 353,72 |
| Seuil Richelieu | 353,57 | 353,17 | 353,37 | 352,67 |

### 3.1.4 Implantation de la promenade basse – EP3 et EP4

L'altimétrie de la promenade a été calée au niveau de la ligne d'eau moyenne simulée dans la Savoureuse lorsque la continuité écologique au niveau des seuils aura été aménagée plus 20 cm environ de revanche pour EP3 (cote du module de l'EP0 + 0.20 m) et sans revanche pour EP4 (cote module de l'EP0). Un récapitulatif des cotes de la promenade sous les arches est présenté dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 6 : Cote de la promenade rive gauche sous les ponts et passerelles**

| Dénomination | Cote de la promenade - EP3* (m NGF) | Cote de la promenade – EP4* (m NGF) | Cote basse du tablier du pont (m NGF) | Tirant d'air sous le pont pour EP3 (m) | Tirant d'air sous le pont pour EP4 (m) |
|---|---|---|---|---|---|
| Pont du Magasin | pas de promenade | pas de promenade | 359,26 | - | - |
| Pont Clémenceau | *357,08* | *356,88* | 358,98 | 1,90 | 2,10 |
| Passerelle des Lettres | *356,25* | *356,05* | 358,55 | 2,30 | 2,50 |
| Pont Carnot | *pas de promenade* | *pas de promenade* | 357,87 | - | - |
| Passerelle des Arts | 355,51** | 355,51** | 356,56 | - | - |
| Pont Denfert-Rochereau | *354,65* | *354,45* | 357,50 | 2,85 | 3,05 |
| Passerelle Gambetta | 354,46 | 354,26 | 356,76 | 2,30 | 2,50 |
| Pont Richelieu | pas de promenade | pas de promenade | 356,00 | - | - |
| Pont du Général De Gaulle | pas de promenade | pas de promenade | - | - | - |

** cette cote est issue du pré-dimensionnement hydraulique afin de vérifier la faisabilité du projet. Elle sera revue lors de la prise en compte de ces éléments dans le dimensionnement technique de la promenade (pente douce et régulière, mise en place de mur digue pour gagner du tirant d'air sous les ponts, dimensionnement détaillé des accès, …).*

*** La cote est similaire pour EP3 et EP4 car il s'agit de la cote de l'atterrissement situé sous la passerelle des Arts. La cote de la promenade est inférieure à l'atterrissement.*

Le tirant d'air est limité sous les ponts Clémenceau et Carnot ainsi que sous la passerelle des Arts.

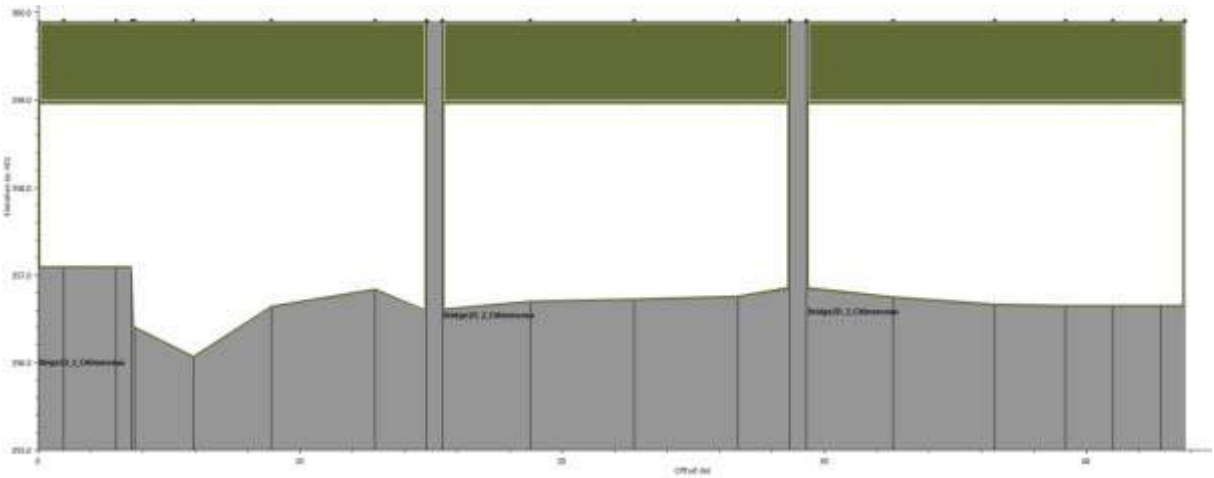


**Figure 27 : Implantation d'une promenade en rive gauche sous le pont Clémenceau (EP3 et EP4)**

## 3.2 Incidence des projets EP0, EP3 et EP4

### 3.2.1 Incidence hydraulique

Le premier élément à vérifier pour que le projet soit acceptable hydrauliquement est la neutralité des aménagements vis-à-vis du risque inondation par débordement de la Savoureuse.

Les figures suivantes présentent :

- l'étendue de la zone inondable pour la crue historique de référence (crue 1990),
- les lignes d'eau simulées pour différentes situations hydrologiques.

Il est ainsi vérifié que les projets EP3 et EP4 n'aggravent pas l'exposition des belfortains au risque inondation.

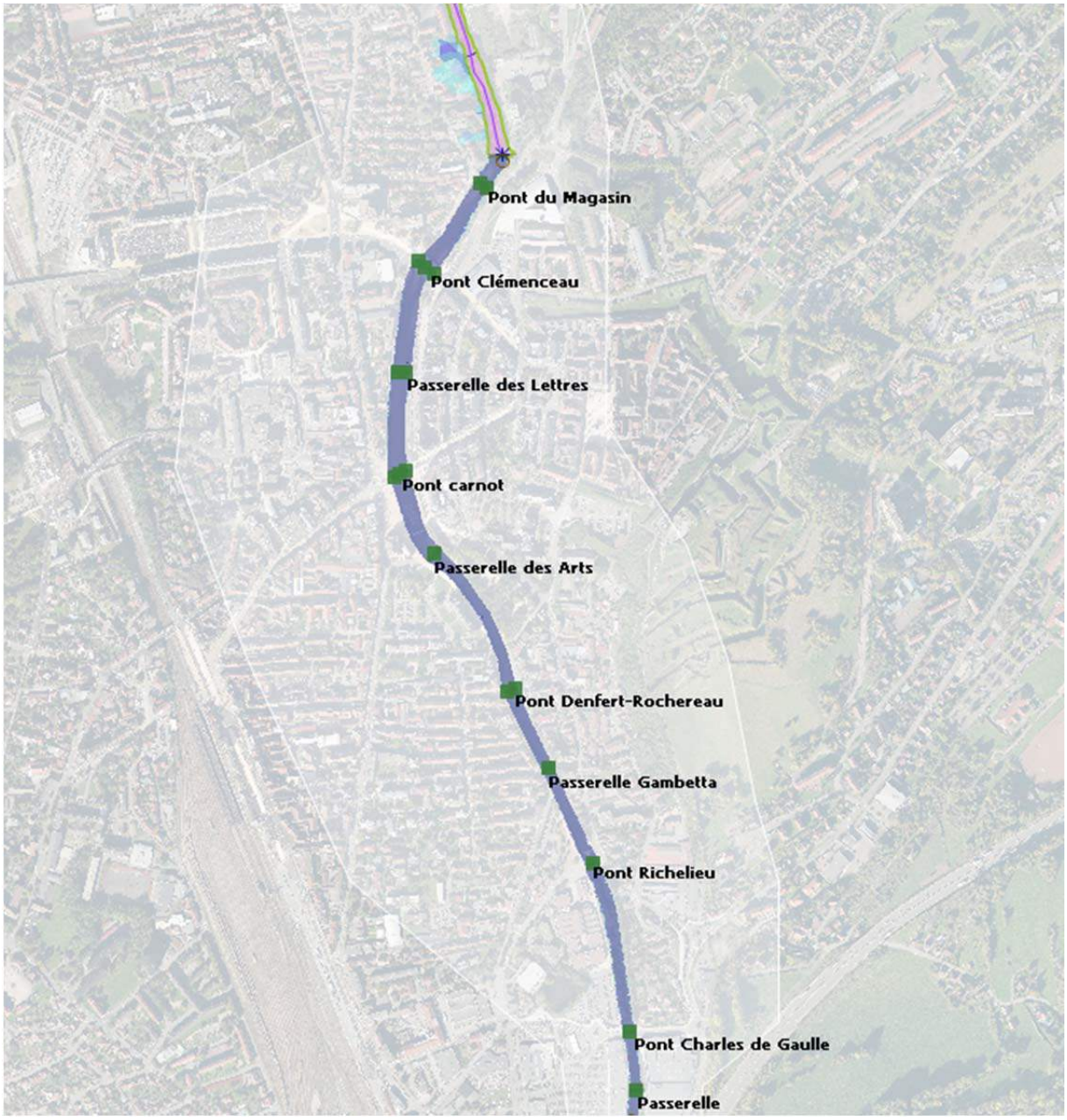



Figure 28 : Zones inondables pour la crue de 1990 – EP4

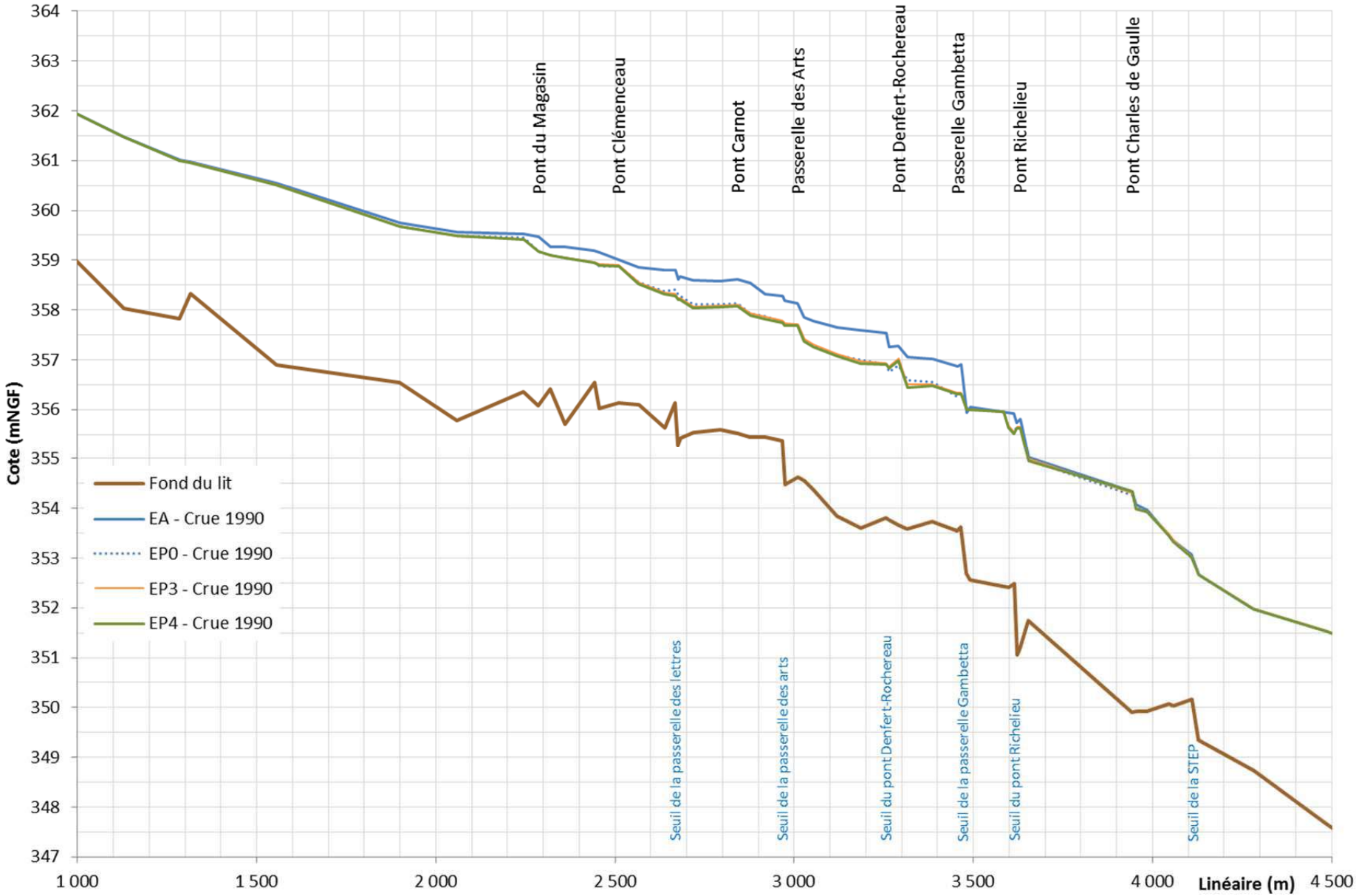



**Figure 29 : Profil en long des lignes d'eau simulées en état actuel, EP0, EP3 et EP4 pour la crue de 1990**

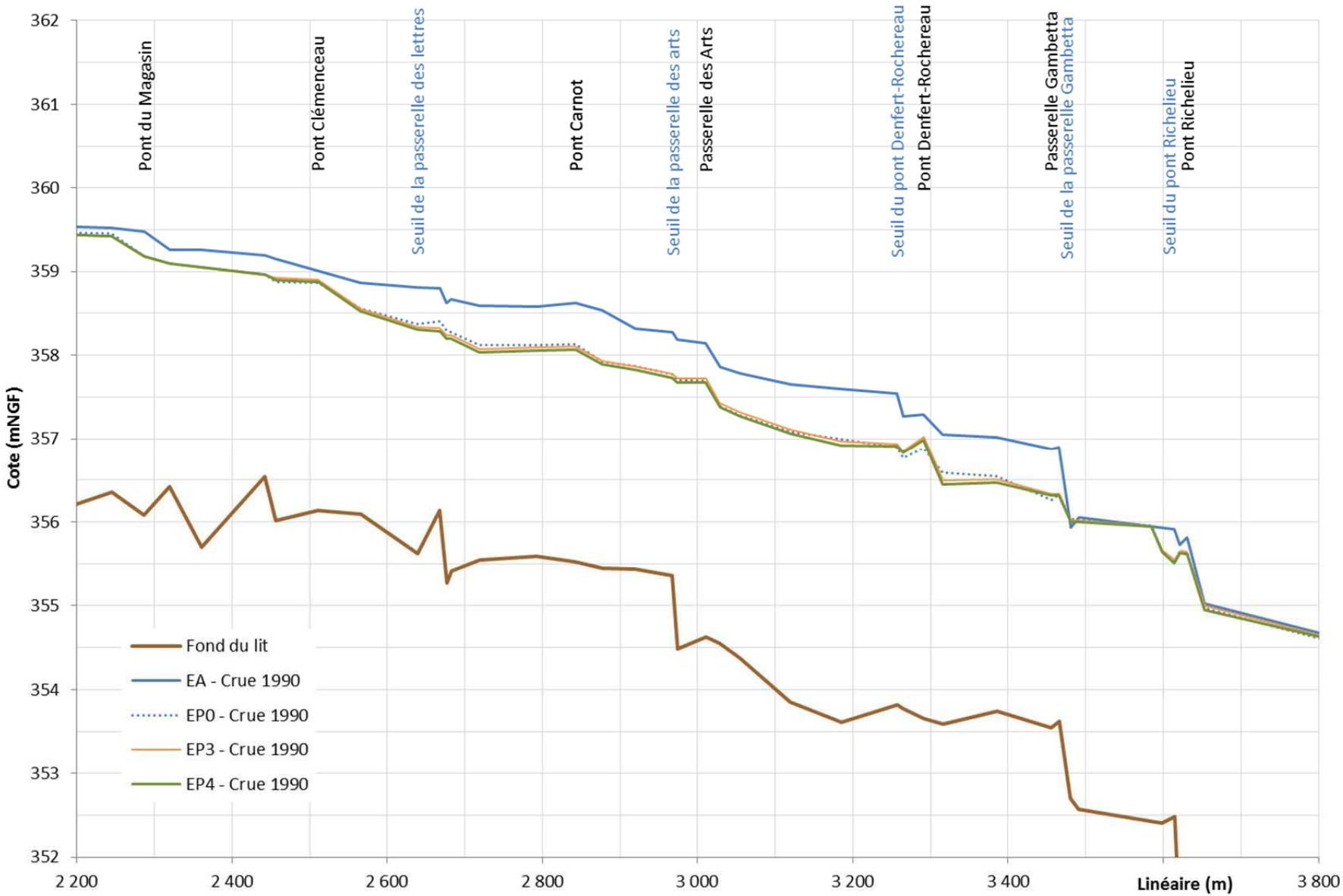



**Figure 30 : Zoom sur le profil en long des lignes d'eau simulées en état actuel, EP0, EP3 et EP4 pour la crue de 1990**

La différence de ligne d'eau entre EP0 et EP3 s'explique par la présence d'atterrissement en rive gauche du lit mineur entre le pont Clémenceau et le seuil des Lettres. Afin d'implanter la promenade basse, il a fallu ponctuellement araser (diminuer la cote) des dépôts en rivière.

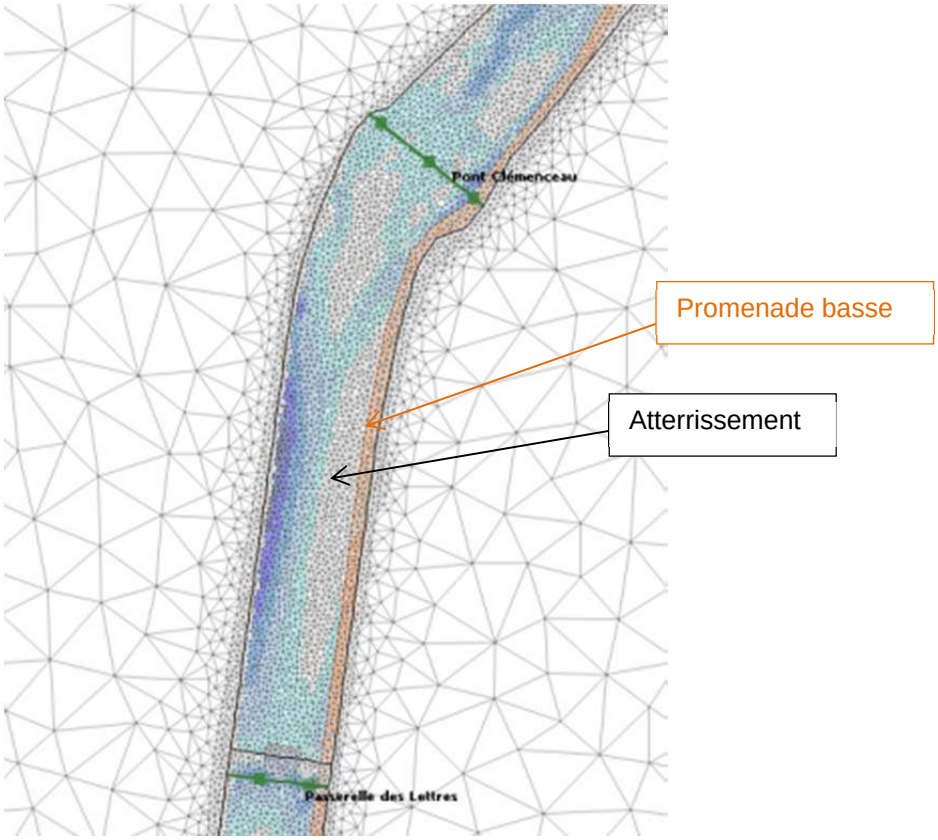



Figure 31 : Promenade entre le pont Clémenceau et la passerelle des lettres

### 3.2.2 Calcul de la restriction de section mouillée due au projet

Un calcul de la section mouillée en état actuel (EA) et les projets (EP3 – calé au module +20 cm / EP4 – calé au module) a été réalisé de manière à quantifier l'incidence du projet.
La section mouillée au droit de 5 profils en travers a été déterminée sous la cote de la crue de 1990 en état actuel.

Tableau 7 : Estimation de la section mouillée sous la cote de la crue de 1990 au droit de 5 profils en travers

| Localisation du profil en travers | EA (m²) | EP3 (m²) | Différence EA / EP3 (%) | EP4 (m²) | Différence EA / EP4 (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| En amont du Pont Clémenceau | 86.01 | 82.52 | -4.1% | 82.82 | -3.7% |
| En amont de la passerelle des Lettres | 79.48 | 76.97 | -3.2% | 77.57 | -2.4% |
| Entre la passerelle des Arts et le pont Denfert-Rochereau | 76.30 | 73.94 | -3.1% | 74.54 | -2.3% |
| Entre le pont Denfert-Rochereau et la passerelle Gambetta | 70.21 | 68.65 | -2.2% | 68.95 | -1.8% |
| Entre la passerelle Gambetta et le pont Richelieu | 72.23 | 68.58 | -5.1% | 69.18 | -4.2% |

La restriction de section est la plus contraignante à l'endroit où la rivière est la plus étroite, entre la passerelle Gambetta et le pont Richelieu.

### 3.2.3 Altimétrie de la promenade

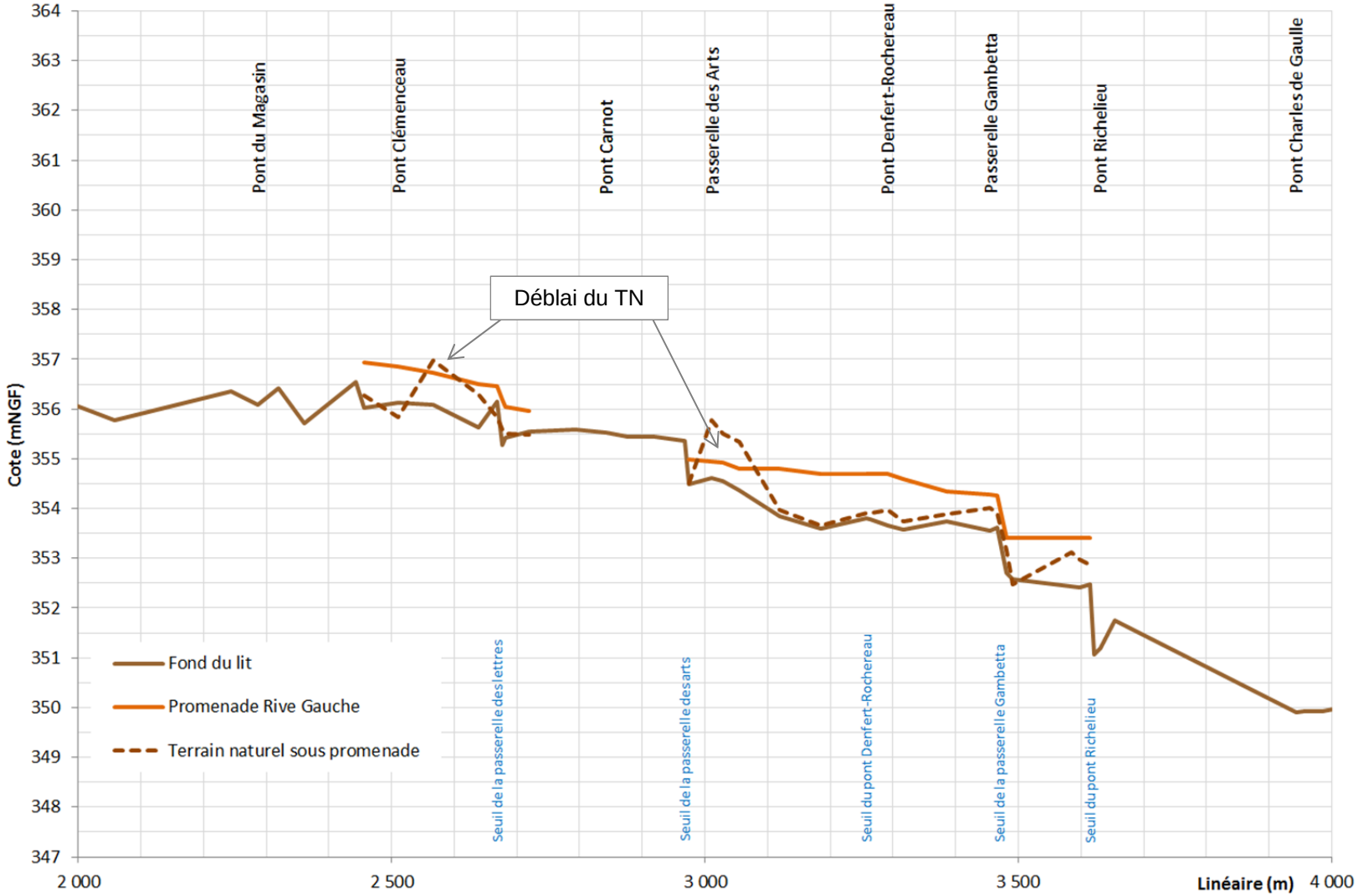



**Figure 32 : Profil en long de la promenade basse (EP4 calée au niveau du module – état actuel) par rapport au terrain naturel actuel**

# 4. 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. A ce stade d'esquisse des aménagements, son incidence a été appréhendée :

- L'aménagement des seuils transversaux contribue à diminuer les hauteurs d'eau.
- Le projet de promenade dans le lit de la rivière induit une restriction de la section d'écoulement et donc un rehaussement localisé des niveaux d'eau et une nouvelle répartition des débits dans les passes des ponts (exemple : Ponts du magasin, Clémenceau, Carnot et Denfert-Rochereau).

Ainsi, au niveau de la ligne d'eau en période de crue, les différents éléments du projet ont tendance à s'équilibrer hydrauliquement. D'un point de vue hydraulique, il est important de garder à l'esprit que l'aménagement d'un cheminement dans le lit de la Savoureuse n'est acceptable uniquement s'il est couplé à l'aménagement des seuils transversaux.

Le projet d'implantation d'une promenade en rive gauche uniquement avec une limite aval au niveau du pont Richelieu a été retenu. Deux scenarios d'aménagement de promenade dans le lit de la Savoureuse ont été appréhendés dans cette phase d'étude : ils diffèrent par le calage altimétrique de la promenade.

Suite aux simulations, 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. La restriction de section mouillée induite par l'implantation de la promenade basse est inférieure à 5%.

Une fois le modèle validé, notamment pour la crue de référence, l'incidence plus détaillée du projet sera étudiée : insertion des gradins et amphithéâtre, étude de submersion, renaturation des biefs en amont des seuils transversaux (diversification du lit), mise en place éventuelle de confortements de piles de pont, … afin de caler son dimensionnement et de confirmer son incidence positive en crue.