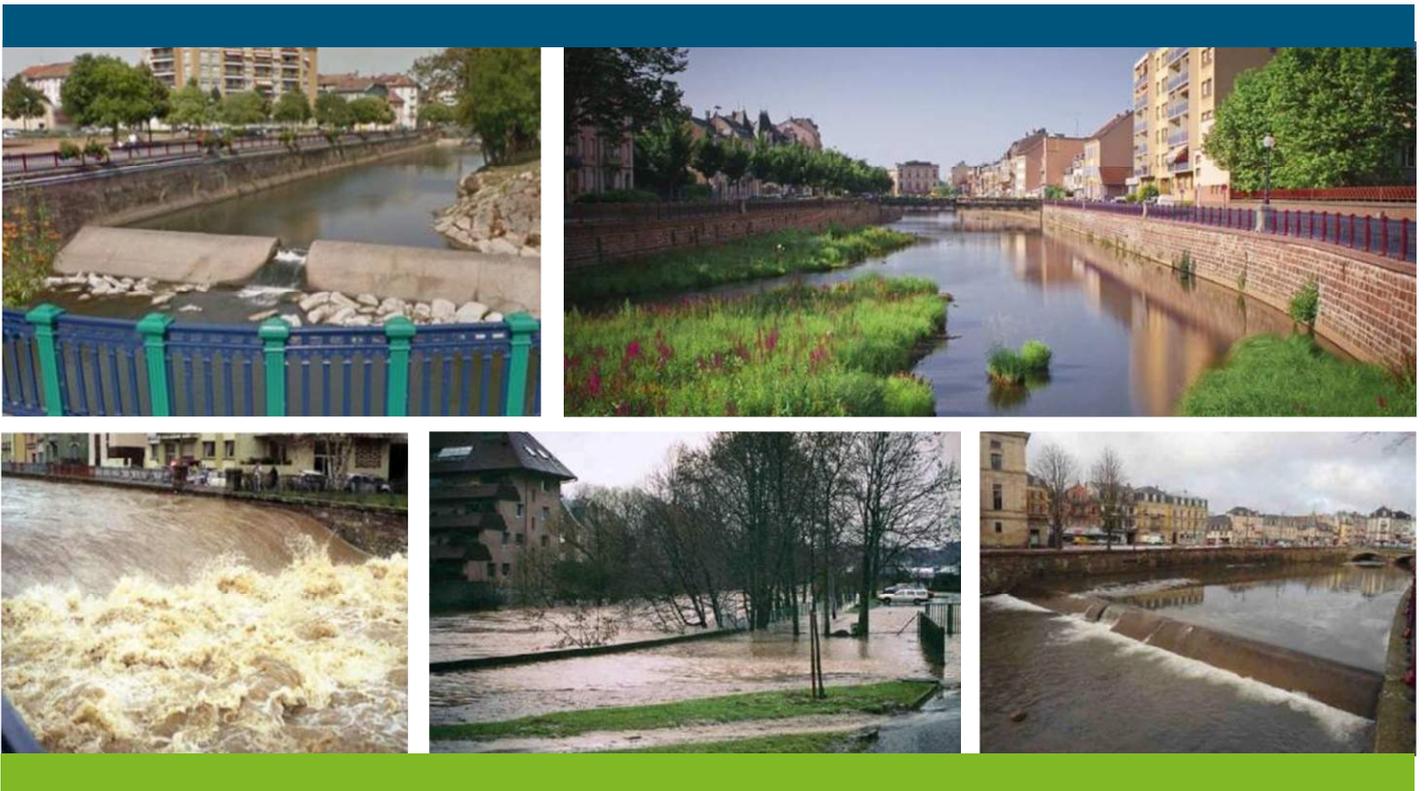




Aménagement de la promenade des berges de la Savoureuse

MISSION HYDRAULIQUE 1 – Etude hydraulique préalable

Version 1



FLG 42333D

Décembre 2015

Informations qualité

Contrôle qualité

Version	Date	Rédigé par	Visé par :
Version 0	Octobre 2015	Soizic Heuzé et Delphine Pavard Egis Eau Ingénierie Etudes et Travaux Fluviaux 15, Avenue du Centre CS 20538 Guyancourt 78286 Saint-Quentin-en-Yvelines Cedex soizic.heuze@egis.fr	Rémy Croix - Egis Eau
Version 1	Décembre 2015	Soizic Heuzé - Egis Eau	Rémy Croix - Egis Eau

Destinataires

Envoyé à :		
Nom	Organisme	Envoyé le :
F. BINOUX-REMY G. GANDON C. SILVESTRE	VILLE DE BELFORT Hôtel de Ville et de la Communauté d'Agglomération Place d'Armes 90 020 Belfort Cedex	Décembre 2015

Table des matières

1. Préambule	1
1.1 Contexte	1
1.2 Périmètre d'étude.....	1
1.3 Objet de la mission hydraulique 1	3
1.4 Objet du rapport.....	3
2. Présentation générale du bassin versant de la Savoureuse.....	4
2.1 Présentation du bassin.....	4
2.2 Réseau hydrographique	4
3. Fonctionnement hydraulique du secteur d'étude	5
3.1 Hydrologie du bassin versant.....	5
3.1.1 Débits caractéristiques	5
3.1.2 Les crues	6
3.1.2.1 Historique des crues et inondations.....	6
3.1.2.2 Types de crue du bassin versant de la Savoureuse	7
3.2 Modélisation hydraulique.....	8
3.2.1 Objectif.....	8
3.2.2 Tracé du cours d'eau et singularités hydrauliques.....	8
3.2.3 Construction du modèle 1D/2D	9
3.2.4 Calage du modèle	10
3.2.5 Conditions actuelles d'écoulement de la Savoureuse dans la traversée de Belfort	20
4. Diagnostic hydromorphologique	26
4.1 Préambule	26
4.2 Tracé en plan.....	26
4.3 Profil en long du linéaire étudié.....	27
4.4 Profils en travers de la Savoureuse.....	30
4.5 Faciès d'écoulement.....	32
4.6 Substrat et transport solide	33
5. Identification des contraintes hydrauliques d'aménagement.....	48

5.1	Plan de Prévention des risques d’Inondation de la Savoureuse, du Rhône et de la Rosemontoise	48
5.1.1	Prescription et arrêté	48
5.1.2	Crue de référence	48
5.1.3	Cartographie règlementaire du PPRI	48
5.1.4	Règlement du PPRI	51
5.2	Contraintes hydrauliques	53

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.....	5
Figure 3 : Chronique des crues annuelles enregistrées depuis 50 ans	6
Figure 4 : Ajustement statistique des débits de crues annuelles et intervalle de confiance à 95% – loi de Gumbel.....	7
Figure 5 : Débits caractéristiques des crues à la station et intervalle de confiance à 95%	7
Figure 6 : Aperçu du modèle 1D / 2D.....	9
Figure 7 : Représentation schématique en coupe d'un seuil bien profilé et de la lame d'eau déversante en période normale d'écoulement.....	10
Figure 8 : Zone inondable simulée pour la crue de 1990 – avant révision de son hydrologie....	11
Figure 9 : Hydrogramme de la crue du 15 février 1990	12
Figure 10 : Parking de l'hôtel Altea - inondé	13
Figure 11 : Vue amont de la passerelle des Lettres - à la limite de monter en charge	13
Figure 12 : Quai Vallet - pas de débordements sur les quais	14
Figure 13 : Vue amont du pont Carnot - à la limite de monter en charge.....	15
Figure 14 : Passerelle des Arts – en charge	16
Figure 15 : Vue amont du pont Denfert-Rochereau – pas de débordement.....	17
Figure 16 : Vue amont du pont Richelieu - à la limite de monter en charge	18
Figure 17 : Zone inondable simulée pour la crue de février 1990	19
Figure 18 : Vue du seuil Gambetta depuis le quai Keller – pas de débordement.....	20
Figure 19 : Profil en long des lignes d'eau caractéristiques sur la Savoureuse	21
Figure 20 : Profil en long des lignes d'eau caractéristiques sur la Savoureuse – test d'effacement des seuils	22
Figure 21 : Différence de hauteur d'eau entre la situation actuelle des seuils et une situation où les seuils sont effacés	23
Figure 22 : Profil en long des vitesses caractéristiques d'écoulement sur la Savoureuse	24
Figure 23 : Cartes géologique et du relief du secteur d'étude	26
Figure 24 : Photographies du barrage d'Arsot.....	27
Figure 25 : Profil en long théorique de l'implantation d'un seuil transversal à l'écoulement.....	27
Figure 26 : Profil en long de la Savoureuse sur 14 Km	28
Figure 27 : Profil en long de la Savoureuse dans la traversée de Belfort	29
Figure 28 : Evolution du profil en travers de la Savoureuse sur le périmètre d'étude	30
Figure 29 : Aperçu du cours d'eau en amont du pont du Magasin	30

Figure 30 : Profil en travers artificialisé en centre-ville.....	31
Figure 31 : Profil en travers en aval du pont Richelieu	31
Figure 32 : Profil en travers en aval du pont Charles De Gaulle	32
Figure 33 : En amont du pont Richelieu – plat lentique	32
Figure 34 : En aval du pont Richelieu – zone de radiers.....	32
Figure 35 : Fondement de l'équilibre de la dynamique fluviale (d'après Lane, 1955)	33
Figure 36 : Les variables de contrôle secondaires de la dynamique fluviale.....	34
Figure 37 : Modes de transport solide en rivière	35
Figure 38 : Atterrissement sous le pont du Magasin.....	37
Figure 39 : Atterrissement en amont du pont Clémenceau	37
Figure 40 : Atterrissements en aval du pont Clémenceau	37
Figure 41 : Mise en mouvement des sédiments dans les conditions normales d'écoulement ..	38
Figure 42 : Mise en mouvement des sédiments dans les conditions d'écoulement en crue biennale	39
Figure 43 : Mise en mouvement des sédiments dans les conditions de la crue caractéristiques de période de retour 10 ans.....	40
Figure 44 Mise en mouvement des sédiments dans les conditions de la crue de 1990.....	41
Figure 45 : Présence d'exhaussement dans le lit de la Savoureuse en amont du seuil de la passerelle des Lettres.....	42
Figure 46 : Présence de quelques blocs et atterrissement caillouteux en aval du seuil des Lettres.....	42
Figure 47 : Pont Carnot – absence d'atterrissement	42
Figure 48 : Présence de blocs, cailloux et atterrissements en aval immédiat du seuil de la passerelle des Arts.....	43
Figure 49 : Entre le seuil du pont Denfert-Rochereau et le seuil Gambetta.....	43
Figure 50 : Présence de trace d'érosion de berges entre les seuils Gambetta et Richelieu.....	43
Figure 51 : Blocs charriés en aval immédiat du seuil Richelieu	44
Figure 52 : Présence d'atterrissements arborés en aval du pont Richelieu	44
Figure 53 : Vues aériennes de 1949, 1980, 2003 et 2013	45
Figure 54 : Synthèse sur la dynamique sédimentaire de la Savoureuse dans la traversée de Belfort	46
Figure 55 : Formulation de calcul l'affouillement généralisé selon Ramette.....	47
Figure 56 : Carte réglementaire du PPRi.....	49

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des singularités hydrauliques présentes dans le périmètre rapproché du projet.....	8
Tableau 2 : Quelques ordres de grandeur du coefficient de Strickler	10
Tableau 3 : Résultats au niveau des ouvrages transversaux des simulations hydrauliques	25
Tableau 4 : Débit capable des ouvrages d'art	25
Tableau 5 : Calcul de la puissance spécifique de la Savoureuse dans la traversée de Belfort..	34
Tableau 6 : Classification pratique de la mobilité d'un grain (Ramette, 1981).....	35
Tableau 7 : Echantillons granulométriques.....	36
Tableau 8 : Calcul de l'affouillement généralisé au niveau des ponts à enjeux – état actuel	47
Tableau 9 : Cotes de référence calculées par modèle mathématique	50

Acronymes et abréviations

D	Diamètre moyen des grains
H	Hauteur d'eau (m) ou cote d'eau (mNGF)
Ks	Coefficient de Strickler traduisant la rugosité du lit de la rivière
Module	Débit moyen interannuel (m ³ /s)
NGF	Nivellement Général de France
Q	Débit de la rivière (m ³ /s)
Q2	Débit de crue biennale - débit maximal se produisant en moyenne une fois tous les deux ans (m ³ /s)
Q10	Débit de crue décennale - débit maximal se produisant en moyenne une fois tous les dix ans (m ³ /s)
QMNA5	Débit mensuel quinquennal sec – débit minimum se produisant en moyenne une fois tous les cinq ans (m ³ /s)
v	Vitesse moyenne d'écoulement (m/s)

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 donc 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 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 du réaménagement, 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.

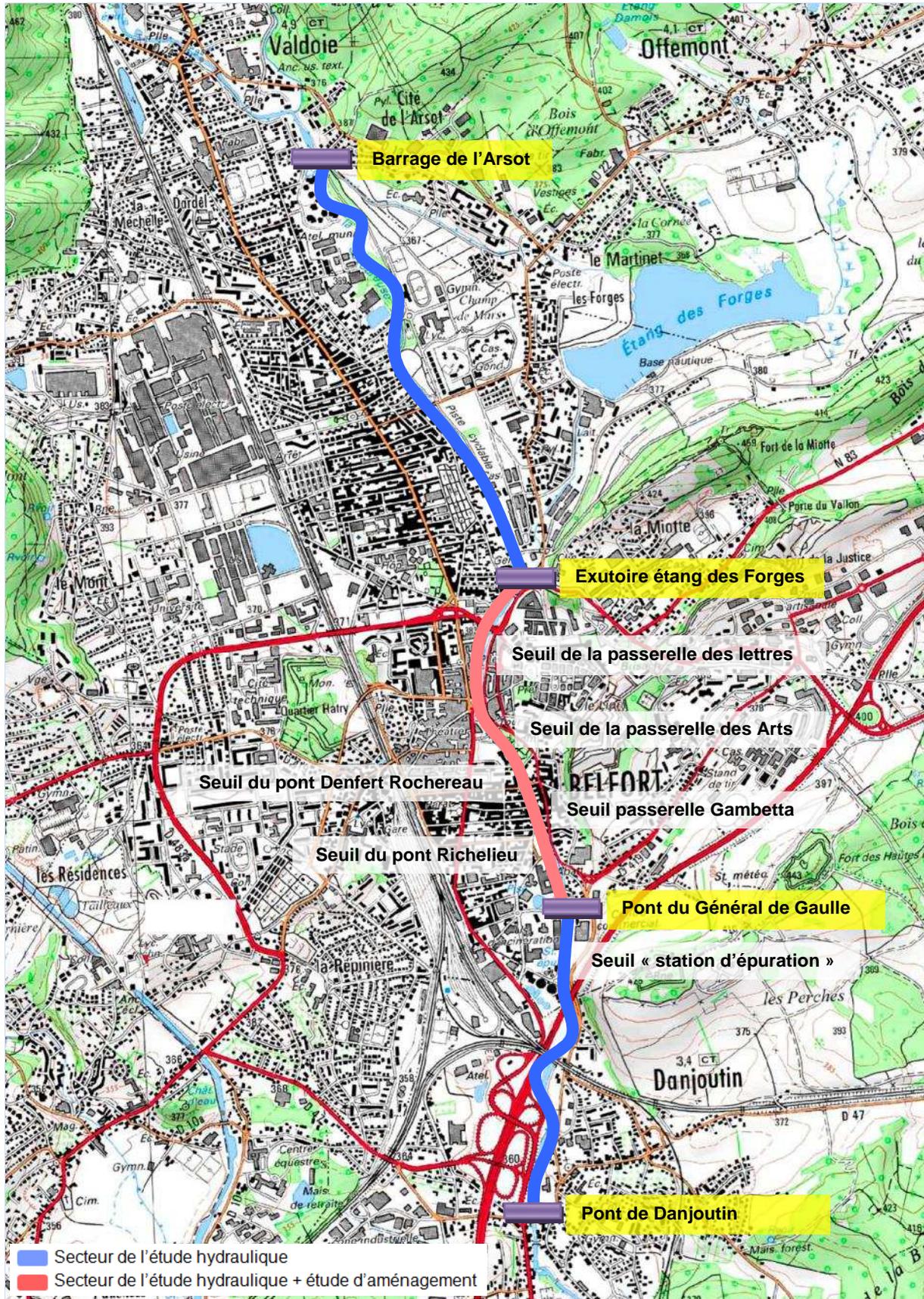


Figure 1 : Carte du secteur d'étude et des seuils présents dans la traversée de Belfort

1.3 Objet de la mission hydraulique 1

L'aménagement de la promenade des berges de la Savoureuse s'accompagne de la restauration du lit de la Savoureuse. La présente étude a pour objectifs :

- Etablir un modèle hydraulique de la Savoureuse permettant de déterminer les principales caractéristiques (vitesse, hauteur d'eau, forces tractrices, ...) en fonction du débit
- Proposer des partis-pris d'aménagement répondant aux objectifs fixés par la Ville de Belfort
- Evaluer l'impact hydraulique de 2 scénarios élaborés

1.4 Objet du rapport

Le présent document correspond au rendu de la Mission Hydraulique 1 « Etude hydraulique préalable » – modélisation hydraulique du fonctionnement actuel de la rivière.

2. Présentation générale du bassin versant de la Savoureuse

2.1 Présentation du bassin

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 permien, 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.

2.2 Réseau hydrographique

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.

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 Rhône 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 Châtenois-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.

3. Fonctionnement hydraulique du secteur d'étude

3.1 Hydrologie du bassin versant

3.1.1 Débits caractéristiques

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	0,25	
Module	4,29	
Crue biennale (Q2)	64	
Crue quinquennale (Q5)	92	
Crue décennale (Q10)	110	
Crue vicennale (Q20)	130	
Crue cinquantiennale (Q50)	150	
Maximum connu	209	Hauteur d'eau à la station : 236 cm (15/02/1990 12:18) Zéro de l'échelle : 356,55 mNGF IGN69

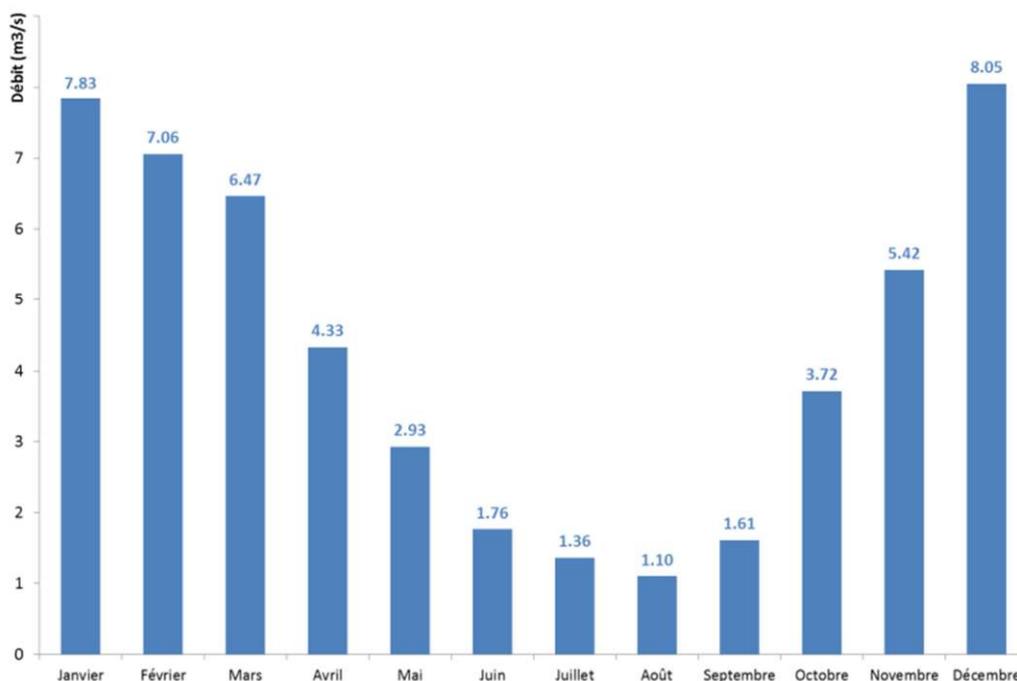


Figure 2 : Ecoulements mensuels de la Savoureuse à Belfort

Source : Banque HYDRO

3.1.2 Les crues

3.1.2.1 Historique des crues et inondations

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

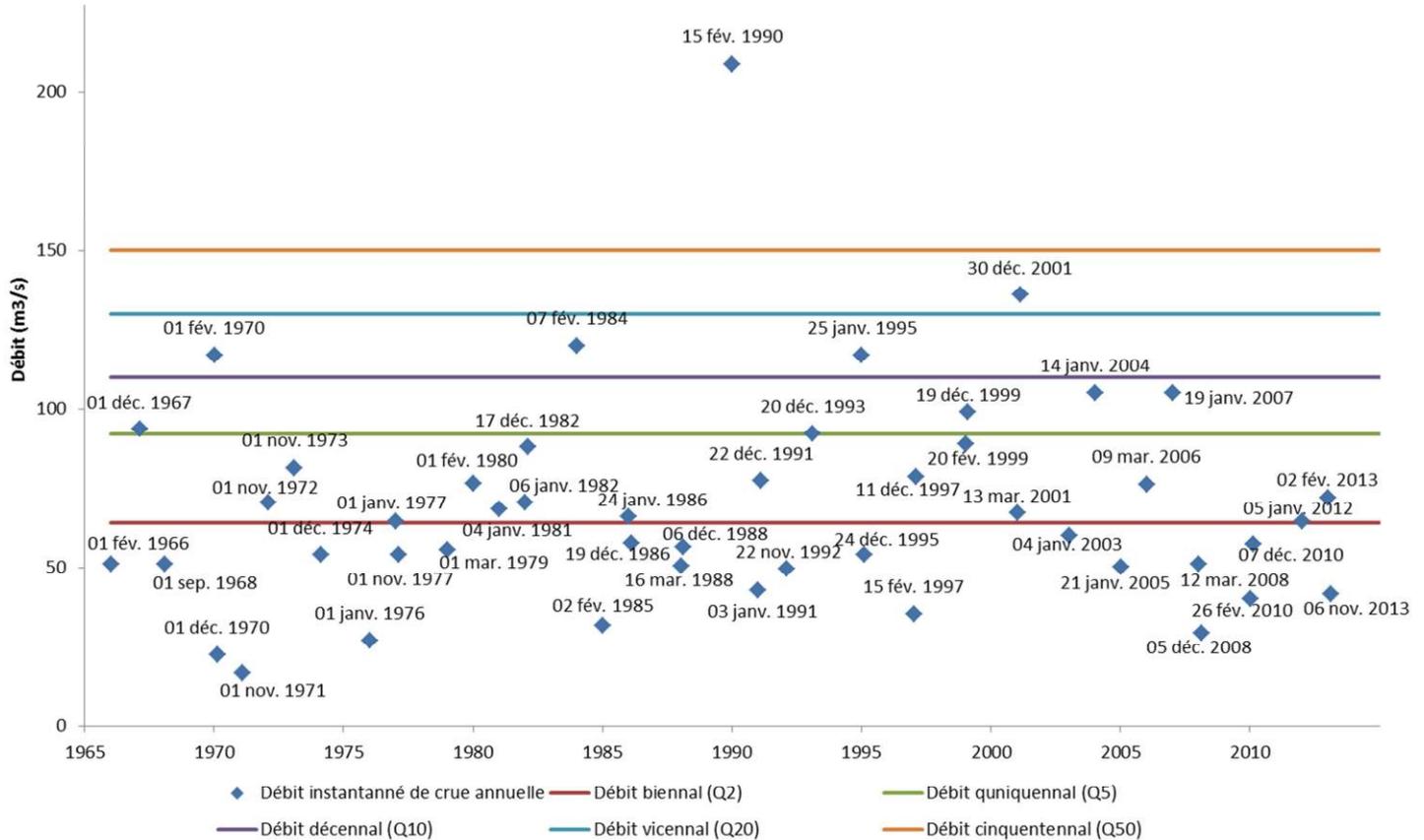


Figure 3 : Chronique des crues annuelles enregistrées depuis 50 ans

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.

Dans 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 inondations 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 (1^{er} septembre – 31 août).

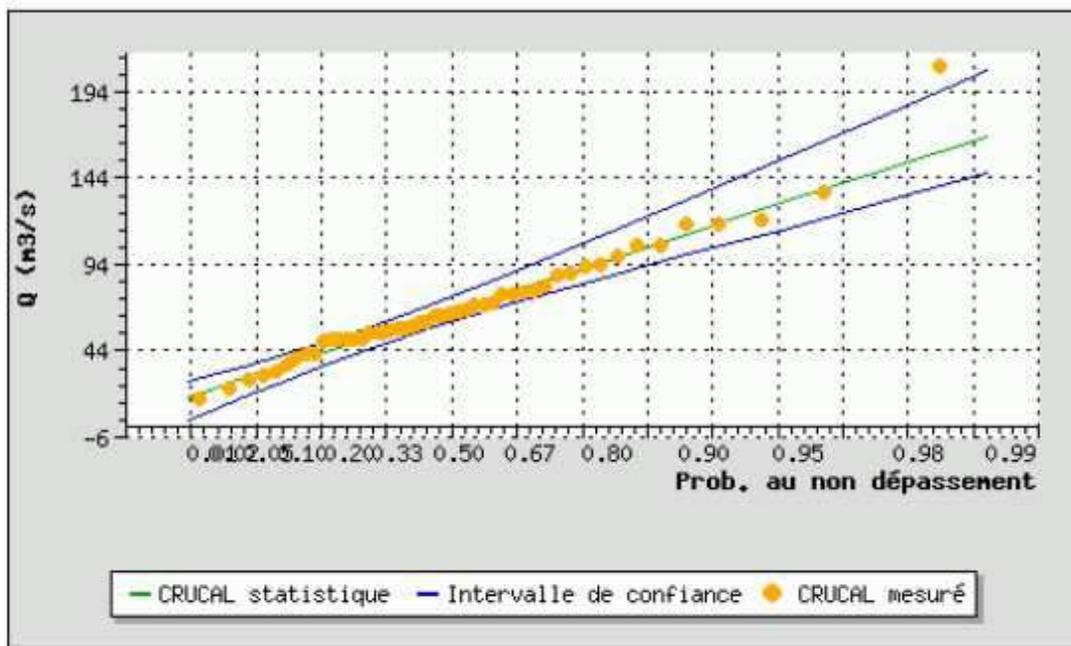


Figure 4 : Ajustement statistique des débits de crues annuelles et intervalle de confiance à 95% – loi de Gumbel
 Source : CRUCAL - Banque HYDRO

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 ($209 \text{ m}^3/\text{s}$) semble avoir été surestimé.

Cinquantennale	151.000	[132.000 ; 183.000]
Vicennale	128.000	[113.000 ; 153.000]
Décennale	110.000	[98.600 ; 130.000]
Quinquennale	91.700	[83.000 ; 106.000]
Biennale	63.900	[57.900 ; 71.600]

Figure 5 : Débits caractéristiques des crues à la station et intervalle de confiance à 95%
 Source : CRUCAL - Banque HYDRO

3.1.2.2 Types de crue du bassin versant de la Savoureuse

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 (Giomagny, Belfort, Vieux-Charmont), du Rhône (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 $209 \text{ m}^3/\text{s}$.

La propagation des crues est très rapide. Entre Belfort et Sochoux, 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.

3.2 Modélisation hydraulique

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

3.2.2 Tracé du cours d'eau et singularités hydrauliques

La Savoureuse entre dans Belfort par le barrage de l'Arso, 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.

3.2.3 Construction du modèle 1D/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). 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),
- 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 6 : Aperçu du modèle 1D / 2D

3.2.4 Calage du modèle

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 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, ont la forme de la surface libre de la lame déversante.

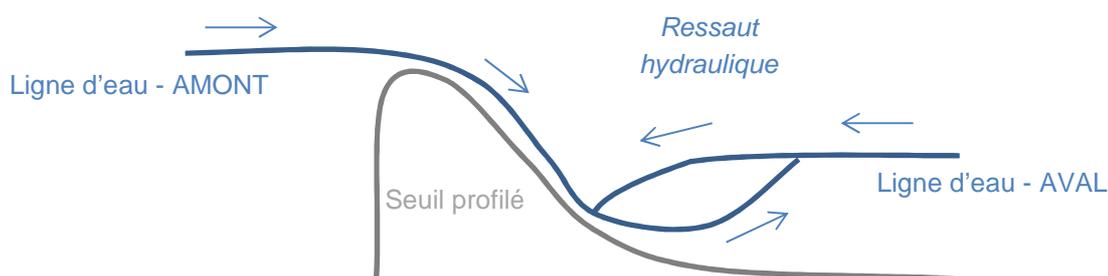


Figure 7 : Représentation schématique en coupe d'un seuil bien profilé et de la lame d'eau déversante en période normale d'écoulement

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 :

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

Tableau 2 : Quelques ordres de grandeur du coefficient de Strickler

Etant donné la configuration du profil en travers de la Savoureuse, les coefficients de rugosité du lit, dit coefficient de Strickler (K_s), suivants ont été appliqués :

- Lit mineur d'étiage, $K_s = 30$
- Berges maçonnées et quais, $K_s = 50$
- Lit majeur urbanisé, $K_s = 15$

La ligne d'eau levée par le géomètre au droit des profils en travers n'a pas été utilisée pour caler le modèle dans la mesure où ces levés se situent au niveau des singularités hydrauliques où la ligne d'eau est instable : en amont immédiat des seuils, au niveau du ressaut hydraulique ou aux abords des piles de ponts.

Le modèle a été calé sur la crue du 15 février 1990, relativement bien connue. Les données à la station hydrométrique située au niveau du pont Clémenceau ainsi que les photos de la crue ont été utilisées. Cette crue faiblement débordante a été utilisée notamment pour le calage des coefficients de Stricklers du lit mineur.

A noter que les cotes de crue du PPRi font l'objet de discussion et n'ont pas été retenues pour le calage.

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. Lors de la simulation de l'hydrogramme de crue de février 1990, la zone inondable était trop étendue pour être réaliste. 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.

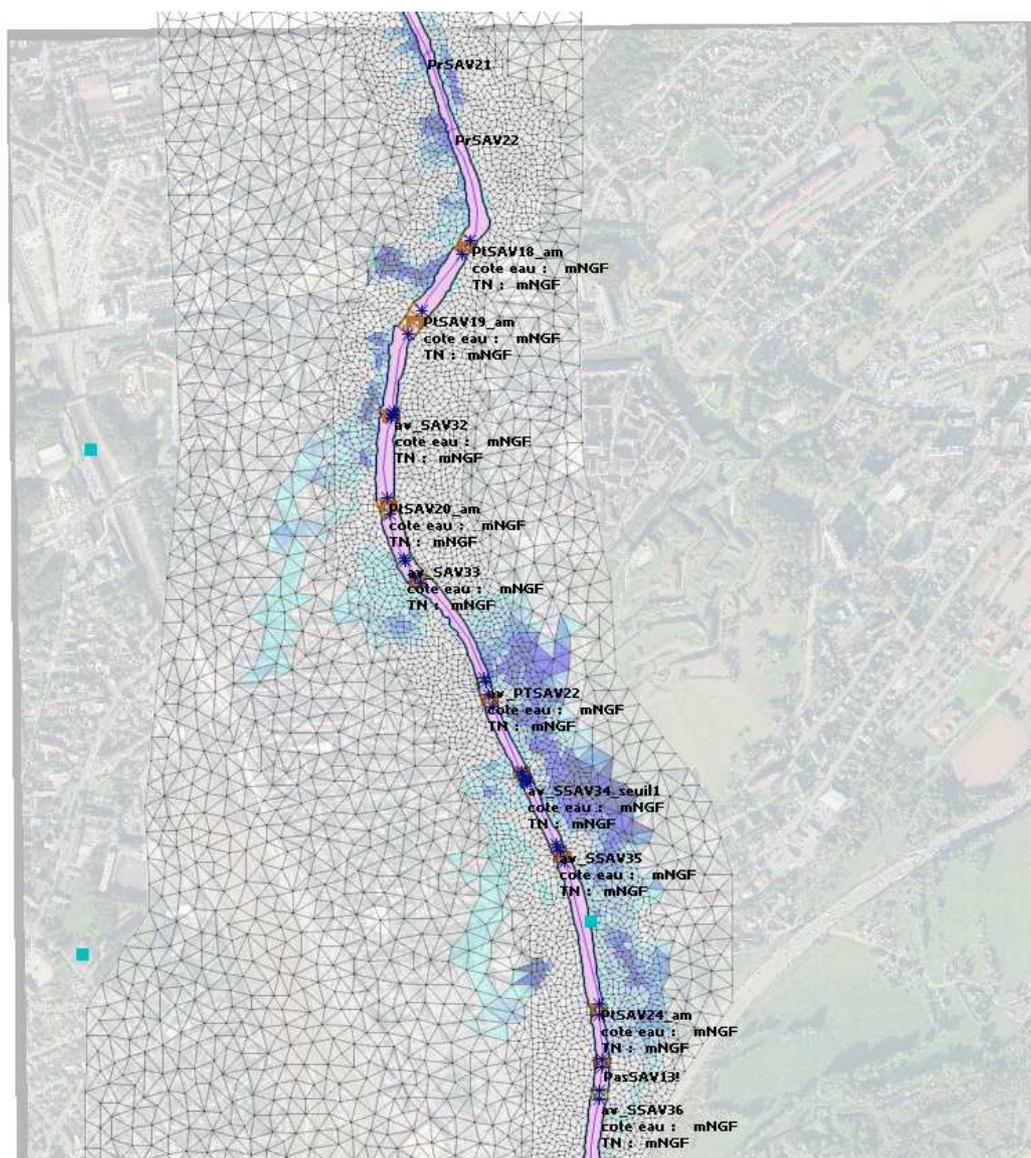


Figure 8 : Zone inondable simulée pour la crue de 1990 – avant révision de son hydrologie

Après plusieurs tests sur les variables d'ajustement, il s'est avéré qu'avec l'hydrogramme proposé par la banque HYDRO, les événements observés n'auraient pas pu être décrits fidèlement par le modèle (cf. Figure 8). Ainsi, étant donné l'incertitude sur l'estimation du débit de crue, Egis Eau s'est fié à la cote de crue à la station HYDRO et non à l'hydrogramme de crue.

De plus, d'après la Figure 4 présentant l'ajustement Gumbel de la station HYDRO, il apparaît que l'estimation du débit de pointe de la crue de 1990 est au-dessus des statistiques. Egis Eau a donc diminué artificiellement le débit de pointe de la crue de février 1990 afin de caler ce dernier sur la cote de la station hydrométrique, soit 358.91 mNGF. L'hydrogramme révisé figure sur le graphique suivant.

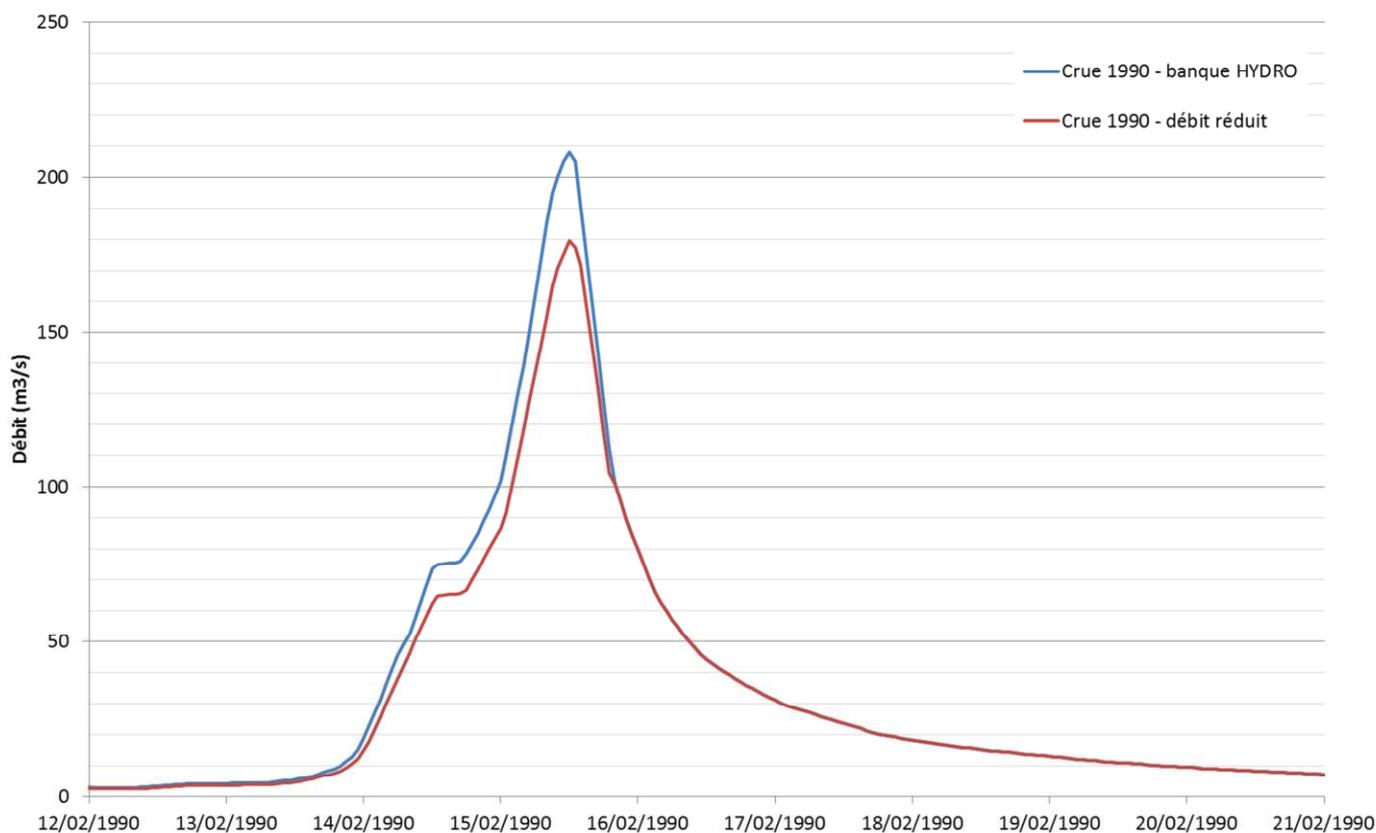


Figure 9 : Hydrogramme de la crue du 15 février 1990

Avec ces données, la cote d'eau simulée au niveau pont de Clémenceau atteint 358.95 mNGF, pour une cote mesurée à 358.91 mNGF.

Les photos de crue associées aux résultats de la simulation hydraulique (profil en travers ou zone inondable) 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.

Les photos de crue sont issues du site internet : <http://www.pbase.com/rollerboy/inondations90>.



Légende des hauteurs de submersion (m) :

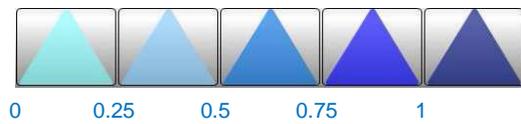


Figure 10 : Parking de l'hôtel Altea - inondé
 Credit photo : © Copyright Marc BERNARD

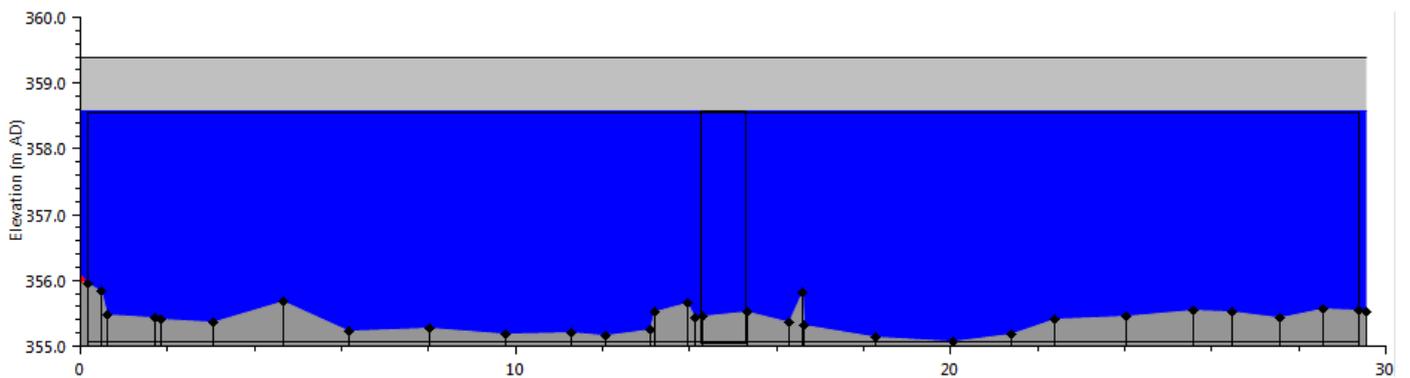
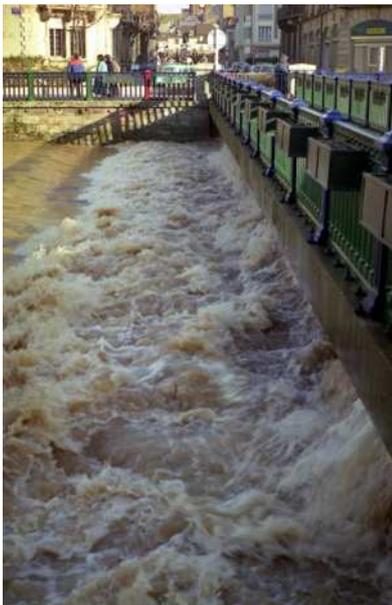


Figure 11 : Vue amont de la passerelle des Lettres - à la limite de monter en charge
 Credit photo : © Copyright Marc BERNARD

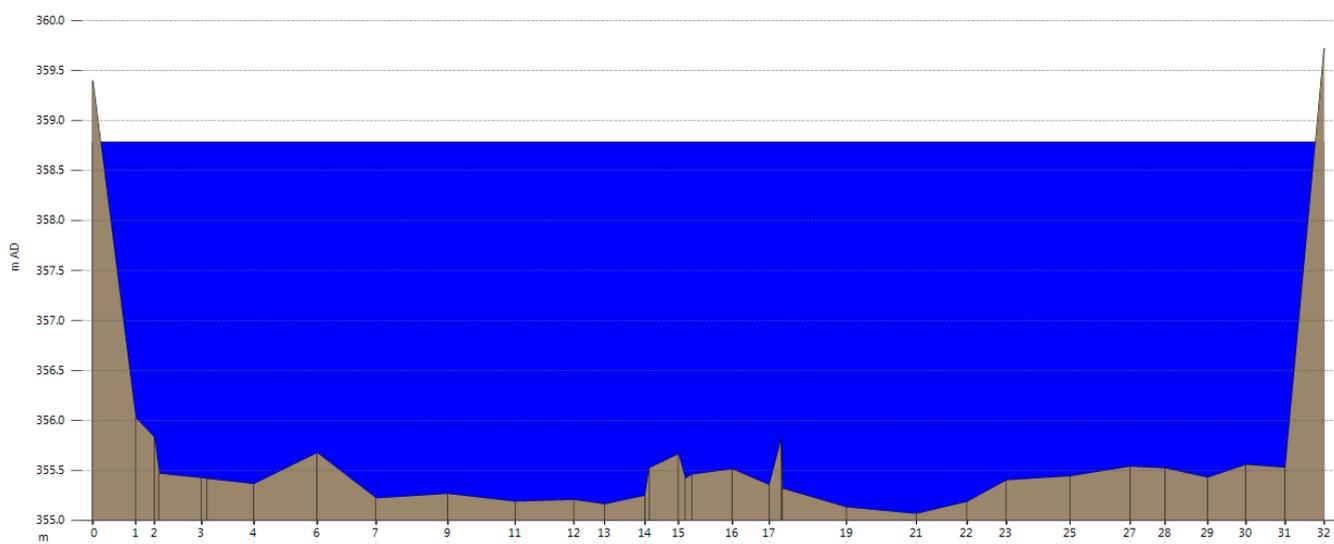
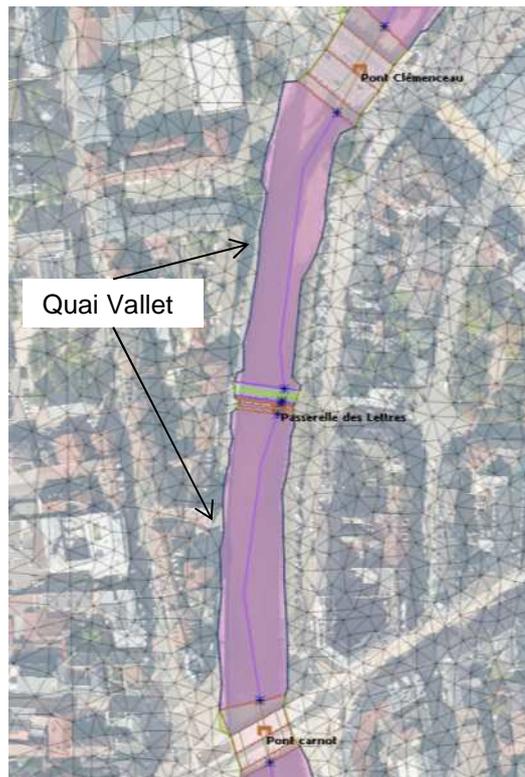


Figure 12 : Quai Vallet - pas de débordements sur les quais
 Credit photo : © Copyright Marc BERNARD

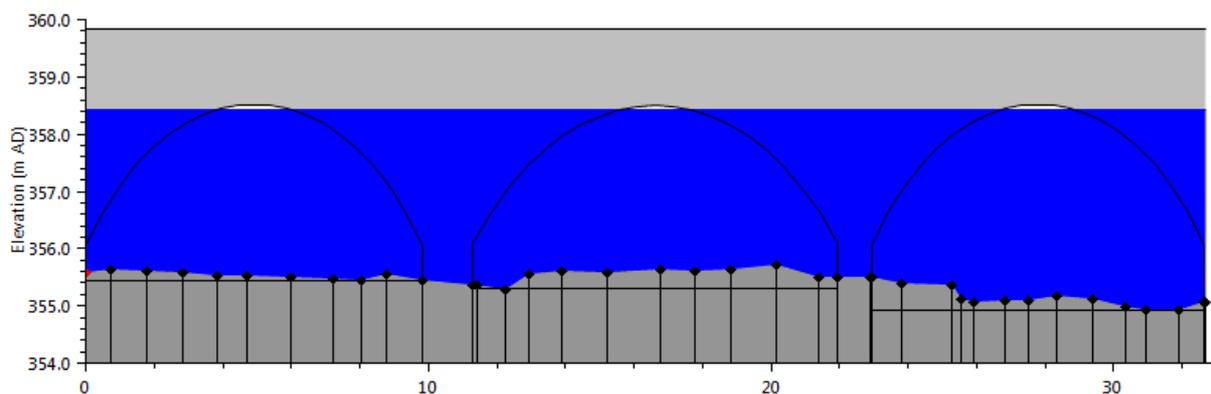


Figure 13 : Vue amont du pont Carnot - à la limite de monter en charge
 Credit photo : © Copyright Marc BERNARD

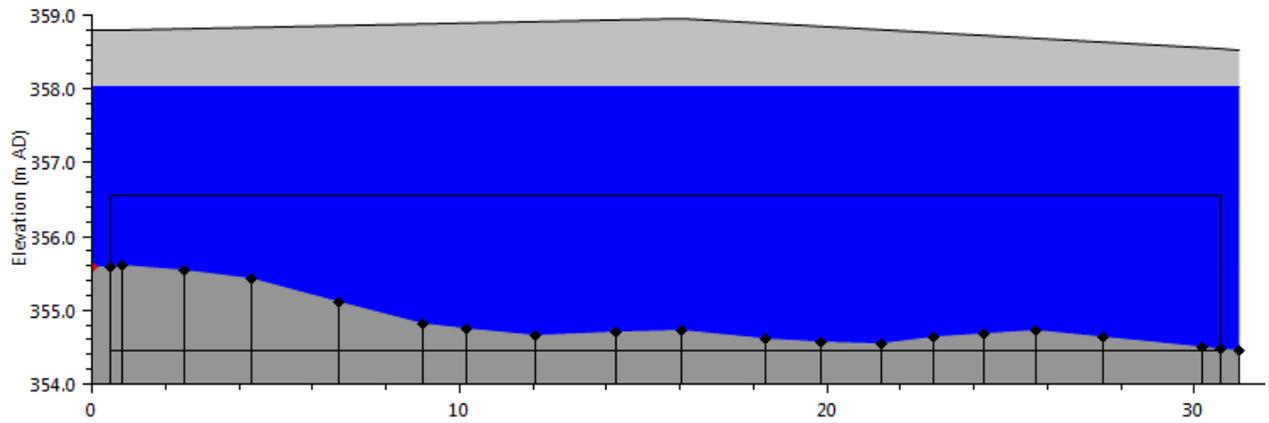


Figure 14 : Passerelle des Arts – en charge
 Credit photo : © Copyright Marc BERNARD

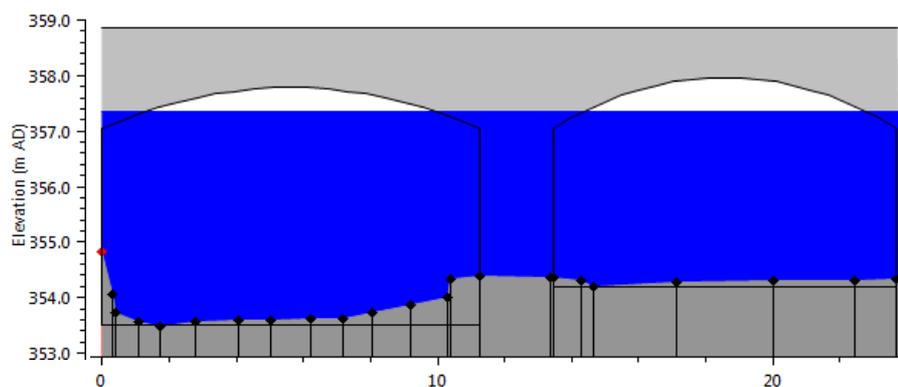


Figure 15 : Vue amont du pont Denfert-Rochereau – pas de débordement

Credit photo : © Copyright Marc BERNARD et <http://www.cancoillotte.net/spip.php?article979>

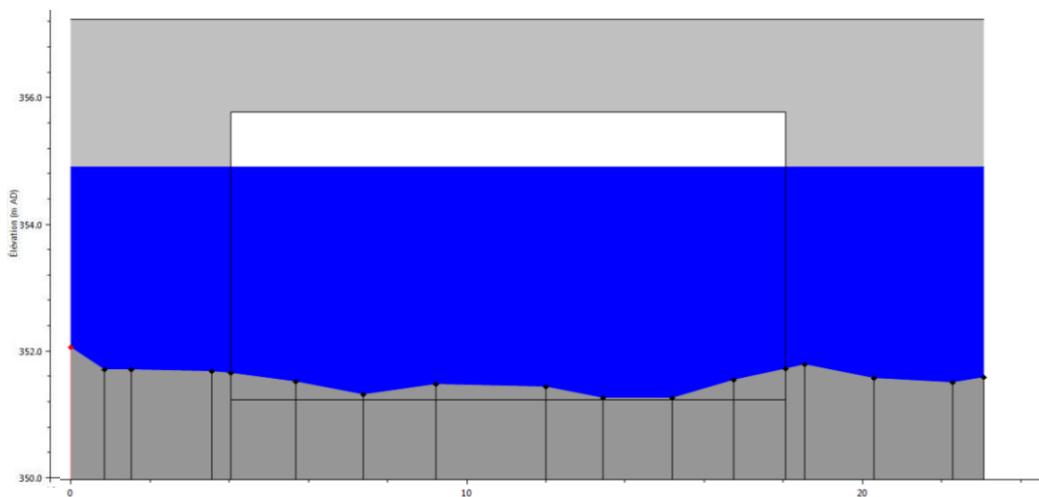


Figure 16 : Vue amont du pont Richelieu - à la limite de monter en charge
 Credit photo : © Copyright Marc BERNARD

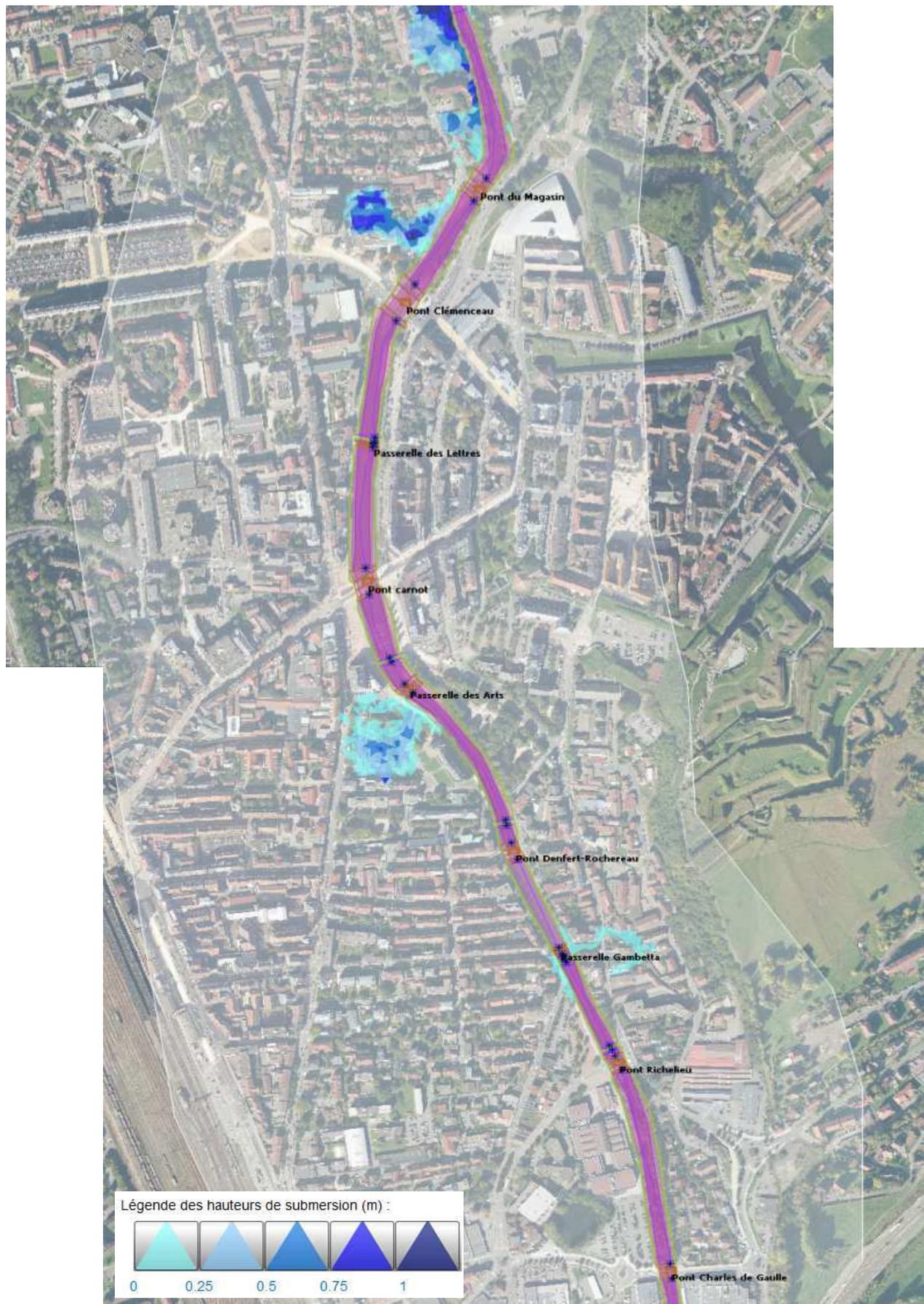


Figure 17 : Zone inondable simulée pour la crue de février 1990

A noter :

- une légère inondation en aval de la place Corbis, en rive droite calculée par le modèle et non constatée.
- de faibles débordements en amont de la passerelle Gambetta (inférieurs à 25 cm). La passerelle a été construite dans les années 2000 bien après 1990. En situation « crue 1990 », il n'y avait pas de débordement à ce niveau.



Figure 18 : 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.

3.2.5 Conditions actuelles d'écoulement de la Savoureuse dans la traversée de Belfort

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.

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.

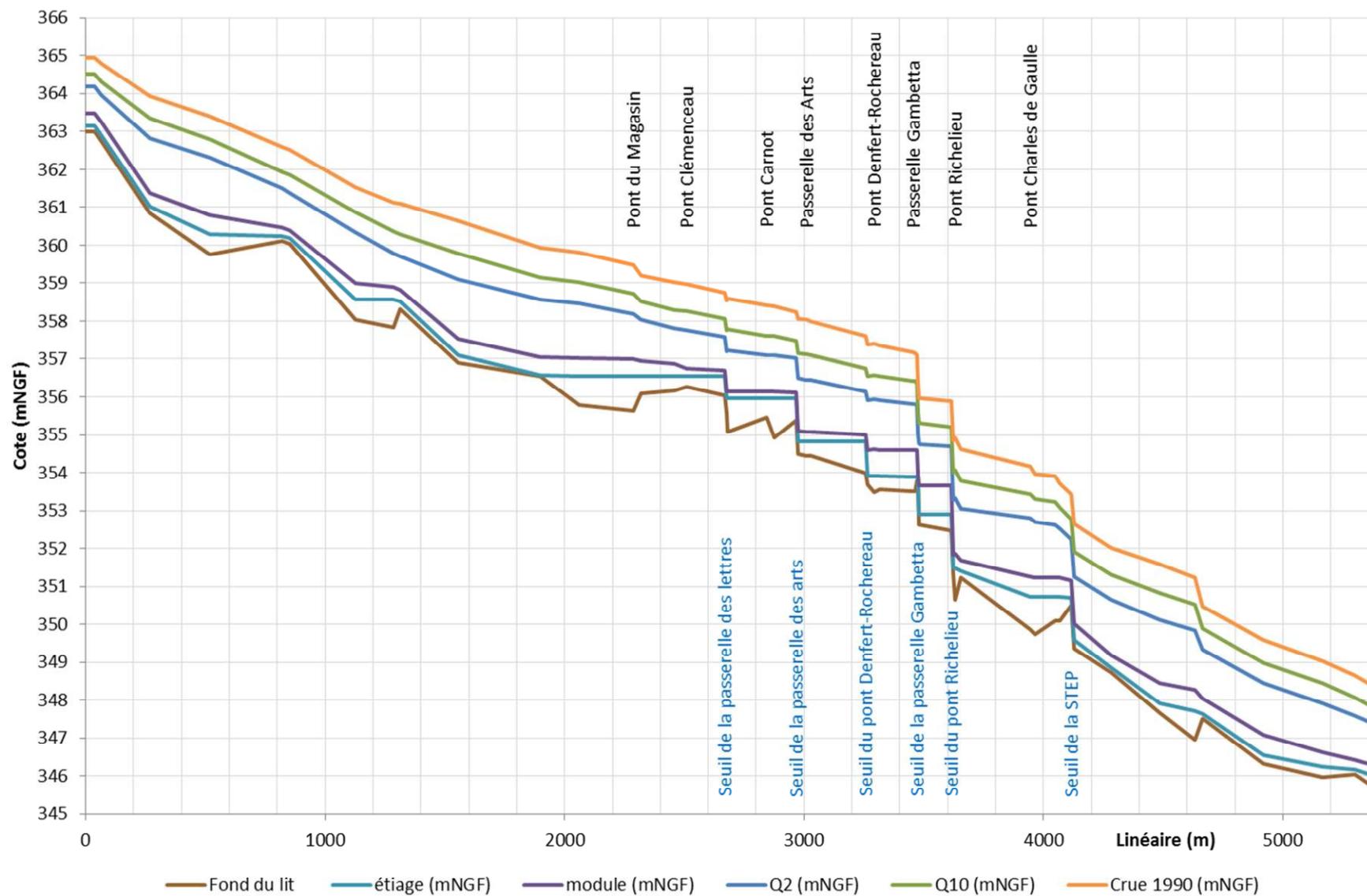


Figure 19 : Profil en long des lignes d'eau caractéristiques sur la Savoureuse

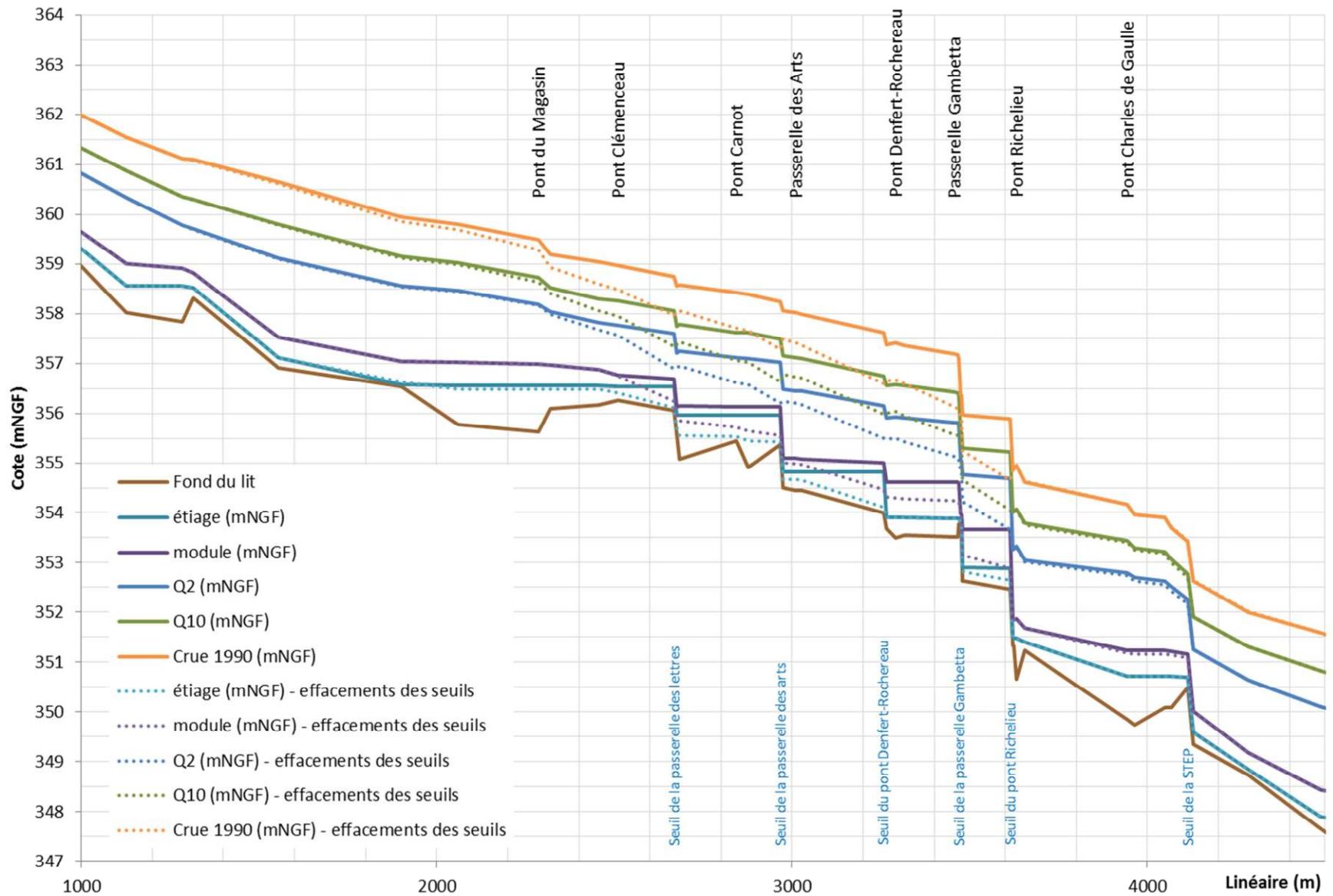


Figure 20 : Profil en long des lignes d'eau caractéristiques sur la Savoureuse – test d'effacement des seuils

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.

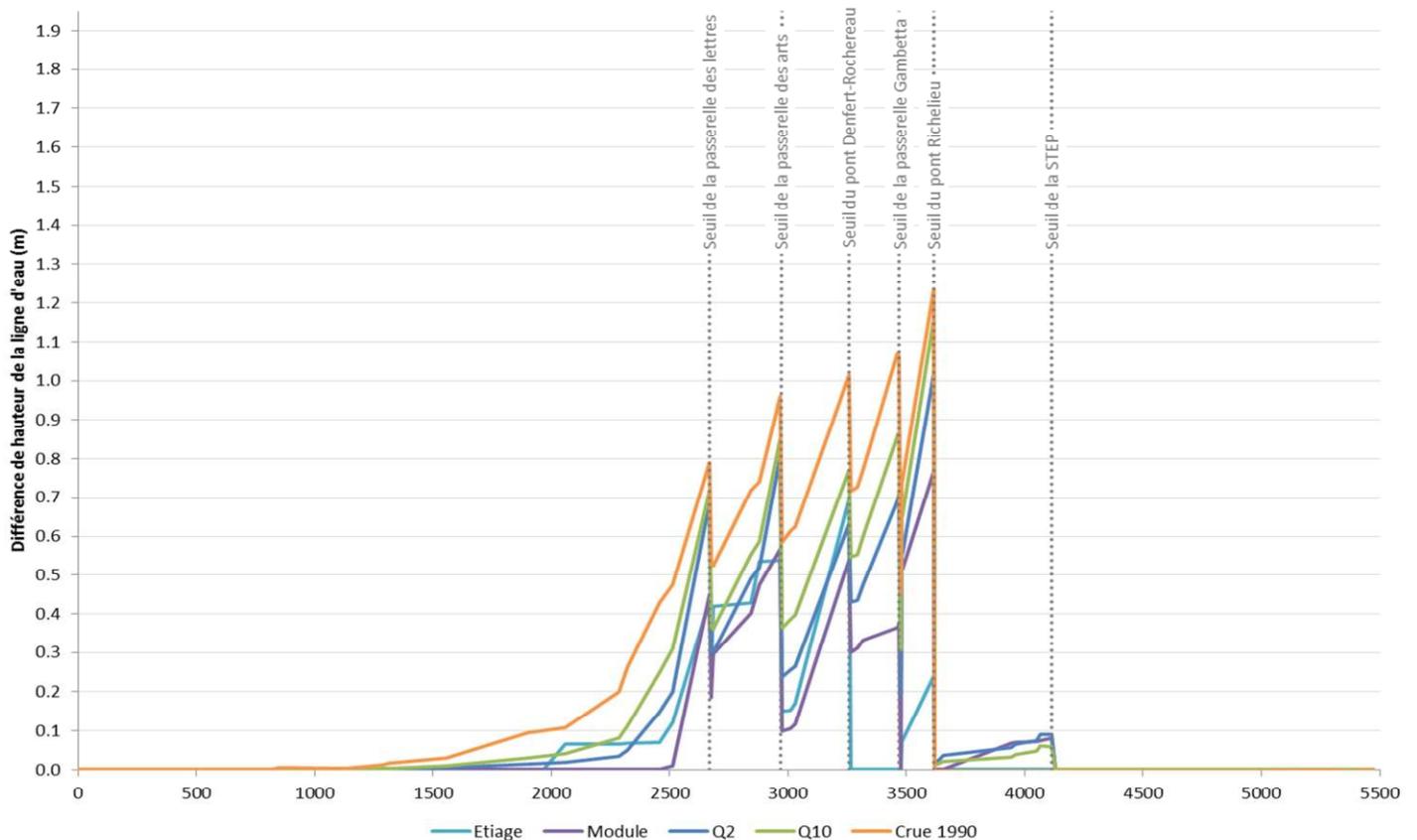


Figure 21 : Différence de hauteur d'eau entre la situation actuelle des seuils et une situation où les seuils sont effacés

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.

Les principaux résultats de simulations sont repris dans le Tableau 3. Le pont du Général De Gaulle et la Passerelle des Arts sont les ouvrages d'art les plus impactants pour la ligne d'eau de février 1990. **La passerelle des Arts est en charge dès la crue décennale** : la présence d'un épais tablier relativement bas limite localement la section d'écoulement de la Savoureuse.

Dans une moindre mesure, la passerelle Gambetta et le pont du Magasin sont aussi en charge pour la crue historique. Aux incertitudes près du modèle hydraulique, les tabliers du pont Clémenceau et de la passerelle des Lettres influencent légèrement cette même ligne d'eau.

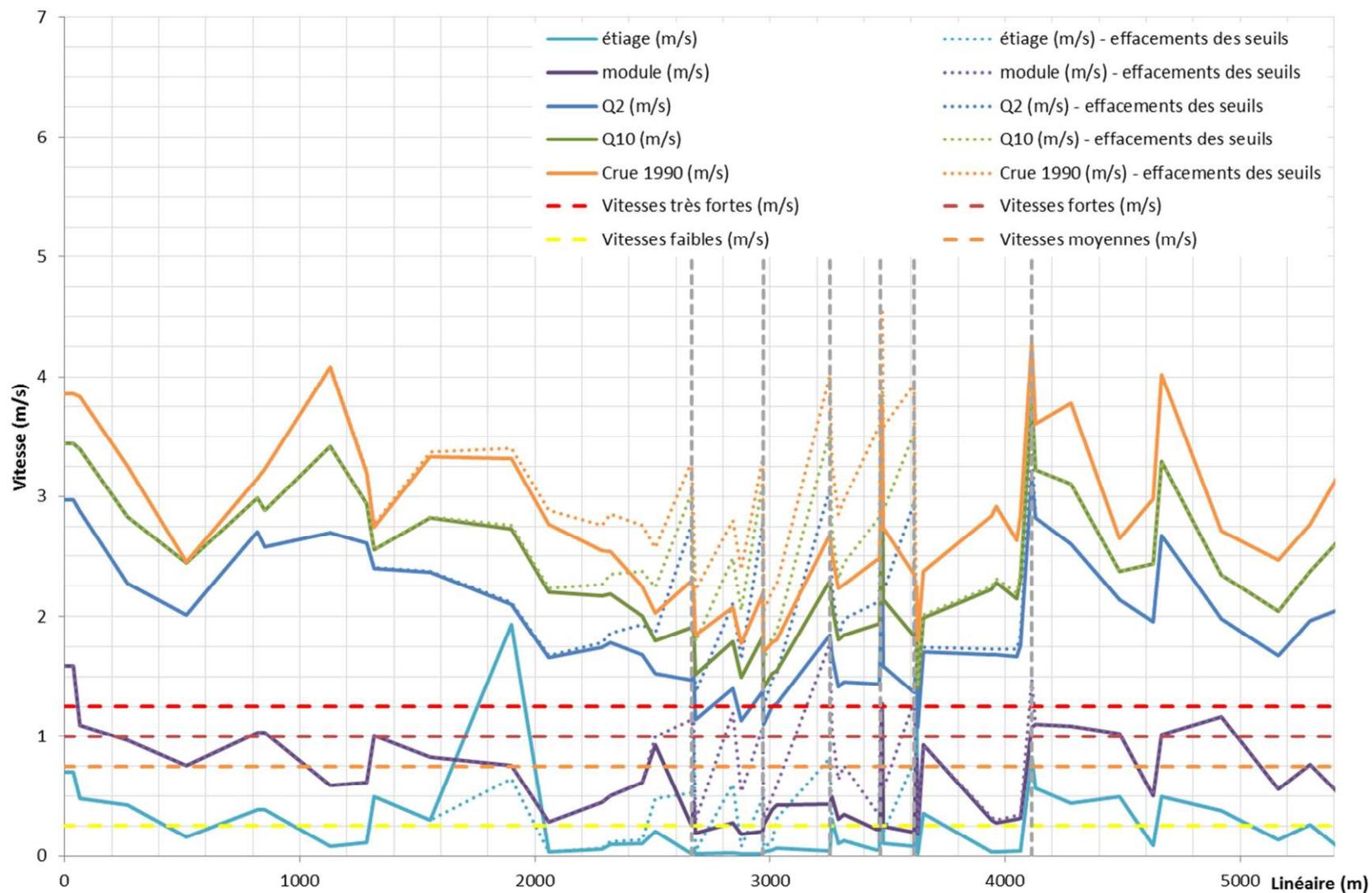


Figure 22 : Profil en long des vitesses caractéristiques d'écoulement sur la Savoureuse

Type d'ouvrage	Dénomination	Repère métrique (m)	Altitude minimale du fond du lit (mNGF)	Altitude de la crête des seuils (mNGF)	Dimension des ponts et passerelles		Cote d'eau (mNGF)					Tirant d'air sous tablier - crue 1990 (m)	Vitesse moyenne maximale d'écoulement en amont des ouvrages (m/s)				
					Cote haute des tabliers (mNGF)	Nb de passes	Etiage	Module	Q2	Q10	Crue 1990		Etiage	Module	Q2	Q10	Crue 1990
Pont	Pont du Magasin	0	356.09		359.26	2	356.55	356.99	358.20	358.72	359.48	-0.22	0.05	0.45	1.74	2.17	2.55
Pont	Pont Clémenceau (RD83)	170	356.26		358.93	3	356.54	356.76	357.76	358.26	358.96	-0.03	0.21	0.93	1.53	1.80	2.03
Seuil	Seuil de la passerelle des Lettres	381		356.53	-	-	356.54	356.69	357.59	358.06	358.75		0.02	0.25	1.47	1.91	2.30
Pont	Passerelle des Lettres	396	355.07		358.55	2	355.97	356.14	357.24	357.78	358.59	-0.03	0.01	0.19	1.14	1.52	1.85
Pont	Pont Carnot	556	354.92		358.52	3	355.97	356.13	357.11	357.61	358.42	0.10	0.02	0.28	1.40	1.79	2.07
Seuil	Seuil de la passerelle des Arts	681		355.94	-	-	355.97	356.13	357.02	357.48	358.24		0.02	0.21	1.38	1.83	2.18
Pont	Passerelle des Arts	724	354.45		356.56	1	354.82	355.09	356.45	357.12	358.03	-1.47	0.05	0.39	1.25	1.53	1.78
Seuil	Seuil du pont Denfert-Rochereau	970		354.76	-	-	354.81	355.00	356.14	356.75	357.61		0.04	0.43	1.85	2.30	2.68
Pont	Pont Denfert-Rochereau	1004	353.56		357.98	2	353.90	354.61	355.94	356.58	357.40	0.58	0.10	0.31	1.41	1.81	2.23
Pont	Passerelle Gambetta	1169	353.51		357.02	1	353.90	354.60	355.82	356.42	357.18	-0.16	0.05	0.22	1.44	1.93	2.47
Seuil	Seuil passerelle Gambetta	1188		354.57	-	-	353.89	354.60	355.76	356.35	357.09		0.79	0.39	1.80	2.30	2.81
Seuil	Seuil du pont Richelieu	1328		353.57	-	-	352.89	353.66	354.69	355.21	355.88		0.08	0.20	1.37	1.84	2.35
Pont	Pont Richelieu	1344	351.21		355.59	1	351.48	351.87	353.34	354.08	354.94	0.65	0.02	0.18	1.07	1.41	1.80
Pont	Pont du Général de Gaulle	1656	349.74		353.68	1	350.72	351.25	352.79	353.44	354.16	-0.48	0.03	0.30	1.68	2.22	2.84

358.59	Pont en charge
-0.03	Pont en charge de moins de 0.10 m pour la crue de 1990

1.85	Très forte vitesse
1.07	Forte vitesse

Tableau 3 : 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 Charles De Gaulle
Débit capable (m3/s)	150	170	170	180	70	250	150	250	130

Tableau 4 : Débit capable des ouvrages d'art

4. Diagnostic hydromorphologique

4.1 Préambule

Le fractionnement de la Savoureuse par les seuils impacte les déplacements de la faune aquacole dans les corridors fluviaux du bassin versant.

Ces ouvrages perturbent aussi une autre composante importante de la continuité écologique : le transport sédimentaire. Les produits d'érosion du bassin versant (sables, graviers...) et les fractions organiques (vases...) sont retenus en partie en amont des ouvrages pouvant créer des déficits sur les zones aval et des accumulations en amont.

Ils amplifient aussi la dénaturation de la morphologie des cours d'eau qui nuisent à la fonction d'habitat écologique et d'autoépuration de la rivière.

Les 5 seuils s'inscrivent dans un environnement urbain complexe. Plusieurs aménagements (ponts, murs de berges, pompage de jets d'eau...) sont tributaires de l'équilibre morphodynamique de la rivière et du profil en long artificialisés par les seuils.

4.2 Tracé en plan

Sur la carte géologique, la couche des alluvions modernes et anciennes de la Savoureuse (en blanc sur la carte ci-dessous) est relativement large et s'étend bien au-delà des quais de la rivière dans la traversée de Belfort.

La carte du relief de la vallée de la Savoureuse fait aussi état d'une vallée relativement large où la Savoureuse a probablement divagué. L'urbanisation de la vallée associée au recalibrage de la rivière contraint aujourd'hui le tracé de la Savoureuse.



Figure 23 : Cartes géologique et du relief du secteur d'étude

Source : BRGM et IGN

4.3 Profil en long du linéaire étudié

Le barrage d'Arsot situé env. 2000 m en amont du secteur d'étude provoque un décroché du profil en long de la Savoureuse d'env. 3,90 m. En amont du barrage, le profil en long de la rivière est relativement régulier. Sa pente moyenne est de l'ordre de 0.0067 m/m (cf. Figure 26).



Figure 24 : Photographies du barrage d'Arsot

Source : Google Earth et Google Maps

La pente du profil en long de la Savoureuse du barrage d'Arsot (exclu) au pont de Danjoutin est de l'ordre de 0.31%, soit env. 2 fois plus faible que la pente du fond du lit en amont du barrage d'Arsot. Ce dernier présente (cf. Figure 27) :

- un profil en escalier dû à la présence de seuils en travers de la rivière.
- un exhaussement du fond du lit d'environ 1.50 m entre le pont Clémenceau et le seuil de la passerelle Gambetta. Ce dernier peut être induit par l'effet de seuil engendrant un remous solide régressif en amont de chacun d'entre eux.

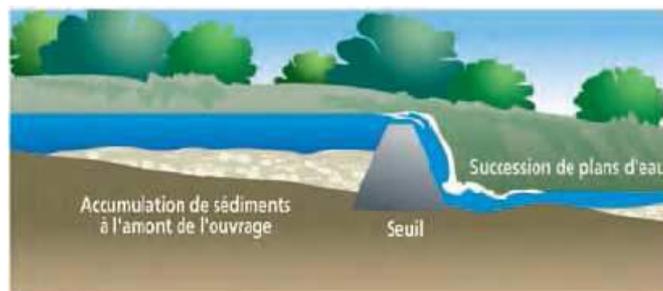


Figure 25 : Profil en long théorique de l'implantation d'un seuil transversal à l'écoulement

Source : ONEMA, 2010

Ainsi,

- au niveau du pont du Magasin et du pont Clémenceau, une contre pente est marquée par des atterrissements étendus et permanents.
- 1,50 m de chute au niveau des seuils Gambetta et Richelieu permettent de rattraper la pente d'équilibre du profil en long.

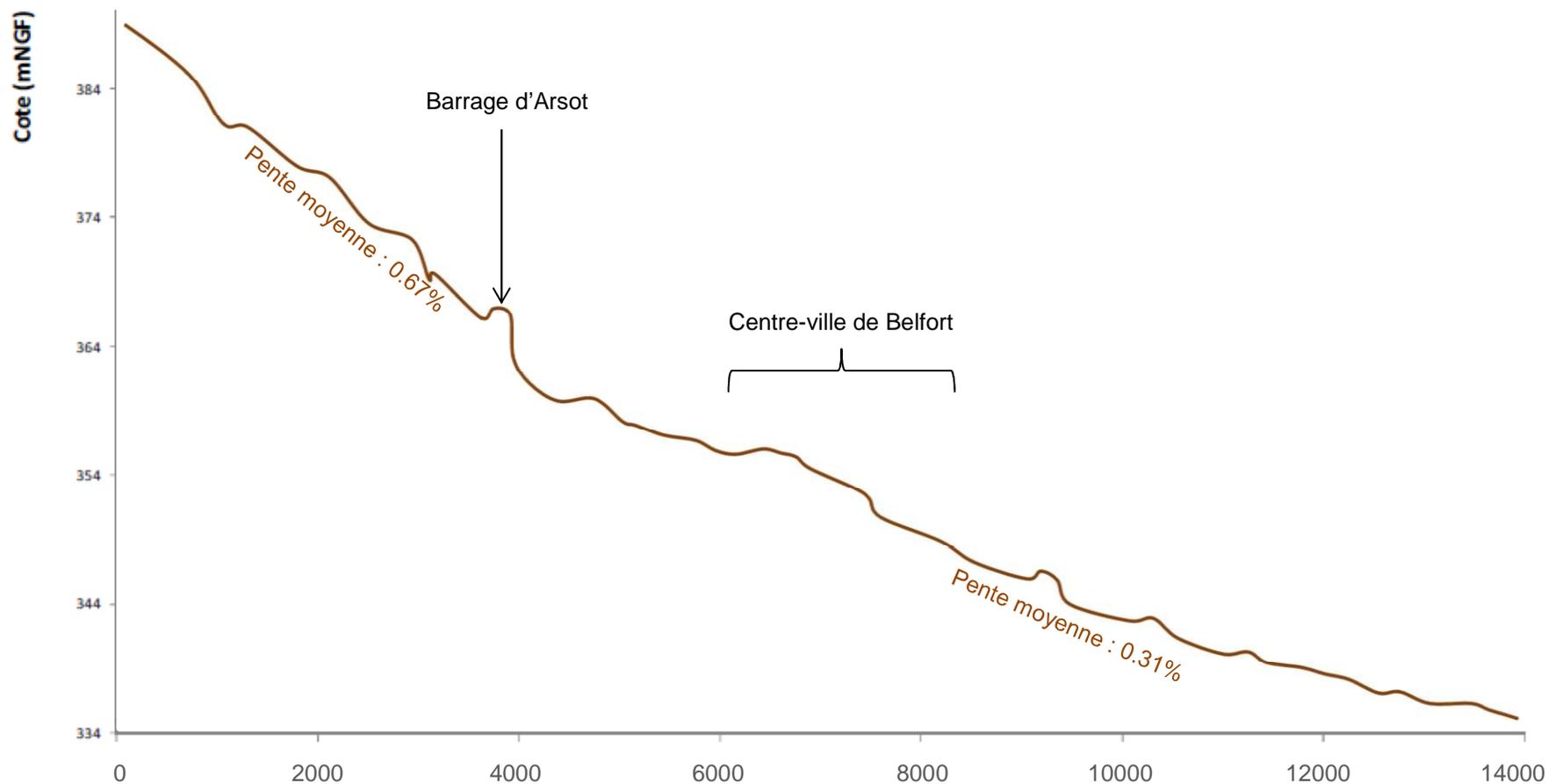


Figure 26 : Profil en long de la Savoureuse sur 14 Km
 Source : Profils en travers PPRi

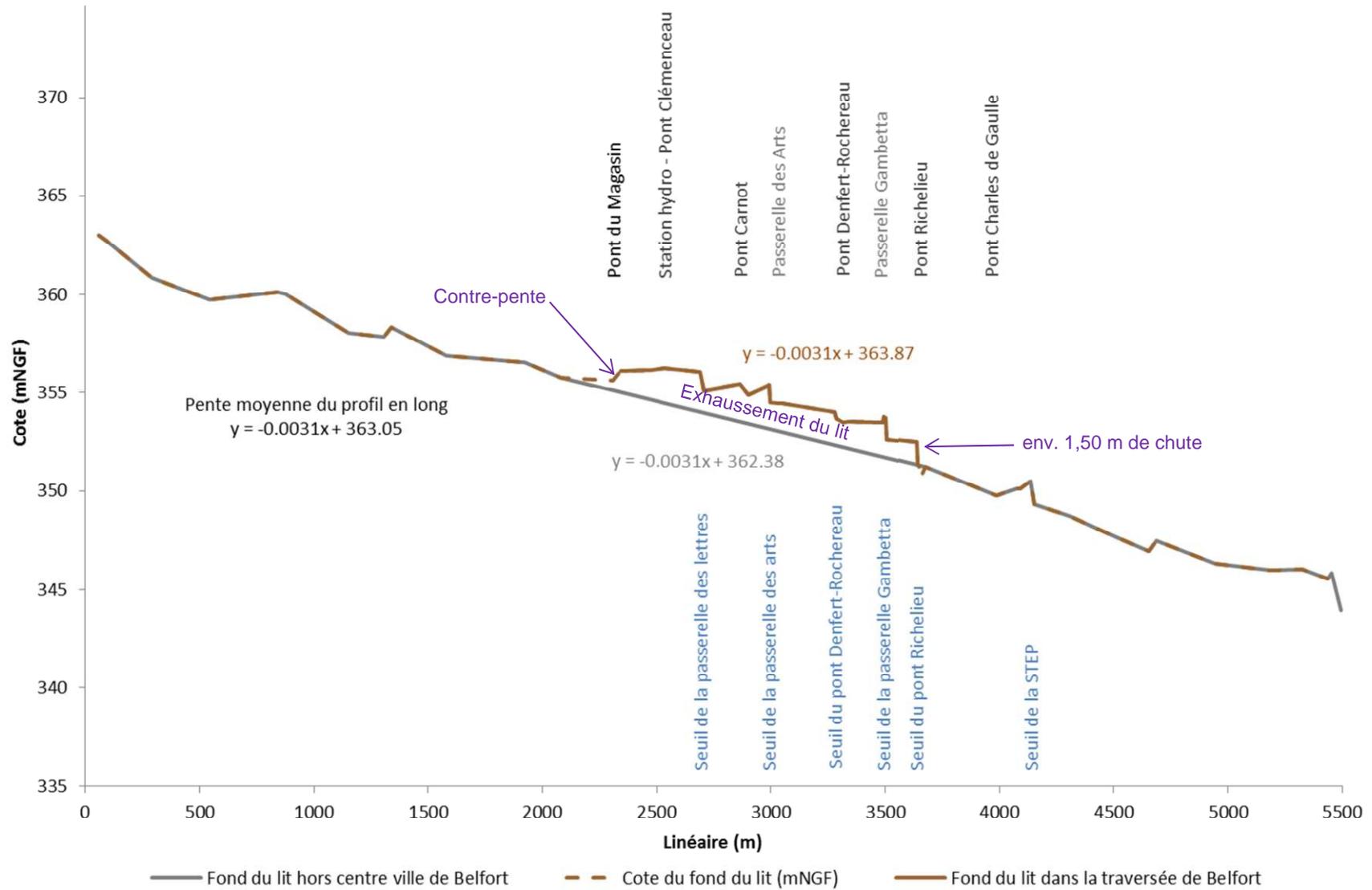


Figure 27 : Profil en long de la Savoureuse dans la traversée de Belfort

Source : Profils en travers PPRI

4.4 Profils en travers de la Savoureuse

Le profil en travers de la Savoureuse évolue le long du linéaire d'étude. En théorie, à mesure que la rivière s'éloigne de sa source, cette dernière devrait s'élargir dans la plaine alluviale. Sur le secteur d'étude, par la présence du centre urbain de Belfort, les caractéristiques morphométriques de la rivière ont été bouleversées.

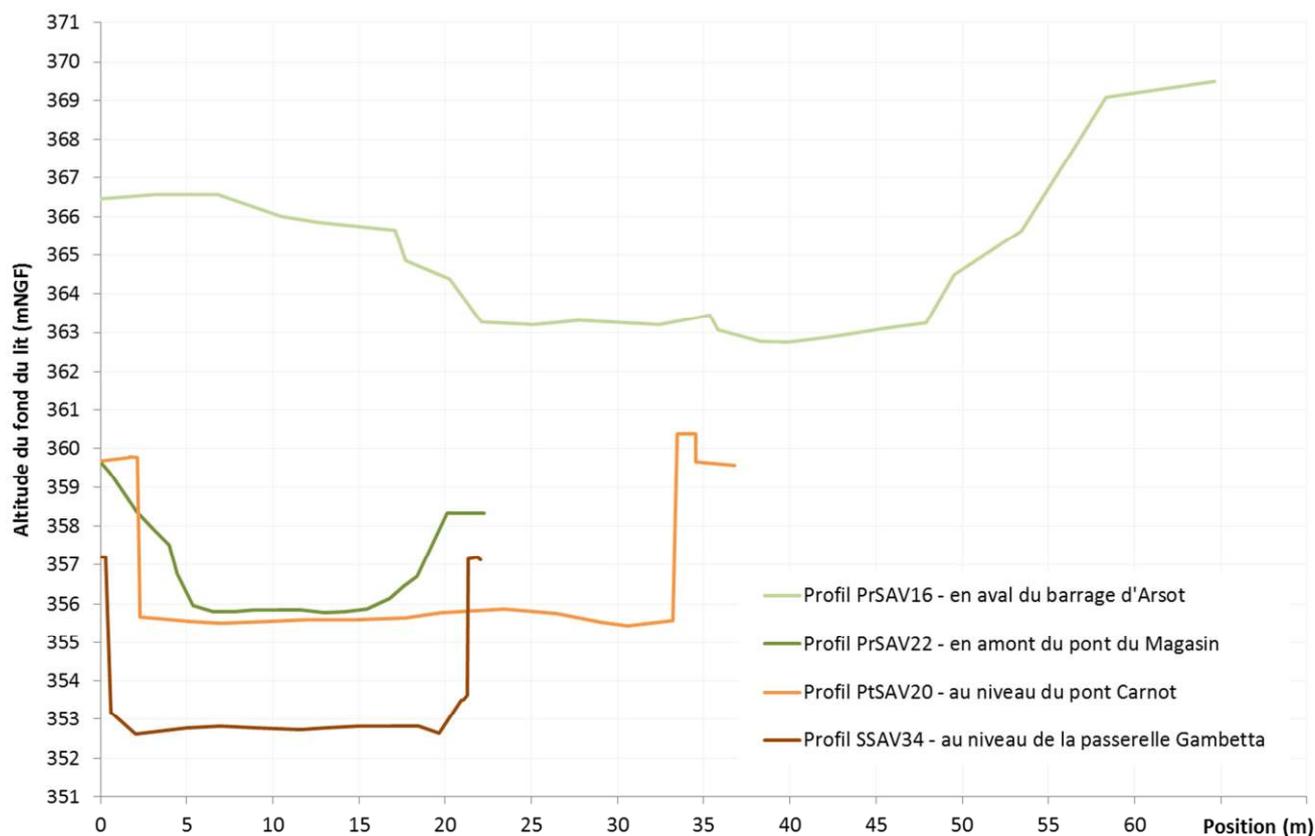


Figure 28 : Evolution du profil en travers de la Savoureuse sur le périmètre d'étude

En aval du barrage d'Arsot, les berges sont naturelles profilées en pentes douces. La ripisylve est herbacée et arbustive.

En amont du pont du magasin, la largeur du lit est relativement resserrée. Les pentes des berges sont plus raides bien qu'elles soient relativement naturelles.



Figure 29 : Aperçu du cours d'eau en amont du pont du Magasin

Dans la traversée du centre-ville de Belfort, le profil en travers de la rivière est très artificialisé et apparenté à un rectangle. Les berges sont verticales, hautes et maçonnées. La largeur du lit peut varier de 30 à environ 20 m. La ripisylve est absente. Sur certains biefs, des atterrissements végétalisés sont présents au fond du lit « plat » de la Savoureuse. Les berges sont hautes de 5 m en moyenne. En centre-ville, la rivière est contrainte, toutes possibilités d'évolution et de débordement sont bloquées.



Figure 30 : Profil en travers artificialisé en centre-ville

En aval du secteur d'étude, le profil en travers de la Savoureuse tend à être plus évasé et naturel. La ripisylve se présente sous les trois différentes strates : herbacée, arbustive et arborée. Etant donné la pente relativement élevée des berges, le pied de berge est conforté avec des enrochements.

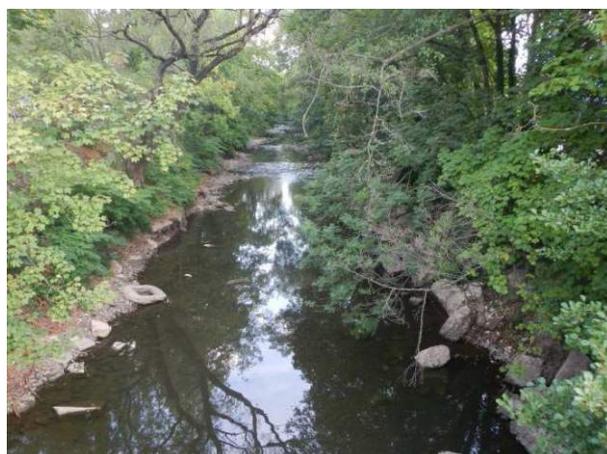


Figure 31 : Profil en travers en aval du pont Richelieu

A proximité du seuil de la station d'épuration, la rivière présente un profil en travers élargi aux berges relativement naturelles et au fond du lit diversifié.



Figure 32 : Profil en travers en aval du pont Charles De Gaulle

En aval du secteur d'étude, le profil en travers de la Savoureuse tend à être plus évasé et naturel.

4.5 Faciès d'écoulement

Les faciès d'écoulement sur le secteur d'étude sont décrits par PEDON environnement dans son rapport sur les milieux et la faune aquatique (cf. mission environnement 1 – rapport et fiches relatives aux faciès d'écoulement).

Le cours d'eau en amont immédiat des seuils est sous l'influence du remous du barrage. La perte de charge induite par l'élévation de la ligne d'eau modifie l'écoulement sous forme d'un plat lentique en amont immédiat du seuil. L'influence est percevable jusqu'au barrage situé en amont. Chaque seuil constitue une singularité dans le transport solide et les écoulements qui favorisent la formation d'un chenal lentique homogène et de faible valeur d'habitats aquatiques.

La zone hors d'influence de la retenue laisse apparaître des faciès d'écoulements plus rapides avec notamment la présence en certaines petites zones de rupture de pente sur des radiers.

En période de basses eaux, la sur-largeur du lit mineur de la rivière par rapport au débit transité contraint l'écoulement à se concentrer : ceci induit la formation de radiers et de mouilles au sein du chenal. Des atterrissements plus ou moins permanent sont alors mis hors d'eau.



Figure 33 : En amont du pont Richelieu – plat lentique



Figure 34 : En aval du pont Richelieu – zone de radiers

4.6 Substrat et transport solide

Les quatre principaux paramètres influençant le transport solide sont ceux représentés sur la balance de Lane : deux termes expriment la puissance de l'écoulement (Q et J) et deux termes expriment le taux de travail effectué (D et Q_s). La balance de Lane exprime un principe bien connu de la mécanique qui est que la puissance dissipée est égale au taux de travail effectué, à un facteur d'efficacité près.

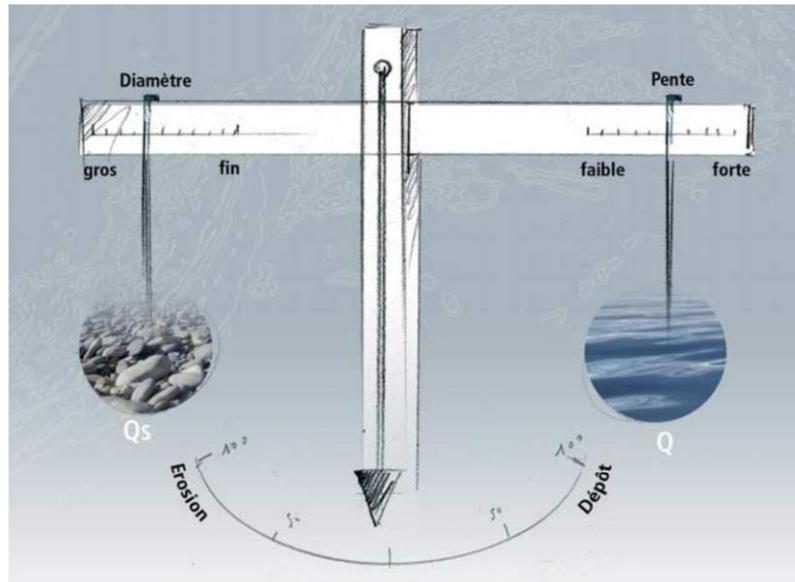


Figure 35 : Fondement de l'équilibre de la dynamique fluviale (d'après Lane, 1955)

La balance de Lane (1955, Figure 35) montre que toute rivière cherche son équilibre entre la charge alluviale imposée (débit (Q_s) et granulométrie) et le débit liquide (Q), qui couplé à la pente, fournit l'énergie capable de l'évacuer.

De manière très simplifiée, la dynamique fluviale peut être présentée comme l'oscillation de l'aiguille d'une balance dont un des plateaux serait rempli d'eau (le débit liquide Q) et l'autre de sables et galets (qui symbolise les sédiments Q_s). Les quantités respectives et les rapports de ces deux éléments étant extrêmement fluctuants (à l'échelle de la journée, de l'année, du millier d'années), il s'ensuit un ajustement permanent de la morphologie du cours d'eau, autour de conditions moyennes, par le biais des processus d'érosion-dépôt.

- Si oscillation régulière : équilibre dynamique
- Si permanence d'une tendance à l'érosion ou au dépôt : tendance déséquilibre
- Si blocage d'un côté ou de l'autre : déséquilibre total.

D'autres variables de contrôle interviennent à divers degrés dans les processus géodynamiques et les formes qui en résultent (Figure 36) :

- la pente et la géométrie de la vallée, mises en place depuis des centaines de milliers, voire des millions d'années, sous le contrôle majeur de la géologie du bassin versant et des mouvements tectoniques ;
- les caractéristiques sédimentologiques du fond du lit et des berges, qui conditionnent leur érodabilité et qui sont elles aussi liées à l'histoire géologique (faciès des roches plus ou moins altérable) et géomorphologique (processus de surface) du bassin versant mais également à son évolution hydro-climatique plus ou moins récente (glaciations) ;
- la végétation des berges, qui est une variable « vivante » et par conséquent beaucoup plus fluctuante que les deux précédentes (car très sensible aux évolutions climatiques et aux actions anthropiques).

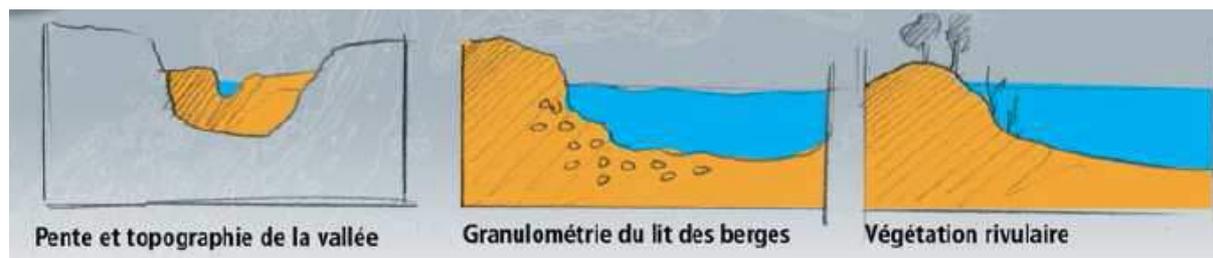


Figure 36 : Les variables de contrôle secondaires de la dynamique fluviale.

Ainsi, les processus d'érosion, de transport et de sédimentation résultent de la dissipation de l'énergie cinétique du fluide en mouvement de l'amont vers l'aval, sous l'influence de facteurs hydrauliques (vitesse du courant, hauteur d'eau, débit et régime des crues) et géologiques (pente, dureté de la roche mère, cohésion des matériaux du lit et des berges).

Le calcul de la puissance spécifique de la rivière dans la traversée de Belfort confirme ce qui est observable : la Savoureuse est une rivière active. La dynamique fluviale et sédimentaire est visible par la présence d'exhaussements plus ou moins végétalisés dans le lit mineur et de traces d'érosion de berges.

Ω	puissance en W/m
ω	puissance spécifique en W/m ²
γ	poids volumique de l'eau en N/m ³
J	pente de la ligne d'énergie en m/m
Q	débit considéré en m ³ /s
l	largeur du lit pour le débit Q en m

Puissance : $\Omega = \gamma Q J$

Puissance spécifique : $\omega = \Omega / L$

Données d'entrée :

$\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$

On considère que le débit de la crue de pleins bords correspond à la crue de période de retour T=2ans

Q = 63.9 m³/s

La pente moyenne de la ligne d'énergie approchée par la pente moyenne du fond du lit estimée à partir des données topographiques.

J = 0.0031 m/m

Puissance calculée :

$\Omega = 1943.26 \text{ W/m}$

La largeur moyenne pour le débit de pleins bords est évaluée à partir des profils en travers :

L = 25.0 m

La puissance spécifique du cours d'eau est :

$\omega = 77.73 \text{ W/m}^2$

< 10 W/m ²	Rivière non active	
10 à 30 W/m ²	Rivière assez faiblement active	
30 à 100 W/m ²	Rivière active	X
> 100 W/m ²	Rivière fortement active	

Tableau 5 : Calcul de la puissance spécifique de la Savoureuse dans la traversée de Belfort

Le transport liquide est indissociable d'un transport solide. La rivière reçoit des particules emportées par les eaux de ruissellement sur le bassin, en arrache à ses berges et à son lit, en dépose et en reprend en fonction des gradients de vitesse. Lit et berges sont donc en perpétuel réajustement.

Les sédiments d'un cours d'eau sont susceptibles d'être mis en mouvement sous l'action des forces hydrodynamiques appliquées par l'écoulement et compte tenu de leur propre poids. Pour étudier la possibilité de mise en mouvement d'un grain sans cohésion de diamètre d , il faut considérer les différentes forces auxquelles il est soumis : la force de frottement, la force d'entraînement (force tractrice), la portance et son propre poids.

La « force » tractrice critique, c'est-à-dire de début d'entraînement d'un grain en rivière, peut se mettre sous la forme d'un paramètre adimensionnel τ^* , appelé paramètre de Shields.

La force tractrice

Pour une pente d'écoulement donnée J (en m/m) et en régime uniforme, la force tractrice est directement proportionnelle à la hauteur de l'écoulement h (en m) et s'écrit :

$$\tau = \rho g h J$$

avec τ en N/m^2 , h la hauteur d'écoulement, g est l'accélération de la gravité, ρ la densité de l'eau et J la pente de l'écoulement, souvent assimilée à la pente du lit.

Le critère de Shields

Lorsque la contrainte qui s'exerce sur le fond est connue, il s'agit de vérifier si elle est capable de mettre en mouvement les sédiments présents. Pour cela Shields (1936) a proposé d'utiliser une grandeur adimensionnelle τ^* obtenue à partir du ratio entre les forces motrices (contrainte exercée τ x la surface de la particule) et les forces stabilisatrices (poids de la particule) :

$$\tau^* = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)D}$$

où ρ_s est la densité du sédiment et D le diamètre de la particule.

Shields a montré qu'un grain soumis à un écoulement (écoulements turbulents rugueux, ce qui est le cas des écoulements en rivière) était mis en mouvement lorsque τ^* dépassait une valeur critique τ^*c .

Critère sur τ^*	Description du mouvement
pour $\tau^* < 0,027$	le grain de diamètre d est au repos ; le fond est plat
pour $0,027 < \tau^* < 0,047$	il y a apparition des tous premiers mouvements, mais pas assez pour générer un débit solide
pour $0,047 < \tau^* < 0,062$	le grain est charrié sur fond plat
pour $0,062 < \tau^* < 0,25$	le grain est charrié par dunes
pour $0,25 < \tau^* < 2,5$	le grain est transporté par dunes en suspension
pour $\tau^* > 2,5$ environ	le grain est transporté en suspension sur fond plat

Tableau 6 : Classification pratique de la mobilité d'un grain (Ramette, 1981)

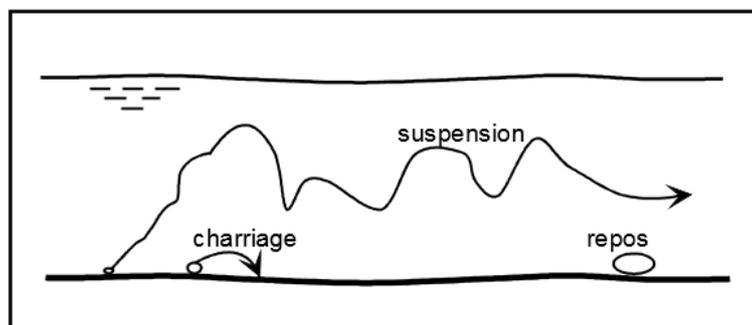


Figure 37 : Modes de transport solide en rivière

D'après les analyses récentes, la granulométrie du fond du lit de la Savoureuse présente les caractéristiques suivantes :

Fraction granulométrique passant au travers des tamis	Taille moyenne des grains	Type de grain
D10 (tamis par lequel passe 10% des grains)	8 mm	Sable /gravier
D50 (tamis par lequel passe 50% des grains)	41 mm	Cailloux
D90 (tamis par lequel passe 90% des grains)	80 mm	Blocs



En amont du pont Clémenceau



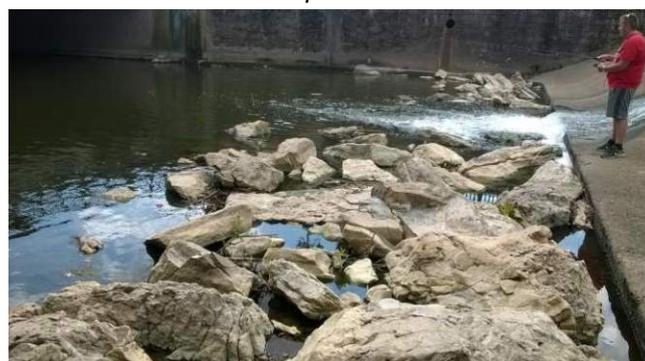
En aval du seuil de la passerelle des Arts



Sous le pont Carnot



Pont Denfert Rochereau



En aval du seuil du pont Richelieu

Tableau 7 : Echantillons granulométriques

Le paramètre de Shields a été calculé pour deux conditions d'écoulement sur la Savoureuse, le module et la crue de 1990 (cf. Figure 41 à Figure 44).

En condition normale d'écoulement, seules les plus petites particules sont en mouvement : en suspensions pour la majorité d'entre elles et charriées sur le fond du lit pour les autres. Les cailloux et les blocs sont au repos ou peuvent être occasionnellement charriés.

En situation de crue de février 1990, les sables, graviers et cailloux sont susceptibles d'être emportés par le courant. Les blocs sont fréquemment charriés.

Ceci explique que le transport sédimentaire ne soit pas totalement interrompu par la présence des seuils au travers du lit de la rivière. La contrainte d'entraînement des particules se trouvant au fond du lit est assez importante pour les mettre en mouvement même les plus grosses.



Figure 38 : Atterrissement sous le pont du Magasin



Figure 39 : Atterrissement en amont du pont Clémenceau

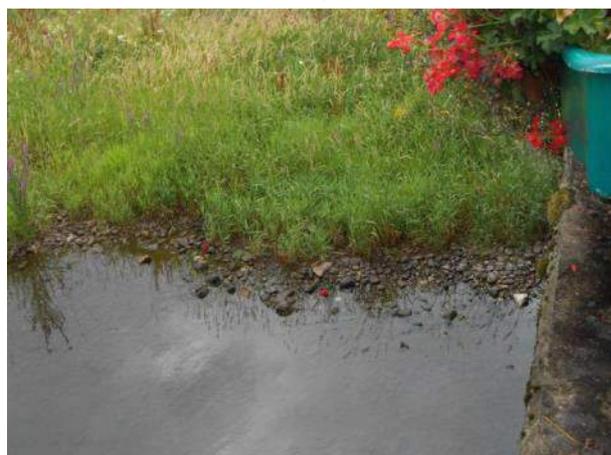


Figure 40 : Atterrissements en aval du pont Clémenceau

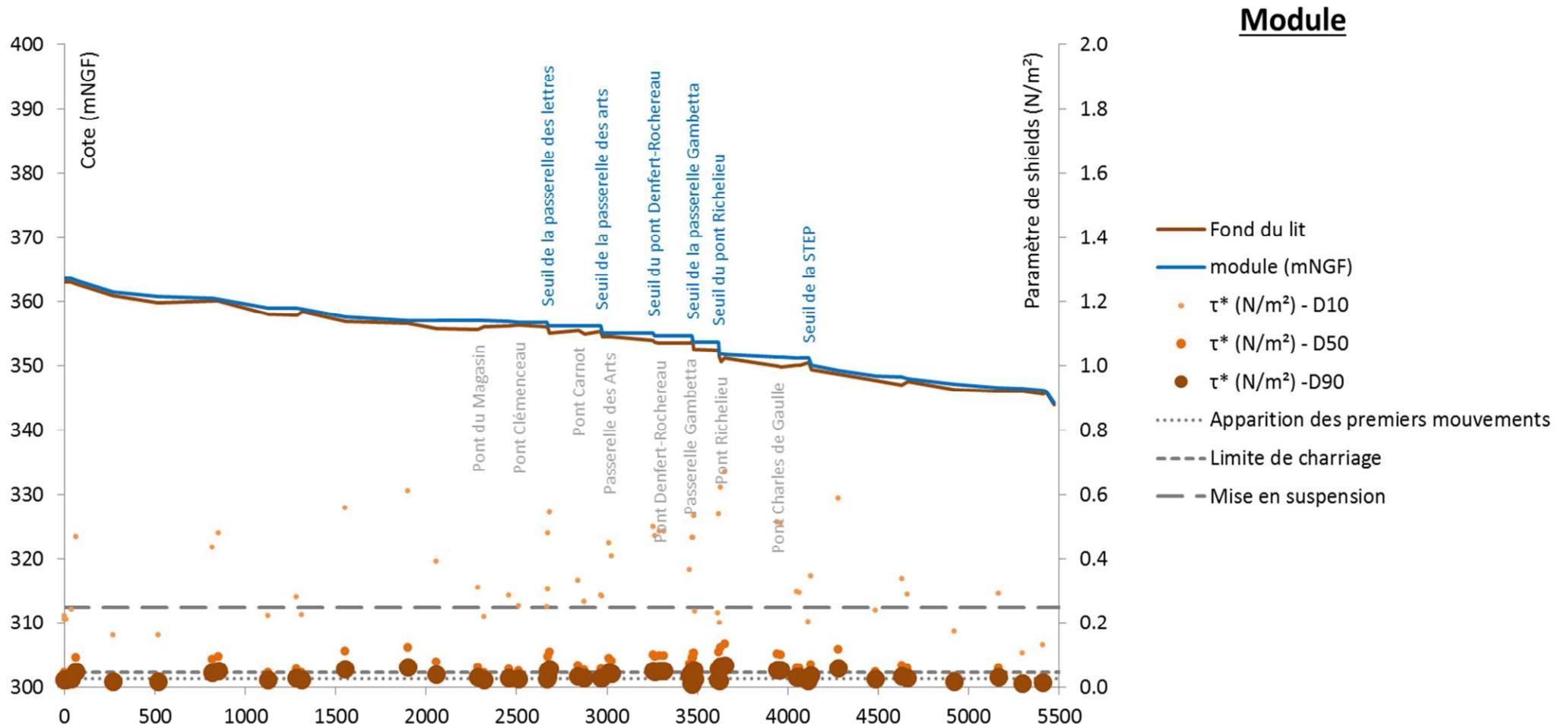


Figure 41 : Mise en mouvement des sédiments dans les conditions normales d'écoulement

Seules, quelques particules de diamètre inférieur à 8 mm peuvent être en suspension dans l'eau. Quelques particules plus grosses peuvent être localement en mouvement dans le fond du lit.

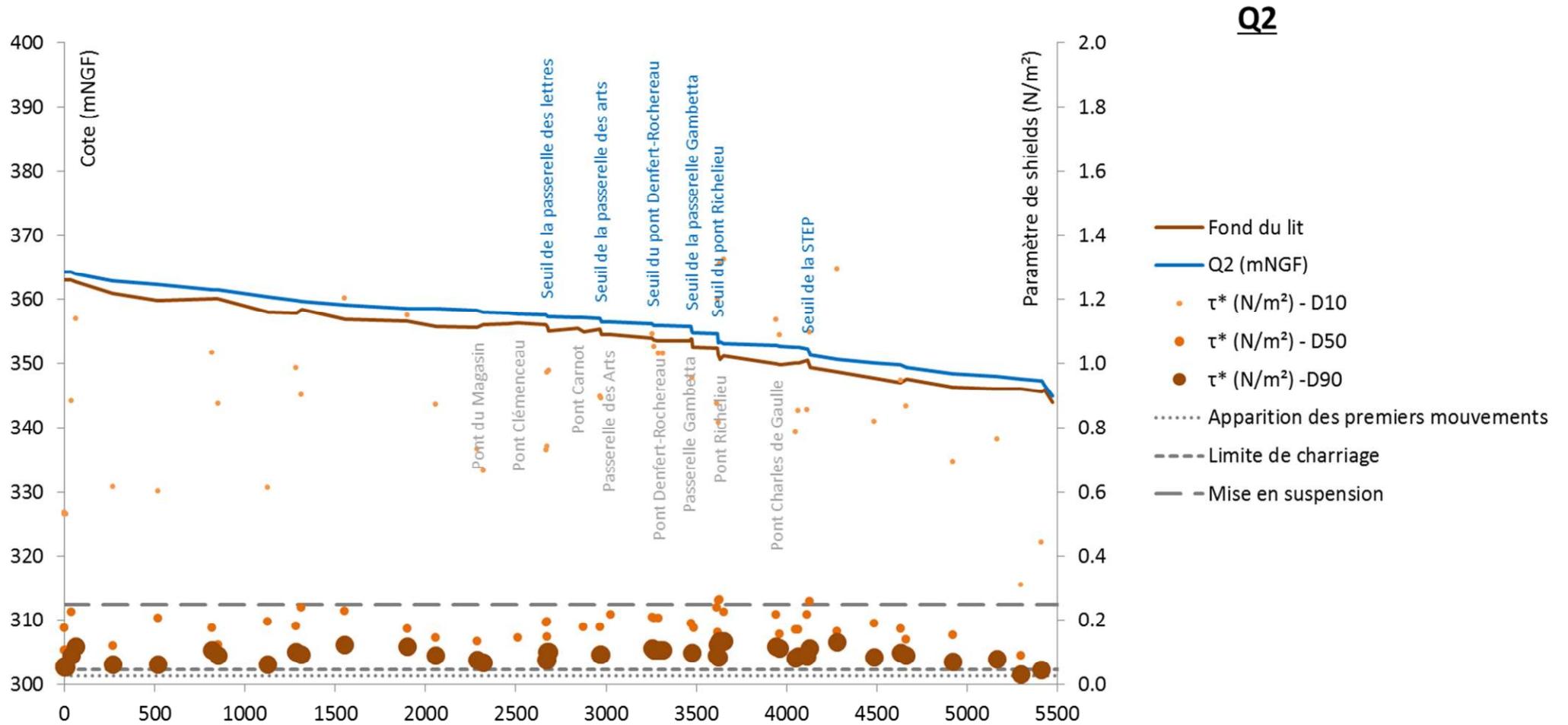


Figure 42 : Mise en mouvement des sédiments dans les conditions d'écoulement en crue biennale

Toutes les particules fines sont emportées par l'écoulement. La plupart des cailloux sont charriés dans le fond du lit. Certains blocs sont mis en mouvement.

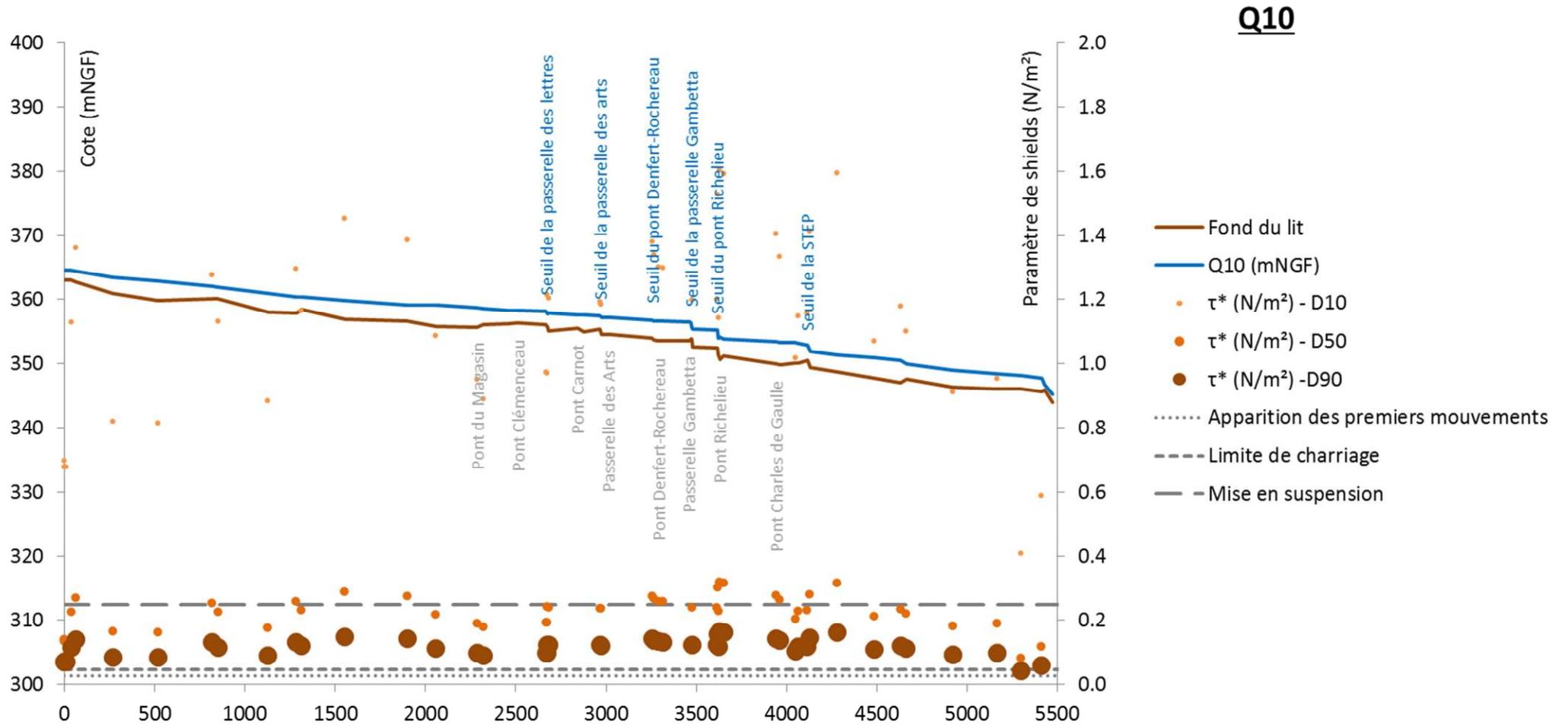


Figure 43 : Mise en mouvement des sédiments dans les conditions de la crue caractéristiques de période de retour 10 ans

Certains cailloux sont mis en suspension. Les éléments les plus grossiers sont mis en mouvement voire charriés par le courant.

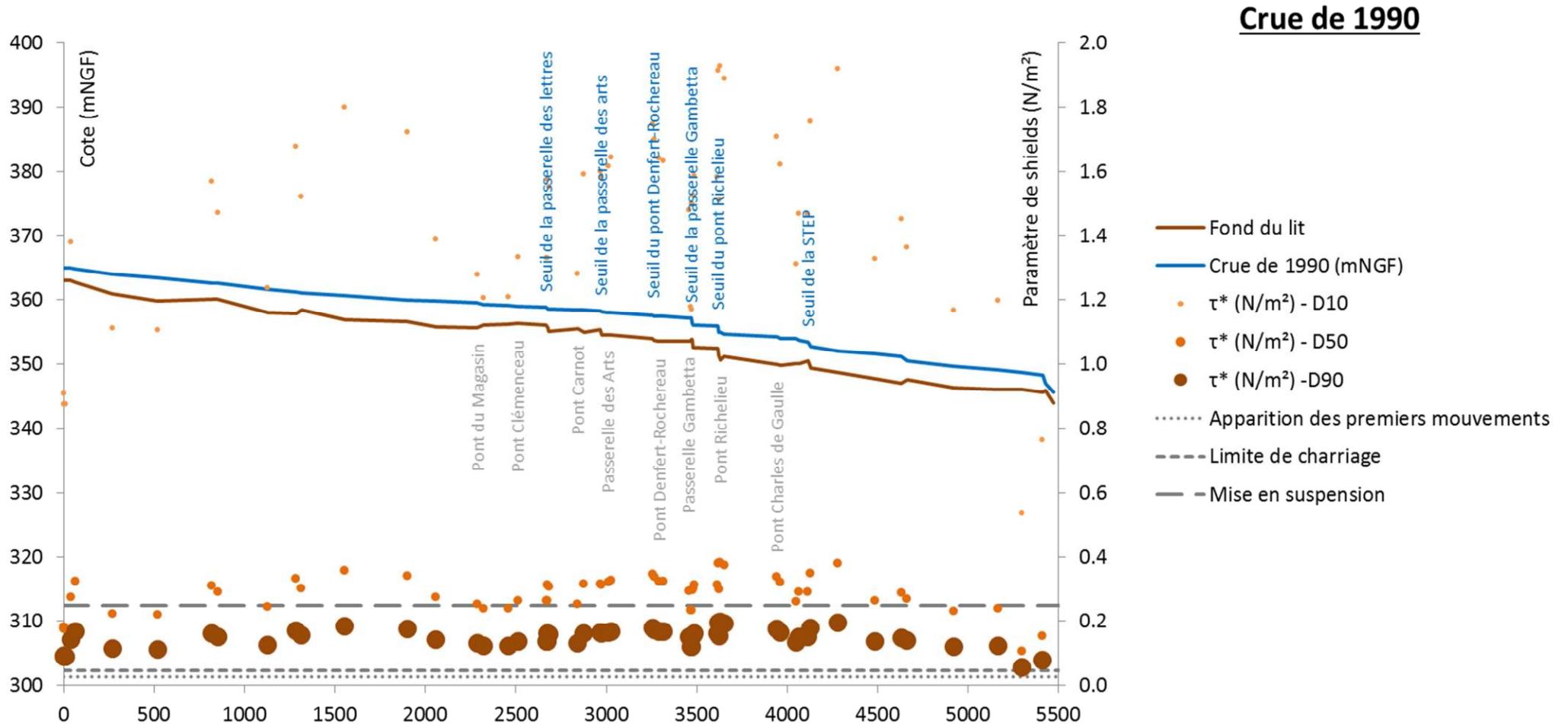


Figure 44 Mise en mouvement des sédiments dans les conditions de la crue de 1990

La plupart des blocs est charriée par la rivière. Les cailloux sont mis en suspension. L'interprétation du calcul du paramètre de Shields permet de comprendre la présence ponctuelle de matériaux grossiers en aval de certains seuils : ces derniers ont été emporté par le courant et déposé immédiatement en aval de l'ouvrage.



Figure 45 : Présence d'exhaussement dans le lit de la Savoureuse en amont du seuil de la passerelle des Lettres



Figure 46 : Présence de quelques blocs et atterrissement caillouteux en aval du seuil des Lettres



Figure 47 : Pont Carnot – absence d'atterrissement



Figure 48 : Présence de blocs, cailloux et atterrissements en aval immédiat du seuil de la passerelle des Arts



Figure 49 : Entre le seuil du pont Denfert-Rochereau et le seuil Gambetta



Figure 50 : Présence de trace d'érosion de berges entre les seuils Gambetta et Richelieu



Figure 51 : Blocs charriés en aval immédiat du seuil Richelieu



Figure 52 : Présence d'atterrissements arborés en aval du pont Richelieu

Les vues aérienne suivantes (Figure 53) datent de 1949, 1980, 2003 et 2013. Elles donnent un aperçu de l'évolution des atterrissements dans le lit mineur de la Savoureuse. Il est à noter la sédentarité des atterrissements suivants :

- en rive droite au niveau du pont du Magasin
- en amont et en aval du pont Clémenceau,
- entre le seuil de la passerelle des Lettres et le seuil de la passerelle des Arts,
- en rive gauche sous la passerelle des Arts,
- sous la passe rive droite du pont Denfert Rochereau.

En fonction du niveau d'eau lors de l'observation ou de la prise de vue aérienne, le faible tirant d'eau entre le pont Denfert-Rochereau et le pont Richelieu est visible.

La Figure 54 propose une synthèse de la dynamique sédimentaire sur le périmètre d'étude.

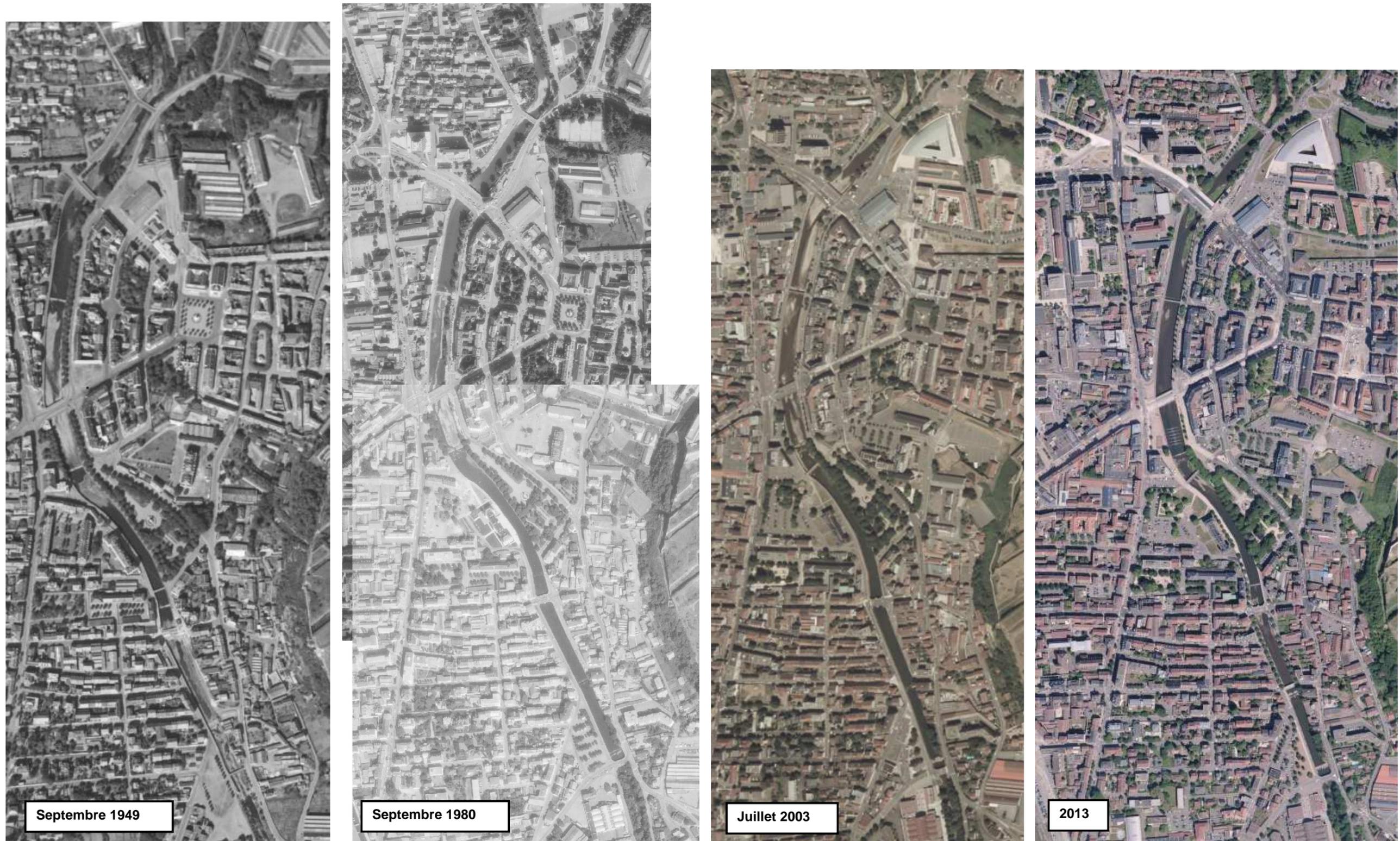


Figure 53 : Vues aériennes de 1949, 1980, 2003 et 2013

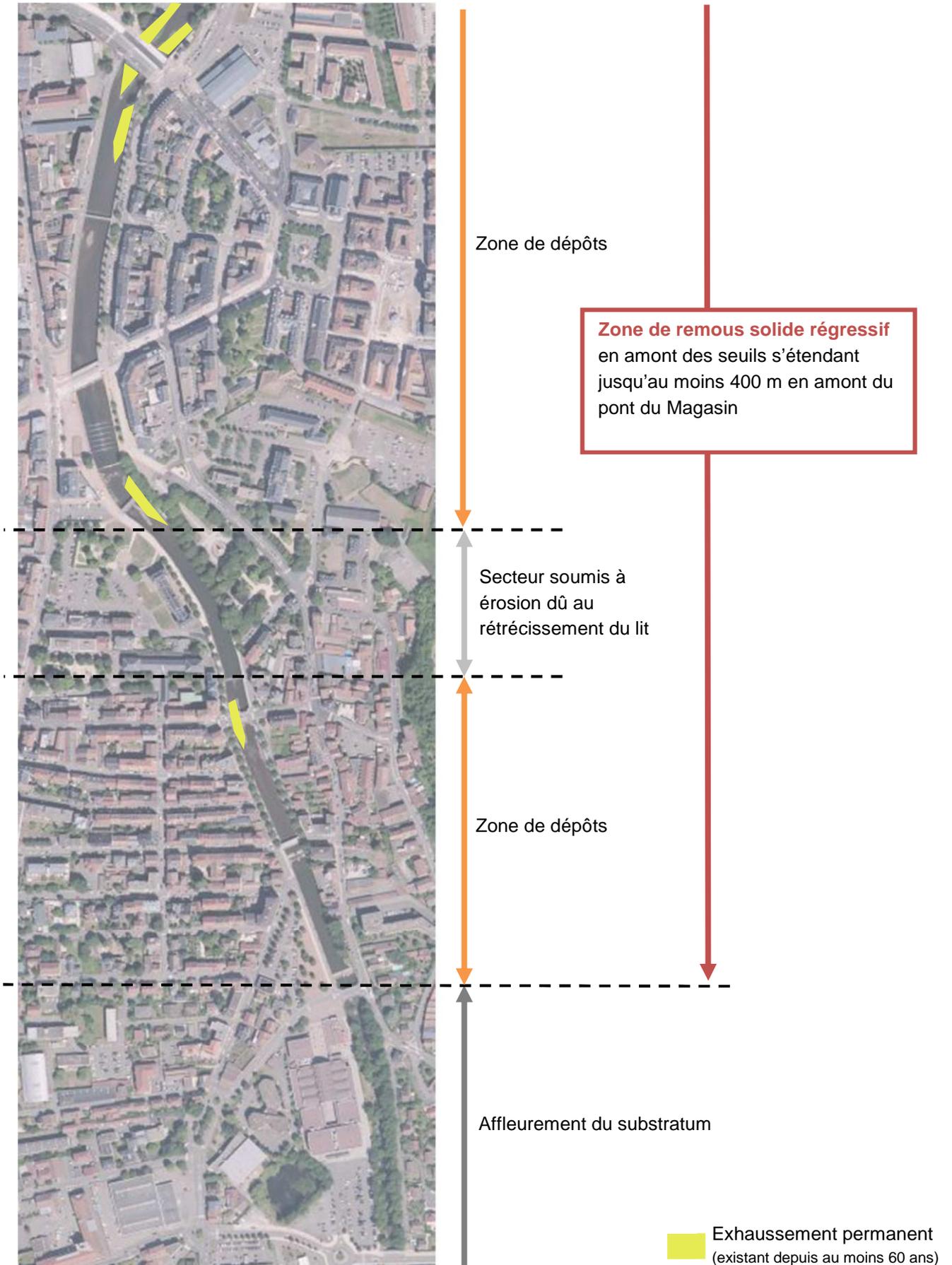


Figure 54 : Synthèse sur la dynamique sédimentaire de la Savoureuse dans la traversée de Belfort

La suppression totale ou partielle d'un seuil se traduira très probablement par un apport brutal et massif de matériaux en aval : ceux qui seront générés par l'érosion régressive dans le remous solide de l'ouvrage, cette érosion régressive pouvant se propager très au-delà du remous liquide et risquant de menacer certains biens et usages établis sur le linéaire de ce remous solide : **ponts et protections de berges**, notamment.

D'après la formulation de Ramette, il peut être estimé l'épaisseur de sol susceptible d'être mis en mouvement à partir d'un certain seuil de débit. Il semble que l'essentiel du transport solide ait lieu au sein de cette couche appelée couche de transition solide/liquide. Cette dernière est comprise entre la cote moyenne initiale du fond du lit (Z_i) et la cote moyenne des fonds non perturbés (Z_m).

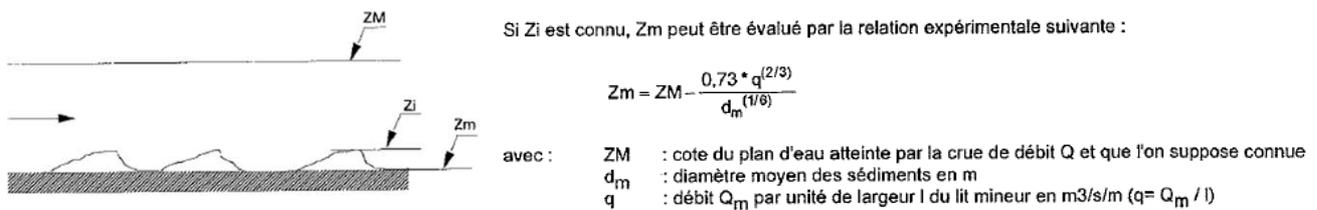


Figure 55 : Formulation de calcul l'affouillement généralisé selon Ramette

La hauteur d'affouillement a été calculée selon la méthode de Ramette au niveau des ponts situés en amont de seuils et présentant un ou plusieurs piles en rivière.

Nom du pont	Nb de pile	Largeur de la rivière (m)	Largeur des piles (m)	Longueur du pont dans le sens des écoulements (m)	Point bas du fond du lit (mNGF)	Crue biennale			Crue de 1990		
						Hauteur d'eau simulée (mNGF)	Cote du fond après affouillement (m)	Hauteur d'affouillement (m)	Hauteur d'eau simulée (mNGF)	Cote du fond après affouillement (m)	Hauteur d'affouillement (m)
Pont du Magasin	1	28.5	0.50	14.0	355.62	358.20	355.62	0.00	359.48	355.23	0.40
Pont Clémenceau	2	36.5	1.10	33.0	356.27	357.76	355.95	0.32	358.96	355.36	0.91
Passerelle des Lettres	1	29.5	1.00	3.0	355.58	357.21	355.13	0.45	358.55	354.40	1.18
Pont Carnot	2	31.5	3.00	21.0	355.45	357.11	355.11	0.34	358.42	354.45	1.00
Pont Denfert-Rochereau	1	24.0	2.00	14.0	353.49	355.94	353.49	0.00	357.40	352.64	0.86

Tableau 8 : Calcul de l'affouillement généralisé au niveau des ponts à enjeu – état actuel

Pour certains de ces ponts, la présence d'atterrissement depuis plusieurs décennies a contribué à engraisser le lit mineur de la Savoureuse. Une cote maximale admissible a été établie dans le cadre du diagnostic des ouvrages d'art sur la base des plans disponibles.

Ainsi, les ponts du Magasin et Clémenceau disposent d'une marge respectivement de 0.40 et 1.05 m avant d'atteindre un niveau de risque de déstabilisation des ouvrages (piles notamment).

Contrairement à ces deux ouvrages, l'étude des fondations des ponts Carnot et Denfert-Rochereau révèle un affouillement en cours développement de 0.10 et 0.95 m.

L'analyse de la stabilité des quais et des ponts s'inscrivant dans les zones d'influence des seuils devra être finement réalisée en fonction des aménagements envisagés.

5. Identification des contraintes hydrauliques d'aménagement

5.1 Plan de Prévention des risques d'Inondation de la Savoureuse, du Rhône et de la Rosemontoise

5.1.1 Prescription et arrêté

L'élaboration du Plan de Prévention des Risques d'inondation (PPRi) a été prescrite par le Préfet, par l'arrêté 1893 du 29 octobre 1996 pour le Territoire de Belfort.

L'arrêté portant approbation du plan de prévention des risques d'inondation de la Savoureuse, du Rhône et de la Rosemontoise date du 14 septembre 1999.

5.1.2 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.

5.1.3 Cartographie réglementaire 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.

Il est rappelé ici, à titre informatif.

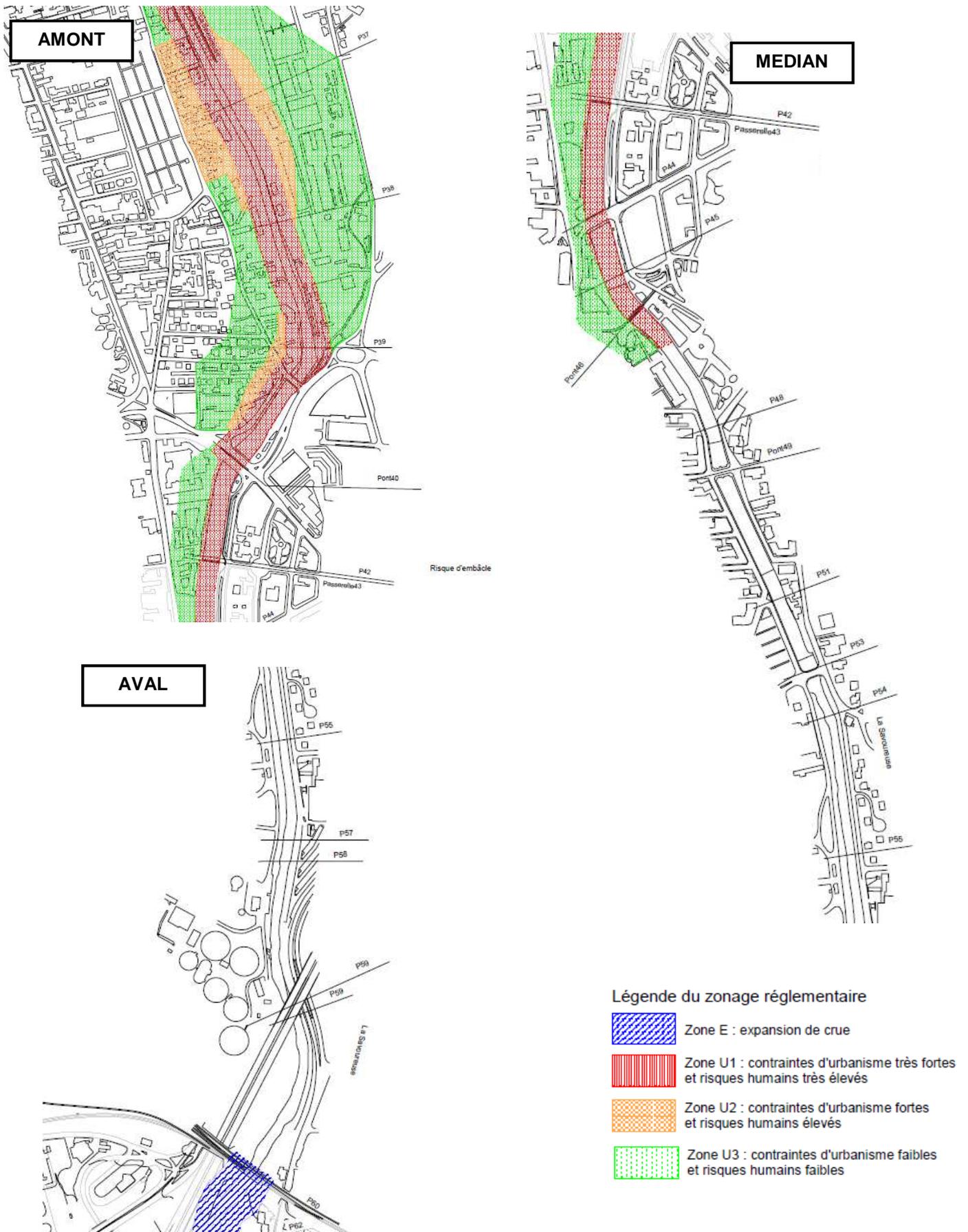


Figure 56 : Carte réglementaire du PPRI

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	<i>362,90</i>	<i>362,15</i>
P34	<i>362,65</i>	<i>361,90</i>
P36	<i>362,05</i>	<i>361,65</i>
P37	<i>361,60</i>	<i>361,20</i>
P38	<i>361,10</i>	<i>360,70</i>
P39	<i>361,00</i>	<i>360,60</i>
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 (aménagement 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 9 : Cotes de référence calculées par modèle mathématique

Source : Annexe du PPRi

5.1.4 Règlement du PPRi

Conditions communes à toutes les zones

Autorisation d'occupation du sol

Les travaux ou constructions réalisés par l'État ou par une collectivité territoriale dans le cadre des mesures prises pour assurer une meilleure protection des personnes et des biens (digues par exemple), y compris tout système de détection ou d'alerte, sont autorisés. Une analyse hydraulique du projet (incidences, mesures compensatoires, dispositions préventives) doit être réalisée au préalable.

Infrastructures de transport

L'implantation d'infrastructures de transport (route, pont) est exceptionnellement autorisée 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 conviendra alors :

- 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.

Remblais liés aux infrastructures

Les dépôts de remblais de quelque hauteur qu'ils soient sont interdits dans toutes les zones.

Cependant, les remblais liés à la construction d'infrastructures de transport ou de lutte contre les inondations sont autorisés sous réserve de respecter les prescriptions liées aux infrastructures de transport précitées.

Le secteur d'étude est concerné par les zones réglementaires U1 - très fortes contraintes d'urbanisme, U3 - très faibles contraintes d'urbanisme et les zones non inondables le long du cours d'eau.

Zone U1 (rouge)

Sont interdits :

- Les constructions de toutes natures autres que celles visées à l'article 2 du chapitre 4 du règlement du PPRi,
- Les remblais, à l'exception de ceux mentionnés au chapitre 2.

Occupation et utilisation du sol admises :

- Les déblais visant à améliorer l'écoulement et le stockage des eaux.
- La plus grande transparence hydraulique possible des bâtiments devra être assurée. Les nouveaux bâtiments autorisés devront être construits sur pilotis au-dessus de la cote de référence.
- Les clôtures devront offrir la plus grande transparence hydraulique possible en comportant au moins 1/3 de vides. En cas de murs bahut, ceux-ci seront dotés de dispositifs de vidange facilitant le ressuyage après crue.

<p><i>Zone U3 (verte)</i></p>	<p><u>Sont interdites :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Les constructions de quelque nature qu'elles soient disposant d'un niveau habitable ou utilisable situé au-dessous des cotes de référence. Cette cote est fixée par mesure de précaution à 50 cm au-dessus du point le plus haut du terrain naturel sur lequel porte l'emprise de la construction. <p><u>Occupations et utilisations du sol admises :</u></p> <p>Les occupations et utilisations du sol non visées ci-dessus sont admises. Toutefois, les conditions suivantes sont à respecter :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Les constructions nouvelles devront être surélevées afin de situer les planchers habitables ou utilisables au-dessus de la cote de référence par création d'un vide sanitaire, de pilotis ou de remblais strictement limités à l'emprise du sol de la construction. Cette disposition ne s'applique pas en cas de restauration suite à sinistre. Les remblais sous terrasse sont interdits. La création d'un remblai avec plan incliné pour l'accès aux piétons et véhicules est admise. ■ Les modifications du bâti existant ne doivent pas augmenter les risques et ne peuvent avoir pour effet : <ul style="list-style-type: none"> ○ de créer de nouvelles ouvertures à un niveau inférieur à la cote de référence, sauf si elles concourent à diminuer la vulnérabilité du bâtiment, ○ de créer ou de transformer en niveaux habitables ou en locaux d'activités un niveau inférieur à la cote de référence. ■ Les clôtures devront offrir la plus grande transparence hydraulique possible en comportant au moins 1/3 de vides. En cas de murs bahut, ceux-ci seront dotés de dispositifs de vidange facilitant le ressuyage après crue.
<p><i>Zones non inondables le long des cours d'eau</i></p>	<p>Afin de respecter le lit moyen des cours d'eau et leur bon fonctionnement hydraulique, sur un franc bord (non cartographié) de 4 m, <u>sont interdits :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Les remblais de quelque nature et hauteur qu'ils soient à l'exception de ceux visés dans les conditions communes à toutes les zones, ■ Les clôtures faisant obstacle à l'écoulement des eaux, à l'exception des travaux de lutte contre les crues régulièrement autorisés par l'autorité compétente, ■ Les constructions nouvelles de toute nature (l'aménagement et l'extension des constructions existantes à moins de 4 m du cours d'eau étant admis sans création de niveau ou d'ouvertures sous le niveau du terrain naturel).
<p><i>Mesures collectives de prévention et de Sauvegarde</i></p>	<p>Tout aménagement hydraulique de la rivière et de ses abords (de type digues ou retenues), ultérieur au P.P.R., devra faire l'objet d'une étude qui justifiera que les aménagements proposés répondent aux objectifs du P.P.R. et en particulier :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ diminuent le risque pour les personnes et les biens exposés, ■ préservent les capacités d'écoulement de la rivière ainsi que les champs d'expansion des crues,

■ **prennent en compte la sauvegarde de l'équilibre des milieux.**

Il est conseillé de réaliser l'étude des aménagements à l'échelle du bassin versant de la Savoureuse selon trois niveaux de protection :

1. Conservation du lit majeur et réhabilitation de zones d'inondabilité naturelle du cours d'eau : Il est possible en certains endroits de provoquer des débordements plus fréquemment par la création de seuils dans les cours d'eau, l'évacuation des remblais actuels en zone inondable, ou l'abaissement du niveau des berges.
2. Aménagement de bassins d'écrêtement et de bassins de contrôle du ruissellement afin de contrôler et d'écrêter les crues.
3. Aménagement de protections locales : Les protections locales sont destinées à combler le vide de protection laissé par les deux premiers niveaux d'intervention. Elles ne pourront en aucun cas être envisagées de façon ponctuelle sans étude globale de l'ensemble de l'écoulement de la rivière.

5.2 Contraintes hydrauliques

Les contraintes hydrauliques à considérer dans le dimensionnement des projets 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 aucuns 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.