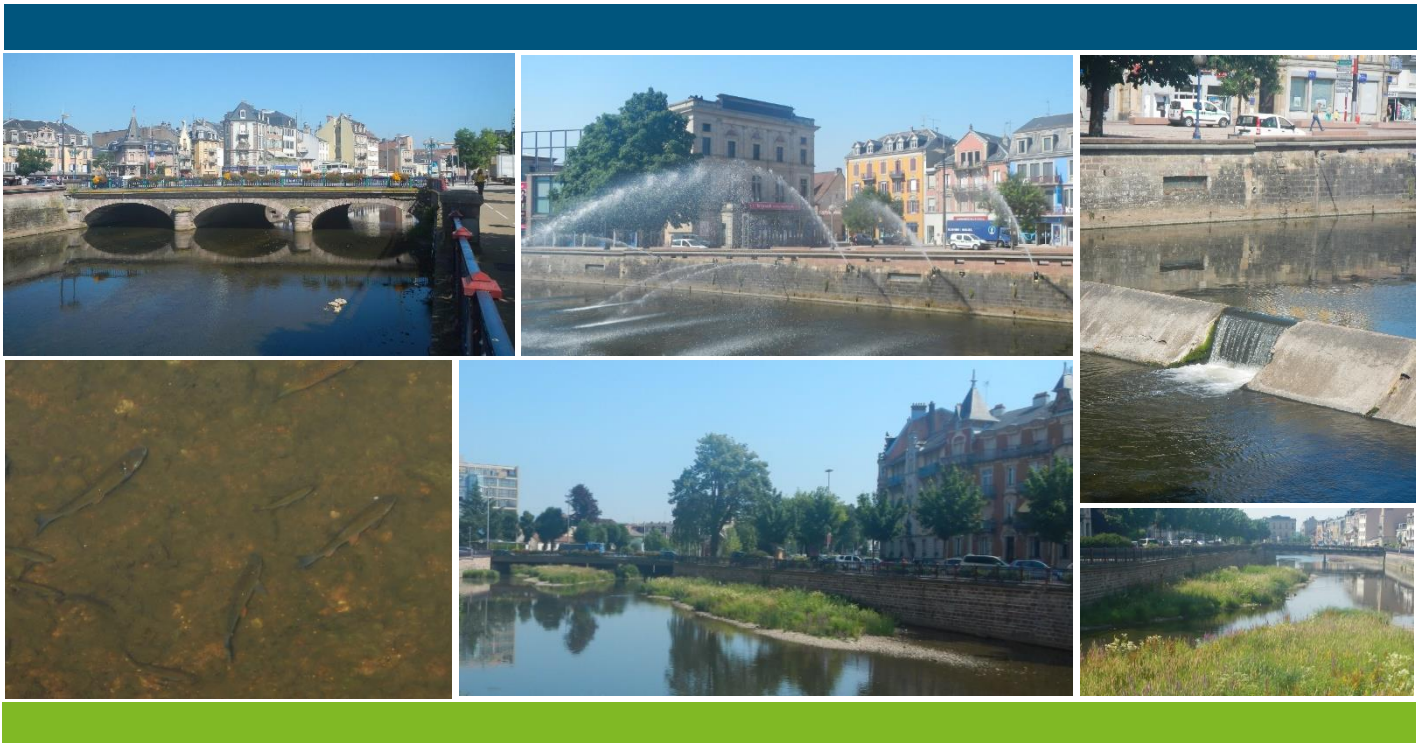


# Rapport de Stage de Fin d'Etudes

## Opération de restauration de la continuité écologique de la Savoureuse à Belfort



Février-Juillet 2017

Léa Bazin

Promotion 56 (EIVP) / Promotion Stuttgart (ENGEES)



# Remerciements

Je remercie chaleureusement M. Remy Croix qui m'a accueillie chez Egis Eau dans un domaine qui m'intéresse particulièrement. Je le remercie également pour sa disponibilité et pour le CDI qu'il m'a proposé à l'issue de ce stage.

Je remercie les ingénieurs qui m'ont intégrée dans l'équipe et qui m'ont apporté des conseils tout au long de mon stage.

Je remercie particulièrement mes tuteurs de l'EIVP et de l'ENGEES : Dr. Nathalie Touze-Foltz et Dr. Pascal Finaud-Guyot pour leur aide et leurs réponses sur des questions techniques complexes.

Je remercie également tous les autres chercheurs et ingénieurs que j'ai contactés et avec qui j'ai eu l'occasion d'échanger au sujet de mon stage.

Je remercie mes parents, et ma famille pour leur soutien et leur encouragement tout au long de mes études.

# Table des matières

Remerciements .....	3
Introduction.....	9
<b>1. Structure d'accueil .....</b>	<b>10</b>
1.1 Groupe Egis.....	10
1.2 Société Egis Eau .....	10
1.3 Service Etudes et travaux fluviaux.....	11
1.4 Intérêt de l'organisme d'accueil et missions du stagiaire.....	12
1.4.1 Choix de l'organisme d'accueil .....	12
1.4.2 Missions de stage.....	12
1.4.3 Moyens à disposition .....	12
<b>2. Présentation du projet.....</b>	<b>13</b>
2.1 Notion de continuité écologique .....	13
2.1.1 La continuité « biologique » des rivières .....	14
2.1.2 La continuité sédimentaire des rivières .....	15
2.2 Périmètre du projet .....	16
2.3 Un projet urbain avec des enjeux fluviaux .....	16
2.3.1 Un projet de restauration de la continuité écologique.....	16
2.3.2 Solutions retenues pour le projet.....	19
<b>3. Etude de l'érosion de la rivière .....</b>	<b>21</b>
3.1 Ponts dont la stabilité peut être impactée .....	21
3.2 La chronologie de construction des ponts et des seuils .....	22
3.3 Etude de l'influence des seuils .....	24
3.3.1 Méthode du calcul de la pente d'équilibre avec le paramètre de Shields.....	24
3.4 Etude de l'affouillement généralisé et localisé.....	33
3.4.1 Etude de l'affouillement généralisé .....	33
3.4.2 Etude de l'affouillement localisé .....	34
3.5 Discussions et conclusion .....	36
3.5.1 Conclusion de l'étude du transport sédimentaire .....	36
3.5.2 Discussions autour des fondations des ponts.....	36
3.5.3 Conclusion de l'étude du transport sédimentaire en rivière .....	37
<b>4. Conclusion générale .....</b>	<b>39</b>
4.1 Difficultés rencontrées et solutions apportées .....	39
4.2 Apports professionnels et perspectives d'évolution.....	39
4.3 Conclusion du stage .....	40

# Liste des annexes

<b>ANNEXES .....</b>	<b>44</b>
<b>Annexe 1 Calendrier du stage et missions effectuées .....</b>	<b>45</b>
<b>Annexe 2 Présentation du projet et de la promenade urbaine.....</b>	<b>46</b>
<b>Annexe 3 Etude de la granulométrie du cours d'eau .....</b>	<b>47</b>
<b>Annexe 4 Profils en long de la Savoureuse .....</b>	<b>48</b>
<b>Annexe 5 Pente d'équilibre calculée à l'état projet.....</b>	<b>49</b>
<b>Annexe 6 Principe de calcul des différents types d'affouillements .....</b>	<b>51</b>
<b>Annexe 7 Affouillement généralisé du fond du lit.....</b>	<b>58</b>

# Liste des figures

Figure 1 : Implantation d'Egis en France .....	11
Figure 2 : Schéma d'une passe à poisson à fente verticale et photo (Photo : Voegtlé – Ecogea).....	14
Figure 3 : Pont du magasin lors de la crue de 1990 (source : ICC territoire de Belfort).	15
Figure 4 : Plan de situation du projet .....	16
Figure 5 : Les ponts et les seuils présents sur la zone d'étude .....	17
Figure 6 : Schémas d'un comblement de retenu et de l'érosion progressive située à l'aval .....	19
Figure 7 : Photographie d'une semelle du pont Denfert Rochereau – Photo Egis .....	19
Figure 8 : Positionnement des ponts d'intérêt (Photo : Egis) .....	22
Figure 9 : Schémas illustrant la méthode afin de déterminer l'étendue de l'érosion et son épaisseur .....	26
Figure 10 : Schéma représentant le processus de l'étude paramétrique pour la pente à l'équilibre.....	28
Figure 11 : Seuil des Arts - étude paramétrique sur la pente à l'équilibre .....	29
Figure 12 : Schéma représentant le processus de l'étude paramétrique pour le calcul de la pelle .....	30
Figure 13 : Photo du seuil des arts de la Savoureuse - EGIS .....	30
Figure 14 : Seuil des lettres, test paramétrique du calcul des pelles en amont du seuil...	31
Figure 15 : Etat des piles du pont Denfert-Rochereau (photos : Egis) .....	32
Figure 16 : Comparaison des méthodes de calcul de l'affouillement total à l'état projet (EP) et à l'état actuel (EA) .....	35
Figure 17 : Diagramme de décision des niveaux de risque pour la stabilité des ponts. ...	37
Figure 18 : Type de risque pour l'affouillement des ponts selon les biefs.....	38

# Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des seuils existants.....	18
Tableau 2 : Espèces cibles de la Savoureuse .....	18
Tableau 3: Tableau des dates de construction des seuils et des ponts .....	23
Tableau 4 : Tableau des hypothèses générales.....	27
Tableau 5 : Récapitulatif de l'incision théorique et de l'impact au niveau des piles de pont .....	32
Tableau 6 : Delta des affouillements généralisés entre l'EA et l'EP .....	34
Tableau 7 : Comparaison des cotes d'affouillement localisé et de la cote d'implantation des fondations (état projet) .....	35

# Résumé

Le stage réalisé au sein d'Egis Eau, concernait la restauration de la continuité écologique de la Savoureuse à Belfort. La solution apportée pour rétablir la franchissabilité piscicole est d'araser tout ou partie des seuils de la zone d'étude. Ma mission concernait un sujet essentiel du projet : l'incision et l'érosion du lit après le réaménagement de la rivière et particulièrement après l'abaissement des 6 seuils concernés.

Lors de ce stage, j'ai estimé la hauteur d'incision théorique du lit en utilisant un modèle calculatoire élaboré à partir d'une feuille Excel. Afin de valider ce modèle je l'ai testé sur l'état actuel en réalisant une étude paramétrique.

Dans un deuxième temps, j'ai également étudié l'affouillement généralisé du lit et des piles de ponts afin de déterminer si ceux-ci seront stables en cas d'une crue majeure à l'état projet.

Ces études ont démontré que l'arasement des seuils induirait une instabilité avérée des ponts : Carnot et Denfert Rochereau.

# Abstract

Restoring the ecological continuity of the Savoureuse river in Belfort was my internship's goal within Egis Eau. The dams in place hinder and disrupt the river's continuity. Lowering or completely getting rid of the dam altogether has become necessary. I was in charge of an essential aspect of the project: the river's bed erosion after its modification and the lowering of the 6 concerned dams.

Therefore, during this internship, I needed to estimate the theoretical incision of the river's bed using a mathematical model with Excel. In order to validate that model, I tested it on its current state and did a parametrical study and estimated the erosion caused by the removal of the dam.

Then, I studied the scouring nearby the bridge pier in order to check the stability of the Savoureuse's bridges in case of a severe flood.

That study demonstrated that the erosion caused by the lowering of the dams would cause a proven instability of both Carnot and Denfert Rochereau bridges.

# Thésaurus

Fleuves, hydraulique à surface libre, hydraulique fluviale, hydromorphologie, transport sédimentaire, affouillement des piles de ponts, érosion, écologie, continuité écologique, seuil en rivière.



# Introduction

Les trames vertes et bleues, correspondant aux réseaux de corridors biologiques terrestres et aquatiques, font partie intégrante des documents d'urbanisme. Ces documents permettent de mettre en œuvre à l'échelle locale et en tenant compte des enjeux régionaux, une continuité écologique correspondant aux territoires concernés. Ils ont également pour but d'inscrire la préservation de l'environnement dans les grandes décisions d'aménagement du territoire. La restauration et la protection des milieux aquatiques et terrestres sont deux principaux objectifs inscrits dans l'article L110 du code de l'urbanisme concernant l'utilisation de l'espace des collectivités publiques<sup>1</sup>.

Mon stage, réalisé chez Egis Eau, concerne principalement la trame bleue (analogue à l'ensemble des réseaux hydrographiques) et plus précisément, la continuité écologique de la rivière la Savoureuse à Belfort.

Avant la loi sur l'eau de 1964, les pratiques et gestions des milieux aquatiques étaient bien différentes des préoccupations actuelles. L'objectif principal consistait à faciliter les usages anthropiques en créant des barrages, en canalisant les rivières ou encore en les redressant sans se soucier des conséquences environnementales. La notion de restauration de la continuité écologique des milieux aquatiques et humides a été reprise de façon plus précise par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) créée en octobre 2000. Cette directive européenne a pour but de définir des objectifs dans le but d'atteindre le bon état écologique des masses d'eau. Le terme de trame bleue a été défini en juillet 2010 par le Grenelle 2 de l'environnement<sup>2</sup>. Cette trame verte et bleue a pour objectif de préserver la biodiversité en empêchant la fragmentation des milieux naturels.

L'aménagement de la Savoureuse, hérité du 19<sup>ème</sup> siècle, a fait apparaître des seuils ne permettant plus la circulation naturelle de certaines espèces. Aujourd'hui, malgré le fait qu'elle reste un formidable vecteur d'animation au sein de Belfort, la Savoureuse représente un ensemble de ruptures écologiques et urbaines. Cette rivière est classée en catégorie 2 (objectifs de transit sédimentaire et espèces indicatives à considérer pour la libre circulation piscicole) au titre de l'article L214-17 du Code de l'Environnement. La Ville doit donc d'ici 2018 restaurer la libre circulation sédimentaire et piscicole.

Quels seront les impacts hydromorphologiques du rétablissement de la continuité écologique de la Savoureuse à Belfort ?

Une première partie de ce rapport concernera, la description de la structure d'accueil, mon implication dans l'étude du transport sédimentaire de la Savoureuse, puis je décrirai ensuite l'étude sédimentaire que j'ai réalisés dans la suite de mon stage, en phase projet. Enfin j'explicitai quels apports professionnels ce stage de 6 mois m'a procurés et les difficultés que j'ai pu rencontrer.

---

<sup>1</sup> J. Brouard-Masson, M. Cheret, L. Letessier - Bureau de l'intégration de la biodiversité dans les territoires, "Trame Verte et Bleue et Documents d'urbanisme," Juillet 2013.

<sup>2</sup> "Code de l'environnement - Article L371-1," <https://www.Legifrance.Gouv.fr>, Juillet 12, 2010.

# 1. Structure d'accueil

## 1.1 Groupe Egis

Egis est un groupe Français de conseil, d'ingénierie, de montage de projets et d'exploitation dans de nombreux domaines : Aéroportuaires, Maritimes et Fluviaux, Routiers, du Bâtiment, de l'Eau, de l'Energie, de l'Environnement, de l'Industrie, des Mines, des Ouvrages d'art et de la Géotechnique, des Systèmes, du Transport Ferroviaire et du Transport urbain. Autrefois Scetauroute (Egis Route), la société devient Egis en 1998 et fusionne en 2007 avec plusieurs sociétés : BCEOM (Bureau d'Etudes pour les Equipements d'Outre-Mer), Semaly (Egis Rail) et Isis (Egis Mobilité). Enfin, Guigues (spécialisé dans l'environnement) en 2010 ainsi qu'Iosis (spécialisé dans le bâtiment et le génie civil nucléaire) en 2011 intègrent Egis.

Egis réalise en 2015 60% de son chiffre d'affaires à l'international avec une présence dans plus de 100 pays. Elle regroupe 13 000 collaborateurs dont 70% sont répartis à l'étranger.

Egis est une filiale appartenant à 75% à la Caisse des Dépôts et à 25% à Iosis Partenaires (actionnariat des cadres partenaires et des salariés), son chiffre d'affaires est de 937 M€ en 2015.

## 1.2 Société Egis Eau

La société Egis Eau est spécialisée dans l'ingénierie des métiers liés à l'eau, à l'environnement et à l'énergie. Nous pouvons distinguer 5 domaines différents : Eaux urbaines, eaux rurales et fluviales, eaux industrielles, port et littoral, et environnement énergie et climat.

Egis Eau propose à ses clients des solutions innovantes et avec des prestations diversifiées qui concernent à la fois le Conseil et la stratégie, les Etudes générales et la maîtrise d'œuvre.

Le chiffre d'affaires d'Egis Eau s'élève à 60 M€ dont 35% est généré à l'international.

### 1.3 Service Etudes et travaux fluviaux

Mon stage s'est déroulé au sein du site d'Egis Eau à Guyancourt dans lequel j'ai intégré le service Etudes et Travaux Fluviaux. (Voir Figure 1).

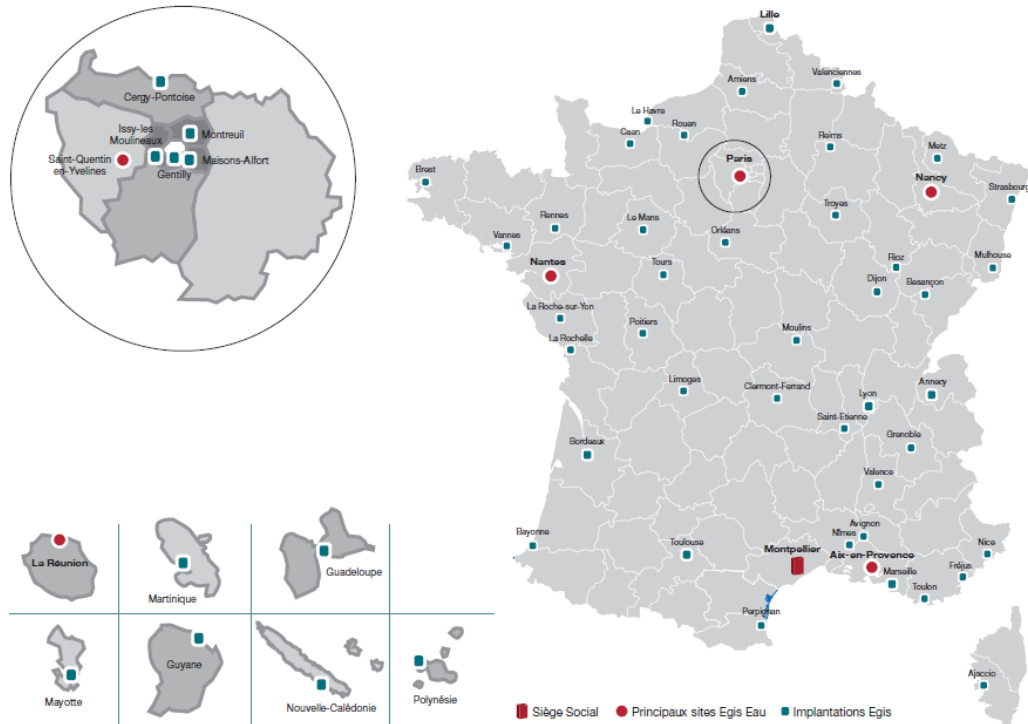


Figure 1 : Implantation d'Egis en France

Les études de ce service concernent le domaine fluvial en général, sur des problématiques liées à la lutte contre les inondations, à la continuité écologique des cours d'eau, à l'optimisation des ressources en eaux, à la navigation, à la sécurité des ouvrages hydrauliques et à l'énergie. Egis se positionne comme le leader dans la réalisation des digues et d'ouvrages hydrauliques associés. Il obtient par ailleurs un agrément en 2011 pour la sécurité des ouvrages hydrauliques.

Les deux principaux sites d'Egis Eau dans le domaine fluvial sont situés à Guyancourt et à Montpellier. Guyancourt s'engage sur les études de la moitié Nord de la France et Montpellier sur la moitié Sud.

Dans le paragraphe suivant, j'explique mes motivations concernant le choix de l'organisme d'accueil et je présente mon calendrier de stage ainsi que les missions associées.

## 1.4 Intérêt de l'organisme d'accueil et missions du stagiaire

### 1.4.1 Choix de l'organisme d'accueil

En réalisant mon stage chez Egis Eau, je souhaitais mettre à profit l'enseignement de mes deux cursus. En effet, ce stage me permettait de mettre en pratique mes connaissances en hydraulique et en génie civil. Mon stage de deuxième année (à l'ENGEES) a été réalisé dans le domaine fluvial et ce TFE réaffirme ma volonté de travailler dans ce secteur. Par ailleurs, j'ai beaucoup apprécié mon stage de 2ème année (à l'EIVP) chez Hydratec et je visais un stage dans un bureau d'ingénierie.

### 1.4.2 Missions de stage

Mon stage était centré autour de la restauration de la continuité écologique de la Savoureuse à Belfort, projet que je présenterai dans les prochains chapitres. J'ai ainsi travaillé en collaboration avec le chef de projet sur de la maîtrise d'œuvre en stade PRO.

La première partie de mon stage concernait l'étude du transport sédimentaire de la Savoureuse. C'est cette partie (qui a été la mission la plus conséquente de mon stage) que je choisis de décrire dans toute la suite de ce rapport.

Par ailleurs, le projet a été différé dû à certains aléas, j'ai donc travaillé sur un autre cours d'eau pendant 10 semaines (la Marne à Créteil) le temps de la reprise du projet de Belfort.

Mon calendrier de stage et toutes les tâches que j'ai réalisées, figurent dans l'Annexe 1.

Le paragraphe suivant concerne les moyens mis à ma disposition durant le stage.

### 1.4.3 Moyens à disposition

Les moyens mis à ma disposition pour le stage étaient de manière générale tout le dossier de l'étude concernant le projet de Belfort, les logiciels Autocad et Arcgis, et enfin les résultats du modèle hydraulique en phase actuelle et en phase projet. J'avais également à disposition des ouvrages disponibles dans la bibliothèque interne d'Egis Eau.

Par ailleurs, je devais impérativement utiliser une feuille Excel afin de réaliser mon étude sédimentaire et non me servir d'un modèle de transport solide.

Dans le chapitre suivant, je définirai la continuité écologique, notion fondamentale de mon stage. Puis, je présenterai le projet, ses enjeux, son avancement vis-à-vis de l'étude réalisée par le bureau d'ingénierie et enfin, mon implication dans la suite de l'étude.

## 2. Présentation du projet

Dans cette partie, je définie la notion de continuité écologique qui peut être séparée en deux grandes parties : la continuité écologique et la continuité sédimentaire des rivières. Par la suite je présenterai le projet, son périmètre, son lien avec la continuité écologique et ses enjeux.

### 2.1 Notion de continuité écologique

Le sujet de mon stage concerne la continuité écologique de la rivière la Savoureuse à Belfort.

Avant la loi sur l'eau de 1964, les pratiques et gestions des milieux aquatiques étaient bien différentes des préoccupations actuelles. L'objectif principal consistait à faciliter les usages anthropiques en créant des barrages, en canalisant les rivières ou encore en rectifiant leur trajectoire sans se soucier des conséquences environnementales. Le terme de trame bleue, désigne le maillage de corridors biologiques correspondant aux zones humides et aquatiques, et a été défini en Juillet 2010 à l'article L371-1 du code de l'environnement<sup>3</sup>. C'est en 1992 qu'une nouvelle loi sur l'eau est instaurée, modifiant les principes de gestion de l'eau en affirmant que « l'eau fait partie du patrimoine commun de la nation. Sa protection, sa mise en valeur et le développement de la ressource utilisable, dans le respect des équilibres naturels, est d'intérêt général »<sup>4</sup>.

La notion de restauration de la continuité écologique des milieux aquatiques et humides a été reprise de façon plus précise par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) créée en octobre de l'an 2000<sup>5</sup>. Cette directive européenne a pour but de définir des objectifs pour atteindre le bon état écologique des masses d'eau. Les principaux enjeux sont de garantir une eau potable favorable aux réglementations sanitaires, de gérer l'eau durablement, de maîtriser sa production, de permettre des activités de loisirs et de préserver la biodiversité des milieux aquatiques.<sup>6</sup>

La continuité écologique des rivières, regroupe deux notions : d'une part la libre circulation des organismes aquatiques ou semi-aquatiques et d'autre part le fonctionnement

---

<sup>3</sup> "Code de l'environnement - Article L371-1," <https://www.Legifrance.Gouv.fr>, Juillet 12, 2010.

<sup>4</sup> "Code de l'environnement - Article L210-1," <https://www.Legifrance.Gouv.fr>, Décembre 2006.

<sup>5</sup> "Directive 2000/60/CE Du Parlement Européen et Du Conseil Du 23 Octobre 2000," <https://www.Legifrance.Gouv.fr>, Octobre 2000.

<sup>6</sup> ONEMA - J.P. Borda, M. Bramard, H. Carmié, C. Pinel, A. Richard, "Pourquoi Rétablir La Continuité Écologique Des Cours d'eau ?" Septembre 2010.

physique de la rivière c'est-à-dire son équilibre morphologique dû à sa dynamique sédimentaire. Dans les sous chapitres suivants, je présenterai ces deux continuités.

### 2.1.1 La continuité « biologique » des rivières

Comme nous l'avons évoqué, depuis l'antiquité le paysage des rivières a été considérablement modifié pour favoriser la navigation, produire de l'énergie grâce aux barrages, ou permettre la traverser des routes par exemple avec l'installation de buses dans le lit des cours d'eau.

La canalisation des cours d'eau et l'installation de certains ouvrages protégeant des inondations empêchent le renouvellement des zones humides et l'accès à des annexes hydrauliques latérales indispensables à la reproduction de certaines espèces piscicoles.

Par ailleurs, les ouvrages tels que les seuils ou les barrages sont des barrières à la faune aquatique et principalement aux poissons d'espèces potamotoques (vivent en mer et se reproduisent en rivière) et thalassotoques (vivent en rivière et se reproduisent en mer) dont le cycle de vie nécessite de se déplacer vers la mer ou dans les eaux douces des rivières. C'est le cas par exemple des saumons (espèces potamotoques) qui vivent dans les mers ou les océans et se reproduisent dans les rivières. Ainsi afin de faciliter leur libre circulation, il est parfois indispensable de recourir à la construction d'un ouvrage très particulier appelé passe à poisson<sup>7</sup> (Figure 2).



Figure 2 : Schéma d'une passe à poisson à fente verticale et photo (Photo : Voegtlié – Ecogea).

Les seuils (ouvrages disposés en travers de la rivière analogue à un petit barrage), en plus d'être une barrière, modifient le régime hydraulique et la température de l'eau ce qui crée des retenues d'eaux stagnantes appauvries en oxygène et pouvant générer des mortalités piscicoles.

La continuité de la ripisylve est également indispensable, car c'est le support de vie de nombreuses espèces aquatiques et semi aquatiques (grenouilles, tritons, loutres ...).

Cependant, les ouvrages tels que les seuils, les barrages, les buses et les ponts ne provoquent pas seulement une rupture écologique mais également physique en empêchant la libre circulation des sédiments ce qui perturbe l'équilibre morphologique des rivières.

---

<sup>7</sup> ONEMA, *Restauration de La Continuité Écologique Des Cours d'eau et Des Milieux Aquatiques et FNE*, 2014.

### 2.1.2 La continuité sédimentaire des rivières

Les ponts, les buses, les seuils et les barrages impactent l'équilibre dynamique du transport sédimentaire et par conséquent la morphologie du cours d'eau. Les seuils et barrages provoquent un déficit de sédiment à l'aval des ouvrages entraînant un enfoncement du cours d'eau et une érosion importante des berges à l'origine de la modification voire de la destruction des frayères<sup>8</sup>.

L'impact n'est pas seulement écologique, car l'enfoncement du lit provoque également le déchaussement des ouvrages d'art tels que les ponts ce qui peut aboutir à des ruptures d'ouvrage. Ce fût le cas lors de la crue de 1990 concernant le pont du Magasin sur la Savoureuse<sup>9</sup> (Voir Figure 3).



Figure 3 : Pont du magasin lors de la crue de 1990 (source : ICC territoire de Belfort)

Le chapitre suivant décrit le périmètre du projet qui s'étend du pont du Magasin au pont Charles de Gaulle en traversant Belfort.

---

<sup>8</sup> AFEID, ONEMA - ASTEE - SHF - Adémie de l'Eau, *Ingénierie Écologique Appliquée Aux Milieux Aquatiques*, 2013.

<sup>9</sup> CCI territoire de Belfort, "Dossier Départemental Des Risques Majeurs. Belfort," 2005.

## 2.2 Périmètre du projet

Le projet sur lequel j'ai travaillé durant mon stage concernait la rivière La Savoureuse à Belfort (voir Figure 4).

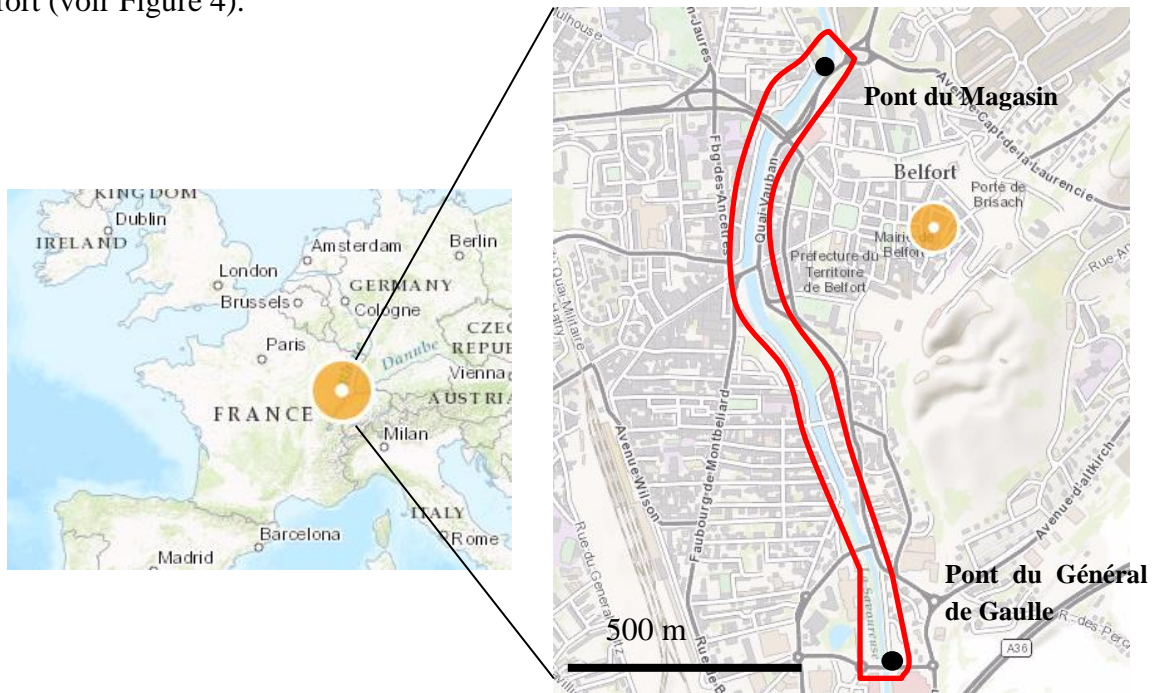


Figure 4 : Plan de situation du projet

La Savoureuse est une rivière longue de 41,2 km. Elle se jette dans l'Allan et prend sa source au niveau du Ballon d'Alsace à 1190 m. Son bassin versant possède une superficie de 235 km<sup>2</sup> ce qui représente en taille approximativement la ville de Marseille.

Le projet s'étend sur une longueur de 1,65 km et parcourt le centre-ville Sud de Belfort du pont du Magasin au pont Charles de Gaulle. Le chapitre suivant décrit le projet, ses enjeux et brièvement les solutions qui ont été retenues par Egis Eau afin de restaurer la continuité écologique de la Savoureuse.

## 2.3 Un projet urbain avec des enjeux fluviaux

### 2.3.1 Un projet de restauration de la continuité écologique.

Ce projet consiste en l'aménagement d'une promenade au niveau des berges dans le lit mineur de la Savoureuse entre le Pont du Magasin et le Pont Charles de Gaulle (Voir une visualisation en Annexe 2). Egis-eau assure toute la maîtrise d'œuvre concernant l'expertise fluviale dans le but de restaurer la continuité écologique de la rivière.



Le cours d'eau, classé en liste 2 au titre de l'article L214-17 du Code de l'Environnement, est en liste prioritaire pour le rétablissement de la libre circulation des migrateurs et du transport sédimentaire. Cette obligation de restauration est une opportunité pour améliorer la qualité paysagère de la rivière et pour proposer un aménagement de circulation douce pour piétons.

Sur la zone d'étude, 14 ouvrages sont concernés par le projet (voir Figure 5) :

- 5 Seuils
- 6 Ponts
- 3 Passerelles

Les 5 seuils sont les suivants : Le seuil des Lettres, le seuil des Arts, le seuil Denfert Rochereau, le seuil Gambetta et le seuil Richelieu tel que le montre la Figure 5. Ces seuils d'une hauteur importante, supérieure à 0,65 m, ne sont pas franchissables par la population piscicole et sont par ailleurs pour la plupart en mauvais état. (Voir les caractéristiques des seuils au Tableau 1).



Figure 5 : Les ponts et les seuils présents sur la zone d'étude

<i>Dénomination</i>	<i>Seuils</i>			
	<b>Hauteur des seuils (m)</b>	<b>Largeur des seuils (m)</b>	<b>Altitude de la crête des seuils (mNGF)</b>	<b>Etat</b>
<i>Seuil de la passerelle des Lettres</i>	0,80	29,70	356,53	Bien profilé - État correct
<i>Seuil de la passerelle des Arts</i>	1,40	29,90	355,94	Bien profilé - État moyen
<i>Seuil du pont Denfert-Rochereau</i>	0,65	20,25	354,76	Profilage moyen - État dégradé
<i>Seuil de la passerelle Gambetta</i>	0,75 (+0,90)	20,70	354,57	Profilage moyen - État dégradé
<i>Seuil du pont Richelieu</i>	1.50	24,70	353,57	Bien profilé - État moyen

**Tableau 1 : Caractéristiques des seuils existants**

Afin d'étudier la franchissabilité des obstacles, il est essentiel de connaître les espèces migratrices du secteur et d'étudier leur capacité à franchir les seuils pendant les périodes de migrations.<sup>10</sup>

Quatre caractéristiques sont à prendre en compte : la vitesse d'écoulement qui s'oppose à la vitesse de nage du poisson, le tirant d'eau, la fosse en aval des seuils et la hauteur de chute du seuil.<sup>11</sup>

Les espèces cibles migratrices, inféodées à la Savoureuse sont décrites dans le Tableau 2. Parmi ces espèces, seule la truite de rivière est une espèce sauteuse. En ne considérant que la hauteur de chute des seuils, il est déjà certain qu'aucune de ces espèces cibles ne peut les franchir.

<i>Espèces cibles</i>	<i>Périodes de migration</i>	<i>Espèces sauteuses</i>
<i>TRF [15-30]</i> <i>Truite de rivière [15-30] (Salmo trutta)</i>	Septembre à décembre	Oui (hauteur de saut moyenne de 0,50m)
<i>BRO</i> <i>Brochet (Esox lucius)</i>	Janvier à mai	Non
<i>BAF</i> <i>Barbeau fluviatile (Barbus barbus)</i>	Mai à juillet	Non
<i>VAN</i> <i>Vandoises (Leuciscus sp hors Idus)</i>	Mars à mai	Non
<i>CHA - LPP</i> <i>Chabots (Cottus sp)</i> <i>Lamproie de Planer (Lampetra planeri)</i>	Migration localisée au printemps	Non

**Tableau 2 : Espèces cibles de la Savoureuse<sup>12</sup>**

En plus de cette rupture écologique provoquée par la hauteur des seuils, ceux-ci piègent les sédiments et créent un déséquilibre sédimentaire avec pour conséquence une érosion régressive en aval et une sédimentation à l'amont (Figure 6). Ce déséquilibre peut créer une instabilité des berges et découvrir les fondations des ponts en aval des seuils. C'est

<sup>10</sup> ONEMA - J-M. Baudoin, V. Burgun, M. Chanseau, M. Larinier, M. Ovidio, W. Sremski, P. Steinbach, B. Voegtle, *Evaluer Le Franchissement Des Obstacles Par Les Poissons, Principes et Méthodes*, 2014.

<sup>11</sup> Ibid.

<sup>12</sup> Ibid.

le cas du pont Denfert Rochereau dont l'affouillement de la semelle est nettement visible (voir Figure 7).

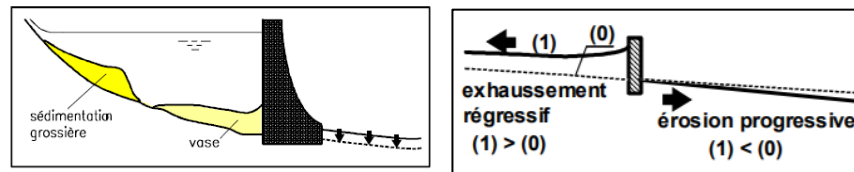


Figure 6 : Schémas d'un comblement de retenu et de l'érosion progressive située à l'aval<sup>13</sup>



Figure 7 : Photographie d'une semelle du pont Denfert Rochereau – Photo Egis

### 2.3.2 Solutions retenues pour le projet

A l'issue de l'avant-projet, Egis-Eau propose plusieurs solutions afin de rétablir la continuité écologique au niveau des 5 seuils :

- ajouter une échancrure dans le seuil des Lettres
- araser partiellement le seuil des Arts
- araser totalement le seuil Denfert Rochereau
- reconstruire totalement les seuils Gambetta et Richelieu

Par ailleurs, le projet ne consiste pas seulement à rendre franchissable les seuils mais également à restaurer les habitats hydroécologiques. Le lit mineur de la Savoureuse est surdimensionné. Son gabarit artificialisé afin de contenir la crue centennale est largement supérieur à son gabarit naturel. Les seuils permettent donc, entre autres, de conserver une ligne d'eau constante à leur amont. Afin d'améliorer les conditions d'écoulement en basses eaux après l'abaissement des seuils, des chenaux préférentiels d'écoulement seront creusés ponctuellement. Ils permettront de garantir un lit d'étiage et de créer des zones de repos pour les poissons.

Il est également prévu un entretien de la ripisylve.

<sup>13</sup> G. Degoutte, *Diagnostic, Aménagement et Gestion Des Rivières*, 2011.

Néanmoins, il est important de noter que ces seuils ont un rôle déterminant dans le maintien du fond de la rivière.<sup>14</sup> Après l'effacement ou l'arasement partiel des seuils, la rivière cherchera à rétablir son équilibre hydromorphologique. Ce rééquilibre se traduira par une érosion régressive en amont des seuils et un apport de sédiment en aval. L'érosion ainsi induite est susceptible de menacer certains ouvrages d'arts : Ponts et Quais.

La première mission de mon stage consiste à étudier l'érosion induite par l'abaissement des seuils et d'estimer la profondeur d'incision aux droits des ouvrages d'art. Dans le prochain chapitre, je décrirai l'étude que j'ai entreprise.

---

<sup>14</sup> ONEMA et Cemagref, "Arasement et Dérasement de Seuils - Aide à La Définition de Cahier Des Charges Pour Les Études de Faisabilité," February 2011.

## 3. Etude de l'érosion de la rivière

L'abaissement des 4 seuils, (le seuil des Lettres, le seuil des Arts, le seuil Gambetta, le seuil Richelieu) et l'effacement du seuil Denfert-Rochereau risquent de menacer la stabilité des ponts situés en amont et des quais. Par ailleurs, cette question de stabilité est une préoccupation majeure puisque le Pont du Magasin a été emporté lors de la crue de 1990<sup>15</sup>. Afin de garantir au mieux sa stabilité durant les fortes crues, il est reconstruit en 1991 avec des fondations plus profondes de type « pieu tubé ».

Dans les paragraphes suivants, je listerai les ponts concernés par un risque d'instabilité après l'arasement partiel ou total des seuils évoqués. Puis, j'exposerai la méthode utilisée pour estimer théoriquement la hauteur d'incision due à l'abaissement des seuils. Enfin, je présenterai les résultats obtenus.

### 3.1 Ponts dont la stabilité peut être impactée

Quatre ponts sont principalement concernés par ces abaissements de seuil : Le Pont du Magasin, Le Pont Clémenceau, le Pont Carnot et le Pont Denfert Rochereau. En effet, ces ponts sont les seuls qui possèdent des fondations et des piles en rivière et qui se situent chacun en amont d'un des seuils qui sera abaissé. Les passerelles des arts et des lettres seront reconstruites sans fondation en lit de rivière car elles s'appuieront sur les digues.

Nous nous concentrerons donc sur le transport sédimentaire en amont des seuils suivants : Le seuil des lettres ; le seuil des arts et le seuil Gambetta (voir Figure 8).

---

<sup>15</sup> CCI territoire de Belfort, "Dossier Départemental Des Risques Majeurs. Belfort."

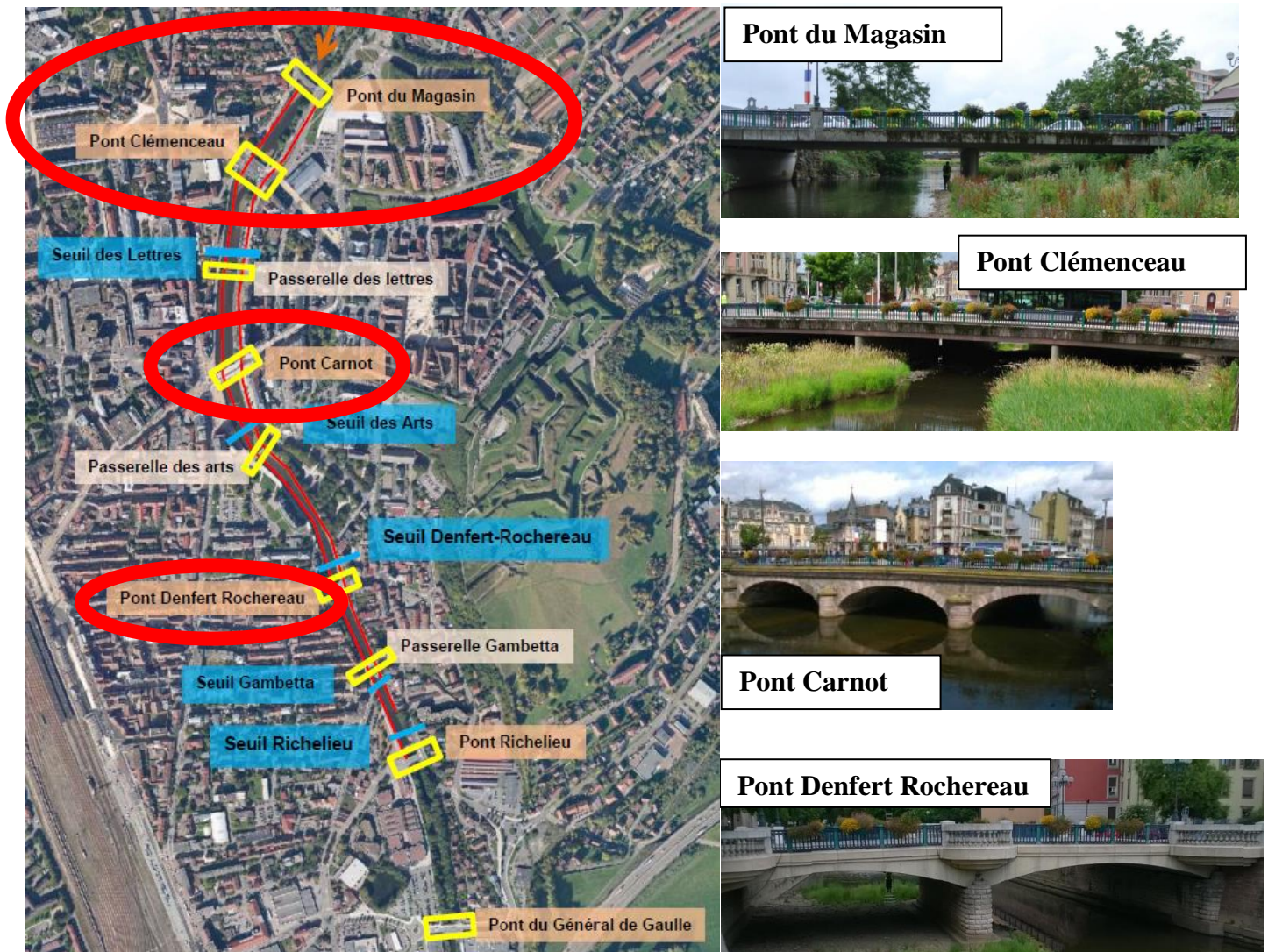


Figure 8 : Positionnement des ponts d'intérêt (Photo : Egis)

Dans le paragraphe suivant, je présenterai les dates de construction des ponts et des seuils afin de vérifier si les seuils ont une influence sur le dimensionnement des piles de ponts en rivière.

### 3.2 La chronologie de construction des ponts et des seuils

Suivant la date de construction des ponts et des seuils, nous pouvons déterminer si l'arasement des seuils est susceptible de déstabiliser l'ouvrage d'art. En effet, le cours d'eau retendra vers sa pente d'équilibre et ainsi, si les ponts ont été construits après les seuils, cela signifie que les ponts sont installés dans le lit du cours d'eau en tenant compte de l'équilibre morphologique sans seuil à l'aval. Par conséquent, les fondations ne sont pas maintenues par les sédiments qui se sont postérieurement accumulés en amont des seuils construits.

Nous avons donc comparé, dans le Tableau 3, les dates de construction des ponts et des seuils afin de vérifier si le dimensionnement de leur fondation prenait en compte le seuil en aval ou non.

	Date de construction	Incertitude date	Danger probable ?
Pont Clémenceau	1973	ok	Danger probable
Seuil des lettres	1909	?	
Pont Carnot	1902	ok	Rassurant dans une première analyse
Seuil des Arts	1929	?	
Pont Denfert Rochereau	1950	ok	?
Seuil Gambetta	?		

Tableau 3: Tableau des dates de construction des seuils et des ponts <sup>16 17</sup>

Dans un premier temps, nous pouvons constater que les dates de construction des seuils sont incertaines. Mais étant donné l'écart entre les dates de construction des seuils et des ponts, nous pouvons quand même admettre une chronologie de construction, même en considérant une incertitude de date d'une dizaine d'années.

Le Seuil des Lettres a été construit bien avant le Pont Clémenceau. Il y a donc un danger probable à baisser le seuil des lettres. En effet, les fondations du Pont Clémenceau ont été dimensionnées en considérant l'épaisseur de sédiments après la pose du seuil.

Le Seuil des Arts a quant à lui été construit après le Pont Carnot. Cette information est rassurante car elle nous indique que le pont Carnot a été implanté dans l'alluvion issue de l'ancien état d'équilibre du cours d'eau. Les fondations sont donc dimensionnées en prenant en compte une absence de seuil à l'aval directe du Pont Carnot.

En ce qui concerne le Seuil Gambetta, nous ne connaissons pas sa date de construction exacte.

**Il ne s'agit que d'une première analyse et ces déductions doivent être étudiées avec précaution.**

Par la suite, je suis allée plus loin dans l'analyse de l'influence des seuils en étudiant la pente à l'équilibre de la rivière avec l'aide du paramètre de Shields.

<sup>16</sup> EGIS, "Fiche Des Ponts de La Savoureuse à Belfort," 2015.

<sup>17</sup> EGIS, "Fiche Des Seuils de La Savoureuse à Belfort," 2015.

## 3.3 Etude de l'influence des seuils

Afin d'étudier l'érosion du fond du lit due à l'abaissement des seuils, je propose d'étudier les pentes à l'équilibre de chacun des tronçons avec l'aide du paramètre Shields. Ce qui permettra d'évaluer à la fois l'épaisseur et la longueur de l'érosion.

Un autre paramètre : La hauteur d'eau en amont des seuils, aurait pu être étudiée. Cette étude permet de mesurer avec l'aide des résultats du modèle : la longueur d'influence du seuil sur la hauteur d'eau (lorsque  $h_n=h$ ). Cette méthode, ne permet pas d'avoir une idée de l'épaisseur d'érosion mais permet d'un premier abord de constater quels ponts seront impactés par l'arasement des seuils.

La démarche du calcul de la pente d'équilibre par le paramètre de Shields est décrite dans le paragraphe suivant.

### 3.3.1 Méthode du calcul de la pente d'équilibre avec le paramètre de Shields

Nous proposons de calculer les nouvelles pentes d'équilibre des tronçons de la rivière au niveau des seuils qui nous intéressent. Pour cela nous avons aussi besoin de calculer les nouvelles pelles (différences entre la crête du seuil et le fond du lit en amont d'un seuil) des seuils afin « d'y faire partir » la pente d'équilibre. Cette pente rencontrera le profil en long actuel, ce qui nous permettra de déterminer la longueur d'érosion future (Figure 9 page 26).

#### 3.3.1.1 Explication de la démarche

La méthode consiste à exprimer que le paramètre de Shields (1) est égal au paramètre de Shields critique (2) de début de mise en mouvement des sédiments, ce qui permet d'extraire la pente à l'équilibre de la formule de Shields.

#### La force tractrice

Pour une pente d'écoulement donnée  $I = J$  (en m/m) et en régime uniforme, la force tractrice (1) est directement proportionnelle au rayon hydraulique  $R_h$  (en m) et s'écrit :

$\tau_0 = \rho g R_h J$  (1) Avec  $\tau$  en  $N/m^2$ ,  $h$  la hauteur d'écoulement,  $g$  est l'accélération de la gravité,  $\rho$  la densité de l'eau et  $J$  la pente de l'écoulement, souvent assimilée à la pente du lit  $I$  en régime uniforme<sup>18</sup>.

---

<sup>18</sup> G. Degoutte, *Diagnostic, Aménagement et Gestion Des Rivières*.



### Le paramètre 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  $\tau^*$  obtenue à partir du ratio entre la force tractrice, contrainte exercée  $\tau$  à la surface de la particule et la force stabilisatrice (poids de la particule) (2).

$$\tau^* = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)D} \quad (2) \quad \text{où } \rho_s \text{ est la densité du sédiment et } D \text{ le diamètre de la particule.}$$

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  $\tau^*$  dépassait une valeur critique  $\tau^*c^{19}$ .

Nous considérons que les sédiments commencent à bouger pour un paramètre de Shields égal à la valeur du Shields critique  $\tau^*c_{crit}$ . Celui-ci est égal à 0,047 dans le cas des rivières possédant une granulométrie uniforme et égale à 0,138 dans le cas des rivières à granulométrie étendue. En dessous de cette valeur, les sédiments sont au repos.

### La pelle

Le piégeage des sédiments par le seuil se fait jusqu'à ce que la retenue soit atterrie. Néanmoins pour les seuils situés sur des cours d'eau avec un écoulement fluvial, on observe une différence d'altitude entre le fond du lit et le seuil que l'on nomme « La pelle ».<sup>20</sup>

Après avoir calculé cette pelle de l'ouvrage à l'état projet, grâce à la détermination de la hauteur normale en amont du seuil et de la hauteur critique au niveau du seuil, nous pouvons appliquer la pente (en orange ici sur le schéma) à la côte de la base de la pelle et constater à quel niveau la pente rencontrera le profil en long de la rivière à l'état d'équilibre (croix rouge sur le schéma Figure 9).

Nous considérons que le profil de l'état actuel possède un profil en long à l'état d'équilibre.

---

<sup>19</sup> Ibid.

<sup>20</sup> Ibid.

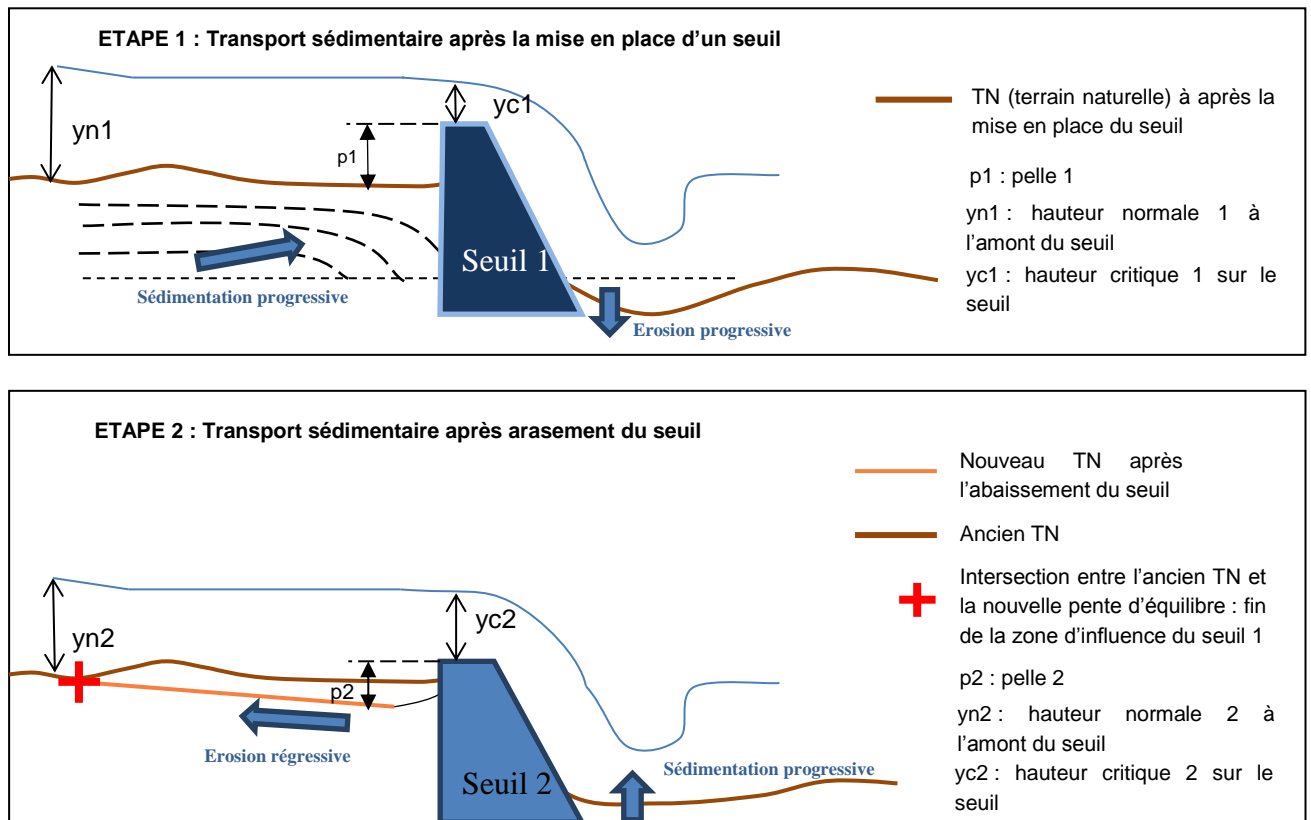


Figure 9 : Schémas illustrant la méthode afin de déterminer l'étendue de l'érosion et son épaisseur

La hauteur de pelle se calcule avec la hauteur normale et la hauteur critique de la façon suivante<sup>21</sup> (3) :

$$p = hn + \left(1 + \frac{yc}{2hn}\right) \left(1 - \frac{yc}{hn}\right)^2 \quad (3)$$

Avec :

hn : la hauteur normale (m)

yc : la hauteur critique au-dessus du seuil (m)

hn est calculé à partir des équations de Manning Strickler (voir (4)).

$$Q = Rh(hn)^{2/3} * S(hn) * \sqrt{I} * K \quad (4)$$

Avec :

Q en m<sup>3</sup>/s : le débit de la rivière

Rh en m : le rayon hydraulique : S/P

S : La surface mouillée

<sup>21</sup> Ibid.

P : le périmètre mouillé

I : la pente du lit

K : le coefficient de rugosité du lit

$\gamma C$  est calculé de la façon suivante à partir de la formule (5) :  $\gamma C = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$  (5)

Afin d'établir le modèle calculatoire, nous avons émis des hypothèses qui permettent d'appliquer le calcul de la pente d'équilibre avec l'aide de la méthode de Shields.

Le paragraphe suivant cite quelles seront nos hypothèses dans l'application de cette méthode.

### 3.3.1.2 Hypothèse pour l'application de la méthode Shields

Afin de valider cette méthode, nous avons calculé la pente à l'état d'équilibre actuel théorique et nous l'avons comparée avec la pente réelle.

Pour appliquer cette méthode, nous avons émis les hypothèses générales indiquées dans le Tableau 4.

Hypothèses générales	
<b>K lit</b>	40
<b>Q2 (m<sup>3</sup>/s) = débit morphogène</b>	64
<b><math>\tau^*c</math> = (rivière granulométrie étendue avec armure)</b>	0,138
<b>d50 (m)</b>	0,0121
<b><math>\gamma_s</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	26,5
<b><math>\gamma_w</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	9,8
<b>s</b>	2,70
<b>g (m/s<sup>2</sup>)</b>	9,81

Tableau 4 : Tableau des hypothèses générales

Les analyses granulométriques ont été réalisées par Géotec sur chacune des portions de cours d'eau entre deux seuils. J'ai déterminé le d50 (diamètre moyen des grains) à l'aide d'une courbe granulométrique telle que le montre l'Annexe 3.

Le coefficient de rugosité a été déterminé à partir du calage du modèle hydraulique.

La Q2 est considérée comme le débit morphogène pour une rivière comme la Savoureuse, artificialisée avec des digues.<sup>22</sup> C'est ce qu'on peut généralement lire dans la littérature mais cela sera confirmé à l'aide d'une étude paramétrique.

De plus, on suppose le régime d'écoulement uniforme en amont des seuils afin de pouvoir appliquer la formule de Shields.

---

<sup>22</sup> Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Centre, "Synthèses Des Connaissances & Proposition d'une Méthode d'évaluation de l'impact Des Ouvrages Transversaux Sur La Continuité Sédimentaire Des Cours d'eau," Juin 2013.

En ce qui concerne le calcul de la pelle (3), la formule proposée par l'ouvrage Degoutte<sup>23</sup> suppose que le régime soit uniforme à l'amont du seuil, que la rivière soit large, que le seuil soit dénoyé et que la largeur du lit soit égale à la largeur du seuil.

Par ailleurs, la rivière possédant une granulométrie étendue, nous considérons un paramètre de Shields égal à 0,138 afin de calculer la pente à l'équilibre.

Afin de valider les hypothèses et pour mieux comprendre le fonctionnement du modèle, j'ai réalisé une étude paramétrique.

### 3.3.1.3 Etude paramétrique et validation du modèle

Afin de valider le modèle calculatoire présenté ci-dessus pour le calcul de **la pente à l'équilibre**, j'ai réalisé une étude paramétrique en faisant varier : **La granulométrie** (de 0,01m à 0,015) **le coefficient critique de Shields** (0,047 pour une rivière à granulométrie uniforme et 0,138 pour une rivière à granulométrie étendue) et **le débit de la crue morphogène** (module, Q2, Q10, Q100). La Figure 10 représente de façon schématique l'étude paramétrique réalisée pour vérifier le calcul de la pente à l'équilibre.

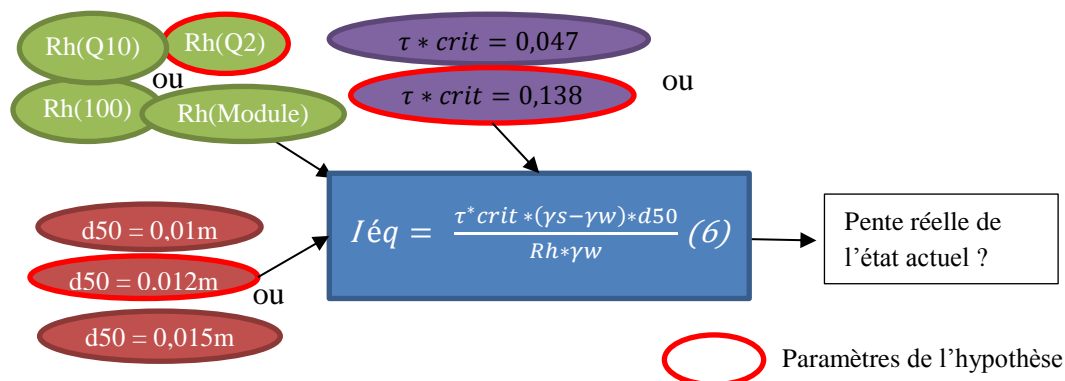


Figure 10 : Schéma représentant le processus de l'étude paramétrique pour la pente à l'équilibre

Le but de cette étude étant de vérifier si la pente à l'équilibre théorique calculée à partir de la formule du Shields correspond à la pente réelle actuelle calculée à partir des profils en long de la rivière. La pente réelle a, par ailleurs, été calculée à partir des pentes de plusieurs profils en long de la Savoureuse comme le montre l'Annexe 4. Ci-dessous, le résultat présenté par un diagramme des pentes à l'aide de l'étude paramétrique (Figure 11), permet de visualiser la pertinence des paramètres étudiés dans le calcul de la pente à l'équilibre pour le seuil des Arts.

<sup>23</sup> G. Degoutte, *Diagnostic, Aménagement et Gestion Des Rivières*.

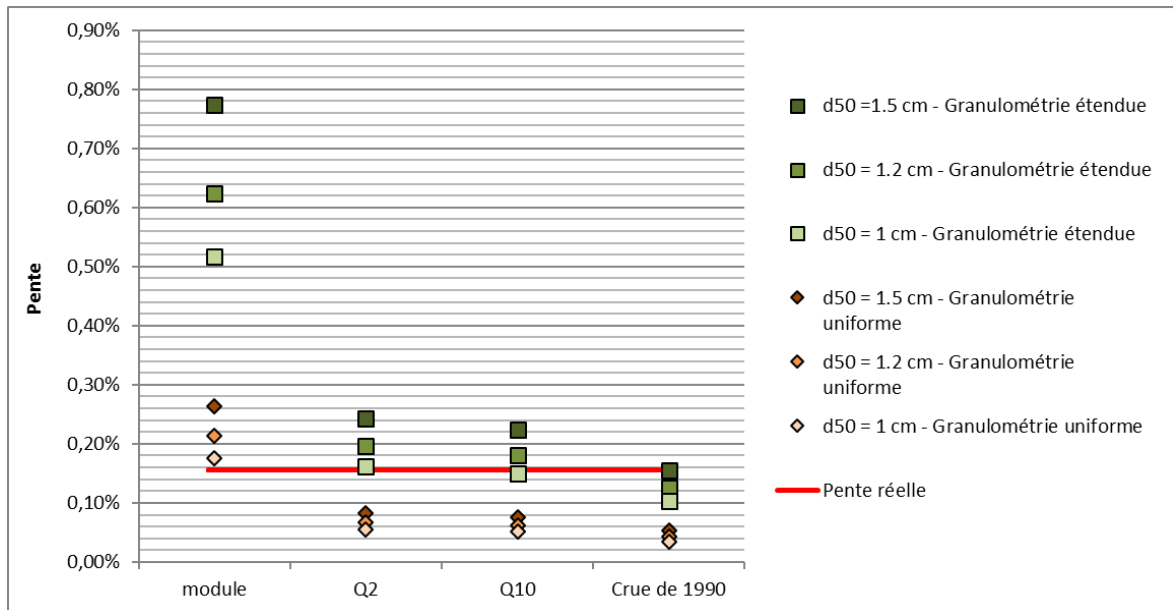


Figure 11 : Seuil des Arts - étude paramétrique sur la pente à l'équilibre

L'exemple « d'étude paramétrique » de la Figure 11, réalisée sur le seuil des Arts, permet d'affirmer que les caractéristiques (pour calculer une pente d'équilibre) se rapprochant le plus de la pente réelle sont les suivantes :

- Le débit morphogène est le **débit biennal (Q2)**
- Le cours d'eau est à **granulométrie étendue**
- Le **d50 se rapproche de 0,01m**

Suite à l'analyse des différents paramètres : nous constatons des résultats concluants concernant les portions de cours d'eau en amont du seuil des Lettres, du seuil des Arts et du seuil Gambetta.

Il convient de remarquer qu'il est peu probable pour cette rivière artificialisée que le débit morphogène puisse être la crue centennale ou même décennale. En effet, ces crues étant assez rares, elles ne sont pas à l'origine de la pente des transecs à l'état d'équilibre. De même, il est fort douteux que le modèle puisse convenir pour un  $\tau \cdot c = 0,047$  puisque la rivière a une granulométrie étendue et possède une armure (couche granulométrique plus grossière en surface)<sup>24</sup>.

J'ai par ailleurs étudié **les différentes pelles** calculées en amont des seuils avec les pelles réelles existantes. Les paramètres utilisés pour étudier la cote de la pelle sont : **les différents débits et le coefficient de rugosité K** pour le calcul de la hauteur normale (**hn**) (voir formule (4)) et de la hauteur critique sur le seuil (**yc**) (voir formule (5)), puis **la cote de crête de référence des seuils** pour calculer la cote de la pelle

<sup>24</sup> ONEMA - J.R. Malavoi, C.C. Garnier, N. Landon, A. Recking, Ph. Baran, *Éléments de Connaissance Pour La Gestion Du Transport Solide En Rivière*, 2010.

(Cote pelle = Cote crête – pelle). En effet ces seuils possèdent des échancrures comme le montre la photo Figure 13. Cependant, les seuils déversent au module et pour la Q2 sur toute leur largeur et pas seulement au niveau de l'échancrure. De plus, nous avons également fait varier le paramètre de hauteur normale en calculant la hauteur normale avec différents coefficients de rugosité (K=30 et K=40) ou en la mesurant à partir des hauteurs calculées par le modèle hydraulique.

De la même façon, la Figure 12 décrit le test paramétrique afin de vérifier le calcul de la pelle :

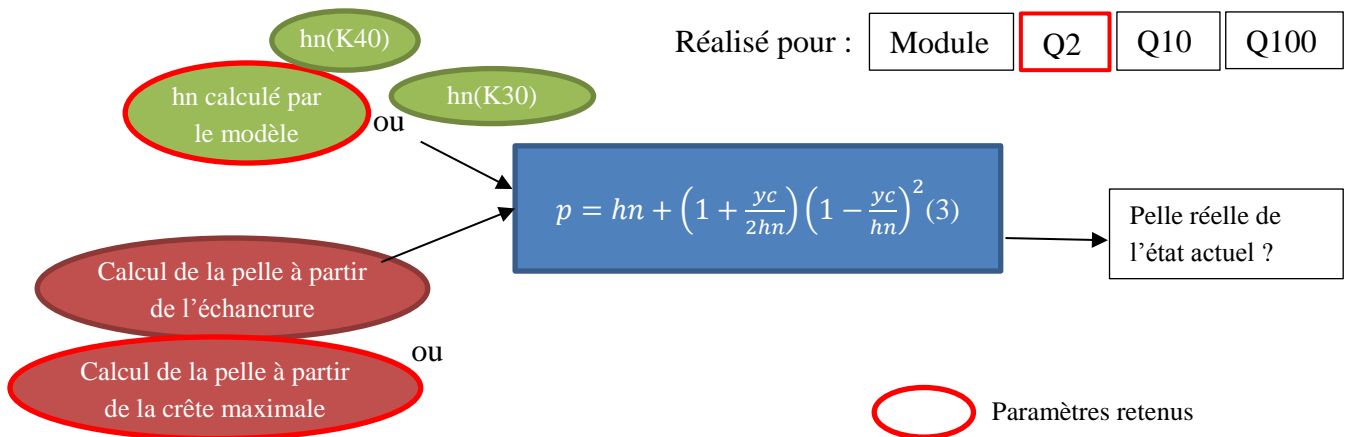


Figure 12 : Schéma représentant le processus de l'étude paramétrique pour le calcul de la pelle

En ce qui concerne la hauteur normale, c'est finalement **la hauteur calculée par le modèle et prise assez loin en amont des seuils qui s'est avérée être la plus convenable** pour calculer la pelle.

Ce que montre le résultat du test paramétrique illustré par la Figure 14 dans le cas du seuil des lettres, c'est **qu'il est plus approprié de prendre en compte la crête maximale du seuil** plutôt que l'échancrure pour en déduire la pelle. Toujours Figure 14, nous pouvons constater que la pelle retenue est donc celle située à 356,0 m NGF contre 356,3 m NGF pour la pelle réelle. La différence va dans le sens de la sécurité.

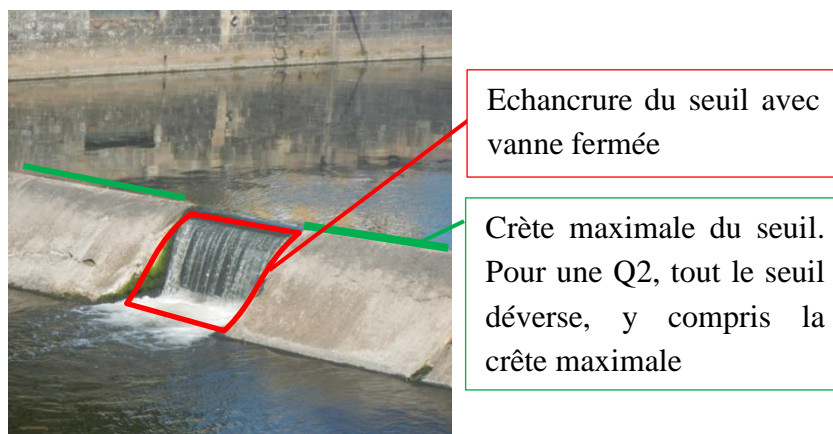


Figure 13 : Photo du seuil des arts de la Savoureuse - EGIS

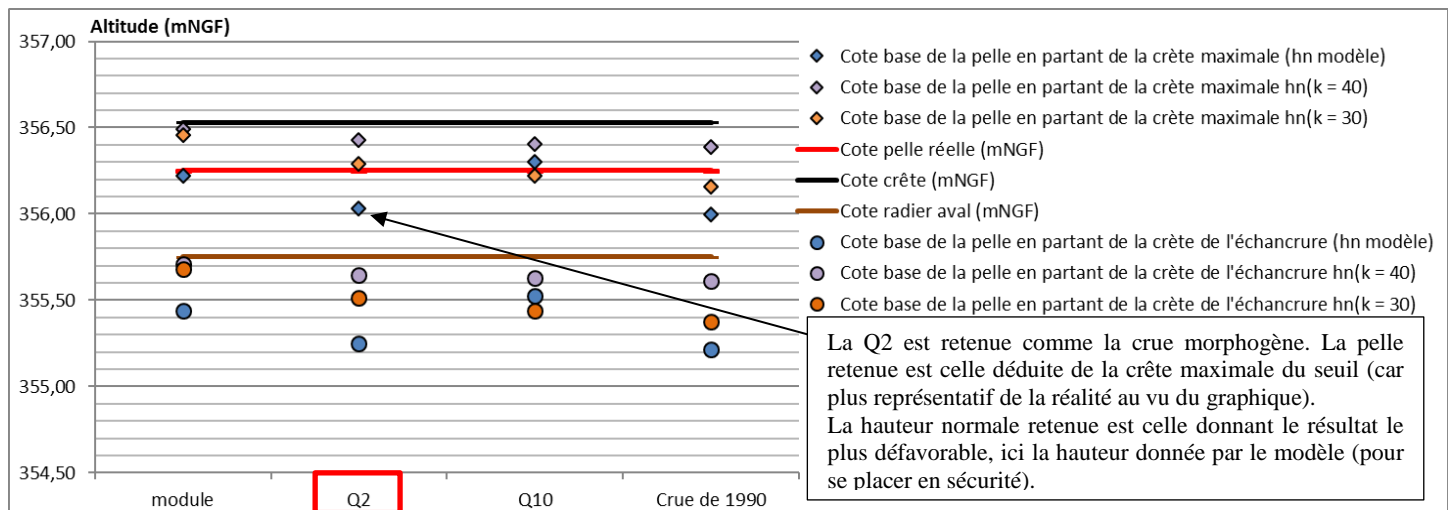


Figure 14 : Seuil des lettres, test paramétrique du calcul des pelles en amont du seuil

Les seuils à l'état projet étant assez éloignés des seuils à l'état actuel (sauf dans le cas du seuil des lettres qui possédera une échancrure), il convient de toujours choisir la plus grande pelle afin de choisir le scénario le plus défavorable. Comme il s'agit d'un résultat théorique, prendre le scénario le plus défavorable permet de ne pas sous-estimer l'incision.

Cette étude paramétrique nous a permis de conclure que :

- La méthode n'est pas applicable pour le tronçon situé en amont du seuil de Denfert Rochereau et de Richelieu.
- Le débit morphogène à considérer est la crue biennale.
- Le paramètre de Shields critique à prendre en compte pour le début de mouvement des sédiments est celui correspondant à une rivière à granulométrie étendue.
- Pour le seuil des lettres, la cote de la base de la pelle sera calculée à partir de la crête maximale du seuil.
- Les autres seuils à l'état projet sont trop différents de l'état actuel, nous ne pouvons donc pas nous appuyer sur le test paramétrique pour le choix de la hauteur normale de calcul. Nous utiliserons donc la cote de la base de la pelle amenant au scénario le plus défavorable.

L'étude paramétrique m'a permis de valider cette méthode. La suite de l'étude consiste donc à utiliser cette méthode afin de calculer l'épaisseur d'incision du lit en particulier aux abords des piles de pont.

### 3.3.1.4 Résultats – application de la méthode à l'état projet

Afin de calculer les résultats j'ai conservé les hypothèses de départ indiquées dans le Tableau 4 page 27. Les cotes d'incision obtenues sont indiquées dans le Tableau 5 et peuvent être comparées avec la cote limite acceptable d'affouillement des semelles de pont.

Plus visuellement, les pentes théoriques à l'état d'équilibre trouvées après l'abaissement des seuils sont observables à l'Annexe 5. Ce graphique, illustre que le fond du lit après quelques années s'enfoncera pour trouver un état d'équilibre (conditionné par les ouvrages amont et aval).

Nous considérons dans le cas de l'incision du fond du lit, qu'il n'est pas acceptable que les semelles soient affouillées. Ainsi, une croix rouge indique sur les graphiques de l'Annexe 5 et de l'Annexe 7, la cote alarmante d'incision à ne pas dépasser.

Le pont Carnot dont les fondations sont les plus superficielles sera visiblement très impacté voire déstabilisé par cette incision du fond du lit.

Le pont Denfert Rochereau quant à lui, verra sa semelle complètement à nu, ce qui n'est pas acceptable et considéré comme alarmant. Par ailleurs, l'étude préalable géotechnique des ouvrages d'art avait indiqué que l'érosion atteint déjà un niveau alarmant. (Voir Figure 15).

	Cotes fond du lit (m NGF)	Limite acceptable d'affouillement des semelles de pont (m NGF)	Cotes de l'incision théorique (m NGF)	Epaisseur incisions théoriques au niveau des piles des ponts (m)
<i>Pont du Magasin</i>	356,99	355,7	356,3	0,7
<i>Pont Clémenceau</i>	356,67	355,2	356,0	0,7
<i>Pont Carnot</i>	355,51	355,0	354,8	0,7
<i>Pont Denfert Rochereau</i>	354,35	354,5	353,3	1,0

Tableau 5 : Récapitulatif de l'incision théorique et de l'impact au niveau des piles de pont



Figure 15 : Etat des piles du pont Denfert-Rochereau (photos : Egis)



- Nous constatons qu'il y aura une incision du lit après l'arasement des seuils.
- L'ordre de grandeur de cette incision sera d'environ 1m
- Le pont Carnot et le pont Denfert Rochereau seront les plus impactés par cette incision.

Une seconde étude m'a été confiée en lien avec le transport sédimentaire : l'étude des affouillements dits « généralisés » et « localisés ». Cette étude consiste à étudier la profondeur d'affouillement à l'état projet des piles de pont après la crue la plus impactante : la crue centennale dans le cas de la Savoureuse au niveau de Belfort.

### 3.4 Etude de l'affouillement généralisé et localisé

En plus de l'incision du lit afin que la rivière retrouve un état d'équilibre, il est important de considérer l'affouillement au niveau des piles de pont et des digues.

Plusieurs types d'affouillements existent : L'affouillement généralisé, l'affouillement dû à un rétrécissement local et l'affouillement localisé au niveau des culées de pont, ou des piles par exemple. Des chercheurs ont proposé des méthodes différentes, afin d'estimer la profondeur de ces types d'affouillement. Toutes ces méthodes sont expliquées en Annexe 6.

Dans le cas de l'affouillement généralisé, nous utilisons la méthode de Ramette, dans le cas de l'affouillement localisé, différentes méthodes ont été étudiées. (La méthode de Ramette, la méthode de Breusers et Al et la méthode dite de « synthèse »).

Le chapitre suivant concerne l'affouillement généralisé.

#### 3.4.1 Etude de l'affouillement généralisé

Le calcul de l'affouillement généralisé permet de déterminer la profondeur des fonds affouillables lors d'une crue. Après la crue, les fonds reprennent en règle générale leur physionomie préexistante<sup>25</sup>. Dans notre cas, nous appliquerons la crue de 1990 qui se rapproche d'une crue centennale. Cette analyse vise à apprécier la couche de mise en mouvement des sédiments lorsque le lit de la rivière est soumis à une contrainte maximale qui correspond dans le cas de la Savoureuse de plein bord.

La formule de Ramette (voir l'Annexe 6 page 51) ne prend pas en compte les points fixes : Les éléments durs comme les seuils par exemple.

Dans le graphique en Annexe 7, nous avons comparé l'affouillement généralisé à l'état projet et à l'état actuel.

---

<sup>25</sup> M. Ramette, "Surveillance et Confortement Des Fondations d'ouvrages d'art En Site Aquatique," 1980.

Le Tableau 6 présente l'épaisseur d'abaissement du fond non perturbé et la différence entre l'état actuel (EA) et l'état projet (EP) après l'arasement des seuils.

<i>Bilan affouillement : écart entre l'état actuel et l'état projet</i>	
<i>Delta moyen de l'affouillement généralisé entre EP et EA (m)</i>	0,30
<i>Delta max de l'affouillement généralisé entre EP et EA (m)</i>	0,79
<i>Delta moyen de l'affouillement généralisé en considérant l'incision entre EP et EA (m)</i>	0,75
<i>Delta max de l'affouillement généralisé en considérant l'incision entre EP et EA (m)</i>	1,39

**Tableau 6 : Delta des affouillements généralisés entre l'EA et l'EP**

Plus précisément, en Annexe 7 se trouve le graphique des différences entre le fond non affouillable à l'EA et à l'EP.

Nous remarquons une différence maximale de **1,40 m** entre l'état projet (EP) et l'état actuel (EA).

Au vu des graphiques présentés en Annexe 7 ; le pont Carnot, et Denfert Rochereau sont directement touchés par l'affouillement généralisé. Le pont Clémenceau est à environ 1m de l'affouillement généralisé. Le pont du Magasin dont les fondations ont été reconstruites plus profondément après l'incident de 1990 n'est pas concerné par cet affouillement.

### 3.4.2 Etude de l'affouillement localisé

Trois méthodes ont été utilisées pour estimer cet affouillement : **La méthode de Ramette, la méthode de Breusers et Al et la méthode dite de « synthèse »**. Ces 3 méthodes sont celles qui sont les plus couramment citées dans les ouvrages<sup>26 et 27</sup> qu'ils soient récents ou plus anciens. Nous obtenons des résultats assez différents selon les ponts.

Il est important de noter qu'il n'y a pas de méthodes préférentielles. Nous sommes bien dans les domaines d'application pour chaque méthode. Cependant, les résultats sont différents selon la méthode et doivent donc être analysés avec précaution.

L'affouillement localisé au niveau des piles de ponts amène au calcul de la profondeur totale d'affouillement incluant l'épaisseur d'affouillement généralisé.

Tout d'abord, d'après la Figure 16 et le Tableau 7, on peut observer que le pont Carnot semble le plus sensible à l'érosion tandis que le pont Clémenceau et le pont du Magasin semblent les moins sensibles. Selon la méthode choisie, le pont Magasin n'est pas impacté par cet affouillement total (dans le cas de la méthode de Synthèse et de la méthode de Ramette). Les fondations du pont Clémenceau se situent quant à elles, à la limite du fond non perturbé.

<sup>26</sup> Sétra, *Cours d'eau et Ponts - Guide Technique*, 2007.

<sup>27</sup> Ministère des transports - Direction des routes et de la circulation routière, "Fondations de Ponts En Site Aquatique En État Précaire," Décembre 1980.

Les côtes des fondations des ponts Carnot et Denfert Rochereau se situent au contraire largement dans la couche d'alluvion affouillable.

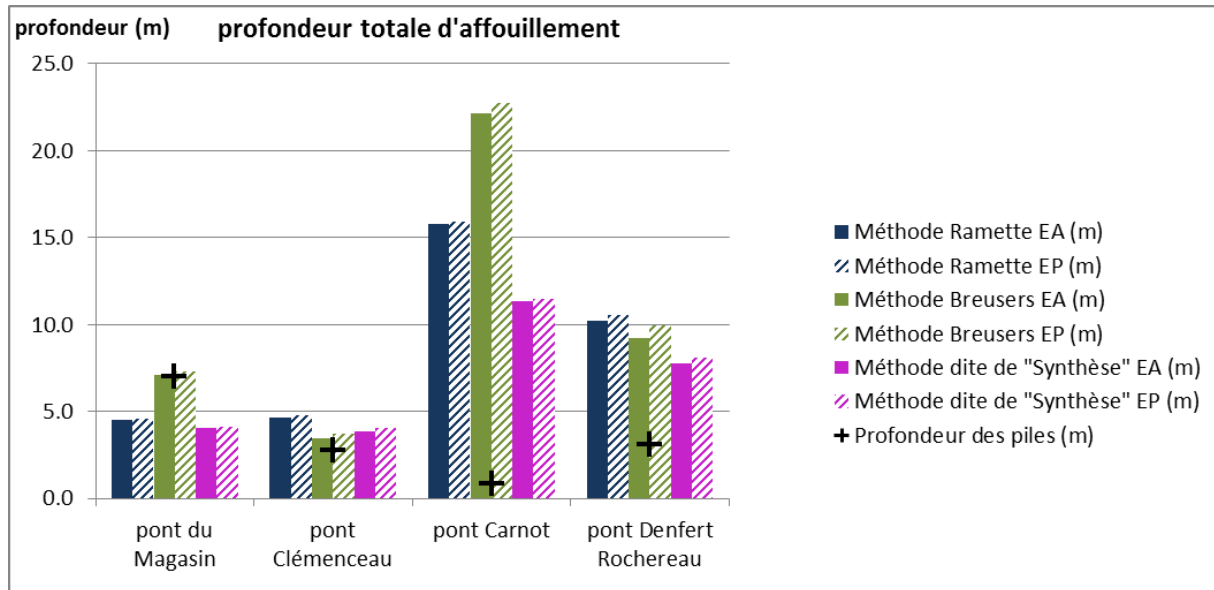


Figure 16 : Comparaison des méthodes de calcul de l'affouillement total à l'état projet (EP) et à l'état actuel (EA)

Par ailleurs nous constatons finalement très peu de différence entre l'affouillement localisé à l'état actuel ou à l'état projet. Nous constatons la plus grande fluctuation au niveau du pont Carnot, qui est le pont le plus en danger vis-à-vis de la profondeur de ses fondations, avec une différence entre l'état projet et l'état actuel de **0,60 m**.

	Côtes fond du lit (m NGF)	Profondeur des piles de pont (m NGF)	Cotes de l'affouillement localisé théorique maximal (méthode la plus impactante) (m NGF)
Pile du pont du Magasin	356,99	350	349.7
Pile du pont Clémenceau	356,67	353.9	351.9
Pile du pont Carnot	355,51	354.7	332.8
Pile du pont Denfert Rochereau	354,35	351.3	343.8

Tableau 7 : Comparaison des cotes d'affouillement localisé et de la cote d'implantation des fondations (état projet)

En Annexe 7 se trouve le bilan graphique de l'ensemble des érosions et affouillements étudiés.

D'après les calculs des affouillements totaux, nous constatons que les différentes méthodes de calcul amènent à la conclusion suivante :

→ Il y a peu de différence entre l'état actuelle et l'état projet, cette différence est d'un ordre de grandeur de 1m.

→ Le pont Magasin et le pont Clémenceau sont peu concernés par les affouillements totaux (localisé et général) car ils se situent à la limite des fonds non perturbés.

→ Le pont Carnot et le pont Denfert Rochereau sont largement impactés (d'autant plus que nous n'avons pas considéré dans le calcul, l'abaissement du fond du lit, rajoutant grossièrement 1 m d'érosion). (Voir Annexe 7).

## 3.5 Discussions et conclusion

### 3.5.1 Conclusion de l'étude du transport sédimentaire

Cette étude permet d'affirmer que le Clémenceau, le Pont Carnot et le Pont Denfert Rochereau seront impactés par l'abaissement des seuils. Le pont Carnot au vu de ses fondations pourrait être mis en danger dès la remise à l'équilibre morphologique du lit après réception des travaux.

Les résultats d'affouillement totaux démontrent que le pont Denfert Rochereau ne résistera probablement pas à une crue centennale, mais celui-ci ne sera pas impacté par l'abaissement des seuils et donc au nouvel état d'équilibre morphologique de la rivière.

Il reste un léger doute sur le pont Clémenceau pour des événements extrêmes car ses fondations se trouvent à la limite de l'affouillement total.

Quant au pont du Magasin, la profondeur de ses fondations coïncide fortement avec la limite de la profondeur d'affouillement total. Ses fondations ne seront visiblement pas impactées par un événement extrême telle qu'une crue centennale.

Le paragraphe suivant indique quelques notions pour éviter l'affouillement autour des piles de pont.

### 3.5.2 Discussions autour des fondations des ponts

Un ouvrage de référence en matière d'affouillement des fondations de pont<sup>28</sup>, The manual on scour at bridges and other hydraulic structures, indique plusieurs conseils pour éviter l'affouillement des piles de pont :

*Box 6.4 Key points for structural design*

- 1 Design foundations to withstand structural loading arising from the total scour depth.
- 2 Plot the different types of scour and extents of scour to develop a total scour envelope.
- 3 Piled foundations are preferable to spread footings if scour is an issue.
- 4 The design of abutment foundations should take account of scour.
- 5 The design of pier foundations on the floodplain should take account of potential lateral channel migration.

Ce que nous pouvons retenir concernant le cas de la Savoureuse c'est que :

- 1) La conception des fondations doit prendre en compte l'affouillement total (et non l'affouillement généralisé) en particulier pour le cas des semelles.
- 3) Les fondations sur pieux sont plus sécurisantes que les semelles.

Dans notre cas, seul le pont du Magasin possède des fondations comportant des pieux tubés, les autres ponts possèdent des semelles. Le Pont Carnot pourrait comporter des pieux en bois sous sa semelle (supposition faite de l'étude géotechnique).

Le pont du Magasin est encore une fois avantagé par son type de fondation ce qui lui garantit un moindre affouillement et une meilleure stabilité.

---

<sup>28</sup> Ciria (Cerema), *Manual on Scour at Bridges and Other Hydraulic Structures, Second Edition. London, 2015.*

### 3.5.3 Conclusion de l'étude du transport sédimentaire en rivière

Afin de conclure sur les résultats de la mission confiée, j'ai réalisé un arbre de décision (Figure 17) afin d'évaluer le risque d'érosion au niveau des ponts. L'échelle de risque comporte 4 niveaux : Pas/peu de risque, risque modéré, risque important en cas de crue et risque très élevé au retour de l'état d'équilibre du cours d'eau. La Figure 18 page suivante précise dans le cas de la savoureuse les niveaux de risque pour chaque pont.

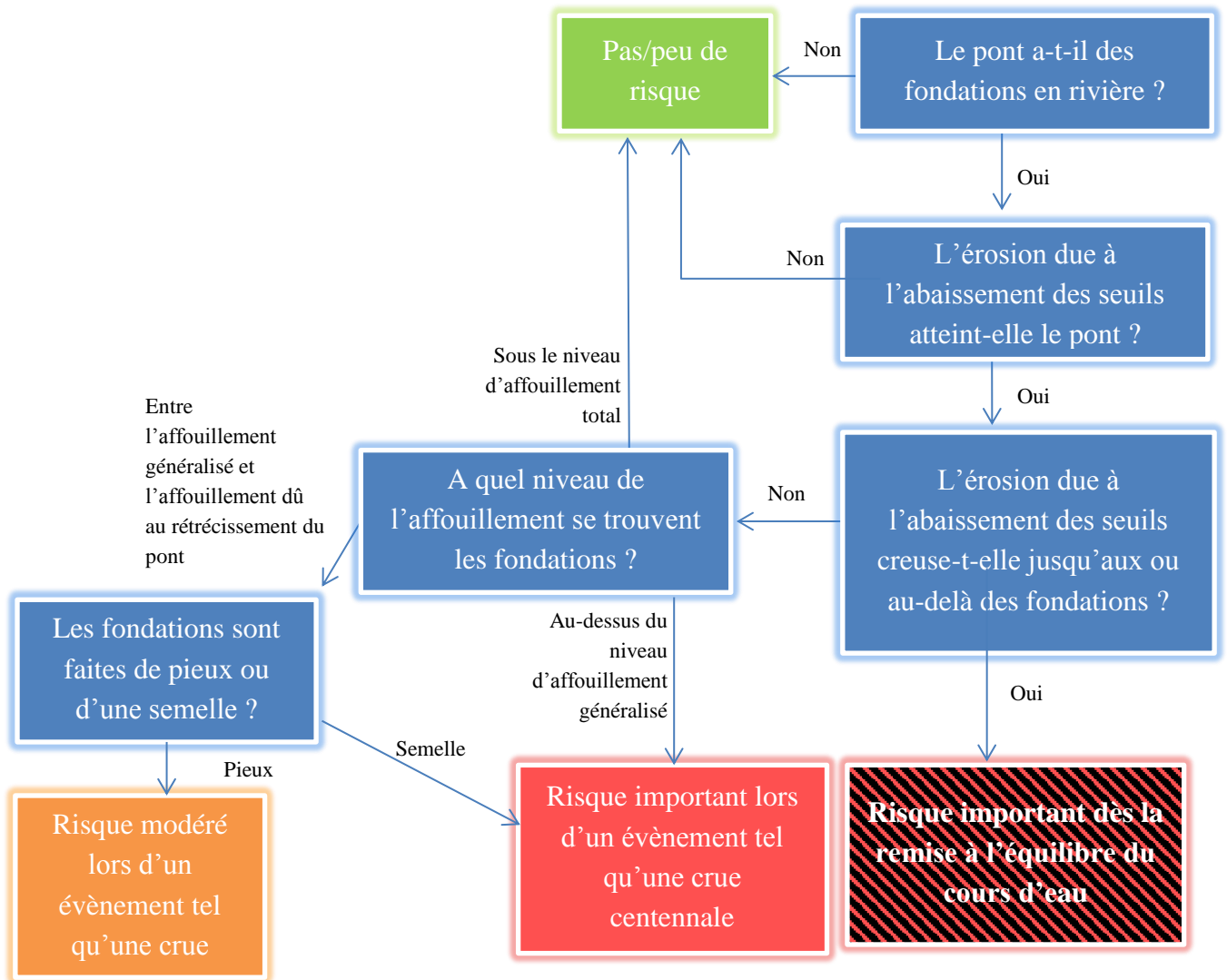


Figure 17 : Diagramme de décision des niveaux de risque pour la stabilité des ponts.

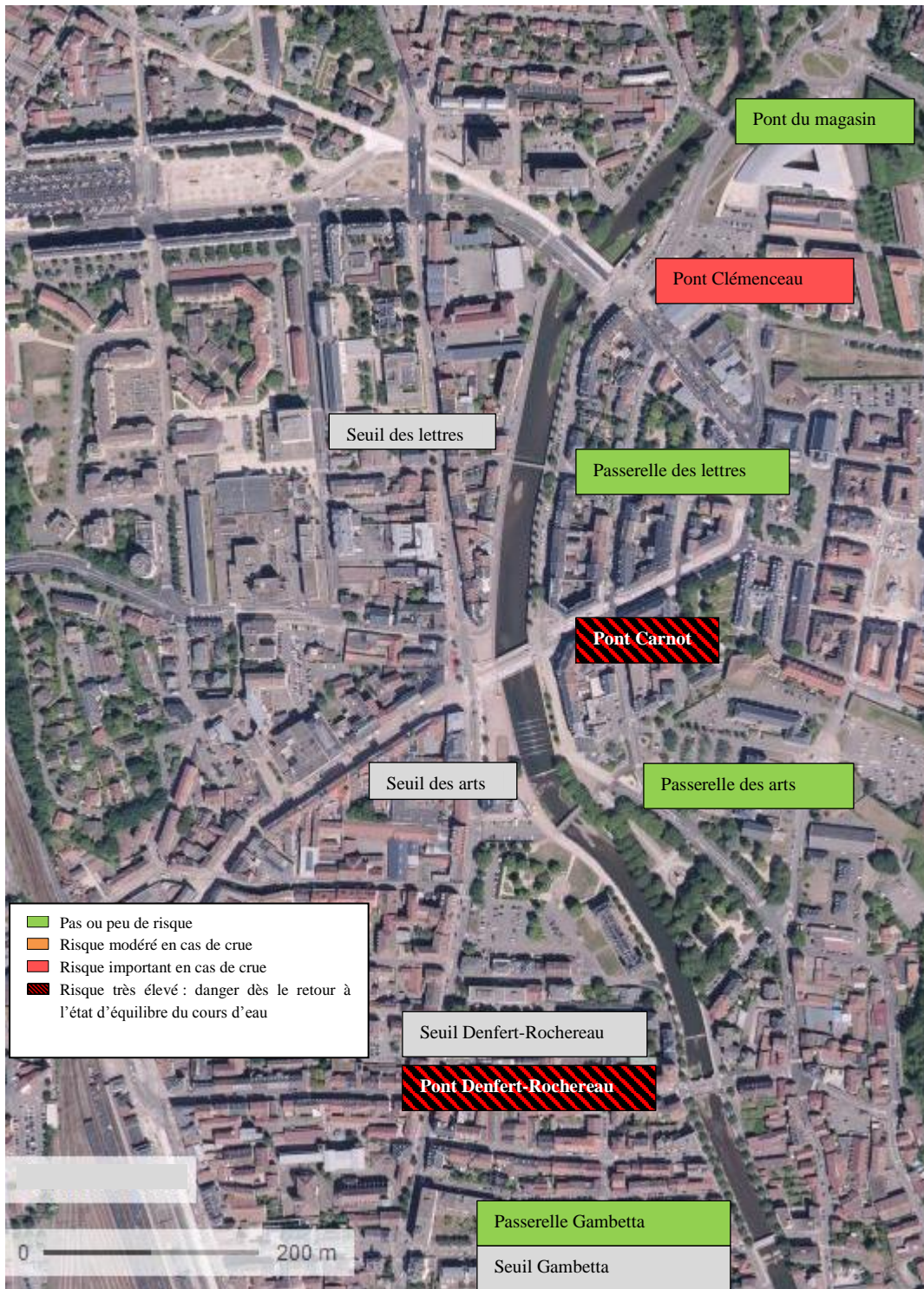


Figure 18 : Type de risque pour l'affouillement des ponts selon les biefs

## 4. Conclusion générale

### 4.1 Difficultés rencontrées et solutions apportées

La mission de stage confiée n'était pas une mission simple. Bien que mon stage de deuxième année d'école d'ingénieur (à l'ENGEES) concernait le transport sédimentaire, il s'agissait là d'une mission bien plus complexe avec un enjeu de stabilité des ponts non sans conséquence.

Par ailleurs, ne possédant pas de logiciel de modélisation du transport sédimentaire à disposition, j'ai dû adopter « le système D » : la feuille de calcul Excel avec les méthodes de calcul théorique. Afin d'avancer dans ma démarche de calcul et de trouver des solutions, j'ai contacté plusieurs chercheurs (de l'ENGEES, d'IRSTEA et du CNRS de Lyon) qui ont discuté volontiers avec moi de la pertinence des différents modèles calculatoires.

De manière générale, j'ai aussi compris que les imprévus sont des problèmes auxquels sont confrontés régulièrement les ingénieurs et qu'il est impératif de s'adapter rapidement afin de réagir efficacement à des changements de programme. En effet, le planning de mon stage a été réadapté car le projet de Belfort a été différé suite à divers aléas. J'ai donc réorganisé mon stage de façon à conserver ma problématique de départ. C'est aussi la raison pour laquelle j'ai choisi de ne traiter dans ce rapport que l'étude concernant le transport sédimentaire.

### 4.2 Apports professionnels et perspectives d'évolution

Ce stage s'est réalisé au sein d'un grand bureau d'ingénierie et m'a beaucoup appris sur le fonctionnement d'un bureau d'études. Je n'avais jusqu'alors pas été impliquée lors de mes stages dans la réalisation des parties de livrable, à rendre à une échéance précise aux clients.

Par ailleurs, ce deuxième stage réalisé dans le domaine fluvial m'a permis d'acquérir des automatismes de réflexion en hydraulique et en restauration des continuités écologiques.

Autonome dans mes tâches, en revanche, les ingénieurs n'hésitaient pas à m'aider en cas de doute ou de frein théorique. J'ai appris à optimiser mon travail, à demander avis aux experts et à parler des difficultés que je rencontrais pour mieux rebondir.

J'espère pouvoir acquérir dans un premier temps un maximum d'expériences en tant que chargé d'études dans ce domaine. Par la suite j'espère évoluer à moyen terme sur un poste de chef de projet et travailler en gestion de projet.

### 4.3 Conclusion du stage

Le rétablissement de la continuité écologique de la Savoureuse suscite des enjeux hydromorphologiques. En effet l'abaissement des différents seuils de la zone d'étude aura un impact crucial sur le transport sédimentaire. Ainsi, la principale problématique de cette étude fut : Quels seront les impacts hydromorphologiques du rétablissement de la continuité écologique de la Savoureuse à Belfort ?

Les choix d'abaisser les quatre seuils suivants : le seuil des Lettres, le seuil des Arts, le seuil Gambetta, le seuil Richelieu et d'effacer le seuil de Denfert-Rochereau impliqueront nécessairement une incision du lit après le retour à l'équilibre de l'hydromorphologie de la rivière. Cet abaissement aura également un impact sur l'affouillement des piles de pont à l'état projet lors des plus grandes crues.

Durant mon stage, j'ai estimé cette érosion avec pour moyens disponibles : l'étude en cours du projet de Belfort, des ouvrages consultables en interne ou en ligne et un tableur Excel. J'ai ensuite proposé d'élaborer une étude paramétrique afin de valider le modèle calculatoire choisi pour évaluer l'incision du lit. La méthode a été validée sur les portions qui incluent les piles de pont concernées.

D'après mes calculs, le lit se creusera d'environ 1 m, ce qui aura un impact sur la stabilité des ponts Carnot et Denfert Rochereau.

Par la suite j'ai évalué l'affouillement généralisé et localisé lors d'une crue centennale à l'état projet.

En conclusion, en cas d'une crue centennale, l'affouillement généralisé et localisé aura également un impact non sans conséquence sur la stabilité des ponts Carnot et Denfert Rochereau. Une vigilance sera apportée au pont Clémenceau dont les fondations se trouvent à la limite des fonds non affouillables. Le pont du Magasin, reconstruit en 1991 après son effondrement lors de la crue de février 1990, comporte désormais des fondations profondes qui le protégeront de l'incision du lit et des affouillements localisés.

Lors de ce stage, j'ai eu la liberté de pouvoir réaliser des tâches avec des responsabilités techniques. Cette expérience était enrichissante et les ingénieurs étaient très accessibles pour répondre à mes questionnements.

J'ai mis en pratique tout ce que j'ai appris à l'ENGEES en hydraulique fluviale et en hydromorphologie des rivières. Par ailleurs, même si ce stage était plus tourné vers mon premier cursus d'ingénieur en hydraulique, mes missions impliquaient des connaissances en matière de génie civil et d'aménagements urbains que j'ai acquises à l'EIVP. En outre, ce stage a été une vraie possibilité d'appréhender mes deux cursus tout en respectant ma volonté de travailler au sein d'un bureau d'études dans le domaine fluvial. A l'issue de ce stage, j'ai par ailleurs eu le plaisir d'être acceptée en CDI afin de continuer cette aventure professionnelle.



# Glossaire

**Affouillement** : Phénomène de surcreusement du lit lors d'une crue intense en particulier aux niveaux des ouvrages tels que les ponts ou les quais.

**Arasement** : Destruction de tout ou parti d'un ouvrage par abaissement de sa crête ou maintien d'un seuil de fond anti-érosion.

**Crête de seuil** : Ligne de déversement d'un seuil.

**Crue** : Phénomène caractérisé par une montée du niveau d'un cours d'eau, liée à une croissance du débit.

**Débit morphogène** : Le débit qui façonne le plus le lit du cours d'eau. Pour les cours d'eau naturel, il s'agit souvent de la crue de plein bord.

**Espèce potamotoque** : Espèce vivant dans la mer et se reproduisant en eaux douces. (Ex : le Saumon).

**Espèce thalassotoque** : Espèce vivant en eaux douces et se reproduisant dans la mer. (Ex : l'anguille)

**Etiage** : Période de faible débit, généralement l'été dans le cas des régimes pluviaux.

**Granulométrie** : Etude de la géométrie des sédiments.

**Hydromorphologie** : Etude de la morphologie des cours d'eau, de la forme du lit et des berges.

**Incision** : Abaissement du cours d'eau de façon générale. C'est le résultat d'une érosion régressive ou progressive.

**Lit majeur** : Lit maximum d'un cours d'eau dans lequel s'effectue les crues de débordement.

**Lit mineur** : Partie du lit comprise entre des berges franches dans lequel circule la rivière la quasi-totalité du temps en dehors des périodes de plus hautes eaux.

**Module** : Débit moyen annuel. Il est évalué par la moyenne des débits.

**Passé à poissons** : Dispositif implanté sur un obstacle naturel ou artificiel (barrage) qui permet aux poissons migrateurs de franchir ces obstacles pour accéder à leurs zones de reproduction ou de développement.

**Pelle** : Différence entre la crête du seuil et le fond du lit en amont d'un seuil.

**Pile de pont** : Appui intermédiaire d'un pont.

**Seuil** : Ouvrage implanté en travers dans le lit mineur d'un cours d'eau. C'est un ouvrage qui fait obstacle à l'écoulement des cours d'eau. Il s'apparente à un petit barrage.

# Abréviations

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

EA : Etat Actuel

EP : Etat projet

EIVP : Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris

ENGEES : Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement

IRSTEA : Institut Nationale de Recherche en Sciences et Technologie pour l'Environnement et l'Agriculture

ONEMA : Office Nationale de l'Eau et des Milieux Aquatiques (nouveau nom : AFB)

AFB : Agence Française pour la Biodiversité (ancien nom : ONEMA)

Q2 : Crue biennale

Q10 : Crue décennale

Q100 : Crue centennale

Sem1, Sem2 ... : Semaine 1, Semaine 2 ...

TFE : Travail de Fin d'Etude

TN : Terrain naturel

# Bibliographie

- AFEID, ONEMA - ASTEE - SHF - Adémie de l'Eau. *Ingénierie Écologique Appliquée Aux Milieux Aquatiques*, 2013.
- CCI territoire de Belfort. "Dossier Départemental Des Risques Majeurs. Belfort," 2005.
- Ciria (Cerema). *Manual on Scour at Bridges and Other Hydraulic Structures, Second Edition*. London, 2015.
- "Code de l'environnement - Article L210-1." <https://www.legifrance.gouv.fr>, December 2006.
- "Code de l'environnement - Article L371-1." <https://www.legifrance.gouv.fr>, July 12, 2010.
- Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Centre. "Synthèses Des Connaissances & Proposition d'une Méthode d'évaluation de l'impact Des Ouvrages Transversaux Sur La Continuité Sédimentaire Des Cours d'eau," June 2013.
- "Directive 2000/60/CE Du Parlement Européen et Du Conseil Du 23 Octobre 2000." <https://www.legifrance.gouv.fr>, October 2000.
- EGIS. "Fiche Des Ponts de La Savoureuse à Belfort," 2015.
- . "Fiche Des Seuils de La Savoureuse à Belfort," 2015.
- G. Degoutte. *Diagnostic, Aménagement et Gestion Des Rivières*, 2011.
- J. Brouard-Masson, M. Cheret, L. Letessier - Bureau de l'intégration de la biodiversité dans les territoires. "Trame Verte et Bleue et Documents d'urbanisme," July 2013.
- M. Ramette. "Surveillance et Confortement Des Fondations d'ouvrages d'art En Site Aquatique," 1980.
- Ministère des transports - Direction des routes et de la circulation routière. "Fondations de Ponts En Site Aquatique En État Précaire," December 1980.
- ONEMA. *Restauration de La Continuité Écologique Des Cours d'eau et Des Milieux Aquatiques et FNE*, 2014.
- ONEMA - J-M. Baudoin, V. Burgun, M. Chanseau, M. Larinier, M. Ovidio, W. Sremski, P. Steinbach, B. Voegtle. *Evaluer Le Franchissement Des Obstacles Par Les Poissons, Principes et Méthodes*, 2014.
- ONEMA - J.P. Borda, M. Bramard, H. Carmié, C. Pinel, A. Richard. "Pourquoi Rétablir La Continuité Écologique Des Cours d'eau ?," September 2010.
- ONEMA - J.R. Malavoi, C.C. Garnier, N. Landon, A. Recking, Ph. Baran. *Éléments de Connaissance Pour La Gestion Du Transport Solide En Rivière*, 2010.
- ONEMA et Cemagref. "Arasement et Dérasement de Seuils - Aide à La Définition de Cahier Des Charges Pour Les Études de Faisabilité," February 2011.
- Sétra. *Cours d'eau et Ponts - Guide Technique*, 2007.

# ANNEXES

---

<b>ANNEXES</b> .....	<b>44</b>
<b>Annexe 1</b> Calendrier du stage et missions effectuées.....	<b>45</b>
<b>Annexe 2</b> Présentation du projet et de la promenade urbaine .....	<b>46</b>
<b>Annexe 3</b> Etude de la granulométrie du cours d'eau .....	<b>47</b>
<b>Annexe 4</b> Profils en long de la Savoureuse .....	<b>48</b>
<b>Annexe 5</b> Pente d'équilibre calculée à l'état projet .....	<b>49</b>
<b>Annexe 6</b> Principe de calcul des différents types d'affouillements .....	<b>51</b>
<b>Annexe 7</b> Affouillement généralisé du fond du lit .....	<b>58</b>

# Annexe 1 Calendrier du stage et missions effectuées

Dans le tableau suivant figurent le calendrier et toutes les tâches réalisées pendant le stage :

Tâches	Temps réalisé (en jours)	Février				Mars				Avril				Mai				Juin				Juillet				Aout	
		Sem1	Sem2	Sem3	Sem4	Sem5	Sem6	Sem7	Sem8	Sem9	Sem10	Sem11	Sem12	Sem13	Sem14	Sem15	Sem16	Sem17	Sem18	Sem19	Sem20	Sem21	Sem22	Sem23	Sem24	Sem25	
T1	T 1.1	16																									
	T 1.2	46																									
	T 1.3	19																									
	T 1.4	15																									
	T 1.5	30																									
	T 1.6	16																									
	T 1.7	104																									
T2	46																										
TOTAL (Σ)	292																										
DUREE (D)	124																										

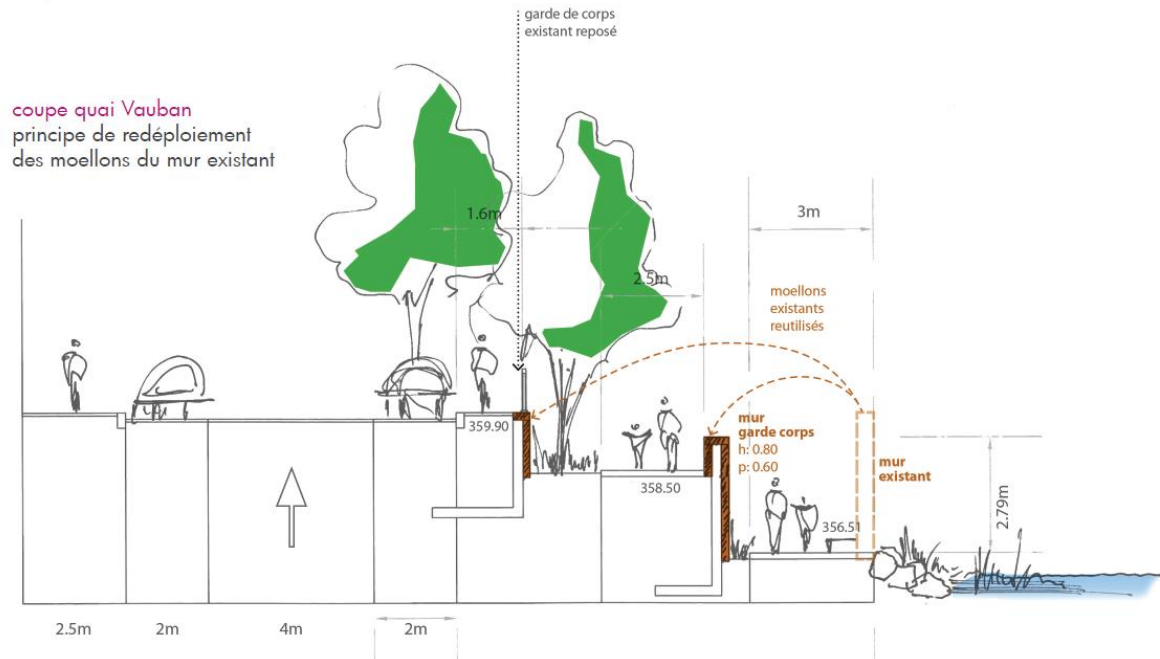
Description des tâches effectuées :

<b>T1 Opération de restauration de la continuité écologique de la Savoureuse à Belfort</b>	
T 1.1	Etat des lieux sur la continuité écologique, les indicateurs écologiques, les réglementations et le projet de Belfort
T 1.2	Etudier les incidences du transport solide sur les piles de ponts et les digues
T 1.3	Eventuellement, développer un outil pour étudier le transport sédimentaire
T 1.4	Affiner la partie AVP concernant la continuité écologique suite à la concertation avec l'AFB
T 1.5	Etudier et développer le projet d'aménagement des berges (Promenade)
T 1.6	Etudier l'affouillement des quais et la visibilité des enrochements.
T 1.7	Réaliser les plans
<b>T2 Opération de restauration de la continuité écologique de la Marne à Créteil : Réaliser l'étude initiale de l'environnement</b>	

## Annexe 2 Présentation du projet et de la promenade urbaine

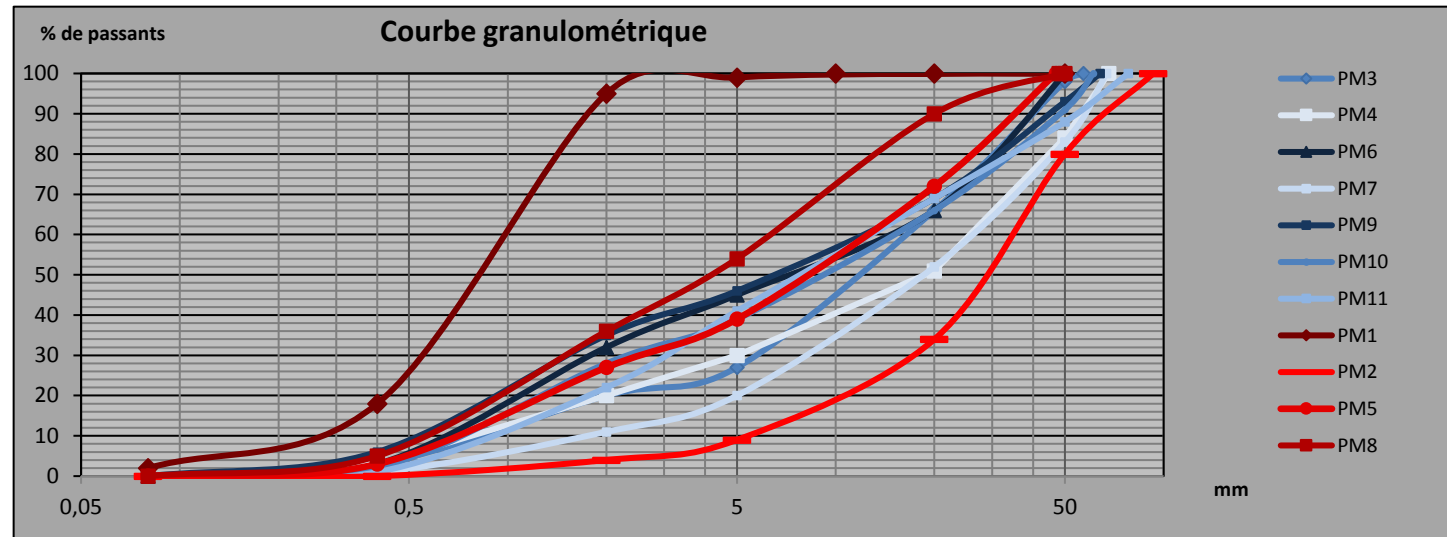
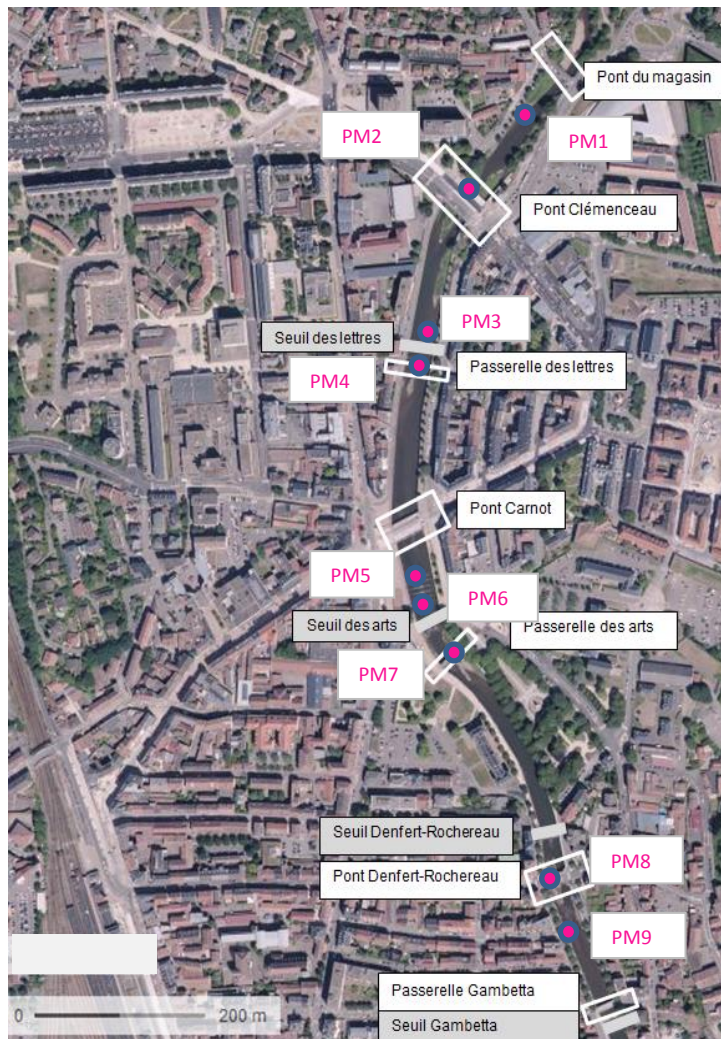
Cette annexe présente le projet de la promenade de la savoureuse sur un tronçon, ici, le secteur du Quai Vauban. Visuellement, nous pouvons remarquer une promenade qui sera en étage. La promenade située au plus près de la rivière sera fermée pendant les périodes de plus hautes eaux.

### SECTEUR QUAI VAUBAN



## Annexe 3 Etude de la granulométrie du cours d'eau

11 échantillons de sol ont été prélevés et analysés en laboratoire en été 2016 par l'entreprise Géotec. La figure ci-dessous indique où les échantillons ont été prélevés.

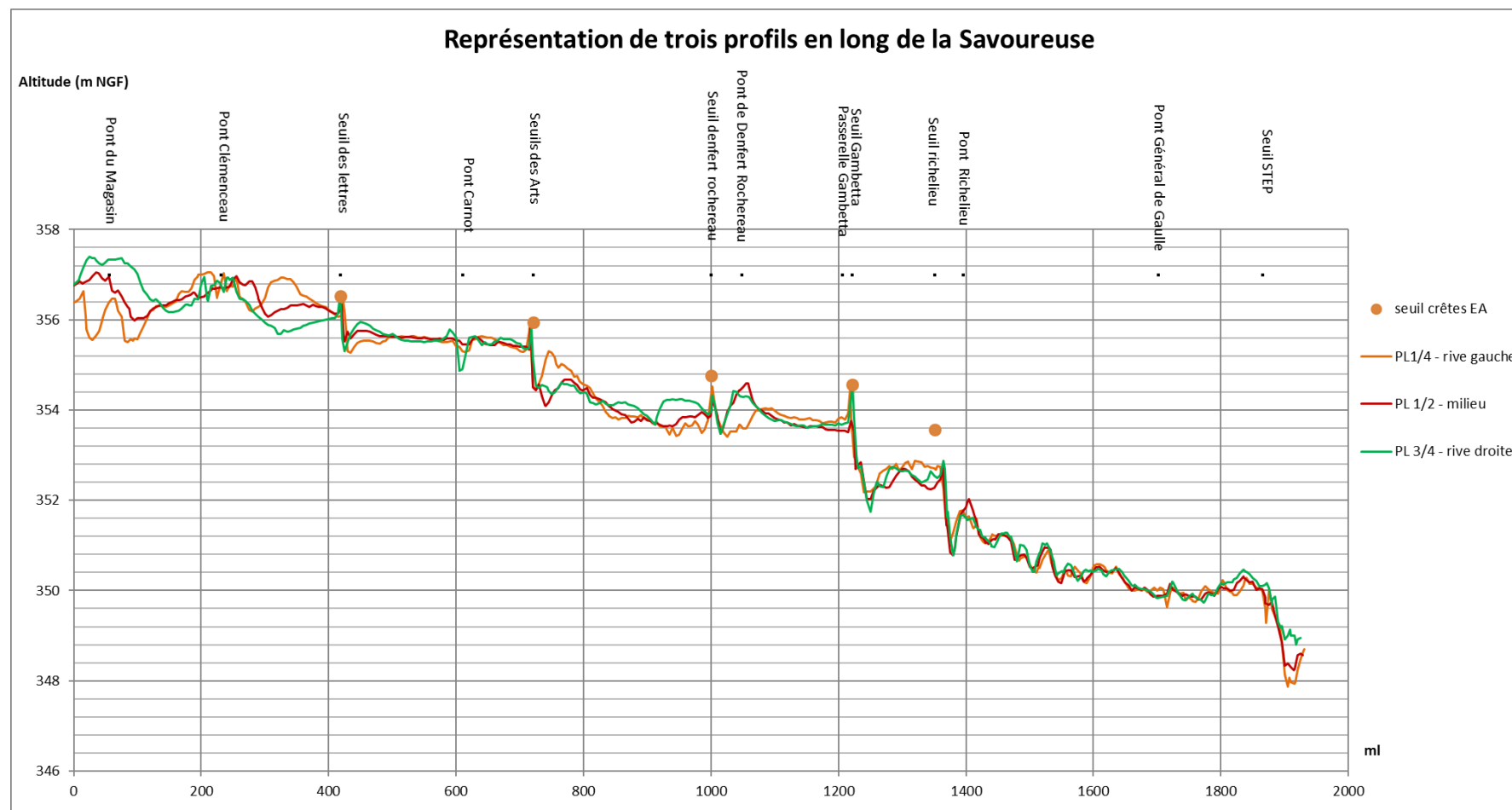


	PM1	PM2	PM3	PM4	PM5	PM6	PM7	PM8	PM9	PM10	PM11	Moyenne	Moyenne (sans les graves et fines)
<b>d10</b>	0,21	6	1	1	0,2	0,8	1,8	0,6	0,8	0,9	1	1,30	1,04
<b>d50</b>	1	30	12,5	19	2	8	19	4	7	10	9	11,05	<b>12,07</b>
<b>d90</b>	1,8	65	42	56	12	40	56	20	44	48	53	39,80	48,43

Afin de calculer le d50 moyen de tous les tronçons, j'ai réalisé une analyse statistique en comparant la variance des diamètres d10, d50 et d90 de chaque échantillon. Les « graves » représentant les sédiments en aval des seuils et les « fines » prélevées sur les atterrissements ont alors été mis à l'écart. Les courbes en rouge représentent les échantillons mis à l'écart et les courbes en bleu représentent les courbes conservées pour calculer le d50.

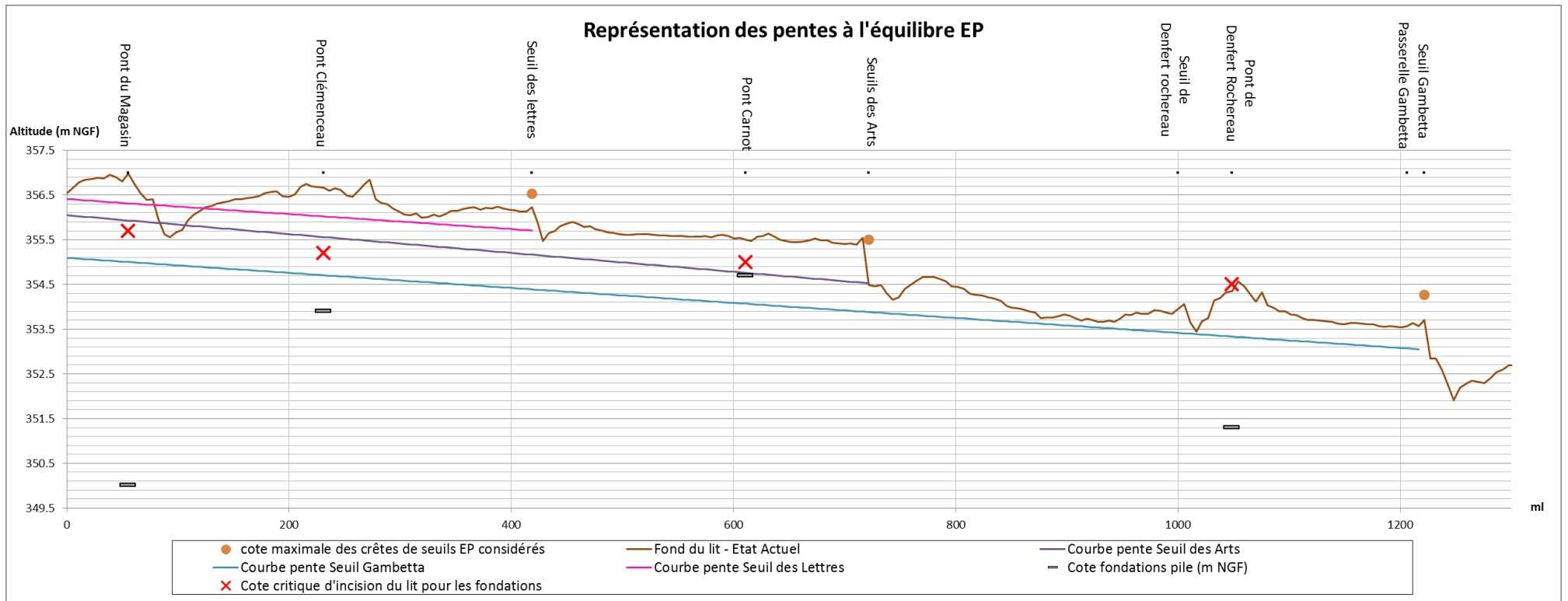
## Annexe 4 Profils en long de la Savoureuse

Plusieurs profils en long de la Savoureuse ont été tracés : un en partant du premier quart côté rive gauche, l'autre en partant du milieu du lit et le 3<sup>ème</sup> en partant sur le 3<sup>ème</sup> quart côté rive droite. Ces profils permettent de calculer la pente de manière plus fiable car certains tronçons (comme en amont du seuil des Lettres) possèdent un fond du lit non homogène. Ce phénomène illustre par ailleurs, le fait que ce tronçon est moins contraint et adopte une morphologie et une dynamique plus naturelles que les autres tronçons.

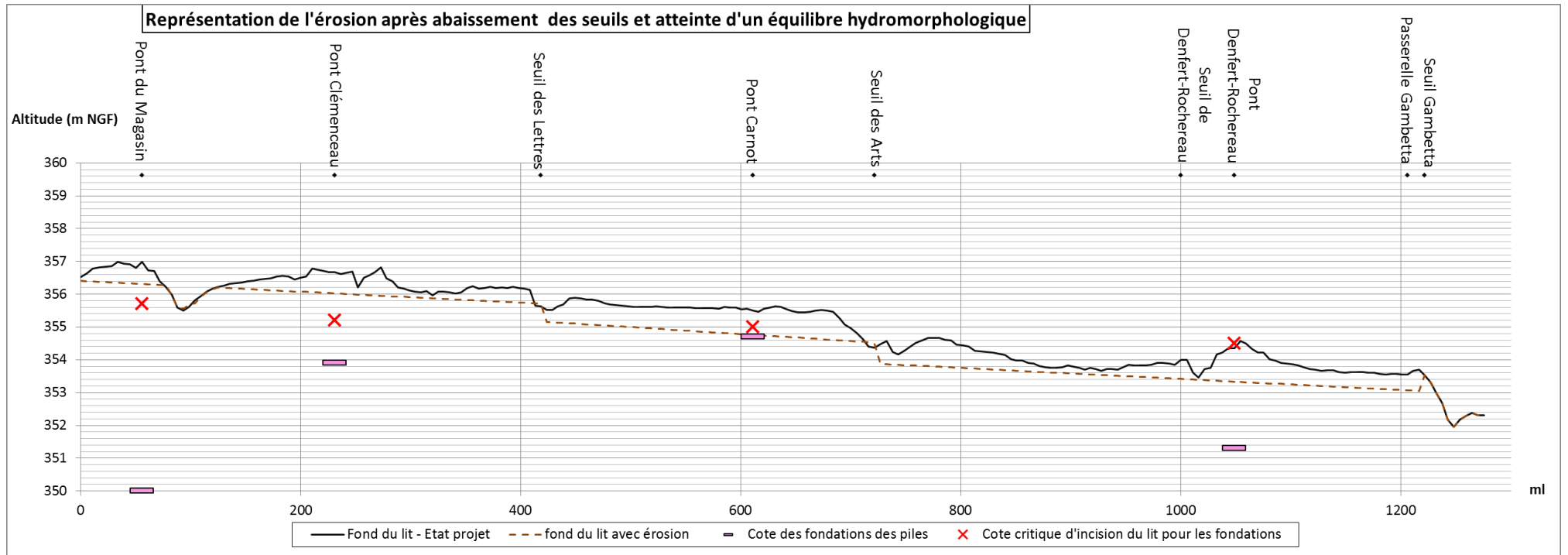




## Annexe 5 Pente d'équilibre calculée à l'état projet



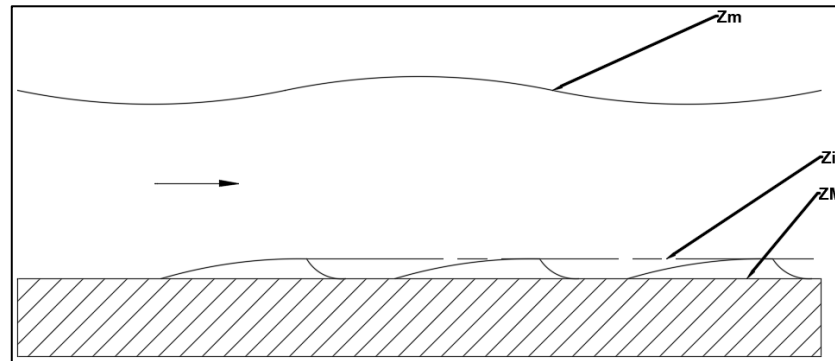
Cette Annexe, représente les pentes à l'équilibre calculées à partir des paramètres hydrauliques de l'état projet. Ce qui amène au graphique suivant représentant le fond du lit à l'équilibre de l'état projet.



## Annexe 6 Principe de calcul des différents types d'affouillements

### 1) L'affouillement généralisé<sup>29</sup>

L'essentiel du transport solide s'effectue entre la côte moyenne des fonds et la cote moyenne des fonds non perturbés. Ce qui peut être illustré par le schéma suivant :



$Z_i$  : côte moyenne des fonds (connue) (m NGF)

$Z_m$  : côte moyenne des fonds non perturbés (m NGF)

$Z_i - Z_m$  étant donc : l'épaisseur du courant sédimentaire. Ce qu'on appelle aussi la profondeur affouillable généralisée.

Grâce aux essais du laboratoire national d'hydraulique de Chatou. Ramette propose la formule suivante afin de calculer  $z_m$  :

$$z_m = Z_M - 0.73 \frac{q^{2/3}}{d_m^{1/6}}$$

$Z_M$  étant la côte de la ligne d'eau pour une crue de débit  $Q_m$  (m NGF)

$Q_m$  étant le débit d'une crue supérieure à la crue de limite de débordement ( $m^3/s$ )

$L$  étant la largeur mouillée.

$$q = \frac{Q_m}{L}$$

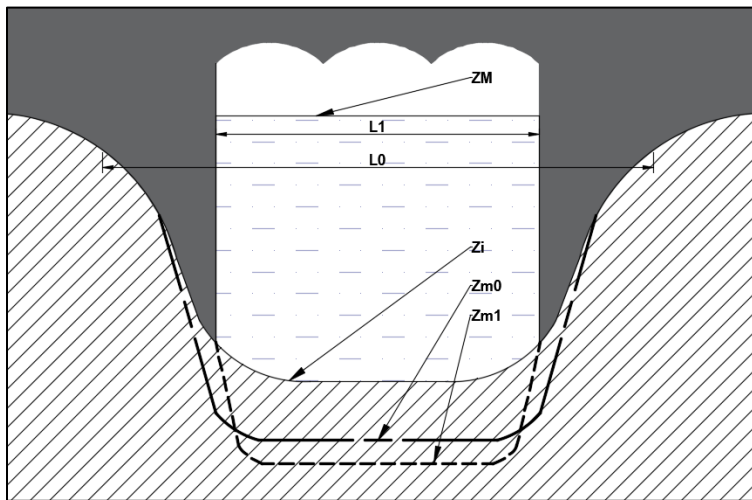
<sup>29</sup> M. Ramette, "Surveillance et Confortement Des Fondations d'ouvrages d'art En Site Aquatique.", 1980.

$d_m$  étant le diamètre moyen des sédiments (m)

La profondeur de fond affouillable n'est pas nécessairement une profondeur d'érosion. En effet, une crue peut mettre en mouvement une épaisseur de sédiments de quelques mètres sans obligatoirement impacter le profil une fois la crue terminée.

## 2) Affouillement dû à un rétrécissement local <sup>30</sup>

L'affouillement dû à un rétrécissement local, est dû à un rétrécissement de section comme c'est le cas sous un pont entre les piles et culées. Si un pont franchit un lit mineur de rivière, l'affouillement au niveau de cet ouvrage est donc plus important car on ne considère plus la largeur du lit mineur mais la largeur entre culées. Nous pouvons ainsi définir une nouvelle côte d'affouillement correspondant à l'érosion possible entre culées d'un pont. La concentration du courant provoquée par le pont entraîne un abaissement de la côte des fonds non perturbés à la côte  $Z_{m1}$  comme le montre le schéma suivant :



$$\text{Avec : } Z_{m0} = ZM - 0.73 \frac{q_0^{2/3}}{d_m^{1/6}}$$

$$\text{Et } q_0 = \frac{Qm}{L_0}$$

$$\text{Avec : } Z_{m1} = ZM - 0.73 \frac{q_1^{2/3}}{d_m^{1/6}}$$

$$\text{Et } q_1 = \frac{Qm}{L_1}$$

$Z_i$  : côte moyenne des fonds (connue) (m NGF)

$Z_{m0}$  : côte moyenne des fonds non perturbés de manière générale (m NGF)

$Z_{m1}$  : côte moyenne des fonds non perturbés par le rétrécissement de la section (m NGF)

$L_0$  : largeur du lit mineur (m)

$L_1$  étant la largeur entre culées (m)

$ZM$  étant la côte de la ligne d'eau pour une crue de débit  $Qm$  (m NGF)

<sup>30</sup> Ibid.

$Q_m$  étant le débit d'une crue supérieure à la crue de limite de débordement (m<sup>3</sup>/s)

$d_m$  étant le diamètre moyen des sédiments (m)

Ainsi nous pouvons calculer une épaisseur d'affouillement dû à la présence des ponts :

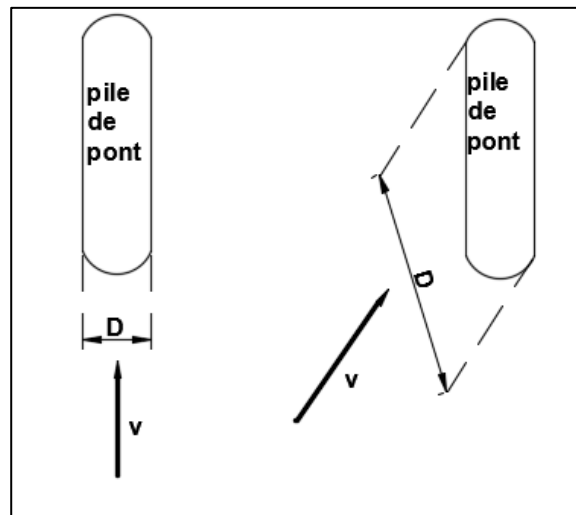
$$\text{Avec : } Zm_0 - Zm_1 = \frac{0.73}{dm^{1/6}} (q_1^{2/3} - q_0^{2/3})$$

### 3) Affouillement localisé

L'affouillement localisé dû à la présence des piles va engendrer un affouillement sous la côte  $Zm_1$ . Cet affouillement est assez complexe à estimer et nous pouvons approximer le surcreusement maximal créé en tête de pile par différentes méthodes : la méthode de Ramette, la méthode de Breusers et la méthode de « synthèse » que je précise dans cette annexe.

- La méthode de Ramette<sup>31</sup>

Dans le cas de la méthode de Ramette, l'affouillement localisé en tête de pile est approximé par  $2xD$  avec  $D$  le maître couple de la pile perpendiculairement à la direction du courant comme le montre le schéma ci-dessous :



$$Zm_2 = Zm_1 - 2D$$

Avec :

$Zm_2$ , la côte d'affouillement localisé dû aux piles de pont (m NGF),

$Zm_1$ , la côte d'affouillement dû au rétrécissement localisé (m NGF),

$D$ , le maître couple de la pile, perpendiculairement à la direction du courant (m).

<sup>31</sup> Ibid.

- **La méthode de « Synthèse »**

La méthode de « Synthèse », détermine l'affouillement localisé de la même façon que la méthode de Ramette mais en se souciant de la forme de la pile et de l'état de l'eau (Chargée ou Claire).

- En eau claire, la formule de l'affouillement autour des piles est la suivante :

$$Zm2 = Zm1 - 0.277C_{pile}(V_l D)^{0.619}$$

Avec :

Zm2, la côte d'affouillement localisé dû aux piles de pont (m NGF),

Zm1, la côte d'affouillement dû au rétrécissement localisé (m NGF),

V<sub>l</sub>, la vitesse moyenne d'approche (m/s)

D, la largeur de la pile projetée sur un plan perpendiculaire à l'écoulement (m).

C<sub>pile</sub>, est un coefficient dépendant du profil des piles :

Caractéristiques de la pile	C <sub>pile</sub>
<b>Profil hémicylindrique</b>	1.05
<b>Profil cylindrique</b>	1.00
<b>Profil double</b>	0.95
<b>Profil ogival</b>	0.95
<b>Profil Joukowski</b>	0.90
<b>Profil lenticulaire</b>	0.75

- En eau chargée de sédiments, la formule de l'affouillement autour des piles est la suivante :

$$Zm2 = Zm1 - 1,4D$$

Avec :

Zm2, la côte d'affouillement localisé dû aux piles de pont (m NGF),

Zm1, la côte d'affouillement dû au rétrécissement localisé (m NGF),

D, la largeur de la pile projetée sur un plan perpendiculaire à l'écoulement (m).

- **La méthode de Breusers**<sup>32</sup>

La méthode de Breusers dépend de plus de paramètres, il est décrit dans l'ouvrage du Sétra.

$$P_p = (P_2 + P_3 + P_{4p})$$

$$P_p/D = f_1(U) \cdot (\beta \cdot th(Y/D)) \cdot f_2 \cdot f_3(\alpha) \cdot f_4(x)$$

Avec :

D, largeur de la pile (m),

L, longueur de la pile (m),

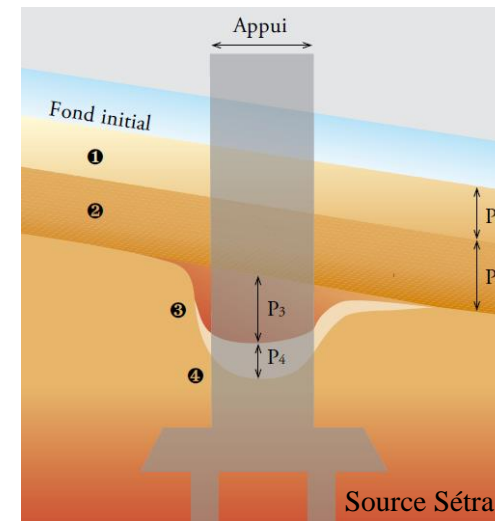
Y, profondeur du plan d'eau amont (m),

U, vitesse moyenne amont (m/s),

UC, vitesse critique d'entraînement du sédiment (m/s)

th : tangente hyperbolique,

$\alpha$  : angle entre l'axe de la pile et le courant (en °),



<sup>32</sup> Sétra, *Cours d'eau et Ponts - Guide Technique*, 2007.

$x$  : valeur la plus faible de l'entraxe avec la pile ou la culée voisine

$d_{50}$  : diamètre moyen du matériau constitutif du lit (en mm)

Sur le schéma :

En 1, La tendance sur le long terme de creusement du lit en fonction des modifications amont et aval (incision ou creusement),

En 2, Mobilisation du fond du lit lors d'une crue (affouillement généralisé),

En 3, Affouillement généralisé,

En 4, Sur-affouillement en pied d'appui du pont.

Dans cette méthode, la hauteur d'affouillement correspondant à l'affouillement localisé dû aux piles est la hauteur P4.

**$f_1(U)$  dépend de l'intensité du courant en fonction de la vitesse d'écoulement :**

<b>U (vitesse en m/s)</b>	<b><math>f_1(U)</math></b>
$U < 0,5 UC$	0
$0,5 UC < U < UC$	$2.(U/UC)-1$
$UC < U$	1

Avec :  $Uc = 1,58. (\overline{\omega s} - \overline{\omega e}). 0,5. d_{50}^{0.333}. Y^{0.167}. g^{0.5}$  (la vitesse critique de début d'entraînement des sédiments)

$\overline{\omega s}$  et  $\overline{\omega e}$  le poids volumique des grains et de l'eau en  $t/m^3$ ,  $d_{50}$  et  $Y$  en m



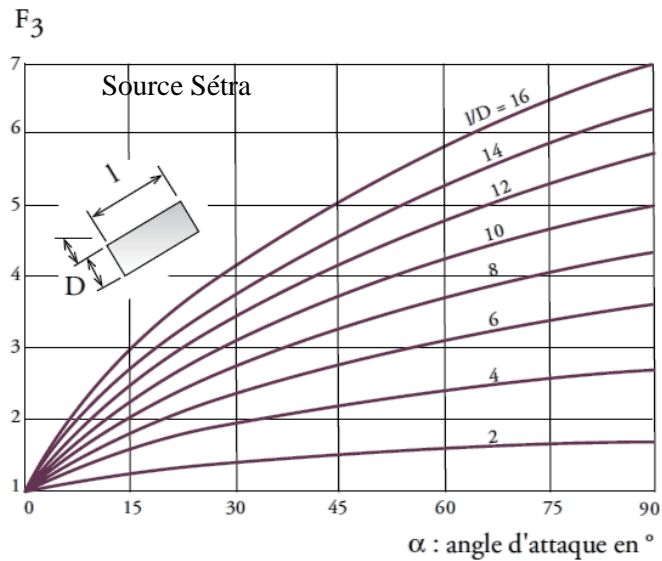
$\beta$  dépend de la taille des grains et du pavage ou non du lit :

Sans pavage du lit	Matériaux fins $d_{50} < 0,8\text{mm}$	$\beta = 2$
	Matériaux grossiers	$\beta = 2,4$
En cas de pavage du lit		$\beta = 3$

$f_2$  dépend de la forme de la pile :

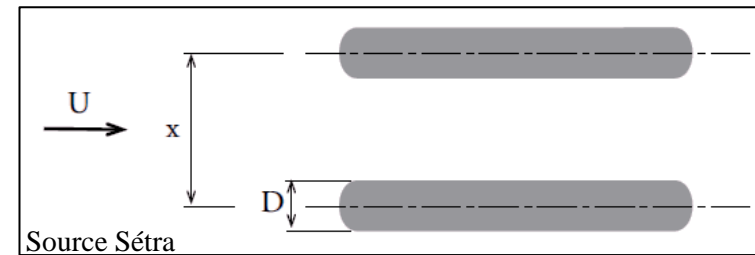
Forme de la pile	$f_2$
Circulaire	1
Pile profilée	0,75
Pile rectangulaire	1,3

$f_3$  dépend de l'angle d'attaque du courant sur la pile, déterminé par l'abaque suivant :



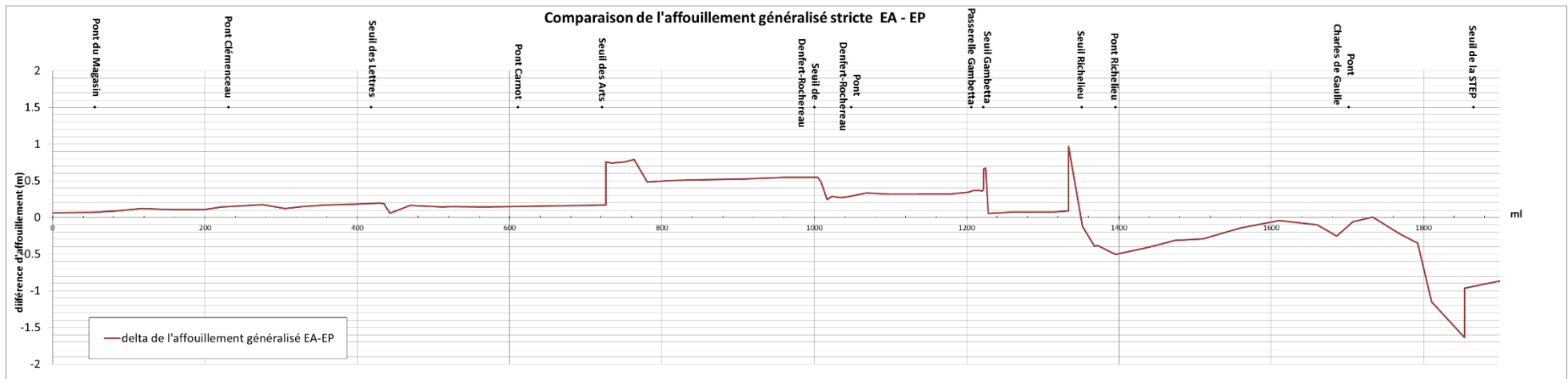
$f_4$  dépend de l'entraxe

$(x/D)$	$f_4$
$(x/D) < 2$	2,79
$2 \leq (x/D) < 4$	$1 + 1,79 / ((x/D) - 1)^{0.695}$
$4 \leq (x/D) < 7$	$4,34 - 0,62 \cdot (x/D)$
$7 \leq (x/D)$	1

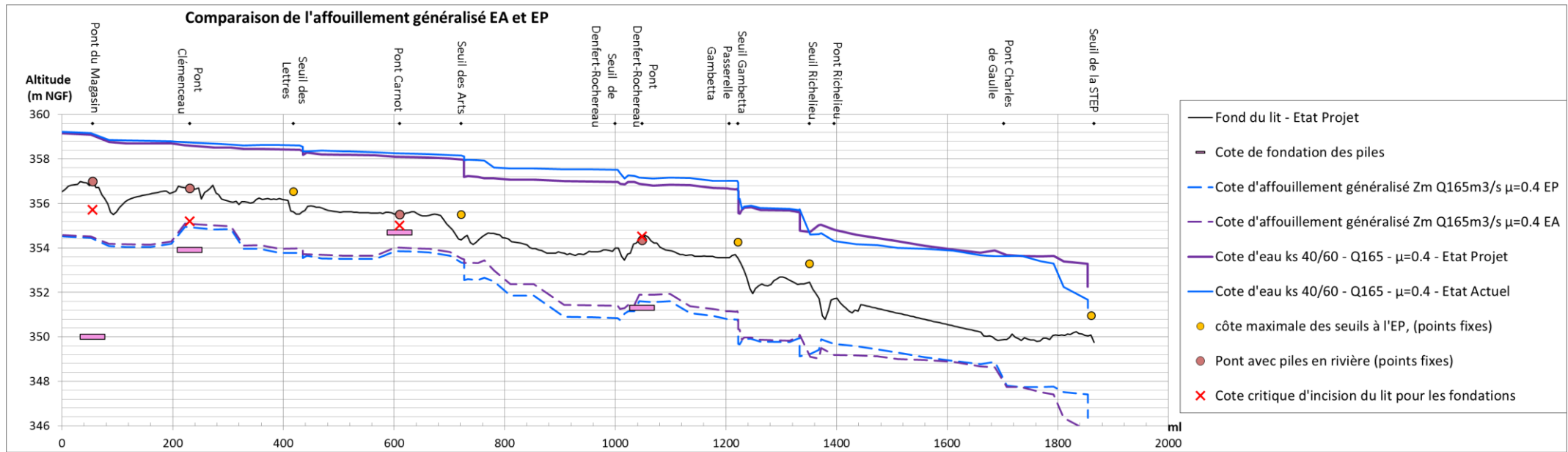


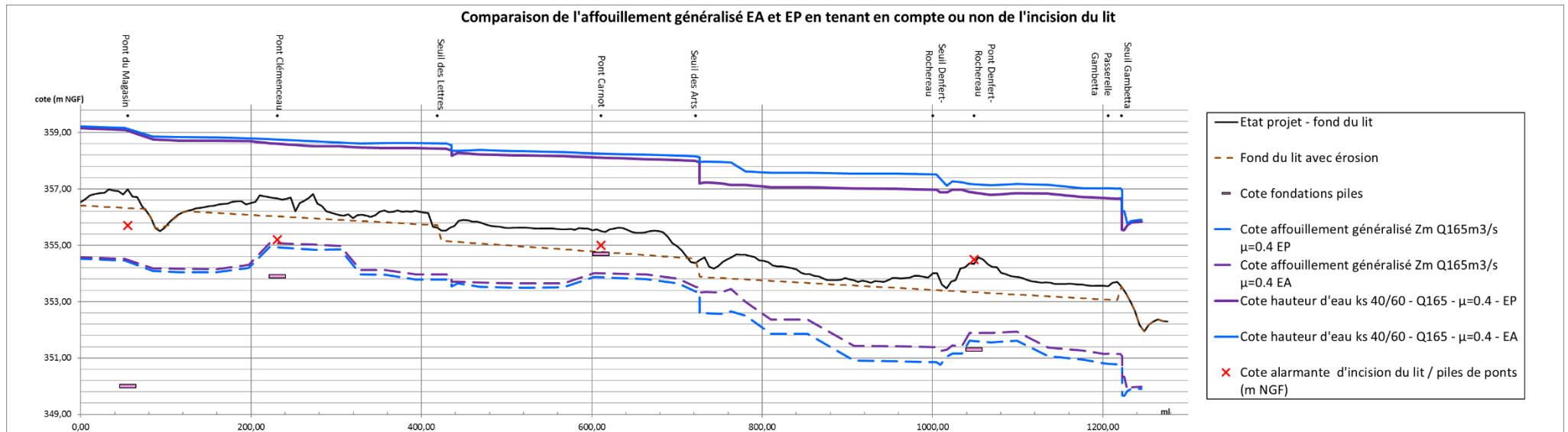
## Annexe 7 Affouillement généralisé du fond du lit

Ce graphique illustre la différence des fonds non perturbés entre l'état actuel et l'état projet. L'affouillement calculé ne représente pas l'affouillement réel, en effet, nous pouvons constater des points fixes : les seuils, les piles de ponts et la poutre située au niveau du seuil de la STEP qui contraignent l'affouillement généralisé.



Le graphique suivant représente la différence en m de l'affouillement généralisé entre EA (l'état actuel) et EP (l'état projet).





Le graphique suivant représente l'affouillement généralisé à l'EA et l'EP avec en plus la côte du fond non affouillable dans le cas où l'incision du lit se serait produite.