



ETAT DE FRIBOURG  
STAAT FREIBURG

**Service des ponts et chaussées SPC**  
**Tiefbauamt TBA**

Section lacs et cours d'eau  
Sektion Gewässer

Rue des Chanoines 17, 1701 Fribourg

T +41 26 305 37 37, F +41 26 305 37 38  
[www.fr.ch/spc](http://www.fr.ch/spc)

Fribourg, le 15 décembre 2014

Planifications stratégiques cantonales

# **Planification stratégique**

# **Assainissement du régime de charriage**

## **Rapport final**

*Version 2 (mise à jour octobre 2015)*



### **Valeur du présent rapport**

Le présent rapport constitue la planification stratégique cantonale de l'assainissement du régime de charriage, au sens de l'art. 38a LEaux et conformément aux exigences de l'art. 41c OEaux.

Version 1	15 décembre 2014
Version 2 (modifications mineures)	6 octobre 2015

### **Editeur**

Service des ponts et chaussées, section Lacs et cours d'eau (SPC)

Le SPC est un service de la Direction de l'aménagement, de l'environnement et des constructions (DAEC)

Avec la participation de la Direction des institutions, de l'agriculture et des forêts (DIAF)

### **Auteur**

BG Ingénieurs Conseils SA  
AquaVision Engineering Ltd.  
Pronat Conseil SA

### **Accompagnement à la DAEC, à la DIAF, à la DEE et à Groupe E**

(par services)

Christophe Joerin, SPC

Benoît Maillard, SPC

Jacques Maradan, SPC

Jean-Claude Raemy, SPC

Regula Binggeli, SNP

Elise Folly, SEn

Léonore Schaller, SEn

Jean-Daniel Wicky, SFF

Marc Dousse, SdE

Bertrand Rey, Groupe E

Johann Ruffieux, Groupe E

Pascal Vonlanthen, représentant des associations

### **Référence bibliographique**

DAEC, 2014 : Planification stratégique de l'assainissement du régime de charriage. Rapport final. SPC, Fribourg



## Table des matières

Page

<b>I</b>	<b>RESUME</b>	<b>I-IV</b>
<b>1.</b>	<b>CONTEXTE ET OBJECTIFS</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>PREAMBULE</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>OBJECTIFS DE L'ETUDE</b>	<b>2</b>
<b>1.3</b>	<b>DEMARCHE GENERALE</b>	<b>3</b>
<b>1.4</b>	<b>CADRE LEGAL</b>	<b>3</b>
<b>1.5</b>	<b>RAPPEL THEORIQUE</b>	<b>4</b>
1.5.1	<i>Qu'est-ce que le charriage ?</i>	4
1.5.2	<i>Fonction d'équilibre – régime de charriage</i>	5
1.5.3	<i>Régime de charriage et revitalisation</i>	6
1.5.4	<i>Formules de transport solide</i>	7
1.5.5	<i>Installations sur les cours d'eau</i>	8
<b>1.6</b>	<b>DEPOTOIR</b>	<b>10</b>
<b>1.7</b>	<b>EXTRACTIONS</b>	<b>10</b>
<b>1.8</b>	<b>INSTALLATIONS HYDROELECTRIQUES</b>	<b>10</b>
1.8.1	<i>Impacts sur le charriage</i>	10
1.8.2	<i>Effets sur les eaux souterraines</i>	11
1.8.3	<i>Effet des installations sur la protection contre les crues</i>	11
<b>1.9</b>	<b>AMENAGEMENTS DE COURS D'EAU</b>	<b>11</b>

### PREMIERE PARTIE

<b>2.</b>	<b>APPRECIATION SOMMAIRE</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>OBJECTIF</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>DEMARCHE GENERALE</b>	<b>13</b>
<b>2.3</b>	<b>ÉTAPE 1: DELIMITER LES RESEAUX HYDROGRAPHIQUES ET LES COURS D'EAU CIBLES</b>	<b>13</b>
2.3.1	<i>Considérations générales</i>	13
2.3.2	<i>Situation initiale</i>	14
2.3.3	<i>Critère écologique: la pente du lit</i>	15
2.3.4	<i>Critère écologique : zones protégées d'importance nationale et cantonale</i>	17
2.3.5	<i>Exclusion des cours d'eau situés en dehors du canton</i>	19
2.3.6	<i>Exclusion des plans d'eau</i>	19
2.3.7	<i>Exclusion de corrections de canaux artificiels</i>	20
2.3.8	<i>Suppression des tronçons hors canton de cours d'eau s'écoulant en partie dans le canton de Fribourg</i>	20
2.3.9	<i>Suppression des tronçons sous tuyaux et des tronçons en amont</i>	20
2.3.10	<i>Nettoyage du réseau hydrographique</i>	20
2.3.11	<i>Contrôle du linéaire le long des cours d'eau qui marquent la limite cantonale</i>	21
2.3.12	<i>Adaptations effectuées dans le rapport final</i>	21
<b>2.4</b>	<b>ÉTAPE 2 : RELEVER TOUTES LES INSTALLATIONS SIGNIFICATIVES</b>	<b>23</b>
2.4.1	<i>Données de base</i>	23
2.4.2	<i>Critères d'élimination des doublons</i>	23
2.4.3	<i>Critère d'exclusion : étude existante</i>	24
<b>2.5</b>	<b>ÉTAPE 4: APPRECIATION SOMMAIRE : ESTIMER GROSSIEREMENT L'IMPACT DE CHAQUE INSTALLATION SUR LE REGIME DE CHARRIAGE</b>	<b>26</b>
2.5.1	<i>Exclusion des installations de première priorité sans impact sur le régime de charriage</i>	26
2.5.2	<i>Installations entravant potentiellement le régime de charriage, suite à l'appréciation sommaire</i>	30



2.5.3	Détails de l'appréciation sommaire, pour les ouvrages ne nécessitant pas une évaluation détaillée	32
<b>2.6</b>	<b>AMENAGEMENTS DE DEUXIEME PRIORITE SUR LES COURS D'EAU.</b>	<b>39</b>
2.6.1	Démarche	40
2.6.2	Assainissement des aménagements de cours d'eau de 2 <sup>ème</sup> priorité	43
2.6.3	Résultat	43
2.6.4	Limites méthodologiques	45
<b>2.7</b>	<b>LINEAIRE RETENU POUR « L'EVALUATION DETAILLEE »</b>	<b>45</b>
<b>2.8</b>	<b>BILAN DE L'APPRECIATION SOMMAIRE</b>	<b>47</b>

## DEUXIEME PARTIE

3.	EVALUATION DETAILLEE	49
<b>3.1</b>	<b>DEMARCHE GENERALE</b>	<b>49</b>
<b>3.2</b>	<b>METHODOLOGIE</b>	<b>49</b>
3.2.1	Démarche générale	49
3.2.2	Etape 5 : Estimation de la charge solide actuelle du cours d'eau	50
3.2.3	Etape 6 : Estimation de la charge solide naturelle et nécessaire	50
3.2.4	Etape 7 : Impact des installations sur le régime de charriage	52
3.2.5	Etapes 8 et 9 : Profils en long du charriage et détermination des tronçons avec atteinte grave au régime de charriage	53
3.2.6	Etape 12 : Evaluer la faisabilité des mesures d'assainissement	53
<b>3.3</b>	<b>POTENTIEL ECOLOGIQUE</b>	<b>55</b>
3.3.1	Méthodologie de détermination	55
3.3.2	Résultat de l'état écologique potentiel	59
<b>3.4</b>	<b>MODÈLE DE DONNÉES</b>	<b>62</b>
4.	LA BROYE	63
<b>4.1</b>	<b>DESCRIPTION DU BASSIN VERSANT</b>	<b>63</b>
<b>4.2</b>	<b>DESCRIPTION DU COURS D'EAU</b>	<b>64</b>
4.2.1	Profil en long topographique	64
4.2.2	Morphologie historique et actuelle	65
<b>4.3</b>	<b>ESTIMATION DE LA CHARGE SOLIDE</b>	<b>65</b>
<b>4.4</b>	<b>ESTIMATION DU DEBIT DE CHARRIAGE NECESSAIRE</b>	<b>66</b>
<b>4.5</b>	<b>QUANTIFICATION DE L'IMPACT DE L'INSTALLATION</b>	<b>68</b>
4.5.2	Visite de terrain, situation à l'aval de l'installation	69
4.5.3	Modèle hydraulique (1D)	71
4.5.4	Conclusion sur l'impact de l'installation FR.BRO.1	72
4.5.5	Evaluation des atteintes à la protection contre les crues	72
<b>4.6</b>	<b>ETABLISSEMENT DU PROFIL EN LONG DE CHARRIAGE - BILAN DE TRANSPORT SOLIDE</b>	<b>73</b>
<b>4.7</b>	<b>PROPOSITION DE MESURE D'ASSAINISSEMENT</b>	<b>73</b>
4.7.1	VAR 0 : Conservation de l'installation en l'état	73
4.7.2	VAR 1 : Suppression du barrage	75
4.7.3	VAR 2 : Suppression du barrage + pré-excavation faible	77
4.7.4	VAR 3 : Suppression du barrage + pré-excavation importante	79
4.7.5	Synthèse des variantes	80
5.	LE GOTTERON	82
<b>5.1</b>	<b>DESCRIPTION DU BV</b>	<b>82</b>
<b>5.2</b>	<b>DESCRIPTION DU COURS D'EAU</b>	<b>82</b>



5.2.1	<i>Profil en long topographique</i>	84
5.2.2	<i>Morphologie historique et actuelle</i>	85
<b>5.3</b>	<b>ESTIMATION DE LA CHARGE SOLIDE</b>	<b>85</b>
<b>5.4</b>	<b>ESTIMATION DU DEBIT DE CHARRIAGE NECESSAIRE</b>	<b>86</b>
<b>5.5</b>	<b>QUANTIFICATION DE L'IMPACT DE L'INSTALLATION FR.GOT.4</b>	<b>86</b>
<b>5.6</b>	<b>EVALUATION DES ATTEINTES A LA PROTECTION CONTRE LES CRUES</b>	<b>87</b>
<b>5.7</b>	<b>ETABLISSEMENT DU PROFIL EN LONG DE CHARRIAGE - BILAN DE TRANSPORT SOLIDE</b>	<b>87</b>
<b>5.8</b>	<b>PROPOSITION DE MESURE D'ASSAINISSEMENT</b>	<b>88</b>
6.	L'HONGRIN	89
<b>6.1</b>	<b>DESCRIPTION DU BASSIN VERSANT</b>	<b>89</b>
<b>6.2</b>	<b>DESCRIPTION DU COURS D'EAU</b>	<b>90</b>
6.2.1	<i>Profil en long topographique</i>	92
6.2.2	<i>Morphologie historique et actuelle</i>	92
<b>6.3</b>	<b>ESTIMATION DE LA CHARGE SOLIDE</b>	<b>93</b>
6.3.1	<i>Etude sur le charriage, VD</i>	93
6.3.2	<i>Estimation selon la méthode de la capacité de transport</i>	93
6.3.3	<i>Estimation du débit de charriage sur les affluents</i>	94
<b>6.4</b>	<b>ESTIMATION DU DEBIT DE CHARRIAGE NECESSAIRE</b>	<b>94</b>
<b>6.5</b>	<b>QUANTIFICATION DE L'IMPACT DU BARRAGE DE L'HONGRIN</b>	<b>94</b>
<b>6.6</b>	<b>EVALUATION DES ATTEINTES A LA PROTECTION CONTRE LES CRUES</b>	<b>95</b>
<b>6.7</b>	<b>ETABLISSEMENT DU PROFIL EN LONG DE CHARRIAGE - BILAN DE TRANSPORT SOLIDE</b>	<b>95</b>
<b>6.8</b>	<b>PROPOSITION DE MESURE D'ASSAINISSEMENT</b>	<b>95</b>
<b>6.9</b>	<b>INFLUENCE DES MESURES PRISES PAR LE CANTON DE VAUD SUR LE TRONÇON FRIBOURGEOIS</b>	<b>96</b>
7.	LE JAVROZ	97
<b>7.1</b>	<b>DESCRIPTION DU BV</b>	<b>97</b>
<b>7.2</b>	<b>DESCRIPTION DU COURS D'EAU</b>	<b>97</b>
7.2.1	<i>Profil en long topographique</i>	99
7.2.2	<i>Morphologie historique et actuelle</i>	100
<b>7.3</b>	<b>ESTIMATION DE LA CHARGE SOLIDE</b>	<b>100</b>
7.3.1	<i>Etudes existantes</i>	100
7.3.2	<i>Calcul de capacité de transport</i>	101
7.3.3	<i>Synthèse et estimation de la charge solide</i>	101
<b>7.4</b>	<b>ESTIMATION DU DEBIT DE CHARRIAGE NECESSAIRE</b>	<b>101</b>
<b>7.5</b>	<b>QUANTIFICATION DE L'IMPACT DES INSTALLATIONS</b>	<b>101</b>
<b>7.6</b>	<b>ETABLISSEMENT DU PROFIL EN LONG DE CHARRIAGE - BILAN DE TRANSPORT SOLIDE</b>	<b>102</b>
<b>7.7</b>	<b>PROPOSITION DE MESURE D'ASSAINISSEMENT</b>	<b>102</b>
7.7.1	<i>Remarques préliminaires</i>	102
7.7.2	<i>VAR 0 : Prélèvement annuel de 2800 m<sup>3</sup> de graviers</i>	104
7.7.3	<i>VAR 1 : Arrêt total des extractions</i>	106
7.7.4	<i>VAR 2 : Prélèvement annuel de 1500 m<sup>3</sup></i>	108
7.7.5	<i>Synthèse des variantes</i>	109
8.	LA JOGNE	111
<b>8.1</b>	<b>PROPOSITION DE MESURES D'ASSAINISSEMENT DE LA GRAVIERE RIME</b>	<b>111</b>
8.1.1	<i>Remarques préliminaires</i>	111
8.1.2	<i>VAR 0 : 600 m<sup>3</sup> d'extraction à Rime</i>	112
8.1.3	<i>VAR 1 : Arrêt des extractions à Rime</i>	113
8.1.4	<i>VAR2 : 300-350 m<sup>3</sup> d'extractions à Rime</i>	114
8.1.5	<i>Synthèse des variantes</i>	115



9.	LA PETITE GLANE	116
9.1	DESCRIPTION DU BV	116
9.2	DESCRIPTION DU COURS D'EAU	116
9.2.1	<i>Profil en long topographique</i>	118
9.2.2	<i>Morphologie historique et actuelle</i>	118
9.3	ESTIMATION DE LA CHARGE SOLIDE	119
9.4	ESTIMATION DU DEBIT DE CHARRIAGE NECESSAIRE	119
9.5	QUANTIFICATION DE L'IMPACT DES INSTALLATIONS	120
9.5.1	<i>Evaluation des atteintes à la protection contre les crues</i>	120
9.6	ETABLISSEMENT DU PROFIL EN LONG DE CHARRIAGE - BILAN DE TRANSPORT SOLIDE	120
9.7	PROPOSITION DE MESURE D'ASSAINISSEMENT	121
10.	LA SARINE (ET PETITS AFFLUENTS)	122
10.1	DESCRIPTION DU BASSIN VERSANT	122
10.2	DESCRIPTION DU COURS D'EAU	123
10.2.1	<i>Profil en long topographique</i>	128
10.2.2	<i>Morphologie historique et actuel</i>	129
10.3	ESTIMATION DE LA CHARGE SOLIDE	130
10.3.1	<i>La Sarine entre le Lac du Vernex et le Lac de la Gruyère – Evaluation approfondie</i>	130
10.3.2	<i>La Sarine entre le Lac de la Gruyère et l'Aar – résumé des études existantes</i>	134
10.4	ESTIMATION DU DEBIT DE CHARRIAGE NECESSAIRE	138
10.5	QUANTIFICATION DE L'IMPACT DES INSTALLATIONS	138
10.6	ETABLISSEMENT DU PROFIL EN LONG DE CHARRIAGE - BILAN DE TRANSPORT SOLIDE	141
10.7	INFLUENCE DES INSTALLATIONS SUR LA PROTECTION CONTRE LES CRUES	143
10.8	PROPOSITION DE MESURES D'ASSAINISSEMENT	145
10.8.1	<i>Objectifs des mesures d'assainissement</i>	145
10.8.2	<i>Evaluation des mesures</i>	146
10.8.3	<i>Variantes – Barrage de Lessoc (Lac de Lessoc)</i>	147
10.8.4	<i>Variantes – Barrage de Rossens (Lac de la Gruyère)</i>	155
10.8.5	<i>Variantes – Barrage de la Maigrauge (Lac de Pérolles)</i>	160
10.8.6	<i>Variantes – Barrage de Schiffenen (Lac de Schiffenen)</i>	163
10.8.7	<i>Estimation des coûts des mesures types</i>	166
10.8.8	<i>Résumé : coûts estimatifs des mesures d'assainissement du régime de charriage</i>	169
11.	LA GLANE	171
11.1	DESCRIPTION DU BASSIN VERSANT	171
11.2	DESCRIPTION DU COURS D'EAU ET PROFIL EN LONG TOPOGRAPHIQUE	172
11.2.1	<i>Découpage morphologique</i>	172
11.2.2	<i>Découpage selon les apports hydrologiques :</i>	173
11.2.3	<i>Découpage selon les installations prioritaires :</i>	174
11.2.4	<i>Découpage en fonction de la pente</i>	174
11.2.5	<i>Découpage final proposé pour l'étude du charriage de la Glâne</i>	174
11.3	ESTIMATION DE LA CHARGE SOLIDE ACTUELLE	175
11.3.1	<i>Calcul de la capacité minimale et maximale</i>	175
11.3.2	<i>Estimation de la charge solide actuelle</i>	176
11.4	ESTIMATION DE LA CHARGE SOLIDE NATURELLE ET NECESSAIRE	179
11.5	IMPACT DES INSTALLATIONS SUR LE REGIME DE CHARRIAGE	180
11.6	INFLUENCE DES INSTALLATIONS SUR LA PROTECTION CONTRE LES CRUES	182
11.7	PROFILS EN LONG DU CHARRIAGE ET DETERMINATION DES TRONÇONS AVEC ATTEINTE GRAVE	182
11.8	PROPOSITION DE MESURES D'ASSAINISSEMENT ADEQUATES	184
11.9	ESTIMATION DU POTENTIEL DE VALORISATION	212



12.	LA TAVERNA	214
<b>12.1</b>	<b>DESCRIPTION DU BASSIN VERSANT</b>	<b>214</b>
<b>12.2</b>	<b>DESCRIPTION DU COURS D'EAU ET PROFIL EN LONG TOPOGRAPHIQUE</b>	<b>214</b>
12.2.1	<i>Découpage morphologique</i>	214
12.2.2	<i>Découpage selon les apports hydrologiques</i>	215
12.2.3	<i>Découpage en fonction des installations</i>	216
12.2.4	<i>Découpage en fonction de la pente</i>	216
12.2.5	<i>Découpage final proposé pour l'étude du charriage de la Taverna</i>	217
<b>12.3</b>	<b>ESTIMATION DE LA CHARGE SOLIDE ACTUELLE</b>	<b>218</b>
12.3.1	<i>Calcul de la capacité minimale et maximale</i>	218
12.3.2	<i>Détermination de la charge solide actuelle</i>	219
<b>12.4</b>	<b>ESTIMATION DE LA CHARGE SOLIDE NATURELLE ET NECESSAIRE</b>	<b>221</b>
<b>12.5</b>	<b>IMPACT DES INSTALLATIONS SUR LE REGIME DE CHARRIAGE</b>	<b>222</b>
<b>12.6</b>	<b>PROFILS EN LONG DU CHARRIAGE ET DETERMINATION DES TRONÇONS AVEC ATTEINTE GRAVE</b>	<b>223</b>
<b>12.7</b>	<b>PROPOSITION DE MESURES D'ASSAINISSEMENT ADEQUATES</b>	<b>225</b>
12.7.1	<i>Secteur 1</i>	225
12.7.2	<i>Secteur 2</i>	225
<b>12.8</b>	<b>ETAPE 11 : ESTIMATION DU POTENTIEL DE VALORISATION</b>	<b>230</b>
13.	LA BIBERA	232
<b>13.1</b>	<b>DESCRIPTION DU BASSIN VERSANT</b>	<b>232</b>
<b>13.2</b>	<b>DESCRIPTION DU COURS D'EAU ET PROFIL EN LONG TOPOGRAPHIQUE</b>	<b>233</b>
13.2.1	<i>Découpage morphologique</i>	233
13.2.2	<i>Découpage selon les apports hydrologiques</i>	233
13.2.3	<i>Découpage en fonction des installations</i>	234
13.2.4	<i>Découpage en fonction de la pente</i>	234
13.2.5	<i>Découpage final proposé pour l'étude du charriage de la Bibera</i>	234
<b>13.3</b>	<b>ESTIMATION DE LA CHARGE SOLIDE ACTUELLE</b>	<b>235</b>
13.3.1	<i>Calcul de la capacité minimale et maximale</i>	235
13.3.2	<i>Détermination de la charge solide actuelle</i>	237
<b>13.4</b>	<b>ESTIMATION DE LA CHARGE SOLIDE NATURELLE ET NECESSAIRE</b>	<b>238</b>
<b>13.5</b>	<b>IMPACT DES INSTALLATIONS SUR LE REGIME DE CHARRIAGE</b>	<b>239</b>
13.5.1	<i>Présentation des installations</i>	239
13.5.2	<i>Influence des installations sur le régime de charriage</i>	241
13.5.3	<i>Evaluation des atteintes à la protection contre les crues</i>	241
<b>13.6</b>	<b>PROFILS EN LONG DU CHARRIAGE ET DETERMINATION DES TRONÇONS AVEC ATTEINTE GRAVE</b>	<b>241</b>
<b>13.7</b>	<b>PROPOSITION DE MESURES D'ASSAINISSEMENT ADEQUATES</b>	<b>243</b>
<b>13.8</b>	<b>ESTIMATION DU POTENTIEL DE VALORISATION</b>	<b>243</b>
14.	LE LEDEUBACH	245
<b>14.1</b>	<b>DESCRIPTION DU BASSIN VERSANT</b>	<b>245</b>
<b>14.2</b>	<b>DESCRIPTION DU COURS D'EAU</b>	<b>245</b>
<b>14.3</b>	<b>EVALUATION DES ATTEINTES A LA PROTECTION CONTRE LES CRUES</b>	<b>247</b>
<b>14.4</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>247</b>
15.	EVALUATION DES COURS D'EAU CIBLES ET DE LA RESPONSABILITE DES INSTALLATIONS	249
16.	INSTALLATIONS DONT LES DETENTEURS SERONT VRAISEMBLABLEMENT APPELES A PRENDRE DES MESURES D'ASSAINISSEMENT ET TYPES DE MESURES PROPOSEES	251
<b>16.1</b>	<b>LISTE DES INSTALLATIONS NECESSITANT POTENTIELLEMENT UN ASSAINISSEMENT</b>	<b>251</b>
<b>16.2</b>	<b>POTENTIEL ECOLOGIQUE DES COURS D'EAU A ASSAINIR</b>	<b>253</b>



<b>16.3</b>	<b>FAISABILITE DES MESURES (EXCEPTE LA SARINE)</b>	<b>255</b>
<b>16.4</b>	<b>COUTS ET POTENTIEL DE VALORISATION DES MESURES</b>	<b>256</b>
<b>16.5</b>	<b>DELAI DES ASSAINISSEMENTS</b>	<b>258</b>
<b>17.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>260</b>



## Table des matières des Annexes

1. Fiches des 152 installations prises en compte dans l'évaluation sommaire
2. Données de base du calcul de la capacité de transport (LOT 1 BG)
3. Données de base du LOT 2 (Aquavision)
4. Fiche d'évaluation des variantes d'assainissement : Broye, Glâne, Taverna, Jogne, Javroz (Aquavision)
5. Etude détaillée pour variantes d'assainissement de l'extraction de la gravière Rime (FR.JOG.9 ; Aquavision)
6. Présentation des critères d'évaluation des mesures d'assainissement sur la Sarine (BG)
7. Fiches d'évaluation multicritère des variantes d'assainissement sur la Sarine (BG)
8. Synthèse de l'évaluation multicritère des variantes d'assainissement sur la Sarine (BG)
9. Analyse morphologique de la Sarine à l'aval de Lessoc (méthode UBCRM ; BG)
10. Résultats cartographiques du rapport (cartes au format A3)



## Table des Figures

Figure 1: Planification cantonale - selon la LEaux .....	1
Figure 2: (a) Schéma des différents types de transport solide, (b) description de forces en jeu .....	4
Figure 3: Diagramme de Hjulström décrivant les diamètres transportés en fonction des vitesses en distinguant les conditions de sédimentation, de transport et d'érosion.....	5
Figure 4: Diagramme de Yalin & Da Silva décrivant les morphologies types et leurs conditions de formation. B: largeur du cours d'eau; h: hauteur d'eau pendant une crue de $Q_{2.5}$ ; D: diamètre moyen.....	6
Figure 5: Profil type de succession de végétation et dynamique alluviale .....	7
Figure 6: Bilan sédimentaire sur un cours d'eau - correspondant au résultat type attendu dans ce mandat.....	8
Figure 7: Icônes illustrant les différents paramètres impactant le charriage (à gauche: hydrologie; au milieu: apport en sédiment; à droite: correction du lit et des berges) .....	8
Figure 8: Influence des installations sur le bilan sédimentaire.....	10
Figure 9: Déroulement de la phase 1 (Schälchli et Kirchhofer, 2012).....	13
Figure 10: Délimitation des cours d'eau cibles (marqués en rouge) sur la base d'indicateurs relatifs à l'importance écologique à l'état naturel (Schälchli und Kirchhofer, 2012) .....	14
Figure 11: Représentation schématique du calcul de la pente moyenne des « features » du réseau hydrographique gwn25. ....	16
Figure 12 Cours d'eau cibles pour l'assainissement du régime de charriage.....	22
Figure 13 Installations entravant potentiellement le régime de charriage, suite à l'appréciation sommaire. ....	31
Figure 14 Bassin versant du Tatrel et localisation de l'ouvrage concerné .....	33
Figure 15 Barrage sur le Tatrel et retenue engendrée.....	33
Figure 16 bancs de graviers en amont de la zone d'influence de l'ouvrage. ....	34
Figure 17 granulométrie du fond du lit et morphologie du cours d'eau en aval de l'installation.....	34
Figure 18 Graviers en aval de l'installations, en faible proportion dans le lit .....	35
Figure 19 Bassin versant de la Gérine.....	36
Figure 20 Bassin versant de l'Albeuve.....	39
Figure 21 Aménagements du fond du lit et renforcements de pied de berge. ....	41
Figure 22 Aménagements de cours d'eau de deuxième priorité.....	42
Figure 23 Prise en compte des aménagements de cours d'eau et tronçons impactés par une installation de deuxième priorité, dans la planification des revitalisations du canton de Fribourg.....	43
Figure 24 Aménagements de 2 <sup>ème</sup> priorité situés dans des tronçons prioritaires pour la revitalisation.....	44
Figure 25 installations et linéaire retenus pour l'évaluation détaillée .....	46
Figure 26 : Vue d'ensemble de la démarche.....	48
Figure 27 Schéma explicatif pour la détermination de la charge naturelle .....	52
Figure 28 Détermination de l'Etat écologique potentiel.....	55
Figure 29 Etat écologique potentiel des cours d'eau fribourgeois .....	60
Figure 30 Potentiel écologique des cours d'eau cibles .....	61
Figure 31: Bassin versant de la Broye à l'amont de Moudon.....	63
Figure 32: Profil en long topographique de la Broye.....	64
Figure 33 : Profil en long au droit de l'installation.....	68
Figure 34 : Synthèse des visites de terrain .....	69
Figure 35 : Banc de graviers observé au pk 54.5 (à gauche) et 54.7 (à droite).....	70
Figure 36 : Sédiments observés directement en amont de l'installation .....	70
Figure 37 Lit de la Broye en aval de l'installation (km 51.2 à gauche, km 49.2 à droite).....	71
Figure 38 : Profil en long au droit de l'installation.....	71
Figure 39: Profil en long de charriage de la Broye.....	73



Figure 40 : Evolution du thalweg après 10 ans .....	74
Figure 41 : Cumul du volume transité après 10 ans de charriage .....	74
Figure 42 Esquisse de la variante 1 (FR.BRO.1).....	75
Figure 43 : Evolution du thalweg après 10 ans .....	76
Figure 44:Volume transité cumulé après 10 ans de charriage.....	76
Figure 45: Esquisse de la variante 2 (FR.BRO.1).....	77
Figure 46:Evolution du thalweg après 10 ans.....	78
Figure 47: Cumul du volume transité après 10 ans de charriage .....	78
Figure 48: Esquisse de la variante 3 (FR.BRO.1).....	79
Figure 49: Evolution du thalweg après 10 ans .....	79
Figure 50: Volume transité cumulé après 10 ans de charriage.....	80
Figure 51: Bassin versant du Gottéron .....	82
Figure 52: Le Gottéron à l'amont de l'installation - km 11.900 (gauche) et km 7.600 (droite).....	83
Figure 53: Installation FR.GOT.4 (km 7.510, gauche) et photo du lit à l'aval du barrage (km 7.400, droite).....	83
Figure 54: Après la fin de la gorge du Galterengraben (gauche, environ km 2.200), le Gottéron s'écoule à côté de la route jusqu'à la confluence avec la Sarine .....	84
Figure 55: Profil en long topographique du Gottéron .....	84
Figure 56: Affluents du Gottéron: le Guchetbach (gauche, km 7.400) et le Moosbach (droite, km 4.080) .....	86
Figure 57: Profil en long de charriage du Gottéron .....	88
Figure 58: Bassin versant de l'Hongrin .....	89
Figure 59: L'Hongrin et à la zone de la confluence du R. de Chaude (gauche, km 9.575) et à km 8.100, où le cours d'eau est alimenté par des apports latéraux .....	90
Figure 60: Derniers 1000 m de l'Hongrin avant la confluence dans le lac de Montbovon. ....	91
Figure 61: Types de matériaux et de formes présentes sur l'Hongrin.....	91
Figure 62: Profil en long topographique de l'Hongrin .....	92
Figure 63: Profil en long de charriage de l'Hongrin.....	95
Figure 64: Bassin versant du Javroz.....	97
Figure 65: Site de l'ancienne extraction de gravier à l'amont de la passerelle (km 5.450) .....	97
Figure 66: Le Javroz entre les deux installations Reposoir (km 5.450) et Chenevières (km 1.850).....	98
Figure 67: Barrages du Javroz (droite) avec le secteur à faible pente en amont (gauche). ....	98
Figure 68: Barrage du Sapex à km 0.850 (en haut à gauche) et situation environ 100 m à l'aval (en haut à droite). Traces d'érosion des berges (en bas).....	99
Figure 69: Profil en long topographique du Javroz .....	100
Figure 70: Profil en long de charriage du Javroz .....	102
Figure 71:Profil en long du modèle .....	103
Figure 72: Evolution des volumes cumulés transités en fonction de la distance -VAR0.....	104
Figure 73: Efficacité de rétention du site-VAR0 .....	105
Figure 74: Evolution des volumes cumulés transités en fonction de la distance (après 10 ans de charriage)-VAR1 .....	106
Figure 75: Efficacité de rétention du site-VAR1 .....	107
Figure 76: Hauteur d'eau pour l'état actuel et pour l'état après 10 ans sans extraction pour la crue centennale.....	107
Figure 77 : Evolution des volumes cumulés transités en fonction de la distance (VAR 2) .....	108
Figure 78 : Efficacité du site de rétention (VAR 2) .....	109
Figure 79 : Profil en long de charriage de la Jogne (VAR 0 : extractions actuelles à Rime).....	113
Figure 80 : Evolution sur 10 ans du volume de sédiments transitant la Jogne en arrêtant complètement les extractions à Rime (VAR 1). ....	114



Figure 81 : Evolution sur 10 ans du volume de sédiments transitant la Jogne en réduisant de 300 m <sup>3</sup> les extractions à Rime (VAR 2) .....	115
Figure 82: Bassin versant de la Petite Glâne.....	116
Figure 83: La Petite-Glâne à l'amont de l'installation - à km 18.500 (gauche, embouchure du Bainoz) et à km 17.200 (droite, tronçon entre la Route de Vesin et Au Village à Les Montets) .....	117
Figure 84: L'installation FR.PGL.1 à côté de la Ferme de Glâne (gauche, km 15.675) et l'état du cours d'eau quelques dizaines de mètres à l'aval (droite) .....	117
Figure 85: Début du tronçon fortement canalisé de la Petite Glâne à 200 m à l'aval de l'installation FR.PGL.1 (gauche); profil de la Petite-Glâne à km 14.000 (au pont de la route cantonale entre Bussy et Payerne).....	118
Figure 86: Profil en long topographique de la Petite Glâne – La ligne en bas présente les tronçons sur territoire fribourgeois (vert) et vaudois (orange). .....	118
Figure 87: Profil en long de charriage de la Petite Glâne .....	120
Figure 88: Bassin versant de la Sarine (sans la Singine) avec un zoom sur l'amont du lac de la Gruyère .....	123
Figure 89: La Sarine entre km 87.800 (gauche) et 86.500 (lac du Vernex, droite). La photo à gauche est prise juste à l'amont du lac. La photo en bas à droite illustre en détail le début du lac du Vernex avec les dépôts de matériaux. ....	124
Figure 90: La Sarine à l'aval du lac du Vernex (droite) - Seuil à km 85.860 (gauche, haut) et affluent T. des Riz à km 85.490 (gauche, bas; probable dépôt de lave torrentielle).....	125
Figure 91: Embouchures des affluents sur le lac de Montbovon - l'Hongrin (km 80.560, gauche) et le Torrent (km 80.275, droite) .....	125
Figure 92: Affluents avec un débit du charriage qui forme un dépôt à l'embouchure dans la Sarine - La Tâna (km 73.825, gauche; vue en direction de l'écoulement) et la Trême (km 67.225, droite; vue contre la direction de l'écoulement).....	125
Figure 93 : Zone alluviale à l'amont de la confluence de la Sarine dans le lac de la Gruyère.....	126
Figure 94: A gauche : confluence de la Gérine dans la Sarine ; à droite : la Sarine en ville de Fribourg.....	127
Figure 95: A gauche : construction du canal de fuite en 1964 ; droite : canal artificiel en aval de Schiffenen. Illustrations tirées de Grandin (2007). ....	128
Figure 96: Profil en long topographique de la Sarine entre le lac du Vernex et l'Aar.....	128
Figure 97: Comparaison des extraits de la carte Siegfried et une carte topographique actuelle. Haut: Tronçon en aval de Lessoc; bas: Tronçon en aval de Schiffenen (source : <a href="http://map.geo.admin.ch/">http://map.geo.admin.ch/</a> ) .....	129
Figure 98: Répartition des sédiments accumulés dans le Lac du Vernex entre 1999 et 2010 (Groupe E, 2010) .....	131
Figure 99: Bassin versant de la Sarine (sans Singine) avec la vue en détail à l'aval du lac de la Gruyère.....	135
Figure 100: Répartition des sédiments accumulés de 1999 à 2007 dans le lac de Pérolles (Groupe E, 2007). La Sarine coule de sud à nord (Tronçon 1) respectivement de gauche à droite (Tronçon 2). ....	136
Figure 101: Profil en long de charriage de la Sarine entre le Lac du Vernex et le Lac de la Gruyère .....	142
Figure 102: Profil en long de charriage de la Sarine entre le Lac de la Gruyère et l'Aar .....	143
Figure 103 : Découpage des tronçons pour l'évaluation de l'érosion du lit de la Sarine .....	148
Figure 104: Erosion du fond de la Sarine entre Lessoc et le Lac de la Gruyère, répartie par lieu et temps. ....	148
Figure 105 : fixation du profil en long à l'aide de deux seuils à l'amont et aval du camping à Enney (le camping est indiqué avec le cercle bleu sur la photo aérienne) .....	149
Figure 106 : Evolution du profil en long à l'amont des points fixes - la carte en bas montre les lieux des 6 biefs investigués, le profil en long en haut montre comme exemple l'analyse du bief C (seuil qui fonctionne comme point fixe dans le profil en long illustré sur la photo à droite). La Sarine coule de A à F. ....	151
Figure 107: Comparaison des mesures proposés (entre le barrage de Lessoc et le Lac de la Gruyère) par rapport à la relation coût / utilité des mesures.....	154
Figure 108: Surface du lit de la Petite Sarine mobilisé en fonction du débit des crues .....	156
Figure 109: Calcul de transport solide dans la Petite Sarine, charge solide en fonction du débit de crue et du diamètre moyen du gravier.....	157
Figure 110 : Comparaison des mesures proposés à l'aval du barrage de Rossens par rapport à la relation coût / utilité des mesures.....	159



Figure 111 : Comparaison des mesures proposées à l'aval du barrage de la Maigrauge par rapport à la relation coût / utilité des mesures.....	162
Figure 112 : Diamètre stable sur un profil représentatif à l'aval du barrage de Schiffenen (GEWISS km 10.287) pour Q = 135 m <sup>3</sup> /s (ligne d'eau indiqué en bleu, diamètre stable en rouge pointé).....	163
Figure 113 : Comparaison des mesures proposés à l'aval du barrage de Schiffenen par rapport à la relation coût / utilité des mesures.....	166
Figure 114 : Bassin versant de la Glâne et installations à évaluer .....	172
Figure 115: Découpage morphologique de la Glâne .....	172
Figure 116: Illustration des quatre zones morphologiques homogènes identifiées sur la Glâne. ....	173
Figure 117: Sous-bassins versant de la Glâne .....	173
Figure 118: Variations générales de pente sur la Glâne.....	174
Figure 119: Profil en long topographique et découpage du cours de la Glâne .....	175
Figure 120: Calcul de la capacité annuelle de charriage théorique minimale et maximale pour la Glâne, pour une granulométrie étendue et pour le diamètre moyen.....	176
Figure 121: Charge solide actuelle dans la Glâne .....	177
Figure 122: Lit de la Glâne dans le secteur 5 .....	178
Figure 123: Morphologie de la Glâne dans le secteur 6. ....	178
Figure 124: Tronçons de la Glâne sur le diagramme de Da Silva. ....	179
Figure 125: Charge solide naturelle et nécessaire dans la Glâne .....	180
Figure 126: Comparaison des volumes disponibles dans chaque ouvrage avec la charge solide nécessaire.....	181
Figure 127: Profil en long de charriage – Bilan de transport solide .....	183
Figure 128: Profil en long du charriage et détermination des tronçons avec atteinte grave au régime de charriage.....	183
Figure 129: Esquisse de la variante 0 (FR.GLA.5) .....	185
Figure 130: VAR 0 : Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance (après 50 ans de charriage) .....	185
Figure 131: VAR 0 : Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage).....	186
Figure 132: VAR 0 : Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps.....	186
Figure 133: Esquisse de la variante 1 (FR.GLA.5) .....	187
Figure 134: VAR1 : Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance (après 50 ans de charriage) .....	188
Figure 135:VAR1: Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage).....	188
Figure 136: VAR1: Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps.....	189
Figure 137:Esquisse de la variante 2 (FR.GLA.5) .....	190
Figure 138: VAR2 : Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance (après 50 ans de charriage) .....	190
Figure 139: VAR2: Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage).....	191
Figure 140:VAR2: Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps.....	191
Figure 141: Esquisse de la variante 3 (FR.GLA.5) .....	193
Figure 142:Esquisse de la variante 0 (FR.GLA.4) .....	194
Figure 143:VAR 0 : Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance (après 50 ans de charriage) .....	195
Figure 144:VAR0 : Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage).....	195
Figure 145:VAR0: Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps.....	196
Figure 146: Esquisse de la variante 1 (FR.GLA.4) .....	197
Figure 147:VAR1: Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance (après 50 ans de charriage) .....	197
Figure 148:VAR1 : Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage).....	198



Figure 149:VAR1 : Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps .....	198
Figure 150:Esquisse de la variante 2 (FR.GLA.4) .....	199
Figure 151:VAR2: Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance (après 50 ans de charriage) .....	200
Figure 152:VAR2: Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage).....	200
Figure 153:VAR2 : Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps .....	201
Figure 154:Esquisse de la variante 0 (FR.GLA.3) .....	204
Figure 155:VAR0 : Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance (après 50 ans de charriage) .....	204
Figure 156:VAR0:Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage).....	205
Figure 157:VAR0: Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps .....	205
Figure 158:Esquisse de la variante 1 (FR.GLA.3) .....	206
Figure 159:VAR1 Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance (après 50 ans de charriage) .....	207
Figure 160:VAR1:Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage).....	207
Figure 161:VAR1: Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps .....	208
Figure 162:Esquisse de la variante 2 (FR.GLA.3) .....	209
Figure 163: VAR2: Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance (après 50 ans de charriage) .....	209
Figure 164 : VAR2 : Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage).....	210
Figure 165:VAR2: Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps .....	210
Figure 166:Esquisse de la variante 3 (FR.GLA.3) .....	211
Figure 167: Charge future après renaturation.....	213
Figure 168: Vue en plan et localisation du bassin versant de la Taverna .....	214
Figure 169: Découpage morphologique de la Taverna.....	215
Figure 170: Illustration des faciès morphologiques principaux identifiés sur la Taverna .....	215
Figure 171: Sous-bassins versants de la Taverna .....	216
Figure 172: Variations de pente le long de la Taverna .....	217
Figure 173: Profil en long topographique et découpage de la Taverna .....	217
Figure 174: Calcul de la capacité de charriage théorique minimale et maximale pour la Taverna .....	218
Figure 175: Localisation des bancs de graviers sur la Taverna (points bordeaux) ; lettres = localisation des bancs sur la Figure 176 et la Figure 177. ....	219
Figure 176: Erosion locale de berges et bancs de graviers sur la Taverna (localisation sur Figure 175).....	219
Figure 177: Bancs de graviers provoqués par du charriage sur la Taverna (localisation sur Figure 175).....	220
Figure 178: Charge solide actuelle de la Taverna, par rapport à la capacité théorique.....	221
Figure 179: Diagramme de Da Silva et tronçon de la Taverna .....	222
Figure 180: Implantation et illustration de l'installation étudiée sur la Taverna.....	223
Figure 181: Profil en long du charriage et détermination des tronçons avec atteinte grave au régime de charriage.....	224
Figure 182: Profil en long du charriage et détermination des tronçons avec atteinte grave au régime de charriage.....	224
Figure 183: Esquisse de la variante 0 (FR.TAV.2).....	226
Figure 184 : Extrait de la carte des intensités (HQ100) .....	226
Figure 185:VAR 0 : Transit annuel (charriage) et risque d'inondation .....	227
Figure 186 : Esquisse de la variante 1 (FR.TAV.2).....	227
Figure 187: VAR1 : Transit annuel (charriage) et risque d'inondation .....	228
Figure 188 : Esquisse de la variante 2 (FR.TAV.2).....	228
Figure 189: VAR2: Transit annuel (charriage) et risque d'inondation .....	229



Figure 190: Charge future après renaturation.....	230
Figure 191: Vue en plan et localisation du bassin versant de la Bibera.....	232
Figure 192: Découpage morphologique de la Bibera.....	233
Figure 193: Sous-bassins versants de la Bibera.....	233
Figure 194: Variations de pente significatives le long de la Bibera.....	234
Figure 195: Profil en long topographique de la Bibera et découpage en secteurs homogènes.....	235
Figure 196: Capacité de charriage théorique, maximale et minimale, de la Bibera.....	236
Figure 197: Charge solide actuelle de la Bibera.....	237
Figure 198: Tronçons de la Bibera situés sur le diagramme de Da Silva.....	238
Figure 199: Charges solides naturelle et nécessaire de la Bibera.....	239
Figure 200: Implantation détaillée des deux installations étudiées sur la Bibera.....	239
Figure 201: Installation FR.BIB.1 étudiée sur la Bibera.....	240
Figure 202: Installation FR.BIB.2 étudiée sur la Bibera.....	240
Figure 203: Profil en long du charriage et détermination des tronçons avec atteinte grave au régime de charriage.....	242
Figure 204: Profil en long du charriage et détermination des tronçons avec atteinte grave au régime de charriage.....	243
Figure 205: Charge future après renaturation.....	244
Figure 206: Vue en plan et localisation du bassin versant du Ledeubach.....	245
Figure 207: Illustration du Ledeubach amont.....	246
Figure 208: Vue en plan du tronçon souterrain du Ledeubach.....	246
Figure 209: Illustration de la partie centrale du Ledeubach.....	247
Figure 210: Localisation et schématisation de la dérivation des eaux du Ledeubach dans le canal d'aménée.....	247
Figure 211: Degré d'atteinte sur les différents tronçons analysés dans l'étude détaillée.....	250
Figure 212 Installations causant une atteinte et tronçons subissant une atteinte.....	252
Figure 213 Installations à assainir et potentiel écologique des cours d'eau impactés.....	254



## Liste des Tableaux

Tableau 1: Détermination des cours d'eau cibles: critères éliminatoires .....	15
Tableau 2: Détermination des cours d'eau cibles: critères de sélection .....	17
Tableau 3: Résumé des inventaires de la Confédération pris en compte (ou non) .....	17
Tableau 4: Procédure et effets de la sélection de cours d'eau cibles .....	21
Tableau 5: Description des sources de données concernant les installations du canton de Fribourg.....	23
Tableau 6: Description des sources de données concernant les installations du canton de Fribourg.....	23
Tableau 7: Installations avec doublons – désignation et source conservée. ....	24
Tableau 8: Installations de l'étude pilote "Assainissement du charriage de la Jogne. Rapport intermédiaire" (Jaeggi et al., 2013).....	25
Tableau 9: Critères d'évaluation de l'impact des installations de première priorité .....	27
Tableau 10: Installations entravant potentiellement le régime de charriage, suite à l'appréciation sommaire. ....	30
Tableau 11: Deux lots constitués pour l'évaluation détaillée .....	49
Tableau 12 Grille d'évaluation des indicateurs de la valeur naturelle du milieu aquatique.....	57
Tableau 13 Barème d'évaluation de la valeur aquatique. ....	57
Tableau 14 Système d'évaluation de la valeur naturelle du milieu terrestre.....	59
Tableau 15: Calcul de capacité de transport de la Broye .....	65
Tableau 16: Calcul de capacité de transport sur les affluents de la Broye .....	65
Tableau 17: Table de synthèse - débit solide charrié estimé sur la Broye et ses affluents .....	66
Tableau 18: Détermination du débit nécessaire charrié, en fonction de la configuration du lit.....	67
Tableau 19: Débit solide nécessaire sur la Broye.....	68
Tableau 20: Calcul de capacité de transport sur le Gottéron.....	85
Tableau 21: Table de synthèse - débit solide charrié estimé sur le Gottéron et ses affluents.....	86
Tableau 22: Débit de charriage nécessaire estimé sur le Gottéron .....	86
Tableau 23: Calcul de capacité de transport sur l'Hongrin.....	93
Tableau 24: Débit de charriage nécessaire estimé sur l'Hongrin.....	94
Tableau 25: Comparaison des diamètres utilisés pour le calcul de capacité de transport .....	101
Tableau 26: Facteur de calage du bassin versant pour respecter les débits prélevés à Villars-le-Grand .....	119
Tableau 27: Capacité de transport solide estimé selon la méthode proposé par l'aide à l'exécution .....	119
Tableau 28: Débit de charriage nécessaire estimé sur la Petite Glâne .....	119
Tableau 29: Perte des matériaux du lit de la Sarine entre le barrage Lessoc et le lac de la Gruyère .....	132
Tableau 30: Synthèse des débits charriés sur la Sarine et ses affluents: Lac du Vernex au Lac de la Gruyère.....	134
Tableau 31: Synthèse des débits charriés sur la Sarine et ses affluents: Lac de la Gruyère à l'Aar .....	137
Tableau 32: Débit de charriage nécessaire estimé sur la Sarine entre le lac du Vernex et le lac de la Gruyère .....	138
Tableau 33 : Evaluation de l'utilité des mesures .....	146
Tableau 34: Tableau de synthèse des propositions des mesures d'assainissement du régime de charriage à l'aval du barrage de Lessoc.....	153
Tableau 35 : Tableau de synthèse des propositions des mesures d'assainissement du régime de charriage à l'aval du barrage de Rossens .....	159
Tableau 36 : Tableau de synthèse des propositions des mesures d'assainissement du régime de charriage à l'aval du barrage de la Maigrauge .....	161
Tableau 37 : Tableau de synthèse des propositions des mesures d'assainissement du régime de charriage à l'aval du barrage de la Maigrauge .....	165
Tableau 38: Hypothèses du niveau de difficulté de la fourniture de graviers par installation .....	167
Tableau 39: Définition des crues projetées et volumes correspondants.....	167
Tableau 40: Hypothèses de calcul de la perte moyenne de vente d'énergie.....	168



Tableau 41: Hypothèse des coûts moyens par mètre d'intervention mécanique.....	169
Tableau 42: Résumé des coûts des mesures charriage.....	169
Tableau 43 : Résumé des coûts des mesures - valeurs reprises pour l'estimation des coûts des mesures .....	170
Tableau 44: Largeur naturelle estimée de la Glâne.....	179
Tableau 45: Volume disponible avant l'atteinte de l'équilibre morphologique.....	181
Tableau 46: Potentiel de valorisation des secteurs portant des atteintes graves au régime de charriage .....	213
Tableau 47: Largeur naturelle estimée pour la Taverna .....	221
Tableau 48: Potentiel de valorisation pour les différents secteurs de la Taverna.....	230
Tableau 49: Largeur naturelle estimée pour la Bibera.....	238
Tableau 50: Potentiel de valorisation pour les différents secteurs de la Bibera.....	244
Tableau 51: Nécessité d'assainissement des installations et potentiel écologique des tronçons. Le potentiel écologique des tronçons qui ne sont pas à assainir est mentionné, de façon indicative, en grisé.....	251
Tableau 52: Centrales au fil de l'eau et avec dérivation.....	255
Tableau 53: Dépotoirs à alluvions.....	256
Tableau 54: Potentiel de valorisation concernant le charriage .....	256
Tableau 55 Délais d'assainissement des barrages sur la Sarine .....	258
Tableau 56 Délais d'assainissement pour les autres installations .....	259



## Résumé

### *Cadre légal*

Le 11 décembre 2009, les Chambres fédérales ont approuvé une série de modifications apportées à la Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux, RS 814.20), à la Loi sur l'aménagement des cours d'eau (LACE ; RS 721.100), à la loi fédérale sur l'énergie (LEne, RS 730.0 ainsi qu'à la loi fédérale sur le droit foncier rural (LDFR, RS 211.412.11). Entrées en vigueur en 2011, ces nouvelles bases légales définissent deux orientations principales :

- Encourager les revitalisations et garantir un espace réservé aux eaux ;
- Réduire les effets négatifs sur les cours d'eau de l'utilisation de la force hydraulique ;

Concernant le deuxième volet, les cantons doivent établir, jusqu'à fin 2014, des planifications stratégiques de renaturation des eaux, concernant trois aspects : le rétablissement de libre-migration piscicole, l'assainissement des éclusées et l'assainissement du régime de charriage, dont fait l'objet le présent rapport. Le rapport final de la planification doit impérativement être remis à la Confédération avant la fin 2014 ; celle-ci n'octroie des indemnités à hauteur de 35 % des coûts d'étude que si la planification est conforme et remise dans les délais.

### *Enjeux*

Le régime de charriage est une caractéristique déterminante d'un cours d'eau. Les matériaux charriés depuis l'amont lors des crues remplacent ceux qui ont été emportés par l'érosion et assurent à intervalles réguliers le renouvellement des bancs de gravier et du substrat. Dans cette planification, nous nous intéressons spécifiquement à la fraction granulométrique des graviers (2 à 6 cm), dont la présence et le renouvellement sont importants pour le bon fonctionnement écologique des cours d'eau.

La planification d'assainissement du régime de charriage a pour but d'identifier et supprimer les atteintes graves au régime de charriage causées par trois types d'installations, dites de première priorité : ouvrages hydroélectriques, dépotoirs à matériaux et extractions de graviers. Une altération du régime de charriage peut être induite par le piégeage de l'apport solide dans des retenues hydroélectriques. L'altération du régime hydrologique par un grand barrage a également des effets sur la dynamique du cours d'eau, en écrétant les crues morphogènes qui permettent de remobiliser le substrat. Les dépotoirs à matériaux ont pour but de piéger la charge solide ; ils jouent un rôle dans la protection contre les crues, dont les enjeux doivent être pris en compte au moment d'évaluer la nécessité d'assainissement de ces installations. Les extractions de graviers ont un impact sur le régime de charriage en soustrayant les graviers du cours d'eau. La motivation de ces extractions est d'éviter le relèvement du lit, et ainsi maîtriser le danger de crue. Comme pour les dépotoirs, ce paramètre est pris en compte au moment de proposer des mesures d'assainissement.

Les aménagements (2<sup>ème</sup> priorité) qui pourraient porter atteinte au régime de charriage des cours d'eau cibles sont également ciblés dans cette planification. Le terme « aménagements de cours d'eau » se rapporte à tous les travaux de correction et renforcement du pied de berge effectués sur des cours d'eau (protection contre les crues, gain de terres agricoles). Cela peut se traduire par une diminution de l'apport en matériaux solides depuis les rives du cours d'eau, qui ne sont plus soumises à l'érosion en raison des aménagements. Ces derniers augmentent par ailleurs la capacité de transport du cours d'eau en raison de la diminution de la largeur et de la rectification



du tracé, favorisant le transit des sédiments et empêchant leur dépôt. Les mesures d'assainissement des aménagements de 2<sup>ème</sup> priorité seront concrétisées par le biais de revitalisations de cours d'eau.

Les effets principaux d'une altération du régime de charriage sont :

- végétalisation ou disparition des bancs de graviers existants ;
- colmatage du fond du lit ;
- incision du fond du lit ;
- déconnexion des zones alluviales et désactivation de leur dynamique.

#### *Démarche générale pour établir la planification*

La planification cantonale a été établie par le biais de mandats externes attribués aux bureaux BG Ingénieurs Conseils et Aquavision Engineering. Le pilotage des mandats a été réalisé par la Section lacs et cours d'eau du Service des ponts et chaussées.

##### *1. Appréciation sommaire (§ 2 du rapport)*

La démarche générale a été calquée sur l'aide à l'exécution publiée par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) en 2012, pour garantir la conformité de la planification aux exigences légales.

L'assainissement du régime de charriage ne concerne pas la totalité du réseau hydrographique fribourgeois (3'800 km). Nous avons tout d'abord déterminé un réseau de cours d'eau « cibles » sur la base de critères écologiques (pente, importance écologique, espèces prioritaires...). Cette étape a permis de définir un linéaire de cours d'eau cibles de 777 km.

En parallèle, nous avons répertorié toutes les installations liées à la force hydraulique, les dépôts et les extractions de graviers (152 ouvrages). Nous avons ensuite évalué sommairement leur impact sur le régime de charriage en exploitant tout d'abord les données existantes, puis par des entretiens avec les gardes faunes et si nécessaire par une vision locale des ouvrages. Après cette étape, seuls 30 ouvrages présentent potentiellement une entrave au régime de charriage, pour un linéaire de cours d'eau potentiellement impacté de 160 km. Pour ces ouvrages et ces tronçons, une étude détaillée a été réalisée. Certains ouvrages ne sont pas situés sur des cours d'eau cibles ; Ces cours d'eau sont considérés comme pourvoyeurs de sédiments pour un cours d'eau cible et l'impact est évalué sur le régime de charriage des cours d'eau cibles récepteurs.

##### *2. Evaluation détaillée (§ 3 à 14 du rapport)*

L'étude détaillée a pour but d'estimer la charge solide actuelle des cours d'eau par modélisation du régime de charriage. Il s'agit également d'estimer la charge solide naturelle du cours d'eau.

Les modélisations permettent de déterminer le degré d'atteinte des installations sur les cours d'eau. L'atteinte est *très prononcée* lorsque le transport solide est inférieur à 20% de la charge naturelle, *prononcée* entre 20 et 40%, *notable* entre 40 et 60 %, *faible* entre 60 et 80 % et *nulle* au-dessus de 80 %. Les degrés *très prononcé*, *prononcé* et *notable* sont considérés comme *atteintes graves* et les installations qui engendrent ces impacts doivent être assainies. La charge solide nécessaire qui doit être rétablie par des mesures d'assainissement correspond à 60 % au moins de la charge solide naturelle.

Au final treize installations portent une atteinte grave au régime de charriage de la Sarine, respectivement de la Glâne, la Broye, la Jogne, la Tâna, le Javro, la Taverna et le Tatreil.



### *Rapport intermédiaire*

Le canton de Fribourg a soumis un rapport intermédiaire à l'OFEV en janvier 2014, après la réalisation de l'appréciation sommaire et de l'évaluation détaillée. Ce rapport a mis en évidence les installations causant une atteinte grave au régime de charriage et les tronçons impactés. L'OFEV a pris position sur ce rapport intermédiaire en juillet 2014 et estimé qu'il était conforme et suivait la bonne direction en vue d'une finalisation à fin 2014.

Le rapport intermédiaire a été soumis, pour information, aux services de l'état concernés (Service des forêts et de la faune, Service de la nature et du paysage, Service de l'environnement et Service de l'énergie) à fin janvier 2014. Ces services ont également été invités aux séances de travail lorsque les thématiques abordées le nécessitaient. Pour les grands barrages sur la Sarine, Groupe E a été intégré à la démarche dès le lancement des études et adhère à la nécessité de leur assainissement. Les organisations non gouvernementales actives dans la protection de l'environnement ont par ailleurs été informées des résultats du rapport intermédiaire.

### *Rapport final*

Dans le rapport final, des objectifs d'assainissement ont été fixés pour les grands barrages sur la Sarine. Pour les 13 installations portant une atteinte grave, plusieurs variantes d'assainissement ont été développées. Les mesures ont été évaluées selon plusieurs facteurs : potentiel de valorisation du régime de charriage (gain de classes), influence sur la protection contre les crues, coût et proportionnalité et politique énergétique. Il peut s'agir de mesures constructives (adaptation des ouvrages, optimisation de la morphologie du lit) ou de mesures d'exploitation (injection de graviers dans le cours d'eau et crues artificielles pour remobiliser les substrats et assurer une certaine dynamique). Une fourchette d'estimation des coûts totaux, au stade actuel des connaissances, est proposée en bas de ce résumé. Le potentiel écologique des cours d'eau fribourgeois a été évalué dans le cadre de la planification des revitalisations et est utilisé pour toutes les planifications (migration piscicole, éclusées, régime de charriage). Les demandes de modifications et de compléments de l'OFEV suite au rapport intermédiaire ont également été satisfaites. Le rapport final propose des délais d'assainissement, même si les exploitants ont jusqu'en 2030 au plus tard (20 ans après l'entrée en vigueur de la législation) pour éliminer les atteintes graves. Les aspects de coordination avec les autres planifications d'assainissement et avec les cantons voisins sont également mentionnés lorsque nécessaire.

### *Procédure de consultation avant soumission du rapport à l'OFEV*

Ce rapport final a subi l'examen des divers services concernés par la problématique du charriage, du Groupe E pour les grandes installations ainsi qu'un groupement d'organisations non gouvernementales. Au terme de cette prise d'avis, les remarques jugées pertinentes ont été intégrées avant que partie du Conseil d'Etat ne l'adopte et ne le soumette à l'OFEV.

### *Suite des démarches*

A partir de 2015, le canton devra élaborer une étude sur le type et l'ampleur des mesures requises. Il en résultera une décision d'assainissement qui sera ordonnée par la DAEC, conformément à l'art. 50 RCEaux. Avant notification, la DAEC aura préalablement entendu le détenteur de l'installation et les organisations concernées. Les études lancées dès 2015 et les mesures d'assainissement seront indemnisés à hauteur de 100% par un fonds ad hoc de Swissgrid. Le financement des mesures d'exploitation est garanti pour 40 ans.



Mesures d'assainissement : les meilleures variantes, au stade actuel des connaissances, sont reprises ; elles permettent d'atteindre les objectifs d'assainissement.

Code	Nom	Cours d'eau	Mesures d'assainissement	Coût
FR.BRO.1	Moulin Dougoud	Broye	Réalisation d'une large encoche dans l'ouvrage avec pré-excavation partielle des matériaux du fond du lit	480'000 CHF
FR.GLA.3	Moulin de Chavannes-sous-Orsonnens	Glâne	Mise en place d'une partie mobile dans le barrage	130'000 CHF
FR.GLA.4	Moulin Waeber	Glâne	Mise en place d'une partie mobile dans le barrage	130'000 CHF
FR.GLA.5	Fille-Dieu	Glâne	Arasement de la crête de l'ouvrage	5'000 CHF
FR.JAV.1	Extraction de sédiments	Javroz	Limitation des extractions à 1'500 m <sup>3</sup> /an	nul
FR.JOG.4	Barrage de Montsalvens	Jogne	Décision d'assainissement de 2011 : injection de graviers dans les gorges de la Jogne, mesure test.	30'000 CHF/an la 1ère année puis 18'000 CHF/an ensuite
FR.JOG.9	Extraction gravière Rime	Jogne	Limitation de l'extraction à 350 m <sup>3</sup> /an	nul
FR.SAA.1	Barrage de Schiffenen	Sarine	Les mesures d'assainissement du régime de charriage dépendent de la variante d'assainissement des éclusées (bassin ou dérivation)	Non déterminé
FR.SAA.2	Barrage de la Maigne	Sarine	Apports en graviers + crues morphogène venant de Rossens	8 mio CHF
FR.SAA.9	Barrage de Rossens	Sarine	Apports en graviers + Crue morphogène + initiation locale de l'érosion des berges	13 mio CHF
FR.SAA.13	Barrage de Lessoc	Sarine	Déconfinement du lit + apports en graviers + aménagement de seuil pour relever le niveau du lit	17 mio CHF
FR.TAV.2	Dépotoir à matériaux	Taverna	Réinjection de la totalité des graviers extraits en aval dans le lit.	6'000 CHF/an
FR.TAT.2	Prise d'eau	Tatrel	Suppression du seuil, à coordonner avec l'assainissement de la migration piscicole	< 10'000 CHF

# 1. Contexte et objectifs

## 1.1 Préambule

Le 11 décembre 2009, les Chambres fédérales ont approuvé une série de modifications apportées à la Loi sur la protection des eaux du 24 janvier 1991 (LEaux, RS 814.20), à la Loi sur l'aménagement des cours d'eau du 21 juin 1991 (LACE, RS 721.100), à la loi fédérale du 26 juin 1998 sur l'énergie (LEne, RS 730.0), ainsi qu'à la loi fédérale du 4 octobre 1991 sur le droit foncier rural (LDFR, RS 211.412.11).

Dans le cadre de ces modifications entrées en vigueur en janvier 2011, l'assainissement des cours d'eau dégradés – subissant des atteintes graves – est défini comme une priorité. Pour cela, la législation sur la protection des eaux impose aux cantons d'établir leur stratégie cantonale, basée sur quatre planifications parallèles, jusqu'à fin décembre 2014.

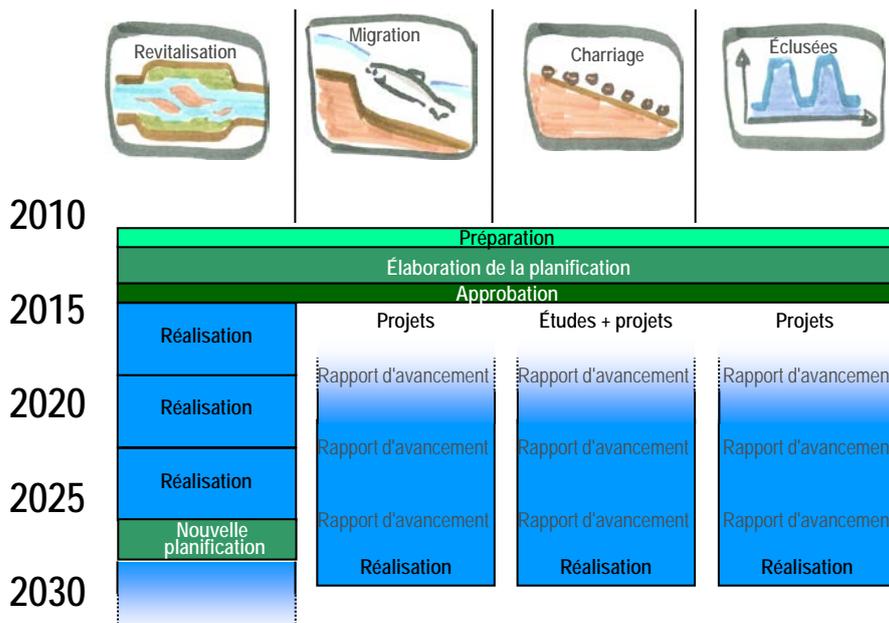


Figure 1: Planification cantonale - selon la LEaux<sup>1</sup>

L'objectif est de prioriser les mesures d'assainissement, de manière à revaloriser les milieux à fort potentiel écologique, en réduisant les atteintes graves aux cours d'eau, tout en gardant à l'esprit la proportionnalité des mesures proposées par rapport aux gains créés.

Deux types de projets sont distingués : les projets d'assainissement de la dégradation de la morphologie propre des cours d'eau, regroupés sous l'appellation « revitalisation », et les projets d'assainissement des prélèvements d'eau pour la force hydraulique.

Les projets de revitalisation considérés comme prioritaires selon la planification cantonale seront en grande partie subventionnés par la Confédération, qui alloue une enveloppe de 40 MCHF par an à cette problématique. Selon un premier diagnostic, l'objectif serait de revitaliser 4'000 km sur

<sup>1</sup> Mandat planification Valais –K. Essyad et V. Sturm, BG ingénieurs Conseils, 2012

les 15'000 km de cours d'eau considérés comme en mauvais état sur l'ensemble de la Suisse, dans les 80 ans à venir.

Les projets d'assainissement des installations liées à la force hydraulique sont financés par Swissgrid, et indirectement par les consommateurs d'électricité hydraulique, par le biais d'une taxe sur le KWh transporté. L'enveloppe financière serait de l'ordre de quelques 50 MCHF par an sur une durée d'environ 20 ans. Ainsi, ces planifications cantonales sont bien délimitées dans le temps et dans leur cadre de financement – quoique les limites exactes et le choix des projets entre eux ne soient pas encore clairement établis.

Dans le domaine de l'assainissement des installations, trois problématiques sont prises en considération :

- la réduction des effets des éclusées en aval des centrales hydroélectriques (art. 39a, 62c et 83a-b LEaux) ;
- la réactivation du régime de charriage (art. 43a, 62c et 83a-b LEaux) ;
- le rétablissement la migration des poissons (art. 9-10 LFSP et 83b LEaux).

## 1.2 Objectifs de l'étude

La planification stratégique de l'assainissement du régime de charriage s'insère donc dans une démarche plus vaste de renaturation des eaux qui a pour objectifs à long terme de revitaliser les cours d'eau et d'atténuer les impacts des ouvrages liés à la force hydraulique. Le rétablissement du régime du charriage des cours d'eau lui-même a pour objectif, entre autres, d'améliorer le fonctionnement écologique des rivières et de leur zone alluviale, pour, au final et comme le précise notamment la loi sur la pêche (LFSP 923.0) : « préserver ou accroître la diversité naturelle et l'abondance des espèces indigènes ... ».

Elle a pour but la réactivation du régime de charriage qui a été altéré par des installations telles que des centrales hydroélectriques, des dépotoirs à alluvions, des aménagements de cours d'eau ou des sites d'extraction de gravier. Il s'agit donc, dans un premier temps, d'évaluer l'évolution de l'amont vers l'aval des volumes de matériaux solides transportés dans les cours d'eau (à l'état actuel et dans un état non-altéré) et d'en déduire un plan de mesures prioritaires qui tendent à réduire les déficits identifiés, l'objectif à long terme étant le renouvellement des flux et des dépôts naturels des matériaux charriés.

Dans ce contexte, les cantons doivent remettre à l'OFEV, à la fin 2013, un rapport intermédiaire de la planification stratégique d'assainissement du régime de charriage. Ce rapport intermédiaire comprend notamment :

- Une liste des installations qui provoquent une atteinte au régime de charriage et qui doivent être assainies ;
- Une liste des tronçons de cours d'eau dont le régime de charriage est altéré ;
- La méthodologie suivie et la démarche appliquée pour identifier les installations et les tronçons impactés ;
- Le potentiel écologique et le potentiel de valorisation des tronçons de cours d'eau altérés ;
- Des ébauches de types de mesures envisageables.

### 1.3 Démarche générale

Ce rapport final a été produit en deux étapes.

Une **appréciation sommaire** a été réalisée durant le printemps 2013, en collaboration avec le bureau BG. Cette première phase a consisté, dans un premier temps, à délimiter les réseaux hydrographiques et les cours d'eau à examiner, puis à établir une liste exhaustive des installations qui représentent potentiellement une entrave au régime de charriage. Dans un deuxième temps, en estimant grossièrement l'impact de chaque installation sur le régime de charriage, nous avons sélectionné les tronçons de cours d'eau cibles et les installations de première priorité à retenir pour une évaluation détaillée. Un rapport technique synthétisant la méthodologie appliquée et les résultats de l'appréciation sommaire a été rédigé. Il a servi de base pour le lancement des évaluations détaillées.

Deux lots ont été constitués pour l'**évaluation détaillée** des installations sélectionnées et des cours d'eau cibles impactés, ainsi que l'élaboration de mesures d'assainissement. Les mandats ont été attribués aux bureaux BG Ingénieurs Conseils SA à Lausanne et Aquavision Engineering Sàrl à Ecublens. Ces mandataires ont produit chacun un rapport technique sur les lots qui leur ont été attribués. Cette phase a été réalisée durant l'automne 2013.

Ce rapport est donc une compilation du rapport provisoire de l'appréciation sommaire et des deux rapports techniques de l'évaluation détaillée. Nous présentons les différents éléments chronologiquement, tout d'abord la méthodologie et les résultats de l'appréciation sommaire, puis ensuite la méthodologie et les résultats de l'évaluation détaillée.

Une liste de tous les ouvrages étudiés et une fiche d'information détaillée sont présentés dans [l'Annexe 1](#).

### 1.4 Cadre légal

Le cadre légal est résumé par une liste des articles de loi pertinents.

Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux ; RS 814.20)

Chapitre 3 Prévention et réparation d'autres atteintes nuisibles aux eaux

*Art. 43a Régime de charriage*

*Art. 44 Exploitation de gravier, de sable ou d'autres matériaux*

Chapitre 4 Mesures d'encouragement

*Art. 62c Planification de l'assainissement des éclusées et du régime de charriage*

*Art. 63 Conditions générales d'octroi des indemnités*

Section 2bis Eclusées et régime de charriage

*Art. 83a Mesures d'assainissement*

*Art. 83b Planification et rapport*

Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux ; RS 814.201)

Chapitre 7 Prévention et réparation d'autres atteintes nuisibles aux eaux

Section 4 Régime de charriage

*Art. 42a1 Atteintes graves dues à une modification du régime de charriage*

Art. 42b Planification des mesures d'assainissement du régime de charriage  
 Art. 42c Mesures d'assainissement du régime de charriage  
 Art. 43 Exploitation de gravier, de sable et d'autres matériaux des cours d'eau

Annexe 4a - Planification des mesures d'assainissement des éclusées et du régime de charriage

Loi sur l'énergie (LEne ; RS 730.0)

Art. 15a bis1 Indemnisation du concessionnaire

## 1.5 Rappel théorique

### 1.5.1 Qu'est-ce que le charriage ?

Le transport de sédiments dans un cours d'eau peut se faire de différentes manières. Le premier mécanisme de transport est le transport en suspension. Si les particules ne sont jamais en contact avec le sol, on parle alors de suspension intrinsèque. Ce mécanisme concerne les particules très fines. Si les particules touchent occasionnellement le fond, et se déplacent par bonds successifs, on parle de transport par suspension. Si les particules sont principalement en contact avec le sol, et se déplacent en roulant ou par des petits bonds à proximité du fond, on parle alors de transport par charriage (Figure 2a). Dans notre cas, on s'intéresse au transport qui vient modifier la morphologie du cours d'eau, soit au charriage.

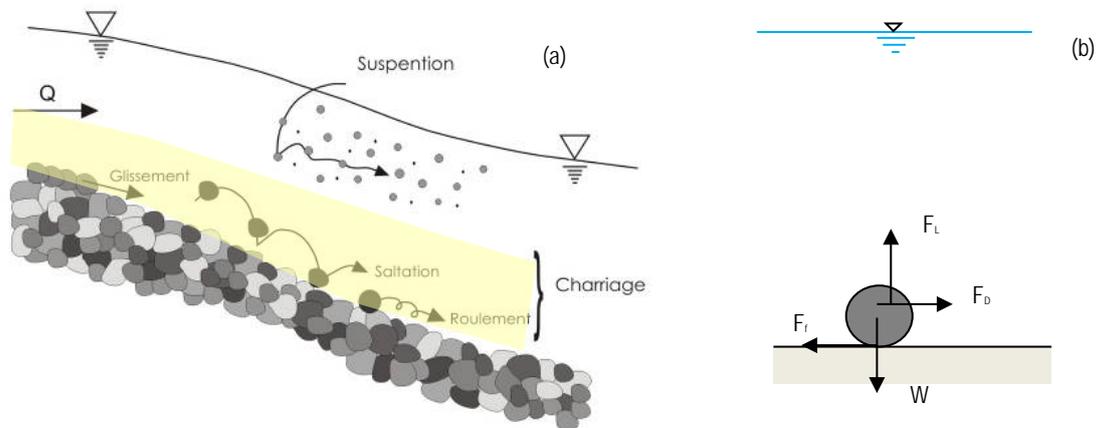


Figure 2: (a) Schéma des différents types de transport solide, (b) description de forces en jeu

La mise en mouvement peut être résumée par différentes approches. Si l'on analyse l'équilibre des forces qui s'exercent sur une particule, on voit qu'il faut que l'écoulement génère une force d'entraînement assez grande pour mettre en mouvement une particule (Figure 2b). Cette mise en mouvement par l'écoulement peut être interprétée comme une force de frottement, c'est l'approche de Shields-Yalin (1936). Les équations de Meyer-Peter Müller (1948) et de Smart & Jäggi (1983) s'appuient sur cette approche. Le critère de Shields  $\theta_{cr}$  (tension adimensionnelle de frottement) définit que les forces tractrices (frottement) doivent être supérieures aux poids spécifiques. Ce critère varie entre 0.03 et 0.06 en fonction des conditions hydrauliques et des sédiments, en général on considère cette variable égale à 0.047.

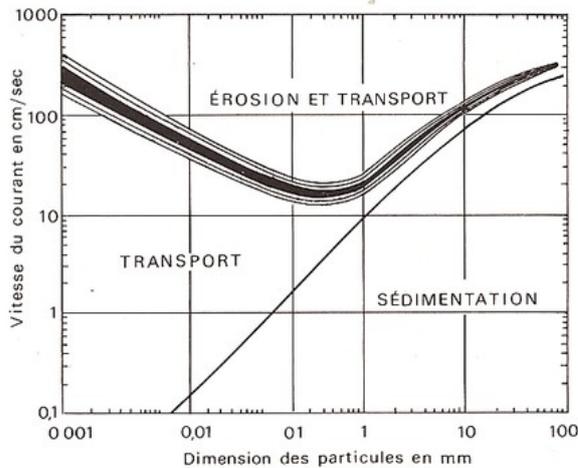


Figure 3: Diagramme de Hjulström décrivant les diamètres transportés en fonction des vitesses en distinguant les conditions de sédimentation, de transport et d'érosion

Cette mise en mouvement peut aussi être interprétée par un bilan d'énergie : l'énergie cinétique de l'écoulement génère une vitesse de déplacement au contact de la particule. Ainsi, comme le montre le diagramme de Hjulström (Figure 3), jusqu'à une certaine valeur critique, le matériau entraîné par l'amont aura tendance à sédimenter. Au-delà d'une certaine vitesse, l'écoulement aura tendance à éroder les matériaux fixes, augmentant la charge de matériaux transportés vers l'aval. Entre ces deux valeurs, les matériaux présents en amont sont transportés en même quantité à l'aval, c'est la zone de transport.

### 1.5.2 Fonction d'équilibre – régime de charriage

Différentes morphologies de lit de cours d'eau existent. Dans certains contextes, le lit sera en tresses, à d'autres endroits, il se développera en méandres. Notons que de telles morphologies se développent lorsque la place est suffisante, et le cours d'eau pas trop « jeune » géomorphologiquement parlant (à priori pas réalisé sur les torrents raides).

Partant de ce constat, différents théoriciens ont voulu décrire le cours d'eau dans l'idée de pouvoir prédire ces fonctions d'équilibre. Cet état d'équilibre est dépendant de sept paramètres, dont quatre sont variables : le débit liquide  $Q$ , le débit solide  $Q_s$ , la vitesse de frottement critique  $u_{*cr}$ , et le diamètre moyen des grains. L'état d'équilibre résultant donne une largeur  $B_r$ , une hauteur d'eau  $h_r$ , et une pente  $J_r$ .

En thermodynamique, un état d'équilibre est atteint lorsque qu'un minimum d'énergie est utilisé. Le cours d'eau aura donc tendance à créer une morphologie permettant de minimiser le nombre de Froude<sup>2</sup> et la vitesse d'écoulement.

Le diagramme de Yalin et Da Silva (Figure 4) permet de déterminer les différents états d'équilibre, en fonction de deux paramètres adimensionnels.

<sup>2</sup> Nombre de Froude:  $Fr = \frac{v^2}{\sqrt{g \cdot h}}$  avec la vitesse d'eau  $v$ , le champ de pesanteur  $g$  et l'hauteur d'eau  $h$ .

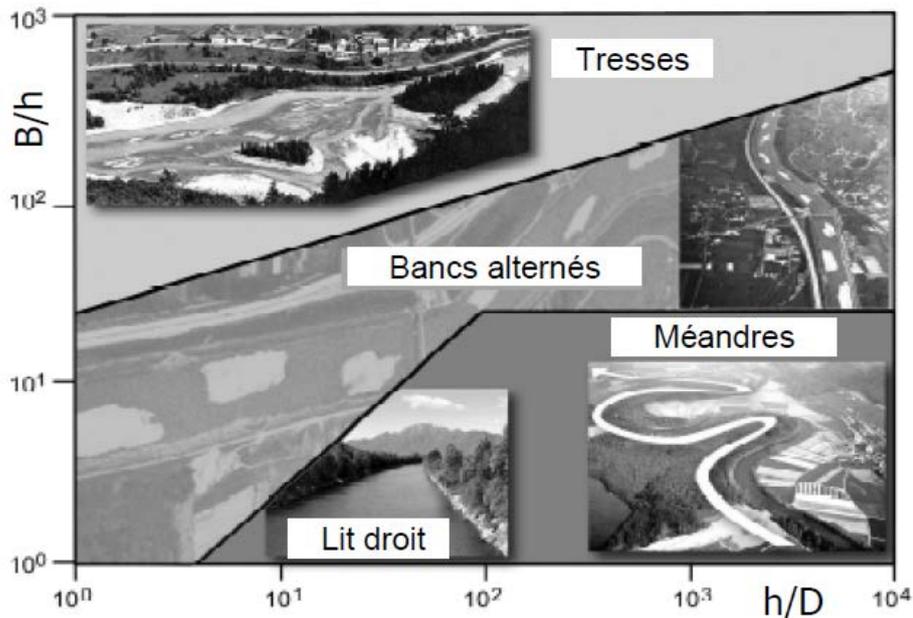


Figure 4: Diagramme de Yalin & Da Silva décrivant les morphologies types et leurs conditions de formation<sup>3</sup>.  
 B: largeur du cours d'eau; h: hauteur d'eau pendant une crue de  $Q_{2.5}$ ; D: diamètre moyen

Cette approche de fonction d'équilibre est intéressante pour définir un état naturel ou idéal des cours d'eau étudiés. C'est une référence utile pour illustrer et mesurer l'écart entre cette référence et l'état actuel.

### 1.5.3 Régime de charriage et revitalisation

Le régime de charriage est une composante importante d'un cours d'eau naturel. C'est le moteur principal d'une morphologie fluviale dynamique. Dans un contexte idéal, sans limite spatiale et temporelle, le dynamisme morphologique permet au cours d'eau d'atteindre un état d'équilibre (dynamique) et de développer sa morphologie propre. Dans notre contexte helvétique, où la plupart des cours d'eau a été corrigée, ce genre de morphologie naturelle a majoritairement disparu. Le retour à un état naturel est difficilement réalisable étant donné la place disponible, et les enjeux sécuritaires qui en découlent, mais le retour à un état morphologique « plus naturel » est par contre réaliste et souhaitable.

Un transport solide altéré crée des atteintes à la morphologie du cours d'eau, et empêche le bon fonctionnement des écosystèmes riverains (milieux pionniers) et aquatiques (faune benthique et piscicole).

Les zones riveraines aux cours d'eau sont souvent riches en biodiversité florale. La succession végétale type d'une zone alluviale est fortement dépendante de cette dynamique, que ce soit par les phénomènes d'inondations fréquentes (pour les forêts à bois tendre) ou par rajeunissement perpétuel des milieux pionniers issus des phénomènes de mobilisation du substrat (Figure 5).

<sup>3</sup> Morphologie fluviale J.L. Boillat, 2012, Cours CAS revitalisation module 1.2.4

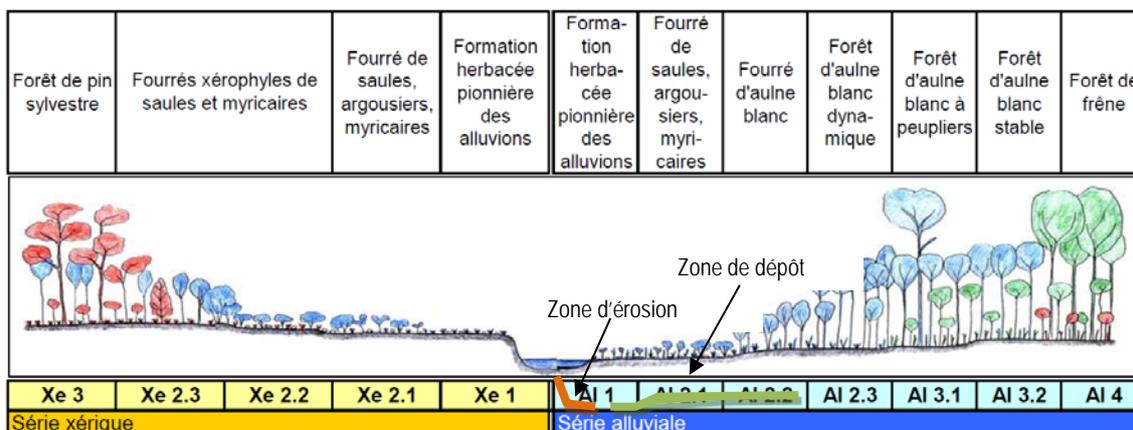


Figure 5: Profil type de succession de végétation et dynamique alluviale<sup>4</sup>

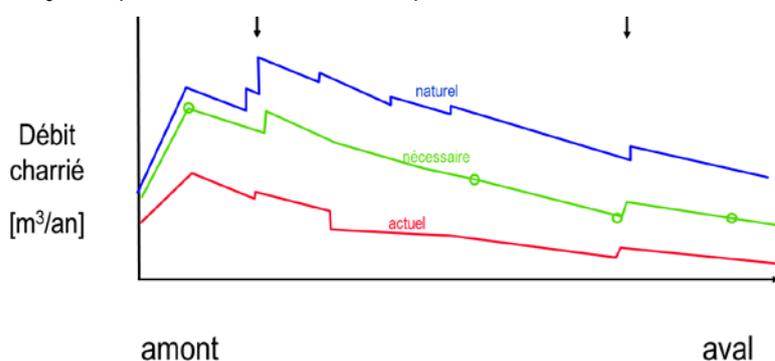
La faune benthique et la faune piscicole sont aussi bénéficiaires de cette dynamique : la présence d'un fond mobile génère des variations de conditions hydrauliques favorables à leur développement. En particulier pour les poissons de rivière qui ont besoin d'un substrat non colmaté à large gamme granulométrique, allant des sables jusqu'aux galets, permettant la croissance des alevins dans les secteurs de frayères.

La morphologie d'un cours d'eau est principalement formée par les crues de temps de retour 2 - 5 ans, appelées crues morphogènes. Au-dessus, leur occurrence devient trop rare pour réellement impacter le cours d'eau (sauf pour les torrents). Au-dessous d'une certaine valeur de débit, aucun charriage ne se fait (autour d'un débit Q50j-100j : débit de la courbe de débits classés, dépassés 50 -100 jours par an).

Dans la même idée, les sédiments impactant réellement les milieux naturels sont les sédiments transportés par charriage. Les sédiments trop grossiers sont rarement déplacés, mais génèrent une diversité hydraulique importante. Par contre, en dessous d'un certain diamètre (sable très fin - limon), leur présence peut même être préjudiciable, par des phénomènes de colmatage en fin de crue.

#### 1.5.4 Formules de transport solide

De manière générale, la caractérisation du transport solide pourrait se diviser en deux étapes : l'identification de la capacité stationnelle (par une équation semi-empirique), puis le transit de l'amont à l'aval (par les lois de l'hydrodynamique). Le transit vise à savoir si en un point au temps  $t=i$ , il y a déposition, érosion ou transport, du volume entrant.



<sup>4</sup> Suivi environnemental des cours d'eau, C. Roulier, Service conseil zone alluviale, 2013, Cours CAS revitalisation module 2.4.4

Figure 6: Bilan sédimentaire sur un cours d'eau - correspondant au résultat type attendu dans ce mandat<sup>5</sup>

Le résultat attendu par l'OFEV est présenté ci-dessus. On distingue trois états : l'état naturel, l'état actuel et l'état nécessaire. L'état naturel fait référence à la fonction de régime (équilibre naturel du cours d'eau s'il n'est contraint nulle part), et l'état nécessaire fait référence à un état futur intermédiaire pour lequel le transit sédimentaire serait rétabli à un niveau plus naturel (permettant de renouveler les bancs de graviers présents), atteint suite à la réalisation de mesures d'assainissement.

Les méthodologies appliquées dans l'évaluation détaillée sont mentionnées dans la deuxième partie de cette étude, au chapitre 3.2.

## 1.5.5 Installations sur les cours d'eau

### 1.5.5.1 Type d'installations

Par « installation », la Confédération entend les différents types d'ouvrages installés dans le lit du cours d'eau pouvant influencer le charriage, soit :

- Les installations hydroélectriques ;
- Les dépotoirs ;
- Les extractions de sédiments ;
- Les aménagements de cours d'eau (seuil, endiguement,...).

Selon la méthodologie développée pour ce mandat, l'influence de ces installations sur le charriage a été regroupée en trois types (Figure 7) :

- L'influence sur le débit du cours d'eau (exemple : turbinage hydroélectrique sur un tronçon) ;
- L'influence sur la quantité de matériaux disponible dans le lit (exemple : prélèvement mécanique ou arrêt de matériaux) ;
- L'influence sur la géométrie du lit (exemple : modification de pente par des seuils, ou rétrécissement de la largeur).



Figure 7: Icônes illustrant les différents paramètres impactant le charriage (à gauche: hydrologie; au milieu: apport en sédiment; à droite: correction du lit et des berges)

### 1.5.5.2 Influence des installations sur le charriage

Les trois types d'atteintes décrits ci-dessus génèrent des conséquences différentes sur le bilan sédimentaire (Figure 8).

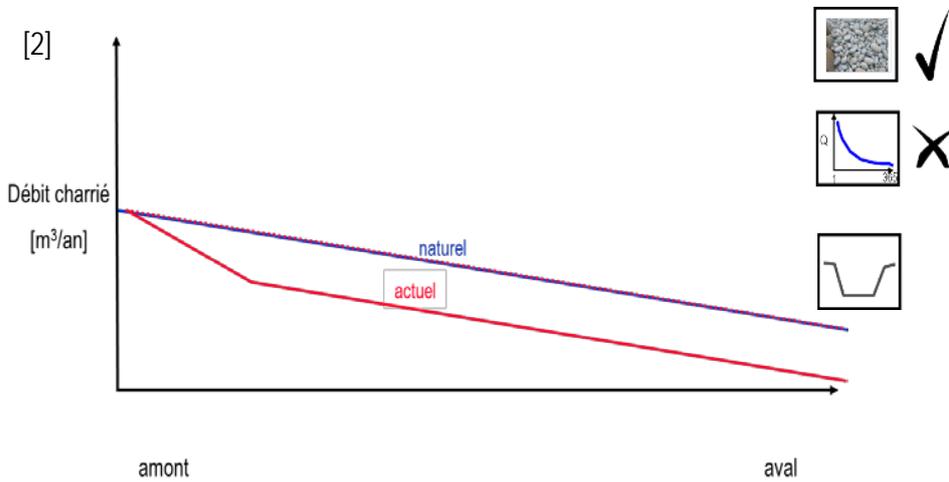
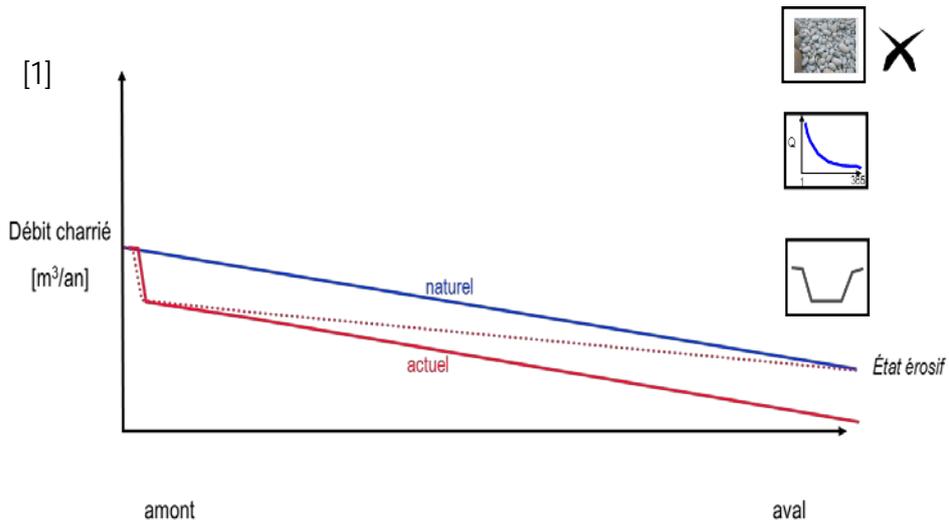
L'extraction de sédiments [1] entraîne simplement une réduction du volume transité de l'amont vers l'aval. Ce phénomène peut engendrer un déficit en matériaux sur le tronçon aval et générer de l'érosion.

Le prélèvement de débit [2] génère une réduction de la capacité de transport sur le tronçon à débit résiduel.

<sup>5</sup> Assainissement du régime de charriage planification stratégique, OFEV 2012, - [www.bafu.admin.ch/uv-1226-f](http://www.bafu.admin.ch/uv-1226-f)



La modification de la géométrie [3] a en général, au cours de l'histoire, été faite de manière à réduire la largeur des cours d'eau. Ce type de modification entraîne une augmentation générale de la capacité de transport. En règle générale, la modification de la capacité de transport n'est pas une modification du régime de charriage, mais un problème de morphologie de cours d'eau. L'assainissement de ce type de dégradation est à régler dans le cadre des revitalisations, pour lesquelles des relevés écomorphologiques sont disponibles. Les ouvrages de type « seuil » ont un impact limité dans le temps sur le charriage, le même état d'équilibre pouvant se réaliser en amont et en aval du seuil.



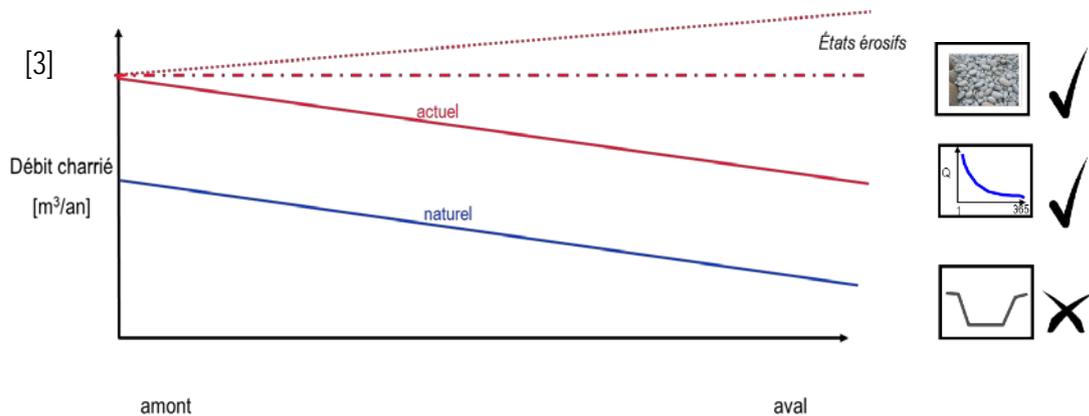


Figure 8: Influence des installations sur le bilan sédimentaire

## 1.6 Dépotoir

Un dépotoir est un ouvrage construit dans le cadre des mesures de protection contre les crues. En général, la partie d'installation-clé est un seuil permettant de ralentir l'écoulement et donc de faire un tri granulométrique (condition hydraulique devant l'ouvrage). L'efficacité d'un tel ouvrage est maintenue si le volume stocké est vidé régulièrement.

Sur les principaux ouvrages cantonaux, le volume d'évacuation annuel moyen est connu. Ainsi, on schématisera l'installation par une simple soustraction de sédiments en un point donné.

## 1.7 Extractions

Les gravières ont un impact clair sur le régime de charriage : une diminution mécanique de la quantité de matériaux disponibles. Les informations sur la gestion de la gravière permet d'affiner l'analyse si besoin (tris de sédiments sur place, fréquence, volume et endroit du prélèvement,...).

## 1.8 Installations hydroélectriques

### 1.8.1 Impacts sur le charriage

Les installations hydro-électriques sur les cours d'eau peuvent être de deux types : les installations avec lac d'accumulation, et les installations au fil de l'eau.

Une installation à accumulation typique du canton Fribourg est le lac de la Gruyère. Dans un tel cas, la morphologie des tronçons en amont du lac, et la morphologie en aval sont deux systèmes complètement distincts. A priori, la présence d'un lac à accumulation entraîne un arrêt complet des apports amont en termes de matériaux charriés. On peut donc identifier une telle installation comme modifiant la quantité de sédiments.

Une installation au fil de l'eau comprend deux ouvrages influençant le charriage : un prélèvement d'une partie du débit et un seuil permettant de réguler la prise d'eau. Le prélèvement de débit est défini par un seuil minimum établi dans la concession : le débit de dotation, et un seuil maximum correspondant à la capacité des machines hydrauliques (avec un ordre de grandeur de 5 fois le débit équipé). Le prélèvement d'eau entraîne une réduction de la capacité de transport solide sur le tronçon à débit résiduel.

### 1.8.2 Effets sur les eaux souterraines

Les retenues d'eau sans possibilité de transit sédimentaire sont généralement caractérisées par un colmatage plus ou moins important par des sédiments fins, dus à la réduction importante des vitesses d'écoulement dans le réservoir. Sont en particulier concernées les grandes retenues d'eau sur la Sarine tels que les barrages de Schiffenen et de Rossens. Ce colmatage a pour conséquence une diminution marquée des infiltrations dans les eaux souterraines. La perméabilité du lit de certaines rivières peut présenter une altération, dans une moindre mesure, similaire en raison de crues morphogènes absentes, qui ne chassent plus les dépôts sur les tronçons à débit résiduel.

D'un point de vue quantitatif, cette réduction ne représente habituellement pas une atteinte, dans le cas d'un barrage, mais plutôt un rapprochement de l'état naturel antérieur. En termes qualitatifs, les diminutions des infiltrations sont positives, tant que celles-ci conduisent, en raison de la qualité insuffisante des eaux infiltrées, à une diminution de la qualité des eaux souterraines environnantes (par exemple une diminution du taux d'oxygène avec des effets collatéraux néfastes).

C'est aujourd'hui moins la qualité de l'eau des rivières, qui s'est considérablement améliorée par rapport à autrefois - en tout cas du point de vue de la pollution organique -, que la pollution chimique et organique des sédiments fins qui se déposent depuis longtemps déjà dans les retenues et les cours d'eau, qui peut conduire en cas d'infiltration, à une altération qualitative indésirable des eaux souterraines.

Ces aspects n'ont pas été traités dans le détail ultérieurement. Cependant, les éventuelles conséquences du rétablissement du régime de charriage sur la qualité des eaux souterraines (par infiltration), seront scrutées par le service de l'environnement dans le cadre des études qui seront lancées dès 2015 (phase 2), au niveau du développement de la variante.

### 1.8.3 Effet des installations sur la protection contre les crues

Pour connaître l'impact des installations hydroélectriques sur la protection contre les crues, nous nous sommes basés sur les données existantes dans ce domaine, soit les cartes de dangers. Un croisement entre les cartes de dangers et les installations a été effectué dans un SIG. Nous avons ainsi pu identifier les installations qui pourraient causer un impact vis-à-vis de la protection contre les crues.

Pour les installations qui portent préjudice au régime de charriage, et qui font l'objet d'une étude détaillée, l'influence sur la protection contre les crues est précisée dans la suite du rapport, dans les chapitres concernant ces installations.

Pour les installations qui n'entravent pas le régime de charriage mais dont la présence aurait conduit à péjorer la situation de danger par le relèvement du lit en amont du barrage, aucun cas n'a été mis en évidence.

## 1.9 Aménagements de cours d'eau

Le terme « aménagements de cours d'eau » se rapporte à tous les travaux de correction effectués sur des cours d'eau, notamment dans une optique de protection contre les crues, ou autrefois dans le but de gagner des terres pour l'extension des cultures.



Ils sont considérés comme des installations de deuxième priorité dans l'aide à l'exécution (chapitre 3.2.5). Leur prise en compte dans cette planification est détaillée au chapitre 2.6.

# PREMIERE PARTIE

## 2. Appréciation sommaire

### 2.1 Objectif

L'objectif de l'appréciation sommaire est de définir les installations significatives et les tronçons de cours d'eau atteints à l'aide des données disponibles, par un procédé clair et compréhensible pour les phases de projets suivants. Les bases légales ainsi que les directives, les publications et les aides à l'exécution de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) sont respectées.

### 2.2 Démarche générale

La méthodologie est basée sur le module "Assainissement du régime de charriage – planification stratégique" (Schälchli et Kirchhofer, 2012). Les quatre premières étapes de la phase 1 prévue dans cette aide à l'exécution constituent l'appréciation sommaire (Figure 9). Celle-ci permet d'évaluer certaines installations et certains cours d'eau simplement, et de manière satisfaisante. La démarche appliquée et les résultats intermédiaires de chacune des quatre étapes sont décrits dans les sections suivantes.

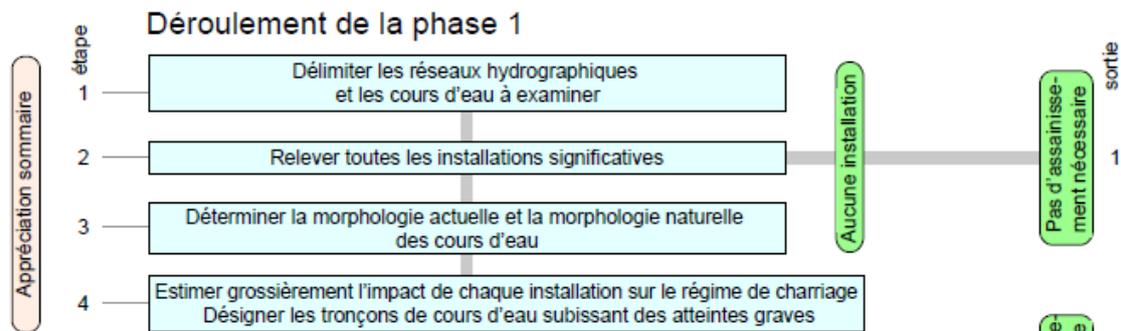


Figure 9: Déroulement de la phase 1 (Schälchli et Kirchhofer, 2012)

### 2.3 Étape 1: Délimiter les réseaux hydrographiques et les cours d'eau cibles

#### 2.3.1 Considérations générales

Selon Schälchli et Kirchhofer (2012), de grands bassins versants bien délimités doivent être considérés pour l'estimation du régime de charriage. Il s'agit ensuite de délimiter les cours d'eau à évaluer (cours d'eau cibles). Les cours d'eau cibles sont des tronçons influencés par au moins une installation significative du point de vue du régime de charriage, et ayant une forte importance écologique à l'état naturel. Le module "Assainissement du régime de charriage – Planification stratégique" présente l'illustration suivante :

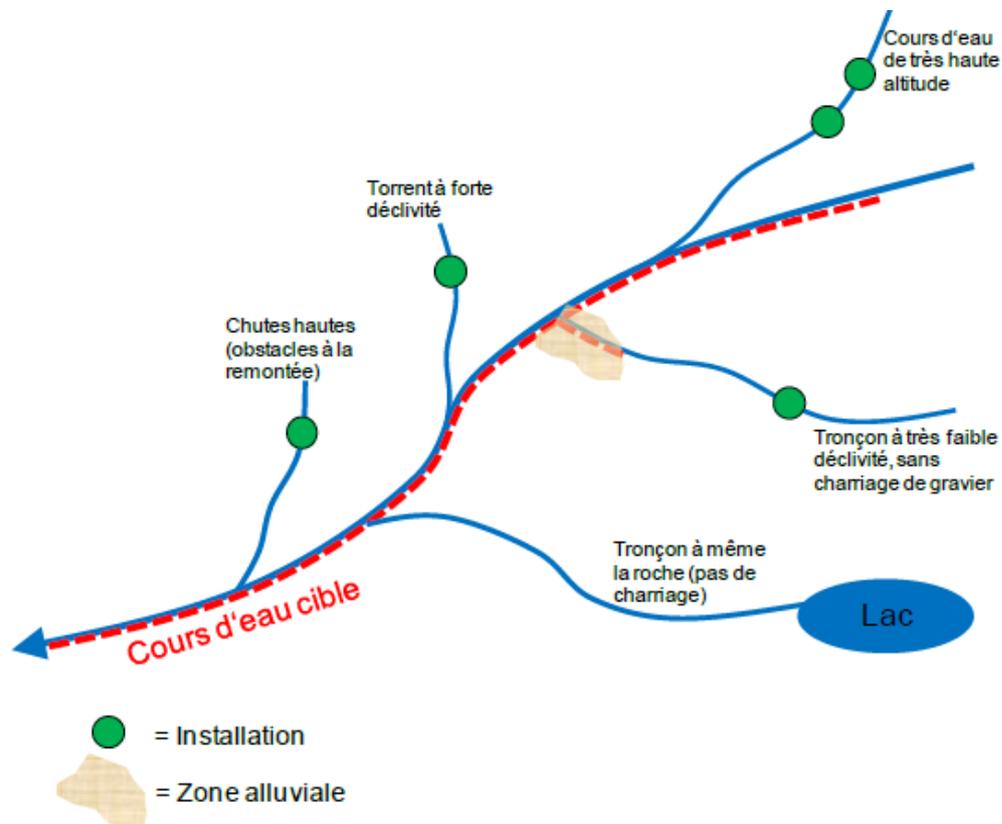


Figure 10: Délimitation des cours d'eau cibles (marqués en rouge) sur la base d'indicateurs relatifs à l'importance écologique à l'état naturel (Schälchli und Kirchhofer, 2012)

Il est de la compétence des cantons de définir les critères de l'importance écologique des cours d'eau à l'état proche de la nature. Une fois ces critères définis, ils devront être appliqués de manière conséquente et compréhensible. Pour le canton de Fribourg, ces critères ont été définis dans le cadre de séances de groupe de travail. Grâce à un large cercle de participants à ce groupe de travail, la prise en compte des intérêts particuliers (aspects piscicoles, alluviaux, etc.) a pu être garantie.

Une démarche permettant de sélectionner, en plusieurs étapes clairement définies, les cours d'eau du canton de Fribourg devant être envisagés comme cours d'eau cibles, a été développée lors des séances du groupe de travail. Le réseau hydrographique GWN25-07 du modèle numérique du paysage de la Suisse (VECTOR25, Juin 2007) a été utilisé comme base.

### 2.3.2 Situation initiale

La plupart des cours d'eau du canton de Fribourg prennent leur source à l'intérieur du canton. Cependant, certains systèmes importants ont leur source ou des affluents importants qui prennent leur source en dehors du canton. Pour éviter des problèmes avec les cours d'eau limitrophes (ex: la Singine) ou traversant les frontières (ex: la Broye), les cours d'eau hors des frontières du canton sont inclus dans la détermination des cours d'eau cibles. Cela signifie que chaque bassin versant situé en amont des cours d'eau fribourgeois, donc hors canton, est pris en compte. Initialement, la sélection est donc clairement trop large (longueur totale de 5'831 km). En dégrossissant la situation, on obtient un linéaire de base de 3860 km.

Ces éléments constituent la situation initiale, avant les étapes de sélection des cours d'eau cibles décrites ci-après.

### 2.3.3 Critère écologique: la pente du lit

Pour évaluer l'importance écologique, on peut s'appuyer sur des critères morphologiques, climatiques, topographiques et biologiques, sur la granulométrie ainsi que sur les zones inventoriées (p. ex. zones alluviales) (Schälchli et Kirchhofer, 2012). Les critères proposés par l'OFEV ont été discutés par le groupe de travail composé de la section lacs et cours d'eau, du service de l'environnement, du Service des forêts et de la faune, secteur milieux aquatiques et pêche et du Service de la nature et du paysage lors de la séance du 05.03.2013. Les décisions suivantes ont été prises :

Tableau 1: Détermination des cours d'eau cibles: critères éliminatoires

Les cours d'eau suivants n'ont PAS une forte importance écologique :		
Les tronçons de cours d'eau pour lesquels un des critères ci-dessous s'applique ne sont pas considérés comme cours d'eau cibles.		
Critère éliminatoire	OFEV : Le cours d'eau n'est PAS un cours d'eau cible si...	Décision canton de Fribourg
Pente	... la pente est plus élevée que 4 %.	Est appliqué
Charriage	... il n'y a pas de potentiel de charriage	Jusqu'à présent, il n'y a pas de données continues sur tout le canton, donc ce critère n'est pas appliqué
Connectivité spatiale	... il y a des obstacles naturels à la migration, ou il n'y a pas de possibilité de connectivité longitudinale ou latérale	Critère n'est pas appliqué car les seuils naturels infranchissables ne sont pas répertoriés
Zone climatique	... il est situé à > 1700 msm	Critère n'est pas appliqué, car il n'y a que très peu de cours d'eau à cette altitude

On considère qu'un cours d'eau dont la pente est supérieure à 4% a un lit structuré avec de grands blocs qui garantissent une certaine stabilité. Le risque d'une atteinte au régime de charriage est donc moins élevé. De plus, ces lits de cours d'eau raides ont tendance à être peu structurés et sont écologiquement moins significatifs<sup>6</sup>. Comme le montre la Figure 11, c'est la pente moyenne des tronçons du réseau hydrographique gwn25 qui a été utilisée pour ce critère. Le modèle numérique de terrain MNT FR 1m a été utilisé comme base pour la détermination de l'altitude.

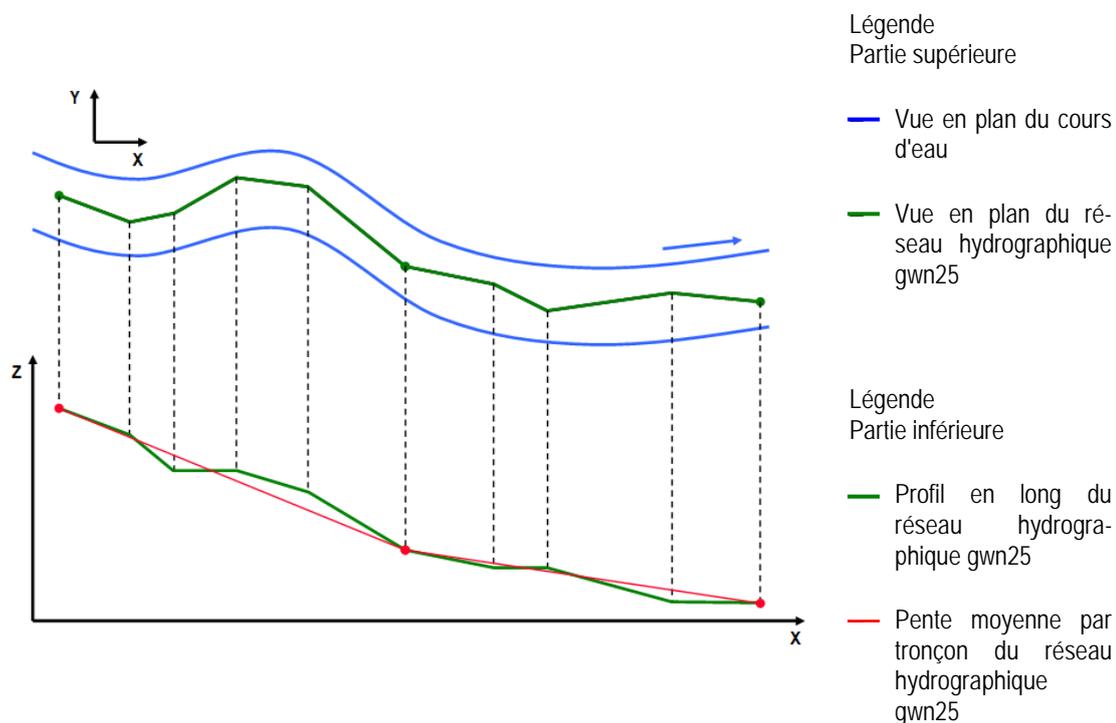


Figure 11: Représentation schématique du calcul de la pente moyenne des « features » du réseau hydrographique gwn25.

Bleu, en haut : vue en plan du cours d'eau

Vert, en haut : vue en plan du réseau hydrographique gwn25

Vert, en bas : Profil en long du réseau hydrographique gwn25

Rouge, en bas : Pente moyenne pour le tronçon du réseau hydrographique gwn25

### ➔ Résultat après application du critère de pente du lit

Après application de ce critère sur l'ensemble des éléments lignes du GWN25 (VECTOR25, 2007), la longueur totale du réseau de cours d'eau restante est de 1'446 km.

La pente de la Broye ne peut pas être calculée par le MNT entre Moudon et Lussens. Sur ce tronçon, une pente moyenne de 0,36% est admise (d'après GWN 25 ou « MNT sur canton de Vaud »).

<sup>6</sup> D'après : Hr Rudolf *Strategische Planung Sanierung Geschiebehaushalt Ergänzende Präzisierungen zum Modul*

### 2.3.4 Critère écologique : zones protégées d'importance nationale et cantonale

Les critères proposés par l'OFEV ont été discutés par le groupe de travail. Les décisions suivantes ont été prises :

Tableau 2: Détermination des cours d'eau cibles: critères de sélection

Les cours d'eau suivants ont une forte importance écologique :		
Les tronçons de cours d'eau pour lesquels un des critères ci-dessous s'applique sont considérés comme cours d'eau cibles, même s'ils ont été exclus par un des critères du tableau 1.		
Critère de sélection	Proposition OFEV Le cours d'eau est un cours d'eau cible si...	Décision canton de Fribourg
Inventaires de protection	...il est situé dans une zone protégée d'importance nationale ou dans une autre zone protégée	Les critères sont appliqués. Voir commentaires et supplément ci-dessous
Biocénoses	...on y trouve des espèces menacées ou prioritaires	

La Confédération ainsi que le canton de Fribourg ont en leur possession de nombreuses listes de zones protégées et d'inventaires de biotopes. Les cours d'eau sont concernés uniquement par certaines de ces listes. A l'échelle du canton, les services cantonaux ont ainsi présélectionné et mis à disposition les inventaires à prendre en considération :

- les zones alluviales d'importance cantonale et locale ;
- cours d'eau prioritaires pour les espèces migratrices ;
- cours d'eau prioritaires pour les espèces menacées ;
- répartition du nase, du barbeau, de la truite et de l'ombre.

Les inventaires de la Confédération ont été présélectionnés par BG, après validation de la section Lacs et Cours d'eau (LCE). Les inventaires du site internet de l'OFEV (<http://www.bafu.admin.ch/schutzgebiete-inventare>) ont été pris en compte de la manière suivante :

Tableau 3: Résumé des inventaires de la Confédération pris en compte (ou non)

Zone de protection / Inventaire des biotopes	pris en considération
Inventaire fédéral des zones alluviales	Oui
Cours d'eau d'importance nationale	Oui
Inventaire des sites de reproduction de batraciens d'importance nationale	Oui
Inventaires des marais	Non
Prairies et pâturages secs	Non
Inventaire fédéral des réserves d'oiseaux d'eau et de migrateurs	Non
Les districts francs fédéraux	Non
Réserve forestière	Non
Zones du réseau émeraude	Non
Réseau écologique national REN	Non

Si un tronçon de cours d'eau est dans une zone protégée d'importance nationale / cantonale, il est considéré comme cours d'eau cible.

En plus des inventaires de protection cantonaux et nationaux, les zones dans lesquelles se trouvent des espèces prioritaires seront prises en compte. Les salamandres terrestres et les espèces d'écrevisses autochtones sont considérées. Si un tronçon est dans une zone dans laquelle des espèces prioritaires ou protégées ont été observées, il est considéré comme cours d'eau cible.

### → Résultat de l'analyse inventaires de protection et biocénose

Dans le canton de Fribourg on trouve :

- zones alluviales d'importance nationale : 24 zones déclarées. Celles-ci se situent le long de la plupart des rives de lacs (Lac de Neuchâtel, Lac de Morat, Lac de Gruyère, Lac de Montsalvens) et sur les cours d'eau suivants : la Sarine (avant et après le lac de Gruyère), la Singine, la Gérine, la Broye, la Neirigue ;
- zones alluviales d'importance cantonale et locale : 24 zones déclarées. A l'exception d'une zone de rive du lac de Morat, il s'agit exclusivement de plaines alluviales ;
- site de reproduction des nases (zone de protection d'importance nationale): Sarine en aval du lac de Gruyère.
- zones à ombres (zone de protection d'importance nationale): Sarine en aval du lac de Schiffenen.

Les zones de frai du nase et les régions à ombre se situent dans la Sarine, qui est déjà définie comme cours d'eau cible en raison de son rôle de cours d'eau récepteur, de sa pente et des atteintes dues aux installations.

### Biocénoses et des espèces prioritaires

Remarque concernant les salamandres tachetées : après discussion avec un spécialiste des amphibiens<sup>7</sup>, il semble que la modification du régime de charriage n'influence pas de façon significative cette espèce. Ce n'est donc pas une donnée à prendre en compte pour la planification du charriage.

Les espèces d'écrevisses autochtones : l'écrevisse à pattes rouges a été trouvée dans l'Arbogne, la Bibera, la Broye et dans la Sarine (lac de Schiffenen). L'écrevisse à pattes blanches est présente dans tous les bassins versants sauf la Jogne et la Haute Sarine. La carte de distribution des écrevisses indigènes mise à disposition par l'OFEV a une résolution très grossière. Elle permet de déterminer les cours d'eau habités. Tous les cours d'eau en amont d'un cours d'eau habité par des écrevisses indigènes sont définis comme cours d'eau cibles.

Les tronçons satisfaisants aux critères des zones écologiques protégées correspondent à un linéaire de 4 km, qui est rajouté aux tronçons cibles potentiels définis lors de la sélection en fonction de la pente. La longueur du réseau de cours d'eau cibles potentiel atteint 1'450 km après cette étape.

---

<sup>7</sup> Renseignements de Madame Regula Binggeli, Bureau de la protection de la nature et du paysage, Canton de Fribourg.

### 2.3.5 Exclusion des cours d'eau situés en dehors du canton

Les frontières du canton de Fribourg coïncident à certains endroits avec le tracé de cours d'eau. L'exemple caractéristique est la Singine dans le nord-est (frontière avec le canton de Berne), mais la Broye, le Chandon ou la Veveyse matérialisent également en partie les limites cantonales. De plus, certains cours d'eau s'écoulent sur certains tronçons en dehors du territoire du canton. Pour éviter des confusions lors de la considération de ces cours d'eau, le bassin versant hydrographique de tous les cours d'eau du canton de Fribourg sera utilisé pour la définition de cours d'eau cibles. Les tronçons de cours d'eau remplissant les critères de cours d'eau cible se situant hors du canton seront retirés manuellement. Les principes suivants sont appliqués:

- Les cours d'eau s'écoulant sur certains tronçons en dehors du canton, ne seront pas considérés, sur ces tronçons, comme cours d'eau cibles. (Ex : Broye) ;
- Un cours d'eau s'écoulant entièrement hors du canton ne sera pas pris en considération. (Ex : Affluent de la Broye dans le canton de Vaud) ;
- Les affluents de cours d'eau à la frontière situés hors du canton ne sont considérés que comme pourvoyeurs de sédiment ;
- Les cours d'eau ayant leur source hors du canton et s'écoulant à travers le canton pourront être considérés comme cours d'eau cibles seulement à partir de la frontière. (Ex: Sarine, Hongrin). Afin de bien comprendre leur régime de charriage, celui-ci est toutefois déjà étudié sur le tronçon nécessaire en amont. Dans le cas de la Sarine et de l'Hongrin, le mandataire BG a déjà travaillé sur la planification d'assainissement du régime de charriage du canton de Vaud, ce qui a facilité la coordination.

A noter que les données SIG sont souvent imprécises et qu'il arrive que la frontière cantonale ne corresponde pas à l'axe du cours d'eau. Un contrôle du linéaire des cours d'eau cibles a été effectué pour les cours d'eau qui marquent la frontière cantonale. Les problèmes topologiques de décalage dans le SIG entre la frontière cantonale et le cours d'eau ont été résolus manuellement ; ces cours d'eau ont été réintégrés dans les cours d'eau cibles.

#### ➔ Résultat de l'exclusion de cours d'eau situés hors du canton

L'exclusion de cours d'eau cible potentiels situés hors du canton réduit le réseau de cours d'eau considéré de 250 km.

### 2.3.6 Exclusion des plans d'eau

Les lacs constituent des interruptions naturelles du régime de charriage des systèmes de cours d'eau. Le réseau hydrographique GWN25-07 (VECTOR25, juin 2007) définit les axes lacustres, les rives des lacs et les îles en tant que lignes. Ceci peut porter à confusion et ces éléments ne doivent pas être considérés comme cours d'eau cibles.

Les deltas, en tant que zones de frai, sont par contre considérés car ils sont très sensibles au régime de charriage.

#### ➔ Résultat de l'exclusion des plans d'eau

L'exclusion des axes lacustres, des rives de lacs et des îles (éléments lignes définis de la même manière que les cours d'eau dans GWN25) réduit les tronçons de cours d'eau cibles potentiels de 123 km. Dans cette phase, les secteurs de delta ne sont pas supprimés.

### 2.3.7 Exclusion de corrections de canaux artificiels

Les canaux de la correction des eaux du Jura présentent une pente très faible. Ces canaux (canal de la Broye, Grand canal, Biberakanal et Galmizkanal) ne doivent pas être pris en considération car d'une part, ils ne permettent pas de charriage, et d'autre part, un assainissement serait disproportionné au regard de l'importance du système pour la protection contre les crues.

Les canaux artificiels de dérivation des eaux comme le canal des usiniers (partie supérieure du Ruisseau des Moulins dans le district de la Broye, et les différents canaux d'aménagements de moulins) sont également retirés du linéaire de cours d'eau cibles.

#### ➔ Résultat de l'exclusion des corrections historiques

L'exclusion du Grand Canal, du Canal de la Broye, de la Bibera et du Galmizkanal, ainsi que des différents petits canaux dans le secteur du Grand Marais réduit le linéaire de cours d'eau cibles de 53 km.

### 2.3.8 Suppression des tronçons hors canton de cours d'eau s'écoulant en partie dans le canton de Fribourg

Dans cette étape, nous retirons du linéaire de cours d'eau cible les tronçons « hors canton » de cours d'eau s'écoulant en partie en territoire fribourgeois. C'est notamment le cas d'une partie du linéaire de la Broye, de la Singine, de la Sarine, de la Petite Glâne, de l'Arbogne, de la Mionne, de la Biorde, du Parimbot, du Chandon et de la Bibera.

#### ➔ Résultat de l'exclusion tronçons hors canton

Cette étape réduit le linéaire de cours d'eau cible de 102 km.

### 2.3.9 Suppression des tronçons sous tuyaux et des tronçons en amont

Dans cette étape, nous supprimons les segments de cours d'eau cibles qui sont enterrés, ainsi que les tronçons de cours d'eau cibles situés directement en amont. Il s'agit d'une problématique qui est traitée dans le cadre de la revitalisation des cours d'eau et de leur remise à ciel ouvert.

#### ➔ Résultat de suppression des tronçons enterrés ou en amont

Cette étape conduit à la réduction du linéaire de cours d'eau cibles de 120 km.

### 2.3.10 Nettoyage du réseau hydrographique

Pour les cours d'eau s'écoulant en tresses ou comportant des bras secondaires (Gérine et Singine principalement, mais également d'autres cours d'eau), cette étape a notamment consisté à ne retenir qu'un seul chenal, pour ne pas fausser le kilométrage réel du cours d'eau dans le SIG.

#### ➔ Résultat de cette étape

Cette opération fait diminuer le réseau de cours d'eau cibles de 31 km.

### 2.3.11 Contrôle du linéaire le long des cours d'eau qui marquent la limite cantonale

Nous avons finalement contrôlé la prise en compte des cours d'eau qui marquent la limite cantonale, pour lesquels des problèmes topologiques peuvent se poser dans le SIG, en raison de l'inadéquation entre la géométrie du cours d'eau et celle de la frontière cantonale.

#### ➔ Résultat de cette étape

Cette étape rajoute 5 kilomètres de cours d'eau cibles qui avaient échappé en raison d'erreurs topologiques dans le SIG.

### 2.3.12 Adaptations effectuées dans le rapport final

Dans sa prise de position sur le rapport intermédiaire de janvier 2014, l'OFEV a demandé que la méthode de détermination des cours d'eau cibles soit redéfinie dans le rapport final. Il s'agissait notamment de ne pas limiter les cours d'eau cibles aux seuls tronçons situés à l'aval d'installations de première priorité (étape *exclusion de tronçons naturels non influencés* dans le rapport intermédiaire). Cette exclusion n'a en conséquence pas été retenue dans la version finale du présent rapport.

La détermination des cours d'eau cibles a été entièrement révisée. Les tronçons situés à l'amont des installations de première priorité ont été réintégrés, même si leur état écomorphologique est bon. Le critère d'exclusion des tronçons « trop courts » a également été supprimé dans le rapport final, comme demandé lors de la séance de discussion avec l'OFEV.

Le linéaire de cours d'eau cible, qui était de 648 kilomètres dans le rapport intermédiaire de la planification, se monte, suite à ces modifications, à 777 km dans le rapport final.

Le Tableau 4 présente le réseau de cours d'eau cibles après chacune des étapes de sélection. La Figure 12 illustre les 777 km de cours d'eau cibles. Pour une meilleure lisibilité, cette carte figure également en [Annexe 10](#) au format A3.

Tableau 4: Procédure et effets de la sélection de cours d'eau cibles

Jalon d'analyse <sup>8</sup>	Critères de sélection	Longueur totale du réseau de cours d'eau cibles [km]
	Situation initiale	3 860
1	Critère écologique : la pente < 4%	1 446
2	Critère écologique : dans un inventaire	1 450
3	Sur le territoire du canton	1 200
4	Pas d'axe de lac	1 077
5	Pas de corrections historiques de cours d'eau	1 024
6	Suppression des tronçons hors canton de cours d'eau s'écoulant en partie dans le canton de Fribourg	922
7	Nettoyage du réseau hydrographique pour les écoulements tresses et bras secondaires	891
8	Tronçons sous tuyaux ou tronçons situés en amont	<b>767</b>
9	Contrôle de la prise en compte totale du linéaire pour les cours d'eau marquant la limite cantonale (résolution des problèmes topologiques dans les analyses SIG)	<b>777</b>

<sup>8</sup> Les numéros correspondent au jalon d'analyse et figurant dans la table SIG

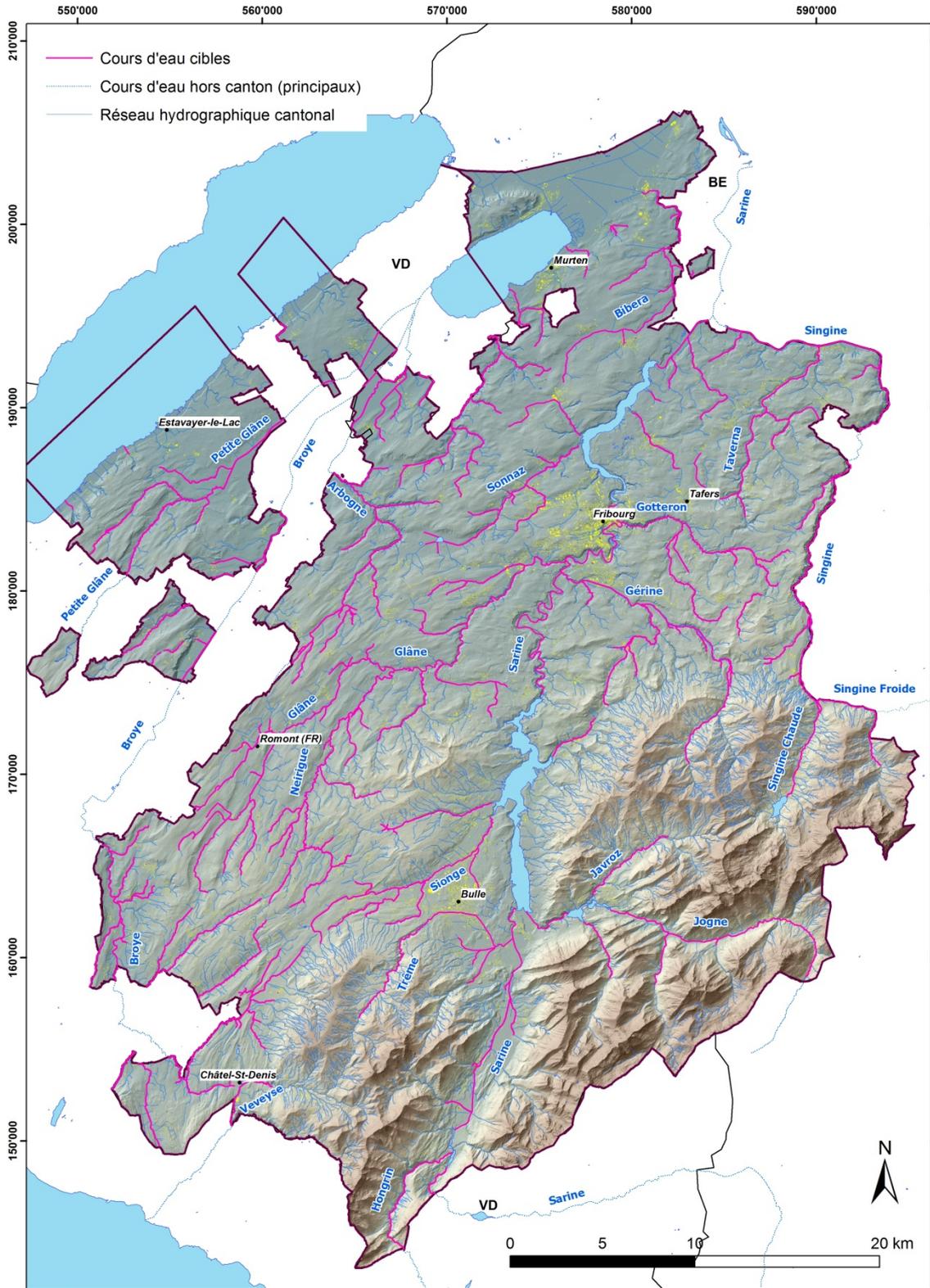


Figure 12 Cours d'eau cibles pour l'assainissement du régime de charriage

## 2.4 Étape 2 : Relever toutes les installations significatives

### 2.4.1 Données de base

Selon Schälchli et Kirchhofer (2012), toutes les installations ayant un impact sur le régime de charriage doivent être évaluées. Il s'agit des pièges à gravier, des extractions de gravier, des centrales hydroélectriques et des aménagements de cours d'eau. Ces derniers ne sont considérés que s'ils engendrent de l'érosion du lit ou qu'ils perturbent de façon évidente l'apport en sédiments d'une installation de première priorité.

Le recensement des installations est basé sur les sources suivantes :

Tableau 5: Description des sources de données concernant les installations du canton de Fribourg

Source	Description	documents	Fournisseur
Src.1 (69 <sup>9</sup> Inst.)	Rétablissement de la migration piscicole sur le canton de Fribourg	Rapport technique Documentation photos Tableau des installations	LCE / PRONAT
Src.2-1 (23 Inst.)	Vue d'ensemble des extractions de gravier dans le canton de Fribourg	Plan de situation Information sur l'exploitation et les concessions	LCE
Src.2-2 (40 Inst.)	Vue d'ensemble des pièges à gravier dans le canton de Fribourg	Plan de situation Information sur l'exploitation et les concessions	LCE
Src.3 (11 Inst.)	Fichier GIS (*.shp) des extractions	Données en format *.shp (GIS)	LCE
Src.4 (40 Inst.)	Concession pour les extractions de gravier, archive de la section LCE	Concession	LCE / BG

Tableau 6: Description des sources de données concernant les installations du canton de Fribourg

On recense donc 183 installations pouvant avoir un effet sur le régime de charriage.

### 2.4.2 Critères d'élimination des doublons

La même installation peut être répertoriée dans plusieurs sources et être incorporée à double dans la base de données. En plus des doublons géographiques, certains concernent le statut de l'installation : une extraction de gravier a été archivée (Src.4) alors qu'elle est toujours en fonction et se trouve dans la carte de synthèse de la LCE (Src.2-1). De la même manière, une installation peut être documentée comme extraction de gravier (Src.2-1) et se situer à l'amont d'un obstacle à la migration piscicole (Src.1). Dans ces deux exemples, la planification de l'assainissement du régime de charriage ne considère qu'une seule installation. La suppression des doublons permet d'assurer la pertinence des données.

La position des installations est définie différemment en fonction des sources d'information. En cas de doublon, la question de savoir quelle position doit être considérée n'est pas triviale. Les informations sont prises en considération selon l'ordre de priorité suivant, qui prend en compte la précision des différentes sources d'informations.

1. Rétablissement de la migration piscicole sur le canton de Fribourg (Src.1)
2. Fichier GIS (\*.shp) des extractions du LCE (Src.3)

<sup>9</sup> 65 objets ont été recensés dans le cadre du rapport intermédiaire « migration piscicole » remis à fin décembre 2012. Le bureau PRONAT a, par la suite (mai 2013), recensé 4 installations supplémentaires qui ont également été prises en compte.

3. Concession pour les extractions de gravier, archive du LCE (Src.4)
4. Vue d'ensemble des pièges à gravier dans le canton de Fribourg (Src.2-1 & 2-2)

### → Résultat de l'analyse des doublons

Le Tableau 7 donne une vue d'ensemble des installations concernées et désigne (en gris) pour les 18 doublons l'installation qui a été finalement retenue.

Tableau 7: Installations avec doublons – désignation et source conservée.

Srs.2-1	Sources de données			Remarques
	Src.2-2	Src.3	Src.4	
Carte	Carte	Shape	Archive	
S		433		
R		431	XIII/18.1	Informations identiques
J			XIII/17.1	Selon la carte extraction en cours, selon archives, hors service depuis 1996
I		4	XV/1.1	Selon la carte extraction en cours, selon archives, hors service depuis 2005
		5	XV/1.2	Informations identiques
H			XV/2.1	Selon la carte extraction en cours, selon archives, hors service depuis 2006
G			XV/6.01 XIII/4.01 XIII/11.01 XIV/1.01	Extraction sur plusieurs années (archive), en raison de protection contre les crues, toujours en cours
C			XV/9.1 XIII/1.1	Selon la carte extraction en cours, selon archives, hors service depuis 1993 / 2009
F		6	XIV/8.1	Beaucoup d'informations sur l'extraction de matériaux
V			XV/7.1 XIV/7.1 XIII/9.2	Selon la carte extraction en cours, selon archives, hors service depuis 1994 / 2003 / 2008
U		3	XIV/12.1 XIII/9.1	Selon la carte extraction en cours, selon archives, hors service depuis 1994 / 2010, Shape sans informations
O			XV/4.1	Selon la carte extraction en cours, selon archives, hors service depuis 2008
	18		XV/10.2	Concession de l'OFEV selon archive jusqu'en 2011, selon la carte extraction en cours
	19		XV/10.1	Concession de l'OFEV selon archive jusqu'en 2011, selon la carte extraction en cours
N			XIII/7.1	Demande d'extraction refusée correspond à la mention : « Extraction: non » sur la carte
	14	1	XV/03.1 XV/12.2	Dépotoir à alluvions, concession jusqu'en 2015, les informations de l'archive et du Shape correspondent. De plus, exclusion d'une installation par une étude de migration piscicole (ID: 304)
		413	XV/12.1	Informations identiques
		414	XV/11.1	Informations identiques

#### 2.4.3 Critère d'exclusion : étude existante

En janvier 2013, l'OFEV a diffusé le rapport « Assainissement du charriage de la Jogne. Rapport intermédiaire » (Jaeggi, IDEALP, GREN). Ce rapport sert de fil rouge et d'exemple aux services

cantonaux et aux bureaux d'ingénieurs. Cette étude sur le bassin versant de la Jogne a déjà analysé les tronçons suivants en détail :

- Jogne (sur un tronçon d'environ 17 km, depuis la frontière bernoise) ;
- Javroz (ensemble du tracé) – considéré comme pourvoyeur de sédiment.

### ➔ Résultat de l'analyse des études existantes

Le Tableau 8 synthétise l'évaluation des installations dans l'étude pilote. Certaines installations, listées dans le cadre de la compilation des données de base, ne sont pas mentionnées explicitement dans l'étude pilote, car elles n'ont aucun effet sur le régime de charriage. On considère pour la suite de l'étude que toutes les installations significatives dans le bassin versant de la Jogne ont été prises en compte.

A noter que le Javroz est considéré uniquement comme pourvoyeur de sédiments dans l'étude pilote. Il est donc repris dans la planification stratégique comme cours d'eau cible.

Tableau 8: Installations de l'étude pilote "Assainissement du charriage de la Jogne. Rapport intermédiaire" (Jaeggi et al., 2013)

Installation	Cours d'eau	ID	Bilan de l'étude pilote	Bilan BG
Barrage de Montsalvens	Jogne	FR.JOG.4	Retenue totale annuelle d'environ 36'000 m <sup>3</sup>	Mesure
Usine hydroélectrique de Broc	Jogne	FR.JOG.1	Installation secondaire	Exclusion
Aménagement Charmey	Jogne	FR.JOG.6	Les vannes secteurs sont ouvertes en période de crue, permettant le transit de matériaux. étude pilote p. 12: "(...) la majorité des graviers étant prélevés à la gravière Rime", donc en amont	Exclusion
Aménagements de la Tzintre Energie SA	Jogne	FR.JOG.7	Etude pilote p. 13: "(...) l'influence de l'aménagement de la Tzintre Energie SA sur le charriage de la Jogne est très restreint ; le transit des sédiments est donc assuré"	Exclusion
Aménagement EW Jaun	Jogne	FR.JOG.12	Etude pilote p. 14 : "Etant donné les faibles débits captés, cet aménagement n'a qu'un impact négligeable sur le charriage de la Jogne."	Exclusion
Captage de la Fabrique Nestlé à Broc	Jogne	FR.JOG.2	La construction permet le transit de matériaux	Exclusion
Gravière Rime	Jogne	FR.JOG.9	Etude pilote p. 16 : "la fosse piège totalement les apports d'alluvions normaux. Un transit peut avoir lieu après le remplissage par une crue exceptionnelle, en particulier si celle-ci se produit en hiver". Extraction annuelle: 600-1000 m <sup>3</sup>	Mesure
Le Brésil	Jogne	FR.JOG.11	Etude pilote p. 16 : "aucun signe d'un prélèvement direct dans la Jogne"	Exclusion
Le Reposoir / Val-sainte	Javroz	FR.JAV.2	Pas de création de fosse, transit de matériaux partiel. Tronçon à réduction naturelle de pente. Morphologie intacte. Volumes prélevés inconnus.	Besoin d'éclaircissement
Les Chenevières	Javroz	FR.JAV.1	Prélèvements en amont de deux seuils de	Besoin d'éclair-

			consolidation. Volumes prélevés connus.	cissement
	Gros Mont	FR.GRM.1	Non significatif pour l'étude pilote	Exclusion
	Gros Mont	FR.GRM.2	Non significatif pour l'étude pilote	Exclusion
	Javroz	FR.JAV.3	Non significatif pour l'étude pilote	Exclusion
	Jogne	FR.JOG.3	Non significatif pour l'étude pilote	Exclusion
	Jogne	FR.JOG.5	Non significatif pour l'étude pilote	Exclusion
	Jogne	FR.JOG.8	Non significatif pour l'étude pilote	Exclusion
	Jogne	FR.JOG.10	Non significatif pour l'étude pilote	Exclusion
	Jogne	FR.JOG.13	Non significatif pour l'étude pilote	Exclusion
	Klein Mundbach	FR.KMU.1	Non significatif pour l'étude pilote	Exclusion
	Klein Mundbach	FR.KMU.2	Non significatif pour l'étude pilote	Exclusion
	R. de Motélon	FR.MON.1	Non significatif pour l'étude pilote	Exclusion

- Les résultats de l'étude pilote sont directement repris dans le présent rapport.
- Les installations déclarées non significatives ne seront pas examinées. 17 installations du bassin versant de la Jogne sont conservées dans les données de base (Annexe 1) et dans les tableaux et cartes de synthèse. Elles ne sont cependant pas réétudiées dans le cadre de l'appréciation sommaire ni de l'étude détaillée menée par le canton car considérées comme traitées.
- Pour deux installations significatives avec suffisamment d'informations de base (barrage de Montsalvens, gravière Rime sur la Jogne), des mesures ont été développées dans le rapport final de la planification cantonale.
- Deux installations issues de l'étude pilote sur le bassin versant de la Jogne, situées sur le Javroz, ont fait l'objet d'investigations supplémentaires dans le rapport intermédiaire de la planification pour déterminer si les atteintes sont significatives ou non.

A ce stade, il reste donc 30 installations de première priorité à prendre en compte. La pertinence de ces installations est évaluée lors de l'étape 4 (chap. 2.5, ci-après).

## 2.5 Étape 4: Appréciation sommaire : estimer grossièrement l'impact de chaque installation sur le régime de charriage

### 2.5.1 Exclusion des installations de première priorité sans impact sur le régime de charriage

Suite à la sélection exhaustive des ouvrages de première priorité potentiels (étape 2 ; chapitre 2.3), et à la mise à l'écart des objets listés à double (ch. 3.3.2) et des installations prises en compte dans les études existantes (ch. 3.3.3), restait une liste de 152 ouvrages de première priorité :

- 65 ouvrages hydroélectriques (4 barrages à accumulation, 3 centrales à accumulation, 46 centrales au fil de l'eau, 12 ouvrages autres), inventoriés d'après la base de données du Service des forêts et de la faune (SFF), élaborée dans le cadre de la planification de l'assainissement de la migration piscicole<sup>10</sup> ;

<sup>10</sup> Rapport intermédiaire rendu à la fin de l'année 2012.

- 44 dépotoirs à alluvions ;
- 43 sites d'extraction ;

Lors de cette étape, des discussions avec les personnes avisées des services de l'Etat de Fribourg et des visites de terrain ont permis d'estimer grossièrement l'impact de chaque installation sur le régime de charriage. Elles nous ont surtout permis d'écarter de la suite de la planification (études détaillées : partie II du rapport) les installations de première priorité qui n'ont pas d'effets sur le régime de charriage.

La visite des installations et leur évaluation ont été nécessaires pour établir quelles installations de première priorité entravaient significativement le régime de charriage, et lesquelles pas. Une fiche de synthèse détaille l'évaluation de chaque installation dans [l'Annexe 1](#).

### 2.5.1.1 Critères d'exclusion

De par leur position, leur disposition, leur finalité et leur exploitation, les installations non significatives peuvent être considérées – sans investigations complémentaires – comme exemptes d'impact nuisible sur le régime de charriage (Schälchli et Kirchhofer, 2012). Si les données disponibles sont suffisantes, une installation peut être jugée comme non pertinente à ce stade. La table ci-dessous présente les critères permettant de considérer une installation comme non pertinente avec une brève justification. La classification est basée sur l'analyse des données disponibles par un spécialiste en transport solide. Les codes utilisés dans le Tableau 9 sont repris dans le catalogue d'objets en [Annexe 1](#) pour permettre la traçabilité de l'évaluation.

Tableau 9: Critères d'évaluation de l'impact des installations de première priorité

Type d'installation	Critère d'exclusion	Commentaire	Code
Extraction de gravier	Extraction dans le secteur de l'embouchure dans un lac	Les lacs forment une rupture naturelle du régime de charriage Il n'y a donc pas de tronçon touché. Par contre, l'effet local dans le delta doit être analysé avant toute exclusion.	A.E1
	Hors service, l'extraction se faisait sur un banc existant	Hypothèse: l'état d'équilibre est atteint	A.E2
	Demande d'extraction non récurrente ou d'une fréquence très rare, justifiée dans le cadre de l'entretien des cours d'eau pour la protection contre les dangers naturels.		A.E3
	Autorisation d'extraction ancienne et unique pour besoins en graviers pour l'aménagement de voies de communication locales		A.E4
Piège à gravier	L'exploitation du piège est définitivement stoppée (pas d'extraction). Le piège est transparent au débit solide	Hypothèse: l'état d'équilibre est atteint	A.GS1
	La capacité de transport à l'aval du piège à gravier est naturellement nulle	Le cours d'eau n'est pas considéré comme pourvoyeur de sédiment	A.GS2
	Principalement dépôt de sédiments fins et de matériaux organiques	L'assainissement du régime de charriage se focalise sur la fraction gra-	A.GS3

Type d'installation	Critère d'exclusion	Commentaire	Code
		nulométrique des graviers	
	Il n'y a pas de piège à gravier mais simplement un seuil sans effet sur le charriage	Pas d'intérêt d'un point de vue de l'assainissement du régime de charriage	A.GS4
	Gros dépotoir à laves torrentielles qui laisse transiter le charriage	Pas d'intérêt d'un point de vue de l'assainissement du régime de charriage	A.GS5
	Il n'y a pas d'ouvrage à cet endroit (erreur dans les données de base)		A.GS6
	L'ouvrage est dans le périmètre d'un projet de revitalisation et ne provoquera plus d'atteinte au régime de charriage	L'assainissement est déjà réalisé par le biais d'un projet de revitalisation en cours.	A.GS7
	Petit dépotoir ou herse avant mise sous tuyau	Volumes insignifiants pour l'aval	A.GS8
	Des mesures constructives rendent l'ouvrage transparent pour le transport solide	Vanne gonflable, vanne mobile en cas de crue	A.WK1
	Installation annexe sans influence sur le transport	Installation à l'extérieur du cours d'eau principal ; usine hydroélectrique	A.WK2
		Cours d'eau particulièrement plat ou cours d'eau sous tuyau.	A.WK3
Installation hydroélectrique	Installation dans un cours d'eau sans transport de gravier	Pas d'intérêt d'un point de vue de l'assainissement du régime de charriage	
	L'installation n'est plus en fonction et son état le rend transparent pour le transport solide	Plus d'entrave au charriage car un état d'équilibre morphologique est établi.	A.WK4
	L'installation est toujours en fonction. Le comblement de la retenue est supérieur à 80% et le rend transparent pour le transport solide	Un état d'équilibre morphologique est atteint. La justification du taux de 80 % est apportée au § 11.5.	A.WK4

Les visites de terrain ont été réalisées par la LCE. Elles ont permis de documenter les installations elles-mêmes ainsi que la morphologie des tronçons directement à l'amont ou à l'aval. La morphologie a été analysée selon les recommandations de l'aide à l'exécution. Une fiche de terrain qui renseigne sur la forme générale du lit, les structures du lit, et le colmatage du fond du lit, a été élaborée. L'évaluation morphologique n'a pas toujours été facile à mettre en œuvre (difficulté de trouver deux stations comparables, écoulement directement sur la roche en place, délais très courts) et a plutôt été effectuée de façon indicative. L'évaluation morphologique est, dans certains cas, indirectement considérée par le biais des critères d'exclusion mentionnés dans le Tableau 9 ci-dessus ; parfois, elle intervient en complément de ces critères.

L'analyse de la morphologie des tronçons amont et aval n'a en aucun cas été effectuée sur les cours d'eau qui n'ont pas été définis comme cibles ; seule l'installation et son fonctionnement ont été pris en compte.

Dans le cas où la morphologie ne change pas entre l'amont et l'aval d'une installation, on peut admettre que cette dernière n'a pas d'impact significatif sur le régime de charriage. En cas de doutes, l'installation a été conservée, par précaution, pour faire l'objet d'une étude détaillée par un bureau d'ingénieurs, dans la seconde phase de l'étude.

Concrètement, ces critères d'évaluation ont été pris en compte selon la démarche suivante.

### 2.5.1.2 Démarche d'évaluation des ouvrages durant l'appréciation sommaire

#### a) Evaluation sur la base des documents disponibles

Une analyse des documents disponibles (orthophotos, cartes, planches photographiques) menée au bureau a tout d'abord permis d'écartier certains objets non pertinents qui ne représentaient pas, de façon évidente, une atteinte au régime de charriage des cours d'eau (**20 objets**). Une installation n'a été exclue avant les visites de terrain que si les documents existants permettent de démontrer sa non-pertinence.

Cette analyse de bureau a également mis en doute la pertinence de certaines installations en tant qu'entrave au charriage (**42 objets**). Pour les installations hydroélectriques déjà prises en compte dans la planification de l'assainissement de la migration piscicole, une discussion avec les gardes-faunes du SFF a permis de clarifier la nature de ces ouvrages et d'en éliminer une partie (**10 objets**). Concernant les extractions de graviers et les dépotoirs, une discussion avec la personne traitant les demandes d'extraction au sein de la LCE a permis d'écartier **19 objets** non pertinents dans le cadre de cette planification.

#### b) Ouvrages causant une atteinte manifeste

Les ouvrages qui affectent le régime de charriage de façon manifeste n'ont pas fait l'objet d'une visite de terrain lors de l'appréciation sommaire. **Cinq** ouvrages engendrant une importante retenue d'eau rentrent dans cette catégorie : les barrages de Lessoc, de Rossens, de la Maigrauge et de Schiffenen sur la Sarine, ainsi que le barrage de Montsalvens sur la Jogne. On peut ajouter à cette liste les barrages de Rossinière sur la Sarine et de l'Hongrin, situés hors canton, mais dont l'émissaire s'écoule ensuite sur territoire fribourgeois

#### c) Vision locale

La septantaine d'installations restantes a été visitée par des collaborateurs de la LCE, afin d'identifier si elles constituaient une atteinte au régime de charriage ou non. Diverses observations ont été effectuées : description de l'installation (documentée par des photographies ; détermination de l'influence de l'installation sur les écoulements ; évaluation de l'entrave potentielle au charriage. Les critères d'exclusion du Tableau 9 ont été appliqués.

#### d) Validation interne à la LCE

Une validation interne par les chefs de secteurs concernés au sein de la LCE a finalement permis d'arrêter la liste des installations de première priorité présentant potentiellement une entrave au régime de charriage (2.5.2) :

## 2.5.2 Installations entravant potentiellement le régime de charriage, suite à l'appréciation sommaire

La méthodologie décrite dans le § 2.5.1 a permis, dans le cadre d'une appréciation sommaire, de distinguer les installations de 1<sup>ère</sup> priorité qui entravent potentiellement le régime de charriage de celles qui n'ont aucun impact. Les premières nommées, au nombre de 31, sont listées dans le Tableau 10 et représentées sur la Figure 13. Pour sept installations qui ne font pas l'objet d'une évaluation détaillée (colonne de droite du tableau), la justification est apportée au chapitre suivant 2.5.3.

Tableau 10: Installations entravant potentiellement le régime de charriage, suite à l'appréciation sommaire.

\* installations déjà été prises en compte dans l'étude pilote *Jaeggi, Idealp, Gren (2013)*,

	Nom installation	Code	Cours d'eau	Détenteur	Coordonnées	Eval. dét.
barrages accumulation	Barrage Schiffenen	FR.SAA.1	Sarine	Groupe E	581'327/192'439	Oui
	Barrage Maigrauge	FR.SAA.2	Sarine	Groupe E	579'145/183'057	Oui
	Barrage Rossens	FR.SAA.9	Sarine	Groupe E	575'072/174'141	Oui
	Barrage Lessoc	FR.SAA.13	Sarine	Groupe E	570'424/150'608	Oui
	Barrage Montsalvens*	FR.JOG.4	Jogne	Groupe E	576'562/162'397	Non
	Barrage Rossinière	-	Sarine	Groupe E	Hors canton/VD	Oui
	Barrage Hongrin	-	Sarine	Forces Motrices Hongrin Léman	Hors canton/VD	Oui
14 centrales au fil de l'eau		FR.BIB.1	Bibera	Urs Grau	581'368/201'293	Oui
		FR.BIB.2	Bibera	André Chevalier	581'694/201'047	Oui
	Moulin Dougoud	FR.BRO.1	Broye	Moulin Dougoud SA	552'374/162'127	Oui
	Barrage Matelec	FR.GLA.1	Glâne	Philippe Gehring, Anne-Elisabeth Nobs	575'114/181'700	Oui
	Moulin Neuf	FR.GLA.2	Glâne	Moulin Neuf	574'683/181'505	Oui
	Moulin de Chavannes-sous-Orsonnens	FR.GLA.3	Glâne	Corpataux Dominique	566'666/175'836	Oui
	Moulin Waeber	FR.GLA.4	Glâne	Max et Daniel Waeber	563'323/173'684	Oui
	La Fille-Dieu	FR.GLA.5	Glâne	Erie-Electroverre SA	560'877/171'998	Oui
	Poffetsmühle Alterswil	FR.GOT.4	Gottéron	Heinrich Wenger	584'638/182'161	Oui
	Barrage de Cheseau	FR.MAR.1	Ruisseau de Marais	Ste-Anne Energie SA	574'328/153'410	Oui
		FR.PGL.1	Petite Glâne	Emile Bersier	557'752/185'657	Oui
	Barrage de la Tâna	FR.TAN.3	Tâna	Ste-Anne Energie SA	574'386/152'445	Oui
	Moulin	FR.TAT.2	Tatrel	Cottet Francis	556'329/152'610	Non
		FR.ZLE.1	Ledeubach	Boschung Franz-Xaver	588'622/189'523	Oui
5 dépotoirs		FR.ALB.2	Albeuve	Commune de Gruyère	571'756/159'164	Non
		FR.PON.1	Ruisseau des Pontets	Commune de Treyvaux	578'632/173'840	Non
	Station mesure OFEV	FR.ROT.1	Rotenbach	WSL / OFEV	587'975/170'600	Non
	Station mesure OFEV	FR.SWB.1	Schwändlibach	WSL / OFEV	588'330/171'040	Non
		FR.TAV.2	Taverna	Unterhaltskommission Obere Taverna	585'845/185'427	Oui
5 sites d'extraction	Muhlersbrücke	FR.GER.7	Gérine	Gemeinde Plasselb	581'616/178'742	Non
	Les Chenevières*	FR.JAV.1	Javroz	Commission d'endiguement du Javroz et de la Mosselta	578'869/164'587	Oui
	Le Reposoir*	FR.JAV.2	Javroz		581'349/166'397	Oui
		FR.SAA.4	Sarine	Consortium d'alimentation en eau potable Ville de Fribourg et communes voisines	576'185/181'045	Oui
	Gravière Rime*	FR.JOG.9	Jogne	Roger Rime SA	580'590/162'147	Oui

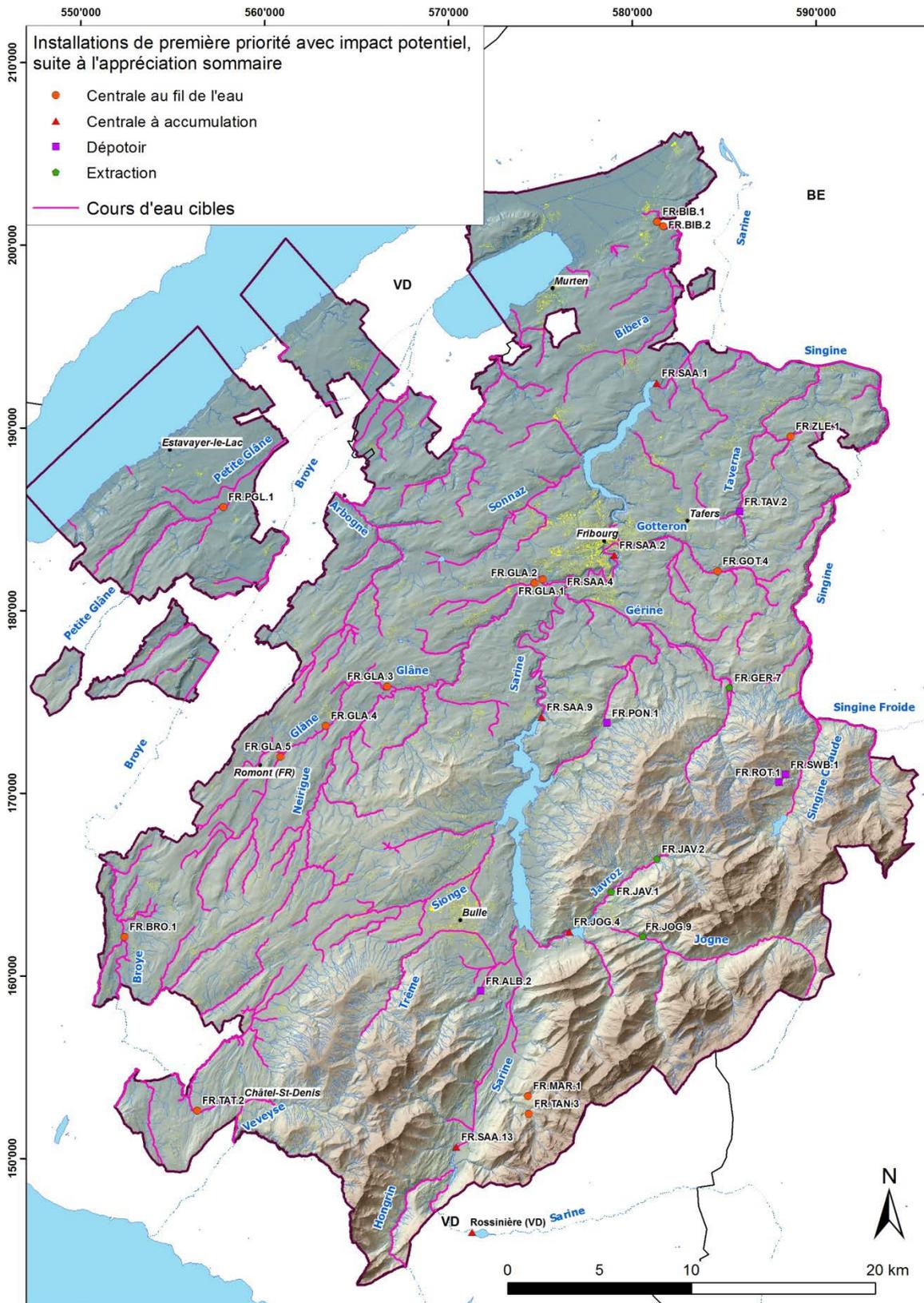


Figure 13 Installations entravant potentiellement le régime de charriage, suite à l'appréciation sommaire.

### 2.5.3 Détails de l'appréciation sommaire, pour les ouvrages ne nécessitant pas une évaluation détaillée

Les 31 installations retenues en § 2.5.2 vont pour la plupart faire l'objet d'une évaluation détaillée par un bureau d'ingénieurs, avec une modélisation du régime de charriage, pour préciser le degré d'atteinte au régime de charriage (colonne de droite du Tableau 10). Le cas échéant, cette évaluation détaillée également démontre que certaines installations ne portent pas atteinte au régime de charriage.

Pour cinq installations cependant, l'appréciation sommaire est suffisante car les données à disposition permettent déjà de statuer à ce stade sur la nécessité d'assainissement ou non. Nous justifions ces éléments ci-dessous.

#### 2.5.3.1 Barrage de Montsalvens (FR.JOG.4)

Une décision d'assainissement du débit résiduel du barrage de Montsalvens a déjà été prise en janvier 2011. Celle-ci prévoit non seulement l'assainissement du débit résiduel, mais également la création d'un ruisseau de contournement au niveau de l'embouchure dans le lac de la Gruyère (mesure éclusées), ainsi qu'une mesure pilote pour l'assainissement du régime de charriage : de 2013 à 2015, 150 m<sup>3</sup> de graviers sont déposés chaque année à la sortie des gorges de la Jogne.

Cette variante est considérée comme minimale dans l'étude pilote sur le bassin versant de la Jogne (Jaeggi, Gren et Idealp, 2013). Cette mesure pilote fera ensuite l'objet d'un monitoring, qui évaluera son efficacité. La quantité et / ou la modalité de l'injection du gravier pourraient ensuite être adaptées si nécessaire.

Cette installation ne fait donc l'objet d'aucun complément d'étude dans l'évaluation détaillée.

#### 2.5.3.2 Tatrel (FR.TAT.2)

Le bassin versant du Tatrel s'ouvre à l'est de Châtel-Saint-Denis et couvre une superficie de 8.1 km<sup>2</sup>. Le bassin versant culmine à 984 m et l'exutoire dans la Broye se trouve à une altitude de 704 m. Au niveau écomorphologique, le Tatrel est sur un peu plus de la moitié de son cours en catégorie « semi-naturel », et un peu moins de la moitié en qualité « très atteinte ou non naturelle ». La majeure partie de ses affluents se trouve sous tuyaux (Figure 14). Concernant le rôle du barrage dans l'aggravation du phénomène de crue, la fiche de scénario propre au périmètre d'étude détaillée « crues » indique qu'à partir de Q100, le niveau d'eau atteint celui du Chemin de l'Étang. L'inondation d'intensité faible suit le Chemin de l'Étang, le Chemin des Erables puis la Route du Village et retourne ensuite au Tatrel. Un danger faible, touchant une construction, résulte donc de la présence de l'ouvrage en raison du lit qui s'est relevé à l'amont de celui-ci.

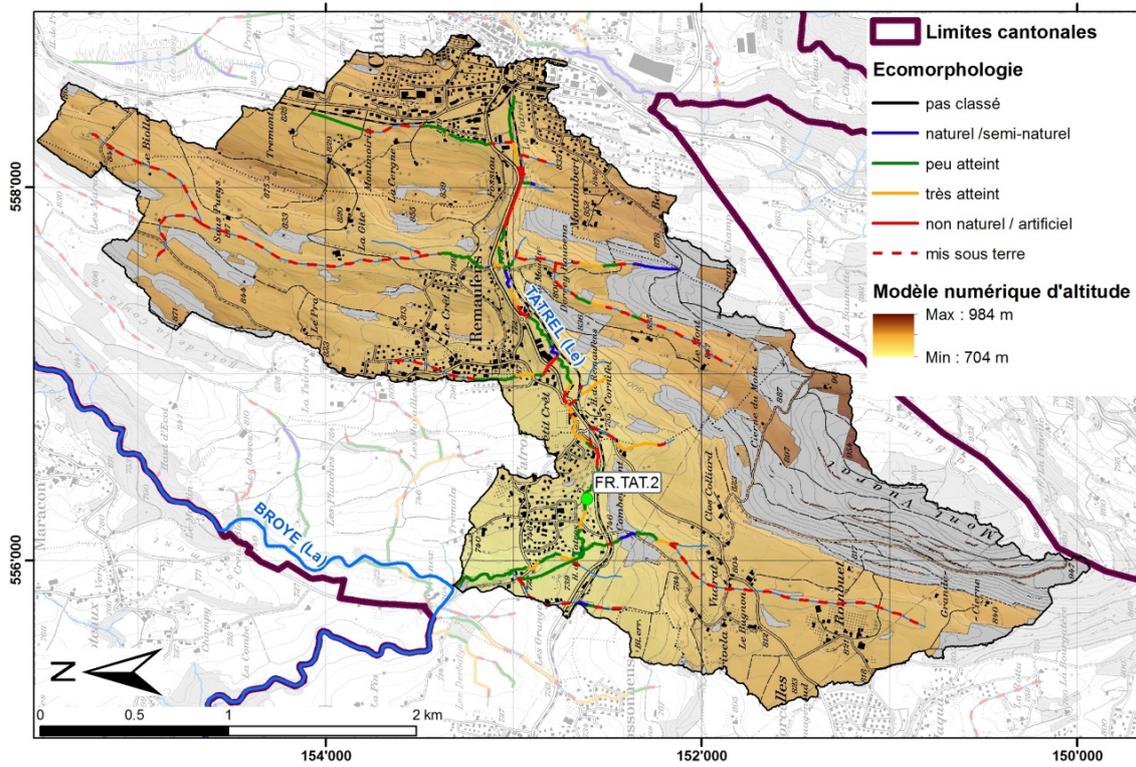


Figure 14 Bassin versant du Tarel et localisation de l'ouvrage concerné

L'ouvrage en question sur le Tarel alimentait une prise d'eau qui n'est actuellement plus en fonction. Il s'agit d'un barrage en pierres de gros appareil d'environ 12 m de large, dont le déversoir d'une largeur de 2 m est barré par deux planches superposées. Il engendre une petite retenue d'environ 12m de large sur 15m de longueur, en grande partie comblée, essentiellement par des sédiments fins (Figure 15).



Figure 15 Barrage sur le Tarel et retenue engendrée

Une analyse morphologique a été réalisée sur une station à l'amont de la retenue, et sur une autre à l'aval de la retenue. La station amont se trouve environ 50m en amont de la queue de la retenue. Plusieurs bancs de graviers y ont été observés, comme l'indique la Figure 16.



Figure 16 bancs de graviers en amont de la zone d'influence de l'ouvrage.



Pour cette analyse morphologique, le tronçon aval est pris en compte dans sa globalité jusqu'à l'installation suivante sur ce cours d'eau (FR.TAT.1), 270 m en aval. Le lit présente généralement un pavage par des cailloux et galets, et est parsemé de petits blocs. (Figure 17). On retrouve des graviers (Figure 18) en aval, mais en proportion relativement faible par rapport aux autres classes granulométriques. On n'observe par contre plus de bancs de graviers comme en amont.

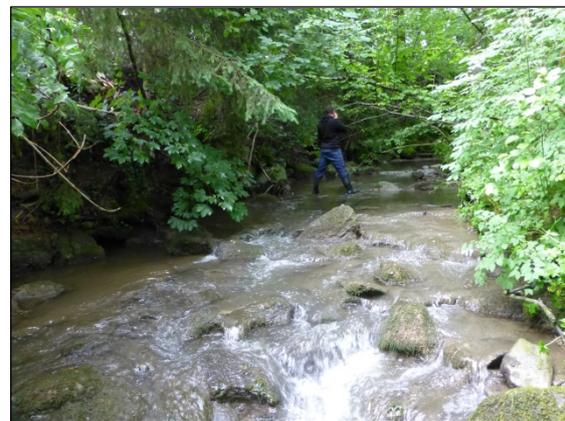


Figure 17 granulométrie du fond du lit et morphologie du cours d'eau en aval de l'installation.



Figure 18 Graviers en aval de l'installations, en faible proportion dans le lit

Pour cet ouvrage, aucune étude détaillée n'est réalisée, en raison de la disproportion entre l'investissement à réaliser pour une modélisation du régime de charriage du Tatrel et le coût effectif d'un assainissement. Une mesure devra également être réalisée pour permettre le franchissement piscicole de cet ouvrage et une variante combinée pourra être développée.

La nécessité d'assainissement et les mesures d'assainissement envisageables sont reportés directement dans les tableaux de synthèse, à la fin de ce rapport (Tableau 51 p. 251 et Tableau 52 p. 255).

### 2.5.3.3 Stations de mesure OFEV Rotenbach et Schwändlibach (FR.ROT.1, FR.SWB.1)

Le Rotenbach et le Schwändlibach sont deux affluents situés en rive gauche de la Singine Chaude (carte générale de la Figure 12). Ils ont une pente importante, une faible importance écologique et ne sont donc pas cours d'eau cibles ; ils sont considérés dans cette étude comme pourvoyeurs de sédiments pour la Singine.

Nous ne décrivons pas ici ces deux petits bassins versants, mais renvoyons à la documentation détaillée de Gertsch (2003a et 2003b). L'OFEV a fourni de nombreuses données sur ces bassins versants. Elles indiquent que ces deux stations de mesure, constituées d'un dépotoir suivi de deux bassins en eau, interrompent totalement le transit sédimentaire. Les observations de terrain réalisées lors de l'appréciation sommaire confirment ces données. Selon les extractions dans ces dépotoirs, le charriage moyen est de 121 m<sup>3</sup>/an pour le Rotenbach et de 41 m<sup>3</sup>/an sur le Schwändlibach<sup>11</sup>.

L'étude bernoise réalisée par Flussbau (2013), dans le cadre du rapport intermédiaire de l'assainissement du régime de charriage, estime que la Singine ne souffre que d'un faible déficit (0-20 %) en matériaux charriés et qu'elle est proche de l'état naturel dans sa partie amont. Les autres affluents compensent donc suffisamment les apports manquants du Schwandlibach et du Rotenbach. Ces deux installations ne sont donc pas à assainir et ne nécessitent pas d'étude détaillée.

### 2.5.3.4 Extraction sur la Gérine à Plasselb (FR.GER.7)

La Gérine est un affluent important de la Sarine, qui draine un bassin versant de 85 km<sup>2</sup> (Figure 19). Les relevés écomorphologiques indiquent qu'il s'agit d'un cours d'eau relativement naturel,

<sup>11</sup> Mesures effectuées sur une période de 23 ans, entre 1988 et 2011.

Elle prend sa source dans le Plasselbschlund où de nombreux affluents torrentiels lui fournissent une charge sédimentaire importante, puis se jette dans la Sarine 20 km plus loin. La Gérine a une dynamique très active et s'écoule en tresses sur une partie de son linéaire.

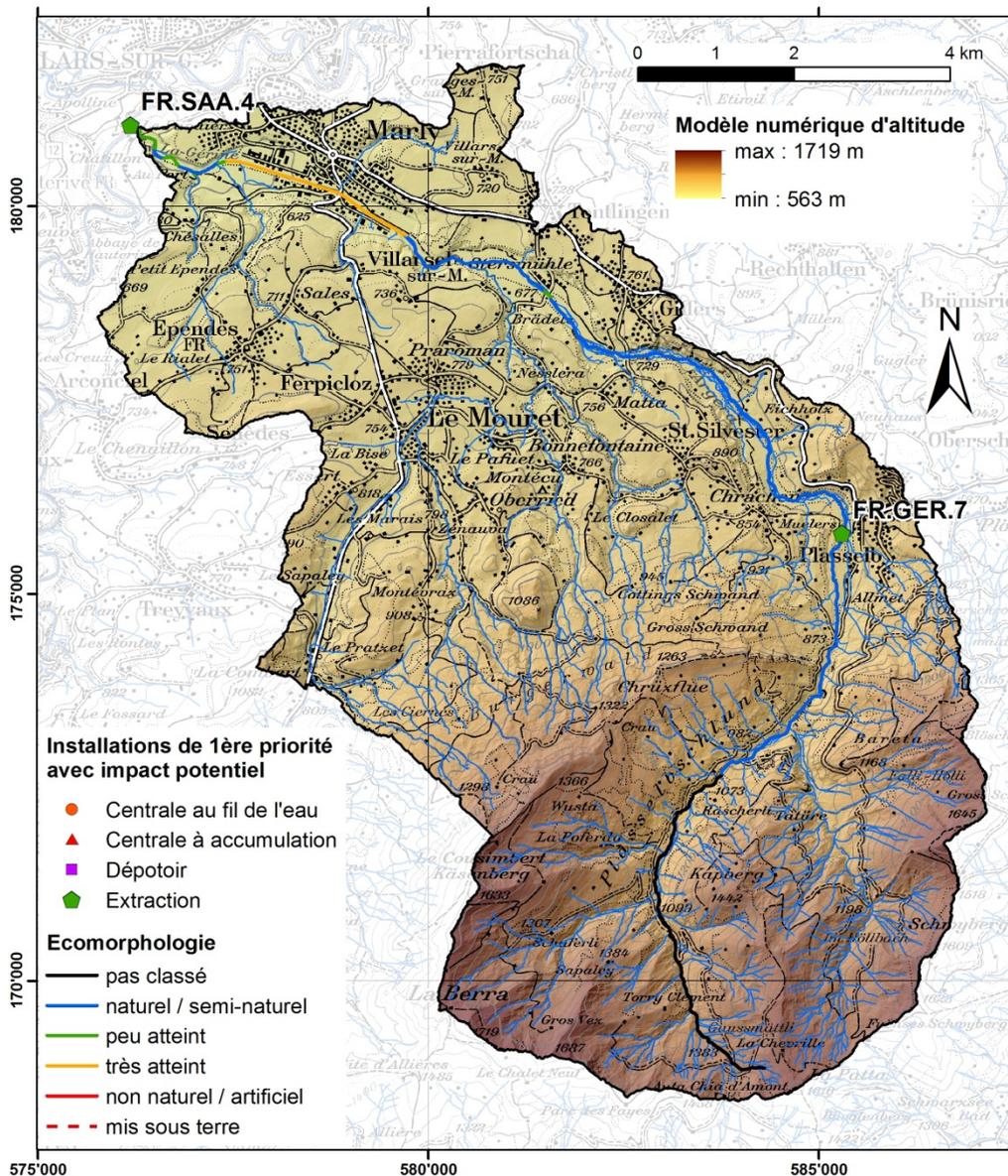


Figure 19 Bassin versant de la Gérine

Trois études existantes traitent du charriage sur la Gérine ; nous en résumons ci-après les principales conclusions :

- Expertise sur le charriage de la Gérine (Jaeggi, 1999) ;
- Charriage de la Sarine entre la Gérine et le lac de Pérolles (2001) ;
- Etude sur la zone alluviale et le charriage à Stersmühle (Guhl, 2013).

La Gérine est en grande partie dans un état relativement naturel, sauf pour le tronçon corrigé à Marly. L'apport en sédiments est important dans la partie supérieure du bassin versant dans le Plasselbschlund. Les courbes modélisées par Jaeggi (1999) du transport solide de la Gérine

montrent une tendance générale au dépôt, même si la Gérine parvient à faire transiter une bonne partie de ses matériaux jusque dans la Sarine. De façon plus détaillée, on observe une première zone de dépôt à Plasselb (entre les km 11 et 12), où la moitié environ des apports sédimentaires du Plasselbschlund se dépose. On relève ensuite une deuxième zone de dépôt à la Stersmühle

Historiquement, une exploitation commerciale de graviers a eu lieu à la Stersmühle à Tentglingen, de 1962 à 1973. 25'000 m<sup>3</sup> / an ont été extraits à des fins commerciales, ce qui a engendré une baisse du fond du lit et une érosion des berges au niveau du pont de la Stersmühle. La loi cantonale du 26 novembre 1975 sur l'aménagement des cours d'eau a ensuite conduit à l'arrêt des extractions régulières de matériaux dans le lit de la Gérine. Des extractions sécuritaires ont encore été pratiquées à Stersmühle, jusqu'en 2010, mais ne sont désormais plus reconduites (8000 m<sup>3</sup> extraits en amont du pont et 2500 m<sup>3</sup> en aval en 2009-2010). A cet endroit, des dépôts relativement concentrés vont se produire à l'aval du pont, jusqu'à atteindre un profil d'équilibre, en environ 20 ans (Guhl, 2013).

Des extractions ont également eu lieu sur la Gérine pour garantir la sécurité contre les crues, car une tendance au dépôt conduit à l'exhaussement du lit dans trois secteurs : Plasselb, Stersmühle et la traversée de Marly (et le secteur en amont).

La Gérine est depuis 1992 presque entièrement incluse dans l'inventaire fédéral des zones alluviales d'importance nationale. Il s'agit de l'objet n°61 s'étend entre Plasselb et Marly et de l'objet 60, qui s'étend sur le tronçon en aval de Marly, jusqu'à la confluence avec la Sarine. « *La zone alluviale de la Gérine présente une très grande valeur naturelle. Son cours est très proche de l'état naturel sur plus de 10 km entre Plasselb et l'entrée de Marly. Il n'est pratiquement pas corrigé et présente une dynamique fluviale très active. La Gérine s'écoule sur une grande largeur avec un régime en tresses en raison de la pente du cours d'eau et des crues morphogènes fréquentes* » (Guhl, 2013).

Jaeggi (2001) estime l'apport de la Gérine dans la Sarine à 3'500 m<sup>3</sup>/a. Les crues de la Sarine dépassant 120 à 170 m<sup>3</sup>/s sont capables d'éroder le dépôt formé par la Gérine à sa confluence. Jaeggi présente un profil en long de charriage de la Sarine en aval de la Gérine jusqu'à la retenue du lac de Pérolles. Pour une année hydrologique moyenne, la Sarine serait en mesure de transporter la totalité des apports de la Gérine jusqu'au lac de Pérolles, où toute la charge solide se déposerait.

Jaeggi (1999) relève également qu'un conflit d'intérêt peut exister sur ce cours d'eau entre la protection contre les crues et le maintien d'un charriage et d'une dynamique naturelle, essentiellement dans trois secteurs : Plasselb, Stersmühle et la traversée de Marly. L'objet **FR.GER.7** (cf Figure 19) est un site d'extraction de sédiments sur la Gérine, au niveau d'une zone de dépôt à la sortie du Plasselbschlund, au lieu-dit *Muhlers*. L'extraction est réalisée pour garantir la sécurité contre les crues à Plasselb. Un système de marquage a été mis en place sous le pont coté à 816m. Lorsque le fond du lit atteint la 2<sup>ème</sup> marque (sur 3), une procédure simplifiée d'autorisation pour l'extraction peut être déclenchée (2100 m<sup>3</sup> en 1995, 6500 m<sup>3</sup> entre 1999 et 2003, 4600 m<sup>3</sup> de 2007 à 2009).

Les études de charriage existantes et l'expérience de la gestion des crues de ce cours d'eau permettent donc de conclure, sans nouvelle étude détaillée, que cette extraction est nécessaire dans une optique de protection contre les crues. Elle ne cause pas une atteinte grave au régime de charriage et ne fait donc pas partie des installations à assainir.

Nous relevons finalement ici que la Gérine est également traitée comme pourvoyeuse de sédiments dans l'étude détaillée du charriage de la Sarine, dans la deuxième partie de ce rapport (§ 10.3.2.1, p. 135).

#### 2.5.3.5 Dépotoir sur le ruisseau des Pontets (FR.PON.1)

Il s'agit d'un dépotoir aménagé sur le ruisseau des Pontets avant une rupture de pente marquée, juste en amont d'une scierie. La pente moyenne du ruisseau, ainsi que de ses affluents qui s'écoulent plus ou moins parallèlement dans le versant, est de 18 % en moyenne en amont du dépotoir. Elle diminue ensuite rapidement, sur une centaine de mètre puis le ruisseau des Pontets s'écoule dans une plaine très peu inclinée sur env. 3.3 km, jusqu'au Mouret (1.3% de pente en moyenne). Ce dépotoir est important pour garantir la sécurité de la scierie attenante, en évitant un relèvement du lit par des dépôts importants au niveau de la rupture de pente. 300 à 400 m<sup>3</sup> en sont extraits périodiquement.

Un projet de protection contre les crues est actuellement à l'étude sur ce cours d'eau. Il intégrera également un volet « revitalisation » en raison du caractère endigué du ruisseau des Pontets dans la plaine en aval. Le Service des forêts et de la faune est également impliqué dans ce projet de protection contre les crues. Il est envisagé de construire plusieurs dépotoirs qui complètent l'ouvrage existant. La problématique du charriage sera prise en compte dans ce projet.

En raison du projet en cours dans ce secteur, nous ne considérons pas cet objet à assainir dans cette étude.

#### 2.5.3.6 Dépotoir sur l'Albeuve (FR.ALB.2)

L'Albeuve est un affluent de la Trême, qui se jette elle-même dans la Sarine peu après leur confluence. L'Albeuve est considérée, dans sa partie inférieure, comme cours d'eau cible. Son cours supérieur, plus pentu et moins intéressant écologiquement, ne fait pas partie du linéaire de cours d'eau cibles. Le bassin versant, qui culmine au Moléson (2002 m), est caractérisé par un charriage important, tout comme la Trême.

Un dépotoir (FR.ALB.1) à proximité de son embouchure porte atteinte au régime de charriage. Cet ouvrage sera prochainement réaménagé et un chenal d'écoulement préférentiel facilitera le transit de la charge sédimentaire vers la Trême. Dans le cadre d'un projet de revitalisation, le lit de l'Albeuve pourrait être modifié en aval et emprunter l'ancien lit de la Trême.

1,5 km en amont, au niveau du village de Pringy, un autre dépotoir (FR.ALB.2) de dimensions relativement importantes (env. 80m de longueur et 12 m de largeur) retient une partie de la charge sédimentaire de l'Albeuve. Cet ouvrage est d'une grande utilité pour la protection contre les crues et permet notamment d'éviter le relèvement du lit en aval. Ce tronçon est actuellement en situation d'équilibre morphologique. Pour attester de la problématique de la protection contre les crues et de la gestion des sédiments dans ce bassin versant, nous signalons qu'une zone d'épandage pour stocker les volumes transitant lors d'événement importants va être aménagée prochainement environ 1 km en amont.

Il n'est pas envisageable de restituer dans l'Albeuve en aval les graviers extraits dans ce dépotoir, car il s'agit actuellement d'éviter l'engravement de ce tronçon pour des raisons de protection contre les crues. Une restitution pourrait par contre être envisagée dans la Trême en aval. Nous relevons toutefois que l'état morphologique de la Trême est jugé bon et qu'elle ne souffre d'aucune atteinte. Il ne semblerait par contre pas opportun de restituer ces graviers directement à

la Sarine car l'atteinte dans le tronçon précédent l'embouchure dans le lac de la Gruyère ne souffre pas d'une atteinte grave. Cette extraction nécessaire peut être considérée comme source de gravier pour une restitution (après transport routier) dans les tronçons situés à l'aval du barrage de Lessoc (FR. SAA.13).

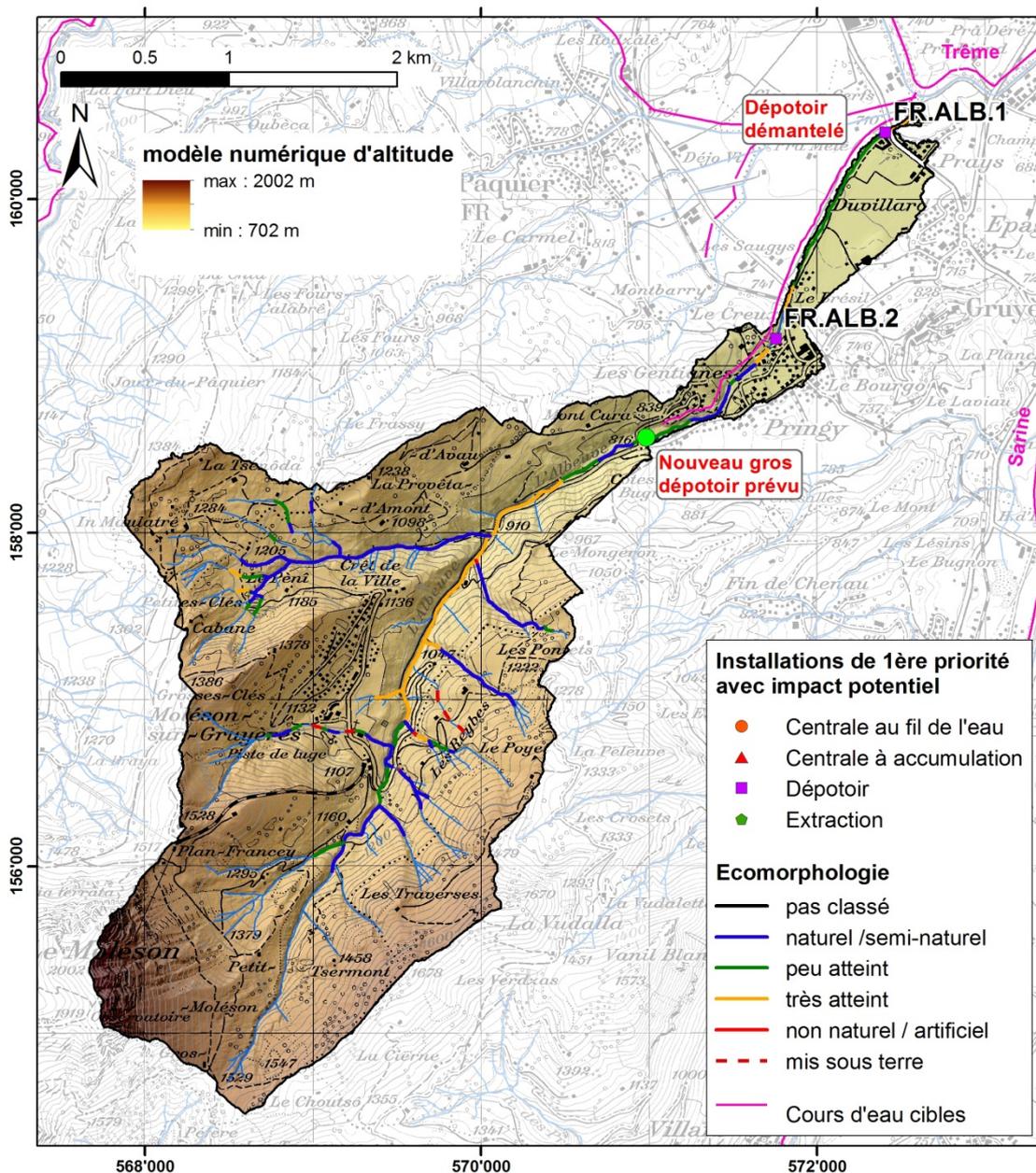


Figure 20 Bassin versant de l'Albeuve

## 2.6 Aménagements de deuxième priorité sur les cours d'eau.

Le terme « aménagements de cours d'eau » se rapporte à tous les travaux de correction effectués sur des cours d'eau, notamment dans une optique de protection contre les crues, ou autrefois dans le but de gagner des terres pour l'extension des cultures. Les aménagements de cours

d'eau ont en général fait disparaître les structures naturelles et ont bloqué leur développement et leur dynamique, altérant ainsi le régime de charriage. Cela peut se traduire, d'une part, par une diminution de l'apport en matériaux solides depuis les rives du cours d'eau, qui ne sont plus soumises à l'érosion en raison des aménagements. Les aménagements de cours d'eau augmentent d'autre part la capacité de transport du cours d'eau en raison de la chenalisation et de la rectification du tracé, favorisant le transit des sédiments et empêchant leur dépôt.

### 2.6.1 Démarche

Pour déterminer le linéaire de cours d'eau concerné par des aménagements au sens de cette planification, nous nous sommes basés sur une analyse SIG de données existantes sur le réseau hydrographique. Nous avons exploité les relevés écomorphologiques des cours d'eau, qui ont été complétés en 2014 dans le canton de Fribourg. Trois paramètres de l'analyse écomorphologique ont été pris en compte, selon la méthodologie de Hütte et Niederhauser (1998) :

- Aménagements du pied du fond du lit : les aménagements du fond du lit servent à le stabiliser ; ils empêchent ainsi l'arrachage et le déplacement des sédiments sur le fond du lit, ce qui entraîne rapidement le colmatage par des sédiments fins. Les tronçons avec aménagement supérieur ou égal à la classe écomorphologique 3 (10 à 30%) ont été retenus. Cela signifie que les tronçons avec plus de 10% d'aménagement du fond du lit ont été retenus, ce qui représente 126 kilomètres (Figure 21) ;
- Renforcements du pied de berge : les renforcements de pied de berge sont présents sur de nombreux cours d'eau. Ils empêchent l'érosion latérale et fixent ainsi le tracé du cours d'eau. L'évaluation est menée séparément pour la berge gauche et pour la berge droite. Comme ci-dessus, les tronçons avec un renforcement supérieur à la classe 3 sont pris en considération. Pour la berge gauche, cela représente 365 kilomètres et 366 kilomètres pour la berge droite (Figure 21).

Au total, 440 km de cours d'eau sont concernés par de tels aménagements, certains tronçons y figurent en raison des trois paramètres. La Figure 21 montre cependant qu'une partie de linéaire de la Sarine sur territoire bernois ou de l'Arbogne sur territoire vaudois est prise en compte par ce kilométrage, de façon erronée, et que ce kilométrage est quelque peu surestimé. Ce biais est corrigé lors de l'étape suivante de croisement avec les cours d'eau cibles qui réduit à 236 km le précédent total. Cette carte est disponible au format A3 en [Annexe 10](#).

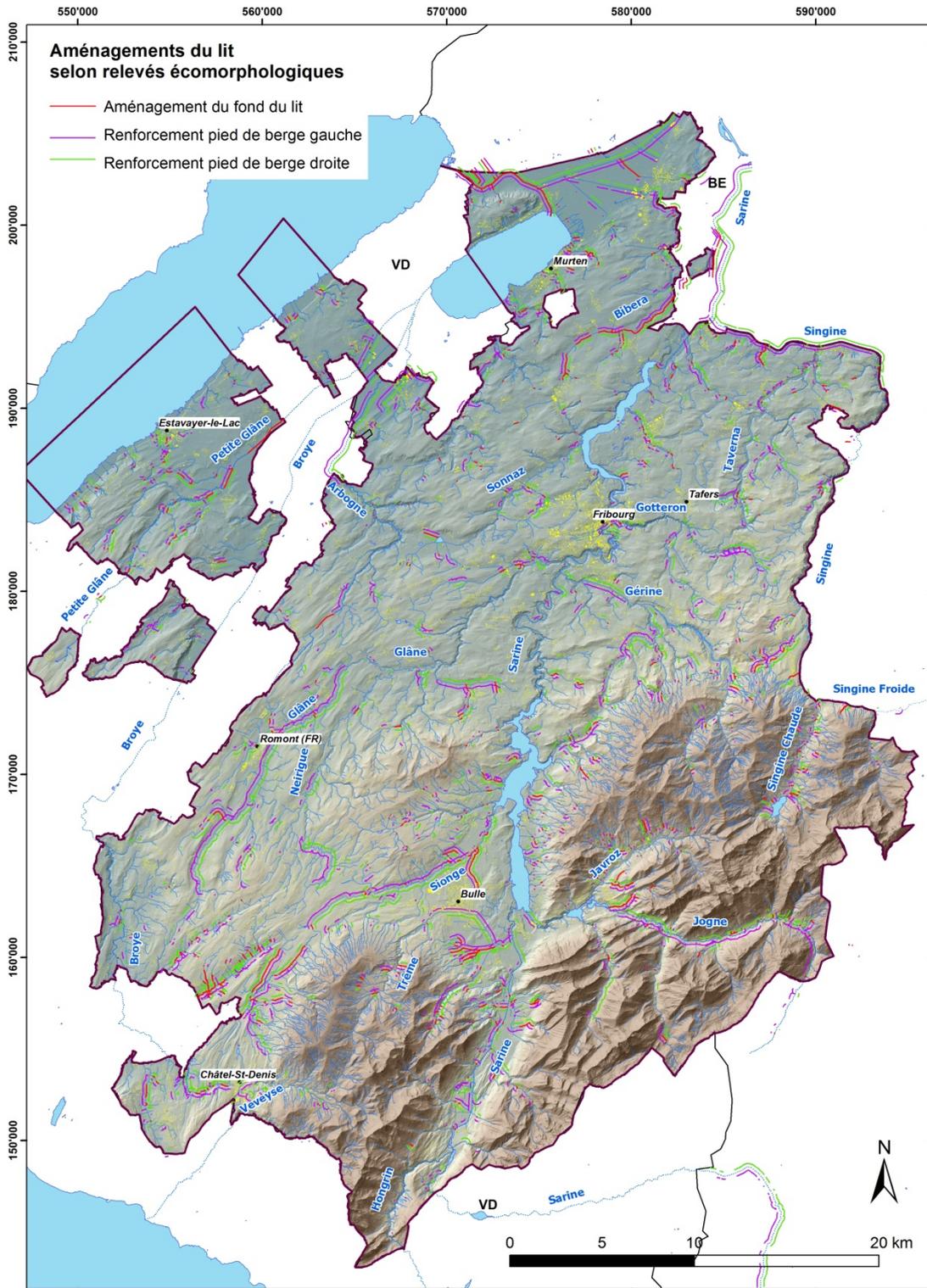


Figure 21 Aménagements du fond du lit et renforcements de pied de berge.

Ce linéaire de 440 km a ensuite été croisé avec les 777 km de cours d'eau cibles déterminés en § 2.3 (illustrés sur la Figure 12). Le croisement donne la part des cours d'eau cibles concernés



par des aménagements de nature à influencer le régime de charriage des cours d'eau : 236 km (Figure 22).

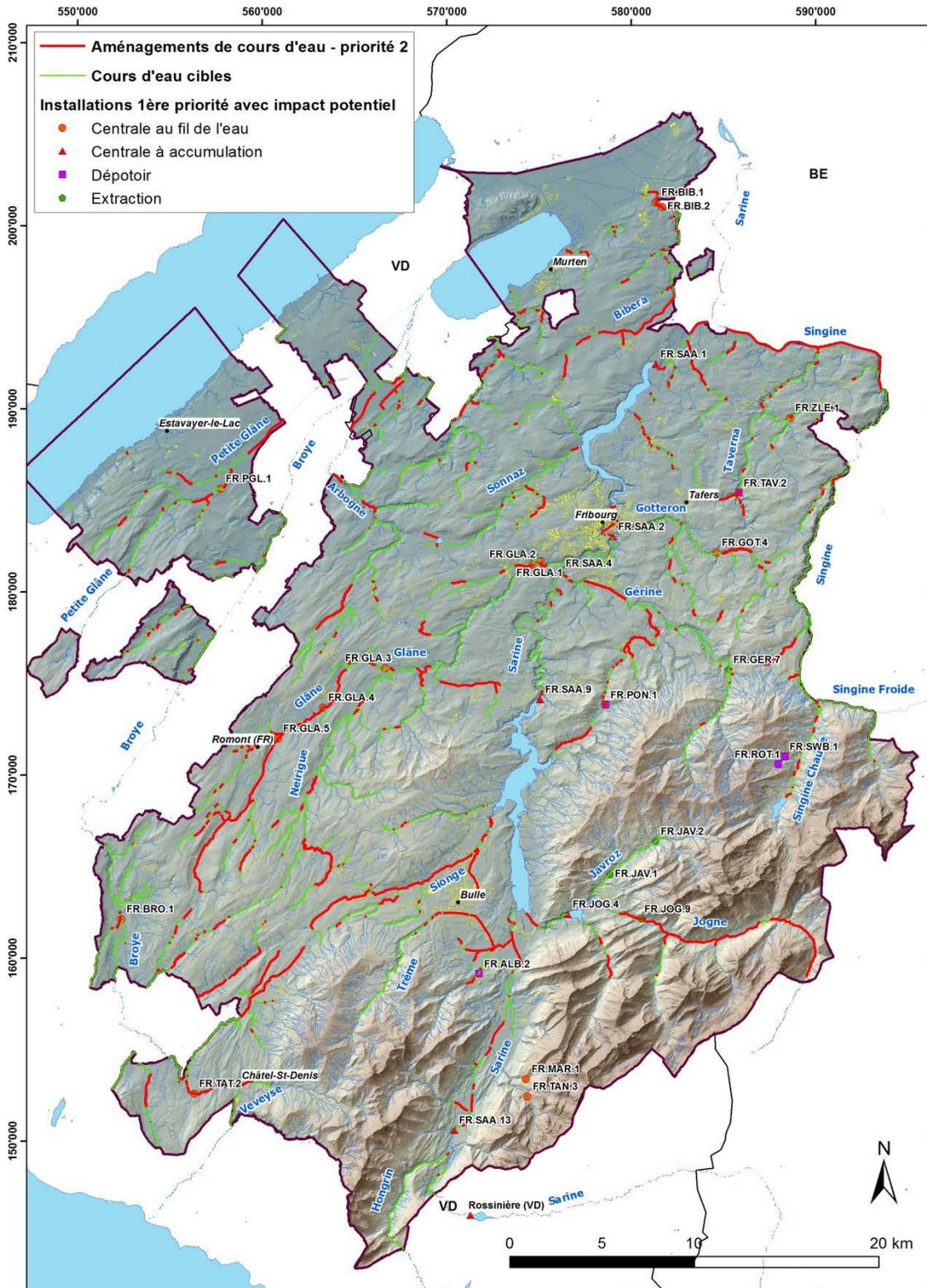


Figure 22 Aménagements de cours d'eau de deuxième priorité.

## 2.6.2 Assainissement des aménagements de cours d'eau de 2<sup>ème</sup> priorité

Les installations de 2<sup>ème</sup> priorité (aménagement de cours d'eau) ne recevront pas de financement Swissgrid. Comme mentionné dans l'aide à l'exécution (p. 27), l'évaluation écologique et la planification de mesures de rétablissement des structures morphologiques et des fonctions naturels de ces tronçons ont lieu dans la planification des revitalisations ou dans le cadre de projet de protection contre les crues.

Concrètement, dans le canton de Fribourg, les adaptations de la morphologie de cours d'eau pour favoriser le régime de charriage et la diversification des structures du lit seront réalisées par le biais de projets de revitalisations, voire de projets combinés de revitalisation et de protection contre les crues. Une coordination a donc été assurée entre les deux planifications, pour que ces tronçons qui engendrent un déficit de charriage soient pris en compte dans la planification des revitalisations (voir chapitre 3.4.1 du rapport final sur la planification stratégique des revitalisations et son annexe 1.2.7.6). Cela a été réalisé par le biais d'une pondération favorable de ces tronçons au niveau des synergies, comme l'indique la Figure 23, tirée de la planification des revitalisations.

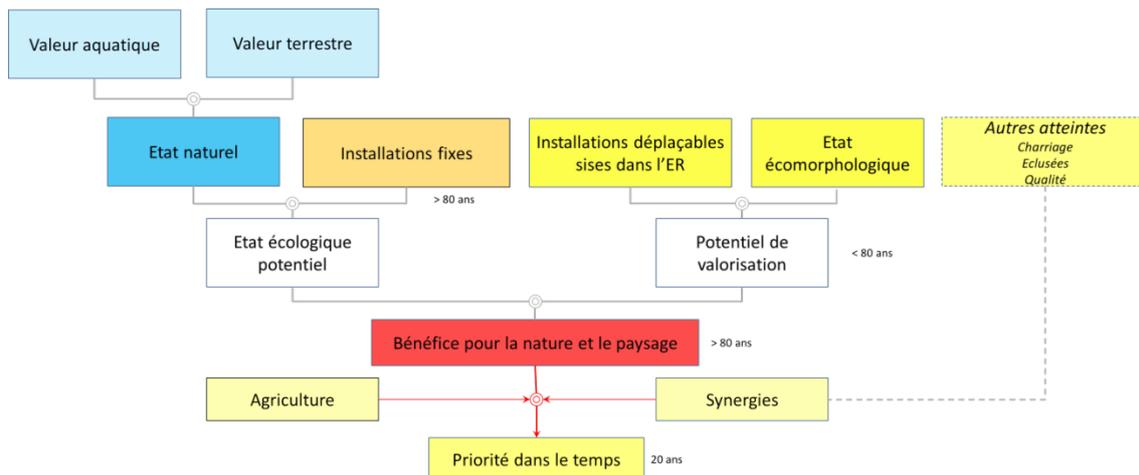


Figure 23 Prise en compte des aménagements de cours d'eau et tronçons impactés par une installation de deuxième priorité, dans la planification des revitalisations du canton de Fribourg.

## 2.6.3 Résultat

L'intégration des aménagements de deuxième priorité dans la planification des revitalisations a été faite au niveau des synergies. En croisant finalement les tronçons à revitaliser en priorité dans les 80 prochaines années et dans les 20 prochaines années, on obtient un linéaire de 101 km, respectivement de 34 kilomètres de cours d'eau (Figure 24). Pour les revitalisations de ces tronçons, la problématique du régime de charriage sera évidemment prise en compte au moment de l'établissement du concept de revitalisation, en temps voulu.

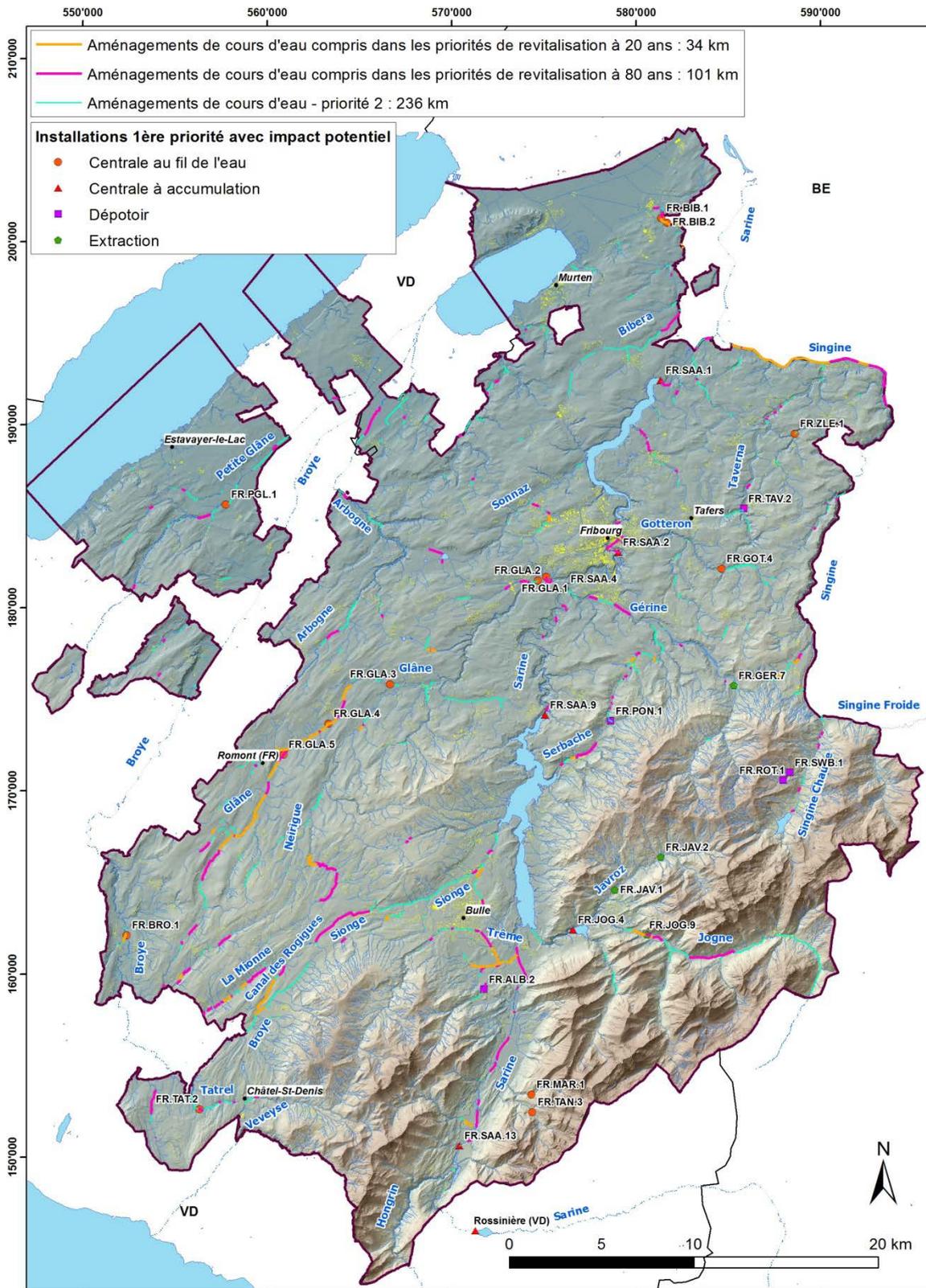


Figure 24 Aménagements de 2<sup>ème</sup> priorité situés dans des tronçons prioritaires pour la revitalisation

#### 2.6.4 Limites méthodologiques

La démarche appliquée ne garantit pas un assainissement de ces tronçons du point de vue du régime de charriage et présente certaines limites méthodologiques :

- L'aide à l'exécution précise (p.27) qu'il faut examiner si les aménagements de cours d'eau portent atteinte au régime de charriage, mais que si ce dernier ne s'en trouve pas altéré de façon substantielle, le tronçon de cours d'eau touché ne doit pas être considéré comme gravement atteint ou comme nécessitant un assainissement. La démarche d'analyse SIG déployée ne permet pas de déterminer s'il y a réellement atteinte au régime de charriage, mais seulement de soupçonner une atteinte en fonction de paramètres écomorphologiques. Il n'est raisonnablement pas possible de détailler plus cette problématique dans le cadre d'une tâche de planification à l'échelle cantonale, dans un délai relativement court.
- La coordination est certes assurée avec la planification des revitalisations. Il faut cependant rester conscient que le linéaire de cours d'eau en priorité 1 d'assainissement (priorisation à 20 ans) est limité dans la planification des revitalisations à env. 60 km (~3 km par an) et que le charriage n'est qu'un critère intervenant au niveau des synergies. Cela permet éventuellement de repêcher certains tronçons importants qui auraient échappés. Les tronçons à revitaliser en priorité sont eux définis en fonction d'une méthodologie propre (renvoi à la planification). Ainsi, les cours d'eau qui ne présentent pas un état écologique potentiel élevé, un potentiel de valorisation élevé et un rapport coût / bénéfice intéressant en cas de revitalisation n'entrent *de facto* pas en ligne de compte pour une revitalisation. La Figure 24 de la page précédente met en évidence le linéaire qui pourra être pris en compte dans le cadre d'une revitalisation.

#### 2.7 Linéaire retenu pour « l'évaluation détaillée »

Les 25 installations de première priorité retenues ont finalement été croisées avec le linéaire de cours d'eau cibles ; il n'est en effet pertinent de réaliser des études approfondies, dans la phase suivante, que sur le linéaire de cours d'eau cibles impactés par des ouvrages. Un **linéaire de cours d'eau cibles de 160 km** (Figure 25) résulte du précédent total de 772 km (Tableau 4), comprenant des tronçons de :

- la Sarine (45.12 km + partie VD) ;
- l'Hongrin (8.22 km + partie VD) ;
- la Glâne (36.07 km) ;
- la Petite Glâne (11.87 km) ;
- la Broye (8.88 km) ;
- le Gottéron (7.56 km) ;
- le Ledebach et le Lettiswillbach (3.95 km + partie BE) ;
- la Bibera (18.33 km) ;
- la Taverna (11.77 km) ;
- le Javroz (6.24 km) ;
- La Jogne (2 km).

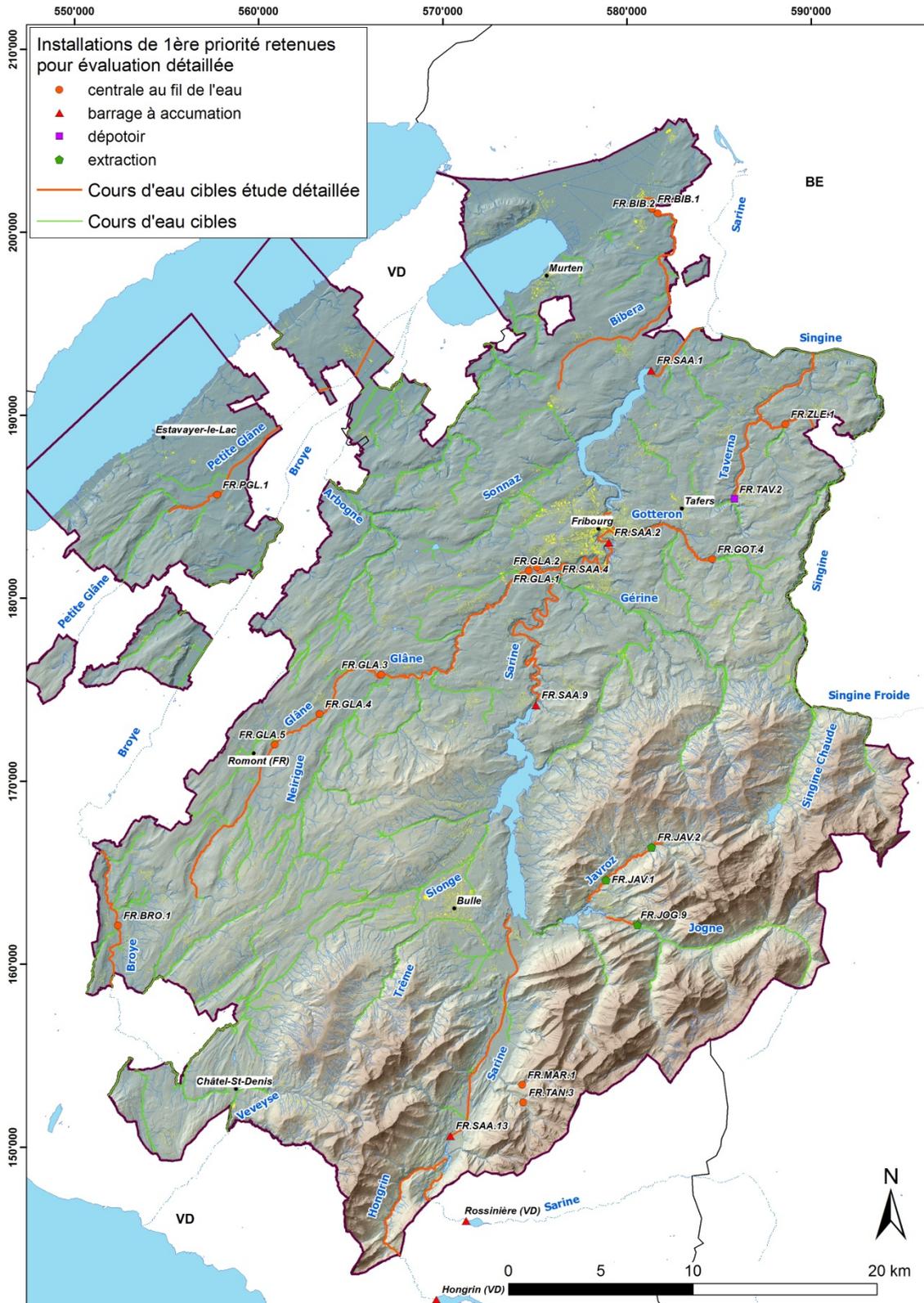


Figure 25 installations et linéaire retenus pour l'évaluation détaillée

## 2.8 Bilan de l'appréciation sommaire

L'appréciation sommaire est la première phase de la planification de l'assainissement du régime de charriage. Les données de base pertinentes ont tout d'abord été compilées. Les ouvrages liés à la force hydraulique, les dépotoirs et les extractions ont été répertoriés sur l'ensemble du territoire cantonal, d'après toutes les sources disponibles. Par une série d'étapes clairement définies, compréhensibles et reproductibles, la première liste de 183 installations recensées a pu être réduite à 31 objets. Une démarche systématique, conforme aux directives de l'aide à l'exécution, a également permis d'identifier 777 km de cours d'eau cibles concernés par cette planification, parmi les 3'860 constituant le réseau hydrographique fribourgeois. Les aménagements de deuxième priorité (aménagement du fond du lit, renforcement du pied de berge gauche et droite) sur les cours d'eau cibles ont également été mis en évidence en exploitant les relevés écomorphologiques.

Dans la deuxième partie de l'étude, l'évaluation détaillée précisera l'impact de ces installations sur les cours d'eau cibles et statuera sur leur nécessité d'assainissement. Des variantes de mesures d'assainissement seront proposées, avec une estimation des coûts, leur proportionnalité et des délais de mise en œuvre; ces différents éléments permettront une comparaison de variantes. Le potentiel écologique du cours d'eau, l'impact de l'assainissement sur la protection contre les crues et sur les relations nappes – cours d'eau seront également prises en compte.

Les aménagements de deuxième priorité ne seront pas traités plus en détails dans la deuxième partie de l'étude; pour certains cours d'eau toutefois, la modélisation du régime de charriage pourrait mettre en évidence un déficit d'apport en charge solide par les berges et le fond du lit, ou alors une capacité de transport trop élevée en raison de la rectification du lit et d'une largeur insuffisante.

La Figure 26 synthétise la démarche et les résultats de l'appréciation sommaire.

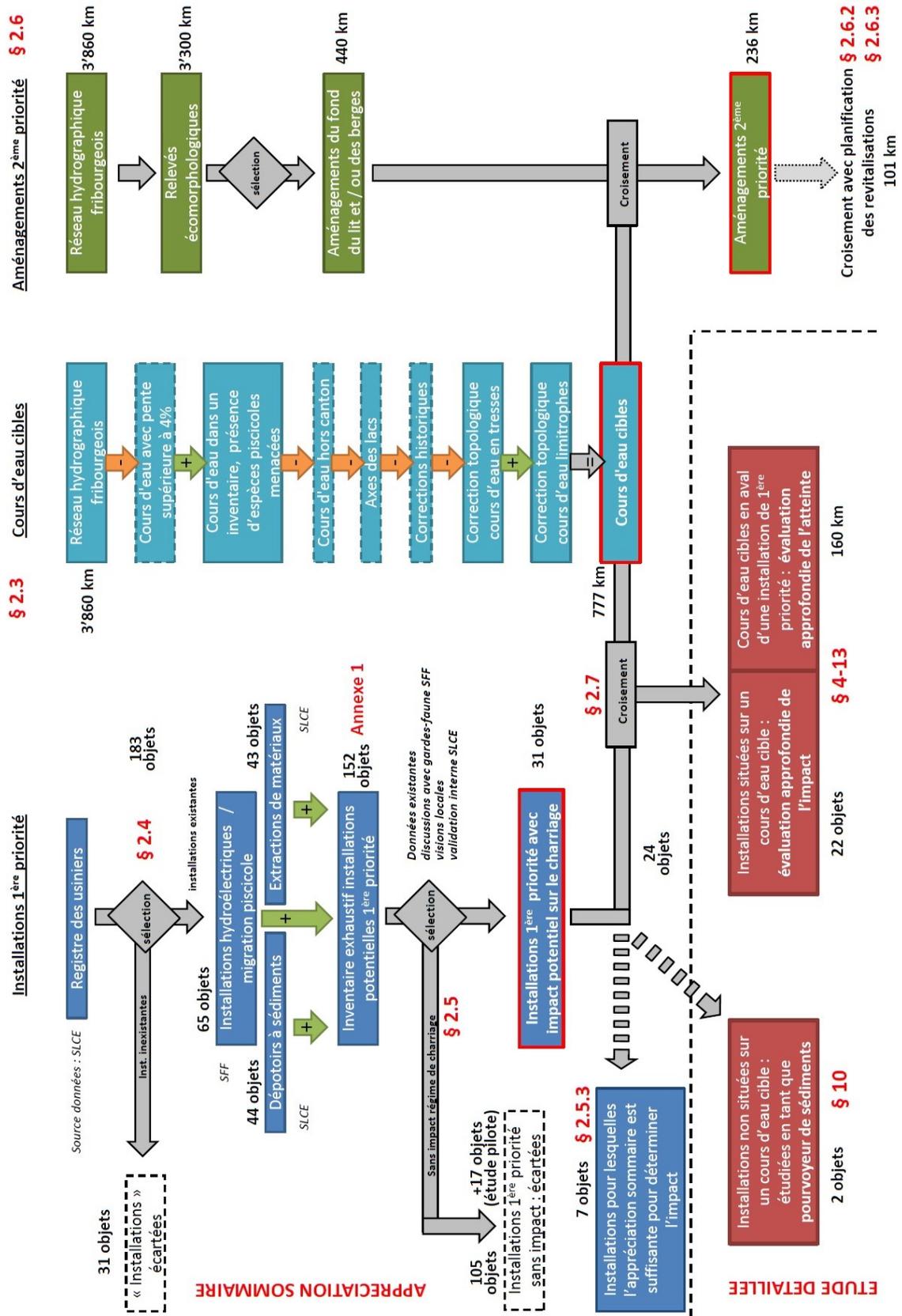


Figure 26 : Vue d'ensemble de la démarche

# DEUXIEME PARTIE

## 3. Evaluation détaillée

### 3.1 Démarche générale

A partir des installations et des cours d'eau cibles mentionnés dans Tableau 10 et au § 2.7, deux lots ont été constitués (Tableau 11). Le premier lot a été traité par le bureau BG Ingénieurs Conseils à Lausanne et le second lot par le bureau Aquavision Engineering à Ecublens.

Tableau 11: Deux lots constitués pour l'évaluation détaillée

	Cours d'eau	Nbre d'installations	
Lot 1	La Broye	1	
	Le Gottéron	1	
	L'Hongrin	1	
	Le Javroz	2	
	La Petite Glâne	1	
	La Haute Sarine	Sarine	2
		Tâna	2
	La Basse Sarine	Sarine	4
La Gérine		1	
Lot 2	La Glâne	5	
	La Taverna	1	
	La Bibera	2	
	Le Ledebach	1	
	<b>Total</b>	<b>24</b>	

Ces différentes installations et cours d'eau cibles sont étudiés en détail dans les chapitres suivants (4 à 14).

### 3.2 Méthodologie

#### 3.2.1 Démarche générale

Pour les installations de première priorité et les tronçons de cours d'eau cible restant à évaluer en détails, conformément à l'aide à l'exécution de l'OFEV, les étapes suivantes doivent être réalisées dans l'évaluation détaillée, selon l'aide à l'exécution :

- estimer la charge solide existante (étapes 5 ; § 3.2.2) et le débit du charriage nécessaire (étape 6 ; § 3.2.3) ;
- tracer les profils en long du débit solide charrié (états naturel et actuel), évaluer le degré d'atteinte du régime de charriage pour les cours d'eaux cible (étapes 7-9 ; § 3.2.4 et § 3.2.5) ;
- identifier les installations nécessitant des mesures d'assainissement (étape 10) ;
- évaluer le potentiel écologique (§ 3.3) et le degré de gravité des atteintes (étape 11) ;
- évaluer la faisabilité des mesures d'assainissement (étape 12 ; § 3.2.6).

### 3.2.2 Etape 5 : Estimation de la charge solide actuelle du cours d'eau

Dans un premier temps, le cours d'eau a été délimité en tronçons homogènes (tronçons ayant les mêmes caractéristiques) en se basant sur les critères/caractéristiques suivants :

- Découpage morphologique ;
- Découpage selon les apports hydrologiques (affluents) ;
- Découpage selon la pente du cours d'eau ;
- Découpage selon les installations prioritaires.

Ensuite, la charge solide actuelle a été estimée pour chaque tronçon homogène en confrontant les données suivantes :

- Calcul de la capacité de transport minimale et maximale du cours d'eau (méthodologie présentée dans la Praxishilfe, Hunziker et Lehmann (2013)) : ces valeurs plutôt théoriques permettent de fixer les bornes min. et max. du volume de matériaux transporté réellement. Autrement dit, le transport solide réel doit se trouver à l'intérieur de ces bornes.
- Les observations de terrain (bancs de graviers, obstacles naturel et/ou artificiel, apports en matériaux, etc.) : permettent de définir et de caler la courbe de charriage réelle par rapport à la capacité théorique minimale ou maximale du cours d'eau.

Remarque importante : le calcul théorique de la capacité du cours d'eau part de l'hypothèse qu'il y a des matériaux à disposition, cependant, dans de nombreux cas cette hypothèse n'est pas valable.

### 3.2.3 Etape 6 : Estimation de la charge solide naturelle et nécessaire

Dans cette étape, nous considérons que la charge solide nécessaire correspond à 60% de la charge solide à l'état naturel. En effet, la qualification du cours d'eau, en termes de régime de charriage, est considérée comme excellente lorsque celui-ci est naturel et est considérée comme bonne lorsque le charriage est compris entre 60 et 80% de la charge solide naturelle selon l'aide à l'exécution.

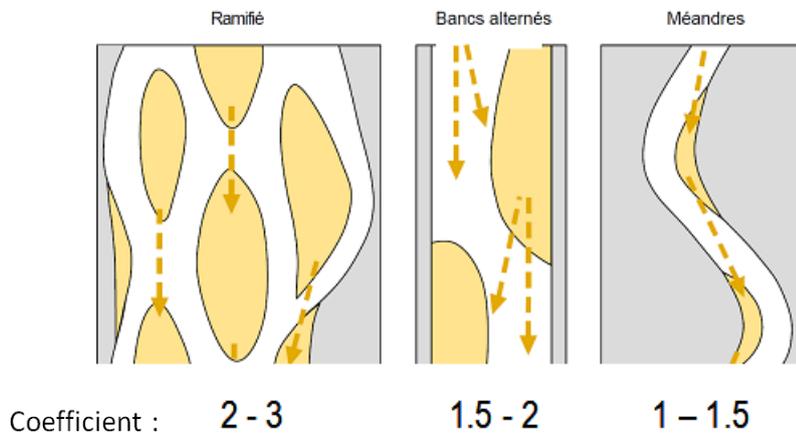
La première étape consiste donc à déterminer la charge solide à l'état naturel. Deux méthodes ont été utilisées pour déterminer l'état naturel. Suivant l'état du tronçon étudié, l'une ou l'autre méthode a été appliquée.

#### 1er cas : le tronçon étudié présente un aspect naturel

Le volume nécessaire est estimé en se basant sur la taille des bancs de gravier (méthode développée dans l'aide à l'exécution, Praxishilfe [Hunziker et Lehmann (2013)]). La taille des bancs est déterminée d'après les visites sur le terrain ainsi que l'analyse des orthophotos disponibles.

Dans ce cas, la charge solide nécessaire est la suivante :  $Q_{nécessaire} = S_{banc} * Coef * 0.3$

Le coefficient utilisé dépend de la nature des bancs observés sur site (voir schéma ci-dessous) :

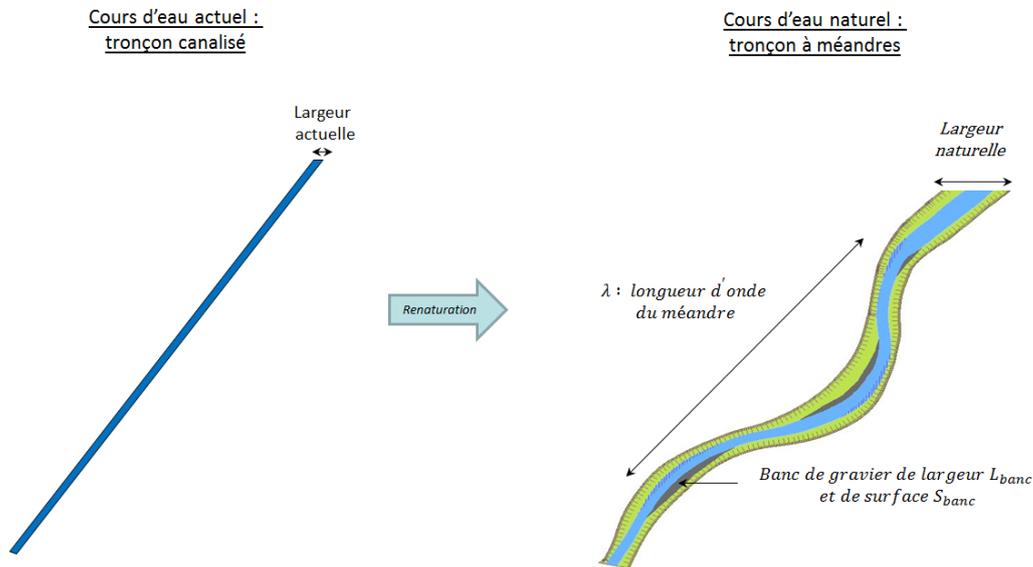


Le facteur 0.3 correspond à l'épaisseur du banc de gravier qui doit être renouvelée, pour un bon développement écologique.

2ème cas : le tronçon étudié est artificiel, pas de bancs de gravier observés

Lorsque l'état du cours d'eau est fortement altéré, il est difficile d'estimer son état naturel. L'estimation réalisée ici se base alors sur la méthode théorique suivante :

- Détermination de la largeur de régime selon la méthode de Da Silva
- Détermination du volume nécessaire en faisant l'hypothèse de la présence de bancs alternés sur la rivière. Cette estimation se base sur les paramètres suivants :
  - Longueur d'onde (entre les bancs de gravier) : 6 à 8 fois la largeur du cours d'eau
  - Surface des bancs de gravier : 2 à 4 fois la largeur du cours d'eau au carré
  - Volume nécessaire : 0.3 m d'épaisseur multiplié par la surface du banc



Avec :  $\lambda = (6 \sim 8) \cdot L_{naturelle}$  ;  $L_{banc} = \frac{2}{3} \cdot L_{naturelle}$  ;  $S_{banc} = \frac{\lambda}{2} \cdot L_{banc} = (2 \sim 4) L_{naturelle}^2$

Figure 27 Schéma explicatif pour la détermination de la charge naturelle

Dans ce cas, la charge solide nécessaire est la suivante :  $Q_{nécessaire} = S_{banc} \cdot 0.3$

### 3.2.4 Etape 7 : Impact des installations sur le régime de charriage

Les installations en question ont été fournies par la LCE Fribourg. Pour chaque installation séparément, son impact sur le régime de charriage a été évalué en se basant sur des approches simples et pragmatiques des conditions d'écoulement au droit de l'ouvrage.

Ainsi, le taux de piégeage et/ou de remplissage des ouvrages a été estimé. Dans le cas d'impact avéré sur le régime de charriage, l'influence de celui-ci a également été évaluée de manière sommaire en calculant le diamètre transportable.

L'impact de chaque installation sur le régime de charriage a été estimé en se basant sur les critères suivants :

Degré de gravité des atteintes portées au régime de charriage :

- Entre 0 et 20 % : aucune atteinte
- Entre 20 et 40 % : atteinte faible
- Entre 40 et 60 % : atteinte notable
- Entre 60 et 80 % : atteinte prononcée
- Entre 80 et 100 % : atteinte très prononcée

### 3.2.5 Etapes 8 et 9 : Profils en long du charriage et détermination des tronçons avec atteinte grave au régime de charriage

La comparaison de l'ensemble des données disponibles et calculées permet de définir les tronçons sur lesquels une atteinte grave au régime de charriage est constatée. Ces données utilisées sont :

- la comparaison entre la charge actuelle et la charge naturelle ;
- les observations de terrain, analyse des orthophotos, etc....

L'état du tronçon a ensuite été déterminé en se basant sur les critères suivants (la comparaison est réalisée entre l'état actuel et l'état naturel) :

Etat du tronçon :

	Excellent (atteinte entre 0 et 20% au régime de charriage)
	Bon (atteinte entre 20 et 40% au régime de charriage)
	Moyen (atteinte entre 40 et 60% au régime de charriage)
	Médiocre (atteinte entre 60 et 80% au régime de charriage)
	Mauvais (atteinte entre 80 et 100% au régime de charriage)

### 3.2.6 Etape 12 : Evaluer la faisabilité des mesures d'assainissement

Pour l'ensemble des installations à assainir, plusieurs variantes ont été étudiées et analysées.

En cas de besoin, un modèle numérique simplifié (1D) de transport de sédiments a été élaboré pour chaque cours d'eau, afin de confirmer ou d'infirmer l'efficacité de la variante retenue et son impact sur la protection contre les crues.

L'hypothèse de base utilisée pour chaque calcul numérique sédimentaire est que la charge naturelle (ou la charge nécessaire suivant les cas) est à disposition en amont de l'ouvrage étudié.

#### 3.2.6.1 Comparaison des variantes

Pour chaque ouvrage étudié, une comparaison des différentes variantes a été réalisée afin de déterminer quelle option semble a priori la plus intéressante. Les principaux points de comparaison sont :

- L'amélioration du régime de charriage (efficacité de la variante) ;
- L'évolution du risque d'inondation (pour la crue centennale) par rapport à la situation actuelle ;
- Le potentiel écologique de valorisation ;
- L'investissement nécessaire (proportionnel ou pas).

L'ensemble de ces informations est synthétisé dans une fiche (réalisation d'une fiche pour chaque ouvrage). Ces fiches ne sont pas présentées dans le corps du rapport mais dans [l'Annexe 4](#).



Les critères de notation utilisés pour comparer les variantes entre elles sont présentés ci-après. Ces notations sont à considérer de manière purement qualitative, elles permettent de comparer les variantes entre elles.

Notation concernant le régime de charriage :

La note attribuée tient compte d'une part du nombre de classes gagné ainsi que de la longueur du tronçon impacté. Le tableau de notation est présenté ci-après :

		Nombre de classes gagnées		
		0	1	2+
Longueur influencée	L < 500 m	0	2	3
	500 m < L < 2000 m	0	3	5
	L > 2000 m	0	4	6

Notation concernant le potentiel écologique de valorisation :

La note attribuée au potentiel écologique tient compte du potentiel établi dans le cadre d'une étude spécifique ainsi que de la longueur du tronçon impacté comme le montre le tableau suivant :

		Etat du potentiel		
		Faible	Moyen	Important
Longueur influencée	L < 500 m	0	2	3
	500 m < L < 2000 m	0	3	5
	L > 2000 m	0	4	6

La note attribuée lors de la comparaison des variantes part de la note mentionnée dans le tableau ci-dessus, puis a été adaptée en fonction du pourcentage de sédiments que laisse passer la variante étudiée.

Notation concernant le risque d'inondation :

Afin de tenir compte de la diminution ou de l'augmentation du risque d'inondation, les notes suivantes ont été attribuées :

Evolution du risque d'inondation	Diminution forte	Diminution faible	0	Augmentation faible	Augmentation forte
Barème	6	4	3	2	0

Notation concernant le coût de l'aménagement :

Le barème ci-dessous a été appliqué, les points attribués tiennent compte de l'investissement ainsi que du gain escompté en termes de charriage.

Cout d'aménagement de la variante	Nul	Très faible	Faible	Moyen	Important	Très Important	Disproportionné
Barème	6	5	4	3	1	0	-5

### 3.3 Potentiel écologique

#### 3.3.1 Méthodologie de détermination

Le potentiel écologique, parfois dénommé « état écologique potentiel », a été déterminé dans le cadre de la planification des revitalisations, également réalisée par la Section lacs et cours d'eau.

La méthodologie générale, décrite dans la Figure 28, est reprise de cette planification, à laquelle nous renvoyons pour d'éventuels compléments.

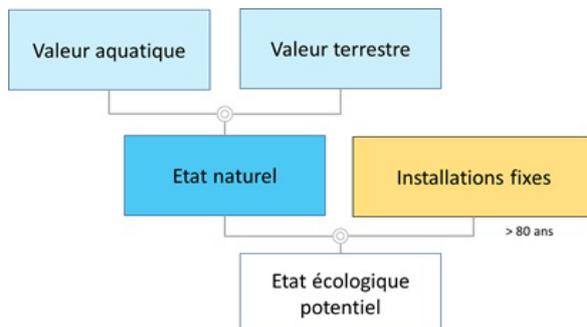


Figure 28 Détermination de l'Etat écologique potentiel

#### a) Valeur de l'état naturel – milieu aquatique

Cette donnée a été traitée par le bureau Pronat. Afin de déterminer la valeur naturelle du milieu aquatique une liste de quatre critères a été élaborée en collaboration avec la LCE et le service des forêts et de la faune (secteur biodiversité, faune, chasse et pêche). Cette liste contient un système de notation avec une échelle de 0 à 5.

Les critères suivants ont servi à l'évaluation :

- POI 1 – Potentiel piscicole ;
- POI 2 – Habitats piscicoles ;
- POI 3 – Frayères potentielles et recensées ;
- POI 4 – Connectivité.

Chaque tronçon a été évalué sur la base des informations disponibles par deux hydrobiologistes de PRONAT (Andreas Zurwerra et Pascal Mulattieri).

- L'évaluation se fonde sur les données existantes au niveau national, cantonal ou autres lorsqu'elles sont à disposition ;
- Un avis d'expert fondé sur les données cantonales partielles et/ou les connaissances personnelles des deux hydrobiologistes. Lorsqu'aucune donnée de base (fédérale, cantonale ou autre) n'est à disposition, les notes sont tout de même attribuées, selon les critères décrits ci-dessus<sup>12</sup>.

<sup>12</sup> à l'exception des tronçons évalués en 2013 pour qui seule l'évaluation finale avait été donnée par l'avis d'expert. La note de 0 avait alors été attribuée à chaque critère.

Afin de différencier les notes attribuées par un avis d'expert des autres, dans le fichier SIG figure une colonne « Avis d'expert » avec la mention « oui » pour tous ces cas particuliers.

e) POI 1 – Potentiel piscicole

La note a été attribuée en fonction des espèces piscicoles présentes ou potentiellement présentes (historiquement ou milieu colonisable avec franchissement des seuils artificiels). Obtiennent la note minimum de 3 les tronçons remplissant au moins un des critères suivants :

- Présence actuelle, potentielle ou historique d'espèces migratrices (truite lacustre, barbeau, nase et ombre);
- Présence actuelle ou historique d'écrevisse à patte blanche.
- Présence actuelle ou historique d'espèces menacées de poissons et cyclostomes (petite lamproie).

Les autres notes sont réparties en fonction du nombre d'espèces et des espèces présentes (qualitatif).

f) POI 2 – Habitats piscicoles

La note a été attribuée en fonction de l'habitabilité du cours d'eau pour les adultes et juvéniles. Obtiennent la note minimum de 3 les tronçons remplissant au moins un des critères suivants :

- Présence actuelle, potentielle ou historique d'espèces migratrices (truite lacustre, barbeau, nase et ombre);
- Présence historique d'écrevisse à patte blanche ;
- Tronçons écomorphologiques peu atteints (vert) ou proche du naturel (bleu) avec la présence confirmée de poissons et/ou d'écrevisses ;

Les autres notes sont réparties en fonction du nombre d'espèces et des espèces présentes (qualitatif), de la classe écomorphologique ainsi que de la structure morphologique du cours d'eau (faible pente, cours d'eau encaissé, milieu forestier, milieu agricole, etc.).

g) POI 3 – Frayères potentielles et recensées.

Obtiennent la note minimum de 3 les tronçons :

- Avec des frayères recensées.

Les autres notes sont réparties en fonction de la présence d'espèces piscicoles cibles ainsi que de la structure morphologique du cours d'eau (faible pente, encaissé, forestier, falaise, molasse, etc.).

h) 4. POI 4 – Connectivité

Obtiennent la note minimum de 3 les tronçons remplissant au moins un des critères suivants :

- Sans seuils naturels ;
- Avec des seuils naturels inférieurs à 30 cm ;

- Directement connecté avec les cours d'eau piscicoles importants (position dans le réseau hydrographique).

Les autres notes sont réparties en fonction de la hauteur des seuils naturels (30 cm à 50 cm ; 50 cm à 1m ; >1m) ainsi que du nombre de seuils présents.

i) Evaluation de la valeur naturelle du milieu aquatique

Le Tableau 12 présente les critères d'évaluation qui sont appliqués et le Tableau 13 montre le barème de répartition entre les classes faible/moyen/important.

Tableau 12 Grille d'évaluation des indicateurs de la valeur naturelle du milieu aquatique.

POI 1	Valeurs	Très faible	Faible	Moyen	Important	Très important	Inconnu
	Points	1	2	3	4	5	0
POI 2	Valeurs	Très faible	Faible	Moyen	Important	Très important	Inconnu
	Points	1	2	3	4	5	0
POI 3	Valeurs	Très faible	Faible	Moyen	Important	Très important	Inconnu
	Points	1	2	3	4	5	0
POI 4	Valeurs	Très faible	Faible	Moyen	Important	Très important	Inconnu
	Points	1	2	3	4	5	0

Tableau 13 Barème d'évaluation de la valeur aquatique.

Total des points	4 à 6	7 à 14	15 à 20
Evaluation	Faible	Moyen	Important

### 3.3.1.1 Valeur terrestre

Le milieu terrestre constitue l'interface entre le cours d'eau et les terres environnantes ; il est généralement influencé par le cours d'eau, soit par les inondations, soit par la nappe d'eau souterraine. Par rapport à la valeur naturelle du milieu aquatique, fondé sur les espèces et leurs exigences, on a privilégié une approche intégratrice de la valeur naturelle fondée sur les milieux et les conditions propices à leur développement. Cette donnée, développée par le SCZA (tout comme la suite de l'analyse SIG), repose sur l'évaluation de quatre indicateurs.

a) La pente moyenne du tronçon

Elle est calculée d'après le modèle numérique de terrain. La règle est que plus la pente du tronçon est faible, plus les milieux terrestres liés au cours d'eau sont développés. On va donc prioriser les cours d'eau peu pentus par rapport aux cours d'eau très pentus. Pour des pentes trop fortes (torrents), le cours d'eau n'a pas la possibilité de divaguer ou de migrer latéralement. La zone terrestre influencée par le cours d'eau, soit par débordement, soit par rajeunissement, est en général très faible pour ce type de cours d'eau. On observe que plus la pente diminue, plus l'emprise spatiale du cours d'eau devient importante. Ce phénomène est aussi lié au style fluvial qui change (formations de tresses, puis de méandres de plus en plus sinueux).

j) La largeur naturelle du tronçon

La dimension du cours d'eau est un critère important du potentiel écologique. En ce qui concerne la partie terrestre, plus le cours d'eau est de grande dimension, plus la zone terrestre influencée par le cours d'eau sera grande. Et cela ne contribue pas seulement à la quantité d'individus présents mais également à la diversité des espèces, car la série alluviale terrestre (bancs de sédiments nus – communautés herbacées pionnières – fourrés et forêts d'essences à bois tendre – forêts d'essences à bois durs) a besoin de beaucoup d'espace pour se développer intégralement.

k) Inventaire des zones alluviales

L'appartenance d'un tronçon à l'inventaire fédéral, régional ou local des zones alluviales reflète bien le potentiel écologique. En effet, comme le critère principal pour figurer dans un inventaire est la végétation alluviale, il existe des zones alluviales dont le cours d'eau principal est corrigé en totalité ou en partie. La végétation a persisté après les endiguements ou du moins change lentement, surtout si des échanges hydriques sont maintenus par la nappe phréatique. La présence ou la proximité d'une zone alluviale justifie une revitalisation et indique un réel potentiel écologique. Les données utilisées pour documenter cet indicateur sont l'inventaire fédéral des zones alluviales et l'inventaire cantonal des zones alluviales du canton de Fribourg.

l) Inventaire fédéral des paysages (IFP) et réseau écologique national (REN)

L'appartenance d'un tronçon à un périmètre IFP est un critère de priorisation, car, comme le recommande l'aide à l'exécution de l'OFEV, on considère qu'il est préférable de revitaliser des espaces dont la valeur paysagère est déjà reconnue, plutôt que de revitaliser des cours d'eau sans valeur paysagère particulière. De même, les cours d'eau appartenant au réseau écologique national (REN) ont été considérés avec un potentiel plus élevé que les autres, mais seulement pour ce qui concerne le réseau des milieux humides (cf. Tableau 14). On notera que les éléments du REN sont rares dans le canton de Fribourg, excepté sur le cours de la Sarine.

m) 5. Evaluation de la valeur naturelle du milieu terrestre

Des notes sont ensuite calculées pour chaque indicateur, puis additionnées pour obtenir une évaluation, comme montré dans le Tableau 14. Il est estimé que lorsqu'un tronçon obtient plus que la moitié des points son potentiel terrestre est important.

*Largeur naturelle* : un point par mètre, jusqu'à 15 m. Et 15 points pour tous les tronçons dont la largeur naturelle est supérieure à 15 m.

*Pente* : 10 points – la pente en %. Cela signifie que les tronçons dont la pente est supérieure à 10% ne reçoivent aucuns points. (Il n'y a pas de points négatifs).

*Inventaire des zones alluviales* : un tronçon situé à l'intérieur ou partiellement à l'intérieur d'une zone alluviale reçoit 10 points pour une zone d'importance nationale, 5 points pour une zone d'importance cantonale et 2 points pour une zone d'importance locale.

*IFP-REN* : un tronçon situé à l'intérieur ou partiellement à l'intérieur d'un objet IFP ou du REN (seulement cours d'eau et milieux humides) reçoit 5 points.

Tableau 14 Système d'évaluation de la valeur naturelle du milieu terrestre.

Largeur naturelle	Valeurs	0-15m	>15m		
	Points	1point/metre	15		
Pente	Valeurs	>10%	0-10%		
	Points	0	10 - 1point/%		
Inventaire des zones alluviales*	Valeurs	non	local	cantonal	fédéral
	Points	0	2	5	10
Autre inventaire* : IFP ou REN	Valeurs	non	oui		
	Points	0	5		
Total des points	[0 à 10[	[10 à 20[	[20 à 40]		
Evaluation	faible	moyen	important		

\*le tronçon est situé dans ou touche un des périmètres en question

### 3.3.2 Résultat de l'état écologique potentiel

La Figure 29 présente l'état écologique potentiel déterminé pour l'ensemble du réseau hydrographique fribourgeois.

Dans le cadre de la planification d'assainissement du régime de charriage, nous nous intéressons uniquement au cours d'eau cibles définis durant la première phase de l'étude, l'appréciation sommaire. L'état écologique potentiel des cours d'eau cibles est précisé dans la Figure 30, ainsi que dans le chapitre 16 (Tableau 51 p.251).

Sur la Figure 30, les installations de première priorité potentiellement à assainir sont représentées. Leur nécessité d'assainissement est déterminée dans l'étude détaillée et synthétisée au chapitre 16 à la fin du rapport.

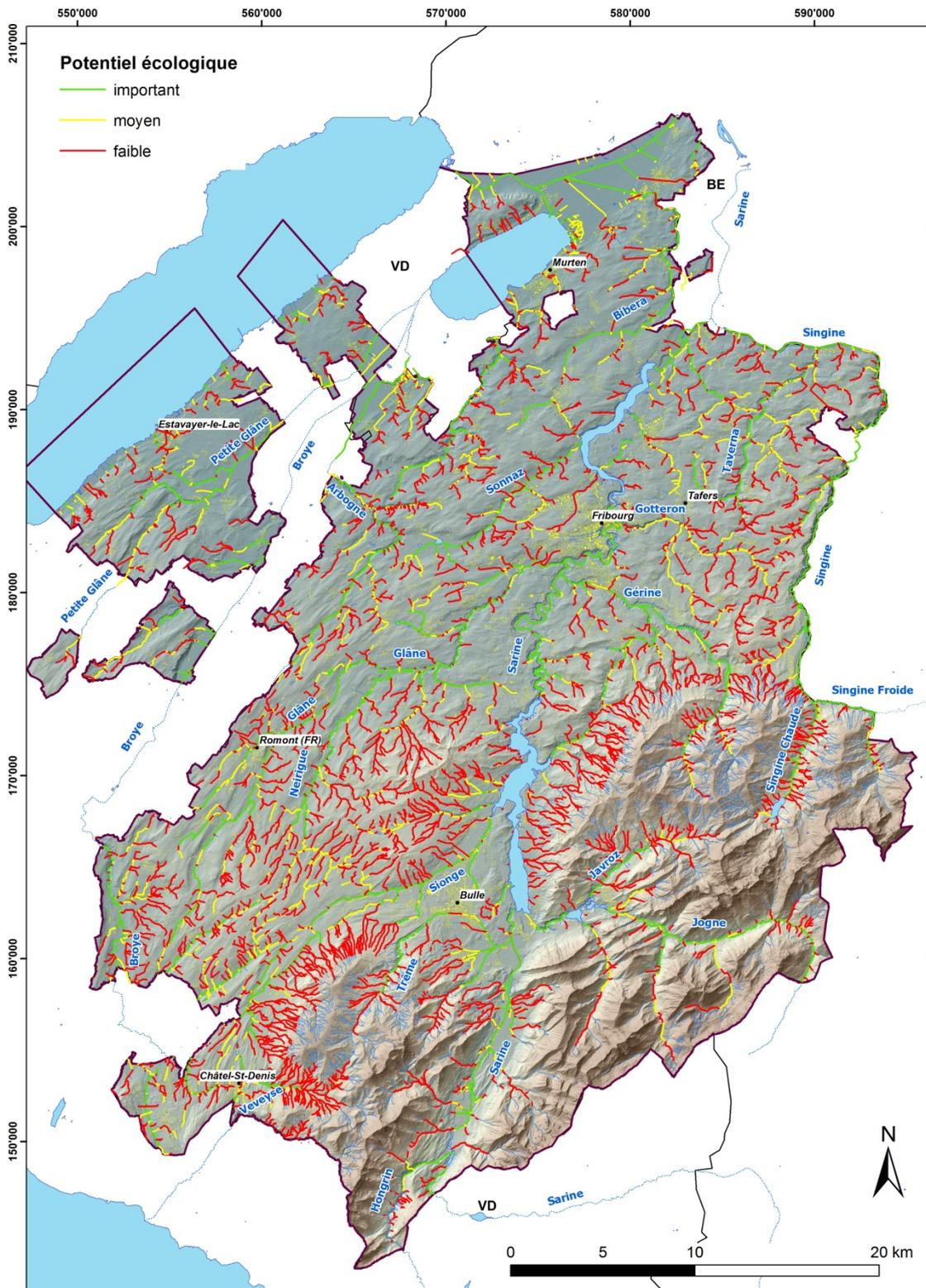
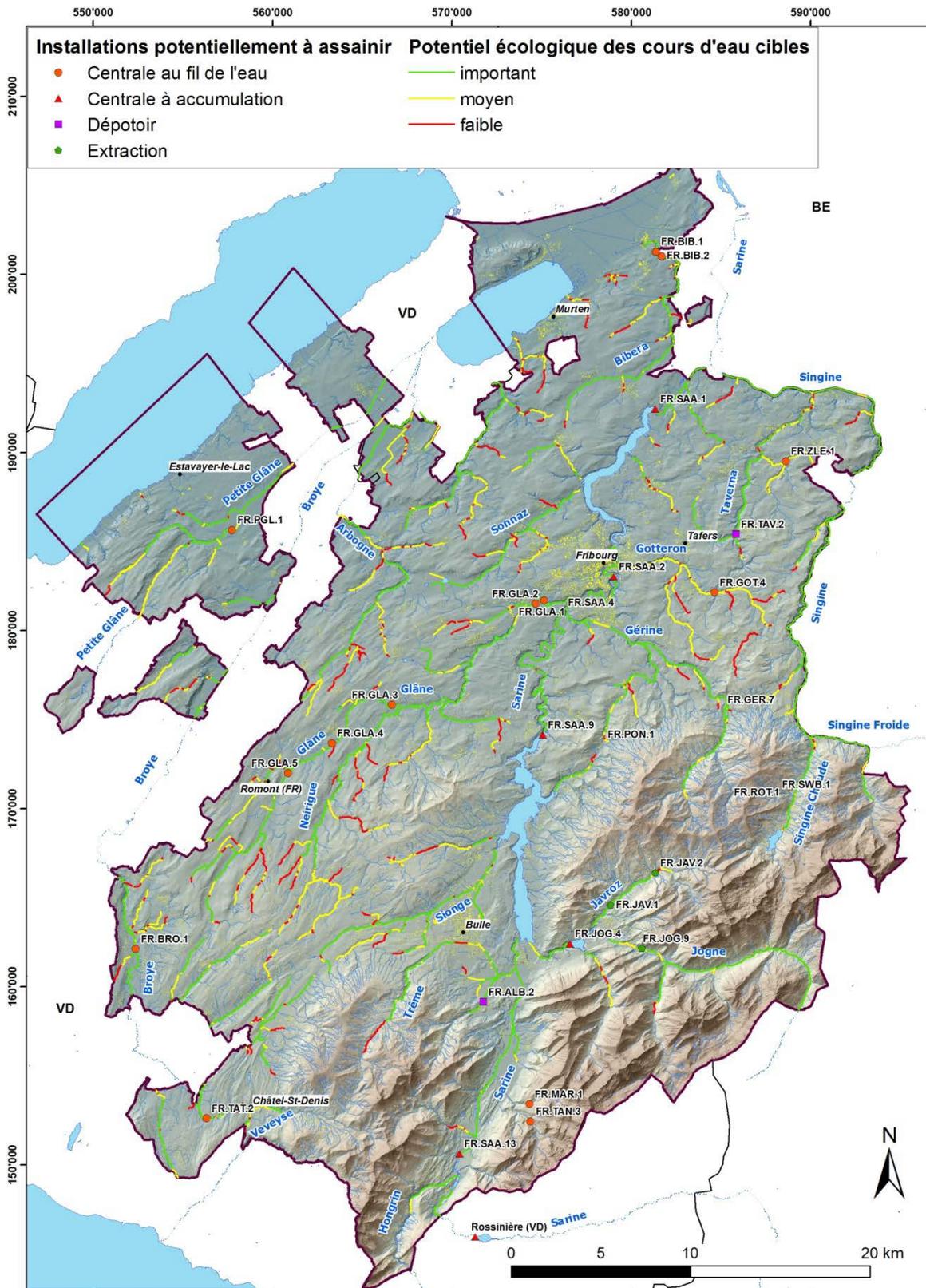


Figure 29 Etat écologique potentiel des cours d'eau fribourgeois





### 3.4 Modèle de données

L'OFEV fournit un catalogue d'objets dans le module Charriage, planification stratégique. Selon ce modèle, le canton de Fribourg s'est conformé au modèle de données contenant toutes les installations et les informations spécifiques aux installations exigées.

Le modèle de données établi est joint en annexes du rapport, sur support informatique. Ce modèle a été établi de façon coordonnée avec le Service des forêts et de la faune, qui réalise la planification de l'assainissement de la migration piscicole.

## 4. La Broye

### 4.1 Description du bassin versant

Le bassin versant de la Broye est présenté sur la base du résumé établi par ETEC Sàrl (2011), légèrement réduit pour respecter le besoin de l'étude présente.

Plusieurs petits torrents du versant nord-ouest des Alpes dans les Préalpes fribourgeoises s'unissent au nord de Semsales pour former la Broye (n° GEWISS 215). Celle-ci s'écoule d'abord en direction du sud-ouest, parallèlement aux Préalpes, puis après 10 km (à Tatroz) change de direction vers le nord-ouest. Après Palézieux, elle bifurque vers le nord en direction de Moudon. Là, elle oblique vers le nord-est jusqu'à son embouchure dans le lac de Morat.

D'une longueur d'environ 70 km, seuls les 30 km sur territoire fribourgeois ont été étudiés (11km plus précisément). Les sous-bassins étudiés couvrent une superficie totale d'environ 180 km<sup>2</sup>.

Le sous-sol de tout le bassin versant de la Broye est constitué de matériaux de dépôt (alluvions et moraines). Le lit proprement dit est constitué de blocs, de gros cailloux surtout de nature calcaire.

Le régime hydrologique de la Broye, du Tatrelet et de la Biorde est de type nivo-pluvial préalpin jusqu'à Tatroz, avec des hautes eaux à la fin du printemps et dans une moindre mesure en novembre (pluies). Les basses eaux sont observées en janvier et en octobre. Sur le reste du linéaire de la Broye et sur les autres affluents (excepté la Vau, non répertoriée dans l'Atlas), le régime est de type pluvio-nival méridional avec un maximum marqué au printemps et dans une moindre mesure à l'automne.

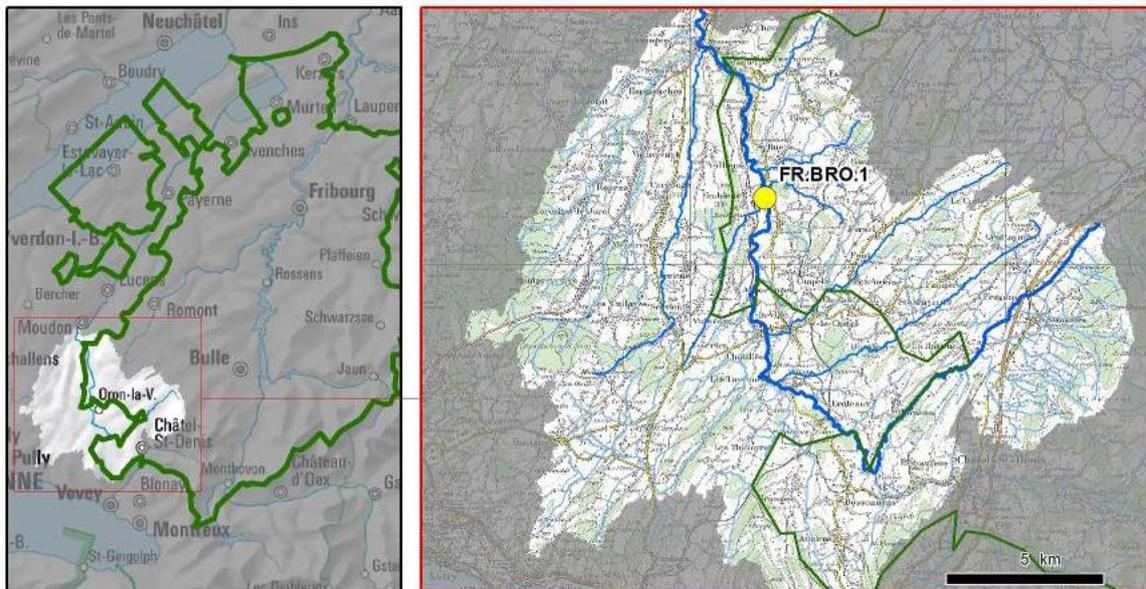


Figure 31: Bassin versant de la Broye à l'amont de Moudon

Le calcul du débit de crue est basé sur la formule de Kürsteiner (BWG, 2003). Le débit de pointe se calcule en fonction de la taille du bassin versant selon la formule suivante:

$$Q_{max} = c \cdot F^{2/3}$$

où  $Q_{max}$  est environ  $HQ_{100}$ ,  $c$  la constante de Kürsteiner et  $F$  la surface du bassin versant. La constante  $c$  est comprise entre 2.5 et 12 en fonction du bassin versant. Le bassin versant pris en considération dans le cadre de cette étude est illustré dans Figure 31.

## 4.2 Description du cours d'eau

Dans le cadre de la présente étude, l'atteinte au régime de charriage est analysée sur la partie fribourgeoise de la Broye. Le tronçon cible va du km 57.400 au km 48.000 et est défini par la frontière entre Fribourg et Vaud (Figure 31). En aval de l'installation (FR.BRO.1), la Broye s'écoule sur un important linéaire dans une gorge difficilement accessible.

### 4.2.1 Profil en long topographique

La Figure 32 présente le profil en long topographique de la Broye, basé sur le MNT laser. Le profil en long est déterminé par le croisement entre le tracé du cours d'eau (basée sur le réseau cantonal des cours d'eau) et le MNT, il ne s'agit donc pas du fond moyen de la Broye. Cependant, cette approche est suffisante pour évaluer la pente de la rivière.

Les affluents pourvoyeurs de sédiment sont représentés par un + sur le graphique. L'installation à étudier (FR.BRO.1) ainsi que les tronçons de calculs (CT ...) figurent également sur le profil en long.

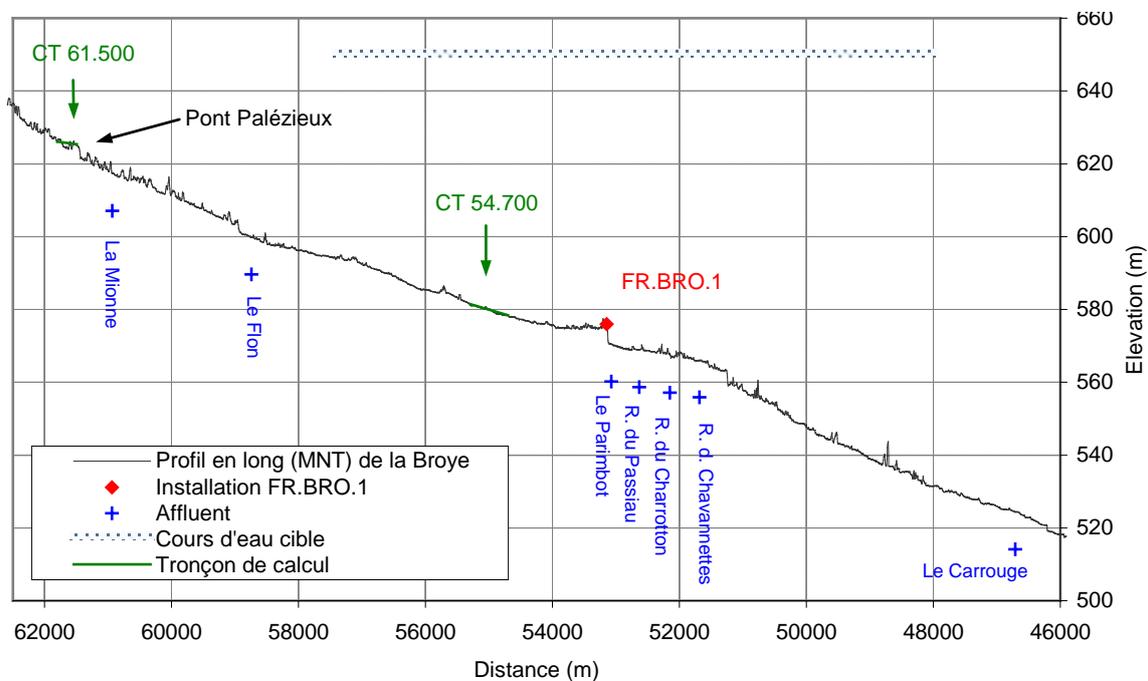


Figure 32: Profil en long topographique de la Broye

## 4.2.2 Morphologie historique et actuelle

Les cartes historiques ne donnent que peu d'informations sur l'état naturel de la Broye. Tant la carte Siegfried que la carte Dufour montrent une Broye corrigée proche de l'état actuel. Le tronçon à l'amont de l'installation (km 54.700) est considéré comme un tronçon de référence. La Broye s'écoule en méandres enfoncés dans le terrain. Le fond est partiellement couvert de sédiments couvrant une granulométrie étendue ; par endroits, la Broye s'écoule directement sur la roche. A l'intérieur des courbes et dans les zones calmes, des bancs de graviers sont observés.

## 4.3 Estimation de la charge solide

L'apport de l'amont de la Broye est calculé à l'aide de la méthode de la capacité de transport selon l'aide pratique à l'exécution. Un tronçon directement à l'amont d'un pont avec une pente comparativement faible (km 72.400) est considéré comme tronçon limitant. Un tronçon est considéré comme limitant lorsque la capacité de transport est inférieure aux apports (présence de bancs de graviers, pente plus faible que les tronçons amont). Sur un tel tronçon, la capacité de transport est donc inférieure ou égale au débit de charriage.

Selon le même principe, le débit solide de la Broye a été calculé au km 61.500 et km 54.700 (Tableau 15) ainsi que sur les affluents de la Mionne, du Parimbot et de Carrouge (Tableau 16). Pour les autres affluents, le débit solide a été estimé sur la base des calculs sur les trois affluents cités.

A notre connaissance, il n'y a pas d'extraction de gravier sur le tronçon considéré. Il n'y a donc pas de moyen de caler les calculs.

Tableau 15: Calcul de capacité de transport de la Broye

Cours d'eau	Distance (km)	Capacité minimale de transport solide (m <sup>3</sup> /a)	Capacité maximale de transport solide (m <sup>3</sup> /a)
La Broye	72.400	1'190	1'970
La Broye	61.500	660	1'320
La Broye	54.700	3'440	6'440

Tableau 16: Calcul de capacité de transport sur les affluents de la Broye

Cours d'eau	Distance (km)	Capacité minimale de transport solide (m <sup>3</sup> /a)	Capacité maximale de transport solide (m <sup>3</sup> /a)
La Mionne	60.940	1730	2160
Le Parimbot	53.080	500	990
Le Carrouge	46.710	1550	2760

Juste en amont du tronçon du cours d'eau cible se trouvent deux affluents pourvoyeurs de sédiments : La Mionne (km 60.940) et le Flon (km 58.750). La transposition directe de la capacité de transport calculée sur la Mionne en un débit de charriage donne des valeurs trop importantes en comparaison régionale (voir Tableau 16 en comparaison avec la capacité de transport de la Broye, Tableau 15). Le débit solide de la Mionne est donc calculé sur la base d'un apport proportionnel à la longueur du cours d'eau. Cette approche fait l'hypothèse que la Mionne et la Broye

amont ont une couverture du sol et une géologie comparables. Le débit solide annuel est donc calculé comme suit:

$$Q_{G, \text{Mionne}} = L_{\text{Mionne}} \cdot \frac{Q_{G, \text{Broye, km 61.500}}}{L_{\text{Broye, km 61.500}}} = 675 \div 225 \text{ m}^3/\text{a}$$

Le bassin versant du Flon étant d'une taille similaire à celui de La Mionne, l'apport du Flon est donc considéré comme identique à celui de la Mionne.

Jusqu'à l'installation FR.BRO.1 (km 53.100) il n'y a aucune nouvelle source de charriage significative. Le Parimbot (km 53.080) est situé directement en aval de l'installation. Le débit de charriage est compris entre 250 m<sup>3</sup>/a et 500 m<sup>3</sup>/a. Pour cet affluent, on considère que le débit solide est égal à 0.5 fois la capacité de transport, car on observe un pavage dans son lit, et l'eau coule sur des tronçons importants directement sur le rocher. Les affluents suivants, R. du Passiau (km 52.630), R. du Charrotton (km 52.150) et R. de Vuaz (km 48.600) sont très pentus et ont donc des capacités de transport importantes. Si les apports étaient suffisants, ils engendreraient des dépôts dans la Broye (car la capacité de transport de la Broye ne permettrait pas d'évacuer les matériaux). L'absence de dépôt dans la Broye nous indique que l'apport solide de ces affluents est conditionné par les apports et non par la capacité de transport. Le débit solide est estimé en utilisant le Parimbot comme cours d'eau de référence, puis adapté à la surface du bassin versant de chaque affluent.

Directement en aval du tronçon cible, se situe l'embouchure du Carrouge (km 46.710) dans la Broye. Il a une capacité de transport estimée entre 1'300 m<sup>3</sup>/a – 2'600 m<sup>3</sup>/a. Cette capacité de transport est grande par rapport au débit charrié dans la Broye; des dépôts importants ou un changement de la morphologie lié à l'apport des sédiments devrait être observés si le Carrouge transportait autant de matériaux. Après vérification sur le terrain, de tels changements ne sont pas observés. Le débit du Carrouge est finalement estimé entre 775 à 1'380 m<sup>3</sup>/a.

Sur la base des calculs ponctuels de capacité de transport et de l'interprétation des résultats basée sur les visites de terrain, les débits solides suivants sont considérés pour la Broye:

Tableau 17: Table de synthèse - débit solide charrié estimé sur la Broye et ses affluents

	Distance km	Débit solide min m <sup>3</sup> /a	Débit solide max m <sup>3</sup> /a	Source
Apport du BV	61.500	660	1320	Calcul CT
Affluent Mionne	60.940	450	900	Calcul / expertise
Affluent Flon	58.750	450	900	Cours d'eau de référence
Affluents	53.080 – 48.600	680	1360	Calcul / expertise
Affluent Carrouge	46.710	775	1380	Calcul CT

#### 4.4 Estimation du débit de charriage nécessaire

Selon l'aide à l'exécution (Schälchli et Kirchofer, 2012), le débit de charriage nécessaire est défini par les critères suivants :

1. Un tronçon de cours d'eau (non corseté) doit pouvoir développer une morphologie analogue à celle de l'état naturel. Son lit doit ainsi pouvoir prendre une forme semblable à celle qu'il au-

rait naturellement, avec des bancs qui se constituent également de façon similaire à ce qu'ils feraient naturellement.

2. La couche superficielle des bancs de graviers doit se renouveler régulièrement lors des crues (dynamique morphologique), empêchant ainsi les bancs de se colmater et garantissant la présence d'un substrat meuble.

On peut admettre que les exigences (1) et (2) sont remplies si la couche supérieure des bancs de graviers se renouvelle annuellement sur une épaisseur d'environ 30 cm. Dans ces conditions, une couche de gravier meuble et suffisamment profonde est en permanence à disposition des biocénoses aquatiques.

Cette couche de 30 cm est suffisante pour le creusement des frayères et dépasse normalement la profondeur du colmatage interne.

L'application de la méthode proposée dans l'aide à l'exécution donne des valeurs de charriage nécessaire qui semblent trop faibles. Ceci notamment en raison du peu de secteurs où se développent encore des bancs. Une méthode alternative est donc utilisée. Elle se base sur la méthode proposée par beffa tognacca gmbh (2012), dans le cadre de l'étude de la Muota.

Pour les cours d'eau à bancs alternés, la surface des bancs est approchée par la formule suivante :

$$A_{Bank} = \lambda / 2 \cdot B_{Bank} = (2 \div 4) B^2$$

Où  $\lambda = (6 \div 12) \cdot B$ ,  $\lambda$  étant la longueur d'onde qui dépend de la largeur naturelle du cours d'eau. La largeur des bancs est estimée à  $B_{Bank} = 2/3 \cdot B$ . La largeur naturelle du cours d'eau est estimée sur la base de la largeur de régime proposée par Parker (1979) :

$$B = 4.4 \cdot \left( \frac{Q}{((s-1) \cdot g \cdot d_{50})^{0.5}} \right)^{0.5}$$

Le volume calculé est finalement multiplié par des coefficients supplémentaires pour prendre en considération la configuration du lit; ces coefficients sont basés sur l'aide à l'exécution:

Tableau 18: Détermination du débit nécessaire charrié, en fonction de la configuration du lit

Configuration du lit	Coefficient	Formule pour $A_{Bank}$
Tronçon avec méandres / lit droit	1 à 1.5	$A_{Bank} = (2 \div 6) \cdot B^2$
Tronçon en bancs alternés	1.5 à 2.0	$A_{Bank} = (3 \div 8) \cdot B^2$
Tronçon ramifié	2 à 3	$A_{Bank} = (4 \div 12) \cdot B^2$

Sur la Broye, le débit solide nécessaire est estimé selon cette méthode aux trois endroits suivants (Tableau 19):

Tableau 19: Débit solide nécessaire sur la Broye

Distance (km)	Morphologie (Critères de Yalin et da Silva, 1991)	B <sub>R</sub> (m)	Débit solide nécessaire	
			(limite inférieure)	(limite supérieure)
km 72.400	lit droit	27.40 m	830 m <sup>3</sup> /a	2500 m <sup>3</sup> /a
km 61.500	lit droit	27.70 m	775 m <sup>3</sup> /a	2325 m <sup>3</sup> /a
km 54.700	lit droit	34.40 m	1150 m <sup>3</sup> /a	3450 m <sup>3</sup> /a

Suite aux informations historiques fournies sur l'installation ainsi que des visites de terrain complémentaires (voir § 4.5), les valeurs de la charge actuelle et de la charge nécessaire ont été modifiées.

## 4.5 Quantification de l'impact de l'installation

Le Moulin Dougoud sur la Broye

### 4.5.1 Informations historiques de l'ouvrage

L'étude du profil en long de l'installation montre des dépôts importants directement en amont de l'ouvrage ainsi qu'une érosion en aval. Le volume de sédiments stocké en amont est estimé à 45 000 m<sup>3</sup> comme le montre la Figure 33 ci-après.

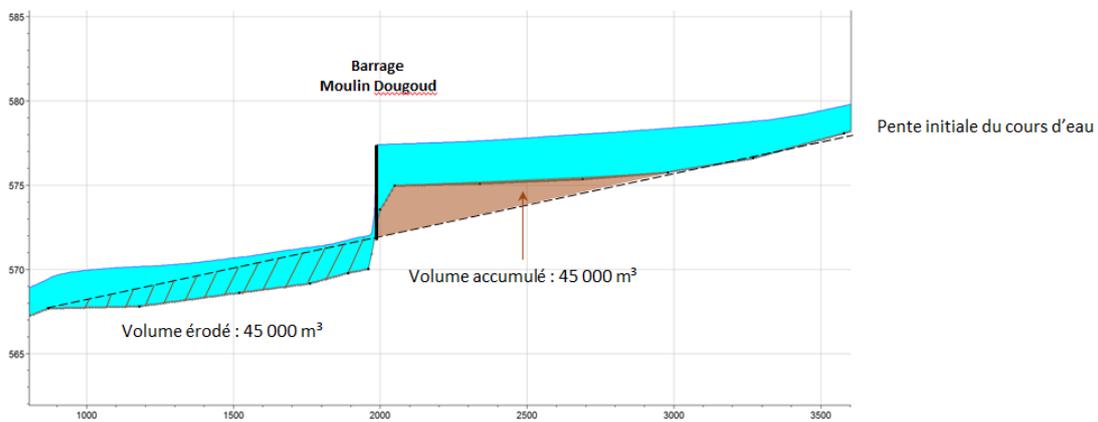


Figure 33 : Profil en long au droit de l'installation

D'après les informations fournies, l'installation est présente sur la Broye depuis un grand nombre d'années :

- mise en exploitation de l'usine : 1800 ;
- agrandissement de l'usine : 1924.

En combinant les informations concernant la mise en exploitation de l'usine et le volume stocké en amont de l'installation, nous estimons que la charge solide actuelle est la suivante :

- ~ 210 m<sup>3</sup> (en comptant depuis 1800) ;
- ~ 500 m<sup>3</sup> (en comptant depuis 1924).



#### 4.5.2 Visite de terrain, situation à l'aval de l'installation

Les différentes observations de terrain effectuées sont synthétisées sur le profil en long suivant :

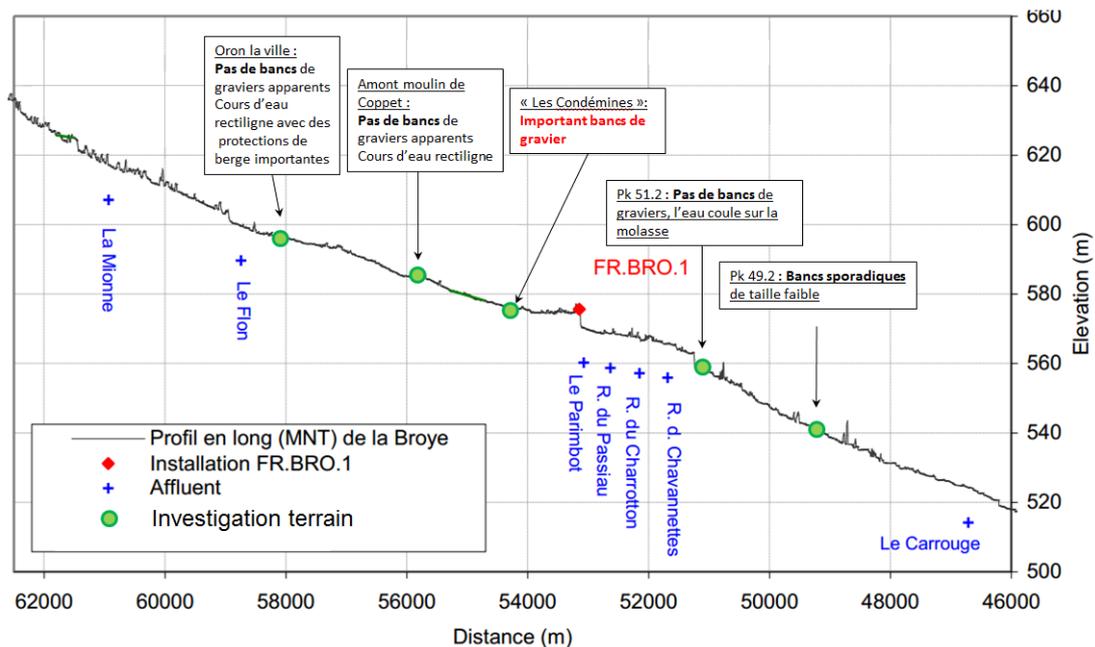


Figure 34 : Synthèse des visites de terrain

Les photos ci-dessous (Figure 35) illustrent un important banc de gravier observé. (« Les Condémines », pk 54.5)

Ce banc se situe au niveau de la cassure de pente observée sur le profil en long de la Broye, environ 1km en amont de l'installation. Le volume de ce banc de gravier est estimé à ~120 m<sup>3</sup>.



Figure 35 : Banc de graviers observé au pk 54.5 (à gauche) et 54.7 (à droite).

Une photo prise tout proche de l'installation (Figure 36) indique clairement que les sédiments bloqués en amont de l'ouvrage n'ont pas été remobilisés depuis très longtemps :



Figure 36 : Sédiments observés directement en amont de l'installation

Les effets observés de l'installation sur la Broye sont évidents. L'ensemble des sédiments provenant de l'amont est stoppé très en amont de l'installation sous l'influence de la baisse importante de la pente à cet endroit. La Broye s'écoule en grande partie sur la molasse et le lit est formé de grands blocs ( $> 20$  cm ; Figure 37, gauche). En aval, de faibles traces de charriage sont observées environ 4 km en aval de l'ouvrage. La présence de bancs de graviers est sporadique aux endroits protégés par des grands blocs et leur épaisseur est faible (quelques cm), au-dessous se trouve un fond de galets avec un diamètre moyen d'environ 10 – 15 cm. Le banc en haut à droite de l'image est constitué surtout de galets de 10 – 15 cm, soit un diamètre très élevé en regard de la situation à l'amont de l'installation.



Figure 37 Lit de la Broye en aval de l'installation (km 51.2 à gauche, km 49.2 à droite).

#### 4.5.3 Modèle hydraulique (1D)

L'installation provoque une réduction de la pente sur une longueur de 800 mètres environ en raison du remplissage à l'arrière du barrage (Figure 32). On observe des dépôts à la racine de la zone de "retenue". Pour déterminer l'impact de l'ouvrage, un modèle hydraulique de l'amont du barrage permet d'évaluer la vitesse, la hauteur d'eau et la pente de la ligne d'eau pour différents débits. On observe les éléments suivants :

- Pas de transport pour  $HQ_2$  et  $HQ_{10}$ .
- Pour  $HQ_{100}$  transport de 200 à 450  $m^3/s$ , sous l'hypothèse forte que la géométrie ne change pas durant la crue.

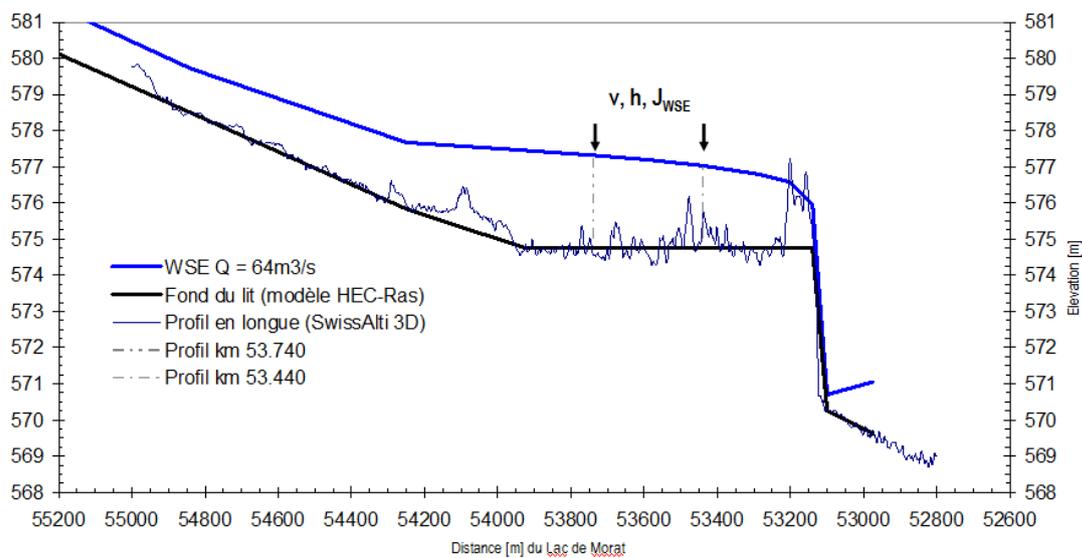


Figure 38 : Profil en long au droit de l'installation

Sur la base des modélisations, les conclusions suivantes peuvent être faites :

- Rétention complète des sédiments durant la période de remplissage derrière le barrage. La durée n'est pas connue, il n'y a pas de levés historiques du fond ;

- Effet de triage des matériaux en raison de la réduction de la capacité de transport (situation actuelle) ;
- Déposition de gravier à la racine de la zone plate (km 54.000) ;
- L'installation empêche le transit vers l'aval pour les crues inférieures à HQ<sub>10</sub>.

Atteinte très prononcée (80 – 100 %) par rapport à une échelle de temps inférieure à 10 ans.

Aucune atteinte (0 – 20 %) par rapport au long terme (>> 10 ans).

En raison des incertitudes sur l'effet réel de l'installation, la quantification de l'effet de l'installation se base également sur une visite de terrain.

#### 4.5.4 Conclusion sur l'impact de l'installation FR.BRO.1

Les calculs indiquent que les débits de crue habituels ne suffisent pas à assurer le transit solide de l'amont vers l'aval de l'installation FR.BRO.1. De plus, les observations de la visite de terrain indiquent que les crues habituelles sont capables de transporter l'apport des affluents. Il est difficile d'apprécier si les apports des affluents directement en aval de l'ouvrage réduisent l'impact.

Les observations indiquent que, même si, sur le long terme, les apports de l'amont sont non négligeables, le lit de la Broye à l'aval de l'installation FR.BRO.1 souffre d'un déficit des matériaux charriés de manière permanente. Il est probable que les grandes crues soient capables de remobiliser le dépôt de matériaux à l'amont de la zone de retenue du barrage, assurant le transport au-delà du tronçon atteint.

Le degré d'atteinte au régime de charriage est **très prononcé (80 – 100 %)** pour le tronçon entre le pk 54.5 (~1 km à l'amont de l'ouvrage) au pk 46 à l'aval de l'installation FR.BRO.1 (fixation du lit et formation sporadique de bancs de graviers).

Remarque : le pk 46 correspond à la limite aval de la Broye fribourgeoise, l'atteinte sur le régime de charriage sur la partie vaudoise semble être très prononcée également (sauf si des apports importants sont constatés).

La transition entre le degré d'atteinte prononcé et notable est progressive, mais pour les besoins de la méthode de classification appliquée, une transition fixe (km 49.500) a été choisie. Lors d'une visite de terrain dans cette zone de transition, une amélioration du régime de charriage au fur et à mesure de l'avancée vers l'aval a pu être observée : le volume des bancs de graviers le long du cours d'eau était de plus en plus important. Une source de matériaux solide individuelle pouvant expliquer ce phénomène n'a pas pu être identifiée. Ainsi, les explications possibles peuvent provenir des débits solides charriés par les affluents, de l'érosion des berges et de la structure de la Broye (grands blocs et bancs de graviers existant) qui peut calmer les conditions d'écoulement.

#### 4.5.5 Evaluation des atteintes à la protection contre les crues

Au chapitre de la protection contre les crues, il semble qu'en raison du relèvement du lit à l'amont de l'ouvrage, des débordements, majoritairement en rive gauche, selon la carte indicative, surviennent. Ne touchant que des terres agricoles, on peut considérer cette atteinte comme faible.

## 4.6 Etablissement du profil en long de charriage - Bilan de transport solide

Suite aux données historiques et les observations de terrain, la charge solide actuelle en amont de l'ouvrage est estimée à  $\sim 300 \text{ m}^3$ . L'ensemble des débits solides charriés estimés (Tableau 14) a été corrigé pour assurer la cohérence entre les calculs numériques et les observations faites sur site. Le profil en long de charriage ainsi obtenu, ainsi que l'évaluation du régime de charriage sur les différents tronçons, est présenté ci-après :

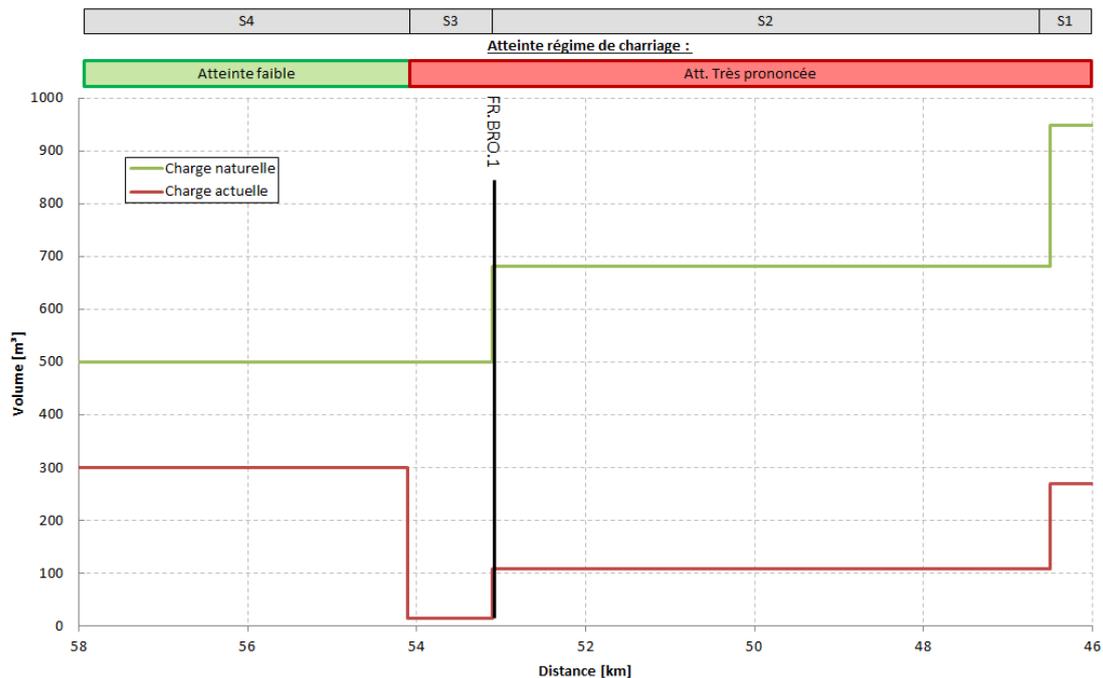


Figure 39: Profil en long de charriage de la Broye

## 4.7 Proposition de mesure d'assainissement

### 4.7.1 VAR 0 : Conservation de l'installation en l'état

#### 4.7.1.1 Description de la variante

Cette variante consiste à garder l'installation en l'état et à attendre que celle-ci atteigne un nouvel état d'équilibre qui permettrait aux sédiments de transiter à nouveau à travers l'ouvrage.

#### 4.7.1.2 Résultat de la modélisation

Les résultats du calcul numérique du charriage sur 10 ans sont présentés sur les Figure 40 et Figure 41 ci-après.

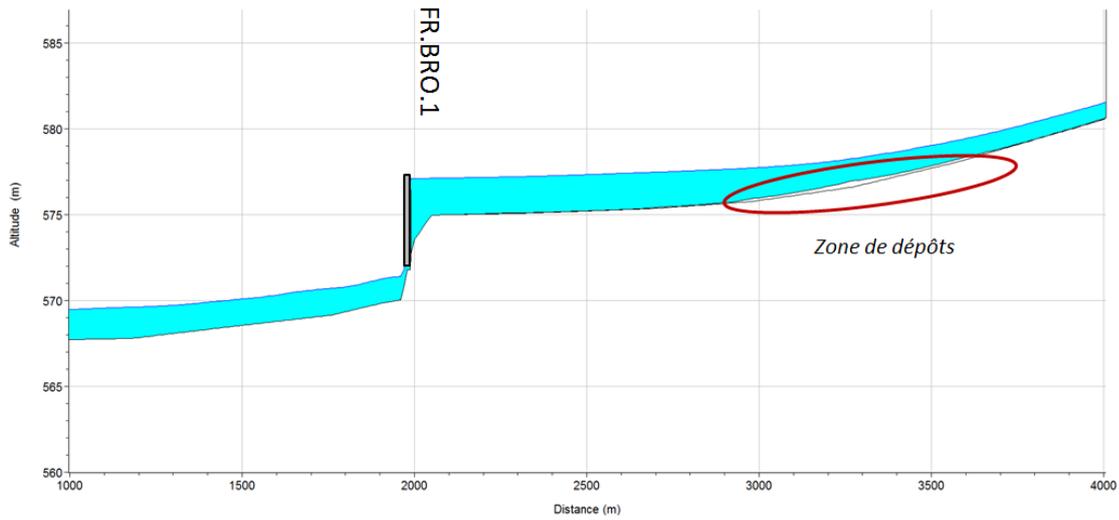


Figure 40 : Evolution du thalweg après 10 ans

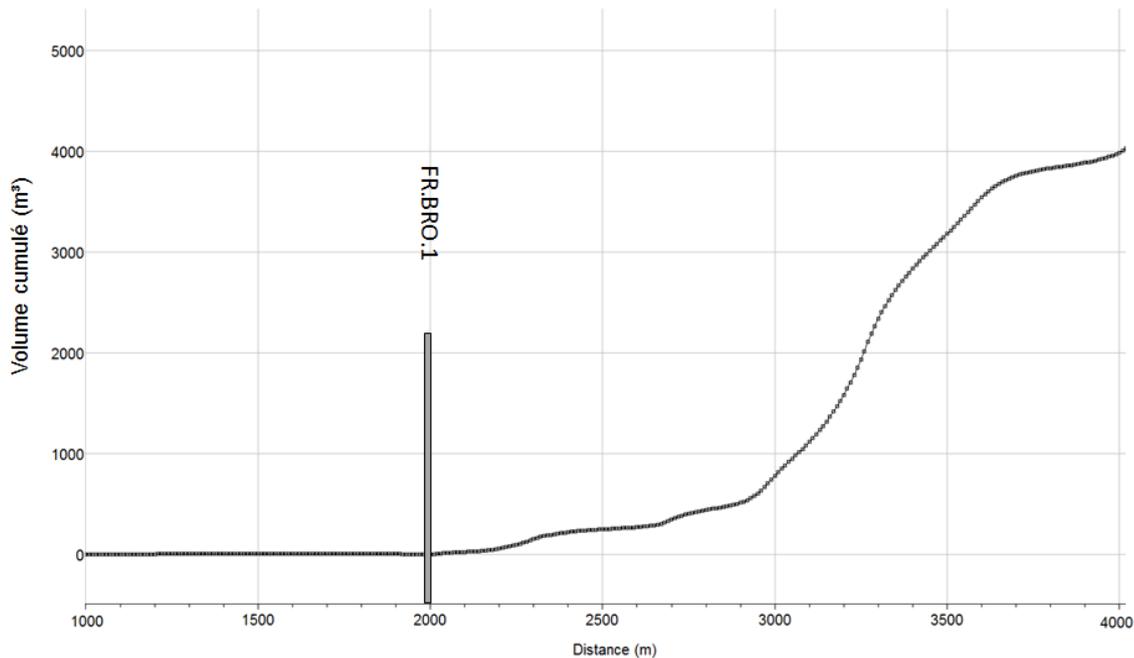


Figure 41 : Cumul du volume transité après 10 ans de charriage

Les résultats montrent que même après 10 ans de charriage, très peu de sédiments - voire aucun - ne transitent par-dessus l'ouvrage. En effet, la pente du thalweg étant tellement faible sur au moins un kilomètre en amont de l'ouvrage, l'ensemble des sédiments restent bloqués au niveau de la cassure de pente située environ 1 km en amont de l'ouvrage.

#### 4.7.1.3 Conclusion

Etant donné la taille de l'ouvrage, l'équilibre qui permettra de faire transiter les sédiments ne sera atteint que dans un certain nombre d'années. De plus, cette variante risque, à terme, d'entraîner

des inondations. Cette variante présente un intérêt quasi nul dans le cadre du rétablissement du régime de charriage.

Le coût de cette variante est estimé à : **0 CHF**

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans l'Annexe 4.

## 4.7.2 VAR 1 : Suppression du barrage

### 4.7.2.1 Description de la variante

Cette variante consiste à supprimer le seuil existant, (ou réaliser une encoche suffisamment large), et de laisser le profil en long du cours d'eau tel qu'il est actuellement.

L'esquisse et le profil en long correspondant à cette configuration sont présentés ci-dessous (Figure 42) :

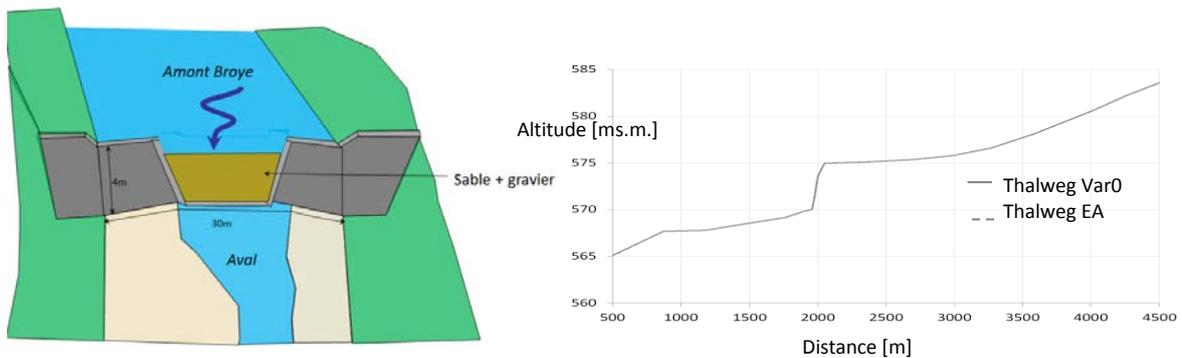


Figure 42 Esquisse de la variante 1 (FR.BRO.1)

Le barrage étant actuellement comblé à environ 90% et ceci de longue date, la réalisation d'une encoche ne permettra probablement pas d'abaisser significativement la ligne d'eau.

### 4.7.2.2 Résultat de la modélisation

Les résultats de la modélisation après 10 ans de charriage sont présentés sur les Figure 43 et Figure 44 ci-après.

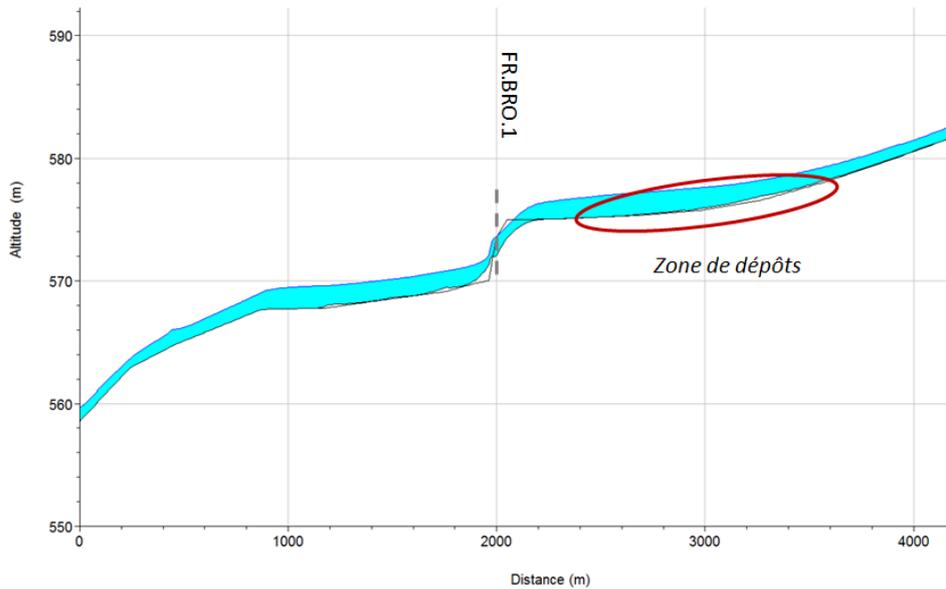


Figure 43 : Evolution du thalweg après 10 ans

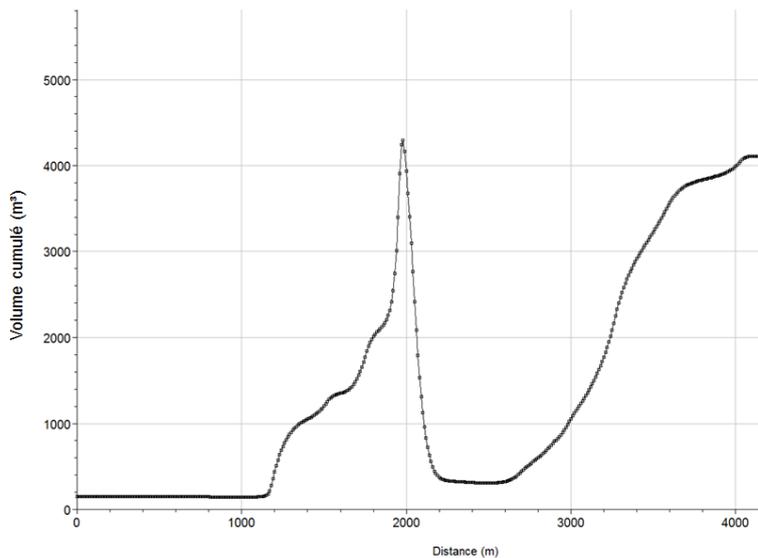


Figure 44: Volume transité cumulé après 10 ans de charriage

Les résultats montrent que les sédiments provenant de l'amont ne transitent toujours pas à travers le barrage. En effet, la suppression du barrage permettrait aux dépôts de se déplacer légèrement plus vers l'aval sous l'influence du léger abaissement de la crête, mais ceux-ci ne transitent toujours pas à travers l'ouvrage.

En revanche, un volume non négligeable de sédiments serait érodé du fond du cours d'eau à l'endroit du barrage même. A long terme, l'érosion régressive va faire tendre le profil en long vers sa géométrie originelle ; nous considérons donc le potentiel de valorisation de cette variante comme important (gain de 4 classes). A court terme, cette mesure ne permet toutefois qu'un faible gain.

### 4.7.2.3 Conclusion

Cette variante ne permet pas aux sédiments provenant de l'amont de transiter à travers l'ouvrage. Cependant, les dépôts situés juste en amont du seuil constitueraient une source importante de sédiments pour une période importante, **sous réserve que les sédiments soient réellement remobilisables**. Des investigations devront être réalisées en amont du barrage pour vérifier cette hypothèse.

Le coût de cette variante est estimé grossièrement à : **100 000 CHF HT**. Cela n'inclut pas les frais liés à la perte d'exploitation.

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans [l'Annexe 4](#).

## 4.7.3 VAR 2 : Suppression du barrage + pré-excavation faible

### 4.7.3.1 Description de la variante

Cette variante consiste à supprimer le seuil existant, (ou réaliser une encoche suffisamment large), et de modifier le profil en long de la Broye vers l'amont, afin de créer une augmentation de la pente actuelle du thalweg pour permettre aux sédiments de traverser l'ouvrage.

L'esquisse et le profil en long correspondant à cette configuration sont présentés sur la Figure 45 ci-dessous :

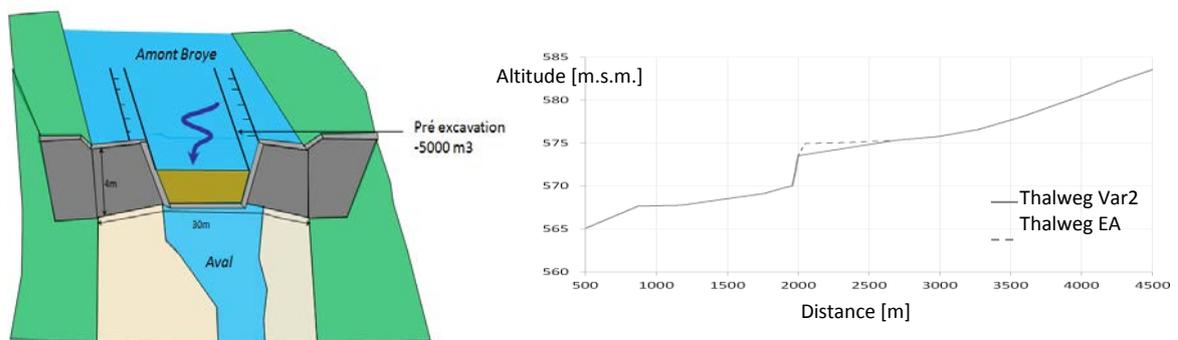


Figure 45: Esquisse de la variante 2 (FR.BRO.1)

Afin de créer une augmentation de la pente du thalweg, un volume de 5 000 m<sup>3</sup> a été excavé sur un linéaire d'environ 500 mètres vers l'amont.

### 4.7.3.2 Résultat de la modélisation

Les résultats de la modélisation après 10 ans de charriage sont présentés sur les Figure 46 et Figure 47 ci-après.

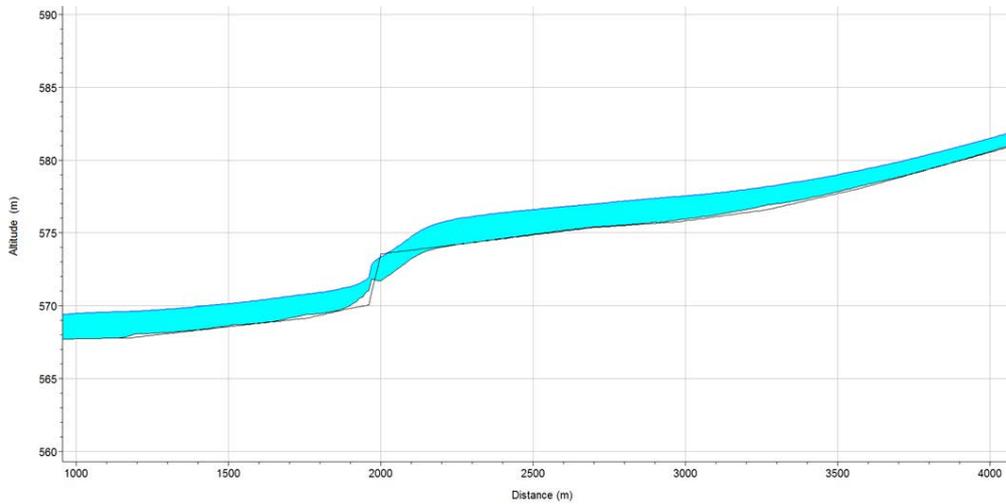


Figure 46: Evolution du thalweg après 10 ans

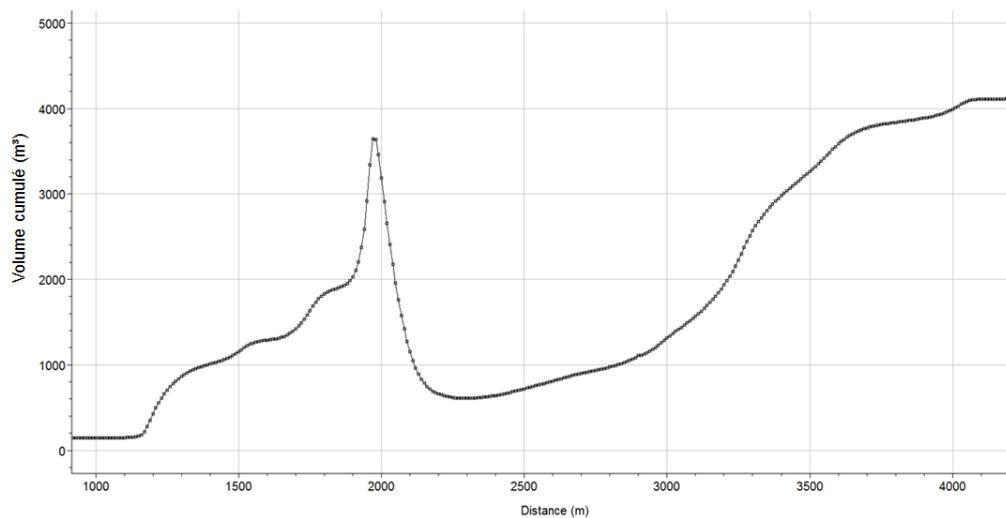


Figure 47: Cumul du volume transité après 10 ans de charriage

Cette variante présente des résultats similaires à ceux de la variante 1. En effet, une partie importante des sédiments situés en amont de la retenue est érodée et transportée vers l'aval. Cette variante permet également à une partie des sédiments provenant de l'amont de transiter à travers l'ouvrage.

Nous considérons le potentiel de valorisation de cette variante comme important (gain de 4 classes). A court terme, cette mesure ne permet toutefois qu'un faible gain.

#### 4.7.3.3 Conclusion

Avec la création d'une pente du thalweg plus élevée en amont, une partie des sédiments provenant de l'amont (~ 25%) peut transiter à travers l'ouvrage. De même que pour la variante 1, des investigations devront être réalisées afin de vérifier si les sédiments sont remobilisables ou non.

Le coût de cette variante est grossièrement estimé à : **480 000 CHF HT**. Cela n'inclut pas les frais liés à la perte d'exploitation.

Cette estimation tient compte de l'adaptation de l'ouvrage ainsi que du volume de sédiments à excaver et à évacuer en décharge.

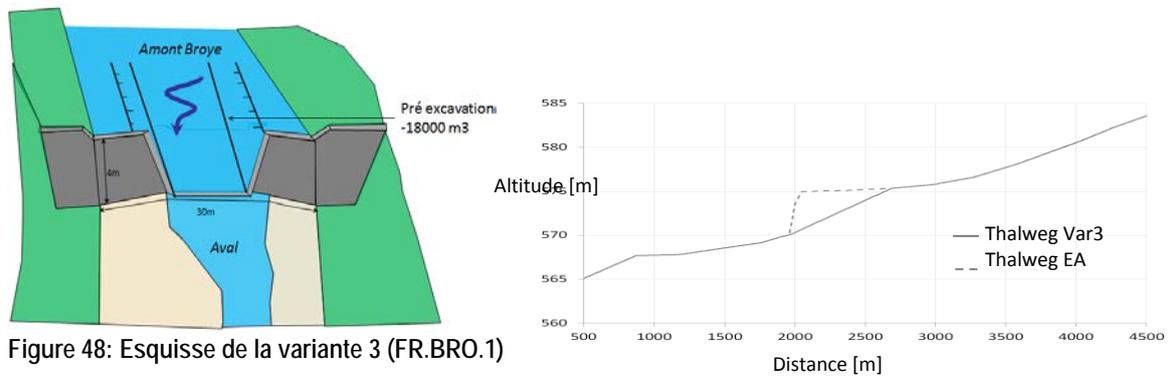
Une fiche synthétique de la variante est présentée dans l'Annexe 4.

#### 4.7.4 VAR 3 : Suppression du barrage + pré-excavation importante

##### 4.7.4.1 Description de la variante

Cette variante consiste à supprimer le seuil existant, (ou réaliser une encoche suffisamment large), et de modifier le profil en long de la Broye en amont afin de créer une pente du thalweg importante pour permettre aux sédiments de traverser l'ouvrage.

L'esquisse et le profil en long correspondant à cette configuration sont présentés sur la Figure 48 ci-dessous :



L'excavation à réaliser est de 18 000 m<sup>3</sup> sur un linéaire de 500 m.

##### 4.7.4.2 Résultat de la modélisation

Les résultats de la modélisation après 10 ans de charriage sont présentés sur les Figure 49 et Figure 50.

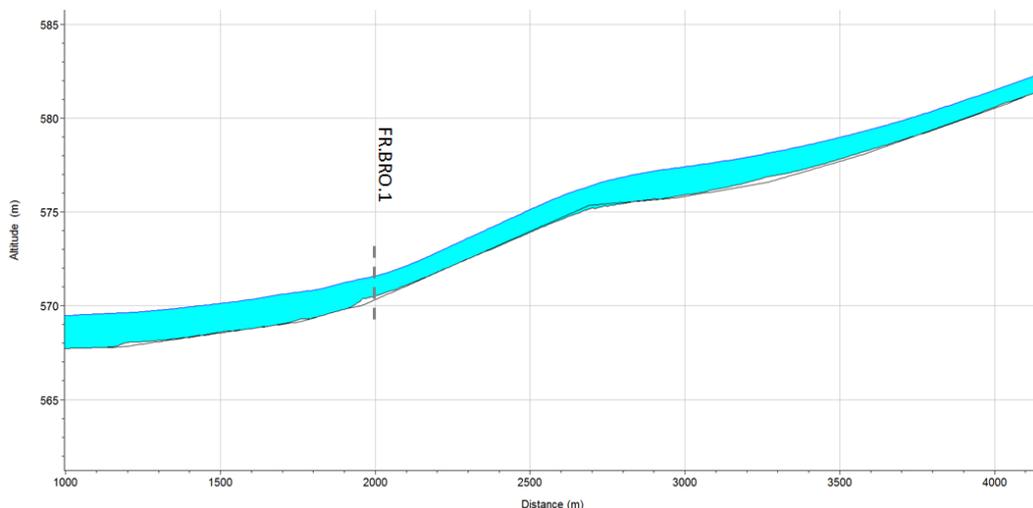


Figure 49: Evolution du thalweg après 10 ans

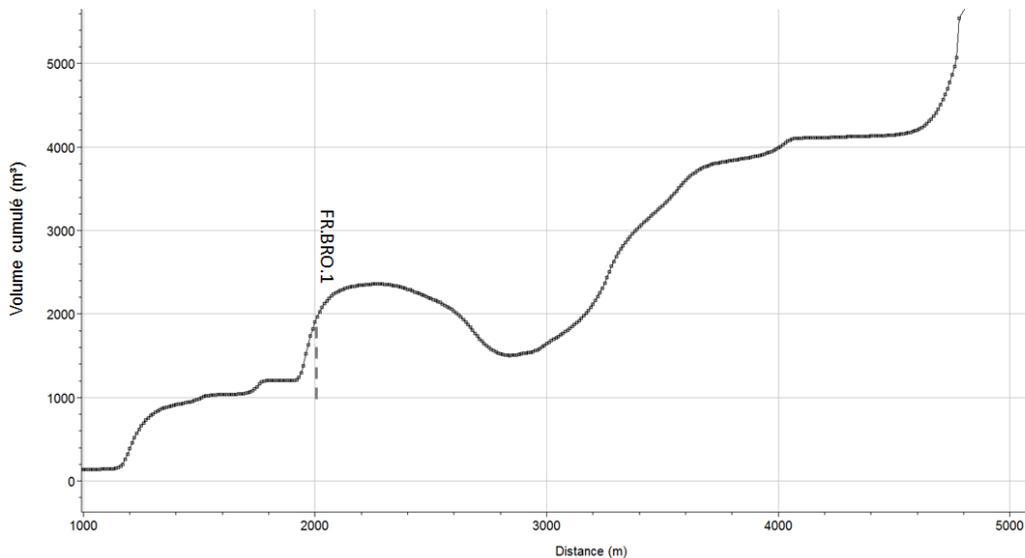


Figure 50: Volume transité cumulé après 10 ans de charriage

Cette variante permet à environ 35 % des sédiments provenant de l'amont de transiter à travers l'ouvrage, après 10 ans. De plus, une partie importante des sédiments retenus en amont de l'ouvrage est érodée et transférée vers l'aval. A long terme, l'érosion régressive va faire tendre le profil en long vers sa géométrie originelle ; nous considérons donc le potentiel de valorisation de cette variante comme important (gain de 4 classes). A court terme, cette mesure ne permet toutefois qu'un faible gain.

#### 4.7.4.3 Conclusion

Cette variante présente le meilleur gain en termes de charriage, mais le surcoût engendré par le volume supplémentaire à excaver limite quelque peu son intérêt.

Le coût de cette variante est grossièrement estimé à : **1 650 000 CHF HT**. Cela n'inclut pas les frais liés à la perte d'exploitation.

Cette estimation tient compte de l'adaptation de l'ouvrage ainsi que du volume de sédiments à excaver et à évacuer en décharge.

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans l'[Annexe 4](#).

#### 4.7.5 Synthèse des variantes

Dans les variantes étudiées, la variante 2 semble la plus intéressante, en considérant l'ensemble des éléments suivants :

- L'amélioration du régime de charriage ;
- L'évolution du risque d'inondation (pour la crue centennale) par rapport à la situation actuelle ;
- Le potentiel écologique de valorisation ;
- L'investissement nécessaire.



Lors d'une étude ultérieure, un compromis devra être trouvé entre le volume excavé et l'efficacité de transit des matériaux.

La variante 1 peut s'avérer intéressante si les matériaux situés en amont de l'ouvrage peuvent être facilement remobilisés. Les sédiments accumulés depuis la mise en place de l'ouvrage (+ de 200 ans déjà...) constitueront une source importante de sédiments pour l'aval.

De manière générale, la position de l'ouvrage sur le linéaire global de la Broye, rend toute intervention améliorant le régime de charriage **très intéressante** pour les 56 km de rivière se trouvant à l'aval.

Le développement de la variante en phase 2 devra tenir compte de l'existence d'un site de reproduction de batracien d'importance nationale (En Vuibroye) à l'amont de l'ouvrage FR.BRO.1. Son périmètre comprend une partie de la Broye. L'analyse de détail devra démontrer si la suppression du barrage portera atteinte ou non au biotope.

## 5. Le Gottéron

### 5.1 Description du BV

Le bassin versant du Gottéron (Figure 51) est décrit sur la base du résumé établi par ETEC Sàrl (2008), légèrement adapté pour respecter le besoin de l'étude présente.

Le bassin versant du Gottéron, situé à l'est et sud-est de Fribourg, appartient selon l'Atlas hydrologique au sous-bassin n° 20-291, intégré dans le bassin de la Sarine n° 20-290. Généralement peu encaissé, le bassin versant du Gottéron a une superficie voisine de 42.7 km<sup>2</sup>. La rivière (code GEWISS 1548) prend sa source au nord de Plasselb (Singine fribourgeoise), à un peu moins de 1'000 m d'altitude. Elle s'écoule en direction du nord, puis vers l'ouest et rejoint la Sarine (code GEWISS 227) à l'est de Fribourg, à une altitude de 650 m environ. Le tracé du Gottéron présente un cours naturel sur la plupart de son linéaire et coule le plus souvent en milieu boisé ou forestier. Avec une longueur de 18.1 km, la pente moyenne du Gottéron est de l'ordre de 2.3 %. Le sous-sol du bassin versant est de type quaternaire, constitué d'alluvions et de moraines, sauf dans la partie aval, où les roches sont de nature siliceuse.

Selon l'Atlas hydrologique, le régime hydrologique du Gottéron est de type nivo-pluvial préalpin (hautes eaux au printemps et basses eaux en hiver avec une amplitude relativement marquée).

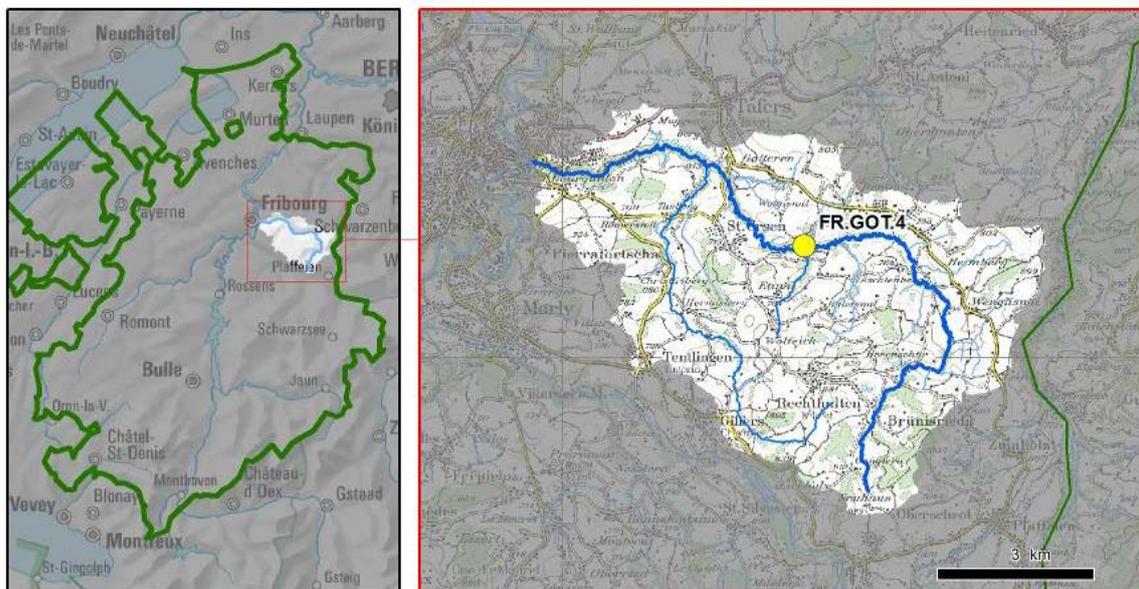


Figure 51: Bassin versant du Gottéron

### 5.2 Description du cours d'eau

Le Gottéron a une longueur totale d'environ 18 km. Sur les 6 premiers kilomètres en amont, il s'écoule en méandres dans un lit de 6 – 7 m de largeur, sous une couverture forestière. Des bancs de graviers sont observés aux endroits relativement larges (Figure 52, à gauche).



Figure 52: Le Gottéron à l'amont de l'installation - km 11.900 (gauche) et km 7.600 (droite)

Dans le tronçon suivant, plus étroit, les bancs de graviers sont moins présents. L'image de droite de la Figure 52 montre un dépôt de graviers, qui se forme à l'amont de la zone de retenue. Ce tronçon à l'amont de l'installation est limitant, en raison de sa faible pente par rapport au débit solide charrié. Sa capacité de transport est utilisée pour estimer l'apport de charriage du Gottéron, en utilisant la méthode proposée de l'OFEV (Hunziker et Lehmann, 2013).

L'installation FR.GOT.4 (km 7.400) est présentée à la Figure 53 (à gauche). Il s'agit d'une prise d'eau latérale qui crée une retenue à l'aide d'un barrage. Les deux vannes sont mobiles et peuvent être relevées en cas de crue. L'image de droite de la Figure 53 montre le lit du Gottéron à l'aval de l'installation, donc avant la confluence du premier affluent.



Figure 53: Installation FR.GOT.4 (km 7.510, gauche) et photo du lit à l'aval du barrage (km 7.400, droite)

A l'aval de l'installation FR.GOT.4, le Gottéron s'incise dans la gorge de Hintergraben. Au km 4.450 l'affluent principal du point de vue de la taille de bassin versant, le Moosbach (ou Tasbergbach) se connecte en rive gauche. Le Gottéron poursuit son cours dans la gorge du Galterengraben. Dès la fin de la gorge, au km 2.200 environ (Figure 54), le Gottéron s'écoule en bordure d'une route, jusqu'à la confluence avec la Sarine à Fribourg.



Figure 54: Après la fin de la gorge du Galterengraben (gauche, environ km 2.200), le Gottéron s'écoule à côté de la route jusqu'à la confluence avec la Sarine

### 5.2.1 Profil en long topographique

La Figure 55 représente le profil en long du Gottéron sur la base du MNT et du réseau hydrographique du canton de Fribourg.

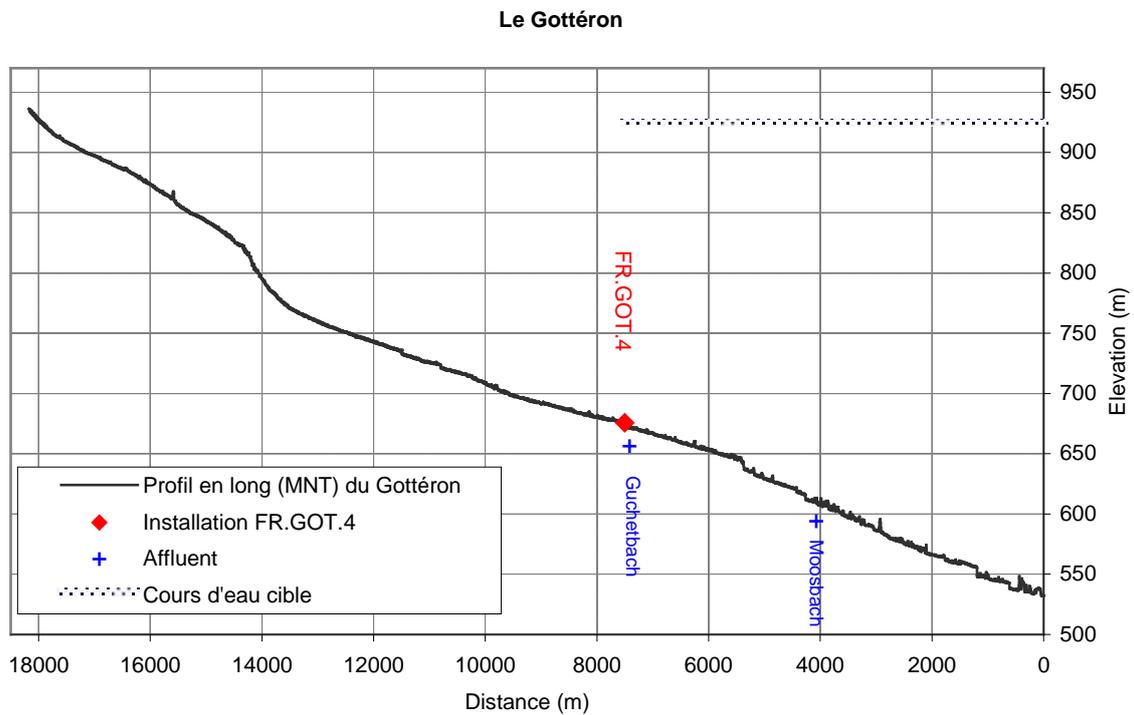


Figure 55: Profil en long topographique du Gottéron

En plus du profil en long, la Figure 55 illustre la position de l'installation FR.GOT.4 et des affluents avec un apport de matériaux charriés important (marqués avec le symbole +) sur le Gottéron.

## 5.2.2 Morphologie historique et actuelle

Les cartes historiques ne donnent que peu d'informations sur l'état historique du Gottéron. Le cours d'eau était caractérisé par une ligne étroite sans méandres, sans variabilité de largeur du lit ou bancs de graviers. Par contre, on peut observer que le tracé du Gottéron était semblable à l'état actuel. Il est donc probable que le cours d'eau à l'amont du bassin versant peut être pris comme état de référence, car il n'y a aucune altération du régime de charriage documentée. L'état écomorphologique du tronçon en amont de l'installation est évalué sur 91.5 % de celui-ci. Il est *naturel / semi-naturel* sur 35.7 % et *peu atteint* sur 55.8 %.

## 5.3 Estimation de la charge solide

Le Tableau 20 présente les sites auxquels des calculs de capacité de transport ont été effectués. Il n'y a pas de site d'extraction de gravier sur le Gottéron ni de mesures de quantité de gravier qui permettraient de caler les calculs. L'estimation du débit solide se base sur la méthode des capacités de transport de l'aide à l'exécution. Les paramètres de calcul ont été déterminés sur le terrain (granulométrie, largeur du lit, ...) et sur la base des données existantes (pente, longueur du cours d'eau, surface du bassin versant, débit de crue, ...). Les résultats sont présentés dans le Tableau 20 et à l'[Annexe 2](#).

Tableau 20: Calcul de capacité de transport sur le Gottéron

Cours d'eau	Distance (km)	Capacité minimale de transport solide (m <sup>3</sup> /a)	Capacité maximale de transport solide (m <sup>3</sup> /a)
Le Gottéron	7.600	790	1'580
Le Gottéron	1.200	2'500	5'000

Le manque d'observation et de mesures (par exemple extraction) rend difficile la consolidation des résultats du calcul. Par rapport à l'estimation du débit de charriage nécessaire, les capacités de transport calculées semblent élevées. Une capacité de transport plus élevée que l'apport de charriage favorise la formation d'un pavage. Ceci n'est pas observé à l'aval de l'installation, donc à l'endroit du calcul de capacité de transport. En l'absence d'extraction ou d'installation sur le Gottéron jusqu'à km 7.510, il est supposé que l'apport de charriage correspond à l'apport à l'état naturel, donc au charriage nécessaire. Pour estimer le débit charrié sur le Gottéron à l'amont de l'installation FR.GOT.4, les valeurs du débit nécessaire à l'état naturel sur le tronçon en méandres au km 11.900 sont reprises (voir Tableau 21). Leur détermination est documentée au chapitre 5.4.

L'application de la méthode de la capacité de transport (Hunziker et Lehmann, 2013) aux affluents Guchetbach et Moosbach donne de très grandes valeurs. De tels apports devraient être visibles à la confluence avec le Gottéron. Cela n'a pas été observé lors des visites de terrain. Pour le Guchetbach, un débit solide entre 150 et 300 m<sup>3</sup>/a est estimé. Il est cohérent avec la capacité du Gottéron et les apports à l'amont. Environ 150 m à l'amont de la confluence, il y a une prise d'eau latérale, qui est complètement remplie de sable (Figure 56, gauche).



Figure 56: Affluents du Gottéron: le Guchetbach (gauche, km 7.400) et le Moosbach (droite, km 4.080)

Le Moosbach (également nommé Tasbergbach ou Frohmattbach) s'écoule peu avant la confluence avec le Gottéron directement sur le soubassement rocheux (Figure 56, droite). Il n'y a que des dépôts isolés de graviers. A l'amont de la vallée du Galterengraben, le cours d'eau est principalement corrigé et parfois mis sous tuyau. Sur la base de ces restrictions en termes d'apport, on estime la charge solide relativement basse entre 250 – 500 m<sup>3</sup>/a

Sur la base des calculs ponctuels de capacité de transport et de l'interprétation des résultats basée sur les visites de terrain, les débits solides suivants sont considérés pour le Gottéron:

Tableau 21: Table de synthèse - débit solide charrié estimé sur le Gottéron et ses affluents

	Distance (km)	Débit solide min (m <sup>3</sup> /a)	Débit solide max (m <sup>3</sup> /a)	Source
Apport du BV	11.900	425	635	Charriage nécessaire
Affluent Guchetbach	7.400	150	300	Calcul / expertise
Affluent Moosbach	4.080	250	500	Calcul / expertise

#### 5.4 Estimation du débit de charriage nécessaire

Le chapitre 4.4 présente la méthode de calcul du débit de charriage nécessaire. Le Tableau 22 présente les résultats pour le Gottéron.

Tableau 22: Débit de charriage nécessaire estimé sur le Gottéron

Distance (km)	Morphologie (Critères de Yalin et da Silva, 1991)	B <sub>R</sub> (m)	Débit solide nécessaire	
			(limite inf. m <sup>3</sup> /a)	(limite sup. m <sup>3</sup> /a)
11.900	lit droit	13.8	170	455
7.600	lit droit	19.1	327	873
7.200	lit droit	18.9	321	855
1.200	lit droit	21.7	425	1133

#### 5.5 Quantification de l'impact de l'installation FR.GOT.4

Le Gottéron a été analysé de façon détaillée dans le voisinage de l'installation. On remarque que:

- Le seuil est rempli à l'amont du barrage.
- Il y a un dépôt de matériaux à l'amont de la zone de retenue – le transport solide est assuré pour les grandes crues
- Présence de gravier directement en aval de l'installation – avant l'affluent suivant
- Aucune extraction de graviers

En aval de l'installation, le lit du Gottéron est composé de plus en plus d'éléments d'un diamètre supérieur à 15 cm. Par contre, la granulométrie sur les bancs de gravier est plus fine qu'à l'amont.



*Le Gottéron, km 7.200:  
Directement à l'aval de l'installation  
FR.GOT.4, le lit du cours d'eau présente une  
grande diversité granulométrique. La granu-  
lométrie des bancs indique un diamètre plus  
faible qu'à l'amont de l'installation ; dans un  
même temps, les éléments d'un diamètre  
d'environ 15 – 20 cm sont présents en pro-  
portion croissante.*

Sur la base de la distribution des graviers directement en aval de l'installation, on peut admettre qu'une nouvelle dynamique s'est installée après la construction du barrage et que le tronçon a retrouvé un état d'équilibre. Le tronçon est dans un état non altéré, ce qui suggère que la transition vers le nouvel équilibre s'est produite sans conséquence durable.

Degré d'atteinte au régime de charriage de l'installation FR.GOT.4: **nulle (0 %)**.

## 5.6 Evaluation des atteintes à la protection contre les crues

L'atteinte à la protection contre les crues est également nulle, selon l'analyse de la carte des dangers.

## 5.7 Etablissement du profil en long de charriage - Bilan de transport solide

Sur la base des débits solide charriés estimés (Tableau 21) et de l'impact de l'installation FR.GOT.4 (chapitre 5.5), le profil en long de charriage suivant peut être établi (Figure 57):

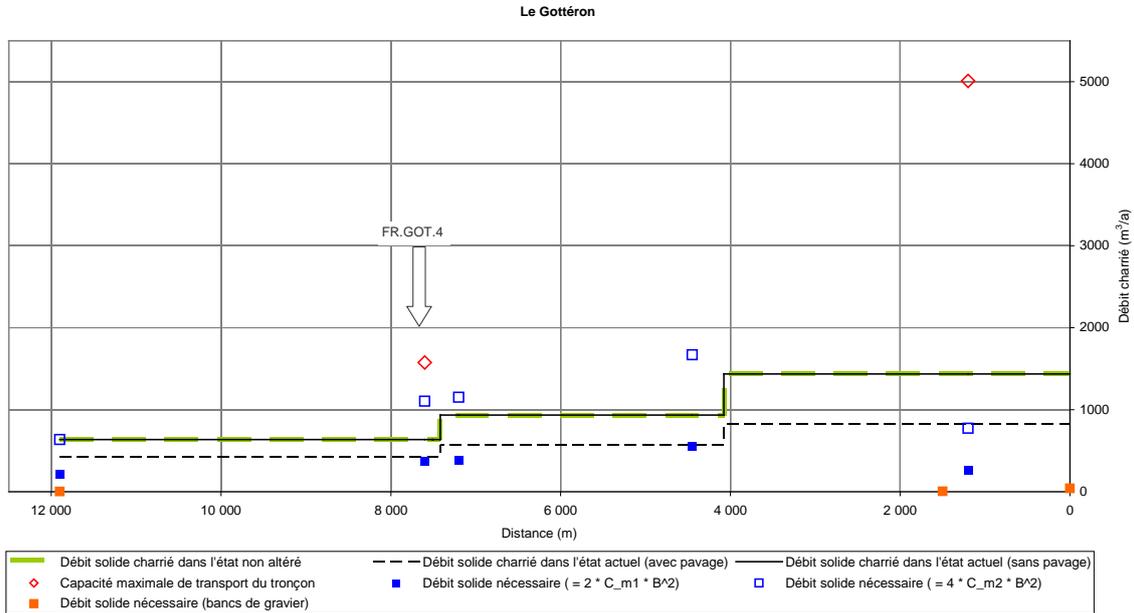


Figure 57: Profil en long de charriage du Gottéron

On observe que le débit de charriage actuel est égal au débit de charriage en situation non altérée et qu'il est supérieur au débit de charriage nécessaire.

### 5.8 Proposition de mesure d'assainissement

Aucune mesure d'assainissement n'est nécessaire.

## 6. L'Hongrin

### 6.1 Description du bassin versant

La description du bassin versant (Figure 58) est reprise du rapport de GREN (2013):

"L'Hongrin prend sa source à l'est du col des Mosses, sur le territoire de la commune de Ormont-Dessous. Situé dans un cirque montagneux, au pied du Pic Chaussy, il forme le lac Lioson, petit lac de montagne situé à 1848 m d'altitude.

En aval, le cours d'eau descend ensuite rapidement jusqu'au village de La Lécherette puis il poursuit son cours et forme le lac artificiel de l'Hongrin. La particularité du barrage qui engendre ce lac est sa double voûte, l'une de 95 m et l'autre de 123 m de haut, jointes par une culée centrale construite sur un promontoire rocheux naturel. Sa construction a nécessité cinq ans de travaux, entre 1966 et 1971.

Implanté au confluent des deux rivières, l'Hongrin et le Petit Hongrin, la retenue occupe 160 ha et récolte les précipitations d'un bassin versant d'environ 46 km<sup>2</sup>. A cela s'ajoute l'apport de huit prises d'eau situées entre six et dix kilomètres à vol d'oiseau du barrage, représentant un bassin versant de 45 km<sup>2</sup> constitué par les vallées avoisinantes. Plus de 20 km de galeries ont été creusées pour l'acheminement de l'eau jusqu'à la retenue. Ces conduites rejoignent la retenue en pente régulière permettant à l'eau de s'écouler par gravité.

En aval du barrage, l'Hongrin s'écoule dans la vallée très encaissée qui porte son nom. Son parcours devient tumultueux avec une succession rapide de goulots d'étranglement et de zones plus larges. Il entre dans le canton de Fribourg 3 km en aval du barrage où il parcourt environ 8 km avant de se jeter dans la Sarine au niveau de la retenue de Montbovon."

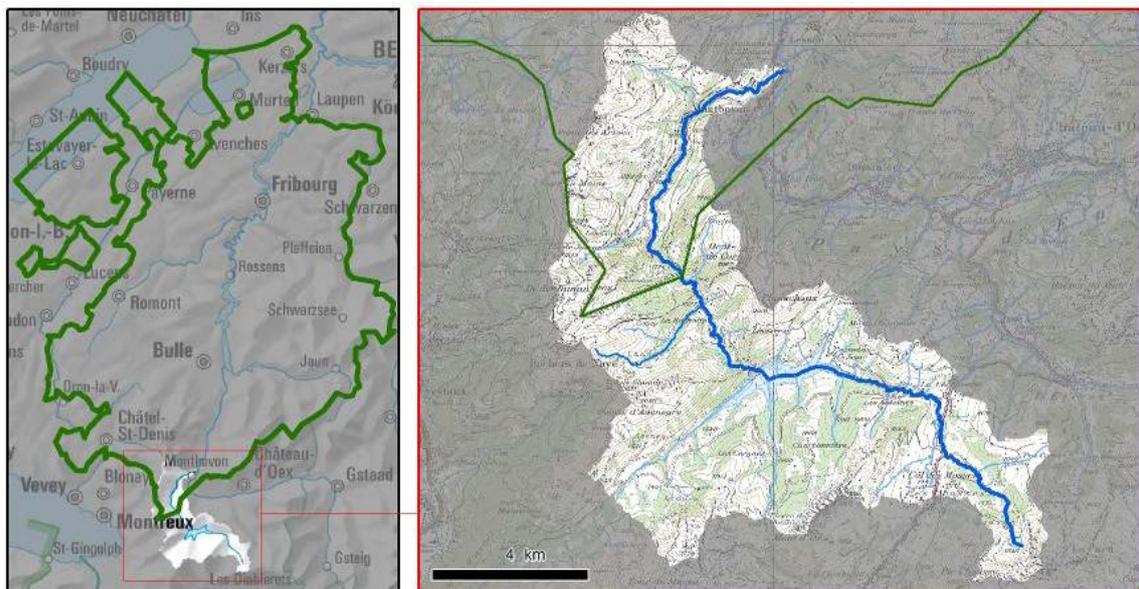


Figure 58: Bassin versant de l'Hongrin

## 6.2 Description du cours d'eau

L'Hongrin en amont du barrage de l'Hongrin n'est pas étudié dans le cadre de ce mandat. Par contre, les résultats provisoires de la planification de l'assainissement du régime de charriage du canton de Vaud sont utilisés dans le cadre du présent rapport. La description du cours d'eau est résumée ici:

"En amont du lac de l'Hongrin, le cours d'eau est naturel et sans installation, mis à part quelques aménagements ponctuels. En sortant du lac Lioson, l'Hongrin dégringole (pente jusqu'à 30%) le flanc pour arriver au col des Mosses. De là, il coule avec une pente majoritairement inférieure à 5% jusqu'à la Lécherette (km 18.000). Le substrat y est en partie recouvert d'algues et de mousse. Après la Lécherette, le cours d'eau s'enfonce quelque peu dans le terrain avant de voir sa pente augmenter (jusqu'à 10%) aux environs de l'embouchure du torrent des Anteines (km 16.012) et couler dans une gorge jusqu'au lac de l'Hongrin. (...) Il n'y a pas d'extraction de matériaux dans le lac de l'Hongrin, ni d'ailleurs dans son bassin-versant. L'eau du lac est turbinée dans l'usine de Veytaux (puis rejetée dans le lac Léman, bassin-versant du Rhône). (...) Le débit de dotation en aval du barrage est fixé à 50 l/s<sup>13</sup>. (...) En aval de l'Hongrin, le cours d'eau est sans installation. La végétation pousse dans le lit et le substrat du lit mouillé est recouvert d'une pellicule gluante, signe que la dynamique de charriage est faible" (Planification de l'assainissement du régime de charriage du Canton de Vaud, rapport intermédiaire provisoire, 2013).

La situation actuelle s'explique par les travaux sur le barrage et sa vidange durant l'hiver 2012-2013. Il est probable que la situation de l'Hongrin sera différente dans quelques années. L'état de l'Hongrin avant les vidanges était décrit par CSD (2012) de la façon suivante: "*colmatage général du lit par de la vase organique, envahissement du lit par de la végétation herbacée et ligneuse, manque de diversité de la granulométrie du substrat*".



Figure 59: L'Hongrin et à la zone de la confluence du R. de Chaude (gauche, km 9.575) et à km 8.100, où le cours d'eau est alimenté par des apports latéraux

Directement avant la limite cantonale, le Ruisseau de Chaude se jette dans l'Hongrin. Dans la région de la confluence, on peut observer d'importants dépôts issus d'un épisode de transport très important. Malgré des extractions de 3'000 m<sup>3</sup> déposés sur le flanc droite du R. de Chaude, ils restent sur les deux côtés de l'Hongrin des matériaux de charriage mobilisables (Figure 59, gauche). Environ 1.5 km plus en aval, l'Hongrin érode la base d'une berge à forte déclivité sur

<sup>13</sup> L'assainissement de ce débit résiduel est actuellement en discussion entre les cantons de Vaud et de Fribourg, mais la valeur n'a pas encore pu être fixée.

une centaine des mètres. (Figure 59, droite) Dès le km 6.000, l'Hongrin s'écoule dans une gorge peu accessible.

Sur le dernier kilomètre à l'amont de la confluence de l'Hongrin dans le lac de Montbovon, le cours d'eau coule toujours dans cette même vallée. Au km 0.400, la topographie s'ouvre et la rivière s'élargit (Figure 60).



Figure 60: Derniers 1000 m de l'Hongrin avant la confluence dans le lac de Montbovon.

La Figure 61 illustre les types de matériaux et de morphologie présentent:

1. Couche de pavage avec matériaux de 15-20 cm (voir également Figure 60, droite) ;
2. Eléments structurant de taille beaucoup plus importante avec présence de mousse ;
3. Beaucoup de charriage avec un diamètre de 2 - 3 cm, déposé sur le lit existant.



Figure 61: Types de matériaux et de formes présentes sur l'Hongrin

La formation de cette morphologie dans l'Hongrin n'est pas claire. Les causes possibles sont les vidanges du barrage et les crues associées, les apports massifs en provenance du Ruisseau de Chaude ou un autre apport.

La totalité du débit charrié sur l'Hongrin se dépose dans la zone de la confluence avec le lac de Montbovon. Cette zone est bien visible en traversant le pont de l'Hongrin sur la route cantonale entre Montbovon et Lessoc.

### 6.2.1 Profil en long topographique

La Figure 62 représente le profil en long de l'Hongrin sur la base du MNT et du réseau hydrographique du canton de Fribourg.

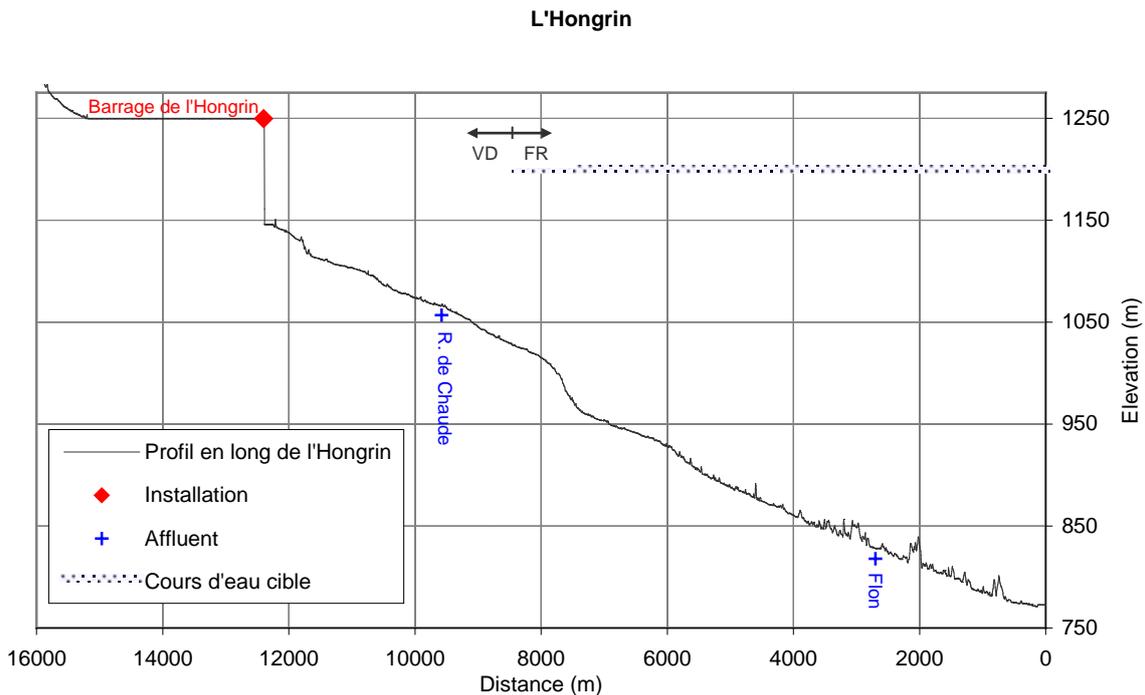


Figure 62: Profil en long topographique de l'Hongrin

En plus du profil en long, la Figure 62 illustre la position du barrage de l'Hongrin, des affluents avec un apport des matériaux charriés marquant (marqué avec le symbole +), la frontière cantonale et donc le tronçon cours d'eau cible de l'Hongrin sur le canton de Fribourg.

### 6.2.2 Morphologie historique et actuelle

Un tronçon à l'amont du lac de l'Hongrin peut être utilisé comme état de référence naturelle de la morphologie historique du cours d'eau. A cet endroit, l'Hongrin est de type méandrique peu marqué. Il y a un léger pavage sur ce tronçon. L'état actuel à l'aval de la frontière cantonale VD / FR présente un cours d'eau avec des bancs alternés et une morphologie qui ne semble être que peu altérée. L'état actuel est probablement fortement influencé par la vidange du lac en hiver 2012 / 2013.

## 6.3 Estimation de la charge solide

### 6.3.1 Etude sur le charriage, VD

L'Hongrin a été analysé jusqu'à la confluence avec le R. de Chaude dans le cadre de l'étude de l'assainissement du régime de charriage du canton de Vaud. Selon les résultats provisoires, le débit charrié des affluents du lac de l'Hongrin est faible: le charriage naturel de l'Hongrin est estimé à 100 m<sup>3</sup>/a. Cette valeur est basée sur les observations suivantes.

"Premièrement, les matériaux provenant du cirque rocheux en amont du lac Lioson vont être piégés par celui-ci. Les matériaux mobilisés dans la descente de l'Hongrin sur le col des Mosses vont être en grande partie déposés sur sa partie plus plate en amont de la Lécherette. De plus, le débit de crue sortant du lac Lioson va être laminé par celui-ci, limitant par là même l'érosion du tronçon raide et les apports dans le tronçon aval. Deuxièmement, la morphologie de l'Hongrin entre le col des Mosses et la Lécherette est peu variée: Le substrat est recouvert par de la mousse et des algues et un léger pavage du lit est présent. Cela indique que le charriage est faible. Troisièmement, aucun dépôt de sédiments dans le lac de l'Hongrin n'est connu. Lors de la vidange de 2013, rien de tel n'a été observé et les installations du barrage n'ont aucune trace d'usure, ce qui suggère un niveau de particules en suspension bas. Des 100 m<sup>3</sup> aboutissant annuellement dans le lac, une part importante (estimée à 50 m<sup>3</sup>/a) provient du torrent des Antaines." (Planification de l'assainissement du régime de charriage du Canton de Vaud, rapport intermédiaire provisoire, 2013)

Il est estimé que les autres affluents du lac de l'Hongrin apportent le même débit de charriage, qui fait augmenter le débit charrié naturel à environ 200 m<sup>3</sup>/a. L'apport du R. de Chaude est estimé à 300 m<sup>3</sup>/a. Cette valeur est réaliste pour un cours d'eau avec un potentiel de laves torrentielles sur le long terme.

### 6.3.2 Estimation selon la méthode de la capacité de transport

La méthode de la capacité de transport est appliquée à deux tronçons limitants (Tableau 23).

Tableau 23: Calcul de capacité de transport sur l'Hongrin

Cours d'eau	Distance (km)	Capacité de transport solide (m <sup>3</sup> /a)
L'Hongrin (état actuel)	8.250	3'500 (± 1'150)
L'Hongrin (état actuel)	0.300	900 (± 250)
L'Hongrin (état naturel)	0.300	1050 (± 350)

L'estimation de la capacité de transport a été réalisée pour l'état actuel (avec le barrage de l'Hongrin) et pour l'état naturel (sans barrage). Une évaluation de la granulométrie historique a été réalisée au km 0.300 sur le site d'un ancien dépôt (voir Figure 61, chiffre 2). Au km 8.250, il n'y a pas de site visible permettant de déterminer la granulométrie historique de l'Hongrin. C'est pourquoi cette donnée est manquante. Les paramètres de calculs de la capacité de transport sont présentés dans [l'Annexe 2](#).

La capacité de transport au km 8.250 est plus élevée que le débit de charriage naturel. Comme expliqué au chapitre 6.3.1, la mobilisation du charriage dans le bassin versant de l'Hongrin est faible – le débit de matériaux charriés sur ce tronçon est déterminé par l'apport, et non par la capacité de transport.

Autour du km 0.300, l'Hongrin montre un surplus de sédiments. Il s'agit de sédiments présentant un diamètre inférieur aux diamètres des sédiments historiques du lit. Sur la base des visites de terrain, on peut conclure que la capacité de transport est dépassée sur ce secteur et que les apports latéraux (petits affluents, berges) dans le secteur des gorges sont déposés ici (km 6.000 à 1.000, Figure 63). L'apport de charriage de l'Hongrin dans le lac de Montbovon est estimé à 900 m<sup>3</sup>/a dans l'état actuel, et à 1050 m<sup>3</sup>/a dans l'état naturel.

### 6.3.3 Estimation du débit de charriage sur les affluents

Les deux plus longs affluents de l'Hongrin sur le territoire du canton de Fribourg sont le Ruisseau de Case (confluence km 6.425, bassin versant 4.3 km<sup>2</sup>) et le Flon (km 2.700, b.v. de 3.9 km<sup>2</sup>). Les apports de ces affluents sont basés sur les similitudes avec le R. Chaude situé dans le même secteur. Le R. de Cases présente moins de signes de transport solide que le R. de Chaude, le débit solide est estimé à 150 m<sup>3</sup>/a, alors que pour le Flon dont le bassin versant est légèrement plus petit que celui du R. de Chaude, le transport est estimé à 250 m<sup>3</sup>/a.

### 6.4 Estimation du débit de charriage nécessaire

"Jusqu'au R. de Chaude (km 9.575), le débit de charriage nécessaire correspond au débit de charriage naturel. En aval du ruisseau de Chaude, le débit de charriage nécessaire est estimé légèrement supérieur au débit de charriage actuel, à savoir 400 m<sup>3</sup>/an (l'impression donnée sur le terrain est bonne, et le rapport CSD de 2012 ne parle que d'« *une diversité granulométrique du substrat peu atteinte* »)" (Planification de l'assainissement du régime de charriage du Canton de Vaud, rapport intermédiaire provisoire, 2013).

Selon la méthode présentée dans chapitre 4.3, un débit de charriage nécessaire est estimé sur l'Hongrin aux km 8.250 et 0.300 (Tableau 24). La largeur déterminante pour estimer la surface des bancs est choisie comme la largeur actuelle, en assumant que l'Hongrin s'écoule dans un lit naturel et que sa largeur est contrainte par la topographie.

Tableau 24: Débit de charriage nécessaire estimé sur l'Hongrin

Distance (km)	Morphologie (Critères de Yalin et da Silva, 1991)	B <sub>R</sub> (m)	Débit solide nécessaire (m <sup>3</sup> /a)
8.250	bancs alternés	8	150
0.300	bancs alternés	14	470

### 6.5 Quantification de l'impact du barrage de l'Hongrin

Selon le rapport provisoire de l'assainissement du régime de charriage du canton de Vaud, l'atteinte sur le tronçon à l'aval du barrage du lac de l'Hongrin est très prononcée, son niveau de charriage est considéré comme quasiment nul.

A partir de la frontière cantonale, il "n'est plus atteint qu'avec un degré faible : en effet la morphologie en aval du ruisseau de Chaude est visuellement bonne et la granulométrie similaire à celle du tronçon en amont du lac. Le débit de charriage actuel n'est donc que légèrement inférieur à la valeur nécessaire" (Planification de l'assainissement du régime de charriage du Canton de Vaud, rapport intermédiaire provisoire, 2013).

On peut conclure que le barrage de l'Hongrin ne cause **aucune atteinte (0 – 20 %)** sur la totalité du tronçon fribourgeois du cours d'eau cible de l'Hongrin.

## 6.6 Evaluation des atteintes à la protection contre les crues

Concernant son influence sur la protection contre les crues, le barrage de l'Hongrin a un effet positif de par sa capacité de turbinage vers le lac Léman (autre bassin versant) et sa capacité de rétention d'eau.

## 6.7 Etablissement du profil en long de charriage - Bilan de transport solide

Sur la base des débits solide charriés estimés (chapitre 6.3) et de l'impact du barrage de l'Hongrin (6.5), le profil en long de charriage suivant peut être établi (Figure 63):

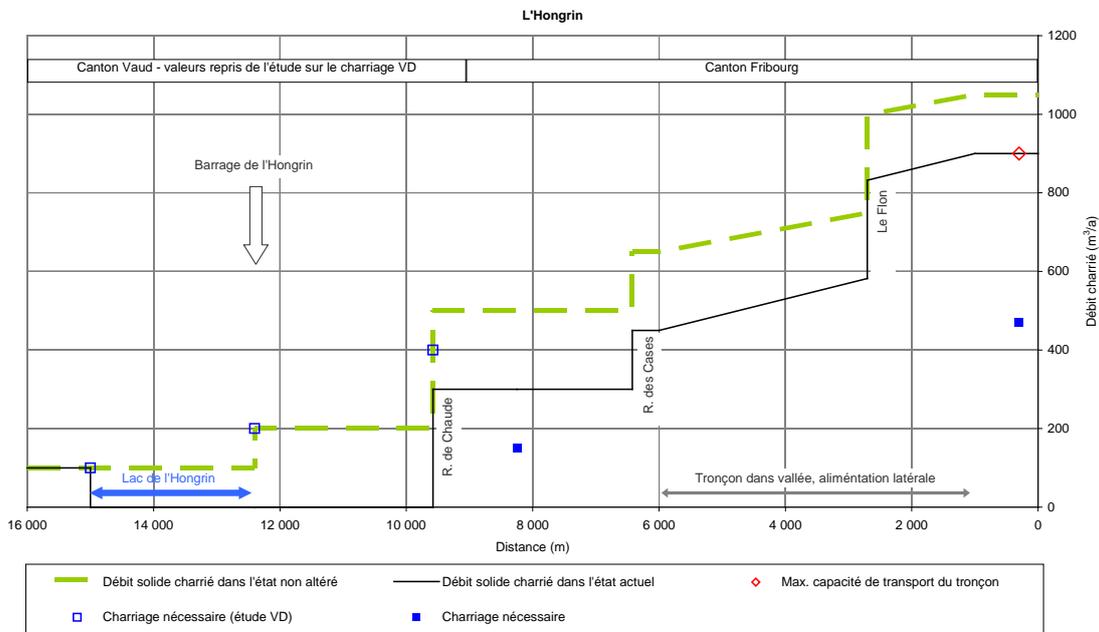


Figure 63: Profil en long de charriage de l'Hongrin

En plus de l'estimation du degré d'atteinte au régime de charriage du barrage de l'Hongrin, une évaluation de l'état actuel des tronçons sur le territoire fribourgeois par rapport au débit de charriage nécessaire, ce dernier étant calculé pour un état proche de l'état naturel, a été élaborée. L'estimation du débit de charriage nécessaire se base sur l'hypothèse de la planification du Canton de Vaud, selon laquelle cette valeur se trouve à environ  $100 \text{ m}^3/\text{a}$  au-dessous du débit de charriage naturel. Sur cette base, l'état des tronçons de l'Hongrin sur le Canton de Fribourg est estimé et résumé dans le Tableau 54 au chapitre 0.

## 6.8 Proposition de mesure d'assainissement

Selon la méthodologie de l'OFEV (Schälchli et Kirchhofer, 2012), un assainissement n'est pas nécessaire. Il faut noter que l'état du cours d'eau est fortement influencé par la vidange de l'ouvrage durant l'hiver 2012/2013. Il est recommandé de suivre régulièrement l'état du cours d'eau,



notamment en termes de pavage, colmatage, granulométrie charriée, présence de mousse dans le lit.

#### **6.9 Influence des mesures prises par le canton de Vaud sur le tronçon Fribourgeois**

Le canton de Vaud doit prendre des mesures pour le tronçon situé directement à l'aval du barrage.

Le premier type de mesure envisagé par le canton de Vaud est la réalisation de crues artificielles (volume d'eau de 200'000 m<sup>3</sup>/an). La recharge en sédiments devrait en principe être garantie par la zone d'éboulis, en contrebas du barrage. Si cela ne suffit pas, des graviers extraits dans le ruisseau de Chaude après les événements de 2010 pourraient être injectés dans l'Hongrin. Deux endroits favorables ont été identifiés.

Le rapport vaudois précise que les mesures proposées seraient également bénéfiques pour la partie fribourgeoise, même si aucune atteinte grave n'est actuellement relevée sur le tronçon fribourgeois.

## 7. Le Javroz

### 7.1 Description du BV

Le Javroz draine un bassin versant de 39.4 km<sup>2</sup> pour une longueur de 7.8 km (Figure 64). Il ne présente pas de renforcements de berges généralisés. Des seuils et des consolidations locales sont cependant visibles par endroit. Le Javroz est avec la Jogne un des affluents du lac de Montsalvens créé par la construction du barrage du même nom en 1920. Les eaux du lac sont turbinées à l'usine de Broc.

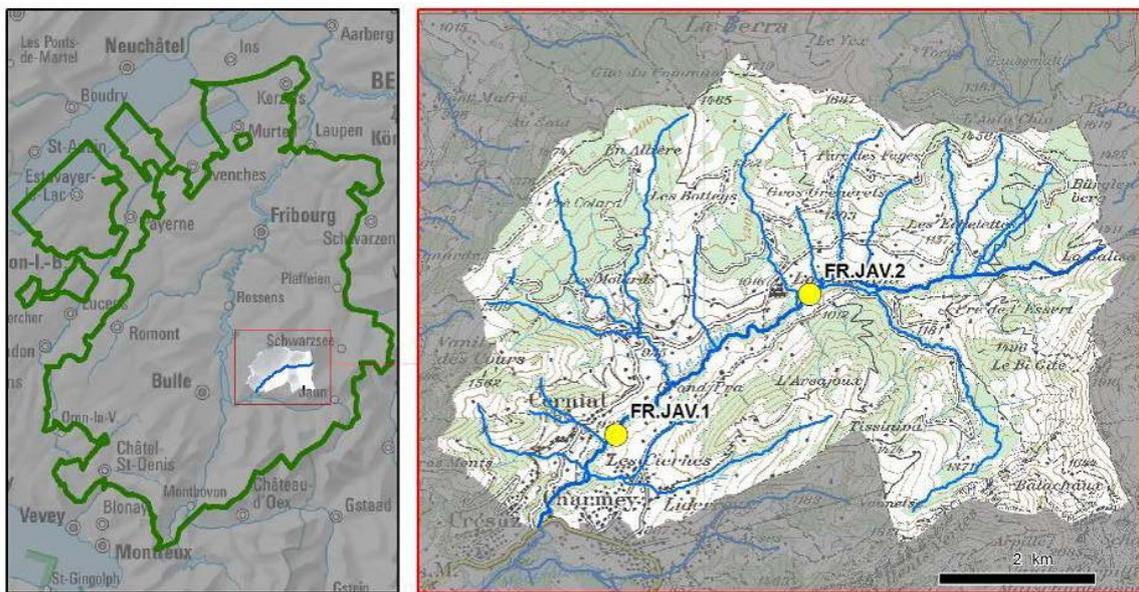


Figure 64: Bassin versant du Javroz

### 7.2 Description du cours d'eau

Le tronçon cible du Javroz débute 5.5 km à l'amont de son embouchure dans le lac de Montsalvens. Il y a à cet endroit une extraction de gravier exploitée uniquement en 2011 (site "Reposoir", installation FR.JAV.2, Figure 65). Un volume de 4500 m<sup>3</sup> de matériaux a été extrait à l'amont d'une passerelle pour des raisons de protection contre les crues.



Figure 65: Site de l'ancienne extraction de gravier à l'amont de la passerelle (km 5.450)

A l'aval, le Javroz s'écoule jusqu'au km 2 parfois en tresses, parfois en bancs alternés. A aucun moment l'on n'observe un écoulement sur le rocher. Il y a des aménagements de berges ponctuels. Sur sa majeure partie, le cours d'eau est dans un état naturel (Figure 66).



Figure 66: Le Javroz entre les deux installations Reposoir (km 5.450) et Chenevières (km 1.850)

A environ 2 km à l'amont de l'embouchure du Javroz dans le lac de Montsalvens, il y a un tronçon de 150 m de longueur avec une pente très faible, provoqué par deux barrages artificiels d'une hauteur d'environ 8 m au total (Figure 67). L'installation FR.JAV.1 se trouve juste à l'amont des seuils. Un prélèvement de 2800 m<sup>3</sup>/an y est autorisé.



Figure 67: Barrages du Javroz (droite) avec le secteur à faible pente en amont (gauche).

A l'aval des seuils, le Javroz continue de couler dans un lit largement naturel, avec des protections de berges ponctuelles. Au km 0.850 il y a de nouveau un barrage d'une hauteur de 6 m. Aucune extraction de gravier n'est réalisée à cet endroit. Pendant la visite de terrain en 2013, des travaux d'entretien du barrage et de ses abords ont eu lieu (Figure 68, à gauche).



Figure 68: Barrage du Sapex à km 0.850 (en haut à gauche) et situation environ 100 m à l'aval (en haut à droite). Traces d'érosion des berges (en bas).

### 7.2.1 Profil en long topographique

La Figure 69 représente le profil en long topographique du Javroz avec les deux installations évaluées et le tronçon défini comme cours d'eau cible.

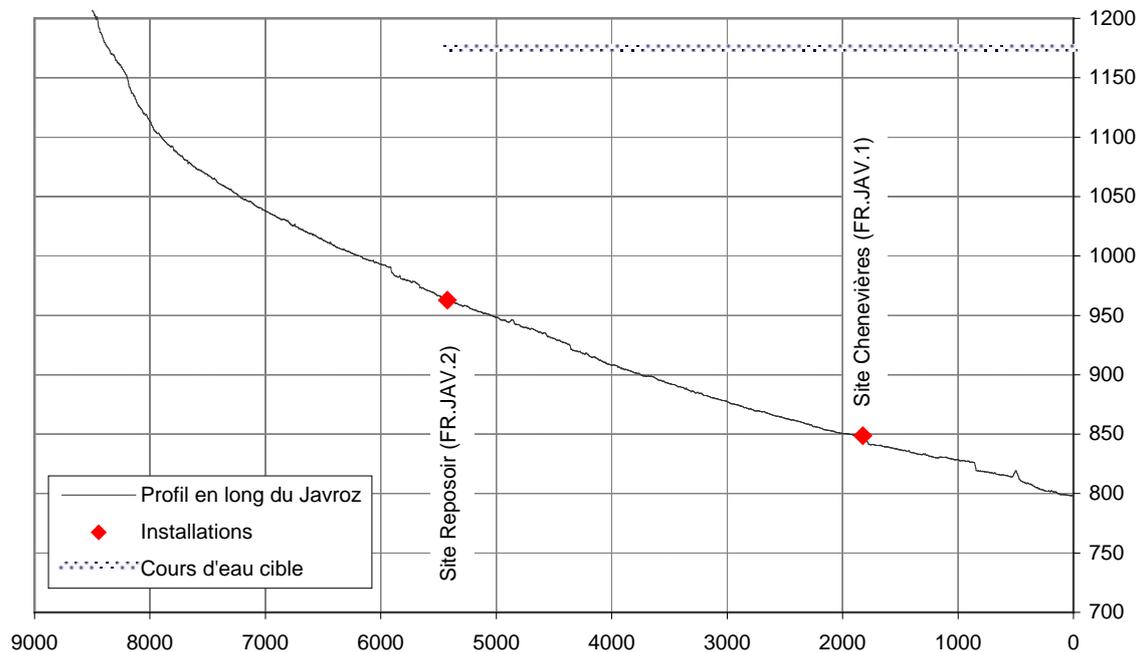


Figure 69: Profil en long topographique du Javroz

## 7.2.2 Morphologie historique et actuelle

Le Javroz transporte une grande quantité de matériaux solides. Il s'écoule en tresses ou dans un lit rectiligne avec des bancs importants de graviers et cailloux. Il y a plusieurs seuils pour protéger le lit de l'érosion. A l'aval de l'installation FR.JAV.1, les indicateurs d'érosion sont plus marqués qu'à l'amont, cependant la granulométrie reste semblable.

## 7.3 Estimation de la charge solide

### 7.3.1 Etudes existantes

Les informations suivantes se basent sur deux études:

- Jaeggi, M. (2013): Assainissement du charriage de la Jogne. Rapport technique
- PERSS Ingénieurs-Conseils SA (2009): Le Javroz et ses affluents. Rapport technique.

Jaeggi (2013) se focalise dans son étude plutôt sur le régime de charriage de la Jogne. Etant l'affluent le plus important du lac de Montbovon après la Jogne, une estimation du débit charrié a également été faite pour le Javroz. Jaeggi (2013) chiffre le débit à 6'000 m<sup>3</sup>/a à l'état naturel et tendant vers 0 m<sup>3</sup>/a à l'état actuel. Son commentaire sur le calcul est cité comme suit: "Le calcul pour une section représentative du Javroz et pour la courbe de débits classés (...) donne une capacité de transport maximale de 6'000 m<sup>3</sup>/a. Le profil en long du Javroz (...) correspond à un profil de déposition car on observe une diminution sensible de la pente longitudinale. Pour des conditions naturelles, le volume transporté devrait donc être de l'ordre de grandeur de la valeur calculée. Sous l'influence des prélèvements, le transport effectif peut donc être fortement réduit et même devenir insignifiant."

PERSS (2009) calcule un apport annuel moyen du Javroz dans le lac de Montsalvens d'environ 25'000 m<sup>3</sup>/a, au moyen d'une modélisation du charriage. Selon PERSS, cette valeur est confirmée par les analyses bathymétriques du lac de Montsalvens. Ces dernières ont déterminé un alluvionnement entre 1968 et 2006 d'environ 30'000 m<sup>3</sup>/a (selon PERSS, 2009).

### 7.3.2 Calcul de capacité de transport

Le calcul de la capacité de transport a été réalisé (selon Hunziker et Lehmann, 2013) sur un tronçon à l'amont de l'installation FR.JAV.1 (km 2.300 à 2.950) avec une pente de 2.6 % et une largeur moyenne d'environ 17 m. La granulométrie a été prélevée à l'amont de la zone influencée de l'installation (Figure 66, à gauche). Pour ce tronçon, la capacité de transport et donc l'apport de charriage vers l'installation FR.JAV.1 juste à l'aval du tronçon est estimé à 4'850 à 8'050 m<sup>3</sup>/a. La valeur conservée est de 6'500 m<sup>3</sup>/a.

### 7.3.3 Synthèse et estimation de la charge solide

Au premier abord, les valeurs des études antérieures et des calculs de la présente étude semblent relativement éloignées, de 6'000 à 30'000 m<sup>3</sup>/a. L'explication se trouve dans les différentes granulométries utilisées par les trois études (Tableau 25).

Tableau 25: Comparaison des diamètres utilisés pour le calcul de capacité de transport

	$d_m$ (cm)	Capacité de transport (m <sup>3</sup> /a)
Jaeggi (2013)	7.09	6'000
PERSS (2009)	2.9	30'000
BG (2013)	6.5	6'500

La bathymétrie du lac de Montsalvens (Groupe E, 2012) prend en compte le "volume total des sédiments accumulés". Le tronçon évalué du lac tient compte des apports de la Jogne. Son apport solide est estimé dans l'étude Jaeggi (2012) à 1'000 m<sup>3</sup>/a. La charge solide totale entrant dans le lac de Montsalvens selon l'étude Jäggi et la présente étude est donc de 6'500 + 1'000 = 7'500 m<sup>3</sup>/a. Avec un alluvionnement annuel moyen de 27'295 m<sup>3</sup>/a du lac, la partie des sédiments fins est calculée à 0.725 (calcul:  $1 - 7'500 / 27'295$ ). Le pourcentage de charriage du transport total est donc estimé à 27.5 %. Pour un cours d'eau alpin à forte pente et un bassin versant avec une grande disponibilité en apports solides, cette valeur est raisonnable.

Le débit de charriage à l'état naturel du Javroz est donc estimé à 6'500 m<sup>3</sup>/a.

## 7.4 Estimation du débit de charriage nécessaire

Le régime de charriage du Javroz n'étant pas influencé dans la partie à l'amont de l'installation FR.JAV.1, le débit de charriage nécessaire est équivalent au débit de charriage naturel.

## 7.5 Quantification de l'impact des installations

L'installation FR.JAV.2 ne cause aucun impact sur le régime de charriage du Javroz, car l'extraction était exceptionnelle. Le degré d'atteinte est **nul (0 %)**.

Les prélèvements sur le site des Chenevières sont périodiques. La quantité extraite selon l'autorisation actuelle est de 2'800 m<sup>3</sup>/a entre 2011 et 2015 (pas d'extraction en 2014). On peut

donc résumer qu'un peu moins que la moitié du débit charrié moyen dans le Javroz est extrait aux Chenevières (FR.JAV.1). Le degré d'atteinte au régime de charriage peut donc être caractérisé comme **notable (40 – 60 %)**.

## 7.6 Etablissement du profil en long de charriage - Bilan de transport solide

Sur la base des estimations du débit de charriage (chapitre 7.3.3) et de l'analyse de l'exploitation de l'installation (chapitre 7.5), le profil en long de charriage du Javroz est élaboré comme suit:

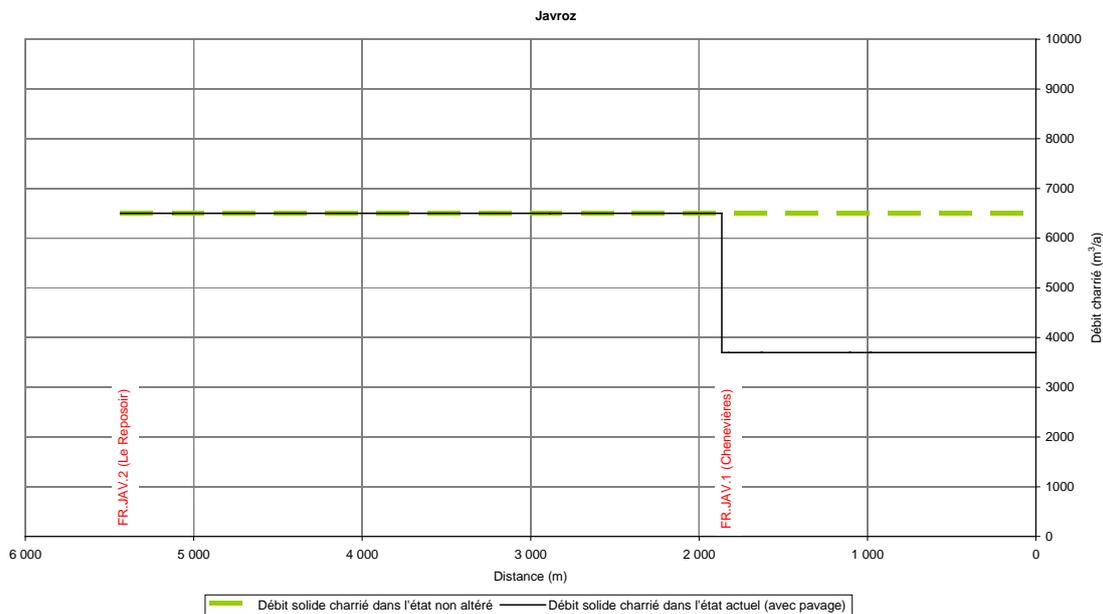


Figure 70: Profil en long de charriage du Javroz

En complément de l'estimation du degré d'atteinte au régime de charriage de l'installation FR.JAV.1, une évaluation de l'état actuel des tronçons par rapport au débit de charriage nécessaire, ce dernier étant calculé pour un état proche de l'état naturel, a été élaborée. Cependant aucun prélèvement du charriage nécessaire n'a été fait. De ce fait, l'estimation se base sur le fait que le charriage naturel permet d'éviter l'érosion du Javroz à l'aval de l'installation. Le débit de charriage nécessaire correspond alors au débit de charriage naturel. Sur la base de cette hypothèse, l'état du Javroz à l'aval de l'installation FR.JAV.1 est estimé et listé dans Tableau 54 au chapitre 0.

## 7.7 Proposition de mesure d'assainissement

### 7.7.1 Remarques préliminaires

Les variantes proposées ont été étudiées grâce à des calculs numériques réalisés à partir d'un modèle existant. Ce modèle ne contenait pas les ouvrages, ceux-ci ont donc été insérés de la manière suivante :

- Cote de la partie déversante du barrage amont : 449.00 m.s.m.
- Cote de la partie déversante du barrage aval : 445.80 m.s.m.

L'état initial calculé correspond à une retenue derrière le barrage qui est déjà passablement comblée (état constaté sur site lors de la visite de terrain).

Le profil en long du modèle est présenté sur la Figure 71 ci-dessous :

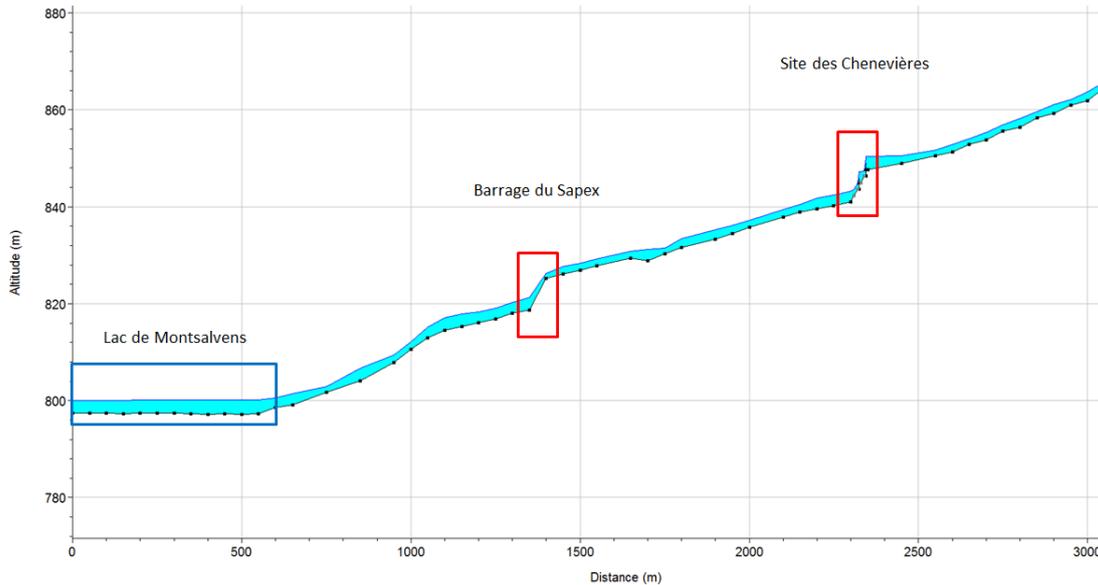


Figure 71: Profil en long du modèle

Le modèle 1D utilisé se base vraisemblablement sur des profils en travers issus du MNT. Afin de s'assurer du bon calage du modèle dans l'espace, les points spécifiques suivants devraient être relevés par un géomètre :

- La crête exacte du barrage ;
- L'altitude exacte au droit des bâtiments à protéger.

Toutefois, pour la phase préliminaire actuelle, le modèle est considéré suffisamment adéquat.

Les différentes variantes se différencient uniquement par la quantité de gravier prélevée, seuls les résultats numériques et les conclusions sont présentées (pas d'esquisse des variantes).

Les calculs ont été réalisés sur une période de 10 ans, les résultats présentés sont les suivants :

- Evolution des volumes cumulés transités en fonction de la distance ;
- Efficacité de rétention du site.

Nous rappelons également que des érosions ont été constatées en aval du site d'extraction des Chenevières, ce qui indique que le cours d'eau n'est pas en équilibre morphologique. Ces érosions sont également dues à la reconstruction récente du contre-barrage. La diminution des volumes prélevés aura pour influence de limiter l'érosion des berges situées en aval, qui restent toutefois faibles.

## 7.7.2 VAR 0 : Prélèvement annuel de 2800 m<sup>3</sup> de graviers

### 7.7.2.1 Description de la variante

Cette variante consiste à prélever aux Chenevières 2800 m<sup>3</sup> sur les 6000 m<sup>3</sup> venant annuellement depuis l'amont. Cette situation correspond en fait aux prélèvements effectués depuis 2011.

### 7.7.2.2 Résultats numériques

Les résultats de la modélisation numérique sont présentés au travers des 2 graphiques (Figure 72 et Figure 73) ci-après :

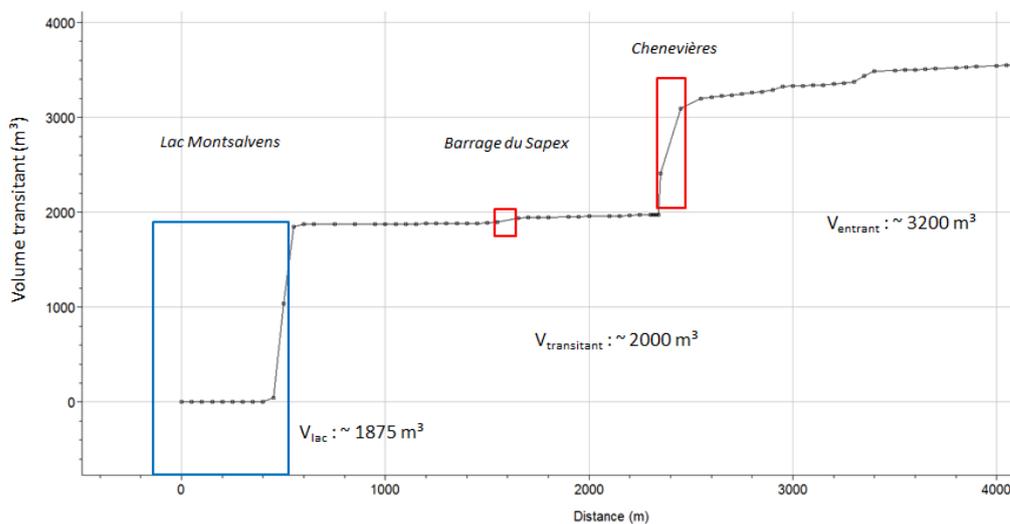


Figure 72: Evolution des volumes cumulés transités en fonction de la distance -VAR0

Les calculs ont été faits pour  $6'000 - 2'800 = 3'200$  m<sup>3</sup> de graviers qui restent ou transitent par le site de prélèvement. Cette manière de calculer tient donc d'office compte des prélèvements annuels de 2'800 m<sup>3</sup>. De ces 3'200 m<sup>3</sup>, environ 1'200 m<sup>3</sup> restent également sur le site et environ 2'000 m<sup>3</sup> transitent vers l'aval.

Très peu de dépôts se font toutefois entre le site des Chenevières et le Lac de Montsalvens. Il convient de mentionner que le manque de dépôts entre le site et le Lac de Montsalvens est probablement partiellement dû au manque de précision du MNT utilisé pour les modélisations. Pour déterminer les volumes sédimentaires qui se déposent sur ce secteur, un modèle de terrain plus détaillé est jugé indispensable.

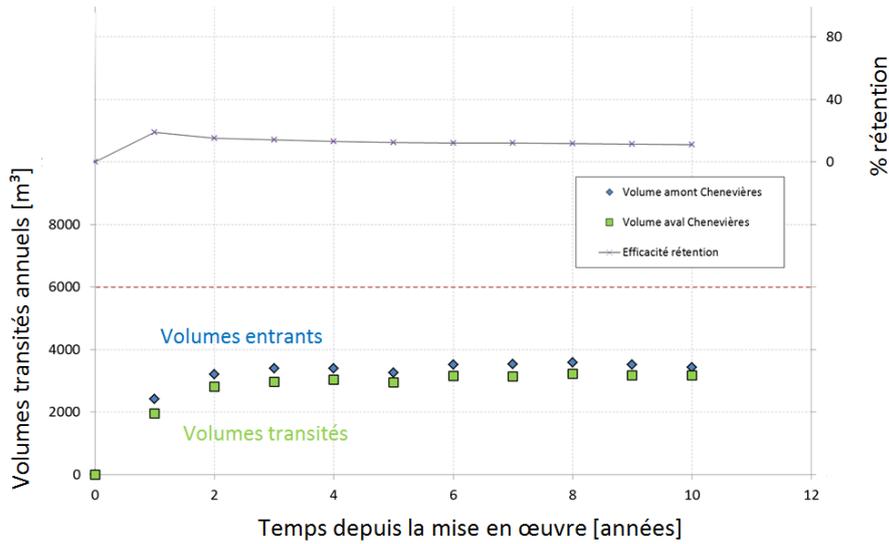


Figure 73: Efficacité de rétention du site-VAR0

### 7.7.2.3 Conclusion

Selon les extractions actuelles sur le site des Chenevières (2'800 m<sup>3</sup>/an), environ un tiers (2'000 m<sup>3</sup>) de graviers transite vers l'aval. De ce tiers, pratiquement l'ensemble des sédiments transite jusqu'au Lac de Montsalvens toutefois. Très peu de dépôts se font donc entre les Chenevières et le Lac, ce qui est partiellement dû à l'utilisation d'une donnée géométrique imprécise (MNT). Dans la pratique, un certain dépôt peut être attendu à l'aval du barrage suite à l'augmentation du charriage.

Le coût de cette variante est estimé à : **0 CHF HT**.

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans l'Annexe 4.

### 7.7.3 VAR 1 : Arrêt total des extractions

#### 7.7.3.1 Description de la variante

Cette variante consiste à ne prélever plus aucun gravier et de voir quel sera le nouvel état d'équilibre.

#### 7.7.3.2 Résultats de la modélisation

Les résultats de la modélisation sont présentés au travers des 2 graphiques (Figure 74 et Figure 75) ci-dessous :

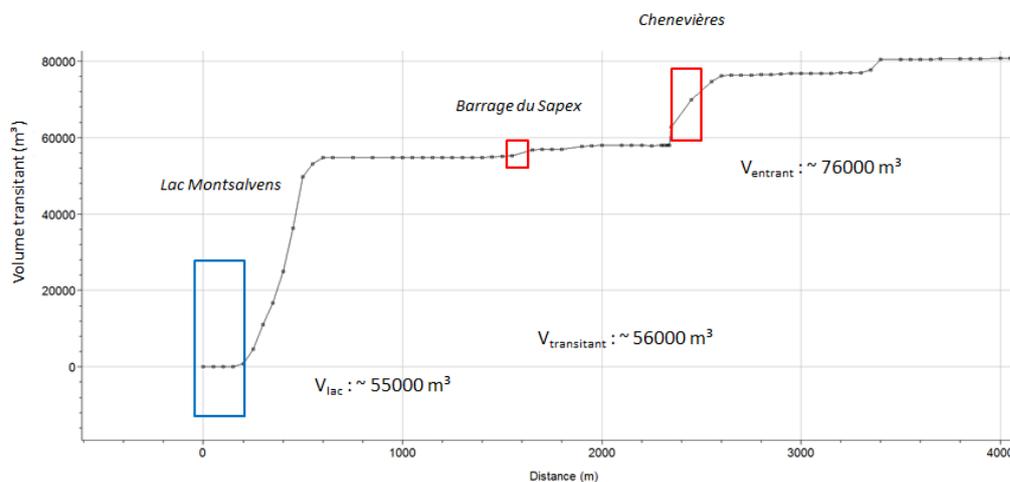


Figure 74: Evolution des volumes cumulés transités en fonction de la distance (après 10 ans de charriage)-VAR1

Après une dizaine d'années de fonctionnement sans aucun prélèvement aux Chenevières, seuls environ 20'000 m<sup>3</sup> (ou encore 2'000 m<sup>3</sup>/an) se déposent sur le site même, le solde transite vers l'aval.

Ce transit se fera pratiquement entièrement jusqu'au Lac de Montsalvens. Environ 1'000 m<sup>3</sup> se déposerait juste en aval du barrage du Sapex.

Il convient de mentionner que le manque de dépôts entre le site et le Lac de Montsalvens est probablement partiellement dû au manque de précision du MNT utilisé pour les modélisations. Pour déterminer les volumes sédimentaires qui se déposent sur ce secteur, un modèle de terrain plus détaillé est jugé indispensable.

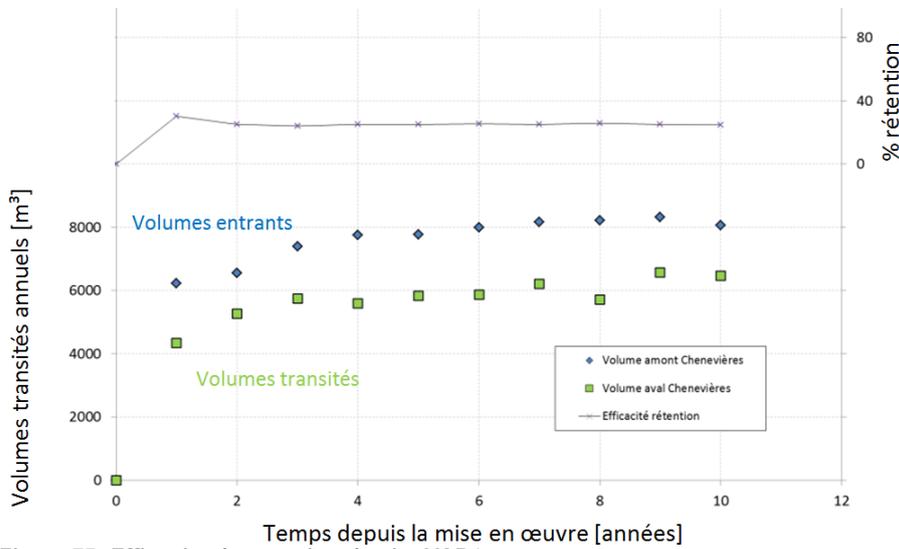


Figure 75: Efficacité de rétention du site-VAR1

### 7.7.3.3 Evaluation du risque d'inondation

Afin d'évaluer le risque d'inondation, une comparaison a été réalisée entre :

- Hauteur d'eau pour l'état actuel (retenue quasi comblée), pour la crue centennale ;
- Hauteur d'eau pour l'état après 10 ans sans extraction, pour la crue centennale.

Les résultats sont présentés ci-dessous :

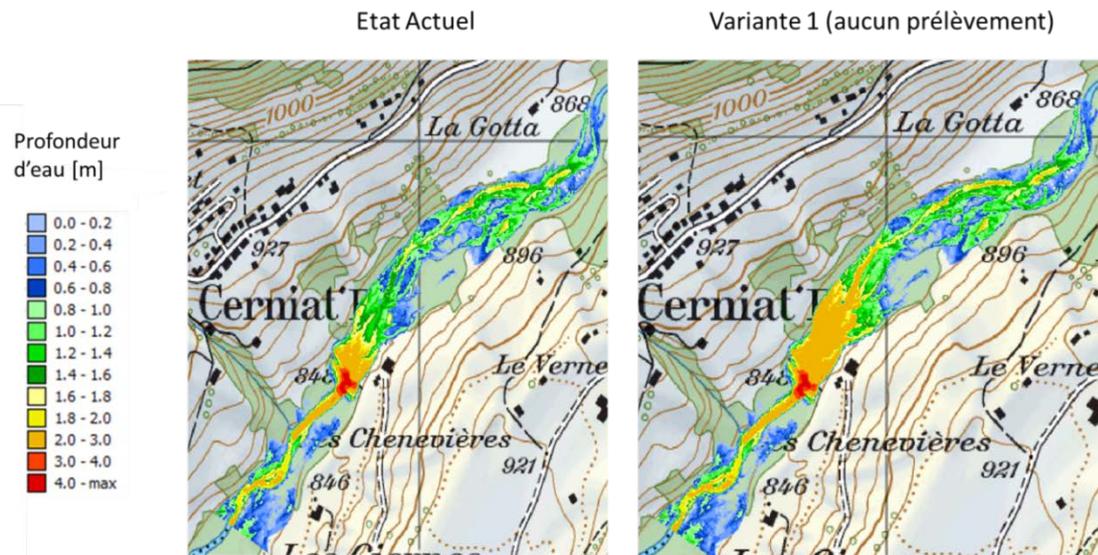


Figure 76: Hauteur d'eau pour l'état actuel et pour l'état après 10 ans sans extraction pour la crue centennale

Les résultats montrent que, pour l'état futur, la profondeur d'eau est effectivement plus importante en amont de l'ouvrage. Cependant, l'habitation située en rive gauche resterait clairement en dehors de la zone d'inondation mais pas de la zone érodable.

### 7.7.3.4 Conclusion

L'arrêt de l'extraction de sédiments sur le site des Chenevières n'engendrerait à priori pas une augmentation importante du risque d'inondation pour le bâtiment situé en rive gauche du Javroz. L'arrêt des extractions pourrait conduire au contournement des ouvrages des Chenevières et provoquer leurs déstabilisations ainsi que les terrains riverains (Village de Cerniat). L'augmentation des dépôts au lieu-dit « Le Sapex » pourrait causer le méandrage des eaux et à terme éroder le pied du versant instable en rive gauche. En revanche, cette manière de faire générerait à terme une quantité importante de sédiments dans le Lac de Montsalvens qui pourrait être compensée par une extraction nouvelle, sous réserve d'une autorisation d'extraction, avant l'embouchure dans le lac.

Le coût de cette variante est nul. Le manque à gagner pourrait grossièrement être estimé à : **16'000 CHF HT /an.**

Cette estimation tient compte du manque à gagner dû à l'arrêt de l'extraction.

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans l'Annexe 4.

### 7.7.4 VAR 2 : Prélèvement annuel de 1500 m<sup>3</sup>

#### 7.7.4.1 Description de la variante :

Cette variante consiste à prélever un volume de sédiments de 1500 m<sup>3</sup> sur les 6000 m<sup>3</sup> provenant de l'amont (état correspondant à la situation de 1995 et 1997).

#### 7.7.4.2 Résultats de la modélisation

Les résultats de la modélisation sont présentés au travers des 2 graphiques (Figure 77 et Figure 78) ci-dessous :

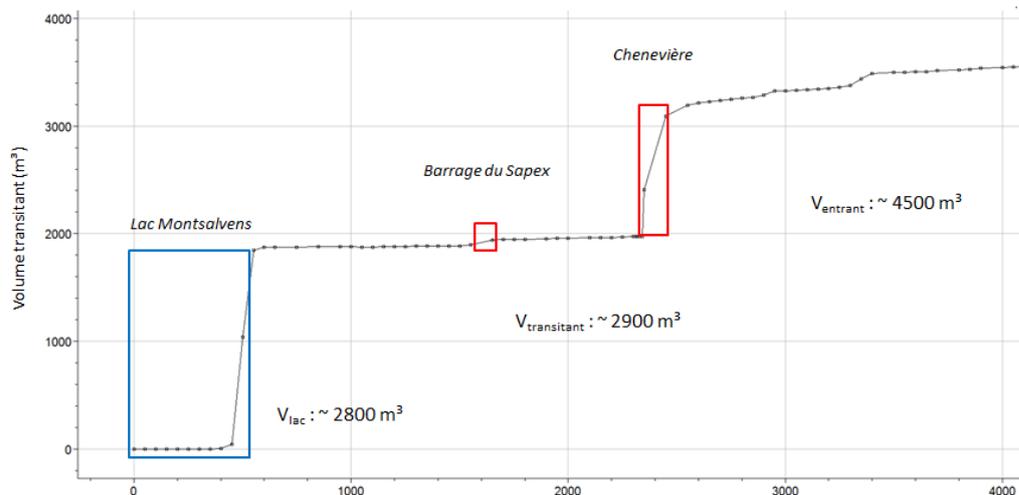


Figure 77 : Evolution des volumes cumulés transités en fonction de la distance (VAR 2)

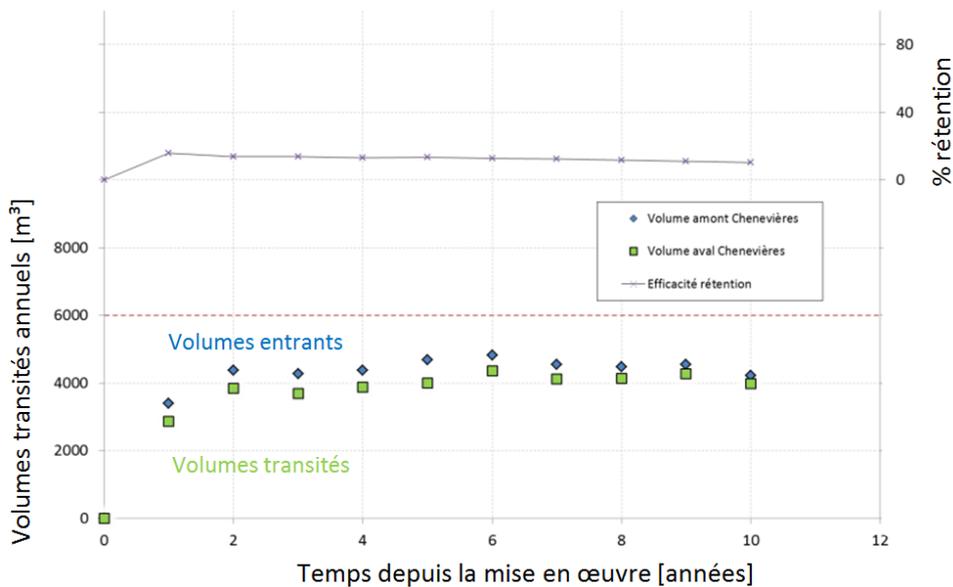


Figure 78 : Efficacité du site de rétention (VAR 2)

Les calculs ont été faits pour  $6'000 - 1'500 = 4'500$  m<sup>3</sup> de graviers qui se déposent ou qui transitent le site de prélèvement. Cette manière de calculer tient donc d'office compte des prélèvements annuels de 1'500 m<sup>3</sup> sur le site. De ces 4'500 m<sup>3</sup>, environ 1'600 m<sup>3</sup> se déposent également sur le site et environ 2'900 m<sup>3</sup> transitent vers l'aval.

Ce transit se fera pratiquement entièrement jusqu'au Lac de Montsalvens. Environ 1'000 m<sup>3</sup> se déposerait juste en aval du barrage du Sapex.

Il convient de mentionner que le manque de dépôts entre le site et le Lac de Montsalvens est probablement partiellement dû au manque de précision du MNT utilisé pour les modélisations. Pour déterminer les volumes sédimentaires qui se déposent sur ce secteur, un modèle de terrain plus détaillé est jugé indispensable.

#### 7.7.4.3 Conclusion

Cette variante permet de limiter l'apport de sédiments dans le Lac de Montsalvens tout en améliorant le régime de charriage et sans augmenter de manière significative le risque d'inondation des enjeux situés aux alentours.

Le coût de cette variante est nul. Le manque à gagner pourrait grossièrement être estimé à : **7'800 CHF HT /an.**

Cette estimation tient compte du manque à gagner dû à la réduction des prélèvements.

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans [l'Annexe 4](#).

#### 7.7.5 Synthèse des variantes

La variante 2 offre à priori le meilleur compromis entre les aspects suivants :

- Amélioration du régime de charriage et limitation de l'érosion des berges en aval ;
- Limitation du volume de sédiments entrant dans le lac de Montsalvens ;
- Limitation du risque d'inondation.



Nous précisons que cette valeur de 1'500 m<sup>3</sup> de prélèvements est une valeur moyenne qui dépend des événements ayant lieu sur le bassin versant. En effet, ce volume peut ponctuellement être augmenté à la suite de gros événements, afin d'assurer la protection contre les crues ou diminuer en cas d'apports insuffisants. Pour cela, le suivi régulier de l'évolution morphologique du site, mis en place en 2011, est nécessaire.

## 8. La Jogne

La Jogne a été prise en compte dans l'étude pilote de Jaeggi, IDEALP et GREN (2013), focalisée sur le bassin versant de la Jogne.

Nous résumons ici les atteintes identifiées sur le régime de charriage de ce cours d'eau, et renvoyons à cette étude pour plus de détails. Deux installations provoquent une atteinte au régime de charriage de la Jogne :

- L'extraction à la gravière Rime ;
- Le barrage de Montsalvens.

Pour le barrage de Montsalvens, une décision d'assainissement du débit résiduel de la Jogne en aval de la retenue a été prise par le canton en janvier 2011. Cette décision inclut également des aspects concernant l'assainissement des éclusées et du régime de charriage. Pour ce dernier aspect, une mesure pilote consiste à injecter 150 m<sup>3</sup> /an de graviers à la sortie des gorges de la Jogne, à Broc. Cette mesure est réalisée pour la deuxième fois lors de l'automne 2014. Cette mesure sera encore reconduite en 2015, puis un monitoring permettra d'évaluer son efficacité. Ce rapport de planification ne développe donc pas plus ces aspects.

Concernant la gravière Rime, l'étude pilote a mis en évidence une atteinte grave car les matériaux charriés par la Jogne sont extraits dans une fosse, dès le remplissage de celle-ci. Les extractions sont toutefois interdites entre le 1<sup>er</sup> octobre et le 1<sup>er</sup> mars et le transit du charriage est donc possible durant cette période. La majorité des sédiments ne transite toutefois pas jusqu'en direction du lac de Montsalvens, où l'embouchure de la Jogne forme une zone alluviale d'importance nationale. Pour plus de détails concernant les atteintes, nous renvoyons à l'étude pilote de 2013.

Dans le rapport final, le bureau Aquavision a réalisé une étude détaillée pour développer des mesures d'assainissement qui tiennent compte des différents enjeux existant dans ce secteur : rétablissement d'un régime de charriage satisfaisant, protection contre les crues, production d'énergie hydroélectrique, présence d'une zone alluviale d'importance nationale.

### 8.1 Proposition de mesures d'assainissement de la gravière Rime

#### 8.1.1 Remarques préliminaires

Le site d'extraction de la Rime se trouve sur la Jogne amont (par rapport au lac de Montsalvens), en amont du lieu-dit « Sous les Vanels ».



Le secteur entre la gravière Rime et le Lac de Montsalvens est constitué de deux parties distinctes :

- Première partie entre la gravière et l'aménagement de Charmey (JOG6) est en zone urbaine avec une pente relativement faible (voir schéma ci-après).
- Seconde partie entre l'aménagement de Charmey (JOG 6) et l'embouchure du Lac de Montsalvens qui sont des gorges (tronçon avec une forte pente).



### 8.1.2 VAR 0 : 600 m<sup>3</sup> d'extraction à Rime

Cette variante correspond à l'état actuel, i.e. environ 600 m<sup>3</sup> d'extractions par an à la gravière. Cette variante ne permet donc pas d'augmenter le charriage sur le tronçon Rime – Lac de Montsalvens. Elle a toutefois l'avantage de maximiser l'aspect protection contre les crues, en minimisant les dépôts sédimentaires dans le secteur d'Overney SA (~ 40 m<sup>3</sup>/an) et à l'exutoire de l'usine de Charmey dans le Lac de Montsalvens (~ 50 m<sup>3</sup>/an).

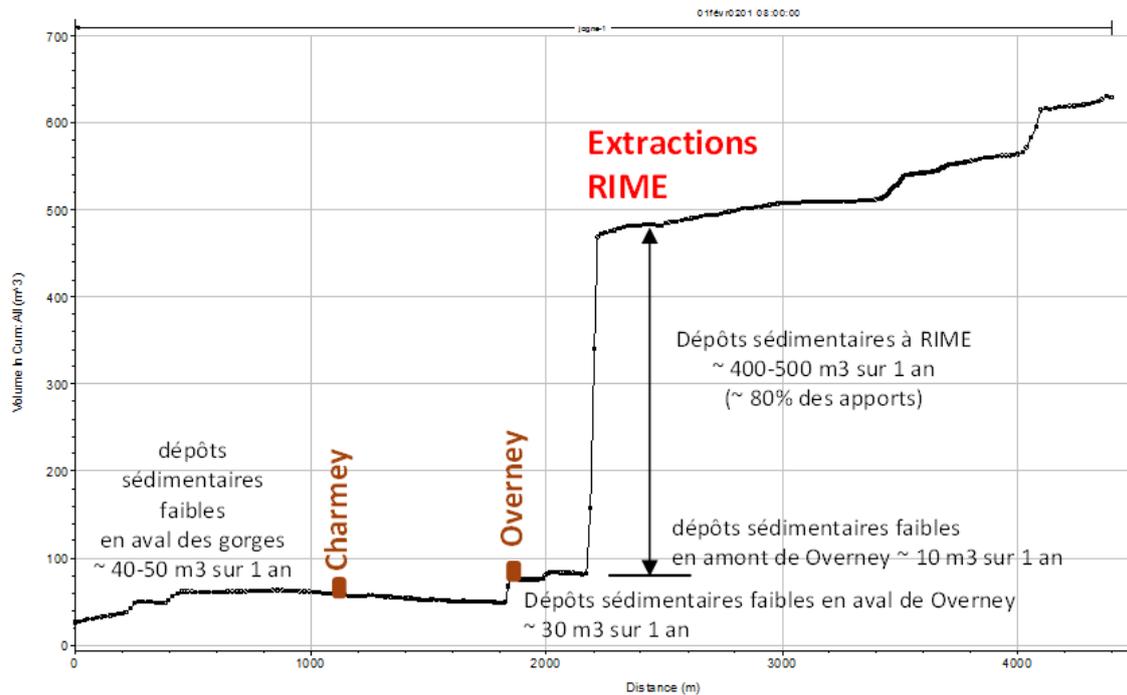


Figure 79 : Profil en long de charriage de la Jogne (VAR 0 : extractions actuelles à Rime)

Le coût de mise en place de cette variante est nul.

On estime grossièrement à : < 10'000 CHF HT les coûts d'entretien.

Cette estimation tient compte des très faibles dépôts sédimentaires à nettoyer/enlever de temps à autre autour des installations hydro-électriques.

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans l'Annexe 4.

### 8.1.3 VAR 1 : Arrêt des extractions à Rime

Cette variante propose un arrêt total des extractions actuelles à la gravière de Rime. Elle permet donc d'augmenter de manière significative le charriage sur le tronçon Rime – Lac de Montsalvens et d'atteindre ainsi le charriage jugé nécessaire. Toutefois, ce rétablissement du charriage se fait au détriment de la protection contre les crues en amont et en aval de la gravière, principalement par le risque de mise en charge d'un pont routier juste en aval de la gravière. Même si la crue centennale permettrait de remobiliser tout ou une bonne partie des dépôts, le risque d'augmentation substantielle des lignes d'eau, accompagnée de débordements, est jugé réel. Les dépôts supplémentaires qui se feraient à l'exutoire de l'usine de Charmey (~ 160 m<sup>3</sup>/an au lieu de 50 m<sup>3</sup>/an) sont jugés gérables au vu de la grande quantité de dépôts déjà actuellement présents à cet endroit.

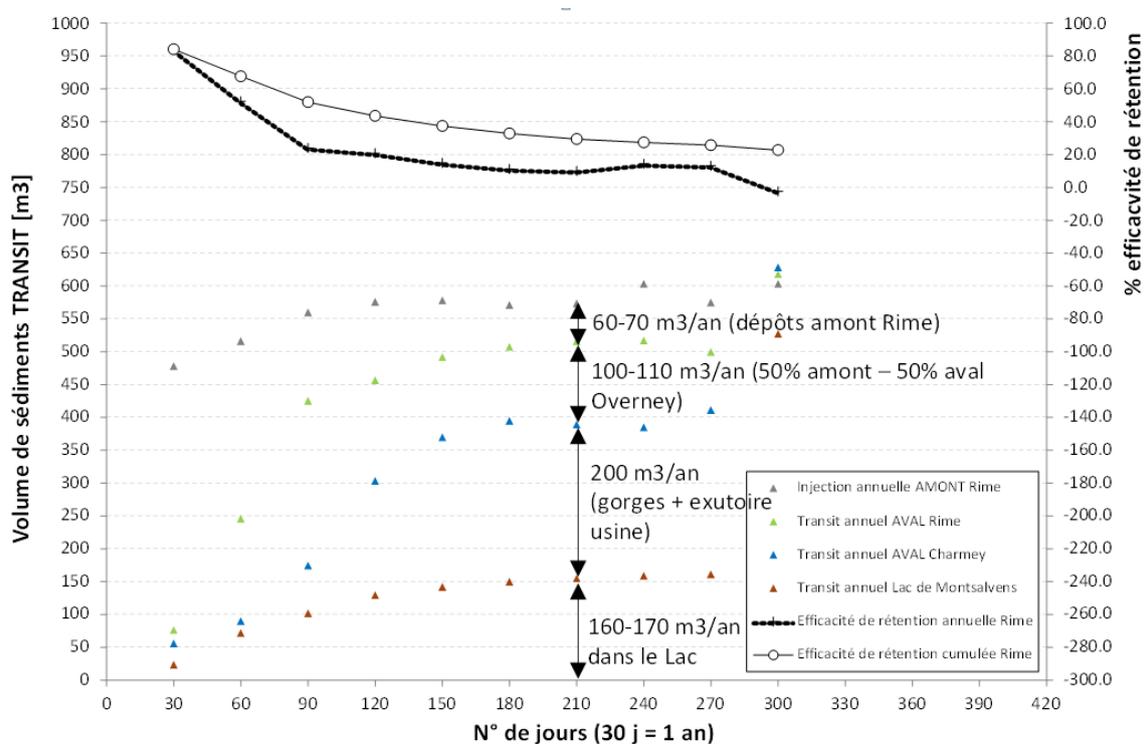


Figure 80 : Evolution sur 10 ans du volume de sédiments transitant la Jogne en arrêtant complètement les extractions à Rime (VAR 1).

Le coût de mise en place de cette variante est nul.

En revanche, on estime grossièrement à : < 20'000 CHF HT /an le manque à gagner de l'exploitation ainsi que l'entretien des installations situées à l'aval.

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans l'Annexe 4.

#### 8.1.4 VAR2 : 300-350 m³ d'extractions à Rime

Cette variante propose une réduction de 300 m³/an des extractions actuelles à la gravière de Rime. Ceci permettrait de partiellement rétablir le charriage sur le tronçon Rime – Lac de Montsalvens, tout en maîtrisant l'aspect de protection contre les crues dans les secteurs critiques. Dans le secteur d'Overney SA, on aurait ainsi environ 80 m³ de dépôts par an au lieu de 40 m³ aujourd'hui. L'augmentation des lignes d'eau lors des crues est quasiment insignifiante. A l'exutoire de l'usine de Charmey, dans le lac de Montsalvens, on aurait 100 m³ de dépôts par an au lieu de 50 m³ aujourd'hui.

De plus, en réduisant les extractions de moitié, l'augmentation du transit se fera de manière progressive lors des premières années, et n'atteindra son nouvel équilibre qu'après environ 5 ans.

Ceci offre la possibilité de suivre de près le charriage et d'intervenir le cas échéant.

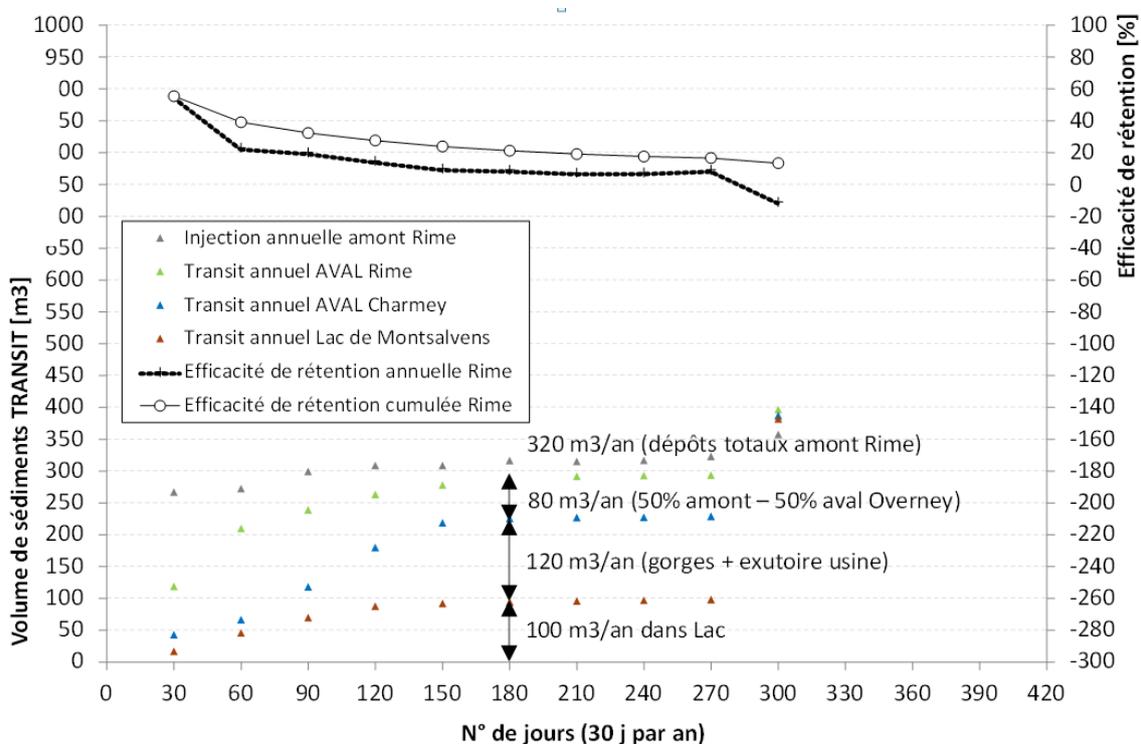


Figure 81 : Evolution sur 10 ans du volume de sédiments transitant la Jogne en réduisant de 300 m<sup>3</sup> les extractions à Rime (VAR 2)

Le coût de mise en place de cette variante est nul.

En revanche, on estime grossièrement à : < 10'000 CHF HT /an le manque à gagner de l'exploitation ainsi que l'entretien des installations situées à l'aval.

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans l'Annexe 4.

### 8.1.5 Synthèse des variantes

Dans la priorisation finale au chapitre 16, la variante 2 représente la meilleure proportionnalité des trois variantes, de par sa capacité à rétablir partiellement le charriage tout en maîtrisant l'aspect protection contre les crues, et ceci pour des coûts qui sont jugés faibles à très faibles. Cette variante est d'autant plus intéressante que les 2 aménagements hydro-électriques présents sur le secteur sont déjà équipés pour faire transiter les graviers lors des crues (vannes secteurs et vanne gonflable).

## 9. La Petite Glâne

### 9.1 Description du BV

Le bassin versant de la Petite Glâne (Figure 82) est présenté sur la base du résumé établi par ETEC Sàrl (2009), légèrement adapté pour respecter le besoin de l'étude présente.

Le bassin versant de la Petite Glâne appartient selon l'Atlas hydrologique au bassin n° 20-490 (Broye inférieure). Divisé en 2 sous-bassins (20-493 et 20-494), il se situe au sud-ouest du lac de Morat (exutoire) et au sud du lac de Neuchâtel (dont il est séparé par une chaîne de collines). De forme très allongée, ce bassin a une superficie voisine de 87 km<sup>2</sup>. La rivière (code GEWISS 790) prend sa source dans une sorte de pointe au nord-est de Vuissens, à environ 700 m d'altitude. Elle coule en direction du nord-est et rejoint la Broye (code GEWISS 215) aux abords du lac de Morat. Le cours supérieur de la Petite Glâne est encore naturel, préservé par des cordons forestiers. Depuis le lieu-dit « Moulin de Glâne », le cours est canalisé. Avec une longueur d'environ 28 km, la pente de la Petite Glâne varie entre 1.5 % et 0.1 %. Le sous-sol de l'ensemble du bassin versant est de type quaternaire, constitué d'alluvions et de moraines.

Selon l'Atlas hydrologique, le régime hydrologique du cours amont (jusqu'à la confluence avec le Bainoz) est de type pluvial jurassien (hautes eaux au printemps et basses eaux en automne avec une amplitude assez bien marquée), alors qu'il est de type pluvial inférieur (plus faible amplitude) à l'aval.

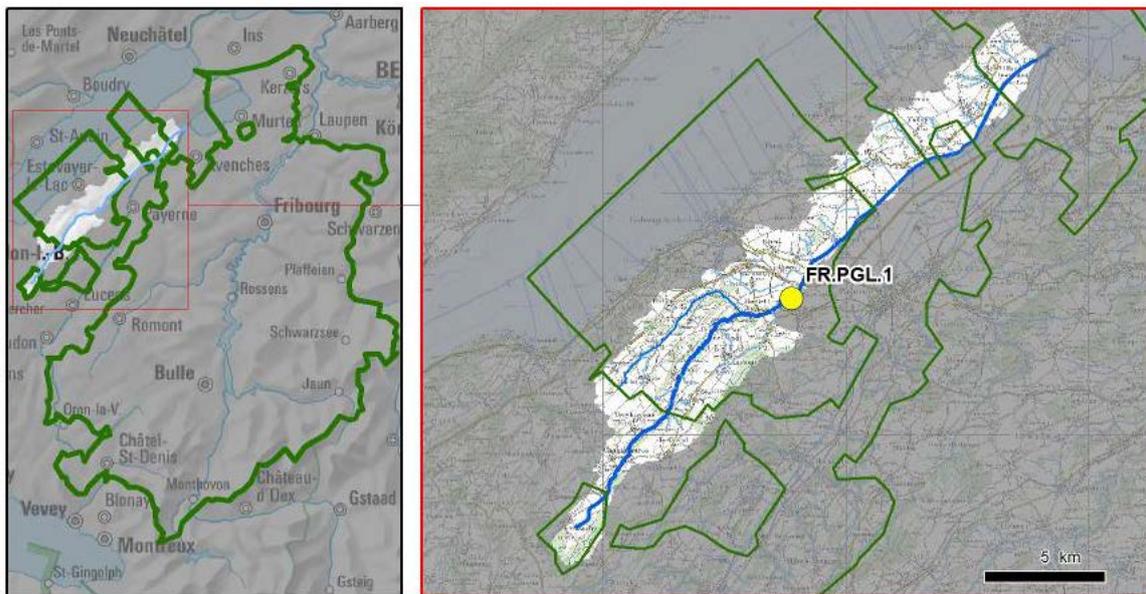


Figure 82: Bassin versant de la Petite Glâne

### 9.2 Description du cours d'eau

A l'amont de Montet, la Petite Glâne coule en méandres dans un lit de 6 – 8 m de largeur sous une couverture de végétation forestière. Des bancs des graviers sont observés aux endroits rela-

tivement larges et calmes (voir Figure 83, gauche). Dès le pont de la Route de Vesin à Montet, le lit du cours d'eau est plus droit, donc moins de dépôts sont observés.

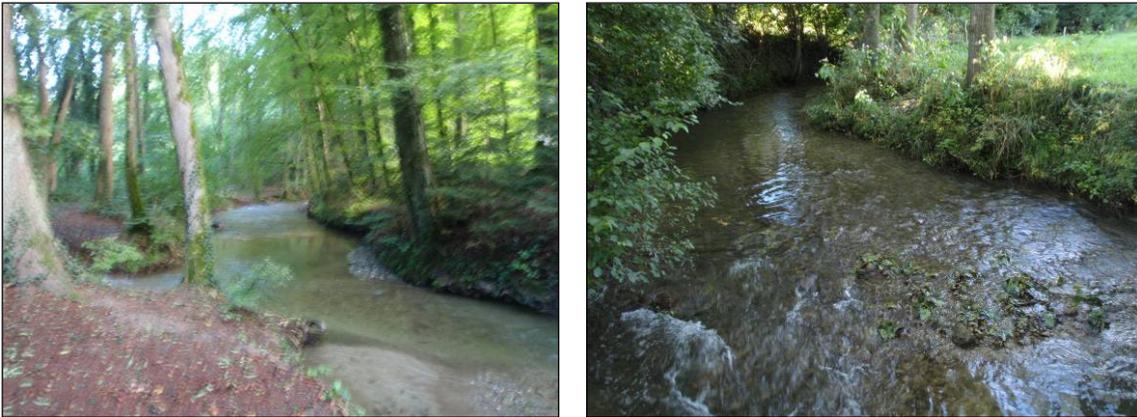


Figure 83: La Petite-Glâne à l'amont de l'installation - à km 18.500 (gauche, embouchure du Bainoz) et à km 17.200 (droite, tronçon entre la Route de Vesin et Au Village à Les Montets)

L'installation FR.PGL.1 (Figure 84) est un seuil qui avait pour but d'alimenter une prise d'eau latérale qui n'est plus en fonction. La zone à l'amont du seuil est remplie de matériaux ; à l'amont et à l'aval de l'installation, une granulométrie similaire des bancs de graviers est observée.



Figure 84: L'installation FR.PGL.1 à côté de la Ferme de Glâne (gauche, km 15.675) et l'état du cours d'eau quelques dizaines de mètres à l'aval (droite)

Quelques dizaines de mètres à l'aval de l'installation FR.PGL.1 la Petite Glâne change d'apparence. La Figure 85 illustre la zone de transition d'un lit localement aménagé vers un cours d'eau canalisé au profil trapézoïdal droit.



Figure 85: Début du tronçon fortement canalisé de la Petite Glâne à 200 m à l'aval de l'installation FR.PGL.1 (gauche); profil de la Petite-Glâne à km 14.000 (au pont de la route cantonale entre Bussy et Payerne)

La Petite Glâne reste canalisée pour le reste de son cours jusqu'à l'embouchure dans la Broye. Entre-temps, elle traverse sur quelques kilomètres le canton de Vaud et forme une partie de la frontière Vaud / Fribourg.

### 9.2.1 Profil en long topographique

La Figure 86 représente le profil en long de la Petite Glâne entre sa source et son embouchure dans la Broye. En plus du profil en long, la position de l'installation FR.PGL.1, de l'affluent "Le Bainoz" et du tronçon cours d'eau cible sont illustrés.

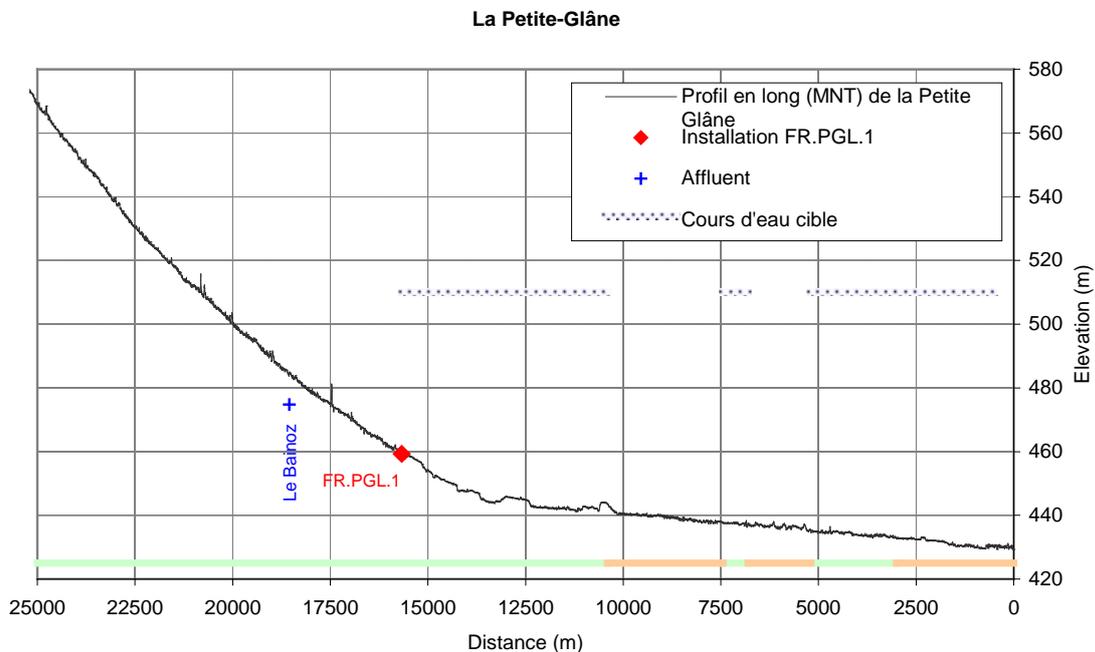


Figure 86: Profil en long topographique de la Petite Glâne – La ligne en bas présente les tronçons sur territoire fribourgeois (vert) et vaudois (orange).

### 9.2.2 Morphologie historique et actuelle

La morphologie dans le tronçon canalisé de la Petite Glâne est fortement modifiée par rapport à l'état historique. Les aménagements des cours d'eau sont traités dans le cadre de la planification de revitalisation des cours d'eau, dans le canton de Fribourg. L'influence du tracé actuel sur le régime de charriage n'est pas évaluée. Le tronçon d'environ 200 m à l'aval de l'installation FR.PGL.1 est comparé avec la morphologie du cours d'eau directement à l'amont du seuil et ainsi qu'à proximité de l'embouchure du Bainoz. Morphologiquement, les sites sont similaires: il y a une tendance à former de petits méandres, avec des bancs de graviers dans les zones plus calmes. Le spectre granulométrique est identique à l'amont et à l'aval de l'installation.

### 9.3 Estimation de la charge solide

Sur la Petite Glâne, il n'y a aucune extraction ou déposition de gravier qui pourrait être reprise ou qui permettrait de caler les calculs effectués. Par rapport à l'hydrologie, le canton de Vaud mesure les débits de la Petite Glâne avec une station limnimétrique vers Villars-le-Grand depuis 1993. L'analyse fréquentielle des débits observés permet de caler l'estimation des débits classés (selon Hunziker et Lehmann, 2013) pour le calcul du transport solide (Tableau 26). En raison de la courte période de mesure de 20 ans, les débits d'un temps de retour supérieur à 50 ans sont considérés comme trop incertains pour être utilisés comme données de base.

Tableau 26: Facteur de calage du bassin versant pour respecter les débits prélevés à Villars-le-Grand

	Temps de retour de crue		
	2 / 2.33 ans	4 / 5 ans	12 / 10 ans
Débit calculé (IDF selon Hunziker / Lehmann)	30.44	37.8	47.67
Débit de crue (Analyse fréquentielle)	16.1	21.2	25.4
Ratio (Analyse / IDF calculé)	0.53	0.56	0.53
<b>Valeur moyenne</b>	<b>0.54</b>		

Avec les débits classés corrigés d'un facteur 0.54 (voir Tableau 26), le calcul de capacité de transport selon l'aide à l'exécution donne les résultats suivants (Tableau 27):

Tableau 27: Capacité de transport solide estimé selon la méthode proposée par l'aide à l'exécution

Cours d'eau	Distance (km)	Capacité minimale de transport solide (m <sup>3</sup> /a)	Capacité maximale de transport solide (m <sup>3</sup> /a)
Petite Glâne	20.000	560	1'100
Petite Glâne	18.100	1'225	2'375
Petite Glâne	16.160	800	1'425
Petite Glâne	3.600	5	10

Les tronçons de calcul étant des tronçons limitants par rapport au transport solide et aucune restriction au transport n'étant connue à l'amont de l'installation FR.PGL.1, les valeurs du Tableau 27 sont reprises comme charge solide à l'état actuel.

Le débit solide charrié dans le Bainoz est estimé entre 300 et 600 m<sup>3</sup>/a.

### 9.4 Estimation du débit de charriage nécessaire

Le chapitre 4.4 présente la méthode de calcul du débit de charriage nécessaire. Le Tableau 28 présente les résultats pour la Petite-Glâne.

Tableau 28: Débit de charriage nécessaire estimé sur la Petite Glâne

Distance (km)	Morphologie (Critères de Yalin et da Silva, 1991)	B <sub>R</sub> (m)	Débit solide nécessaire	
			(limite inf. m <sup>3</sup> /a)	(limite sup. m <sup>3</sup> /a)
18.100	lit droit	23	320	950
16.100	lit droit	23	310	940

## 9.5 Quantification de l'impact des installations

L'impact de l'installation est évalué par le biais d'une visite de terrain, d'une interview avec M. Nicolas Bersier (Ferme de Glâne) et des données mises à disposition par la LCE Fribourg.

Pendant la visite de terrain, la Petite Glâne a été examinée à l'amont et à l'aval de l'installation FR.PGL.1. La zone de stockage à l'amont de l'installation est remplie de sédiments. A l'amont de la zone de retenue, il y a un dépôt de matériaux. On estime qu'ils sont transportés au-delà du seuil lors de crues importantes. La granulométrie à l'amont et à l'aval de l'installation est comparable.

Des extractions de graviers sur la Petite Glâne ne sont connues ni de M. Nicolas Bersier ni de la LCE. Aucune hausse du lit n'est connue.

Pour synthétiser ces informations, l'impact de l'installation FR.PGL.1 sur le régime de charriage de la Petite Glâne est **nul (0 %)**.

### 9.5.1 Evaluation des atteintes à la protection contre les crues

L'influence de cette installation sur la protection contre les crues est nulle, selon l'analyse de la carte des dangers.

## 9.6 Etablissement du profil en long de charriage - Bilan de transport solide

Sur la base des débits solides charriés estimés (Tableau 27) et de l'impact de l'installation FR.PGL.1 (chapitre 9.5), le profil en long de charriage de la Figure 87 peut être établi:

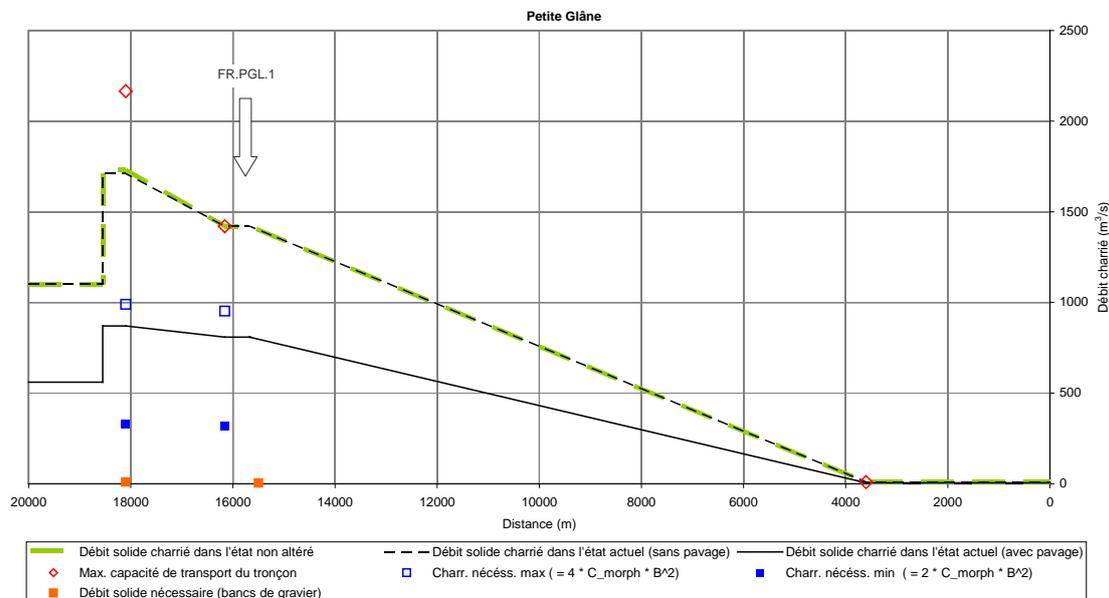


Figure 87: Profil en long de charriage de la Petite Glâne

Le profil en long est dessiné sur la base des données collectées pendant la visite de terrain. Notons que dans le tronçon canalisé à l'aval du km 15.000 environ, une estimation du transport solide est difficile car le fonctionnement n'est pas linéaire. Selon la littérature, une transition nette est à prévoir au passage de la capacité de transport entre gravier et sable ("gravel sand transition").



along river channels", Venditti, 2010). La ligne figurant sur la Figure 87 ne représente pas la réalité mais elle est suffisante pour évaluer l'atteinte de l'installation FR.PGL.1. Cette dernière ne provoque pas d'atteinte au régime de charriage.

### **9.7 Proposition de mesure d'assainissement**

Aucune mesure d'assainissement n'est nécessaire.

S'il fallait, dans le cadre de la planification de revitalisation, prendre en considération le régime de charriage, il serait recommandé d'effectuer, concernant la Petite Glâne, une évaluation plus approfondie des conditions du fond du lit du tronçon canalisé.

## 10. La Sarine (et petits affluents)

### 10.1 Description du bassin versant

Le bassin versant de la Sarine est présenté sur la base du résumé établi par ETEC Sàrl (2008, 2009), légèrement adapté pour respecter le besoin de l'étude présente.

D'une longueur de 16 km et d'une pente moyenne assez faible de l'ordre 0.9 %, le linéaire fribourgeois de la **Haute Sarine** (Figure 88) est corrigé à partir de l'aval du barrage de Lessoc, par enrochement des rives (anciens blocs) et stabilisation locale du lit. Le tracé des affluents est aussi en partie corrigé.

Le bassin versant de la Sarine est constitué de roches calcaires. En revanche, le sous-bassin versant de la Trême se trouve dans des terrains siliceux, puis dans des terrains quaternaires (alluvions et moraines).

Le bassin versant de la **Basse Sarine** comprend le tronçon de la Sarine qui s'écoule entre le Lac de la Gruyère (code GEWISS 9276 selon l'Atlas hydrologique) et le lac de Schiffenen (code GEWISS 9285). Il est constitué de 2 sous-bassins (n° 20-275 et n° 20-293). Généralement peu encaissé, le bassin versant de la Basse Sarine présente une superficie totale voisine de 104.8 km<sup>2</sup>. La Basse Sarine (code GEWISS 227), qui s'écoule à l'aval du barrage de Rossens à une altitude de 610 m, présente un débit déterminé par la dotation octroyée à l'aval de ce dernier (2.5 m<sup>3</sup>/s en hiver, 3.5 m<sup>3</sup>/s en été). Elle coule en direction du nord, puis du nord-est à partir de Posieux, traverse le lac de Pérolles et le barrage de la Maigrauge au sud-est de la ville de Fribourg, pour rejoindre en méandres le lac de Schiffenen à une altitude de 540 m environ. D'une longueur de 28.3 km (dont 15.1 km sur le bassin versant n° 20-275) et d'une pente moyenne de l'ordre de 0.3 %, le tracé de la Basse Sarine est naturel, de même que celui de ses affluents, à l'exception d'un tronçon à plus fortes contraintes dans la traversée de la ville de Fribourg.

Dans la vallée formée par la rivière, le sous-sol de la Basse Sarine est constitué de roches siliceuses (molasse). Le reste du bassin versant est de type quaternaire, formé d'alluvions et de moraines.

Le régime hydrologique de la Basse Sarine n'est pas caractérisé dans l'Atlas hydrologique, car fortement influencé par le barrage de Rossens. Celui de ses affluents est donné et varie entre les types :

- nivo-pluvial préalpin avec des hautes eaux au printemps, des basses eaux en hiver et une amplitude relativement marquée (Gottéron) ;
- nival de transition, avec des hautes eaux à la fin du printemps, des basses eaux en hiver et une amplitude très marquée (Gérine) ;
- pluvial jurassien caractérisé par des hautes eaux au printemps, mais des basses eaux en automne (Glâne).

## 10.2 Description du cours d'eau

### Haute Sarine

Dans le cadre de ce mandat, le tronçon de la Sarine entre le lac du Vernex et le lac de la Gruyère est évalué dans une analyse approfondie selon la démarche proposée par l'aide à l'exécution de l'OFEV. La Sarine est classée comme cours d'eau cible sur tout le territoire fribourgeois.

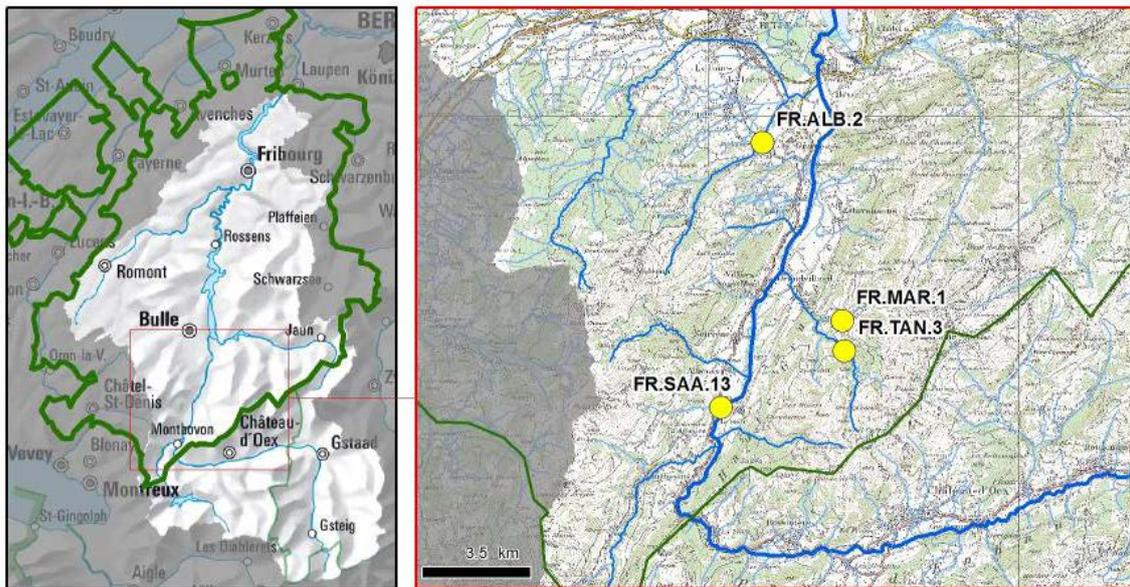


Figure 88: Bassin versant de la Sarine (sans la Singine) avec un zoom sur l'amont du lac de la Gruyère

La Sarine prend sa source dans le canton du Valais, puis transite par les cantons de Berne et de Vaud avant d'alimenter le lac du Vernex. A ce point, elle draine un bassin versant de 395 km<sup>2</sup> sur une distance de 38 km. Sur la Sarine et ses affluents à l'amont de Rossinière, il y a des extractions de graviers. En traversant le lac du Vernex, la Sarine présente un alluvionnement important (Figure 89). La totalité du charriage est stoppée dans le lac (voir chapitre 10.3.1.1 pour l'argumentation).



Figure 89: La Sarine entre km 87.800 (gauche) et 86.500 (lac du Vernex, droite). La photo à gauche est prise juste à l'amont du lac. La photo en bas à droite illustre en détail le début du lac du Vernex avec les dépôts de matériaux.

De l'aval du barrage de Rossinière jusqu'au lac de Montbovon, la Sarine s'écoule avec un débit résiduel. Selon e-dric.ch (2011), le débit de dotation est actuellement de 350 l/s. La centrale de Montbovon est équipée pour un débit de 40 m<sup>3</sup>/s, ce qui signifie que les crues provoquent un déversement sur le barrage de Rossinière assez régulièrement (en considérant une crue Q<sub>10</sub> de 240 m<sup>3</sup>/a ou une crue Q<sub>100</sub> de 330 m<sup>3</sup>/s).

Au km 85.860 se trouve l'ancien barrage de Rossinière, d'une hauteur d'environ 6 à 8 mètres, dans lequel un volume potentiel d'accumulation de sédiments est encore disponible (e-dric.ch, 2011). Le lit à l'aval de cette installation montre un déficit de sédiments fins et moyens. Le lit se compose de cailloux de diamètre supérieur à 20 cm (Figure 90, photo droite). Un fort pavage est observé. Dans le lit du cours d'eau, il y a une prolifération d'algues et une vase organique est observée. Sur les bancs s'est développée une végétation herbacée.



Figure 90: La Sarine à l'aval du lac du Vernex (droite) - Seuil à km 85.860 (gauche, haut) et affluent T. des Riz à km 85.490 (gauche, bas; probable dépôt de lave torrentielle)

Au km 85.490, il y a un dépôt de lave torrentielle du T. des Riz (Figure 90, en bas à gauche). Cet endroit est documenté dans l'étude d'e-dric.ch (2011), où la zone de la confluence semble plus "récente" et une grande quantité des matériaux fins et moyens peut être observée. En comparaison avec la situation actuelle (octobre 2013), seuls des cailloux avec un diamètre d'environ 20 cm et plus restent sur place ; le dépôt est colonisé par une végétation herbacée.

La Sarine traverse ensuite les gorges de la Coulat et la zone alluviale de l'Auge avant de se jeter dans le lac de Montbovon. Sur le secteur du lac formé par le barrage de Lessoc, il y a deux affluents avec un débit de charriage important, l'Hongrin (km 80.560, en rive gauche) et le Torrent (km 80.275, en rive droite). Les zones d'embouchure sont illustrées dans la Figure 91.



Figure 91: Embouchures des affluents sur le lac de Montbovon - l'Hongrin (km 80.560, gauche) et le Torrent (km 80.275, droite)

A l'aval du barrage Lessoc, la Sarine traverse deux zones alluviales inscrite à l'inventaire national, "Les Auges de Neirivue" (km 79.085 à 74.350) et "Les Auges d'Estavannens" (km 72.800 à 68.800). Entre les deux, il y a un apport de charriage de la Tâna (km 73.825, Figure 92) et d'autres affluents au débit de charriage notable, notamment la Marive (km 77.650) et le R. d'Aflon (km 72.550). Juste en amont de la zone alluviale du delta de "Broc" (dès km 65.800) afflue la Trême qui forme un dépôt des matériaux à son embouchure dans la Sarine (km 67.225, Figure 92).



Figure 92: Affluents avec un débit du charriage qui forme un dépôt à l'embouchure dans la Sarine - La Tâna (km 73.825, gauche; vue en direction de l'écoulement) et la Trême (km 67.225, droite; vue contre la direction de l'écoulement)

La zone alluviale du delta de "Broc" est caractérisée par une largeur plus élevée que le lit moyen de la Sarine. Il y a un grand dépôt de matériaux charriés avec une végétation faible.



Figure 93 : Zone alluviale à l'amont de la confluence de la Sarine dans le lac de la Gruyère

### *Basse Sarine*

La partie à l'aval du lac de la Gruyère a été analysée sur la base des études existantes sur le charriage et la bathymétrie des lacs suivantes :

- Pour la description de la Sarine : l'étude de Jaeggi (2002) sur la Petite Sarine à l'aval du barrage de Rossens ;
- Pour le tronçon entre la confluence de la Gérine et le lac de Pérolles, l'étude de Jäggi (2001) ;
- Pour le tronçon entre Schiffenen et la confluence avec la Singine : l'étude de Grandin (2007) ;
- Pour le tronçon à l'aval de la confluence de la Singine, l'étude de Flussbau AG (2007), la carte "Entwurf Beeinträchtigung der Geschiebeführung - Stand 30.10.2013" de l'étude sur la planification de l'assainissement du régime de charriage du canton de Berne (Flussbau AG, 2013) ainsi qu'une interview téléphonique avec M. Lukas Hunzinger le 16.12.2013.

La description des tronçons de la Sarine qui suit est également inspirée de ces études.

Le tronçon de la Sarine entre le barrage de Rossens (km 51.548) et le barrage de la Maigrauge (km 29.980) à Fribourg est inclus dans l'objet 62 *Rossens-Fribourg* de l'Inventaire des zones alluviales d'importance nationale. Le tracé de la Sarine est caractérisé par des méandres profondément incisés dans la molasse. La Sarine s'écoule dans une vallée encaissée d'une largeur comprise entre 50 et 200 m, cette largeur maximale étant atteinte dans les méandres très prononcés. Le lit de la Sarine est cependant essentiellement alluvial, même si plusieurs seuils relativement résistants de molasse subsistent et contrôlent l'érosion.

Jaeggi (2002) propose une analyse de l'évolution de la Sarine suite à la construction du barrage de Rossens, par comparaison de photographies aériennes de 1946 et de 2000 :

- En 1946, le lit de la Sarine n'était pas végétalisé entre Rossens et Illens, mais présentait des bancs de graviers découverts qui s'étendaient d'une falaise à l'autre, ce qui est typique d'une situation de dépôt. Plus en aval, la Sarine s'écoulait dans un chenal de régime de 45 à 50 m de largeur. On note l'existence d'une terrasse alluviale récente recouverte d'une forêt alluviale à bois dur, ce qui témoigne d'une érosion relativement récente. En aval, on relève une morphologie plus variable avec alternance de zones de dépôt avec un lit actif dépassant une largeur de 50 m et des tronçons marqués par une érosion plus ancienne avec des niveaux de terrasses plus élevées.
- Les photographies de l'an 2000 indiquent d'importantes transformations morphologiques :

- développement important de la végétation ; les bancs de graviers sont couverts de forêts alluviales à bois tendre ou dur, parfois par des colonies de plantes pionnières ;
- le chenal actuel correspond au chenal charriant les débits d'étiage en 1946, devenu dominant par la suite. Le développement de la végétation a ensuite favorisé l'érosion du chenal dominant.

Jaeggi (2002) retrace également la chronologie des transformations morphologiques : de 1951 à 1974, directement en aval du barrage, la Sarine se retire dans son chenal de régime et passe d'une situation de dépôt à une tendance à l'érosion. On assiste à une végétalisation de l'amont vers l'aval. Dès 1974, en raison d'une gestion plus rationnelle et efficace du barrage, on note une forte augmentation de la végétation. Des débits supérieurs à 300 m<sup>3</sup>/s n'ont dès lors plus transité en aval du barrage. La morphologie du fond du lit est devenue plus monotone dans ce chenal étroit. Le fond est horizontal sur d'assez longs tronçons et ne présente plus de variations. Suivant la tendance actuelle, sans mesure d'assainissement, la zone d'érosion devrait se déplacer progressivement vers l'aval, et à terme la molasse deviendrait apparente de manière générale.

Deux affluents importants sont situés sur ce tronçon : la Glâne (km 35.49) et la Gérine (km 36.56), cette dernière ayant un apport solide important dans la Sarine (Figure 94).

En aval de la Gérine, il y a tout d'abord une rampe qui présente une pente décroissante (de 8 à 3 ‰) jusqu'à Invua, puis un tronçon de transit entre Invua jusqu'après la confluence avec la Glâne. On retrouve ensuite une rampe plus raide avec une île en amont de Planafaye (pente de 6‰), puis nouveau tronçon de transit, et finalement le delta du lac de Pérolles. Le premier et le dernier tronçon mentionnés témoignent d'une « forte dynamique alluviale ».



Figure 94: A gauche : confluence de la Gérine dans la Sarine ; à droite : la Sarine en ville de Fribourg

En aval du barrage de la Maigrange (km 29.980) qui engendre le lac de Pérolles, la Sarine traverse la ville de Fribourg (Figure 94) ; ce tronçon est marqué par des contraintes urbaines plus importantes. Il y a tout de même un affluent important qui amène également du charriage sur ce tronçon : le Gottéron (km 27.66). Le lac de Schiffenen, long de 12 kilomètres et engendré par le barrage du même nom, débute au km 26.197.

En aval du barrage de Schiffenen (km 14.293), la Sarine s'écoule sur un tronçon de 4 km dans un canal artificiel aménagé lors de la construction du barrage de Schiffenen, afin d'augmenter la hauteur de chute (Figure 95).

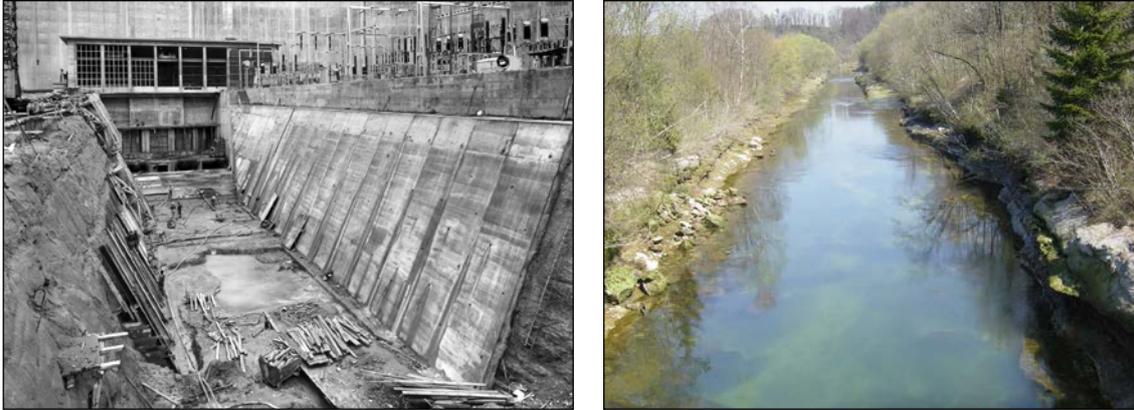


Figure 95: A gauche : construction du canal de fuite en 1964 ; droite : canal artificiel en aval de Schiffenen. Illustrations tirées de Grandin (2007).

Sur les 2.9 premiers kilomètres en aval du barrage de Schiffenen, la Sarine s'écoule entièrement sur territoire fribourgeois, puis elle marque la frontière avec le canton de Berne sur une distance de 1.3 km. Finalement, la Sarine conflue avec la Singine au km 9.712, sur le territoire du canton de Berne, 390 m en aval de la limite cantonale.

### 10.2.1 Profil en long topographique

La Figure 96 représente le profil en long de la Sarine entre le lac du Vernex et la confluence avec l'Aar. En plus du profil en long, la position des installations, des affluents et du tronçon des cours d'eau cible significatifs dans le cadre de cette étude est illustrée.

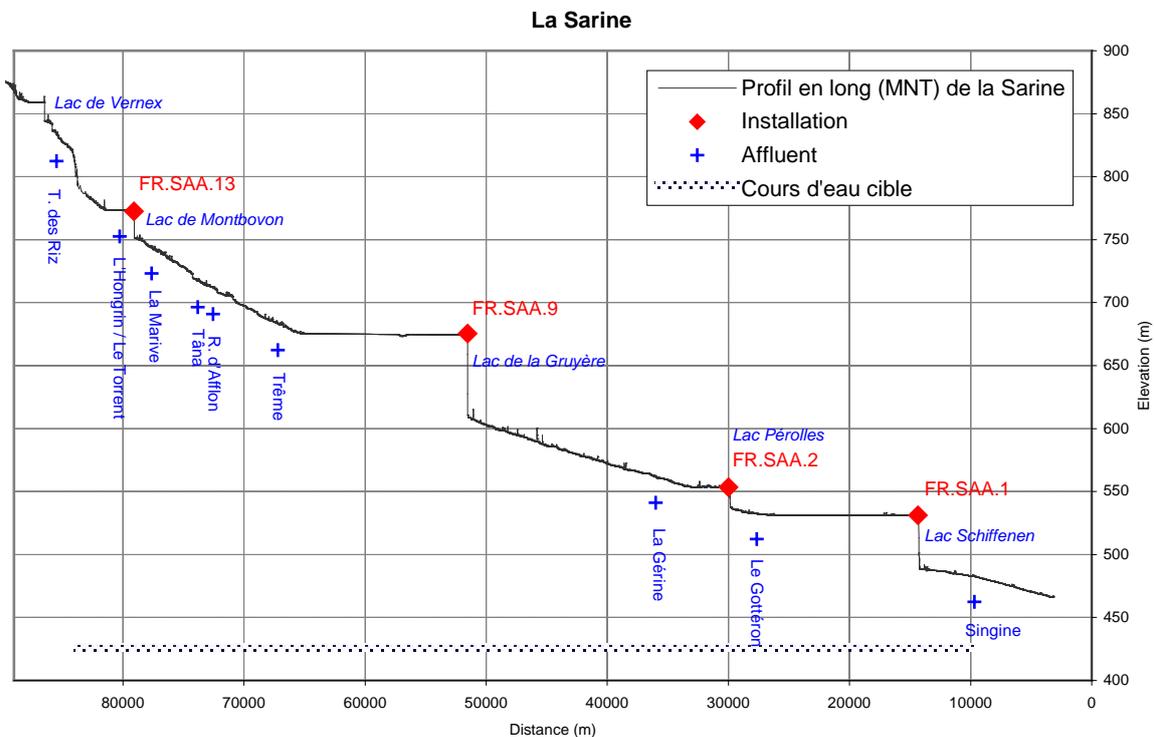


Figure 96: Profil en long topographique de la Sarine entre le lac du Vernex et l'Aar

## 10.2.2 Morphologie historique et actuel

Le chapitre 10.2.2 est repris du rapport intermédiaire des assainissements des éclusées (2013).

L'écomorphologie niveau R selon la méthodologie de l'OFEV n'est pas adaptée aux grands cours d'eau comme la Sarine. La Sarine entre la restitution de Lessoc et la confluence avec la Singine (en aval de Schiffenen) ne correspond dans l'ensemble plus à un cours d'eau de type écomorphologique « naturel », même si quelques courts tronçons se rapprochent encore d'un état naturel.

Afin de mettre en évidence les différences écomorphologiques de la Sarine, la Figure 97 présente à titre d'exemple des tronçons de la Sarine dans les années 1900 (carte Siegfried élaborées entre 1870 et 1926) et les cartes actuelles :

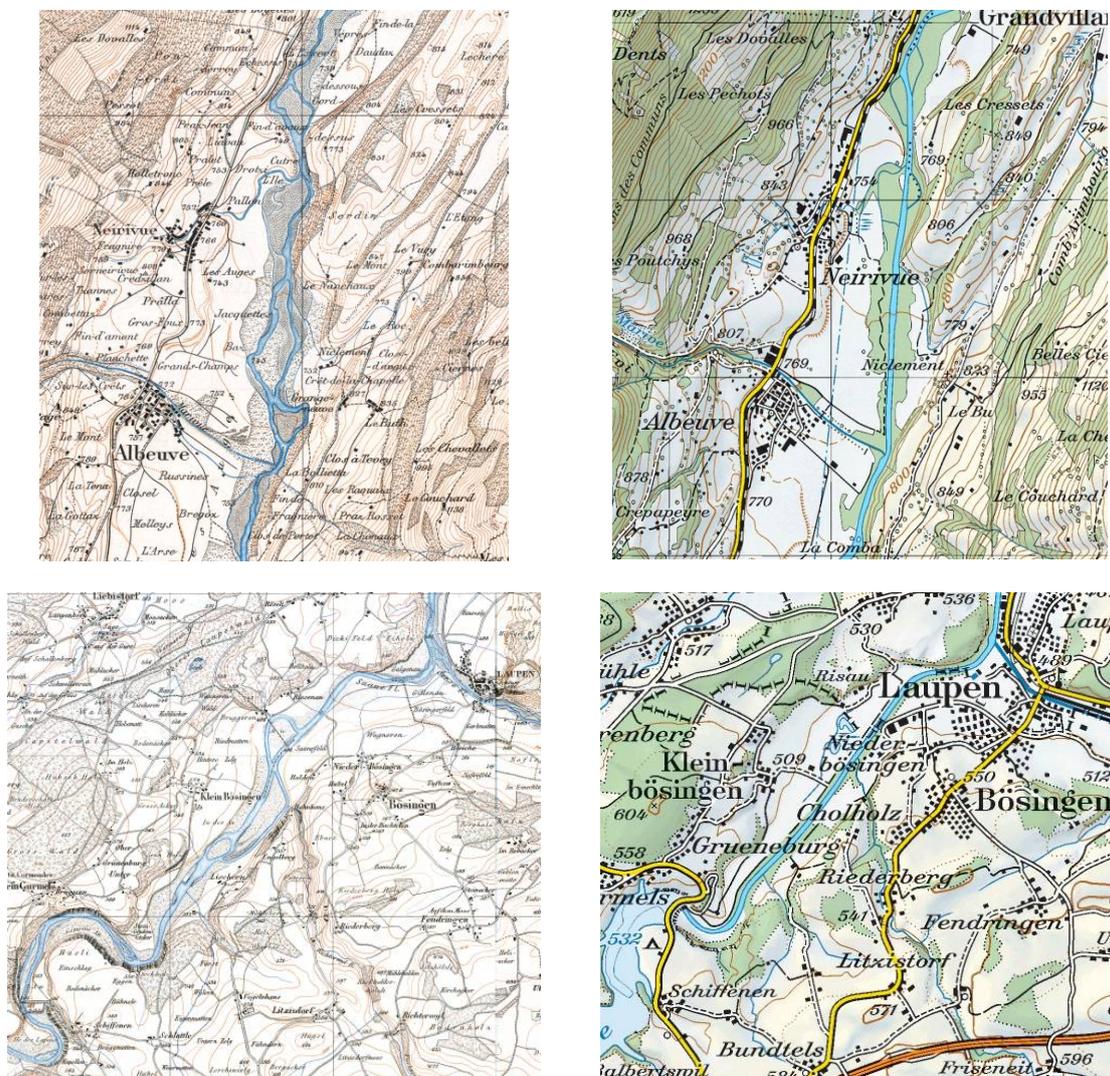


Figure 97: Comparaison des extraits de la carte Siegfried et une carte topographique actuelle. Haut: Tronçon en aval de Lessoc; bas: Tronçon en aval de Schiffenen (source : <http://map.geo.admin.ch/>)

Des appréciations écomorphologiques vis à vis des indicateurs biologiques (benthos) réalisées par le SEn sur les stations étudiées de la Sarine mettent en évidence les points suivants :

- "En ce qui concerne la Haute Sarine, l'ensemble du lit est en grande partie proche d'un état naturel. Les berges sont toutefois renforcées sur la plupart du linéaire par d'anciens enrochements qui ne sont plus toujours visibles" (EETEC, 2009).
- "Le cours de la Basse Sarine est très naturel, et ne présente des stabilisations ou des berges aménagées qu'uniquement dans la traversée de Fribourg" (EETEC, 2008).

En résumé, la Sarine entre Lessoc et la confluence avec la Singine a été fortement aménagée avec principalement des enrochements :

- Il existe cependant des tronçons qui ne sont pas canalisés ni soumis à un endiguement systématique des berges sur les 2 rives ;
- La divagation du cours d'eau est fortement réduite par la présence de ces enrochements ;
- Sur tous les tronçons de la Sarine étudiés, il existe encore des portions où le développement des rives présente, du point de vue de la biologie aquatique, des caractères relativement proches du naturel (enrochements non étanches, présence de bois mort, etc.) à l'exception du canal en aval de Schiffenen;
- Le cordon boisé est plus ou moins naturel et par conséquent l'ombrage est encore important sur l'ensemble du linéaire ;
- Des bancs de graviers sont encore présents sur certains secteurs mais fortement diminués en hautes eaux ;
- Il existe un déficit de charriage sur l'ensemble du linéaire mais aucune indication sur la qualité granulométrique n'est disponible (important notamment pour la reproduction piscicole).

### 10.3 Estimation de la charge solide

#### 10.3.1 La Sarine entre le Lac du Vernex et le Lac de la Gruyère – Evaluation approfondie

Les études et données existantes sur ce tronçon de la Sarine ont été analysées et les informations concernant le débit solide ont été comparées et consolidées entre elles et sur la base de visites de terrain. Les valeurs de débit solides considérées pour l'élaboration du profil en long de charriage sont présentées dans la table de synthèse (Tableau 30) au chapitre 10.3.1.7.

##### 10.3.1.1 Bathymétrie et étude des purges sur le lac du Vernex

L'estimation du débit solide charrié à l'amont du lac du Vernex est basée sur trois études principales:

- Entreprises Electriques Fribourgeoises (1996): Alluvionnement du Lac du Vernex. Etude des processus de transport solide. LCH – EPF Lausanne.
- Groupe E (2010). Lac du Vernex Rossinière. Rapport Bathymétrie 2010. Rapport technique.
- E-dric.ch et al. (2011): Gestion des purges du Lac du Vernex à Rossinière. Notice d'impact sur l'environnement. Rapport technique.

Selon les levés bathymétriques (2010, Figure 98) le volume moyen des sédiments déposés entre 1974 et 2010 est d'environ 44'000 m<sup>3</sup>/a. Cette valeur de l'alluvionnement du lac du Vernex a été reprise dans l'étude E-dric (2011). De plus, cette même étude conclut que le transit à travers l'installation via les vannes de fond est d'environ 45'000 m<sup>3</sup>/a. Les ordres de grandeur de ces valeurs sont confirmés par l'étude EPFL (1996) qui concluait que les apports totaux sont de

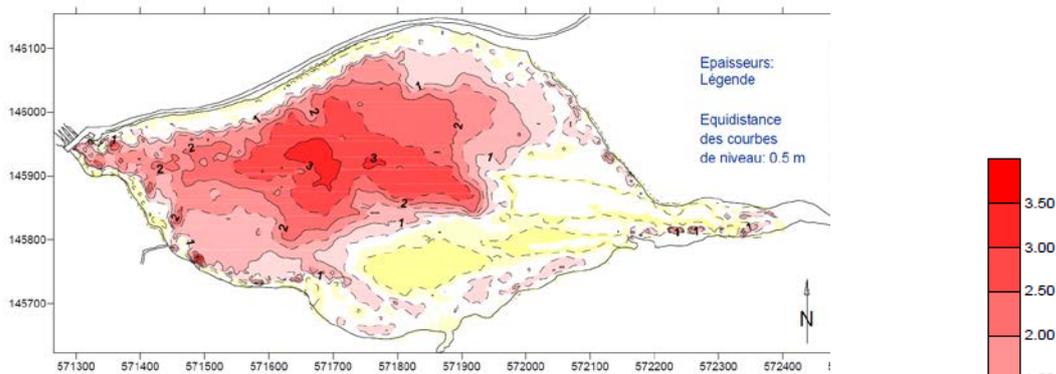
83'000 m<sup>3</sup>/a, dont 36'000 m<sup>3</sup>/a se déposent dans le lac, 37'000 m<sup>3</sup>/a le franchissent et 10'000 m<sup>3</sup>/a sont extraits sous forme de gravier à l'amont du lac.

Pour estimer le volume de matériaux de charriage, on peut faire l'hypothèse que 87% du transport total sont des sédiments fins (13% de charriage, selon Brune (1953)). Sur la base de la moyenne de la charge totale des études de 1996 et 2011, on estime le débit solide charrié à l'amont du lac du Vernex à **11'250 m<sup>3</sup>/a**.

Dans le cadre de l'étude d'impact sur l'environnement des purges du lac du Vernex, les apports latéraux de charriage entre le barrage de Rossinière et le lac de Montbovon étaient estimés à 3'100 m<sup>3</sup>/a. Il n'y est pas clairement explicité s'il s'agit du débit charrié annuel ou du débit solide total, y compris les matériaux fins. Dans le même rapport, un faible alluvionnement du lac de Montbovon est documenté. Des calculs hydrauliques simples ont montré que les forces tractrices dans le secteur du barrage de Lessoc ne permettent pas de faire transiter les matériaux. On conclut, à partir des dépôts minimes observés dans le lac, que les apports en charriage en aval du barrage de Rossinière sont très faibles. De plus, on peut en conclure que les apports en sédiments fins qui sont évacués par la turbine peuvent transiter dans le lac de Montbovon.

L'apport latéral de charriage entre le barrage de Rossinière et le lac de Montbovon est estimé à 400 m<sup>3</sup>/a. Dans ce chiffre, les apports du T. des Riz de 250 m<sup>3</sup>/a ne sont pas considérés.

Répartition des sédiments accumulés de 1999 à 2005:



Répartition des sédiments accumulés de 2005 à 2010:

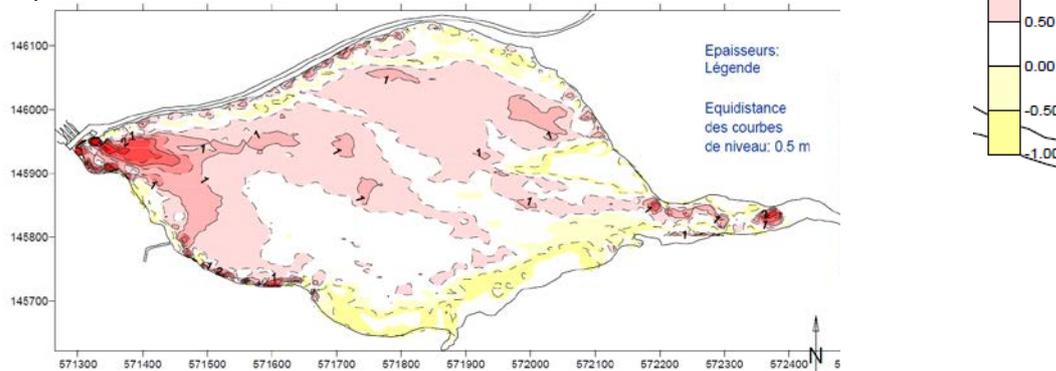


Figure 98: Répartition des sédiments accumulés dans le Lac du Vernex entre 1999 et 2010 (Groupe E, 2010)

### 10.3.1.2 Planifications de l'assainissement du régime de charriage BE / VD

Selon les résultats provisoires (état 30.10.2013) du rapport intermédiaire "Gewässersystem Saane Oberlauf" du canton Berne, l'apport des matériaux charriés sur la Sarine est quantifié avec 2'800 m<sup>3</sup>/a pour l'état actuel et 4'600 m<sup>3</sup>/a pour l'état non altéré.

En traversant une partie du canton de Vaud, le charriage de la Sarine est alimenté par trois affluents ; concomitamment deux sites d'extraction de graviers sont opérationnels. Le bilan de charriage qui entre dans le lac du Vernex, selon l'étude vaudoise (rapport intermédiaire provisoire, 2013), est estimé à 6'000 – 12'000 m<sup>3</sup>/a pour l'état naturel (valeur repris: 9'000 m<sup>3</sup>/a) et 5'300 – 11'000 m<sup>3</sup>/a pour l'état actuel (valeur repris: 8'150 m<sup>3</sup>/a).

### 10.3.1.3 Evolution du lit de la Sarine entre Lessoc et Broc

L'évolution du lit de la Sarine est documentée grâce à des relevés de profils en long du lit moyen et grâce à des profils en travers entre Lessoc et le lac de la Gruyère pour les années 1976, 1982, 1999 et 2009. Cette donnée de base permet d'estimer le volume des matériaux qui a été érodé du lit de la Sarine pendant cette période. Ce tronçon est notamment caractérisé par une déconnexion latérale des zones alluviales, en raison de l'incision de la Sarine dans son lit mineur (Guex et al., 2003<sup>14</sup>).

Les profils en long sont subdivisées en trois tronçons: GEWISS 78.963 – 74.423 (Barrage Lessoc jusqu'au Pont à Villars-sous-Mont), GEWISS 74.423 – 69.916 (jusqu'à la confluence du R. de Chésalles) et GEWISS 69.916 – 65.238 (jusqu'au lac de la Gruyère). Le Tableau 29 présente les volumes équivalents à l'érosion du lit moyen :

Tableau 29: Perte des matériaux du lit de la Sarine entre le barrage Lessoc et le lac de la Gruyère

	Tronçon 1 (m <sup>3</sup> ) 65.238 - 69.916	Tronçon 2 (m <sup>3</sup> ) 69.916 - 74.423	Tronçon 3 (m <sup>3</sup> ) 74.423 - 78.963	Total (m <sup>3</sup> )	Volume par an m <sup>3</sup> /a
1976-1982	5'580	22'100	23'460	51'150	8'525
1982-1999	19'380	26'180	33'710	79'260	4'662
1999-2009	9'520	40'680	15'460	65'660	6'566
m <sup>3</sup> /an (1999-2009)	950	4050	1550		

Une interprétation de ces résultats est utilisé pour le dimensionnement des mesures d'assainissement du régime de charriage, voir dans paragraphe 10.7.3.2.

### 10.3.1.4 Extractions de graviers

Entre le lac du Vernex et le lac de la Gruyère, il n'y a aucune extraction de graviers sur la Sarine. Par contre, il y a des sites d'extraction sur les affluents que sont l'Albeuve et la Tâna, où les apports solides peuvent être quantifiés.

<sup>14</sup> Selon Guex et al., (2003), après 1960, deux activités humaines principales ont contribué à augmenter l'incision du lit et la déconnexion de la rivière d'avec sa plaine alluviale. L'exploitation de gravier et la rétention d'eau dans les barrages dans la partie supérieure des bassins versants. Entre 1960 et 1976, le gravier était extrait directement depuis le lit de la rivière et la combinaison de cette activité avec le piégeage des sédiments en amont a contribué à accélérer l'incision du lit déjà initiée par les endiguements systématiques. Ainsi, l'érosion a été favorisée par rapport à la sédimentation. L'analyse des profils en travers a montré une incision moyenne d'environ 2 m, avec une incision maximale de 5.3 m depuis 1916 au niveau de Enney.

Sur la Tâna, il s'agit de l'installation FR.TAN.3, où les matériaux charriés sont piégés en amont de l'ouvrage de la prise d'eau. Le gravier est remis en aval de manière artificielle, par des moyens mécaniques. Selon les informations de M. Guy Raboud (interview du 31.10.2013), un volume d'environ 600 m<sup>3</sup>/a doit être extrait de la retenue. Seulement 450m<sup>3</sup>/a sont remis à l'aval.

Sur l'Albeuve, il y a une extraction de graviers à l'amont de la rupture de la pente du cours d'eau. Cette mesure est liée à la protection contre les crues, car le cours d'eau à l'aval jusqu'à la confluence avec la Trême n'est pas capable de transporter les apports du bassin versant. Il s'agit d'une extraction d'environ 875 m<sup>3</sup>/a.

### 10.3.1.5 Capacité de transport sur la Sarine et ses affluents

La méthode des capacités de transport de l'aide à l'exécution a servi de base à l'estimation de la capacité de transport dans le tronçon à l'amont de l'embouchure de la Sarine dans le lac de la Gruyère à Broc (km 67.160). La granulométrie utilisée dans le calcul a été prélevée dans la zone alluviale de Broc (Figure 93) pour être représentative d'un débit à l'état naturel. La capacité de transport du tronçon est estimée à 13'500 m<sup>3</sup>/a.

### 10.3.1.6 Bathymétrie: Lac de la Gruyère

L'estimation du débit solide charrié sur la Sarine à l'amont du lac de la Gruyère est basée sur le rapport Bathymétrie (Entreprises Electriques Fribourgeoises, 2001), qui prend en considération l'alluvionnement entre 1945 et en 1996. Le lac de la Gruyère est subdivisé en trois tronçons. La Sarine entre dans le tronçon 3 en amont du lac. Le seul autre affluent avec un apport de transport solide sur ce tronçon est la Jogne.

L'alluvionnement du tronçon 3 du lac de la Gruyère est quantifié à 108'350 m<sup>3</sup>/a. Avec l'hypothèse qu'il est composé d'environ 90 % de matériaux fins (taux selon Brune (1953), légèrement adapté pour prendre en considération le piégeage de charriage dans le bassin versant), le débit solide charrié sur les affluents peut être quantifié à environ **10'835 m<sup>3</sup>/a**.

### 10.3.1.7 Synthèse: débit solide sur la Sarine et ses affluents jusqu'au Lac de la Gruyère

Le Tableau 30 résume les chapitres précédents, et présente les apports de charriage pris en considération pour l'élaboration du profil en long de charriage de la Sarine.

Les débits estimés dans l'étude sur le charriage du canton de Vaud (chapitre 10.3.1.2) concordent bien avec les débits déposés dans le lac du Vernex (chapitre 10.3.1.1). Par rapport à l'incertitude concernant le taux de charriage de 13 % des apports totaux, les débits de l'étude vaudoise sont préférés et donc repris comme valeur de base.

La quantification des débits apportés des affluents de la Sarine est possible sur la Tâna et la Trême, où il y a des extractions de graviers connues. Pour estimer le débit charrié à la confluence de la Sarine, les données sont interpolés sur le bassin versant: les 600 m<sup>3</sup>/a de la Tâna sur les premiers 3 km sont interpolés sur la longueur totale à l'amont de la chute vers Grandvillard (4.5 km, donc 900 m<sup>3</sup>/a). Sur la Trême, les apports sont estimés à l'échelle de grandeur des extractions sur l'Albeuve (1'000 m<sup>3</sup>/a). Nous formulons l'hypothèse que l'apport additionnel de l'Albeuve à l'état naturel n'excède pas 250 m<sup>3</sup>/a environ car le charriage se déposait sur le tronçon à l'aval de l'installation FR.ALB.2

Les apports de la Marive, du Torrent et du R. d'Afflon sont estimés par rapport aux caractéristiques de leur BV et par rapport aux dépôts observés à leur confluence dans la Sarine, en considérant les cours d'eau de référence évoqués dans le Tableau 30.

Tableau 30: Synthèse des débits charriés sur la Sarine et ses affluents: Lac du Vernex au Lac de la Gruyère

	Distance (km)	Charriage actuel (m <sup>3</sup> /a)	Charriage naturel (m <sup>3</sup> /a)	Source
Amont Rossinière	87.850	8'150	9'000	Etude charriage VD
Aval Rossinière	86.500	0	9'000	Voir chapitre 10.5
Affluent T. des Riz	85.490	250	250	e-dric.ch / expertise / visite
Alimentation latérale	86.500 - 81.450	400	400	e-dric.ch / expertise
Affluent l'Hongrin	80.560	900	1050	Calcul / expertise / visite
Affluent le Torrent	80.270	900	900	Cours d'eau de référence: La Tâna / visite
Affluent la Marive	77.650	600	600	Cours d'eau de référence: La Tâna / visite
Affluent la Tâna	73.820	900	800	Gestion de l'installation / interpolation sur BV / visite
Affluent R. d'Afflon	72.550	125	125	Cours d'eau de référence: La Tâna / visite
Affluent la Trême	67.220	1'250	1'000	Gestion de l'installation / interpolation sur BV / visite
Tronçon limitant (Broc)	67.160	13'500	13'500	Calcul / visite
Erosion du lit de la Sarine	79.085 - 65.000	6'500	0	Calcul

### 10.3.2 La Sarine entre le Lac de la Gruyère et l'Aar – résumé des études existantes

Des études mettant en évidence un déficit de charriage existent déjà pour ces tronçons; elles sont mentionnées dans les chapitres concernés.

### 10.3.2.1 Résumé des études existantes sur le transport solide de la Sarine à l'aval du Lac de la Gruyère

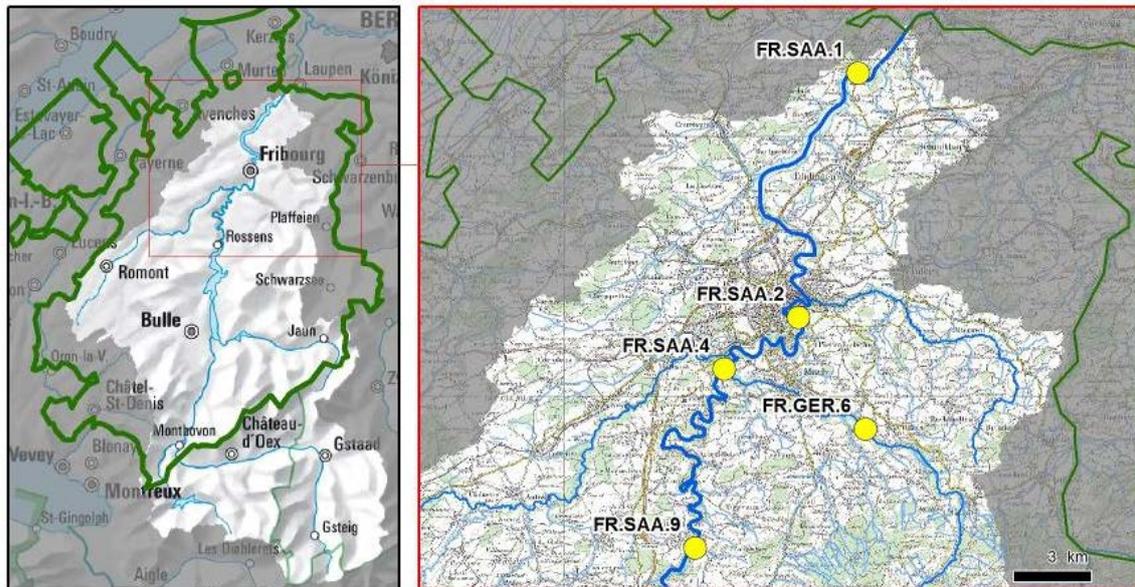


Figure 99: Bassin versant de la Sarine (sans Singine) avec la vue en détail à l'aval du lac de la Gruyère

L'étude de Jaeggi (2002) présente un nombre important de modélisations numériques du charriage de la Sarine à l'aval du barrage de Rossens. Elle constate un apport solide d'en moyenne 4'000 m<sup>3</sup>/a dans la situation avant la construction du barrage. Les raisons de ce débit "relativement bas" sont liées soit à une tendance générale au dépôt de la Sarine, soit à un choix de granulométrie relativement grossière. A l'état actuel, le charriage est complètement coupé dans le lac de la Gruyère. Selon les simulations numériques, il y a une tendance à l'érosion à l'aval du barrage – successivement, le lit de la Sarine serait lavé des alluvions en raison du manque du ravitaillement. Selon Jaeggi (2002), cette érosion se propage de l'amont vers l'aval avec une vitesse d'environ 1 km tous les 6 ans. Dans la situation actuelle, en raison de l'érosion du lit, la Sarine transporte un débit de charriage d'environ 1'000 m<sup>3</sup>/a à Hauterive.

Concernant la **Gérine**, deux études détaillées ont par ailleurs déjà été consacrées à son charriage:

- Jaeggi (1999) ;
- Guhl (2013).

Nous résumons ci-dessous les principales informations livrées par ces deux études consacrées au charriage de la Gérine.

La Gérine est depuis 1992 presque entièrement incluse dans l'inventaire fédéral des zones alluviales d'importance nationale. Il s'agit de l'objet n°61 s'étend entre Plasselb et Marly et de l'objet 60, qui s'étend sur le tronçon en aval de Marly, jusqu'à la confluence avec la Sarine. Les études mettent en évidence que la Gérine présente un cours presque entièrement naturel, sauf dans sa partie aval à Marly. « *La zone alluviale de la Gérine présente une très grande valeur naturelle. Son cours est très proche de l'état naturel sur plus de 10 km entre Plasselb et l'entrée de Marly. Il n'est pratiquement pas corrigé et présente une dynamique fluviale très active. La Gérine s'écoule sur une grande largeur avec un régime en tresses en raison de la pente du cours d'eau et des crues morphogènes fréquentes* » (Guhl, 2013).

L'apport en sédiments est important dans la partie supérieure du bassin versant dans le Plas-selbschlund. Les courbes modélisées du transport solide de la Gérine montrent une tendance générale au dépôt, même si la Gérine parvient à faire transiter une bonne partie de ses matériaux jusque dans la Sarine.

Historiquement, une exploitation commerciale de graviers à eu lieu à la Stersmühle à Tentglingen, de 1962 à 1973. 25'000 m<sup>3</sup> / an ont été extraits à des fins commerciales, ce qui a engendré une baisse du fond du lit et une érosion des berges au niveau du pont de la Stersmühle. La loi cantonale du 26 novembre 1975 sur l'aménagement des cours d'eau a ensuite conduit à l'arrêt des extractions régulières de matériaux dans le lit de la Gérine.

Le rapport sur la Gérine de Jaeggi (2001) estime l'apport de la Gérine à 4'300 t/a, soit avec une densité de 1.6t/m<sup>3</sup> un apport de 3'500 m<sup>3</sup>/a. Les crues de la Sarine dépassant 120 à 170 m<sup>3</sup> sont capables d'éroder le dépôt formé par la Gérine. Jaeggi présente un profil en long de charriage de la Sarine en aval de la Gérine jusqu'à la retenue du lac de Pérolles. Pour une année hydrologique moyenne, la Sarine serait en mesure de transporter la totalité des apports de la Gérine jusqu'au lac de Pérolles, où tout se déposerait. Selon cette étude, le transport est stoppé au barrage de la Maigrauge (point km 32.800).

Notons tout de même que le volume de sédiments dans le lac de Pérolles a diminué d'environ 4'300 m<sup>3</sup>/a entre 1999 et 2007 en raison de "la très grande crue du 22 août 2005" (Groupe E, 2007). L'analyse détaillée des relevés bathymétriques (Figure 100) confirme les hypothèses de Jaeggi. A proximité du barrage de la Maigrauge, au nord du tronçon 1 (Figure 100), on note une érosion du lit. Cependant, on observe une zone de dépôt à l'entrée du lac (ouest du tronçon 2, Figure 100)

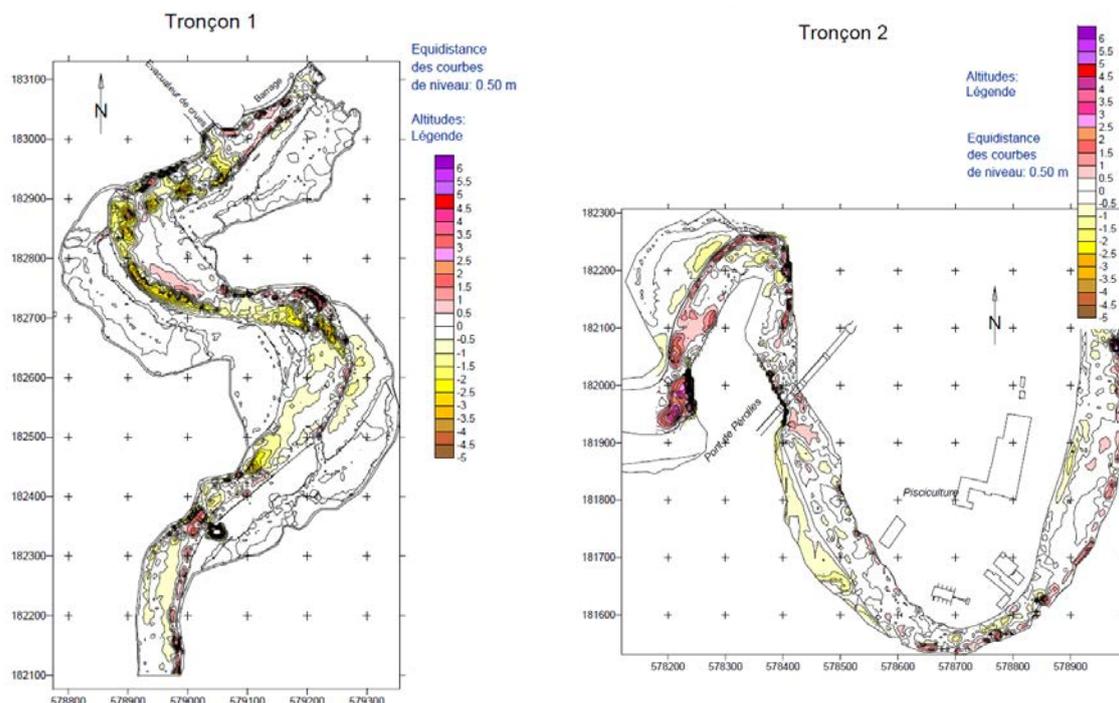


Figure 100: Répartition des sédiments accumulés de 1999 à 2007 dans le lac de Pérolles (Groupe E, 2007). La Sarine coule de sud à nord (Tronçon 1) respectivement de gauche à droite (Tronçon 2).

L'analyse des cartes de synthèse confirme donc les conclusions de Jaeggi. Bien que le volume total de sédiments diminue, des dépôts sont visibles en amont de la retenue. La fraction des graviers est la première fraction à se déposer au fur à la mesure que la vitesse de l'écoulement diminue dans le lac. On peut en conclure que cette fraction (gravier) se dépose en amont du lac et que les sédiments fins, eux, peuvent transiter.

Il n'y a pas d'étude sur le transport sédimentaire pour le tronçon à l'aval du barrage de la Maigrauge. Le seul pourvoyeur de sédiment est le Gottéron qui entre dans la Sarine à 2.35 km à l'aval de l'installation en rive droite. L'apport du débit solide est estimé dans le cadre de la présente étude à 1'435 m<sup>3</sup>/a.

Environ 2.5 km en aval de l'installation FR.SAA.2 (Barrage de la Maigrauge), dans le secteur du pont de Zaehringen, débute le lac de Schiffenen. D'une longueur d'environ 12 km, il bloque également le transport solide de la Sarine et de ses affluents.

Il n'y a aucune étude qui quantifie le charriage de la Sarine entre le barrage de Schiffenen et la confluence de la Singine. Les informations disponibles se basent sur le système Singine – Sarine, qui ne traite pas un tronçon d'environ 4.65 km en aval du barrage de Schiffenen sur la Sarine. Le transport solide est complètement bloqué par le barrage de Schiffenen (Flussbau AG, 2007). Selon l'étude sur le charriage du canton de Berne (Flussbau AG, 2013), les apports restent négligeables jusqu'à la confluence de la Singine en rive droite. Seuls les apports de la Singine, qui sont estimés à 6'500 m<sup>3</sup>/a à l'état actuel, ont été pris en compte et non l'estimation de 11'000 m<sup>3</sup>/a du débit charrié à l'aval de la confluence dans l'état naturel. Ces derniers chiffres mentionnés dans cette section sont donnés à titre indicatif – car la Singine rejoint la Sarine sur le territoire du canton de Berne. Ils ne sont donc pas repris dans le profil en long du charriage.

Tableau 31: Synthèse des débits charriés sur la Sarine et ses affluents: Lac de la Gruyère à l'Aar

	Distance (km)	Charriage actuel (m <sup>3</sup> /a)	Charriage naturel (m <sup>3</sup> /a)	Source
Transit Lac de la Gruyère	51.500	0	13'500	Cette étude
Tronçon limitant (Petite Sarine)	51.500 – 36.000	inconnu	4000	Jaeggi (2002)
Érosion du fond du lit	51.500 – 36.000	1000	inconnu	Jaeggi (2001)
Apport de la Gérine	36.000	3500	3500	Jaeggi (2002)
Tronçon limitant	32.800	4500	4500	Jaeggi (2001)
Transit Lac de Pérolles	30.000	0	inconnu	Jaeggi (2001), Groupe E (Bathymétrie, 2007)
Apport du Gottéron	27.650	1435	1435	Cette étude
Transit Schiffenensee	14.350	0	inconnu	Flussbau AG (2007)

## 10.4 Estimation du débit de charriage nécessaire

Le chapitre 4.4 présente la méthode de calcul du débit de charriage nécessaire. Le tableau suivant présente les résultats pour la Sarine à plusieurs endroits à l'amont du lac de la Gruyère:

Tableau 32: Débit de charriage nécessaire estimé sur la Sarine entre le lac du Vernex et le lac de la Gruyère

Distance (km)	Morphologie (Critères de Yalin et da Silva, 1991)	B <sub>r</sub> (m)	Débit solide nécessaire	
			limite inf. (m <sup>3</sup> /a)	limite sup. (m <sup>3</sup> /a)
84.620	lit droit	49.3	3'850	10'300
82.165	lit droit	49.8	3'950	10'500
67.160	lit droit	74.6	5'675	15'125

Pour le tronçon entre le barrage de Lessoc et le lac de la Gruyère, l'évolution de la pente et de la largeur de la rivière en fonction notamment de l'apport de charriage a été évaluée. Cette évaluation est utilisée pour dimensionner l'apport de charriage appropriée. Le paragraphe 10.7.3.2 détaille plus précisément la démarche appliquée pour ce tronçon.

## 10.5 Quantification de l'impact des installations

### FR.SAA.1 – Barrage de Schiffenen (Schiffenensee)

Coupant complètement le charriage de la Sarine, l'atteinte du barrage du Schiffenensee sur le régime de charriage peut être caractérisée comme **très prononcée** (80 – 100 %). Cette évaluation se base sur l'étude Flussbau AG (2007) et sur l'évaluation de l'alluvionnement du lac. Il n'y a pas eu d'évaluation détaillée de la Sarine à l'aval du barrage de Schiffenen. Dans le cadre de l'étude actuelle bernoise sur le charriage (discussion avec M. Hunzinger de Flussbau AG, 2013), le débit solide actuel sur le tronçon à l'aval du barrage de Schiffenen est caractérisé comme négligeable.



Photos: Groupe E

### FR.SAA.2 –Barrage de la Maigrauge (Lac de Pérolles)



Photo: Groupe E

Coupant complètement le charriage de la Sarine, le barrage de la Maigrauge porte une atteinte au régime de charriage qui peut être caractérisée comme **très prononcée** (80 – 100 %).

Pour la justification du degré d'atteinte, voir chapitre 10.3.2.1.

#### FR.SAA.4 – Extraction des graviers

Il s'agit d'une extraction sur le banc de graviers à la confluence de la Gérine et de la Sarine, nécessitée par l'absence de crues morphogènes sur la Sarine qui empêche l'évacuation naturelle du dépôt. Selon les informations de la commune de Marly, des matériaux sont enlevés pour garantir le fonctionnement du canal de fuite de la station de traitement des eaux usées de la commune de Marly. Cette mesure est nécessaire environ tous les 10 ans, avec un volume d'environ 10 – 12'000 m<sup>3</sup> extrait. L'atteinte de cette extraction sur le régime de charriage de la Sarine est **nulle** (0 – 20 %).

#### FR.GER.7 – Extraction des graviers

Pour raison de protection contre les crues, il y a une extraction de graviers à l'amont Muhlersbrücke à Plasselb. Les extractions sont périodiques et seulement exécutées en cas de besoin lorsqu'une certaine cote est atteinte sous ce pont. Bien que M. Jaeggi (1999) relève un conflit d'intérêt entre protection contre les crues et maintien d'un charriage et d'une dynamique naturels, on ne peut pas parler d'atteinte grave au régime de charriage de la Gérine puisque l'extraction de sédiments est opérée lorsque le niveau du lit est remonté de façon excessive et qu'il péjore le danger de crue. Les matériaux extraits ne sont pas réintroduits à l'aval. Par rapport au régime de charriage de la Sarine, l'installation a une atteinte **nulle** (0 – 20 %). Nous renvoyons pour plus de détails au § 2.5.3.4 car la Gérine est également évaluée comme cours d'eau cible dans l'appréciation sommaire.

#### FR.SAA.9 – Barrage de Rossens (Lac de la Gruyère)

Coupant complètement le charriage de la Sarine, le barrage de Rossens porte une atteinte caractérisée comme **très prononcée** (80 – 100 %) au régime de charriage. Cette évaluation se base sur les études existantes (Jaeggi 2001 et 2002) et sur l'analyse du rapport de bathymétrie du lac. Dans le cadre de cette étude, aucune évaluation approfondie du tronçon en aval du barrage de Rossens n'a été réalisée.

*Photos: Groupe E*

### FR.SAA.13 – Barrage de Lessoc (Lac de Montbovon)

Coupant complètement le charriage de la Sarine, le barrage de Lessoc porte une atteinte caractérisée comme **très prononcée** (80 – 100 %) sur le régime de charriage.

*Photos: Groupe E*

### Barrage de Rossinière (Lac du Vernex)

Le barrage de Rossinière est évalué dans le cadre de la planification stratégique de l'assainissement du régime de charriage du canton de Vaud. Il a une atteinte **très prononcée** (80 – 100 %) sur le régime de charriage de la Sarine. Cette évaluation correspond aux données de base et à l'analyse réalisée dans le cadre de cette étude (voir chapitre 10.3.1.1).

*Photos: Groupe E*

### FR.ALB.2 – Extraction des graviers sur l'Albeuve (bassin versant de la Sarine)



Comme présenté au chapitre § 2.5.3.6 où l'Albeuve est traitée en tant que cours d'eau cible, cette extraction est liée à la protection contre les crues de l'Albeuve. Juste à l'amont de la confluence avec la Trême, l'Albeuve présente toujours une granulométrie étendue.

Degré d'atteinte sur la Sarine: **nul** (0 – 20 %)

#### FR.MAR.1 – Prise d'eau tyrolienne



Charriage très faible, pas de matériaux visibles. Apport non significatif par rapport à la Sarine.

Degré d'atteinte: **nul** (0 %)

#### FR.TAN.3 – Prise d'eau tyrolienne



Les matériaux extraits du barrage sont remis à l'aval de manière mécanique (500 – 600 m<sup>3</sup>/a). Une réserve pour la commune d'environ 100 – 150 m<sup>3</sup> est déposée juste à côté du cours d'eau (sans autorisation cantonale).

Degré d'atteinte: **faible** (20 – 40 %).

Même si l'atteinte est faible, nous jugeons nécessaire de restituer ce volume au cours d'eau en aval et subséquemment à la Sarine. L'ordre de grandeur du gain (environ 100 -150 m<sup>3</sup>/a) est à mettre en balance avec le déficit d'environ 9'000 m<sup>3</sup>/a sur la Sarine.

### 10.6 Etablissement du profil en long de charriage - bilan de transport solide

Sur la base des analyses des données de base existantes, des calculs de capacité de transport et d'une synthèse des chiffres avec les résultats des autres planifications stratégiques (BE, VD), le profil en long de charriage de la Sarine entre le lac du Vernex et le lac de la Gruyère peut être établi comme suit (Figure 101):

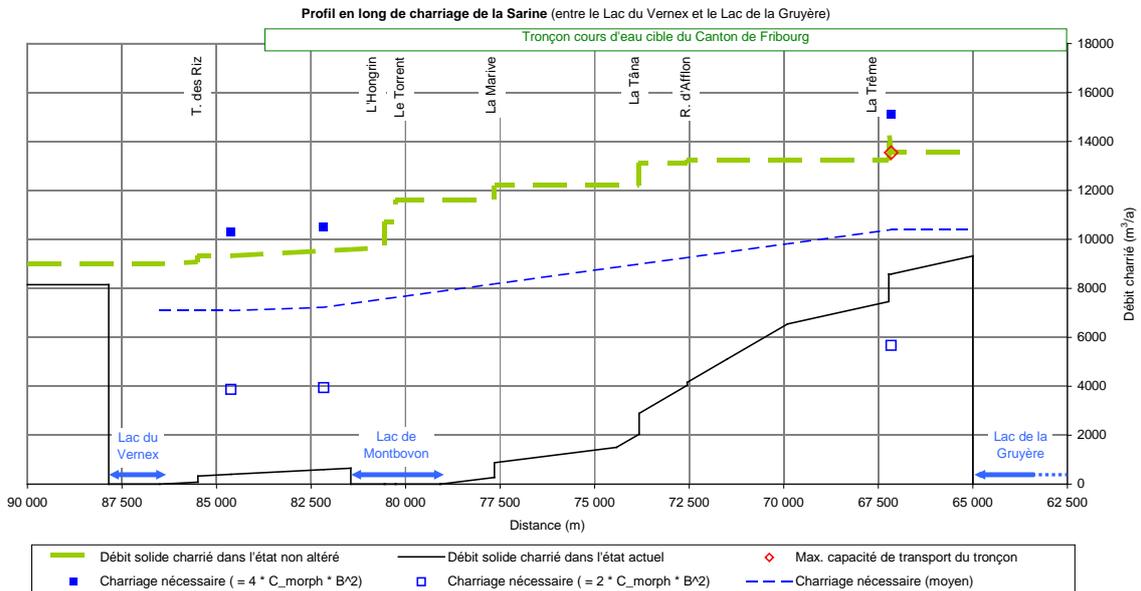


Figure 101: Profil en long de charriage de la Sarine entre le Lac du Vernex et le Lac de la Gruyère

Entre le lac du Vernex et le lac de Montbovon, le débit de charriage nécessaire n'est pas obtenu. Le barrage de Rossinière bloque le transit des apports solides.

La situation à l'aval du barrage Lessoc (lac de Montbovon) demande une explication: là, l'érosion du lit dans les trois tronçons mentionnés en chapitre 10.3.1.6 provoque un débit de charriage sur la Sarine qui, autour de la confluence de la Trême, est proche du débit de charriage nécessaire. Néanmoins la problématique n'est pas résolue. L'érosion du lit de la Sarine provoque la déconnection des zones alluviales entre le barrage Lessoc et le lac de la Gruyère. Bien que le débit charrié sur les derniers kilomètres avant le lac de la Gruyère soit suffisant, l'état actuel n'est pas durable. La source primaire du débit charrié est l'érosion; les apports latéraux (Marive, Tâna, Afflon et Trême) ne jouent qu'un rôle mineur. L'évaluation du degré d'atteinte du tronçon à l'aval du barrage Lessoc est donc faite pour la situation appréhendée dans son ensemble. L'atteinte par rapport au régime de charriage naturel est "très prononcée" du lac de Montbovon jusqu'au lac de la Gruyère.

Pour le profil en long de charriage de la Sarine à l'aval du lac de la Gruyère (Figure 102), les débits charriés sur le cours d'eau principal sont basés sur l'analyse et la synthèse des rapports et études existants. Le même principe est appliqué pour l'apport de charriage des affluents, sauf pour le Gottéron où le débit charrié est estimé dans le cadre de ce mandat.

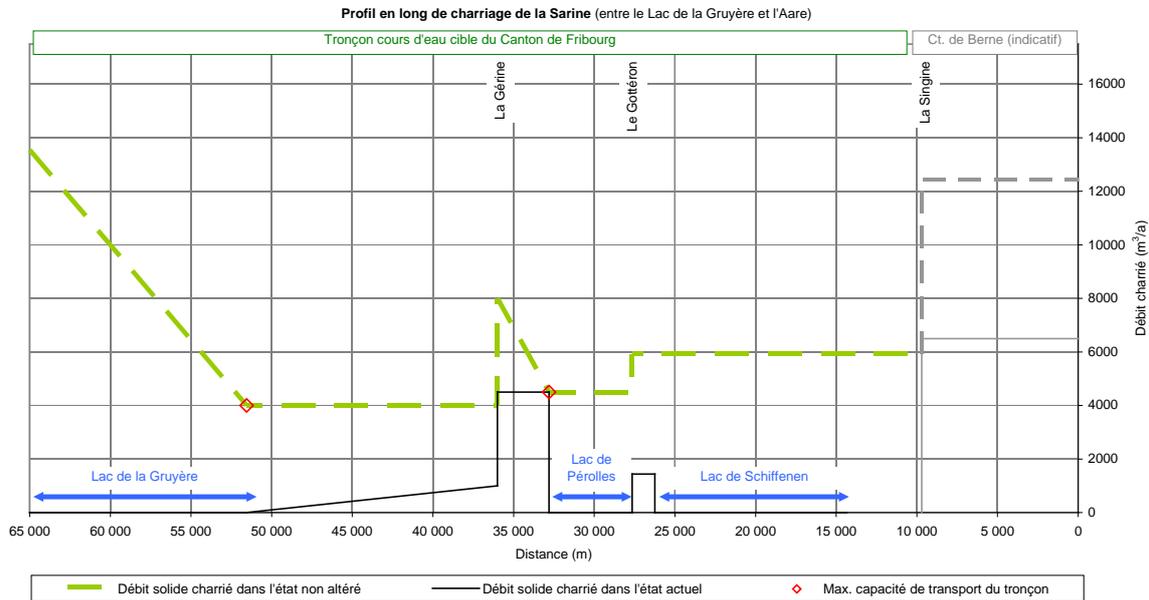


Figure 102: Profil en long de charriage de la Sarine entre le Lac de la Gruyère et l'Aar

En plus de l'estimation du degré d'atteinte au régime de charriage pour les installations de la Sarine, une évaluation de l'état actuel des tronçons par rapport au débit de charriage nécessaire a été élaborée, ce dernier étant calculé pour un état proche de l'état naturel (selon Fig. 13 de Schälchli et Kirchofer, 2012). Néanmoins, le débit de charriage nécessaire entre le lac du Vernex et le lac de la Gruyère n'est relevé que de la manière locale. Pour étendre ces mesures sur les tronçons, une interpolation linéaire de valeurs moyennes (entre la limite supérieure et inférieure) est faite. L'état des tronçons de la Sarine à l'amont du lac de la Gruyère est estimé et listé dans le Tableau 54 au chapitre 0.

Pour la Sarine à l'aval du lac de la Gruyère, aucune évaluation du débit de charriage nécessaire n'est faite, car l'analyse se base exclusivement sur des études existantes dans lesquelles ce paramètre ne faisait pas partie de l'investigation. Cette courbe ne figure donc pas sur la Figure 102 mais sera rajoutée dans le cadre du rapport final. Une estimation grossière du débit de charriage nécessaire est problématique, car liée aux incertitudes et aux conditions locales. Donc pour l'estimation de l'état des tronçons à l'aval du lac de la Gruyère jusqu'à la frontière cantonale de Fribourg / Berne, nous nous basons sur le degré d'atteinte au régime de charriage des installations (voir chapitre 10.5).

## 10.7 Influence des installations sur la protection contre les crues

De manière générale, les barrages de Rossinière, Lessoc, Rossens et Schiffenen servent à stocker de l'eau pour produire de l'électricité. En cas de crue, ils peuvent absorber un certain volume d'eau et ainsi modifier l'hydrogramme de la crue naturelle. Pour planifier sa production d'électricité à moyen et à court terme, Groupe E se base sur des modèles hydrologiques qui permettent d'optimiser la production d'énergie en fonction de la demande en électricité, des conditions météorologiques et des apports hydrologiques dans ses retenues (e-dric, 2013). Cela lui

permet par exemple d'abaisser préventivement le niveau de certains lacs afin de pouvoir stocker l'eau des crues de la Sarine.

L'optimisation de cette gestion conduit à diminuer les déversements dans les tronçons à débit résiduel lors de crues. Cela est notamment le cas en aval du barrage de Rossens. Le lac de la Gruyère est un grand réservoir qui permet d'absorber la majorité des crues. Des déversements sont toutefois réalisés lors des crues importantes (comme août 2005, août 2007, mai 2015). Des déversements sont plus fréquents en aval des barrages de Rossinière et Lessoc, dont les lacs d'accumulation ont une capacité beaucoup plus faible.

Pour qu'on puisse parler d'une influence d'un grand barrage comme Rossens sur la protection contre les crues, il faut toutefois qu'il existe en aval des objets menacés par les crues. La Sarine s'écoule en aval de Rossens dans une vallée encaissée dans la molasse, dans un cadre naturel. Le seul enjeu de protection contre les crues se situe en ville de Fribourg. Les études réalisées par E-dric (2013) montrent que la pointe de crue peut être réduite de plus de 10% (au maximum, selon les scénarios analysés), si un turbinage préventif est effectué pour abaisser le niveau de la retenue. Cet écrêtement de 10% peut sembler a priori plutôt faible mais peut permettre de rester au-dessous des valeurs de capacité critique du lit de la Sarine à Fribourg. De ce point de vue, on peut affirmer que le barrage de Rossens contribue à améliorer la protection contre les crues de la Sarine. Il a donc un effet bénéfique.

Le barrage de la Maigrauge et le barrage de Schiffenen sont situés en aval du barrage de Rossens. Tous les tronçons de la Sarine en aval de Rossens bénéficient de cette atténuation de la pointe de crue. Le barrage de Schiffenen permet également de conserver un volume libre pour stocker les crues, cependant beaucoup plus faible que le barrage de Rossens. Il peut permettre d'atténuer une première pointe de crue, avant de fonctionner au fil de l'eau si une deuxième pointe de crue se produit (e-dric, 2013). De manière générale, le barrage de Schiffenen a également un effet bénéfique sur la protection contre les crues. Selon e-dric (2013), la diminution de débit en aval de Schiffenen ne présente pas vraiment d'intérêt localement (Laupen), mais plutôt au niveau de la gestion globale contre les crues dans la région des trois lacs (Morat, Neuchâtel, Bienne), en lien avec les crues de l'Aar.

Les autres installations sur la Sarine (Rossinière, Lessoc et la Maigrauge) ont un effet de rétention uniquement des crues plus faible et plus fréquentes. Ils n'atténuent pas les crues le long de la Sarine. Leur influence sur la protection contre les crues est neutre.

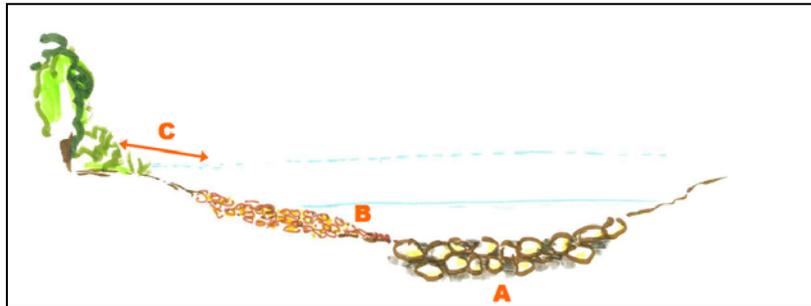
Concernant les affluents de la Sarine, le dépotoir sur l'Albeuve et le site d'extraction sur la Gérine sont bien entendu liés à la protection contre les crues. Il s'agit d'éviter un relèvement trop important du lit. De manière générale, cette étude démontre que ces dépotoirs et extractions de graviers ne portent pas d'atteinte grave au régime de charriage. Elles ne doivent en conséquent pas être assainies et ne doivent pas faire l'objet de mesure d'assainissement. Dès lors, il n'y a pas d'aspects de coordination à détailler entre l'assainissement du charriage et la protection contre les crues pour ces installations.

Concernant l'extraction de matériaux à la prise d'eau sur la Tâna, l'influence sur la protection contre les crues est plus ou moins nulle. L'installation se trouve à très grande distance d'infrastructure à enjeux. Il s'agit simplement de garantir le fonctionnement de la prise d'eau. La majorité des sédiments sont remis dans le cours d'eau en aval. Nous posons un constat similaire pour la prise d'eau sur le ruisseau des Marais.

## 10.8 Proposition de mesures d'assainissement

### 10.8.1 Objectifs des mesures d'assainissement

Pour décrire les phénomènes en jeu et l'ensemble des situations et atteintes observés sur la Sarine, un système d'évaluation de la performance des mesures basé sur trois indicateurs a été élaboré: La dynamique du lit (A), le charriage nécessaire pour le renouvellement du substrat (B) et l'équilibre alluvial (C).



#### Dynamique du lit (indicateur A)

La capacité du cours d'eau à générer du transport solide peut être altérée soit par des modifications du régime hydrologique (les débits de crue ne suffisent pas pour transporter des graviers), soit par altérations dans le cours d'eau (formation d'un pavage, couche pavée).

Les différentes installations influencent cet indicateur de la façon suivante :

- Le lac de Lessoc (**barrage de Lessoc**) ne lamine pas les crues importantes. Le débit moyen annuel et la probabilité des crues ne sont pas altérés. À l'aval de Lessoc, la dynamique du lit est atteinte par la formation d'un pavage lié au piégeage du transport solide dans la chaîne des installations de Rossinière et Lessoc.
- À l'aval du lac de la Gruyère (tronçon entre le **barrage de Rossens** et la centrale de Haute-rive, aussi appelé la Petite Sarine), l'altération du régime hydrologique cause un manque de dynamique du lit car des crues fréquentes sont atténuées dans le lac (pas de déversements en cas de crue).
- Le lac de Pérolles (**barrage de la Maigrage**) ne lamine pas les crues fréquentes ; le régime hydrologique est quand même atteint par la chaîne des installations des grands lacs à l'amont. À l'aval du barrage, le lit manque de dynamique en raison du débit résiduel uniforme.
- Le lac de Schiffenen (**barrage de Schiffenen**) altère le régime hydrologique, les débits d'éclusées réguliers à l'aval du barrage causent un pavage.

Les tronçons à l'aval des installations de Lessoc, Rossens et Maigrage sont traités comme tronçons prioritaires par rapport à l'assainissement de l'indicateur « dynamique du lit ».

### Renouvellement du substrat / charriage annuel (indicateur B)

Le charriage annuel ou renouvellement du substrat peut être altéré soit par un déficit quantitatif de charriage, soit par un apport du substrat en qualité non appropriée. L'objectif de l'assainissement du régime de charriage est de rétablir le débit de charriage de manière à éviter des atteintes durables aux structures morphologiques ou à la dynamique morphologique des eaux. Des apports de charriage de qualité appropriée amenés par des affluents peuvent réduire l'atteinte dans la rivière.

Les tronçons à l'aval des installations Lessoc, Rossens et Maigrauge sont traités comme tronçons prioritaires à l'assainissement de l'indicateur « charriage nécessaire ».

### Equilibre alluvial (indicateur C)

La déconnexion des zones alluviales peut être liée aux effets de l'érosion et de l'incision du lit de la Sarine, en raison du déficit de charriage. Cela a comme conséquence que des crues régulières ne sont plus capables d'inonder les bancs et zones de transition – leur fonctionnement environnemental ne peut plus être assuré. C'est le cas dans les zones alluviales qui se trouvent à l'aval de Lessoc et de Schiffenen. De plus, un tel effet peut être observé sans l'effet d'érosion, mais par une altération du régime hydrologique. Les signes sont similaires soit une stabilisation des berges et des bancs par une végétalisation trop bien développée pour le fonctionnement d'une zone alluviale.

Les tronçons à l'aval des installations de Lessoc, Rossens et Schiffenen présentent tous trois des zones alluviales d'importance nationale et sont donc prioritaires par rapport à cet indicateur.

## 10.8.2 Evaluation des mesures

L'évaluation de variantes d'assainissement proposées dans le cadre de ce rapport est documentée dans un rapport de synthèse "grandes installations" qui réunit les mesures des planifications stratégiques du charriage, des éclusées et de la migration piscicole sur la Sarine :

*RF Sarine Grandes Installations – Partie B Evaluation des variantes.*

Dans les chapitres suivants, les variantes sont présentées sur la base des objectifs d'assainissement et l'estimation de leur coût. L'utilité des mesures se compose de l'évaluation de la longueur du tronçon influencé par la mesure, du potentiel écologique du tronçon (à l'état revalorisé) et du gain théorique sur les indicateurs. Le tableau suivant montre les bases d'évaluation de l'utilité des mesures:

Tableau 33 : Evaluation de l'utilité des mesures

Mesure de l'utilité	Très bonne	Bonne	Faible	Nulle
Longueur du tronçon influencé par la mesure	long, > 10 km 3 pts	moyen, 5 à 10 km 2 pts	court, < 5km 1 pt	-
Potentiel écologique du tronçon influencé par la mesure, à l'état revalorisé	important 3 pts	moyen 2 pts	minime 1 pt	-
Valorisation potentielle	très bonne,	bonne,	moyenne,	faible,

gain sur les indicateurs	mieux que bonne 4 pts	+1 classe sur tous les indicateurs 3 pts	+1 classe sur indica- teur critique 2 pts	+1 classe sur indic. non critique 1 pt
--------------------------	-----------------------------	---	--	---

L'utilité d'une mesure est la somme des points des trois catégories.

### 10.8.3 Variantes – Barrage de Lessoc (Lac de Lessoc)

#### 10.8.3.1 Etat des lieux des indicateurs critiques

La centrale hydroélectrique de Lessoc se situe dans le barrage lui-même, avec des éclusées plus ou moins journalières. Il n'y a pas tronçon à débit résiduel lié au barrage de Lessoc. Le volume du Lac de Lessoc est estimé à 750'000 m<sup>3</sup> et est donc pas capable de laminer les crues importantes. La dynamique du lit à l'aval de Lessoc est assurée par les éclusées et les crues.

Les barrages de Rossinière et Lessoc bloquent l'entier des apports de charriage. Les sources possibles de matériaux sont l'érosion du lit, les apports des affluents et l'érosion des berges. Directement à l'aval du barrage de Lessoc, le lit de la Sarine est fortement pavé avec des blocs d'un diamètre moyen d'environ 20 cm. Les apports de graviers des affluents ne suffisent pas pour maintenir le profil en long, la Sarine se trouve dans un état d'érosion (voir paragraphe suivant).

L'incision du lit moyen de la Sarine depuis la construction des installations de Lessoc et Rossinière a entraîné la déconnexion des zones alluviales, qui se situent sur une grande partie du linéaire entre Lessoc et le Lac de la Gruyère. La problématique des zones alluviales est traitée plus spécifiquement dans le rapport d'assainissement selon LEaux Art. 80 al. 2 ("Assainissement des prélèvements d'eau", PRONAT, 2014).

Les indicateurs B et C sont critiques dans le tronçon de la Sarine à l'aval du barrage de Lessoc. Les mesures proposées visent à l'amélioration de ces indicateurs.

#### 10.8.3.2 Elaboration des interventions d'assainissement (Lessoc)

##### Interprétation des investigations d'érosion du lit de la Sarine

Pour une compréhension plus profonde de l'état d'érosion du lit de la Sarine, l'approche introduit dans le chapitre 10.3.1.3 a été répétée sur trois secteurs de 4.5-5km, l'objectif étant d'évaluer l'érosion. La figure ci-dessous montre les secteurs analysés.

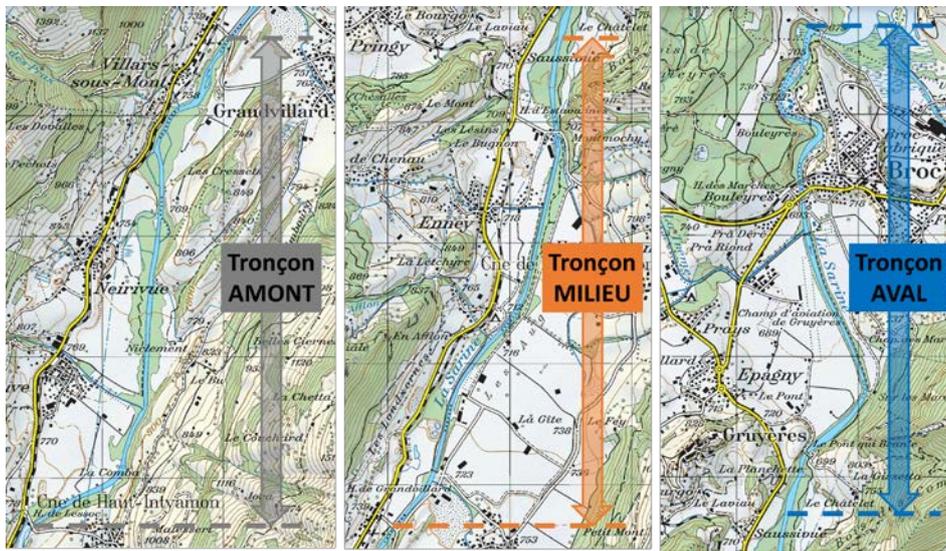


Figure 103 : Découpage des tronçons pour l'évaluation de l'érosion du lit de la Sarine

Les données de base utilisées sont les profils en long du fond moyen du lit de la Sarine entre Lessoc et le Lac de la Gruyère réalisés par l'OFEV. Les profils ont été mesurés en 1976, 1982, 1999 et 2009, ce qui permet d'analyser l'évolution du fond sur trois périodes de temps. La répartition par lieu et période est illustrée dans la Figure 104 et permet les interprétations suivantes:

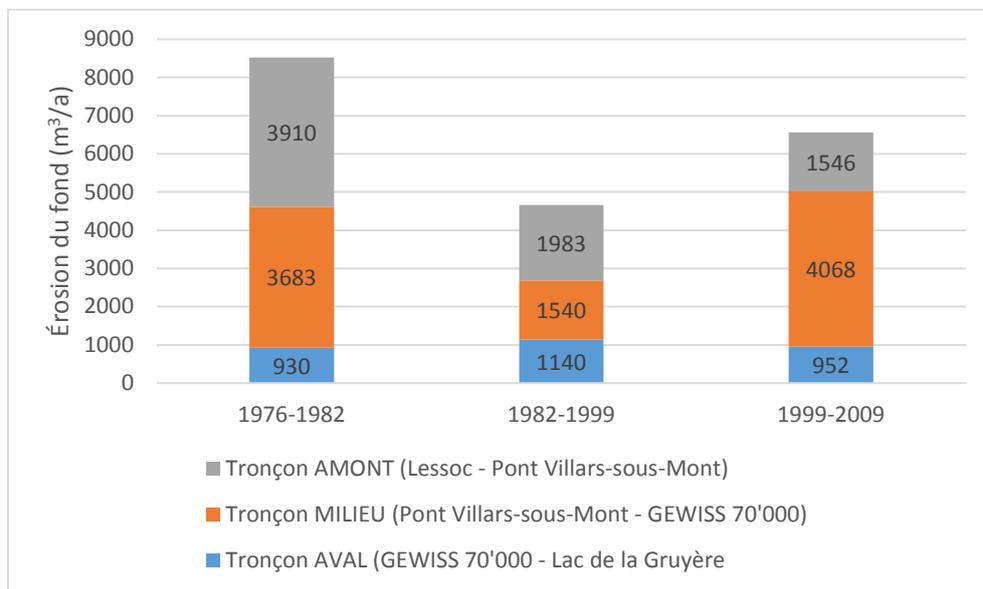


Figure 104: Érosion du fond de la Sarine entre Lessoc et le Lac de la Gruyère, répartie par lieu et temps.

- tronçon amont
  - Ce tronçon se termine juste à l'amont de la confluence de La Tâna – les apports solides ne se font donc que depuis la Marive.
  - Diminution d'érosion annuelle de presque 4'000 m³/a entre 1976 et 1982 à 1'500 m³/a entre 1999 et 2009.

- On peut faire l'hypothèse que cette diminution est liée au fait que le charriage "facilement" accessible a été lessivé dans la première phase et que le profil en long est maintenu en position grâce aux points fixes (rampes, « riffles », rocher, ...).
- tronçon milieu
  - Deux seuils ont été construits entre 1982 et 1999 avec une augmentation locale importante du niveau du lit. L'effet de l'érosion est donc sous-estimé par la méthode appliquée.
  - Augmentation d'érosion récente par rapport à l'époque 1976-1982 - malgré la fixation du profil en long à l'aide des seuils – probablement liée à la compensation du manque d'apport solide depuis l'amont, où l'érosion est en régression (pavage à l'aval du barrage).

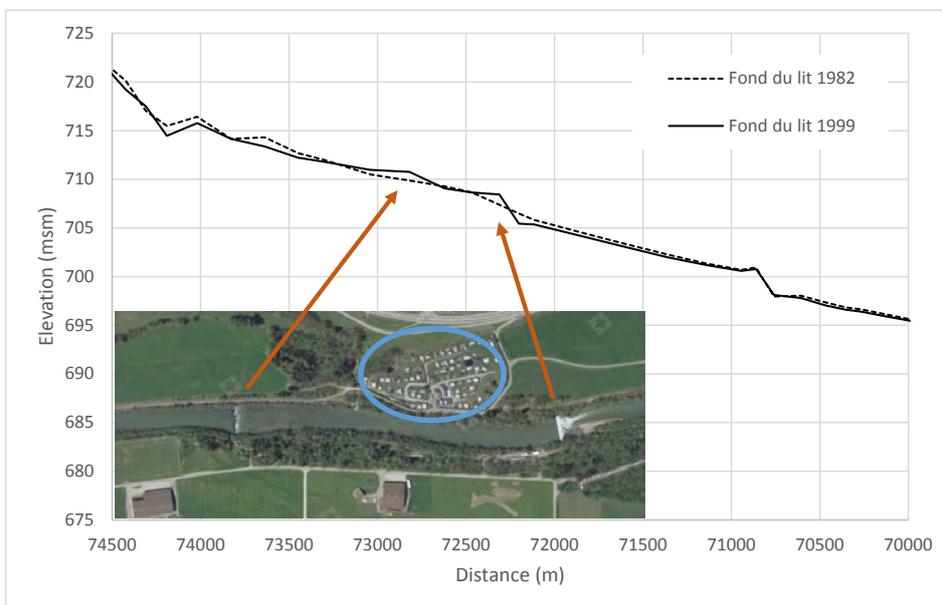


Figure 105 : fixation du profil en long à l'aide de deux seuils à l'amont et aval du camping à Enney (le camping est indiqué avec le cercle bleu sur la photo aérienne)

- tronçon aval
  - Érosion du lit régulière

La compréhension plus développée de l'évolution des sous-tronçons et de leur résistance contre l'érosion est une base précieuse pour l'élaboration d'un modèle morphologique selon l'approche UBCRM introduite dans le paragraphe suivant.

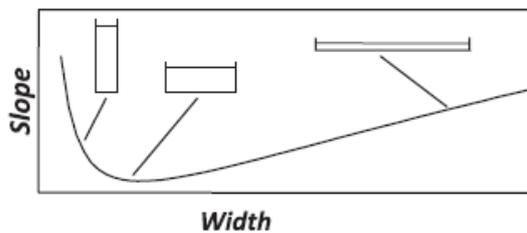
### Investigation selon l'approche UBCRM<sup>15</sup>

Cette approche n'est utilisée que sur ce tronçon. Les propriétés physiques d'une rivière sont couplées les unes avec les autres. En influençant les variables indépendantes comme le régime hydrologique (débit de crues), la concentration du sédiment ou leur granulométrie, un cours d'eau

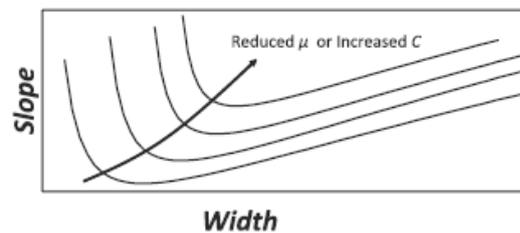
<sup>15</sup> *Bank Vegetation, Bank Strength, and Application of the University of British Columbia Regime Model to Stream Restoration.* Millar, R.G. et Eaton, B.C. (2011)

a tendance à établir un nouvel équilibre dynamique pour optimiser l'efficacité du transport. Ceci est réalisé par une adaptation de la largeur ou de la pente, en fonction des conditions locales.

En partant de l'hypothèse de valeurs constantes pour le débit de crue et le transport solide, la largeur et la pente dépendent l'une de l'autre selon la figure suivante (gauche). Cette courbe de base peut être influencée selon la figure de droite soit en réduisant la stabilité des berges, soit en augmentant le débit de charriage.



**Figure 3.** A single solution curve corresponding to all possible combinations of  $W$  and  $S$  for specified values for  $Q$ ,  $C$ , and bank strength. The optimum width corresponds to the minimum slope.



**Figure 5.** A family of theoretical solution curves for different combinations of  $Q$ ,  $C$ , and bank strength. Each curve has one optimal solution (the minimum slope). Wider and steeper optima are generally associated with reduced bank strength and/or an increase in sediment load.

Source: *Bank Vegetation, Bank Strength, and Application of the University of British Columbia Regime Model to Stream Restoration*. Millar, R.G. et Eaton, B.C. (2011)

Dans une configuration avec des berges érodables (non fixées), le cours d'eau peut changer sa morphologie en adaptant la pente et la largeur du lit. L'approche UBCRM permet de faire le lien entre le régime de charriage, le régime hydrologique (exprimé par le débit de crue et la concentration du sédiment) et la morphologie en fonction de la stabilité des berges. Les équations correspondantes se trouvent dans la fiche de calcul dans l'Annexe 9 "La Sarine à l'aval de Lessoc, analyse morphologique".

Le but d'une mesure est d'améliorer l'équilibre alluvial en influençant la pente à l'amont des points fixes du profil en long de la Sarine. Ceci fait, la zone d'influence du point fixe peut être allongée vers l'amont.

Entre le barrage de Lessoc et le Lac de la Gruyère, un ensemble de 6 biefs homogènes qui sont limités à l'aval par un point stable ont été identifiés. Sur la base des profils en long de l'OFEV, l'évolution de la pente moyenne entre 1976 et 2009 a été mesurée. La figure suivante illustre cette évolution à l'amont du pont d'accès d'Estavannens (à l'aval d'Enney, GEWISS km 70.900, photo de droite).

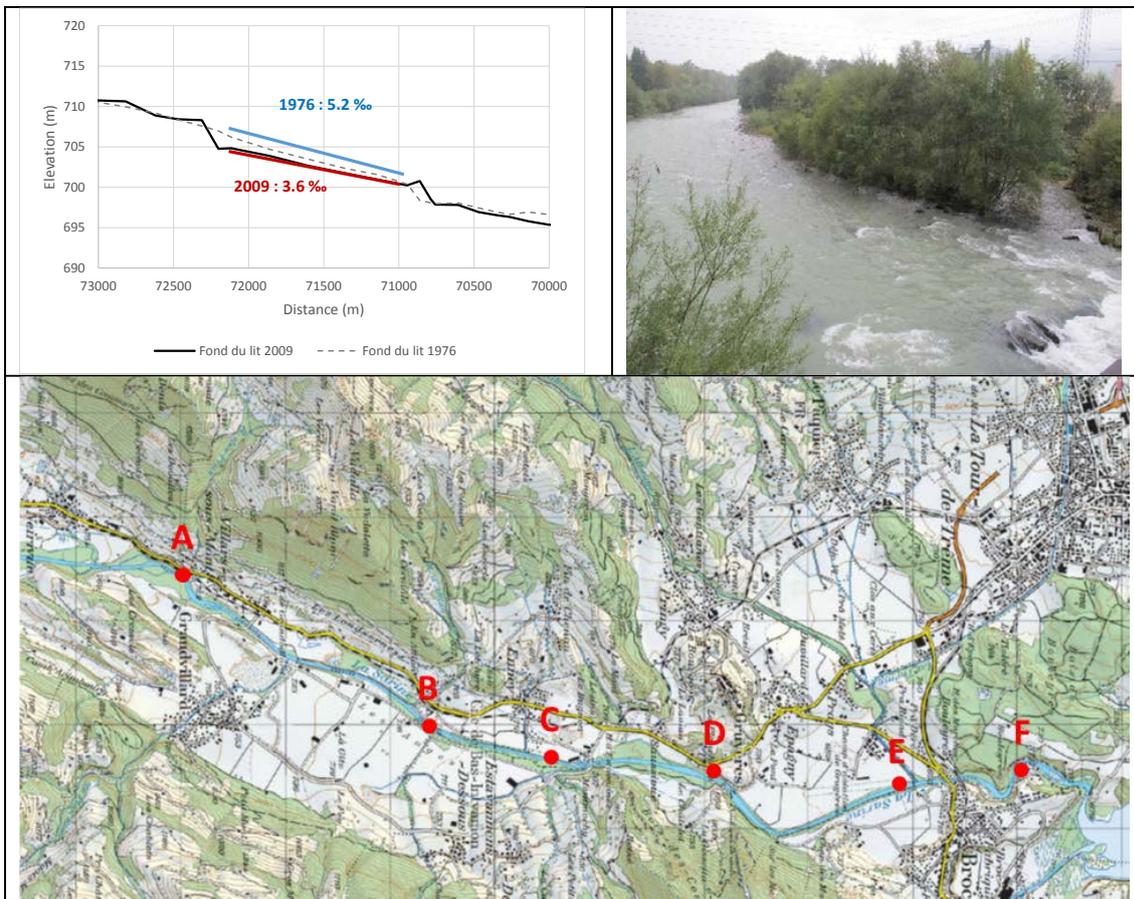


Figure 106 : Evolution du profil en long à l'amont des points fixes - la carte en bas montre les lieux des 6 biefs investigués, le profil en long en haut montre comme exemple l'analyse du bief C (seuil qui fonctionne comme point fixe dans le profil en long illustré sur la photo à droite). La Sarine coule de A à F.

Les connaissances acquises sur le régime de charriage et le régime de crues ont permis d'estimer une valeur pour la stabilité des berges puis de calibrer sur la base des mesures historiques. Ensuite, l'approche a été validée de manière satisfaisante avec les régimes de charriage, crues et morphologies actuelles (hypothèses, calculs et figures dans l'Annexe 9 "La Sarine à l'aval de Lessoc, analyse morphologique").

Une fois le modèle calibré et validé, des hypothèses concernant une adaptation du régime de charriage, de la stabilité des berges et de la combinaison des deux ont été testées. La prédiction des largeurs et de la pente à atteindre par choix de mesure permettent de définir les mesures d'accompagnement comme les hauteurs des rampes nécessaires.

Il faut noter que le déconfinement des berges serait exécuté sur un linéaire important pour permettre l'érosion latérale de la Sarine. Le terme "mesure isolée" utilisé dans le Tableau 41: Hypothèse des coûts moyens par mètre d'intervention mécanique des coûts des interventions mécaniques concerne la mise en place d'un chantier uniquement pour le déconfinement, qui ne peut en conséquence pas profiter des synergies d'autres interventions parallèles. Ceci se manifeste par un prix plus élevé par mètre à assainir. Les linéaires effectifs de la mesure tel que les positionnements idéals des rampes seront à préciser dans le cadre des études détaillées de la phase 2.

### 10.8.3.3 Description des mesures (objectifs, ampleur, coût)

Les mesures présentées dans la suite sont chiffrées dans le paragraphe 10.7.7. Les coûts des mesures d'exploitation sont extrapolés à une durée de 20 ans à fins de comparaison.

#### Mesure C1 – apports de graviers et rampes

La fourniture de gravier améliore l'indicateur B. La connexion des zones alluviales est assurée au moyen de rampes locales. Prenant en compte que la pente longitudinale reste proche de l'état actuel, il résulte un besoin de rampes d'environ 1 m de hauteur par kilomètre de la Sarine.

#### Mesure C1.1 – apports de graviers sans construction des rampes

La fourniture de gravier est évaluée sans prendre en considération une fixation du profil en long de la Sarine. On estime qu'en raison de la capacité de transport de la Sarine et des éclusées régulières, la majeure partie de charriage ajouté est lessivé vers le lac de la Gruyère.

#### Mesure C1.2 – fixation du profil en long avec rampes sans fourniture de graviers

L'érosion du lit de la Sarine peut être réduite au moyen de rampes pour fixer le profil en long. À l'amont des rampes, une zone avec une capacité de transport réduite est induite. Ceci permet de retenir une plus grande part des matériaux apportés par les affluents qu'à l'état actuel. Vu que ces apports sont faibles en regard du charriage nécessaire, ils ne sont pas capables d'influencer la pente longitudinale. La zone d'impact pour réduire l'atteinte de l'indicateur B est donc faible. La connexion des zones alluviales (indicateur C) est aussi limitée à un linéaire faible à l'amont des rampes.

#### Mesure C2 – déconfinement des berges et rampes

Basé sur l'approche "University of British Columbia Regime Model (UBCRM)", la pente longitudinale d'une rivière à fond de gravier est fonction de la charge sédimentaire et de la résistance des berges. Un déconfinement des berges de la Sarine lui permet de développer une largeur d'équilibre plus importante, qui provoque une augmentation de la pente liée à la réduction de la capacité de transport locale. La connexion des zones alluviales peut être obtenue avec des rampes plus faibles comparées avec la mesure C1 (0.5 m par kilomètre linéaire), lié à leur zone d'impact plus long vers l'amont grâce à la pente plus raide. Les matériaux érodés des berges diminuent l'atteinte de l'indicateur B.

#### Mesure C3 – apports de graviers, déconfinement des berges et rampes locales

En combinant les mesures C1 et C2, la hauteur nécessaire des rampes peut encore être réduite : l'apport de gravier, la fixation du profil en long avec les rampes et l'augmentation de la pente liée aux élargissements provoqués par le déconfinement des berges permettent de réduire l'atteinte au régime de charriage sur une grande partie du tronçon entre le barrage Lessoc et le lac de la Gruyère. Quelques rampes locales pour assurer la stabilité des points fixes sont nécessaires (0 à 0.4 m par kilomètre linéaire).

### 10.8.3.4 Influence des mesures sur la protection contre les crues

Avec les mesures de type C1, on aboutit à un relèvement du lit qui diminue la capacité du cours d'eau. Cependant, on ne peut pas parler d'atteinte à la protection contre les crues. On ne fera que retourner à la situation avant incision du lit et la capacité restera suffisante pour évacuer les crues de la Sarine. Il n'existe par ailleurs par d'enjeux de protection contre les crues dans ce tronçon.

Avec les mesures de type C2 et C3, il n'y a pas de diminution de capacité de la Sarine. En effet, le relèvement du fond du lit est compensé par un déconfinement du lit et une augmentation de la largeur jusqu'à la largeur de régime. Un nouvel équilibre se mettra en place.

Au final, les mesures d'assainissement du régime de charriage n'ont pas d'influence sur la protection contre les crues.

### 10.8.3.5 Synthèse des mesures proposées : Barrage de Lessoc

Le tableau suivant résume les mesures proposées sur le tronçon à l'aval du barrage de Lessoc. Au-dessous, la comparaison des variantes par rapport au coût et à l'utilité est illustrée. La variante C3 est la plus performante pour améliorer l'état des indicateurs critiques entre le barrage de Lessoc et le Lac de la Gruyère. L'état de la Sarine après mesure est prédit comme "excellent", avec un potentiel de valorisation de 4 classes (amélioration de « mauvais » à « excellent »).

Tableau 34: Tableau de synthèse des propositions des mesures d'assainissement du régime de charriage à l'aval du barrage de Lessoc

Variante	Mesures			Coût Mio CHF	Utilité de la mesure <i>Synthèse de longueur influencé, potentiel écologique et valorisation potentielle</i>
	<i>Fourniture de graviers</i>	<i>Déconfinement des berges</i>	<i>Rampes ou seuils</i>		
C1	2'000 à 4'000 m <sup>3</sup> /a	-	0.3 - 1 m par km	14.88	7
C1.1	2'000 à 4'000 m <sup>3</sup> /a	-	-	6.88	6
C1.2	-	-	0.3 - 1 m par km	8.00	6
C2	-	oui	0.5 m par km	15.83	9
C3	2'000 à 4'000 m <sup>3</sup> /a	oui	0 - 0.4 m par km	16.43	10

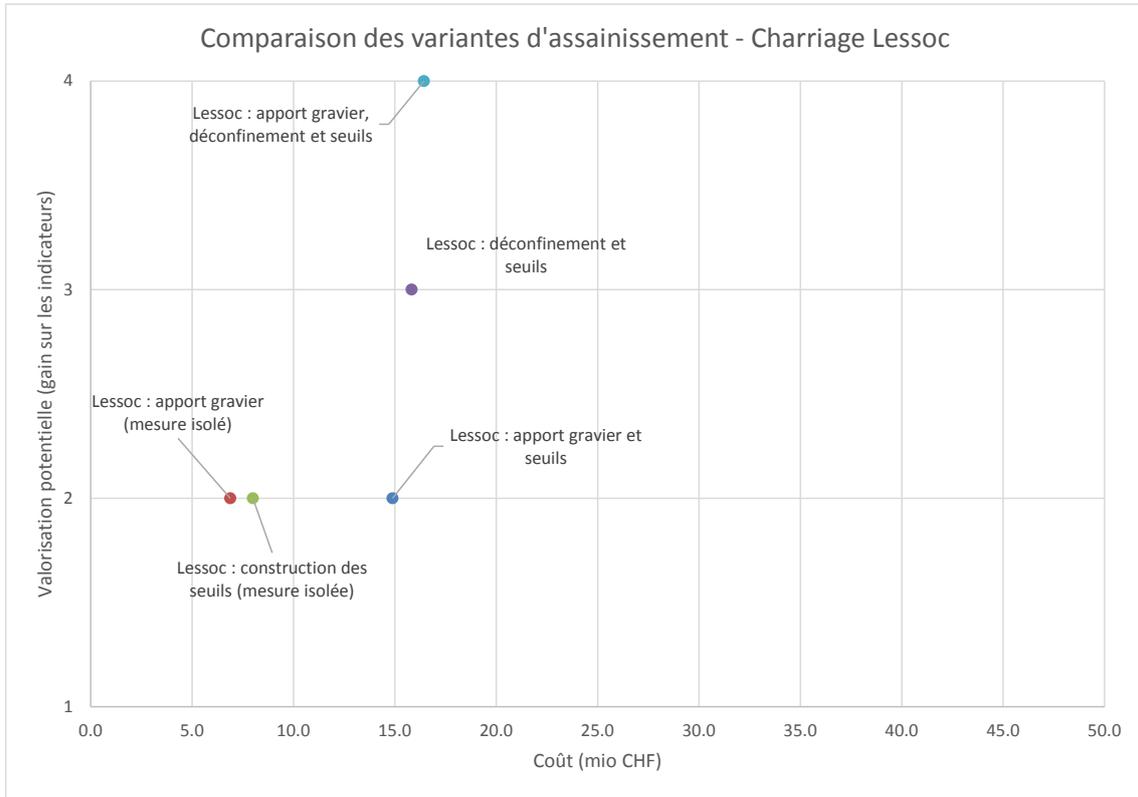


Figure 107: Comparaison des mesures proposés (entre le barrage de Lessoc et le Lac de la Gruyère) par rapport à la relation coût / utilité des mesures.

## 10.8.4 Variantes – Barrage de Rossens (Lac de la Gruyère)

### 10.8.4.1 Etat des lieux des indicateurs critiques

La prise d'eau est située dans le lac de la Gruyère et la centrale à Hauterive environ 13 kilomètres à l'aval du barrage. L'installation Rossens – Hauterive provoque un tronçon à débit résiduel (la "Petite Sarine"). Un système hydrologique de prévision des crues installé depuis quelques années permet de baisser le niveau du lac pour réduire les déversements (stockage du volume total des crues). Les effets du débit résiduel dans la Petite Sarine sont bien marqués: pavage, végétalisation des bancs, pincement du lit et végétalisation du fond (algues, ...) sont observés. La mobilisation et la dynamique du lit sont des indicateurs critiques à l'aval du barrage de Rossens.

Avant la construction du barrage de Rossens, le linéaire de la Petite Sarine était une plaine alluviale importante. Le stock de graviers dans la vallée est très important. Le problème est dû au fait que le barrage empêche un approvisionnement en matériaux charriés en provenance de l'amont. Le pavage et la végétalisation des bancs empêchent d'initier la remobilisation et le transport du substrat, qui en théorie serait optimal au regard de sa qualité. Les éventuelles mesures doivent prendre en considération la nécessité de fournir du gravier à l'amont du tronçon pour équilibrer le transport solide qui serait provoqué.

La déconnexion de la zone alluviale est liée au régime hydrologique à l'aval du barrage. Les inondations des berges et de la plaine ne sont pas assez fréquentes pour garantir les fonctions de la zone alluviale.

### 10.8.4.2 Elaboration des mesures d'assainissement (Rossens)

#### Estimation du débit de crue morphogène dans la Petite Sarine

Le débit nécessaire d'une crue morphogène est estimé à l'aide d'un modèle 1D de la Petite Sarine, basé sur les profils en travers de l'OFEV de 2006. La modification du régime hydrologique de la Sarine par le barrage de Rossens est telle qu'il n'est plus possible que le lit revienne à sa largeur de régime naturelle par des mesures d'assainissement proportionnées. La largeur de régime de cours d'eau restera donc plus faible que naturellement, même avec les mesures proposées. Le lit mouillé à 4 m<sup>3</sup>/s (débit moyen) est donc utilisé comme largeur de référence pour investiguer le transport solide dans la Petite Sarine. Pour une série des crues modélisées dans le modèle, le taux de surface avec des forces d'arrachement suffisamment grandes pour initier le transport solide d'un gravier de 4 cm de diamètre est calculé. La figure suivante montre l'augmentation du lit mobile en fonction des crues modélisées.

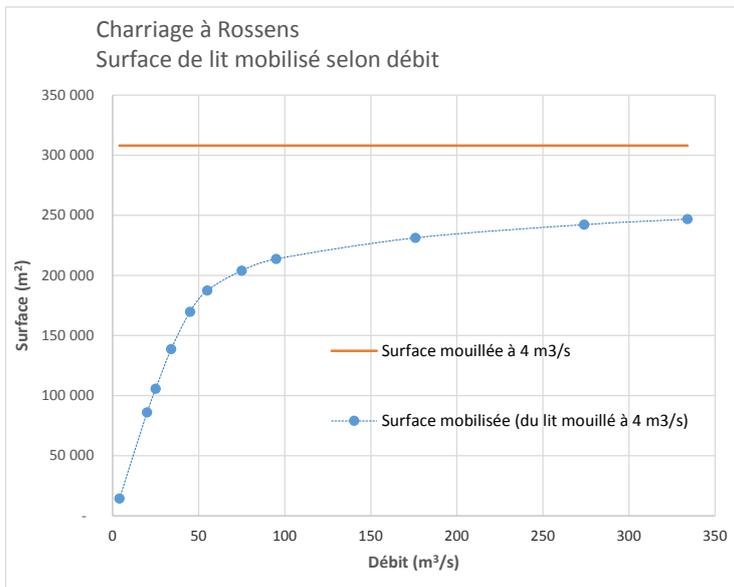


Figure 108: Surface du lit de la Petite Sarine mobilisé en fonction du débit des crues

La crue morphogène artificielle telle que décrite, dans le cadre de ces mesures, est une crue qui est capable de mettre en mouvement les graviers ajoutés (diamètre 2-6 cm). Elle ne serait pas nécessairement capable de casser le pavage établi dans le lit de la Petite Sarine.

Le terme de "surface mobilisée" de la figure Figure 108: Surface du lit de la Petite Sarine mobilisé en fonction du débit des crues est défini comme la part de la surface mouillée pour un débit de  $4\text{ m}^3/\text{s}$  où les forces d'arrachement sur le fond sont assez grandes pour transporter les graviers déposés. Les modélisations numériques effectuées montrent qu'au-dessous de  $50\text{ m}^3/\text{s}$ , le taux de la surface mouillée mobilisée augmente fortement avec une augmentation du débit. Dans un même temps, l'augmentation de la surface mouillée mobilisée devient faible à partir d'environ  $150\text{ m}^3/\text{s}$ . Cette analyse permet de choisir un débit de pointe de la crue artificielle optimale en adéquation avec les aspects de performance et coûts. Dans le cas présent, le débit de  $100\text{ m}^3/\text{s}$  a été choisi pour pré-dimensionner les mesures des crues artificielles dans la Petite Sarine.

Pour un profil de référence (GEWISS 50.639), un calcul de transport solide selon l'approche de Meyer-Peter et Müller (1948) est élaboré. La granulométrie testée est fonction des diamètres intéressants pour les frayères (de 2 à 6 cm). Ce calcul permet une estimation du besoin de fourniture de charriage dans le cadre de mesures liées aux crues artificielles, ayant comme but de rester dans un état d'équilibre entre l'érosion et le rehaussement. La figure suivante montre le débit de charriage transporté par crue en fonction du débit et du diamètre moyen des sédiments.

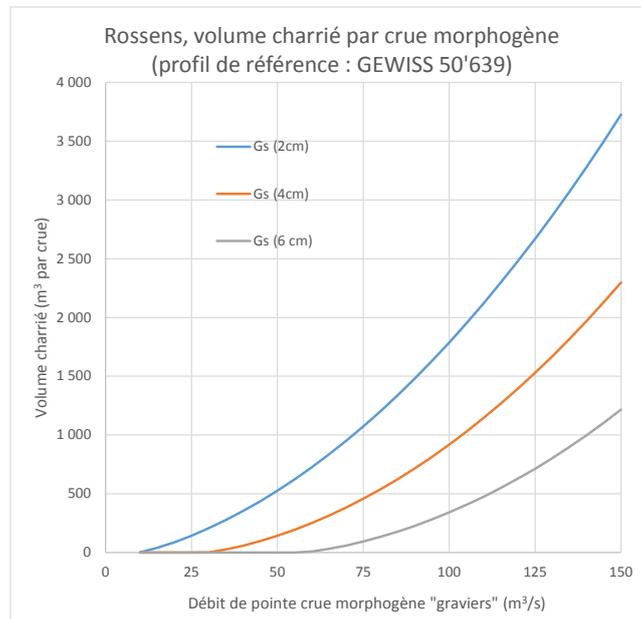


Figure 109: Calcul de transport solide dans la Petite Sarine, charge solide en fonction du débit de crue et du diamètre moyen du gravier

Au vu de ce qui précède, on peut pré-dimensionner la crue morphogène à environ 100 m<sup>3</sup>/s et prévoir un volume de gravier de l'ordre de 4 000 m<sup>3</sup>. Ces valeurs seront à préciser dans les phases ultérieures.

Le dimensionnement d'une crue capable d'initier le transport des blocs à diamètre de 15 à 20 cm dans la Petite Sarine est moins univoque. Un palier aussi bien marqué que dans la Figure 108: Surface du lit de la Petite Sarine mobilisé en fonction du débit des crues ne peut pas être observé. Le but de cette "crue morphogène boulet" étant une intervention unique et ponctuel, il est indispensable d'assurer un débit suffisamment grand pour garantir l'effet désiré. Pour une indication de l'ordre de grandeur nécessaire il est possible de s'inspirer de la crue Q<sub>2</sub> naturelle (à 334 m<sup>3</sup>/s), qui serait capable de mobiliser environ 20 % du lit constamment mouillé selon des simulations numériques. Ce débit étant à affiner et valider dans le cadre des étapes suivantes, la présente étude se base sur une valeur arrondie à 350 m<sup>3</sup>/s pour le pré-dimensionnement des mesures à l'aval du barrage de Rossens.

A noter qu'un groupe de travail ad hoc se penche actuellement sur la question des "crues artificielles" dans la Petite Sarine. La crue morphogène sera décrite plus en détail dans le rapport qui résultera de ce travail.

#### 10.8.4.3 Description des mesures (objectifs, ampleur, coût)

Les mesures présentées dans la suite sont chiffrées dans le paragraphe 10.7.7. Les coûts des mesures d'exploitation sont extrapolés à une durée de service de 20 ans.

#### Mesure C4 – fourniture de graviers et crue morphogène

Une crue morphogène dans la Petite Sarine est censée garantir la dynamique du lit. Dans le cadre de cette étude, on considère que cela est atteint avec le transport des graviers de diamètres 2 – 6 cm. Il faut considérer qu'une crue artificielle qui est capable de transporter du char-

riage provoque un déséquilibre dans le tronçon manquant d'apport solide naturel. La fourniture de graviers est donc à calibrer en fonction de la capacité de transport de la crue morphogène projetée. La méthodologie permettant d'estimer le débit nécessaire pour garantir le transport solide et le débit de charriage associé est documentée dans le paragraphe 10.7.4.2.

#### **Mesure C5 – intervention mécanique dans le lit et crue morphogène**

En conséquence de l'altération du régime hydrologique depuis la construction du barrage de Rossens, les bancs et berges de la Petite Sarine se sont végétalisés de manière importante. De plus, un pavage bien marqué s'est formé dans le lit majeur. Pour initier la dynamique du lit dans la Petite Sarine, cette mesure prévoit une intervention mécanique pour rompre le pavage et initier un déconfinement des bancs avec des interventions forestières. Ensuite, une crue morphogène capable d'initier le transport des "boulets" (blocs à diamètre de 15 – 20 cm) assure la réactivation des bancs de graviers.

Il est à noter que la dynamique du lit réactivé par cette combinaison d'une intervention mécanique avec une crue importante mais unique n'est pas d'une grande durabilité si elle n'est pas soit répétée régulièrement, soit suivie de crues morphogènes pour éviter la recolonisation et la stabilisation du lit et des bancs de la Petite Sarine par la végétation.

#### **Mesure C6 – combinaison C4 + C5**

La mesure C6 combine la fourniture de graviers et les crues morphogènes avec une intervention mécanique dans le lit de la Sarine. Le pavage dans la Petite Sarine est rompu avec la mesure d'initiation, suivi de la crue morphogène à débit capable de réactiver le lit et les bancs de graviers (correspondant à la mesure C5, mesure unique). Dans la suite, il est prévu de maintenir la dynamique du lit avec des crues morphogènes régulières, toujours en assurant un équilibre du régime de charriage avec la fourniture d'un débit solide identique du débit transporté par la crue artificielle (correspondant à la mesure C4, répétitive à long terme en fonction des besoins du système écologique).

#### **10.8.4.4 Influence des mesures sur la protection contre les crues**

Les mesures d'assainissement du régime de charriage n'ont pas d'influence sur la protection contre les crues car il n'existe pas d'enjeux de protection contre les crues de la Sarine dans ce tronçon.

#### **10.8.4.5 Synthèse des mesures proposées : Barrage de Rossens**

Le tableau suivant synthétise les mesures proposées sur le tronçon à l'aval du barrage de Rossens. Au-dessous, la comparaison des variantes par rapport au coût et à l'utilité est illustrée. La variante C6 est la plus performante pour améliorer l'état des indicateurs critiques à l'aval du barrage de Rossens. L'état de la Sarine après mesure est prédit comme « excellent », avec un potentiel de valorisation de 4 classes (amélioration de « mauvais » à « excellent »).



Tableau 35 : Tableau de synthèse des propositions des mesures d'assainissement du régime de charriage à l'aval du barrage de Rossens

Variante	Mesures			Coût Mio CHF	Utilité de la mesure <i>Synthèse de longueur influencé, potentiel écologique et valorisation potentielle</i>
	<i>Fourniture de graviers</i>	<i>Crue morphogène (graviers)</i>	<i>Intervention mécanique et crue morphogène (boulets)</i>		
C4	1'000 à 4'000 m <sup>3</sup> /a	oui	-	8.43	8
C5	-	-	1 x	6.57	7
C6	1'000 à 4'000 m <sup>3</sup> /a	oui	1 x	14.99	9

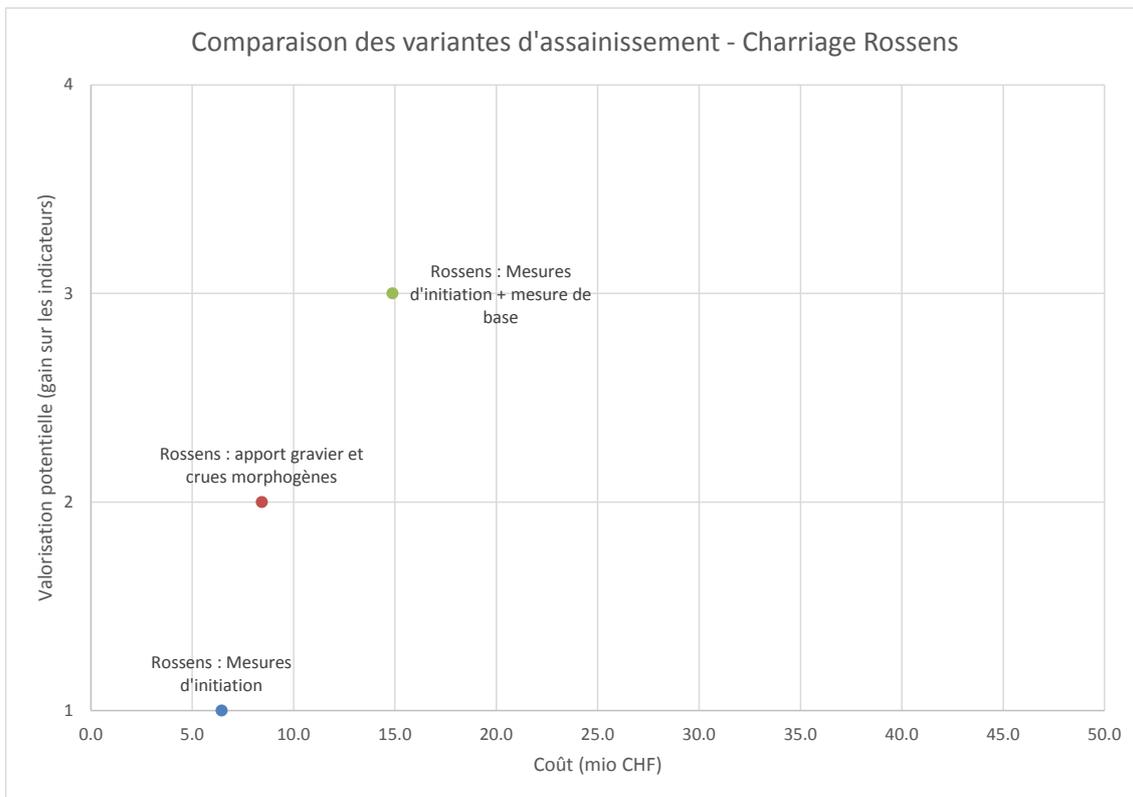


Figure 110 : Comparaison des mesures proposés à l'aval du barrage de Rossens par rapport à la relation coût / utilité des mesures

## 10.8.5 Variantes – Barrage de la Maigrauge (Lac de Pérolles)

### 10.8.5.1 Etat des lieux des indicateurs critiques

L'eau du lac de Pérolles est turbinée à la centrale d'Oelberg. Dans le tronçon à l'aval du barrage de la Maigrauge ne s'écoule que le débit résiduel. La dynamique du lit est très réduite et n'apparaît qu'en cas de déversement au barrage de la Maigrauge.

Le charriage amené par la Sarine depuis la Petite Sarine ainsi que les apports de la Gérine et de la Glâne se déposent soit dans l'embouchure de la Gérine (zone d'alluvionnement), soit à l'amont du lac de Pérolles. Le tronçon à débit résiduel à l'aval du barrage de la Maigrauge n'a pas d'apports latéraux de graviers.

Il n'y a pas de zone alluviale dans ce secteur.

Au niveau des synergies avec la planification, nous relevons que le projet de revitalisation de la Sarine en ville de Fribourg est prioritaire et que les études ont déjà commencé.

### 10.8.5.2 Elaboration des mesures d'assainissement (Maigrauge)

Au vu de l'absence de zones alluviales dans le tronçon de la Sarine à l'aval du barrage de la Maigrauge, les variantes d'assainissement sont axées sur une amélioration de la dynamique du lit et sur le débit de charriage. Les deux mesures correspondantes (crues artificielles pour la mobilisation du lit, fourniture de graviers pour augmenter le débit du transport solide) sont évaluées séparément et en combinaison. De plus, une variante d'aménagement du lit qui permet la formation des dépôts locaux est évaluée.

### 10.8.5.3 Description des mesures (objectifs, ampleur, coût)

Les mesures présentées ci-dessous sont chiffrées au paragraphe 10.7.7. Les coûts des mesures d'exploitation sont extrapolés à une durée de service de 20 ans.

#### Mesure C7 – crues morphogènes

La mesure C7 a pour but de réactiver la dynamique du lit dans le tronçon à débit résiduel avec des crues morphogènes. Le débit de crue nécessaire est estimé à 80 m<sup>3</sup>/s, mais serait à valider par des calculs de transport plus détaillés avant mise en œuvre de la mesure. Une telle réactivation de la dynamique du lit risque de produire un lessivage des matériaux, car les plupart des sédiments mis en mouvement dans le lac de Pérolles sont des fines. Toutefois, selon Groupe E, il n'y a nul besoin de chiffrer une crue morphogène étant donné que l'aménagement de la Maigrauge est au fil de l'eau et que chaque année, des déversements ont lieu. Ils atteignent ou dépassent le débit de la crue morphogène prévue. La mesure est conservée vu qu'un affinage du débit et de sa récurrence sont nécessaires.

#### Mesure C8 – fourniture de graviers

Les apports de la Gérine et la Glâne sont retenus dans le lac de Pérolles, seules les parties fines peuvent être transportées à travers le lac. Etant donné qu'il n'y a pas de bancs de graviers historiques dans le tronçon à l'aval du barrage de Maigrauge, des matériaux doivent y être ajoutés de

manière artificielle. Le gravier doit être diffusé à la pelleuse dans le tronçon en raison du manque de dynamique du lit.

### Mesure C7+8 – fourniture de graviers et crues morphogènes

La combinaison des deux mesures permet une dynamique du lit plus élevée grâce au débit de charriage artificiellement augmenté par la fourniture de graviers. Grâce à l'ajout de sédiments de qualité appropriée et de diamètre défini, le risque de produire un déficit sédimentaire dans le tronçon est faible. La crue artificielle peut être calibrée sur la base de la qualité et de la quantité de la fourniture. De plus, la diffusion dans le tronçon ne doit pas être réalisée de façon mécanique.

### Mesure C9 – aménagement du lit

La création des petites structures stables (singularités) permet de former des dépôts locaux lors des décrues des déversements du lac de Pérolles. Cela permettrait d'assurer que les apports de charriage transportés éventuellement lors d'une évacuation de crue ne soient pas tout de suite lessivés vers l'aval.

#### 10.8.5.4 Influence des mesures sur la protection contre les crues

La problématique de la protection contre les crues devra être prise en compte au moment de définir précisément les mesures d'assainissement. En principe, l'ajout de gravier ne conduira pas à un relèvement du lit important, ou uniquement localement.

#### 10.8.5.5 Synthèse des mesures proposées : Barrage de la Maigrauge

Le tableau suivant résume les mesures proposées sur le tronçon à l'aval du barrage de la Maigrauge. Ensuite, la comparaison des variantes par rapport au coût et à l'utilité est illustrée. La variante C7+8 est la plus performante pour améliorer l'état des indicateurs critiques à l'aval du barrage de la Maigrauge. L'état de la Sarine après mesure est prédit comme "bon", avec un potentiel de valorisation de 3 classes (amélioration de « mauvais » à « bon »). Notons aussi qu'une coordination sera réalisée au sein de LCE entre cette mesure et le projet de revitalisation de la Sarine en ville de Fribourg.

Tableau 36 : Tableau de synthèse des propositions des mesures d'assainissement du régime de charriage à l'aval du barrage de la Maigrauge

Variante	Mesures			Coût Mio CHF	Utilité de la mesure Synthèse de longueur influencé, potentiel écologique et valorisation potentielle
	Fourniture de graviers	Crue morphogène	Aménagement du lit		
C7	-	oui	-	0.60	5
C8	1'000 à 4'000 m <sup>3</sup> /a	-	-	8.21	5
C7+8	1'000 à 4'000 m <sup>3</sup> /a	oui	-	8.27	6
C9	-	-	oui	4.00	5

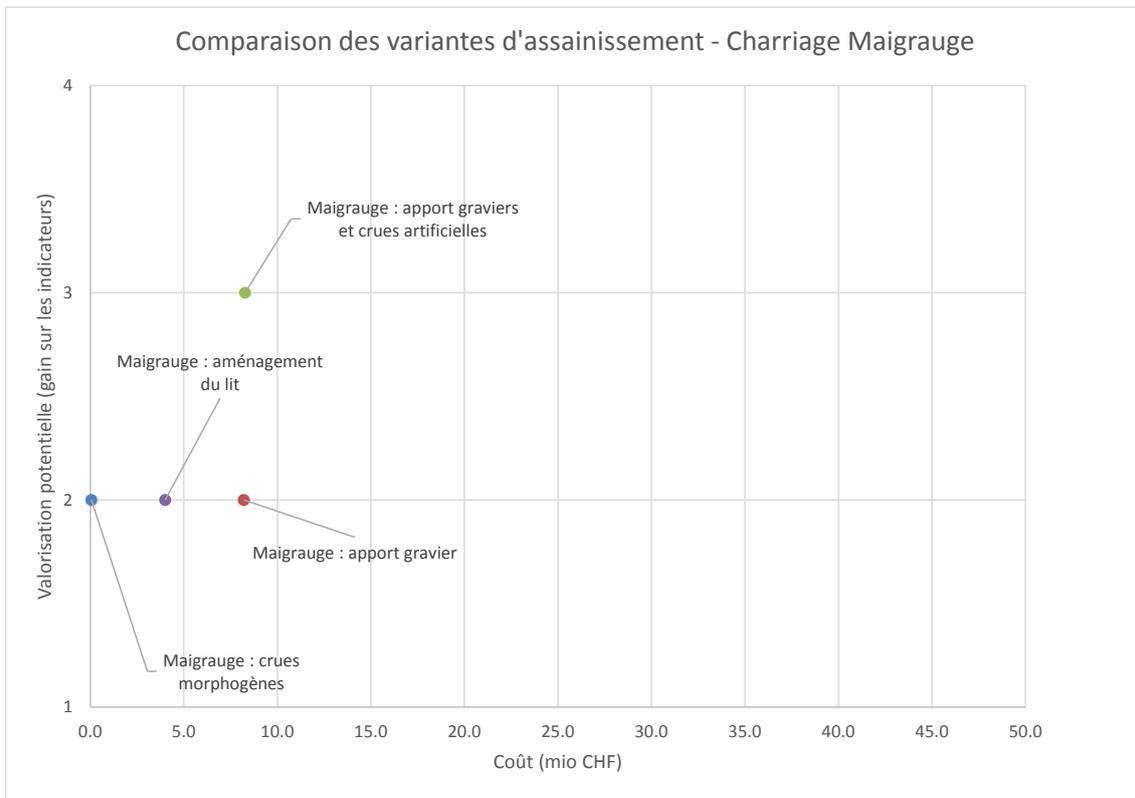


Figure 111 : Comparaison des mesures proposées à l'aval du barrage de la Maigrauge par rapport à la relation coût / utilité des mesures

## 10.8.6 Variantes – Barrage de Schiffenen (Lac de Schiffenen)

### 10.8.6.1 Etat des lieux des indicateurs critiques

La centrale hydroélectrique est située directement au pied du barrage et il n'y a pas de tronçon à débit résiduel. La dynamique du lit à l'aval de Schiffenen est influencée par les éclusées. Le volume du lac de Schiffenen est estimé à 58,639 mio m<sup>3</sup>. Les crues fréquentes peuvent théoriquement être stockées dans le lac, il n'y a que peu de déversements à Schiffenen.

Le barrage de Schiffenen bloque l'entier des apports de charriage de la Sarine et des autres affluents. La première source de gravier est l'embouchure de la Singine, 4.65 km à l'aval du barrage. Le lit de la Sarine en aval de la centrale a été façonné artificiellement sous la forme d'un canal dans la molasse pour augmenter la hauteur de chute d'eau turbinée de 4 m.

La première zone alluviale de la Sarine à l'aval du barrage de Schiffenen est la Laupenau qui se trouve sur le territoire du canton de Berne.

Sur le tronçon influencé par le barrage de Schiffenen, seule la reconnexion de la zone alluviale est un critère prioritaire.

### 10.8.6.2 Elaboration des mesures d'assainissement (Schiffenen)

Le calcul de transport solide selon Meyer-Peter et Müller (1948) montre que, sur le tronçon entre le barrage et l'embouchure de la Singine, les graviers de diamètre < 8 cm ne sont pas stables lors des éclusées. Le calcul se base sur l'approche d'une force d'entraînement critique égale à  $0.047 = (R_h * J) / [(s-1) * d_m]$ , avec pour simplification du rayon hydraulique  $R_h$  égal à la hauteur d'eau et prenant comme pente  $J$  la pente de la ligne de charge (2.275 ‰). Les résultats du calcul du diamètre stable pour un débit d'éclusee de 135 m<sup>3</sup>/s sont illustrés dans la figure suivante:

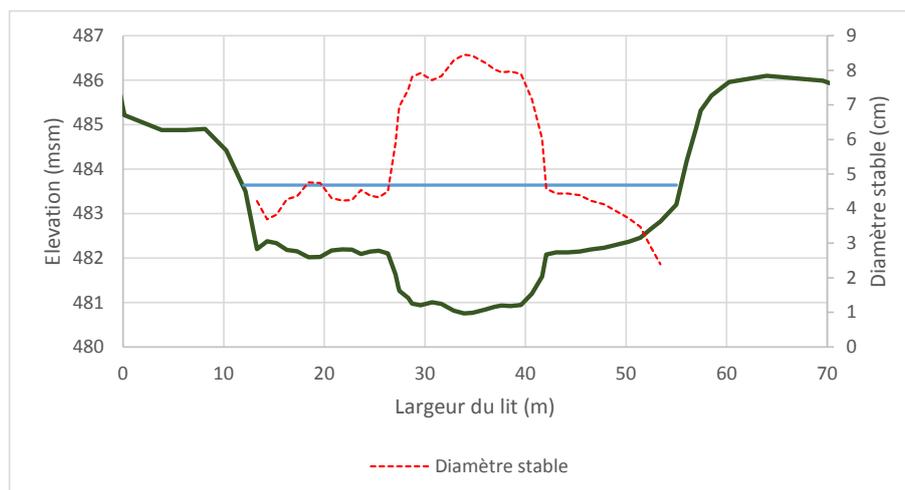


Figure 112 : Diamètre stable sur un profil représentatif à l'aval du barrage de Schiffenen (GEWISS km 10.287) pour  $Q = 135 \text{ m}^3/\text{s}$  (ligne d'eau indiqué en bleu, diamètre stable en rouge pointé).

Des mesures d'assainissement du régime de charriage ne sont donc possibles que si des mesures de réduction des éclusées sont mises en œuvre. Deux variantes d'assainissement des éclusées sont prises en considération :

- Bassin à l'aval du barrage de Schiffenen pour réduire le débit maximal de l'éclusee ;

- Dérivation de l'eau turbinée qui supprime les éclusées dans la Sarine.

### 10.8.6.3 Description des mesures (objectifs, ampleur, coût)

Les mesures présentées dans la suite sont chiffrées dans le paragraphe 10.7.7. Les coûts des mesures d'exploitation sont extrapolés à une durée de service de 20 ans. Les deux mesures C10 et C11 sont évalués selon l'hypothèse que les éclusées sur le tronçon à l'aval du barrage de Schiffenen sont assainies. Cette condition est indispensable car dans les conditions actuelles, une granulométrie adéquate pour la faune aquatique ne serait pas stable et lessivé par les éclusées (explications au paragraphe précédent).

La mesure C10 est conçue pour le cas où les éclusées de la centrale hydroélectrique de Schiffenen seraient assainies à l'aide d'un bassin de rétention directement à l'aval du barrage. La mesure C11 illustre une variante d'assainissement de l'atteinte du régime de charriage dans le cas où les éclusées à l'aval de Schiffenen seraient assainies par une dérivation complète du débit (sauf le débit de dotation) vers l'Aar ou vers le Lac de Morat. Une description plus détaillée de ces mesures éclusées se trouve dans le rapport "Rapport Final Sarine Grandes Installations, Partie B - Evaluation des mesures".

#### Mesure C10 – apport de gravier à l'aval de l'ouvrage de restitution

Augmentation de l'apport solide dans la Sarine. La diffusion du charriage fourni est garantie car les éclusées réduites sont encore capables de transporter des matériaux. La qualité et la quantité sont à déterminer sur la base de calculs de transport plus détaillés après élaboration finale de la mesure éclusées.

Un apport de gravier améliore les indicateurs A (mobilisation du lit) et B (charriage nécessaire). Il n'a par contre aucune influence sur la connexion de la zone alluviale Laupenau, qui serait le critère prioritaire. La fourniture de graviers n'est pas la mesure appropriée pour influencer le profil en long du cours d'eau de la Sarine. La mesure C10 conduirait à la conservation de l'état actuel (éviter tout approfondissement supplémentaire) de la zone alluviale.

#### Mesure C11 – apport de gravier et crues dans tronçon à débit résiduel

La mesure prévoit un apport artificiel de gravier et une crue artificielle. La calibration de la crue et de la quantité / qualité des graviers est nécessaire sur la base d'observation de terrain. La dynamique du lit n'est assurée que pour une durée limitée durant la crue artificielle.

Un apport de gravier en combinaison avec des crues artificielles dans le tronçon à débit résiduel améliorent les indicateurs A (mobilisation du lit) et B (charriage nécessaire), par contre n'a aucune influence sur la connexion de la zone alluviale Laupenau (pas d'augmentation du fond de la Sarine à attendre). La mesure C11 conduirait à la conservation de l'état actuel de la zone alluviale à condition qu'un réaménagement du lit actuel permette une reconnexion à cette zone alluviale.

### 10.8.6.4 Influence des mesures sur la protection contre les crues

Les mesures proposées n'ont pas d'influence sur la protection contre les crues.

### 10.8.6.5 Synthèse des mesures proposées : Barrage de Schiffenen

Le tableau suivant synthétise les mesures proposées sur le tronçon à l'aval du barrage de Schiffenen. Au-dessous, la comparaison des variantes par rapport au coût et à l'utilité est illustrée. La variante C11 est la plus performante pour améliorer l'état des indicateurs critiques à l'aval du barrage de Schiffenen. L'état de la Sarine après mesure est prédit comme "moyen", avec un potentiel de valorisation de 2 classes (amélioration de « mauvais » à « moyen »).

Etant donné que l'étude ne considère pas seulement le territoire fribourgeois (coordination inter-cantonale), il faut noter que le barrage de Schiffenen n'impacte pas uniquement le tronçon fribourgeois de la Sarine, mais aussi la zone à l'aval de l'embouchure de la Singine (environ 10 km) et même une partie de l'Aar (environ 17 km) sur territoire bernois. Ce fait est pris en considération dans l'évaluation multi-critère par l'indicateur de performance "Longueur du tronçon influencé par la mesure" qui prend en compte un linéaire amélioré de > 10 km.

Dans un même temps, l'indicateur de la valorisation potentielle (gain sur les indicateurs) reste faible (figure 113), car les mesures proposées ne permettent pas d'améliorer la connexion du milieu rivulaire dans la zone alluviale de "Laupenau". Pour améliorer cet indicateur critique, un réaménagement du lit actuel serait nécessaire. Etant donné que la zone en question ne se trouve pas sur le territoire fribourgeois, une mesure correspondante n'est pas élaborée dans le cadre de l'étude présente.

Tableau 37 : Tableau de synthèse des propositions des mesures d'assainissement du régime de charriage à l'aval du barrage de la Maigrauge

Variante	Mesures		Coût Mio CHF	Utilité de la mesure <i>Synthèse de longueur influencé, potentiel écologique et valorisation potentielle</i>
	<i>Fourniture de graviers</i>	<i>Crue morphogène</i>		
C10	oui	-	6.88	7
C11	1'000 à 4'000 m <sup>3</sup> /a	oui	8.19	7

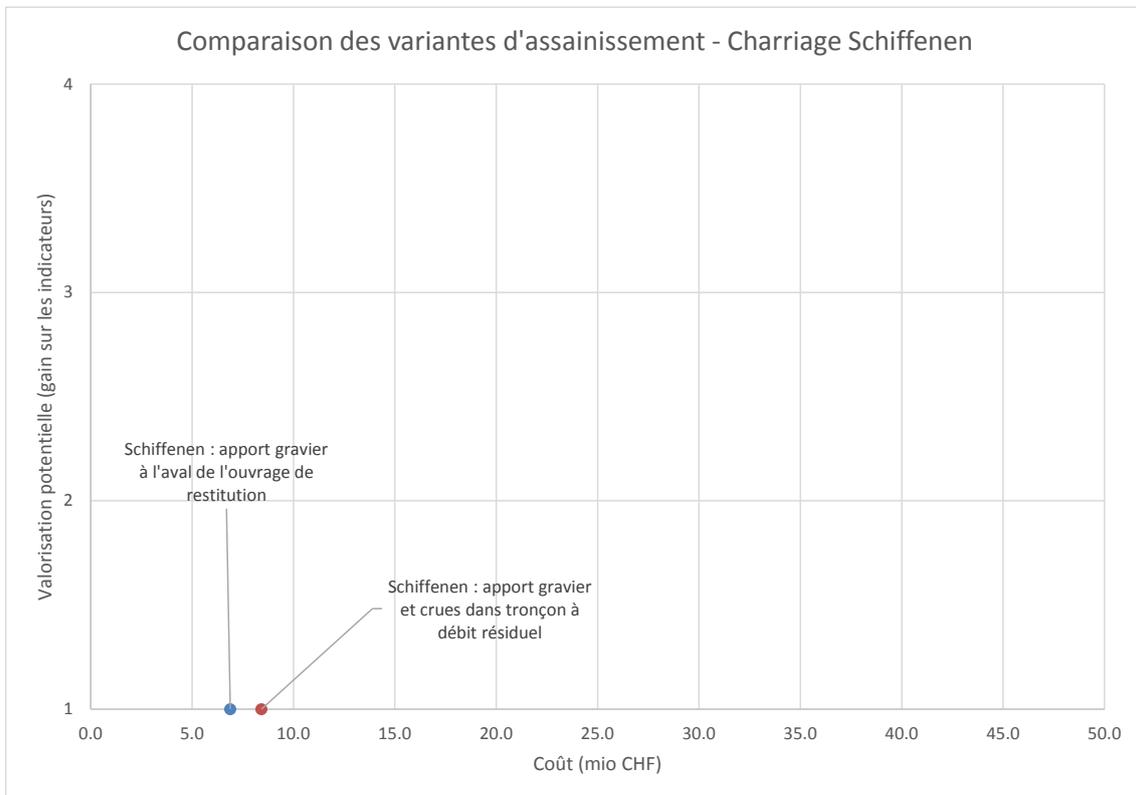


Figure 113 : Comparaison des mesures proposés à l'aval du barrage de Schiffenen par rapport à la relation coût / utilité des mesures

### 10.8.7 Estimation des coûts des mesures types

Les coûts des mesures se basent sur les approches suivantes, expliquées plus en détail dans la suite:

- Coûts annuels
  - Fourniture de gravier (estimation du coût basé sur une **extrapolation de l'ajout de charriage sur la Jogne**)
  - Crues artificielles (estimation du coût basé sur la **définition de la crue projetée** et une **hypothèse de la perte moyenne de vente d'énergie**)
- Coûts uniques
  - Interventions / constructions durables (estimation du coût basé sur la **longueur des tronçons considérés** et une **hypothèse de coûts moyens par mètre**)

Pour permettre de comparer le coût des mesures entre elles, le coût annuel des interventions annuelles est multiplié par 20. Cela revient à admettre un rendement de 5% sur un montant en réserve.

### Extrapolation des coûts basée sur l'injection de graviers dans la Jogne

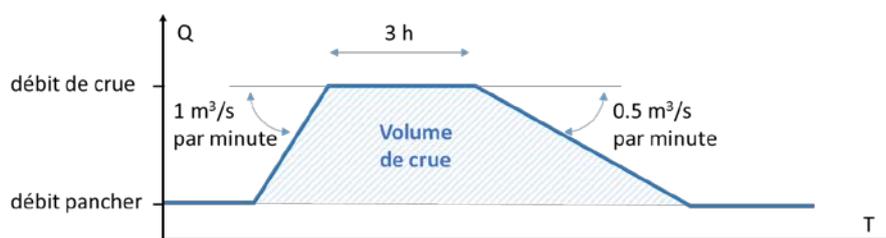
Depuis 2013, Groupe E dépose environ 150 m<sup>3</sup>/a de graviers dans la Jogne dans le cadre d'une mesure pilote. Les coûts annuels de la mesure sont de CHF 18'000 selon Groupe E, avec un léger surcoût la première année (+12'000 CHF). La répartition des coûts est estimée comme suit: CHF 6'000 pour la mise en œuvre, le coût du transport est estimé à CHF 4'950 (CHF 33 / m<sup>3</sup>) et le coût brut des matériaux est estimé à CHF 7'050 (CHF 47 / m<sup>3</sup>). Pour l'estimation des coûts par mesure, l'accessibilité du lieu de la fourniture est prise en considération car elle influence le coût du transport et / ou de la fourniture. Les facteurs adaptés par installation pour le transport des matériaux et la durée du chantier ont comme but de compenser le fait que les coûts de l'injection de graviers dans la Jogne ne sont pas directement transposables sur les aménagements de la Sarine. Les hypothèses sont listées dans le tableau suivant:

Tableau 38: Hypothèses du niveau de difficulté de la fourniture de graviers par installation

	Volume <i>m<sup>3</sup> par an</i>	Transport <i>facteur</i>	Chantier <i>jours estimés</i>
Lessoc	2000 à 4000	1	2 à 4
Rossens	1000 à 4000	1.25	2 à 8
Maigrauge	1000 à 4000	1.5	1 à 4
Schiffenen	1000 à 4000	1.25	2 à 8

### Définition de la crue artificielle

Le coût d'une crue artificielle est estimé sur la base de la perte de production lié au volume de la crue. Celui-ci est calculé avec un hydrogramme type illustré dans la figure suivante:



Le choix des critères de durée, montée et descente de la crue artificielle permet la comparaison des coûts entre les installations. L'hydrogramme devra être affiné dans la suite des études pour être conforme aux besoins de la faune piscicole, des critères / obligations du côté des services officiels et être en adéquation avec les limites techniques liées aux installations en place. Un coût annuel (administration, frais, ...) de la mesure de CHF 2'500 est considéré. Les débits de crues et volumes totaux des crues artificielles projetées sont listées dans le tableau suivant:

Tableau 39: Définition des crues projetées et volumes correspondants

Description de crue	Débit plancher <i>m<sup>3</sup>/s</i>	Débit maximal <i>m<sup>3</sup>/s</i>	Volume de crue <i>m<sup>3</sup></i>
---------------------	--	---	--

Lessoc	2.5	40	531 563
Rossens (boulet)	2.5	350	14 621 063
Rossens (graviers)	2.5	100	1 908 563
Oelberg	4	80	1 340 640
Schiffenen	5	100	1 838 250

### Estimation de la perte financière moyenne

Le calcul de la perte financière par crue artificielle se base sur le volume de la crue (voir paragraphe correspondant) et un coût par kWh du marché d'énergie retenu sur la page d'accueil d'EPEX SPOT SE. Une estimation grossière de la perte de production d'énergie est basée sur la règle empirique suivante : 1 m<sup>3</sup> turbiné sur une dénivellation de 500 m produit 1 kWh. Les hypothèses pris en considération pour le coût par kWh et la dénivellation par installation sont listées dans le tableau suivant:

**Tableau 40: Hypothèses de calcul de la perte moyenne de vente d'énergie**

Base d'estimation	valeur considérée
production de 1 kWh par m <sup>3</sup> turbiné sur un dénivèlement de	500m
coût max d'énergie par kWh (CHF)	0.06
coût min d'énergie par kWh (CHF)	0.04
coût administratif par an	2500
Dénivèlement moyen de Lessoc (20 - 24 m):	22
Dénivèlement moyen de Rossens (75 - 111 m):	93
Dénivèlement moyen d'Oelberg (18 - 21 m):	19.5
Dénivèlement moyen de Schiffenen (34-48 m):	41

Hypothèses pour l'estimation des coûts des mesures:

- Prix le plus haut = 45 € / MWh, prix le plus bas = 30 € / MWh
- 1 € = CHF 1.25

Source des coûts d'énergie par kWh:

[http://www.epexspot.com/fr/donnees\\_de\\_marche/intraday/graphe/intraday-chart/2014-08-30/CH](http://www.epexspot.com/fr/donnees_de_marche/intraday/graphe/intraday-chart/2014-08-30/CH)

Valeurs basés sur l'historique des prix du mois août 2014.

### Longueur des tronçons considérés pour l'estimation des coûts

Le tableau suivant illustre les longueurs considérées pour le calcul des interventions mécaniques:

Tronçon	Longueur (km)	Commentaire
Lessoc	8.55	Linéaire totale des zones alluviales
Rossens / Petite Sarine	13.5	Linéaire totale entre le barrage de Rossens et la centrale d'Haute-rive, zone alluviale d'importance nationale
Maigrauge	2	Linéaire entre le barrage de la Maigrauge et la centrale d'Oelberg

### Hypothèse des coûts moyens par mètre d'intervention mécanique

Les coûts sont estimés pour les interventions suivantes:

Tableau 41: Hypothèse des coûts moyens par mètre d'intervention mécanique

Description de l'intervention	Coût estimatif CHF	
Déconfinement des berges (mesure isolée)	1500	par m à assainir
Déconfinement des berges (mesure en combinaison avec d'autres mesures constructives)	1000	par m à assainir
Seuils / rampes	1 000 000	par m hauteur de seuil
Intervention mécanique dans la Petite Sarine	475	par m à traiter
Aménagement du lit - création de petites structures stables / singularités	2000	par m à traiter

### 10.8.8 Résumé : coûts estimatifs des mesures d'assainissement du régime de charriage

Le tableau suivant résume les coûts des mesures présentées dans les paragraphes 10.7.3 à 10.7.6 sur la base des estimations des coûts des mesures types selon paragraphe 10.7.7.

Tableau 42: Résumé des coûts des mesures charriage

Code	Installation	Coût annuel	Coût mesure unique	coût total de mesure
C1	Lessoc	6 880 000	8 000 000	14 880 000
C1.1	Lessoc	6 880 000		6 880 000
C1.2	Lessoc		8 000 000	8 000 000
C2	Lessoc	0	15 825 000	15 825 000
C3	Lessoc	6 880 000	9 550 000	16 430 000
C4	Rossens	8 426 033		8 426 033
C5	Rossens		6 565 473	6 565 473
C6	Rossens	8 426 033	6 565 473	14 991 506
C7	Maigrauge	58 821		58 821
C8	Maigrauge	8 213 333		8 213 333
C7+8	Maigrauge			8 272 154
C9	Maigrauge		4 000 000	4 000 000
C10	Schiffenen	6 880 000		6 880 000
C11	Schiffenen	8 189 600		8 189 600

Dans le tableau suivant, les valeurs prises en considération pour l'estimation des coûts sont listés.



Tableau 43 : Résumé des coûts des mesures - valeurs reprises pour l'estimation des coûts des mesures

	Fourniture de graviers			Crues artificielles		Aménagement de la Sarine					
	Fourniture de graviers m <sup>3</sup> /a	Facteur transport	Durée chantier jours	Dénivelation m	Volume crue annuelle m <sup>3</sup> /a Coût par an: Cl. 0.01125 / (m <sup>3</sup> * dénivelation)	Volume crue unique m <sup>3</sup> Coût unique: Cl. 0.01125 / (m <sup>3</sup> * dénivelation)	Hauteur total des rampes m	Déconfinement (isolée) km	Déconfinement (en combinaison) km	Intervention dans l'ilt km	Aménagement du lilt km
Mesure Installation	CHF 47 / m <sup>3</sup>	CHF 33 / m <sup>3</sup> * facteur	CHF 6000 / jour								
C1 Lessoc	4000	1	4				8				
C1.1 Lessoc	4000	1	4				8				
C1.2 Lessoc							3	8.55			
C2 Lessoc							1		8.55		
C3 Lessoc	4000	1	4								
C4 Rossens	4000	1.25	8	93	1 908 563						
C5 Rossens				93		2 673 563				13.5	
C6 Rossens	4000	1.25	8	93	1 908 563	2 673 563				13.5	
C7 Maigrauge				19.5	1 340 640						
C8 Maigrauge	4000	1.5	4								
C7+8 Maigrauge	4000	1.5	4	19.5	1 340 640						
C9 Maigrauge				19.5							2
C10 Schiffenen	4000	1	4								
C11 Schiffenen	4000	1.25	8	41	1 838 250						

## 11. La Glâne

### 11.1 Description du bassin versant

Le bassin versant de la Glâne est présenté sur la base du résumé établi par ETEC Sàrl (2006), légèrement réduit pour respecter le besoin de la présente étude.

Le bassin versant de la Glâne appartient selon l'Atlas hydrologique au bassin n° 20-280. Divisé en quatre sous-bassins, il est situé à l'ouest du lac de Gruyère et au sud-ouest du Schiffenensee, et possède une superficie voisine de 195.1 km<sup>2</sup>. La rivière (code GEWISS 233) prend sa source sur le territoire de la commune de Bouloz, à environ 845 m d'altitude. Elle coule en direction du nord-est et rejoint la Sarine (code GEWISS 227) peu avant la ville de Fribourg, à une altitude de 560 m. Peu encaissée dans sa partie supérieure, la vallée de la Glâne se resserre à l'aval. Le cours supérieur de la Glâne est encore naturel, préservé par des cordons forestiers. A la confluence du ruisseau des Chavannes, la rivière est corrigée et rectiligne. Bien qu'elle retrouve un cours naturel à la hauteur de Romont, l'aval est corrigé, quelques tronçons présentent toutefois un tracé non rectiligne. L'aval du cours d'eau, soit le tronçon débutant peu après la confluence de la Longivue jusqu'à son embouchure dans la Sarine, est naturel. Avec une longueur d'environ 34.9 km, la pente moyenne de la Glâne avoisine 0.8 % ; elle est plus faible sur le linéaire aval. Les affluents peuvent présenter des pentes plus élevées, comme le ruisseau du Glèbe (5 %), le ruisseau de Cottens et la Bagne (3%) ou le ruisseau de Chavannes (2.7 %). Le sous-sol de l'ensemble du bassin versant de la Glâne est de type quaternaire, constitué d'alluvions et de moraines. Selon l'Atlas hydrologique, le régime hydrologique du cours amont est de type pluvial jurassien (plus hautes eaux au printemps et plus basses eaux en automne avec une amplitude assez bien marquée). La Glâne reçoit plusieurs affluents (37), les principaux étant d'amont en aval, en rive droite le ruisseau de Chavannes avec pour affluent le Fochaux (code GEWISS 1563 et 1562), le Glaney en rive gauche (code GEWISS 1561), puis à nouveau en rive droite la Neirigue (code GEWISS 244, longue d'environ 19.6 km, soit l'affluent le plus important), le ruisseau du Glèbe (code GEWISS 1561) et le ruisseau de la Longivue (code GEWISS 1552). Enfin viennent en rive gauche le ruisseau de Cottens (code GEWISS 785) et la Bagne (code GEWISS 1551).

Cinq installations prioritaires sont à étudier (points rouge sur la Figure 114) de l'amont vers l'aval :

- FR.GLA.5 : prise d'eau du canal de la Fille-Dieu ;
- FR.GLA.4 : prise d'eau pour le moulin Waeber ;
- FR.GLA.3 : ancienne prise d'eau du moulin de Chavannes-sous-Orsonnens (plus en activité) ;
- FR.GLA.2 : prise d'eau du Moulin Neuf;
- FR.GLA.1 : barrage Matelec.

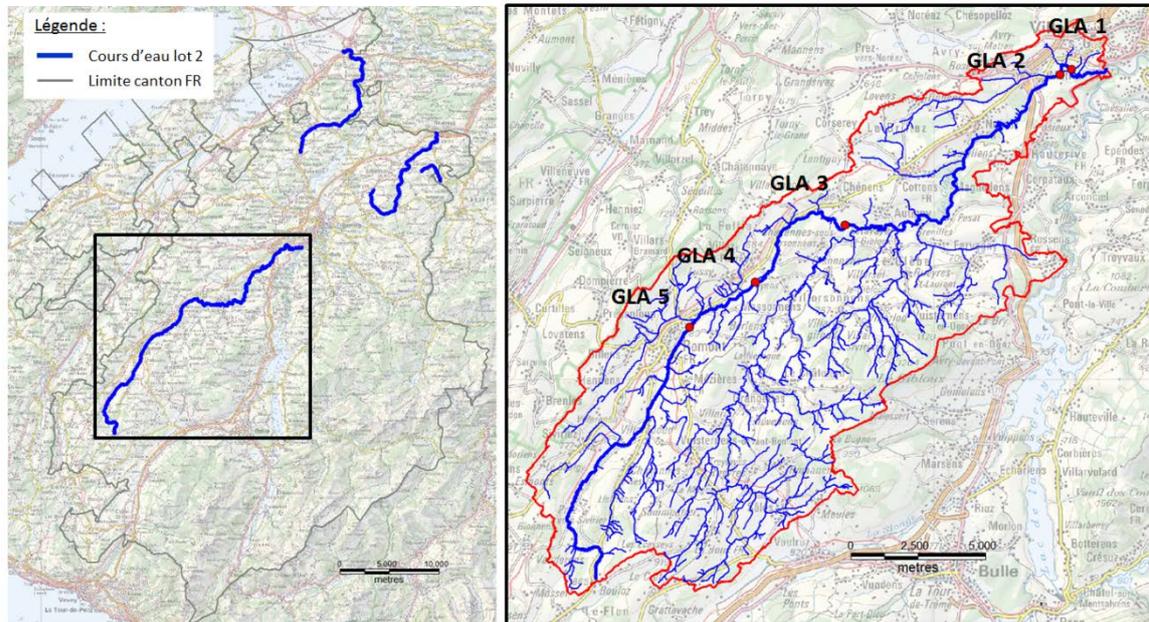


Figure 114 : Bassin versant de la Glâne et installations à évaluer

## 11.2 Description du cours d'eau et profil en long topographique

Le cours de la Glâne a été découpé en secteurs homogènes, en fonction de plusieurs paramètres.

### 11.2.1 Découpage morphologique

Quatre faciès d'écoulement généraux sont identifiés le long de la Glâne (Figure 115 et Figure 116).

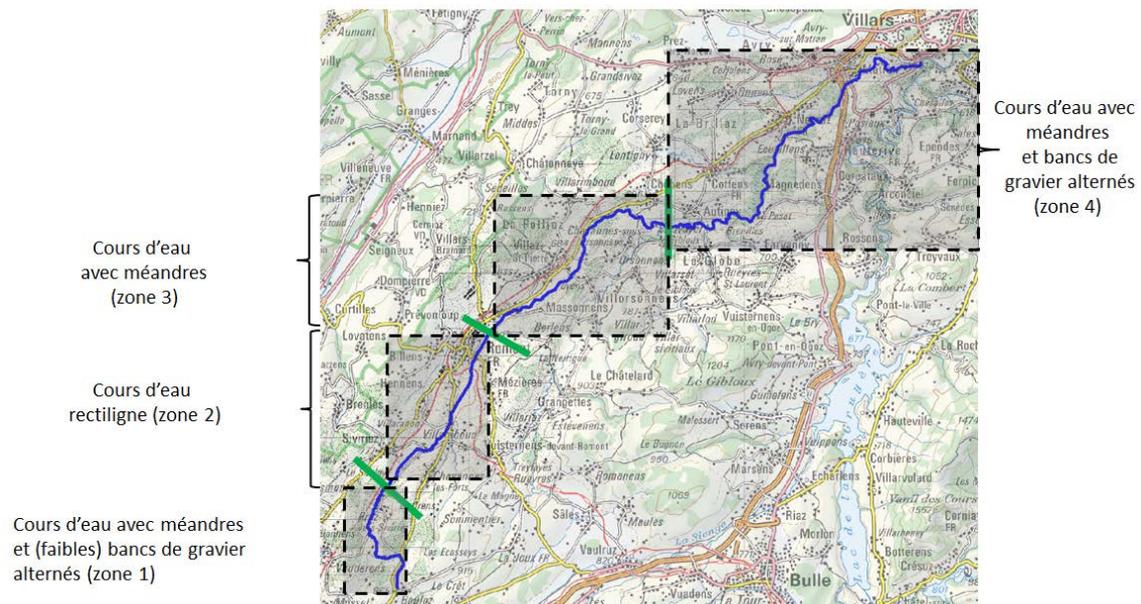


Figure 115: Découpage morphologique de la Glâne



Figure 116: Illustration des quatre zones morphologiques homogènes identifiées sur la Glâne.

### 11.2.2 Découpage selon les apports hydrologiques :

Un autre niveau de découpage peut être réalisé selon les apports hydrologiques (Figure 117) de la Glâne.

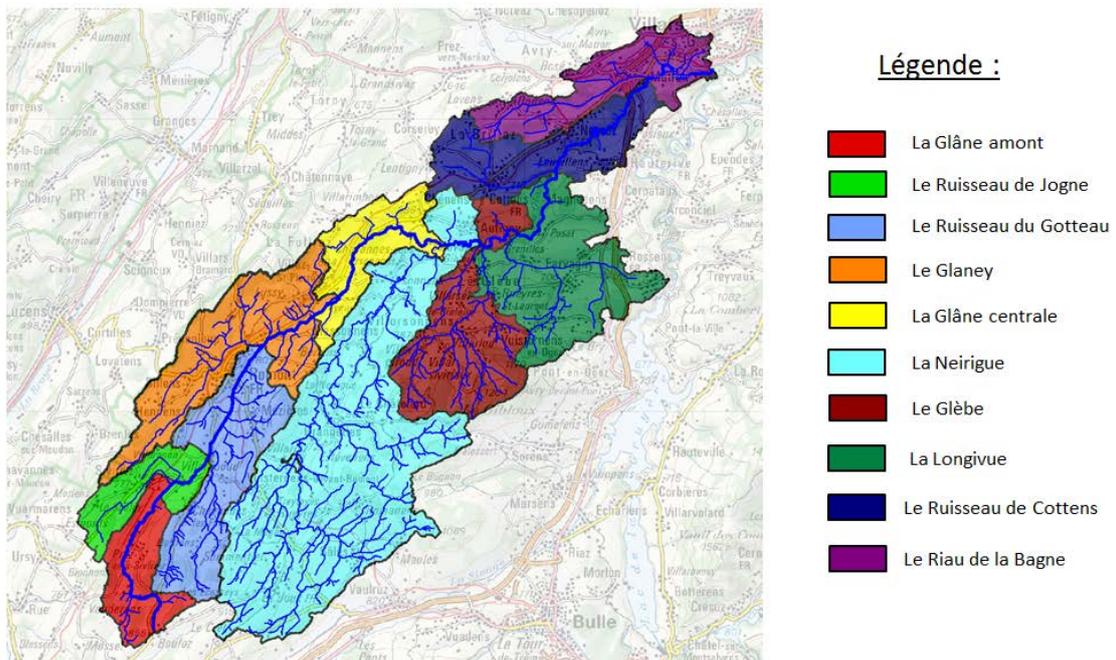


Figure 117: Sous-bassins versant de la Glâne

### 11.2.3 Découpage selon les installations prioritaires :

Le cours de la Glâne peut également être scindé à partir des cinq ouvrages identifiés altérant potentiellement le régime de charriage (Figure 114)

### 11.2.4 Découpage en fonction de la pente

Un dernier niveau de découpage est proposé en fonction des variations de pente significative le long du cours d'eau (Figure 118).

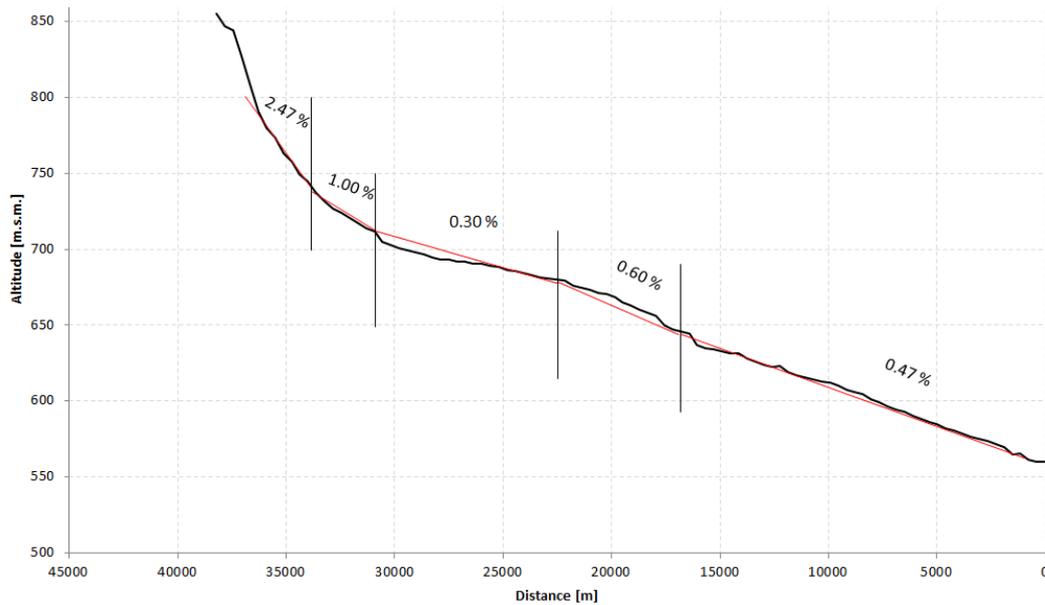


Figure 118: Variations générales de pente sur la Glâne.

### 11.2.5 Découpage final proposé pour l'étude du charriage de la Glâne

En superposant ces différents découpages, on identifie finalement dix tronçons homogènes le long de la Glâne (Figure 119). L'Annexe 3.1 détaille les caractéristiques de chaque tronçon.

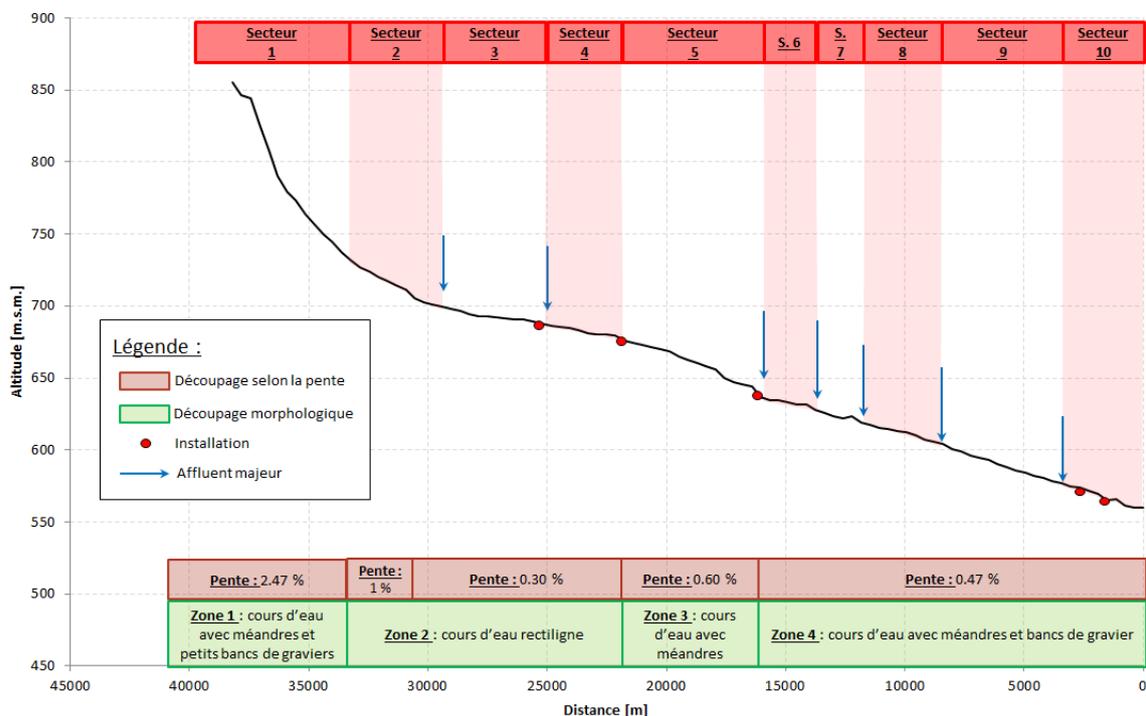


Figure 119: Profil en long topographique et découpage du cours de la Glâne

## 11.3 Estimation de la charge solide actuelle

### 11.3.1 Calcul de la capacité minimale et maximale

La capacité minimale et maximale a été calculée selon la méthodologie détaillée dans la Praxishilfe, Hunziker et Lehmann (2013). La courbe des débits classés a été déterminée à partir des mesures de la station OFEV de Villars sur Glâne pour les années 2003 et 2004<sup>16</sup>(voir justification dans l'Annexe 3.1.3). Les résultats sont présentés dans la Figure 120.

En utilisant une courbe granulométrique étendue telle que relevée in situ (voir Annexe 3.1.2), le calcul de la capacité minimale et maximale montre que le volume transportable se situe entre quasiment 0 m<sup>3</sup>/an et 20 000 m<sup>3</sup>/ an, suivant les secteurs. Ces valeurs étant très étalées, elles ne permettent pas de définir, uniquement sur ce critère, quel est le débit solide transitant effectivement dans la Glâne.

En utilisant le diamètre moyen, les volumes transportables sont moins élevés et correspondent à des valeurs plus proches de la réalité. Ces valeurs théoriques ont, par la suite, été comparées avec les observations réalisées sur le terrain.

En amont de la Glâne, les valeurs théoriques de charriage sont importantes car la pente y est relativement forte (2.47% et 1%). Il est à noter que ces valeurs ne correspondent pas à la réalité car ce secteur est entièrement canalisé et les traces de transport observées sont quasi-nulles.

Ce décalage entre le calcul théorique et la réalité in situ provient d'un manque d'approvisionnement depuis l'amont du bassin versant.

<sup>16</sup> Station suivie par l'OFEV, mais procurant des valeurs de débit estimées approximatives

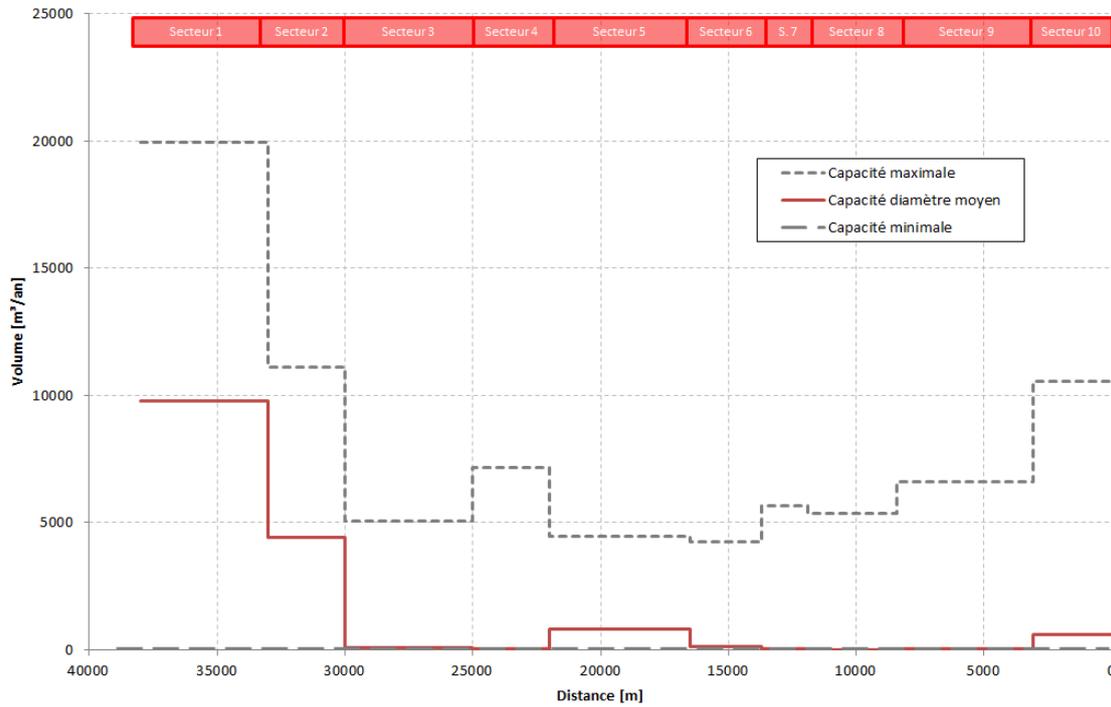


Figure 120: Calcul de la capacité annuelle de charriage théorique minimale et maximale pour la Glâne, pour une granulométrie étendue et pour le diamètre moyen.

### 11.3.2 Estimation de la charge solide actuelle

La charge solide actuelle est basée sur les observations de terrain telles que :

- la présence de bancs de graviers
- les obstacles au charriage
- les apports de matériaux

La charge solide actuelle, par secteur, est présentée sur la Figure 121. Une analyse plus détaillée par secteur est présentée à la suite du graphique.

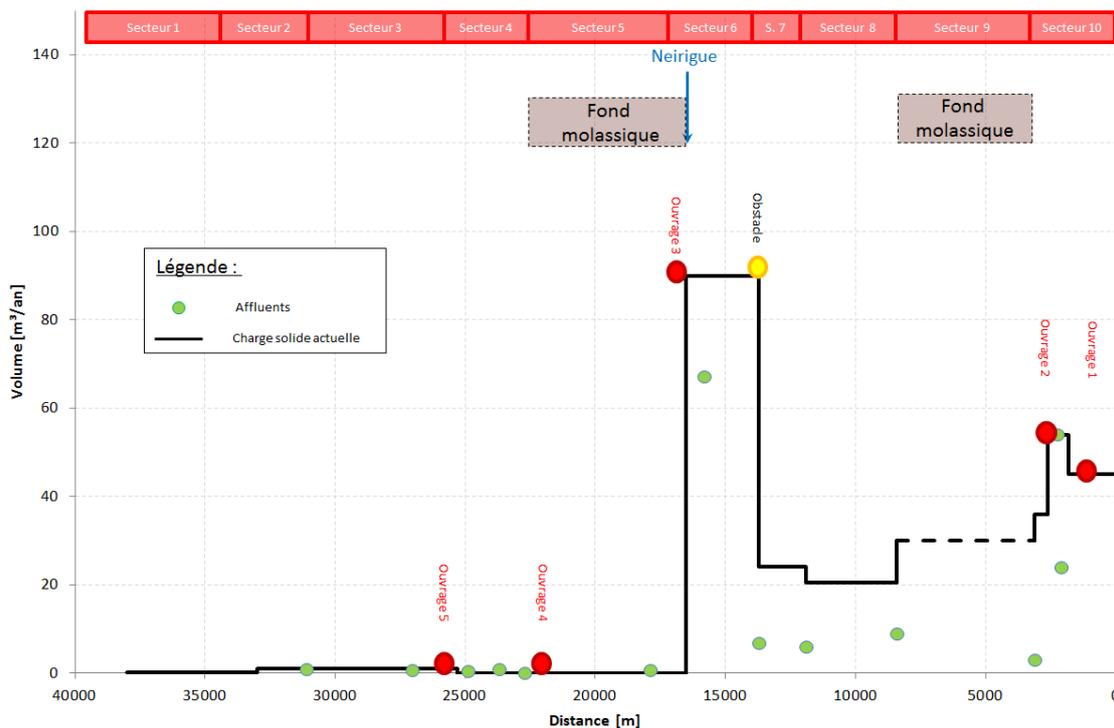


Figure 121: Charge solide actuelle dans la Glâne

Sur les secteurs 1, 2 et 3, le charriage observé est quasi nul car ce tronçon est très canalisé et donc protégé. Cette canalisation pèjore fortement le régime de charriage car :

- la largeur fixe du cours d'eau ne permet pas à celui-ci de former des bancs de graviers ;
- la canalisation de la Glâne, ainsi que la canalisation (mise sous terre) de ses affluents, limite fortement l'apport en sédiments.

Sur le secteur 4, malgré un aspect plus naturel, le charriage observé est également quasi nul car il n'y pas d'apport de l'amont (ni affluent ni érosion des berges). Très peu d'affluents sont observés dans ce secteur et la pente du tronçon est très faible.

Sur le secteur 5, le faible transport observé s'explique par le manque d'apports de l'amont (l'ouvrage 4 situé en amont du tronçon est un piège à sédiments qui retient le charriage provenant de l'amont) et par la nature du fond (fond molassique observé ; Figure 122).

Remarque : même si aucun banc de graviers n'est observé sur ce tronçon, celui-ci semble assez naturel et le fond molassique offre une variabilité de l'écoulement à priori intéressante pour le développement piscicole.



Figure 122: Lit de la Glâne dans le secteur 5

Finalement, sur les secteurs 6 à 10, de nombreux bancs de graviers ont été observés. Cette abondance de bancs s'explique par la présence de nombreux affluents pourvoyeurs de sédiments tels que la Neirigue, le Glèbe et la Longivue.

*Remarque* : le secteur 6 (Figure 123) est considéré comme étant naturel car de nombreux bancs sont observés : ce tronçon est situé directement en aval de l'affluent principal de la Glâne, la Neirigue, qui fournit une quantité importante de sédiments. Cependant, cet état naturel ne se retrouve pas en aval du tronçon 6 car l'assainissement en 2006 du barrage de la Battiaz (= « Obstacle » sur Figure 123), situé dans les gorges, a augmenté la capacité de transport de sédiments vers l'aval, en raison d'un rétrécissement ponctuel de la largeur naturelle (Figure 123, en bas).



Figure 123: Morphologie de la Glâne dans le secteur 6.

A droite : barrage de la Battiaz, dans lequel une encoche a été ouverte en 2006. La largeur du tronçon directement à l'amont a été rétrécie en conséquence.



## 11.4 Estimation de la charge solide naturelle et nécessaire

Pour l'estimation de la charge solide naturelle, la Glâne a été divisée en deux zones :

- La zone en amont de la Neirigue : cette zone est fortement anthropisée. La méthode utilisée est celle basée sur l'estimation de la largeur naturelle. Cette largeur est calculée, pour les secteurs amont 1 à 5, en supposant un régime naturel du cours d'eau. La comparaison entre la largeur actuelle et la largeur naturelle est présentée dans le Tableau 44. Dans l'état naturel projeté, chaque tronçon se situe dans la partie des bancs de graviers / bancs de graviers alternés sur le diagramme de Da Silva (Figure 124).
- La zone en aval de la Neirigue : cette zone est considérée comme étant naturelle. La charge solide actuelle est alors considérée comme étant égale à la charge solide naturelle.

Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 125.

Tableau 44: Largeur naturelle estimée de la Glâne

Secteur	Largeur actuelle [m]	Largeur naturelle [m]
● 1	1.5	2
● 2	1	3.3
● 3	2	5.7
● 3	5	7
● 5	7	8

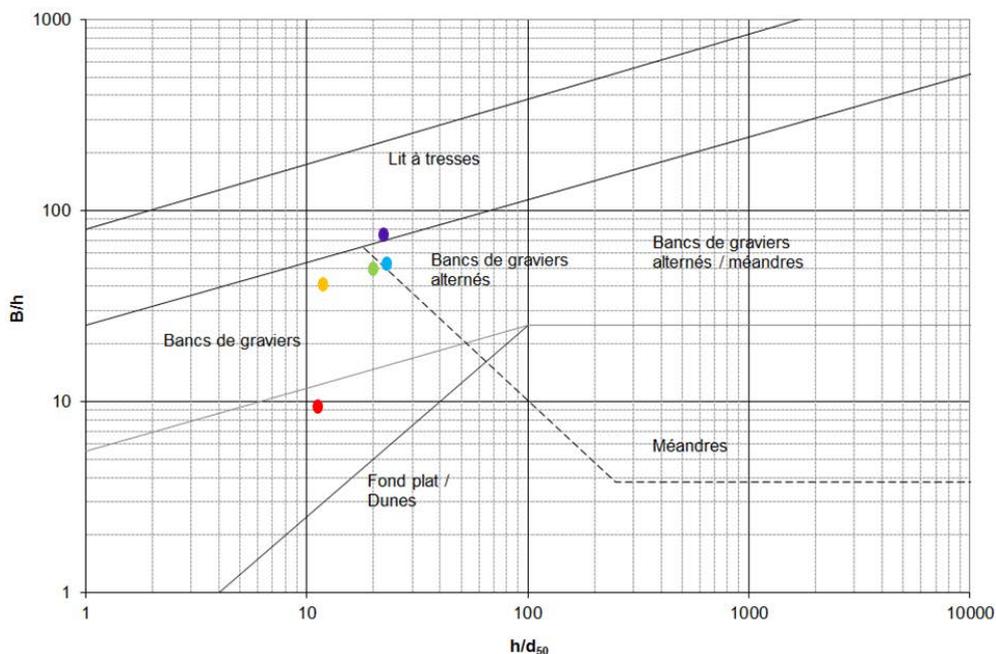


Figure 124: Tronçons de la Glâne sur le diagramme de Da Silva.

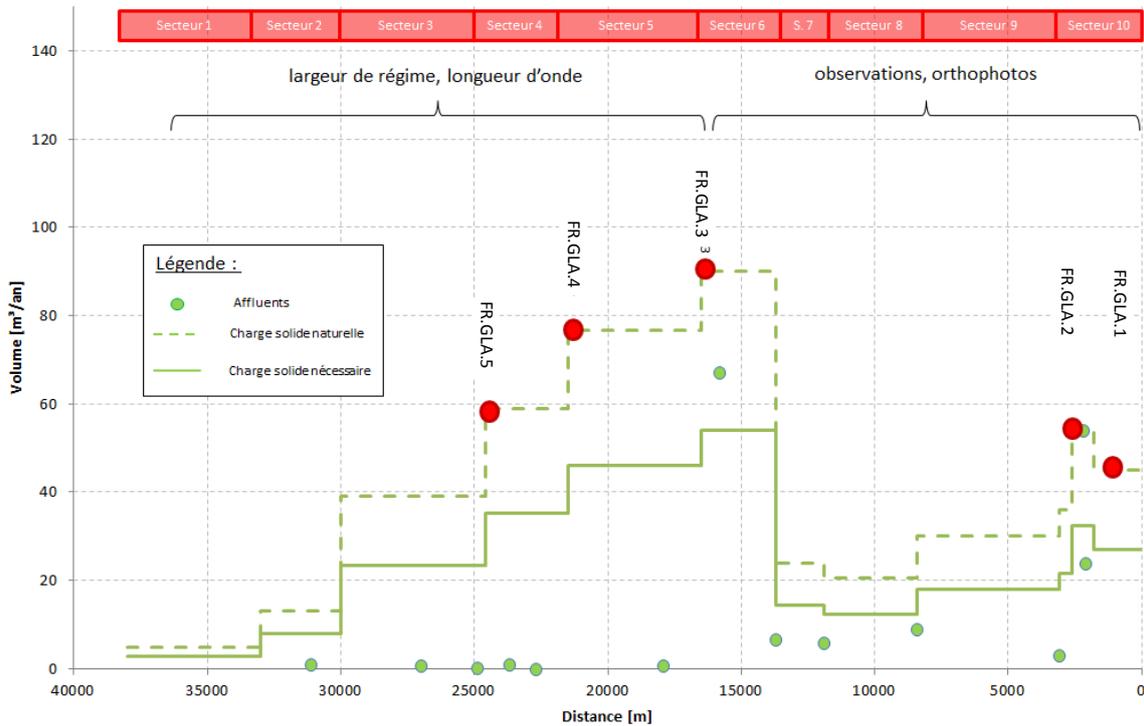


Figure 125: Charge solide naturelle et nécessaire dans la Glâne

## 11.5 Impact des installations sur le régime de charriage

Cinq installations prioritaires sont situées sur la Glâne. **Une description de chaque ouvrage est fournie dans les fiches de l'Annexe 1**, réalisées suite aux visites de terrain de l'appréciation sommaire. Dans un premier temps, l'impact de chaque installation a été sommairement estimé en se basant sur le volume de rétention disponible avant l'équilibre morphologique de la retenue. L'équilibre morphologique d'une retenue se traduit par les caractéristiques suivantes :

- Comblement important de la retenue et formation de thalweg à faible pente ;
- Transit de la plupart des matériaux à travers l'ouvrage. (l'ouvrage ne permet plus un stockage important des matériaux et une grande partie de ceux-ci passent à travers l'installation).

Pour simplifier les choses, on estime dans la suite qu'une installation a atteint son régime d'équilibre lorsqu'elle est comblée à 80%<sup>17</sup>.

Les volumes disponibles avant atteinte de l'état d'équilibre morphologique sont présentés dans le Tableau 45. Le comblement estimé correspond au comblement actuel de la retenue, observé sur site.

<sup>17</sup> Il est à noter que cette valeur n'est pas figée et fluctue selon le rapport du volume total de la retenue vide par rapport au gabarit naturel du cours d'eau d'origine. Ainsi, pour chaque retenue, des calculs morphologiques tenant compte des contraintes de cisaillement sur le fond devraient théoriquement être menés pour déterminer le comblement d'équilibre. Dans le cadre de la présente planification stratégique, traitant de retenues modérées formées par des seuils en rivière, le taux de 80% constitue une valeur raisonnable permettant une première approche globale.

Tableau 45: Volume disponible avant l'atteinte de l'équilibre morphologique  
 \*Selon explication de la page précédente, équilibre morphologique atteint (80%)

Ouvrage	Volume estimé	Comblement estimé	% disponible avant équilibre	Volume restant
FR.GLA.5	625 m <sup>3</sup>	50 %	30 %	180 m <sup>3</sup>
FR.GLA.4	7'000 m <sup>3</sup>	30 %	50 %	3'500 m <sup>3</sup>
FR.GLA.3	4'230 m <sup>3</sup>	25 %	55 %	2'330 m <sup>3</sup>
FR.GLA.2	7'965 m <sup>3</sup>	80 % *	0 %	0 m <sup>3</sup>
FR.GLA.1	3'825 m <sup>3</sup>	80 % *	0 %	0 m <sup>3</sup>

Ces valeurs ont ensuite été comparées à la valeur de la charge naturelle. Cette comparaison est présentée sur la Figure 126.

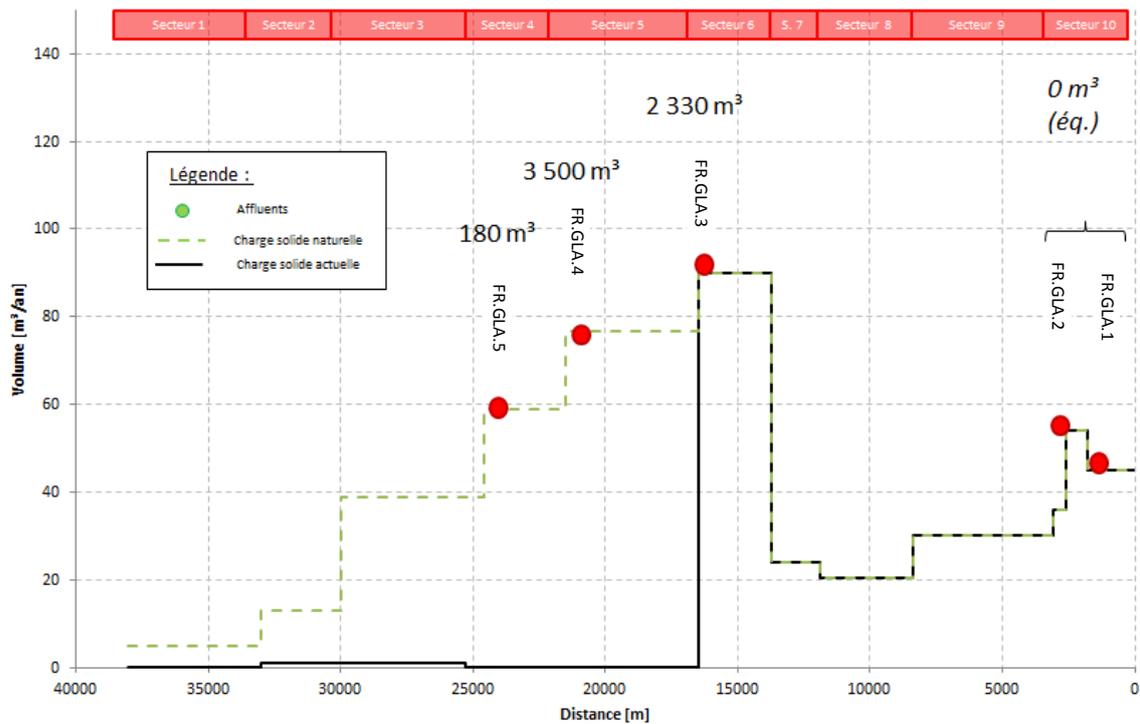


Figure 126: Comparaison des volumes disponibles dans chaque ouvrage avec la charge solide nécessaire

Pour chaque installation, le degré de gravité des atteintes a été estimé selon le barème présenté dans l'aide à l'exécution (figure 13 p.46).

- **FR.GLA.1 et FR.GLA.2** : Ces barrages semblent avoir atteint leur état d'équilibre morphologique ; de plus, des apports importants provenant d'affluents ou de l'érosion des berges ont été observés.  
 Degré d'atteinte sur le régime de charriage inférieur à 20% : **atteinte faible**.
- **FR.GLA.3** : Ce barrage a un volume de rétention important, ce qui peut bloquer le charriage vers l'aval. Cependant, l'ouvrage est situé directement en amont de la Neirigue, le pour-

voyeur majeur en sédiments de la Glâne et le secteur en aval de l'installation présente un aspect très naturel.

Degré d'atteinte sur le régime de charriage dans le court tronçon (580 m) entre le barrage et la Neirigé : entre 80% et 100% : **atteinte très prononcée**

- **FR.GLA.4** : Ce barrage a un volume de rétention très important par rapport au volume charrié dans l'état naturel ce qui bloquerait totalement le charriage si un régime naturel était réinstauré en amont. Le barrage ayant une hauteur de 2 mètres, son influence se fait ressentir jusqu'à 1 km à l'aval (voir influence de l'ouvrage sur les diamètres transportables présentée en Annexe 3.1.4). Enfin, le débit prélevé par les exploitants semble être important et diminue la capacité de charriage à l'aval.

Degré d'atteinte sur le régime de charriage entre 80% et 100% : **atteinte très prononcée**.

**Remarque** : les exploitants de cet ouvrage sont peu coopératifs, ainsi aucune valeur de débit prélevé et aucun renseignement quant au fonctionnement de l'ouvrage n'ont été fournis. De plus, l'accès à l'installation a été refusé au bureau mandataire lors des investigations de terrain.

- **FR.GLA.5** : Cette installation peut entraver le charriage durant 3 à 5 ans si un régime de charriage naturel est instauré en amont. L'influence de l'ouvrage sur les diamètres transportables a également été calculée, les résultats sont présentés dans l'Annexe 3.1.4.

Degré d'atteinte sur le régime de charriage entre 40% et 60% : **atteinte notable**.

## 11.6 Influence des installations sur la protection contre les crues

Les barrages situés sur la Glâne sont des barrages de faible envergure. Ils ont néanmoins une influence sur le relèvement de la pente du lit à l'amont. Comme le souligne la carte indicative pour les dangers de crues du bassin versant de la Glâne, FR.GLA.1, FR.GLA.2 et FR.GLA.3 pourraient à priori occasionner l'inondation des cultures adjacentes, sur quelques dizaines de mètres à l'amont. Il n'y a donc pas lieu de parler d'atteinte grave à la protection contre les crues puisqu'aucune zone à bâtir n'est touchée, si ce n'est une habitation pour GLA.1.

Aucune atteinte n'a été reconnue pour FR.GLA.4 et FR.GLA.5.

## 11.7 Profils en long du charriage et détermination des tronçons avec atteinte grave

Dans un premier temps, un bilan de transport est présenté sous forme de profil en long (Figure 127). Ce graphique reprend les données suivantes :

- Charge solide à l'état actuel ;
- Charge solide à l'état naturel ;
- Charge solide estimée nécessaire.

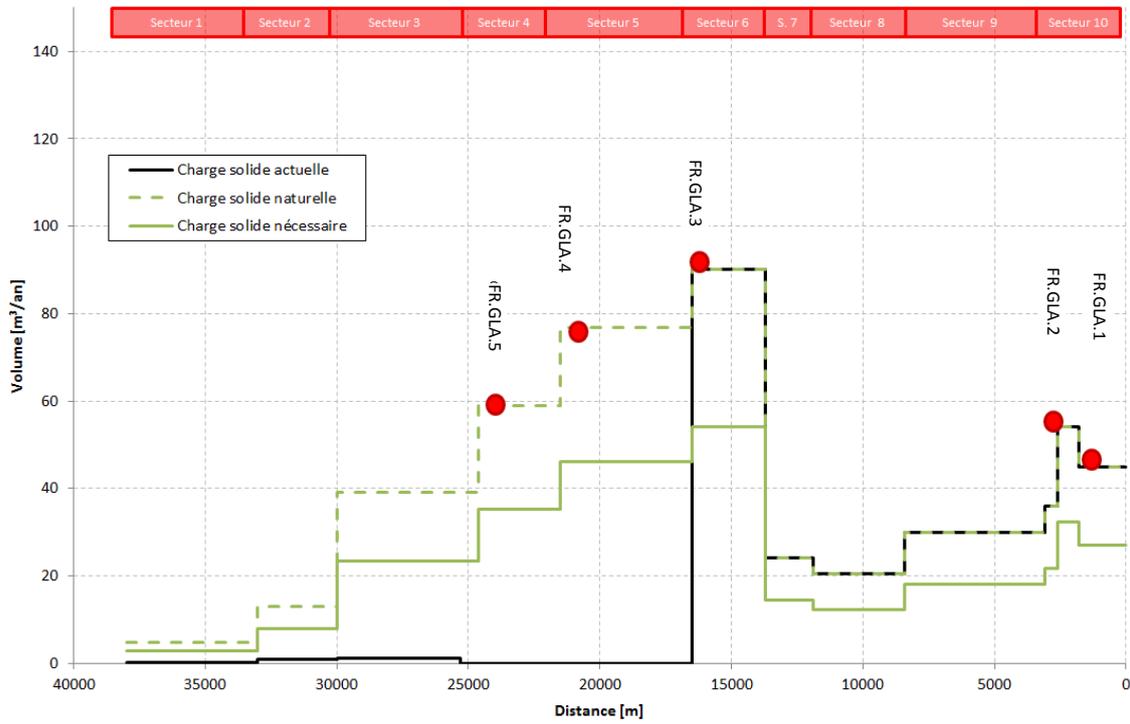


Figure 127: Profil en long de charriage – Bilan de transport solide

Dans un second temps, l'état du tronçon par rapport au régime de charriage a été estimé en comparant l'état actuel et naturel de celui-ci (Figure 128).

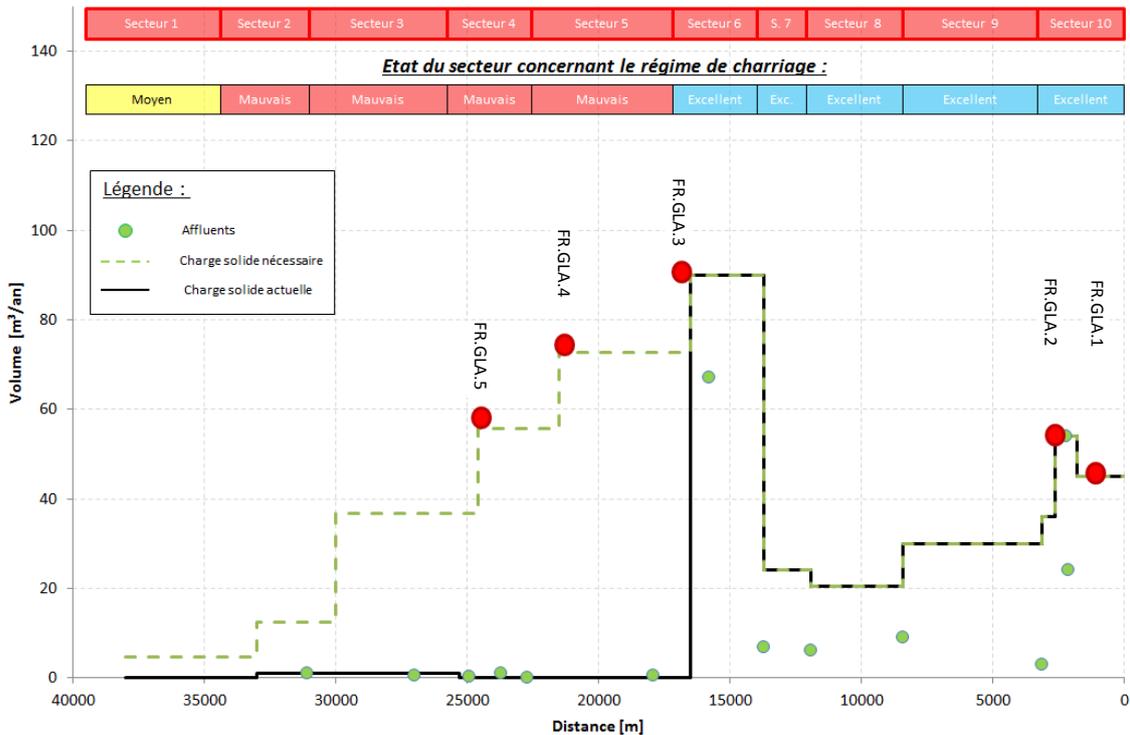


Figure 128: Profil en long de charriage et détermination des tronçons avec atteinte grave au régime de charriage.

L'ensemble des tronçons en amont de la Neirigue présente une atteinte grave au régime de charriage.

## 11.8 Proposition de mesures d'assainissement adéquates

### 11.8.1 Prise d'eau de la Fille-Dieu (FR.GLA.5) sur la Glâne

#### 11.8.1.1 Remarque préliminaire

L'ouvrage étudié présente une atteinte importante au régime de charriage, **à condition que celui-ci soit rétabli en amont de l'ouvrage.**

Pour rétablir un régime de charriage intéressant, une revitalisation des secteurs en amont de l'ouvrage doit être entreprise, telle que par exemple:

- Suppression des protections de berges actuelles ;
- Elargissement du cours d'eau ;
- Remise à ciel ouvert des embouchures des affluents.

(Dans la notation des variantes, un malus de -5 points a été appliqué pour tenir compte de ce prérequis important.)

Pour l'ensemble des calculs de variantes, nous avons supposé que la charge nécessaire était à disposition en amont de l'ouvrage. Les calculs de transport solide ont été réalisés sur 50 ans.

Les résultats sont présentés de la manière suivante :

1. Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance
2. Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage)
3. Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps

#### 11.8.1.2 VAR 0 : Conservation de l'installation en l'état

##### a) Description

Cette variante consiste à laisser l'ouvrage dans son état actuel et d'attendre qu'un nouvel état d'équilibre soit atteint.

Une esquisse représentant la variante étudiée est présentée sur Figure 129.

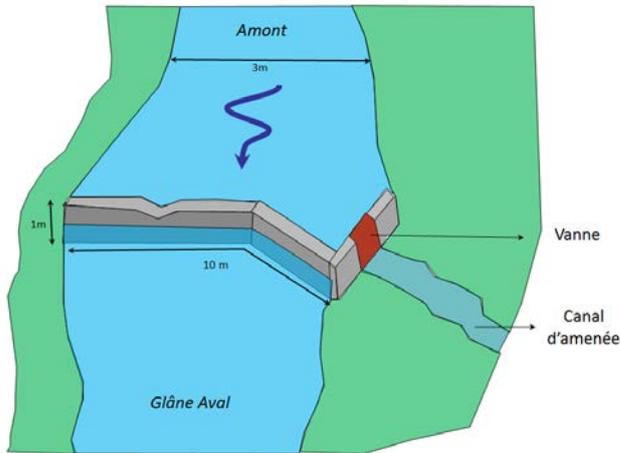


Figure 129: Esquisse de la variante 0 (FR.GLA.5)

b) Résultats de modélisation :

Les résultats de la modélisation sont présentés au travers des 3 graphiques (Figure 130, Figure 131 et Figure 132) ci-dessous :

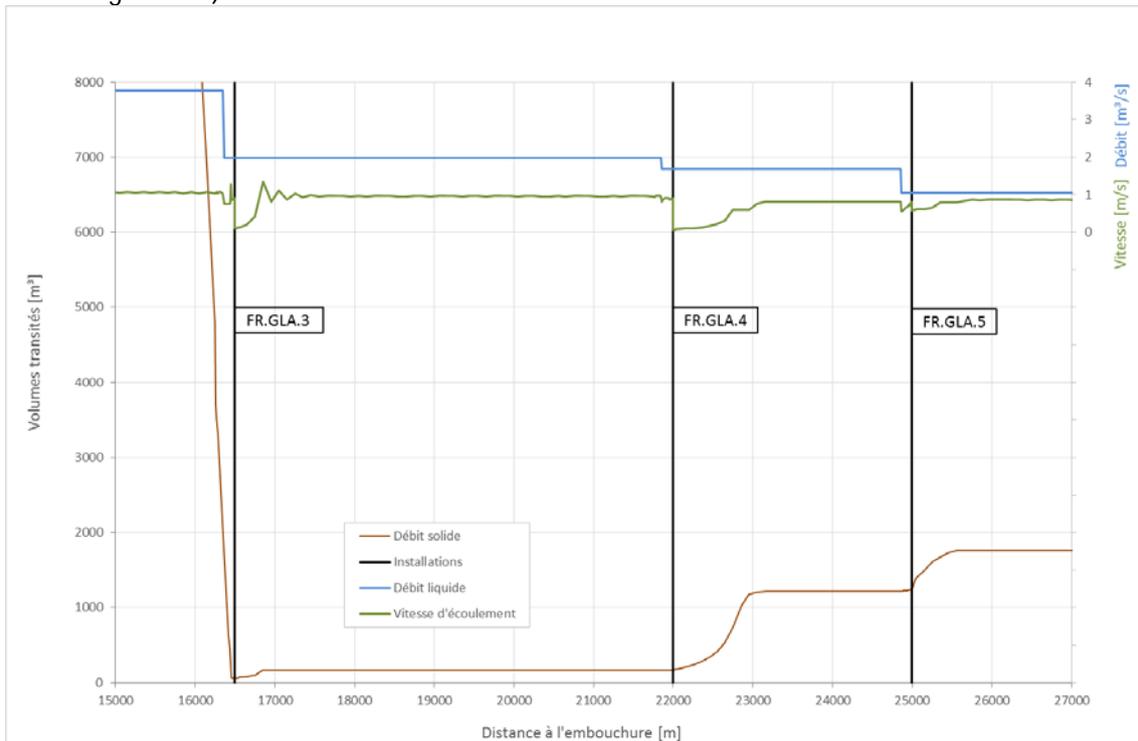


Figure 130: VAR 0 : Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance (après 50 ans de charriage)

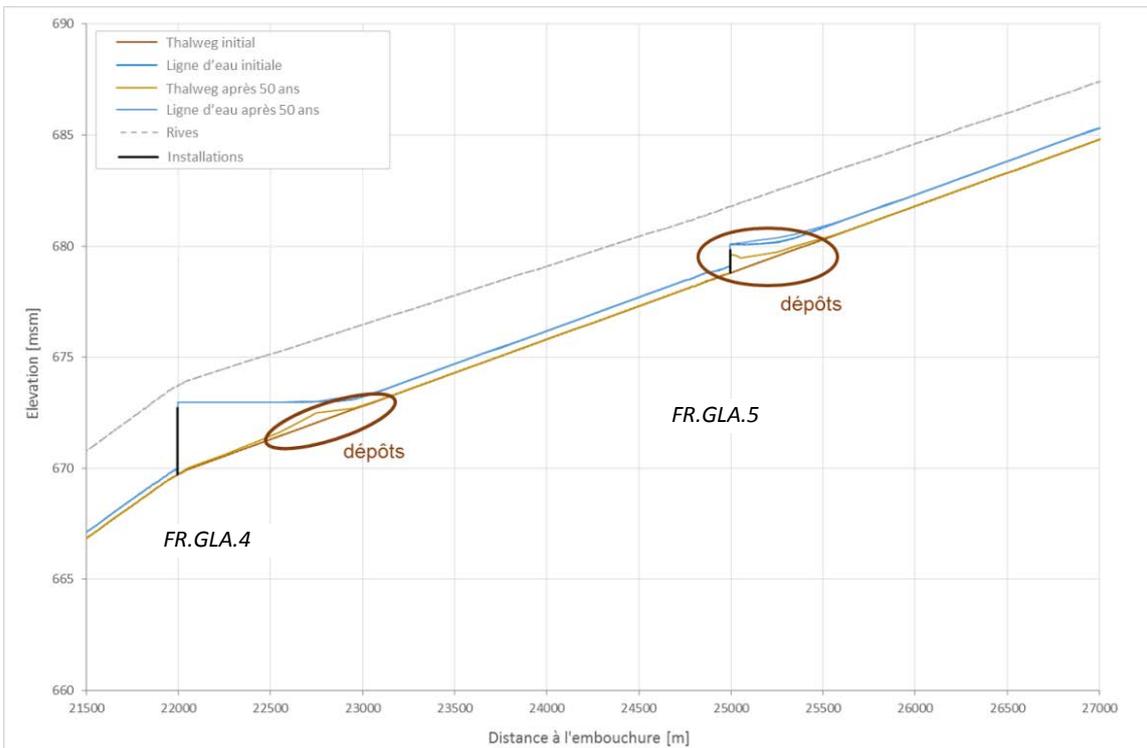


Figure 131: VAR 0 : Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage)

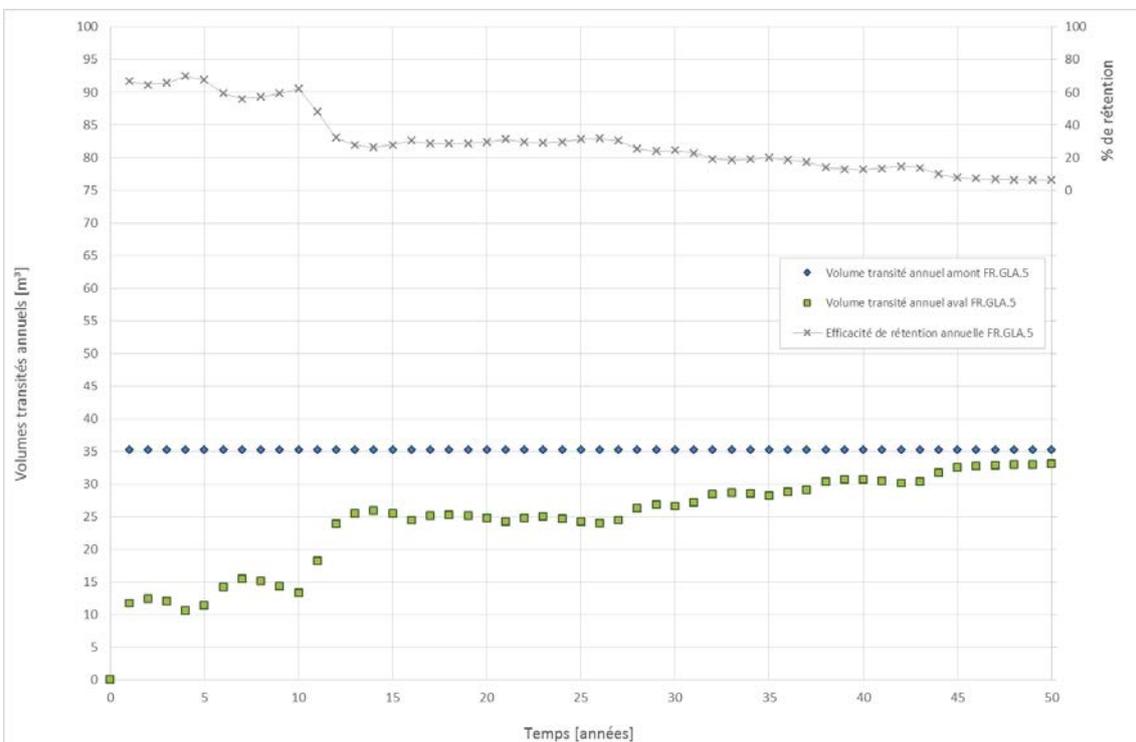


Figure 132: VAR 0 : Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps

La **figure 101** montre que l'ouvrage en question laisse transiter une partie des sédiments vers l'aval. Selon la **figure 102**, les sédiments se déposent directement en amont de l'ouvrage, tandis que les sédiments transitant vers l'aval se déposent entre 500 m et 1 km en amont de l'ouvrage 4 (prise d'eau du Moulin Waeber).

D'après la **figure 103**, l'ouvrage retient plus de 60% des sédiments les dix premières années, puis le pourcentage de rétention diminue progressivement jusqu'à atteindre un taux de 20% au bout des 50 ans de modélisation du régime de charriage.

### c) Conclusion

Dans le cadre du rétablissement du régime de charriage, cette variante n'est pas optimale. En effet, le transit des matériaux n'est pas assuré pour les premières années, de plus cette variante a également l'inconvénient d'ensabler la prise d'eau actuelle ce qui limite fortement son utilisation sur le long terme. Enfin, cette variante est peu compatible avec le rétablissement de la migration piscicole.

Le coût de cette variante est estimé à : **0 CHF**

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans l'Annexe 4.

### 11.8.1.3 VAR 1 : Suppression de l'ouvrage

#### a) Description de la variante

La variante consiste à supprimer totalement l'ouvrage. (*Remarque* : la prise d'eau pourrait être déplacée sur un des affluents situé en aval de la Glâne. Cet aspect a été pris en compte dans les coûts de la variante, mais la faisabilité du déplacement de la prise n'a pas été approfondie.)

Une esquisse de la variante est présentée sur la Figure 133 :

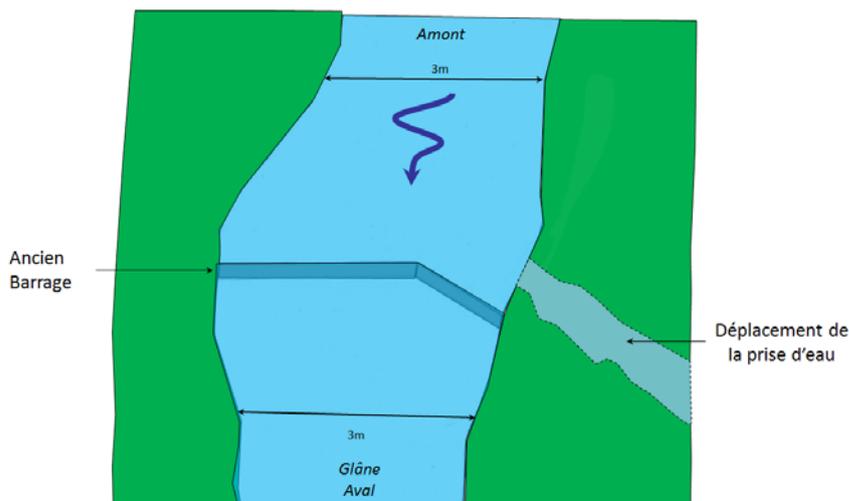


Figure 133: Esquisse de la variante 1 (FR.GLA.5)

#### b) Résultats de la modélisation

Les résultats de la modélisation sont présentés au travers des 3 graphiques (Figure 134, Figure 135, Figure 136) ci-après :

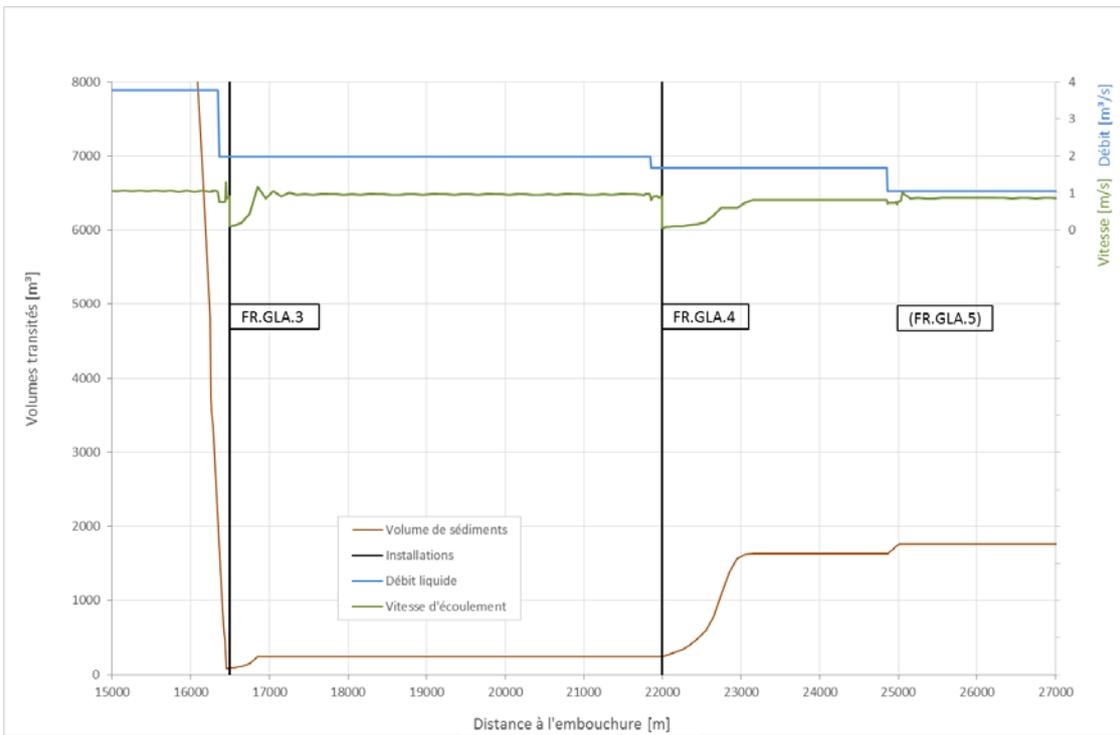


Figure 134: VAR1 : Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance (après 50 ans de charriage)

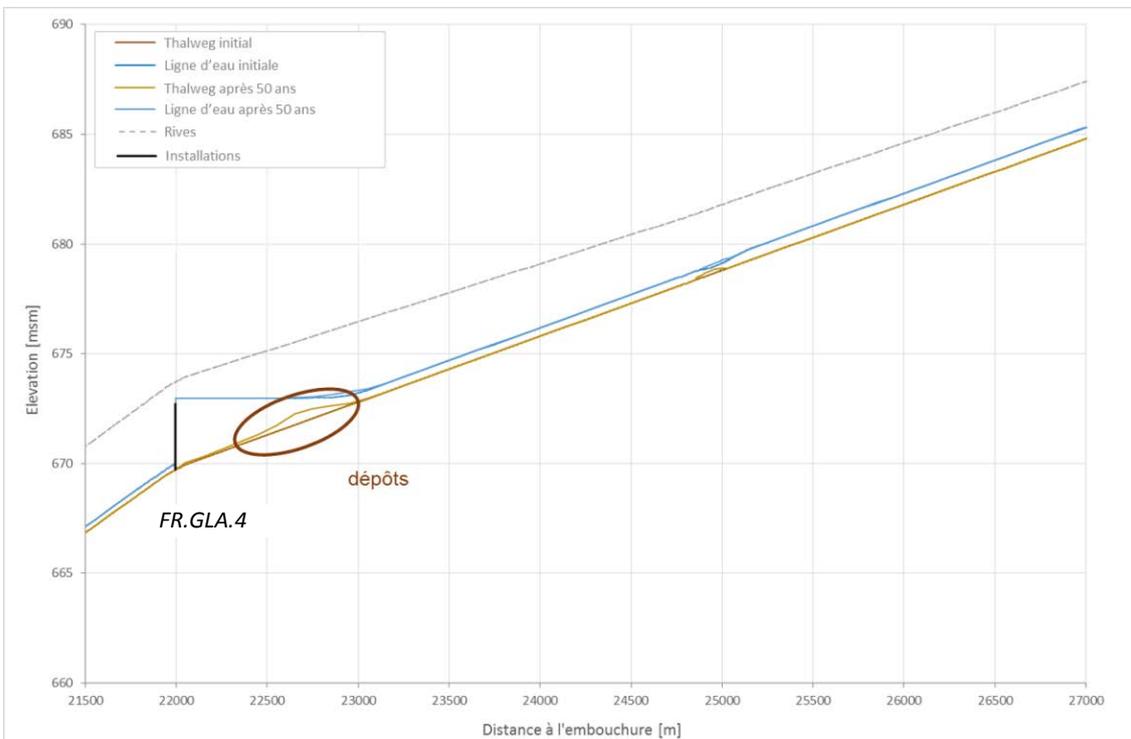


Figure 135:VAR1: Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage)

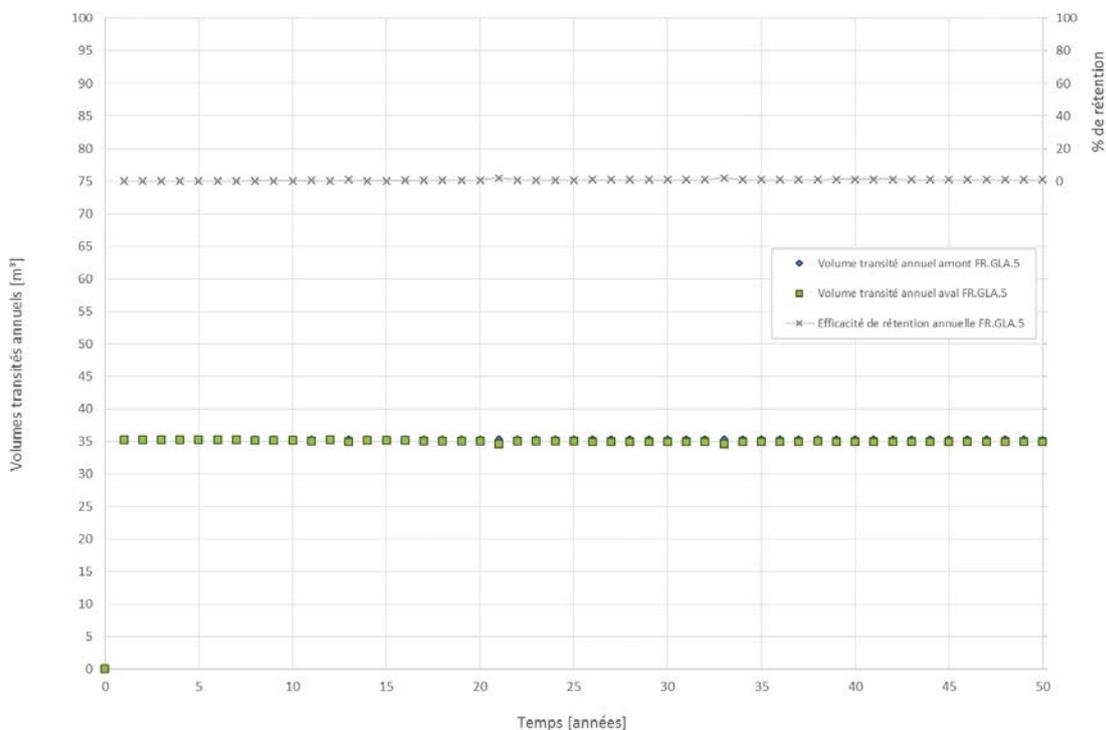


Figure 136: VAR1: Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps

La Figure 134 montre que la majorité des sédiments transite sur le secteur en aval de l'ouvrage. De légers dépôts sont observés légèrement à l'aval de l'ouvrage actuel : ceux-ci sont dus au changement de géométrie du profil type.

L'ensemble des sédiments est ensuite stoppé au niveau de l'ouvrage 4, situé plus en aval.

Le pourcentage de rétention de sédiments est nul et la charge en amont de l'ouvrage est égale à la charge en aval de l'ouvrage.

c) Conclusion

Cette variante permet de laisser transiter la totalité des sédiments provenant de l'amont. De plus elle permet de rétablir la migration piscicole en supprimant un obstacle important. En revanche, elle rend l'utilisation de la prise d'eau actuelle inutilisable.

Le coût de cette variante est grossièrement estimé à : **120 000 CHF**

Cette estimation tient compte de la suppression de l'ouvrage ainsi que du déplacement de la prise d'eau.

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans [l'Annexe 4](#).

**11.8.1.4 VAR 2 : Réalisation d'une encoche dans le barrage actuel**

a) Description de la variante

La variante consiste à réaliser une large encoche d'environ 20 cm de profondeur dans l'ouvrage existant. Ceci permettra d'abaisser légèrement la ligne d'eau et de limiter le volume de stockage

à disposition derrière l'ouvrage. La prise d'eau actuelle pourrait être conservée via quelques aménagements (mise en place d'un dégrilleur pour éviter l'ensablement par exemple).

Une esquisse de la variante est présentée sur la Figure 137 ci-dessous :

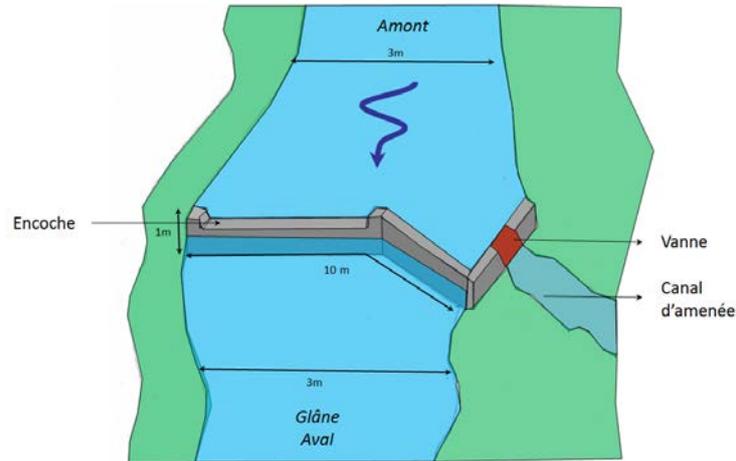


Figure 137: Esquisse de la variante 2 (FR.GLA.5)

b) Modélisation numérique

Les résultats de la modélisation numérique sont présentés au travers des 3 graphiques (Figure 138, Figure 139, Figure 140) suivants :

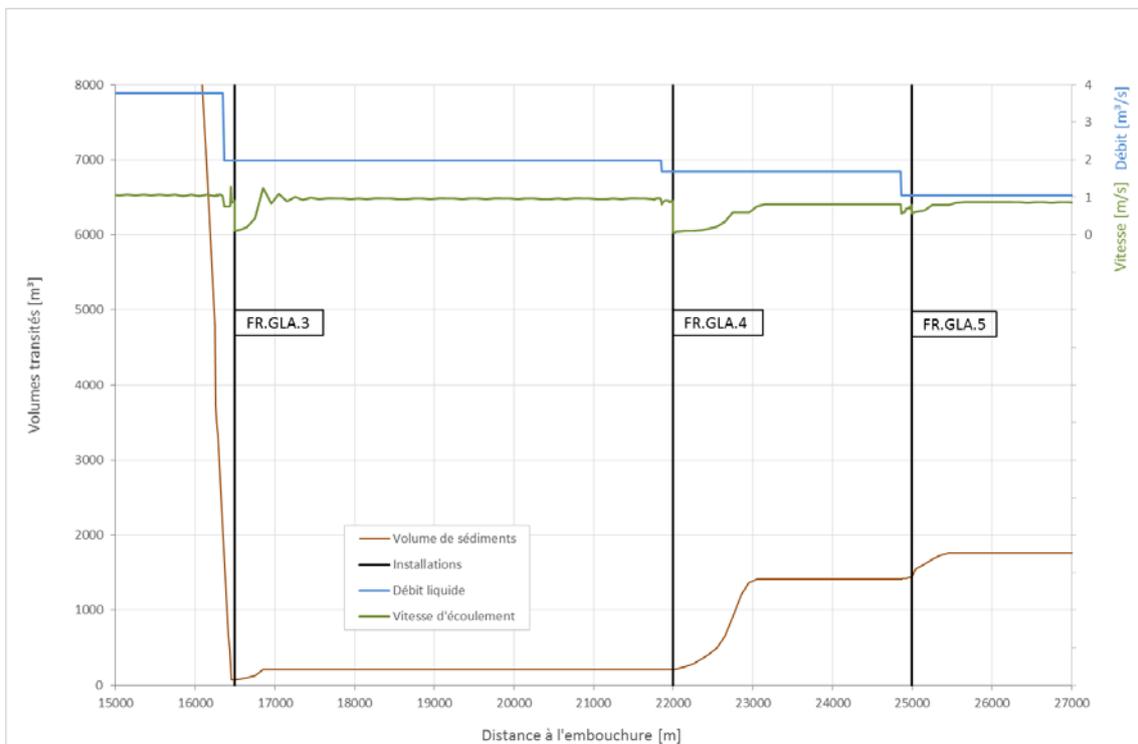


Figure 138: VAR2 : Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance (après 50 ans de charriage)

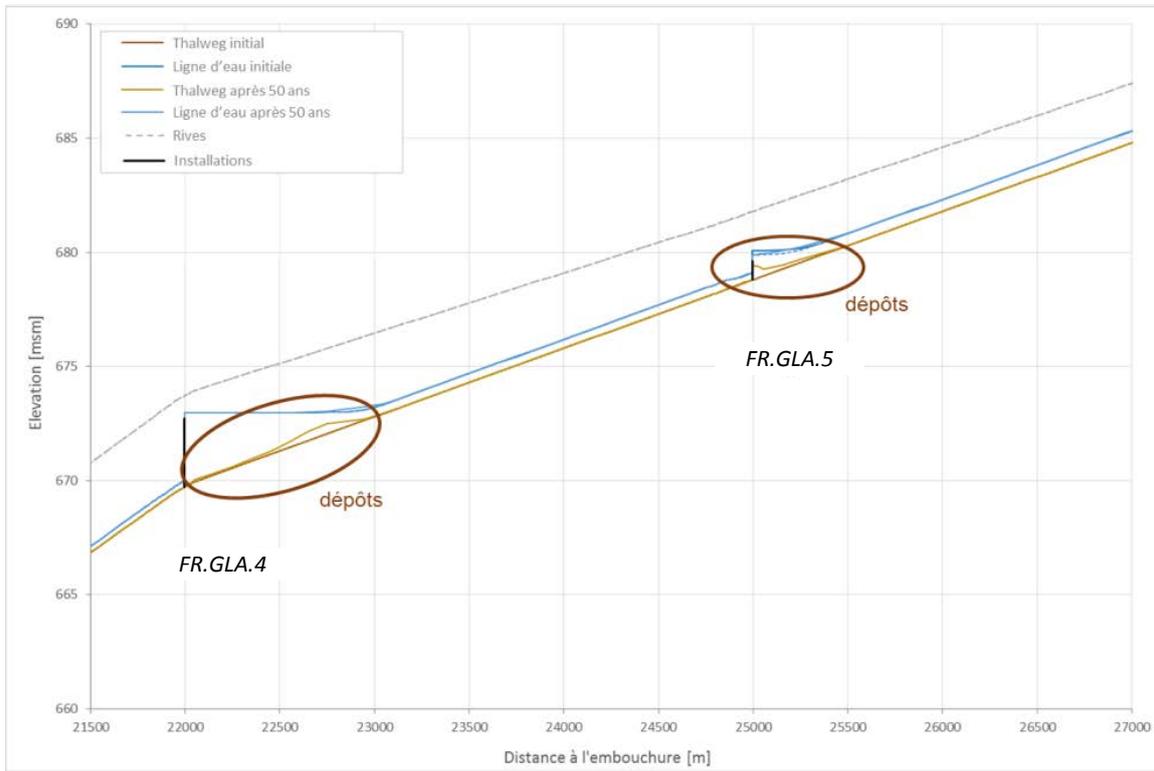


Figure 139: VAR2: Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage)

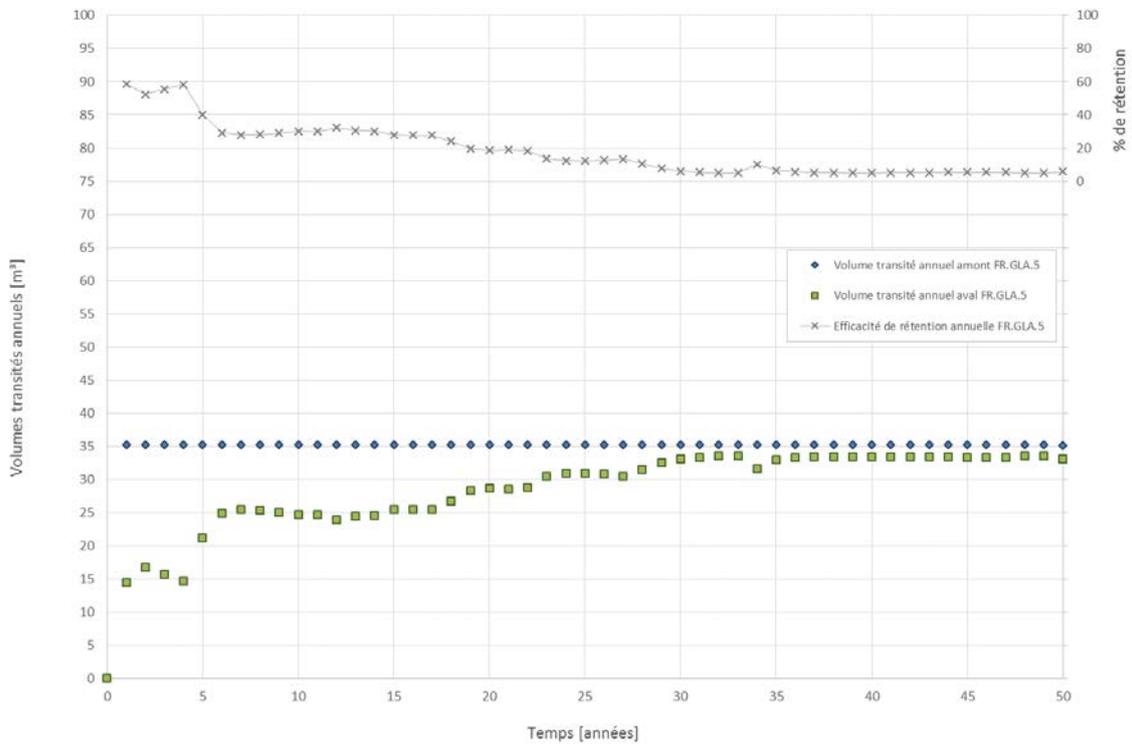


Figure 140: VAR2: Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps

Les résultats de cette variante sont assez similaires aux résultats obtenus pour la variante 0 (installation laissée en l'état) :

- L'ouvrage laisse transiter une quantité importante de sédiments
- Les dépôts se situent directement en amont de l'ouvrage 5 ainsi que en amont de l'ouvrage 4

La différence majeure entre les deux variantes est que l'équilibre morphologique est quasiment atteint au bout de 5 ans.

#### c) Conclusion

Cette variante permet de laisser transiter la majorité des sédiments provenant de l'amont au bout de 5 années de charriage. Etant donné que la prise d'eau prélève actuellement plus d'eau que ce qui est réellement utilisé (d'après communication téléphonique avec l'exploitant et une visite sur place), un compromis pourrait être imaginé pour améliorer le transit du charriage tout en gardant une prise d'eau fonctionnelle via quelques légers aménagements.

Enfin, cette variante réduit légèrement la hauteur de l'obstacle, ce qui rend l'adaptation de l'ouvrage en vue de rétablir la migration piscicole moins importante.

Le coût de cette variante est grossièrement estimé à : **5 000 CHF**

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans l'[Annexe 4](#).

### 11.8.1.5 VAR 3 : Mise en place d'une vanne gonflable

#### a) Description de la variante

Cette variante consiste à installer une vanne gonflable sur le seuil existant. Le fonctionnement en temps normal est le suivant :

- La vanne est gonflée lors des petits débits ce qui permet une alimentation suffisante de la prise d'eau
- La vanne est abaissée en cas de crue, ce qui permet aux matériaux provenant de l'amont de transiter à travers l'ouvrage.

Une esquisse de la variante est présentée sur la Figure 141 ci-dessous :

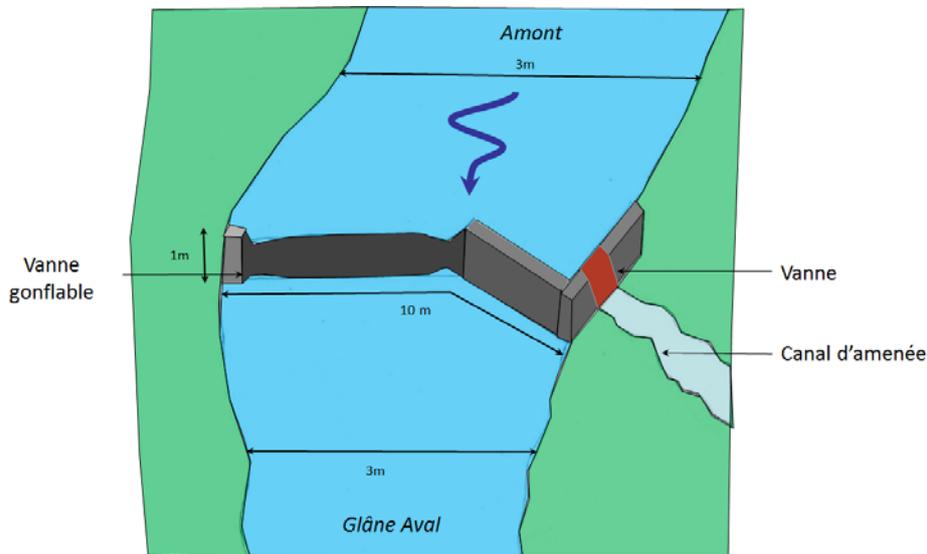


Figure 141: Esquisse de la variante 3 (FR.GLA.5)

b) Résultats de la modélisation

Etant donné le mode de fonctionnement de la vanne (vanne dégonflée en cas de crue), les résultats sont les mêmes que ceux de la variante 1 (suppression de l'ouvrage).

c) Conclusion

Cette solution présente un compromis entre l'amélioration du régime de charriage et la conservation de la prise d'eau actuelle. Le principal inconvénient de cette variante, par rapport aux autres variantes étudiées, est le coût de la mise en place d'une telle vanne.

Le coût de cette variante est grossièrement estimé à : **80 000 CHF**.

Cette estimation tient compte de l'adaptation du seuil et de la mise en place de la vanne.

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans l'Annexe 4.

### 11.8.1.6 Synthèse des variantes

La solution la plus appropriée est la variante 2 qui consiste à réaliser une encoche dans l'ouvrage existant. Son coût faible et la rapide atteinte de l'équilibre morphologique la distingue clairement des autres mesures. Des mesures complémentaires devront être réalisées (altimétriques et/ou débimétriques) pour s'assurer de la compatibilité de la mesure avec le maintien de la prise d'eau actuelle.

## 11.8.2 Moulin Waeber (FR.GLA.4) sur la Glâne

### 11.8.2.1 Remarques préliminaires

Comme pour GLA.5, la nécessité de modifier GLA.4 ne se présente que si un régime de charriage est rétabli en amont. Le rétablissement du régime de charriage peut passer par les mesures suivantes :

- Renaturation des tronçons en amont ;
- Adaptation de GLA.5 pour assurer le transit des matériaux.

(Dans la notation des variantes, un malus de -5 points a été appliqué pour tenir compte de ce prérequis important.)

Pour l'ensemble des calculs de variantes, nous avons supposé que la charge nécessaire était à disposition en amont de l'ouvrage. Les calculs de transport solide ont été réalisés sur 50 ans.

Les résultats sont présentés de la manière suivante :

1. Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance
2. Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage)
3. Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps

### 11.8.2.2 VAR 0 : Conservation de l'installation en l'état

#### a) Description de la variante

Cette variante consiste à laisser l'ouvrage dans son état actuel et d'attendre qu'un nouvel état d'équilibre soit atteint, sans utilisation des parties mobiles lors du charriage.

Une esquisse de la variante est présentée sur la Figure 142 ci-après :

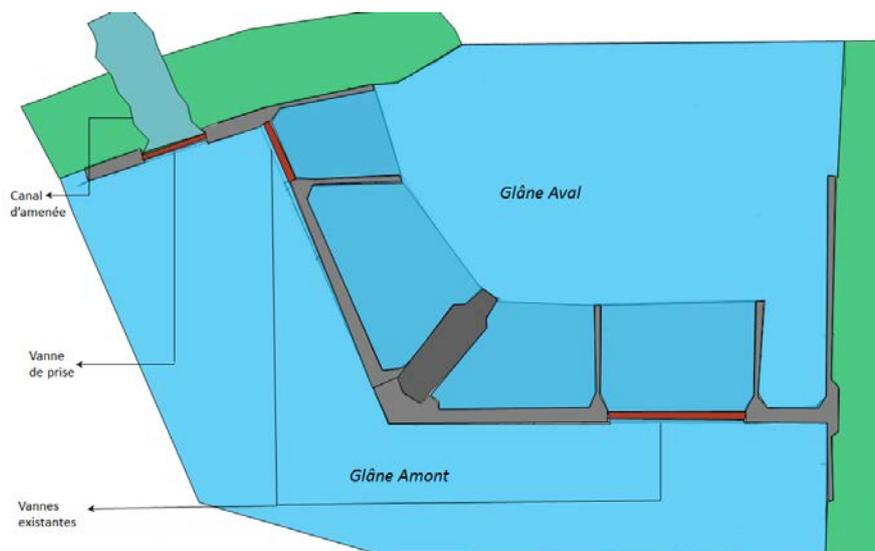


Figure 142: Esquisse de la variante 0 (FR.GLA.4)

b) Résultats de la modélisation

Les résultats de la modélisation sont présentés au travers des 3 graphiques ci-après (Figure 143, Figure 144, Figure 145).

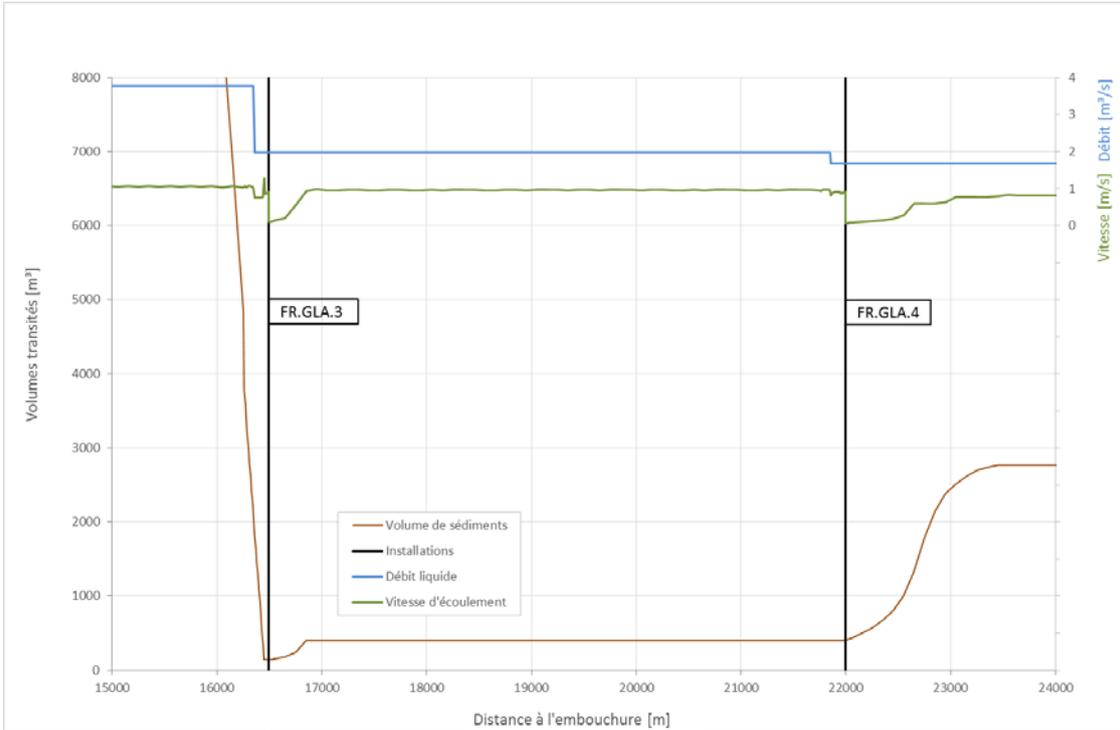


Figure 143:VAR 0 : Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance (après 50 ans de charriage)

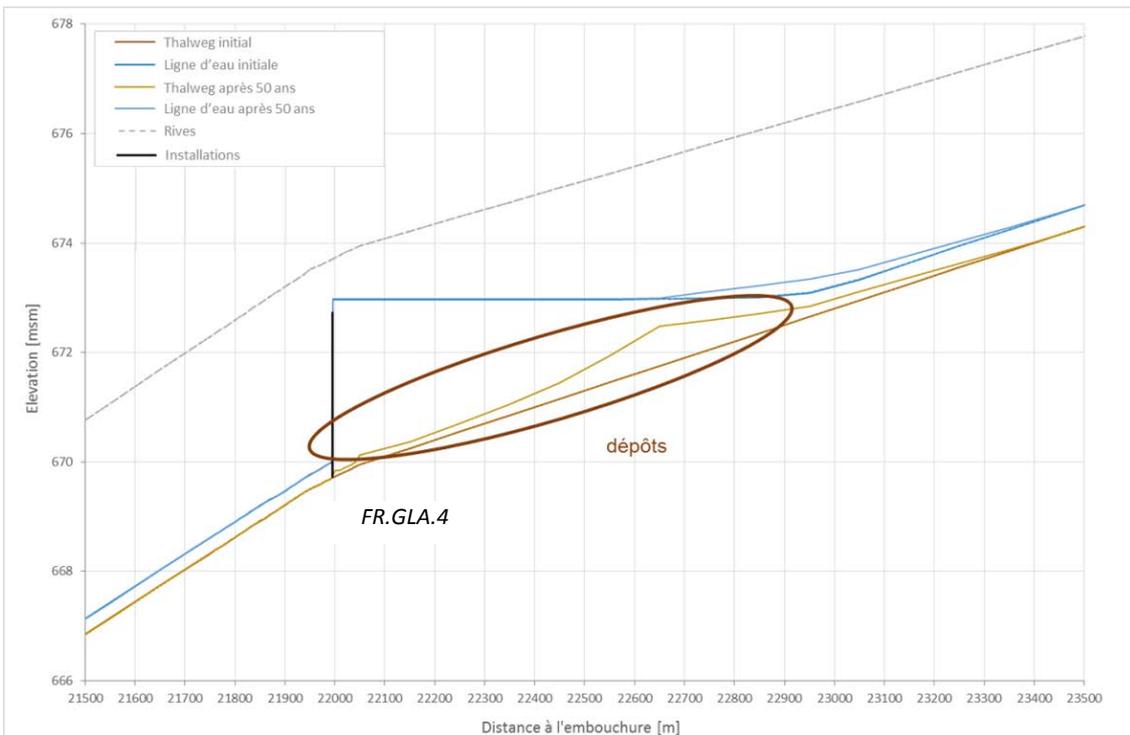


Figure 144:VAR 0 : Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage)

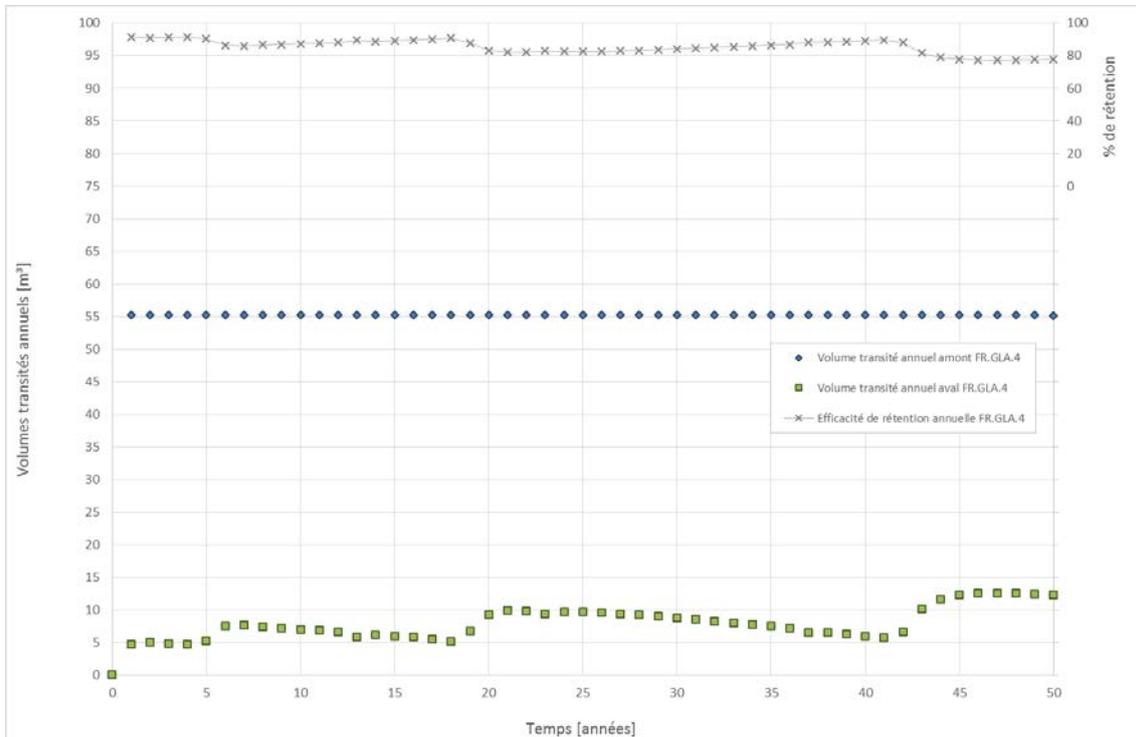


Figure 145:VAR0: Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps

Les résultats montrent que, même au bout de 50 ans, la quasi-totalité des sédiments resterait bloquée en amont de l'ouvrage.

c) Conclusion :

Cette solution ne semble pas adéquate dans le cadre du rétablissement du régime de charriage. De plus, les dépôts en amont de l'ouvrage entraînent un rehaussement de la ligne d'eau, ce qui peut augmenter le risque d'inondation. Enfin, cette variante est peu compatible en cas d'aménagement dans le cadre du rétablissement de la migration piscicole.

Le coût de cette variante est estimé à : **0 CHF**

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans [l'Annexe 4](#).

### 11.8.2.3 VAR 1 : Suppression de l'installation

a) Description de la variante

Cette variante consiste à supprimer l'installation existante, et d'adapter localement le thalweg.

*(Remarque : cette variante rend la prise d'eau actuelle inutilisable. Cet aspect a été pris en compte dans la notation finale en rajoutant un malus de 5 points.)*

L'esquisse correspondant à cette configuration est présentée sur la Figure 146 ci-dessous :

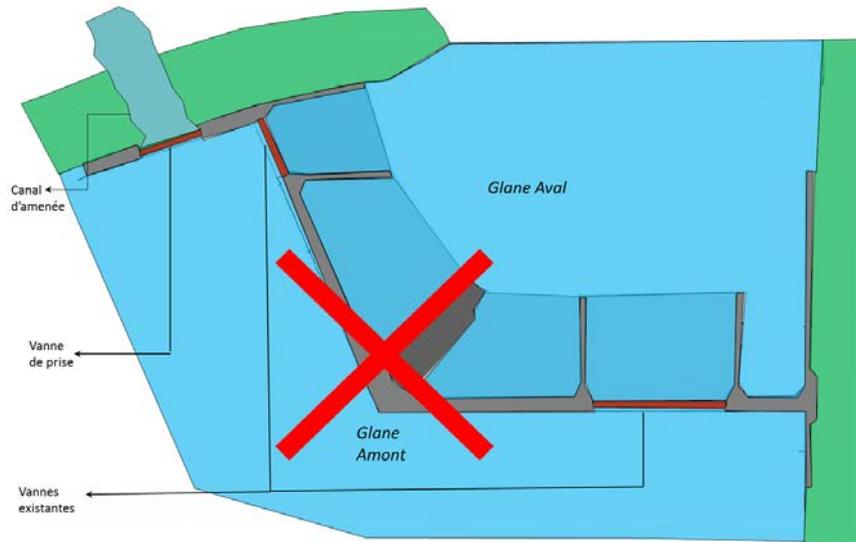


Figure 146: Esquisse de la variante 1 (FR.GLA.4)

b) Résultats de la modélisation

Les résultats de la modélisation sont présentés au travers des 3 graphiques suivants (Figure 147, Figure 148, Figure 149) :

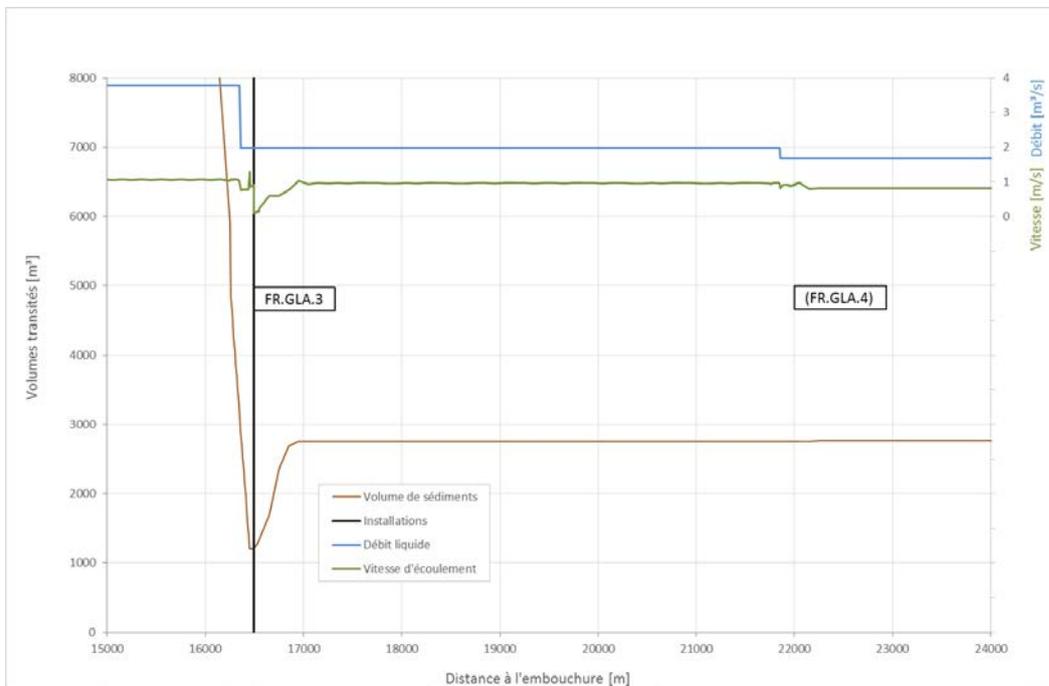


Figure 147:VAR1: Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance (après 50 ans de charriage)

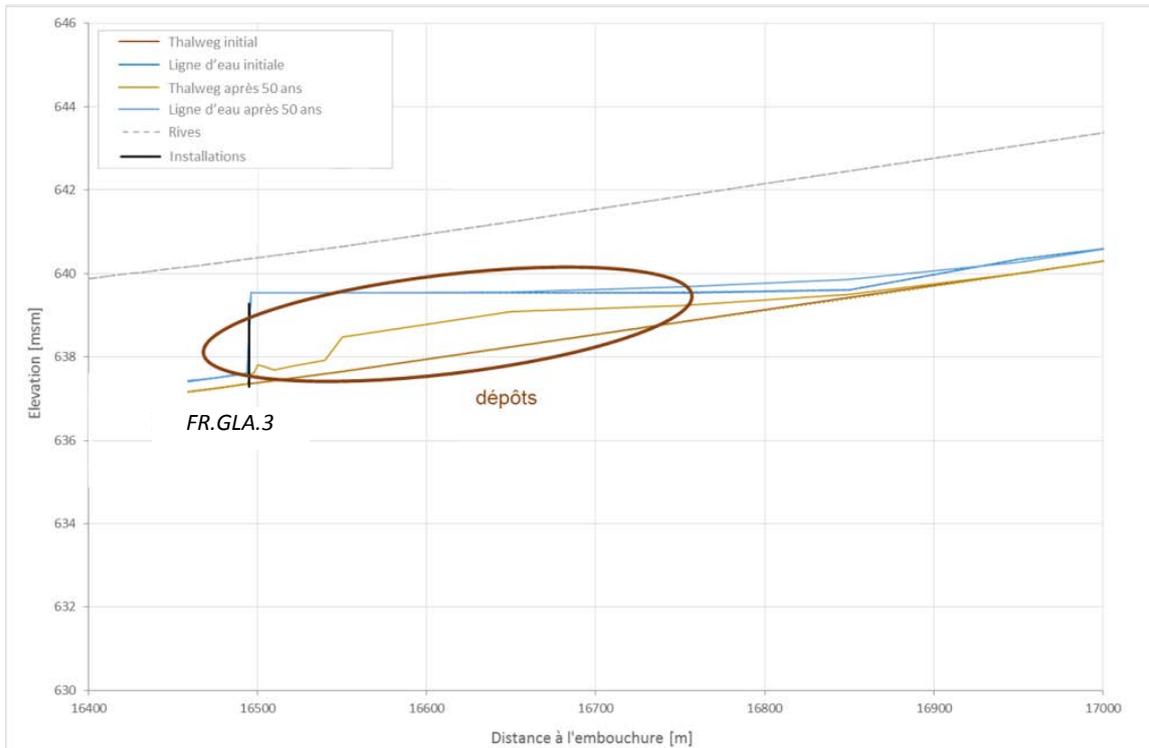


Figure 148:VAR1 : Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage)

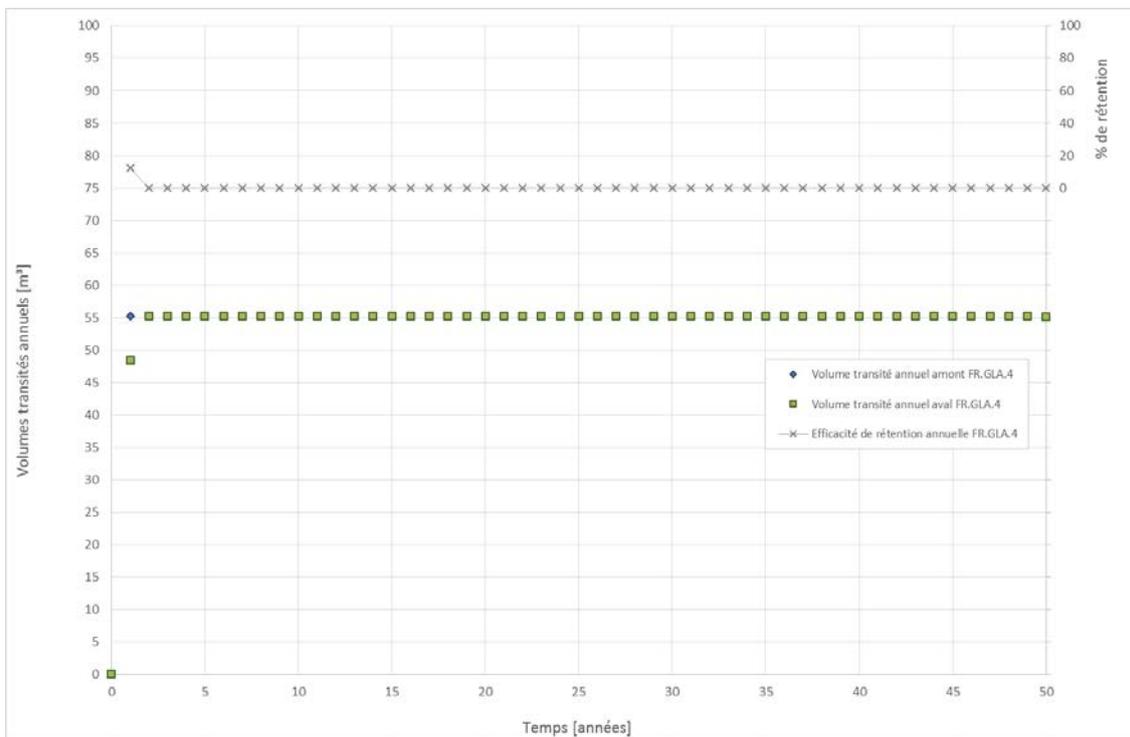


Figure 149:VAR1 : Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps

Les calculs montrent que la suppression de l'ouvrage permet à l'ensemble des sédiments provenant de l'amont de transiter vers l'aval. Ceux-ci se déposeront alors en amont de l'ouvrage 3 situé en aval.

#### c) Conclusion

Cette variante est optimale pour le rétablissement du régime de charriage. Elle permet également de rétablir la migration piscicole. Elle est cependant à considérer uniquement si l'abandon de la prise d'eau actuelle est envisageable.

Le coût de cette variante est grossièrement estimé à : **50 000 CHF**

Cette estimation tient compte uniquement du démantèlement de l'ouvrage. Le coût de la modification de la prise d'eau n'a pas été pris en compte et n'inclut pas les frais liés à la perte d'exploitation.

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans l'Annexe 4.

### 11.8.2.4 VAR 2 : Remise en état et/ou automatisation de la vanne existante

#### a) Description de la variante.

Cette variante consiste à remettre en état la vanne actuelle et/ou de l'automatiser. Le fonctionnement serait le suivant :

- Fermeture de la vanne en temps normal (pour les petits débits)
- Ouverture de la vanne en cas de crue pour permettre aux sédiments de transiter.

(Remarque : la vanne de la prise d'eau devra également être fermée en cas de crue pour limiter la prise de débit et assurer le transit des sédiments vers l'aval.)

Une esquisse de la variante est présentée sur la Figure 150 ci-dessous :

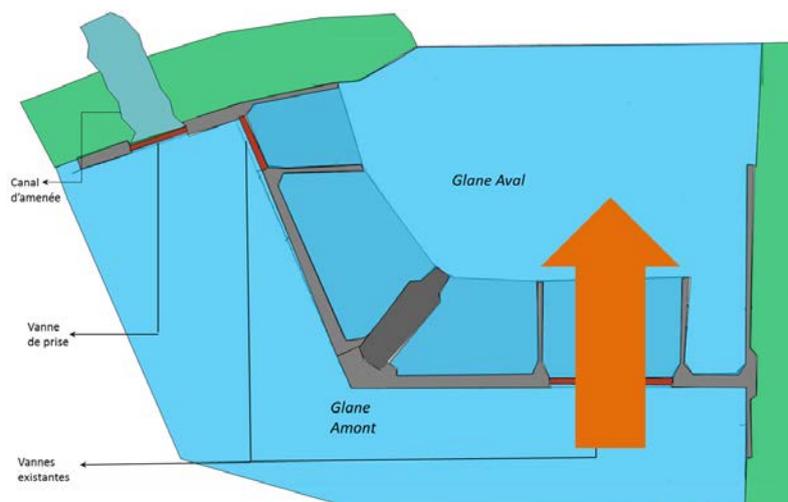


Figure 150: Esquisse de la variante 2 (FR.GLA.4)

#### b) Résultats de la modélisation

Les résultats de la modélisation sont présentés au travers des 3 graphiques (Figures 122,123 et 124) ci-dessous :

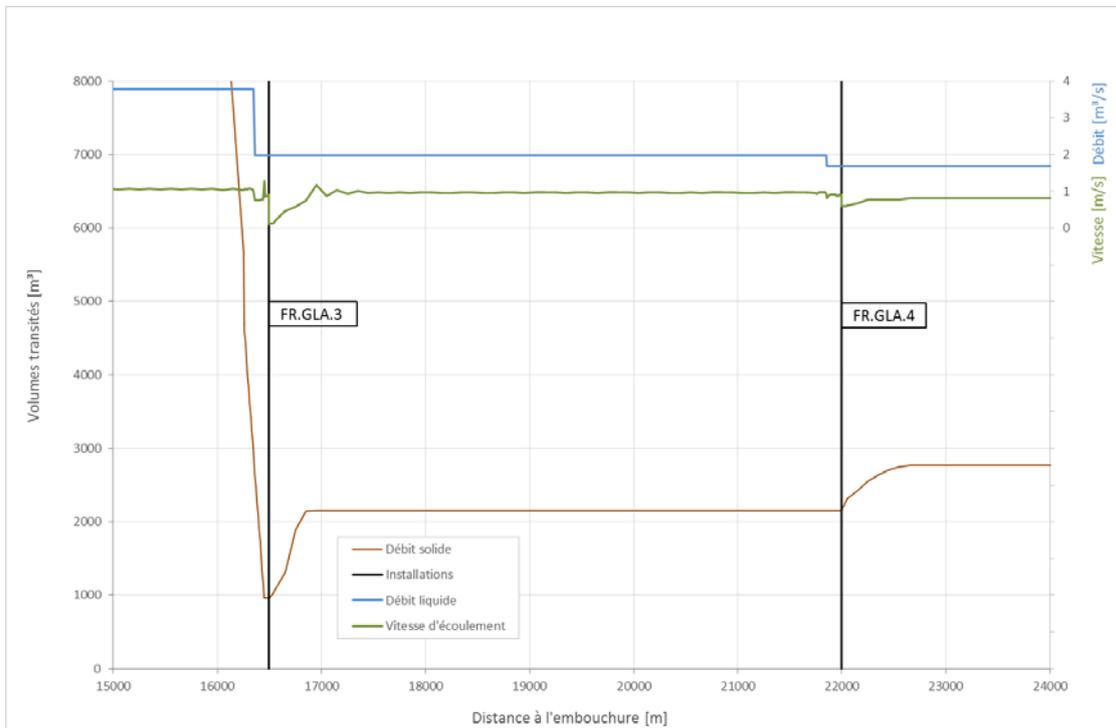


Figure 151:VAR2: Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance (après 50 ans de charriage)

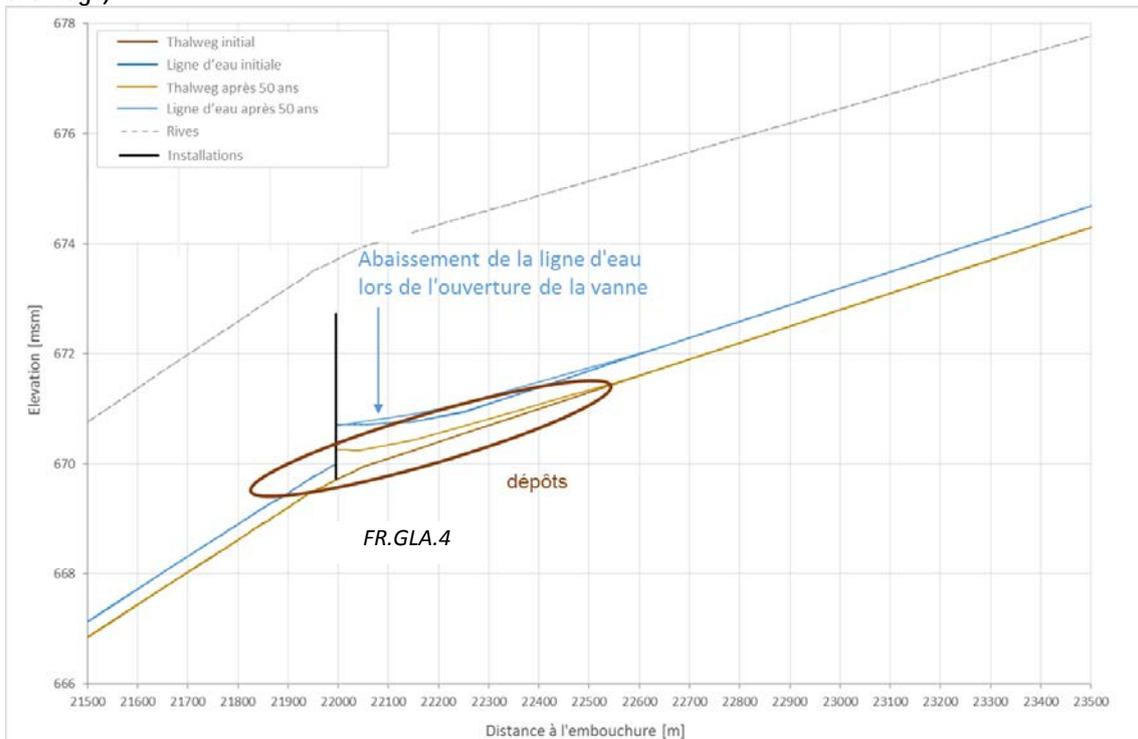


Figure 152:VAR2: Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage)

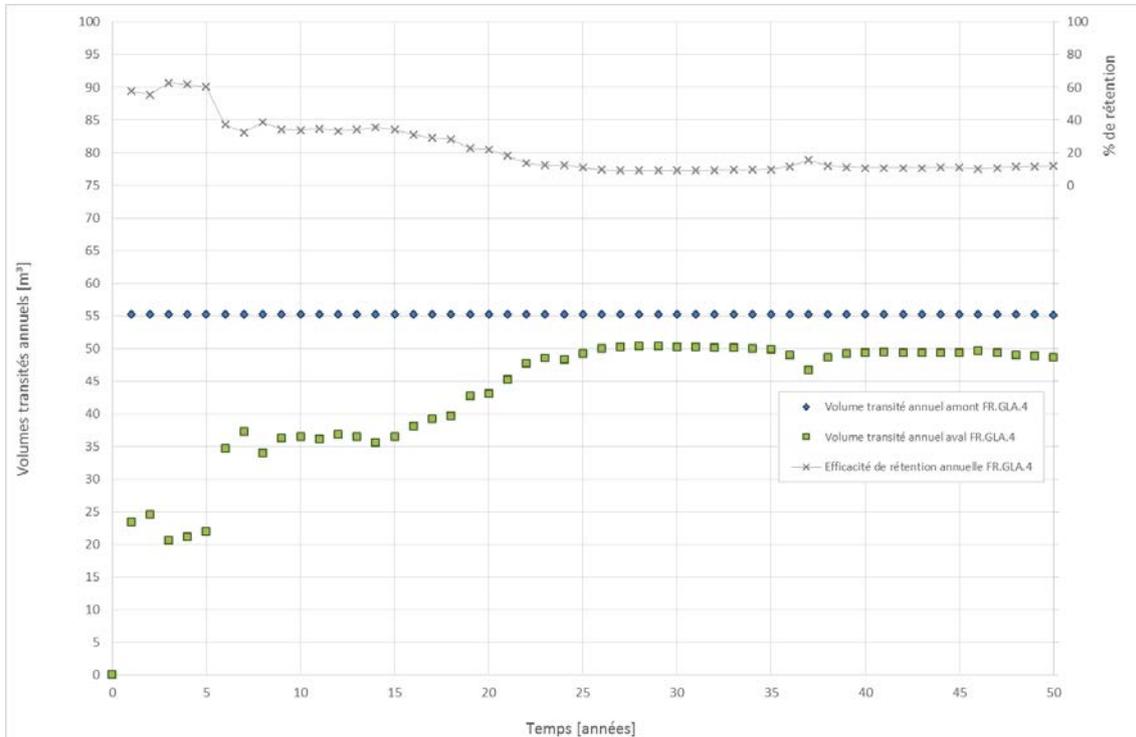


Figure 153:VAR2 : Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps

Les résultats montrent que l'utilisation de la vanne lors des crues permettra de faire transiter une partie importante des sédiments vers l'aval. Les premières années, l'influence de la vanne est limitée, en effet, environ 60% des sédiments sont encore stockés en amont. En revanche, après environ 5 années, le pourcentage de rétention des sédiments passe en-dessous de 40% et atteint seulement 20% après 25 ans.

### c) Conclusion

Cette variante offre à priori un bon compromis entre le maintien de la prise d'eau actuelle et l'amélioration du régime de charriage.

Le coût de cette variante est grossièrement estimé à : **130 000 CHF**

Cette estimation tient compte du remplacement de la vanne existante et de l'automatisation de celle-ci. Le prix peut probablement être revu à la baisse si la vanne existante est en bon état.

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans l'Annexe 4.

### 11.8.2.5 Synthèse des variantes

La remise en état et/ou l'automatisation de la vanne actuelle permettrait d'obtenir un compromis entre l'utilisation de la prise d'eau actuelle et l'amélioration du régime de charriage. L'estimation du prix de l'automatisation de la vanne a été faite grossièrement, l'estimation devra être confirmée dans les étapes ultérieures.



Il est à noter que, si l'exploitant ne souhaite pas le maintien de la prise d'eau dans le futur, la suppression de l'ouvrage semble alors être la meilleure solution.

### 11.8.3 Moulin de Chavannes-sous-Orsonnens

#### 11.8.3.1 Remarques préliminaires

De même que pour les ouvrages 4 et 5 situés en amont de la Glâne, l'adaptation de l'installation n'est nécessaire que si le régime de charriage est rétabli en amont. Le rétablissement du régime de charriage en amont de l'ouvrage 3 peut être fait suivant la réalisation des mesures suivantes :

Option 1 :

- Renaturation dans le secteur 5

Option 2 :

- Renaturation dans le secteur 4
- Aménagement de FR.GLA.4 pour rétablir le transit vers l'aval
- Renaturation éventuelle dans le secteur 5 pour augmenter la quantité de charriage mobilisée.

Option 3 :

- Renaturation dans les secteurs 1, 2, ou 3
- Aménagement des ouvrages 3 et 4 pour rétablir le transit
- Renaturation éventuelle dans le secteur 4 et/ou 5 pour augmenter la quantité de charriage mobilisée.

Nous faisons remarquer que le régime de charriage est atteint uniquement sur 500 mètres en aval de l'ouvrage. Cependant, si l'ensemble des mesures proposées à l'amont est réalisé, le transit des sédiments devra être rétabli afin de ne pas augmenter le risque d'inondation.

#### 11.8.3.2 VAR 0 : Conservation de l'installation en l'état

##### a) Description de la variante

Cette variante consiste à laisser l'ouvrage dans son état actuel et d'attendre qu'un nouvel état d'équilibre soit atteint.

Une esquisse de la variante est présentée sur la Figure 154 ci-dessous :

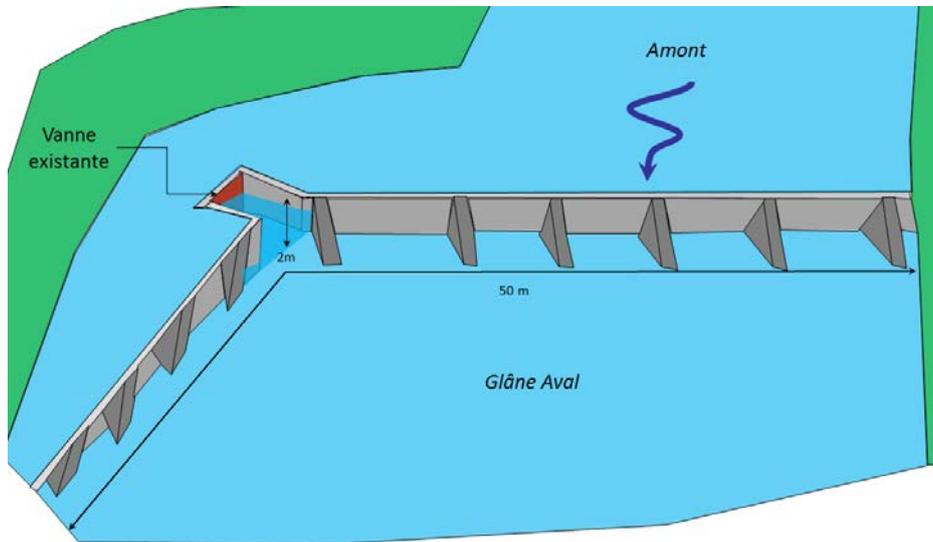


Figure 154: Esquisse de la variante 0 (FR.GLA.3)

b) Résultats de la modélisation

Les résultats de la modélisation sont présentés au travers des 3 graphiques suivants (Figure 155, Figure 156, Figure 157) :

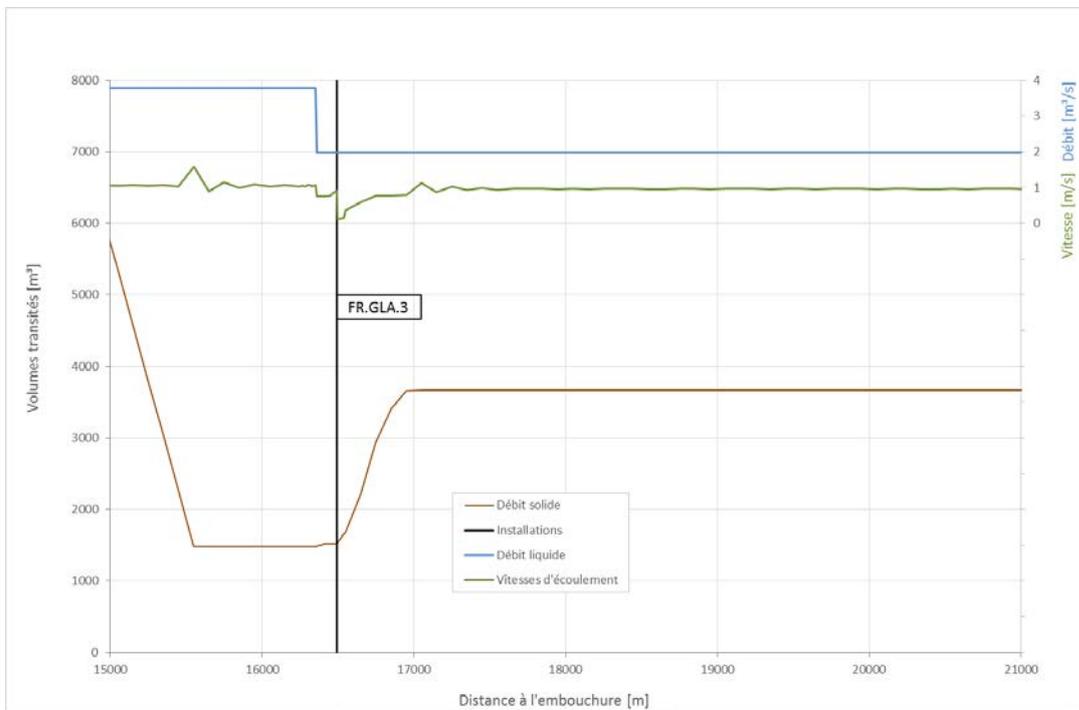


Figure 155: VAR0 : Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance (après 50 ans de charriage)

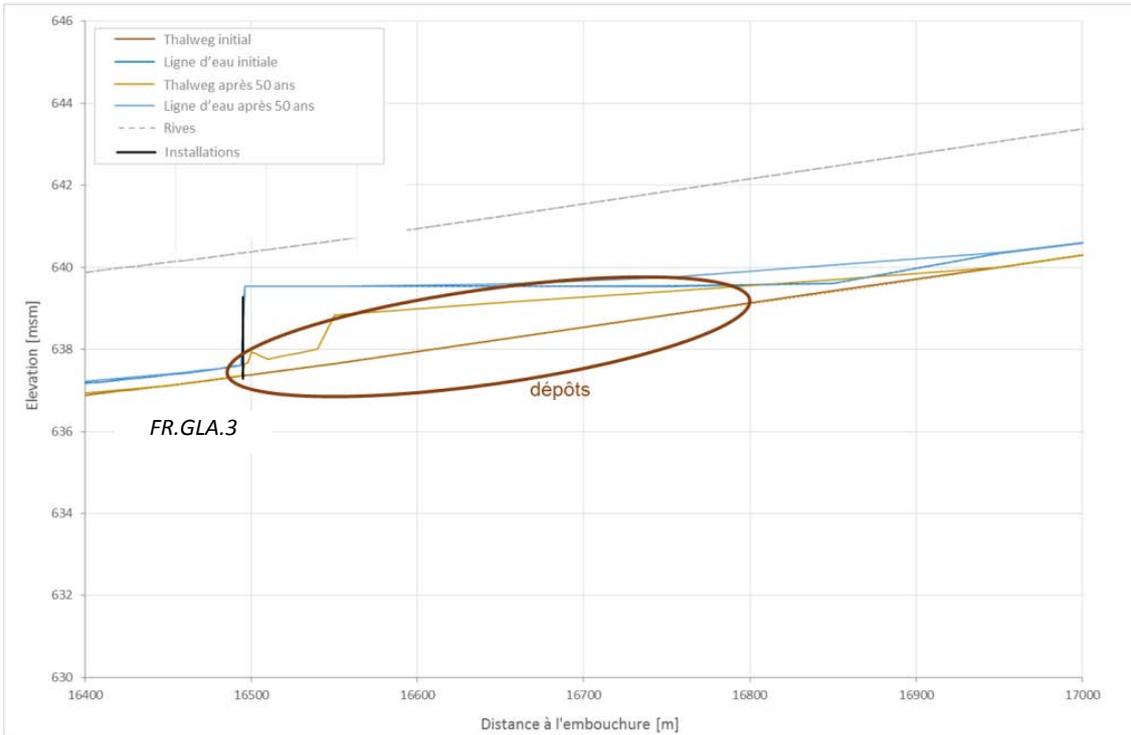


Figure 156:VAR0: Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage).

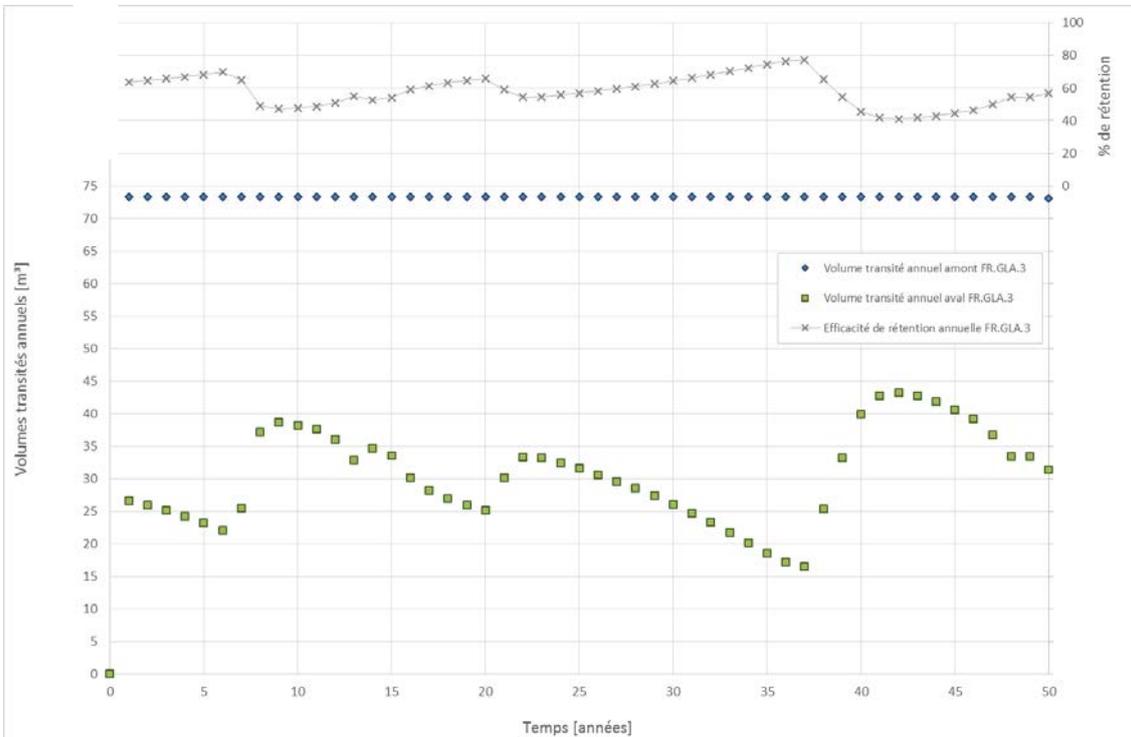


Figure 157:VAR0: Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps.

Les calculs montrent que dans la situation actuelle, l'ouvrage laisserait passer, en moyenne, 60% des sédiments provenant de l'amont.

Lors de visite sur site ce comportement n'a pas pu être vérifié, faute de charriage sur la Glâne sur l'ensemble du tronçon amont. Ce comportement pourrait être vérifié grâce à des calculs numériques plus poussés, qui tiendrait compte notamment de l'élargissement important de section en amont et en aval de l'ouvrage ainsi que de sa position en deux dimensions (partie frontale et latérale de l'ouvrage).

c) Conclusion

Si le comportement mis en avant lors des modélisations s'avère être exact, l'ouvrage pourrait être laissé en l'état.

Remarque : si les mesures pour rétablir le charriage en amont de l'ouvrage 3 sont réalisées, une période d'observation pourra être mis en place afin de confirmer ou d'infirmer le comportement.

Si le comportement n'est pas vérifié, des actions devront être entreprises afin de réduire le risque d'inondation que pourrait entraîner le dépôt de sédiments en amont de l'ouvrage.

Le coût de cette variante est estimé à : **0 CHF**

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans [l'Annexe 4](#).

### 11.8.3.3 VAR 1 : Démantèlement de l'ouvrage

a) Description de la variante

Cette variante consiste à réaliser une encoche significative dans le barrage afin de laisser transiter le charriage provenant de l'amont.

Une esquisse de la variante est présentée sur la Figure 158 ci-après :

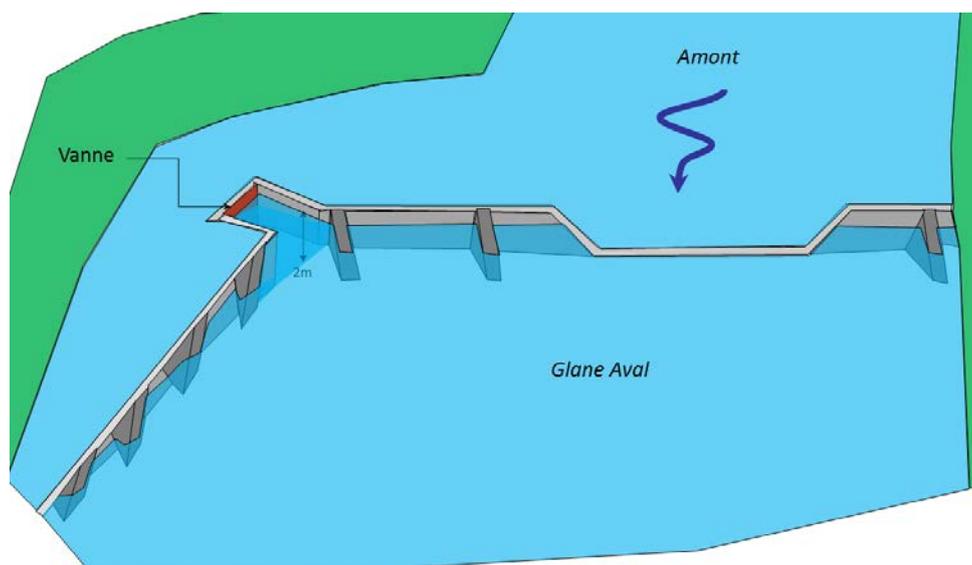


Figure 158: Esquisse de la variante 1 (FR.GLA.3)

b) Résultat de la modélisation

Les résultats de la modélisation sont présentés au travers des 3 graphiques suivants (Figure 159, Figure 160, Figure 161) :

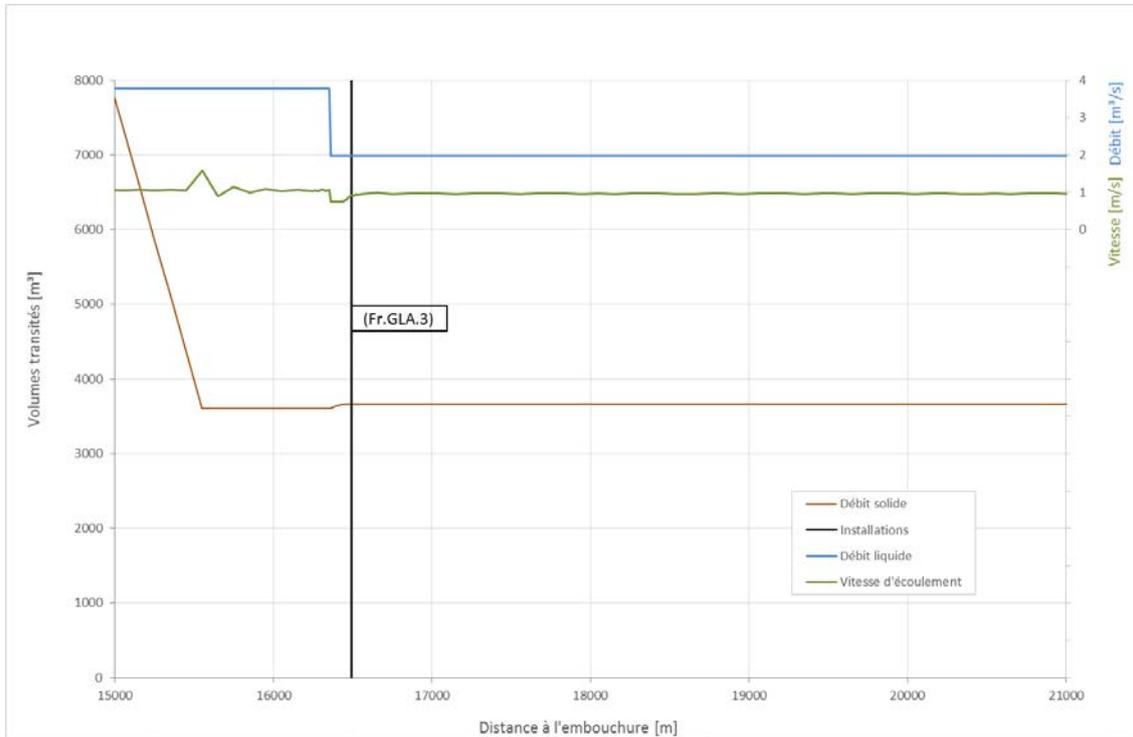


Figure 159:VAR1 Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance (après 50 ans de charriage).

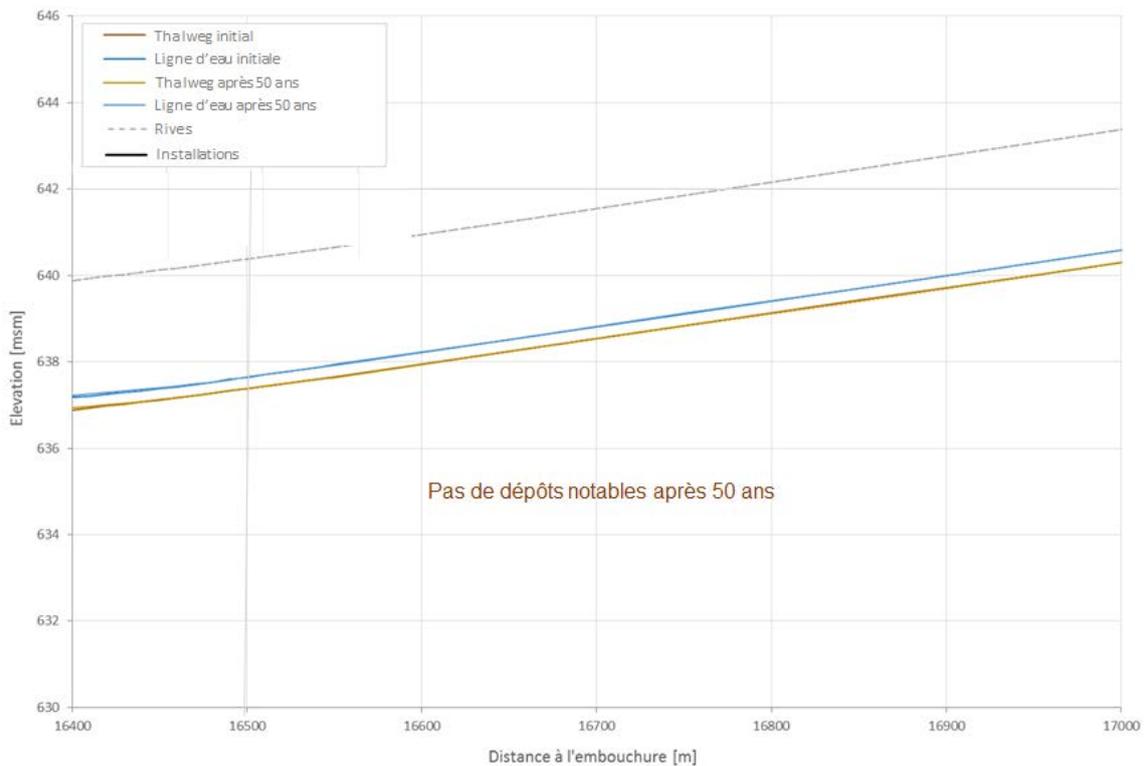


Figure 160:VAR1:Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage).

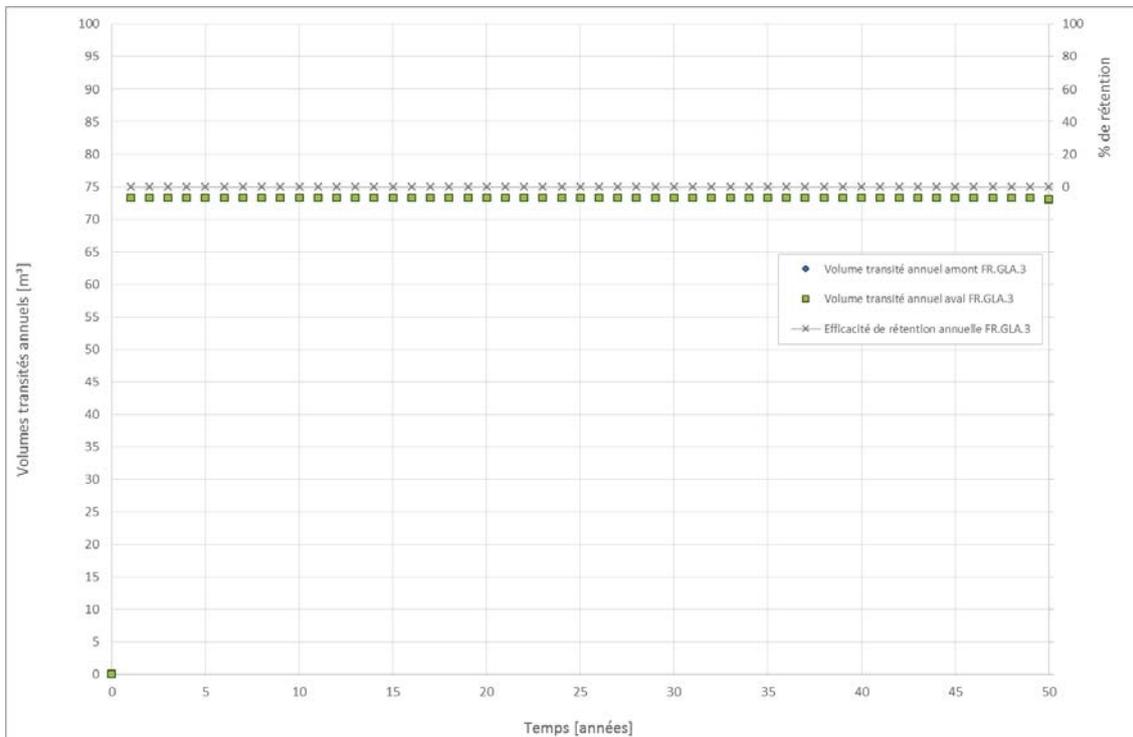


Figure 161:VAR1: Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps.

### c) Conclusion

Cette solution permet de laisser transiter quasiment la totalité des sédiments provenant de l'amont. Elle permettrait une bonne compatibilité dans le cadre du rétablissement de la migration piscicole.

Elle nécessite toutefois une modification importante de l'ouvrage et ne semble à priori pas compatible avec tout projet de réhabilitation de la prise d'eau.

Le coût de cette variante est grossièrement estimé à : **60 000 CHF**.

Cette estimation tient compte de l'aménagement de l'ouvrage et n'inclut pas les frais liés à la perte d'exploitation.

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans [l'Annexe 4](#).

### 11.8.3.4 VAR 2 : Installation d'une nouvelle partie mobile

#### a) Description de la variante

Cette variante consiste à mettre en place une vanne, sur la partie frontale du barrage, afin de laisser transiter les sédiments en cas de crue.

Une esquisse de la variante est présentée sur la Figure 162 ci-après :

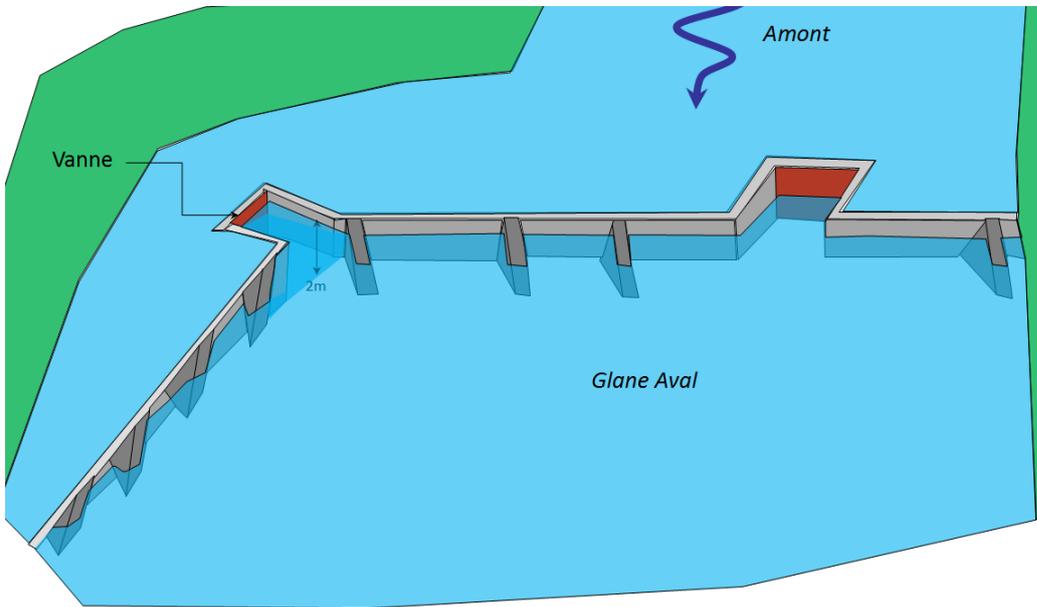


Figure 162: Esquisse de la variante 2 (FR.GLA.3)

b) Résultat de la modélisation

Les résultats de la modélisation sont présentés au travers des 3 graphiques suivants (Figure 163, Figure 164, Figure 165) :

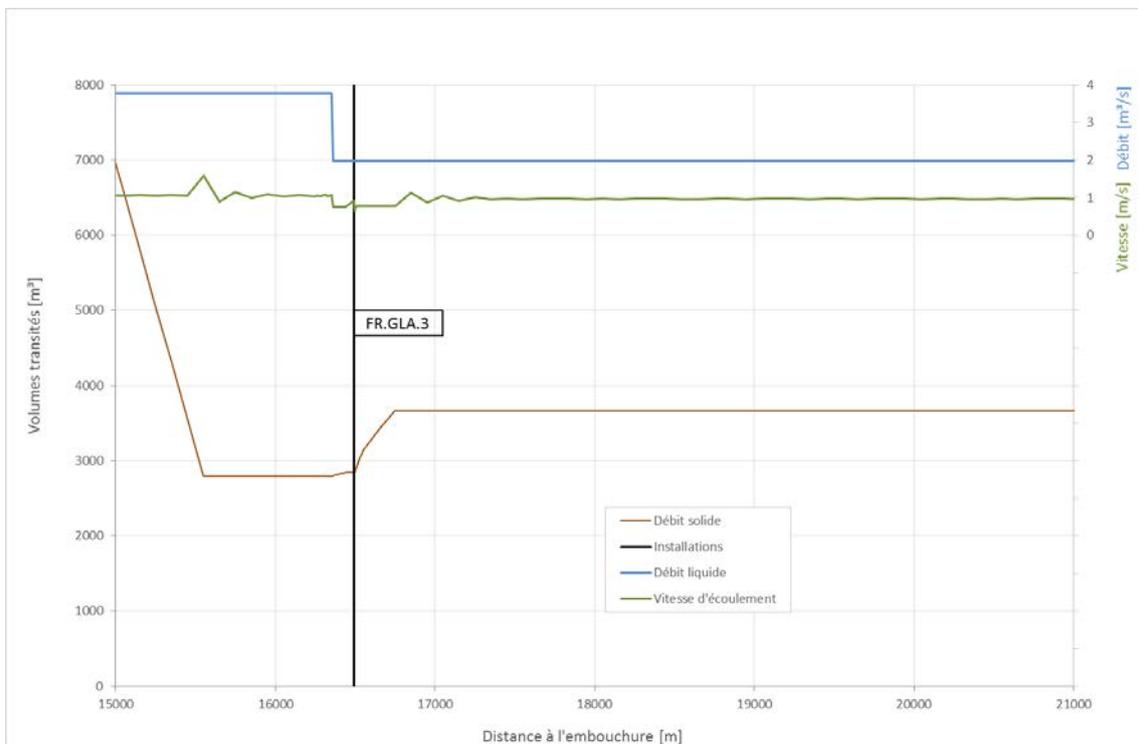


Figure 163: VAR2: Evolution du volume de sédiments cumulés en fonction de la distance (après 50 ans de charriage)

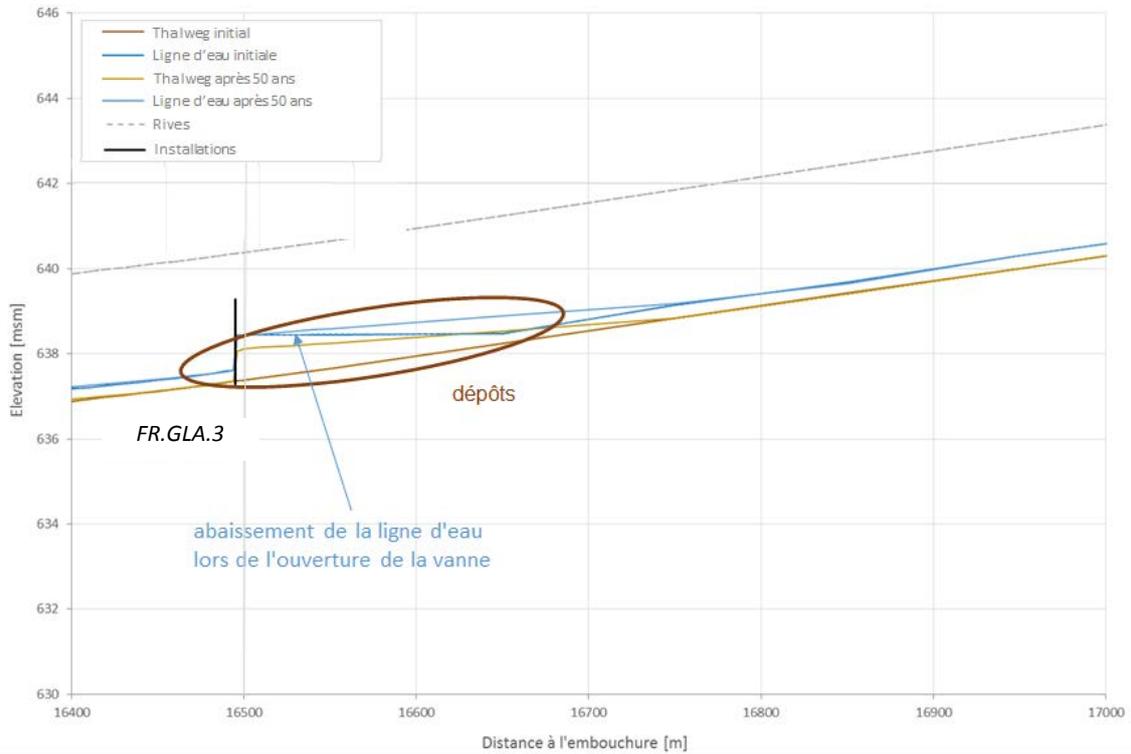


Figure 164 : VAR2 : Comparaison du profil en long initial et final (après 50 ans de charriage)

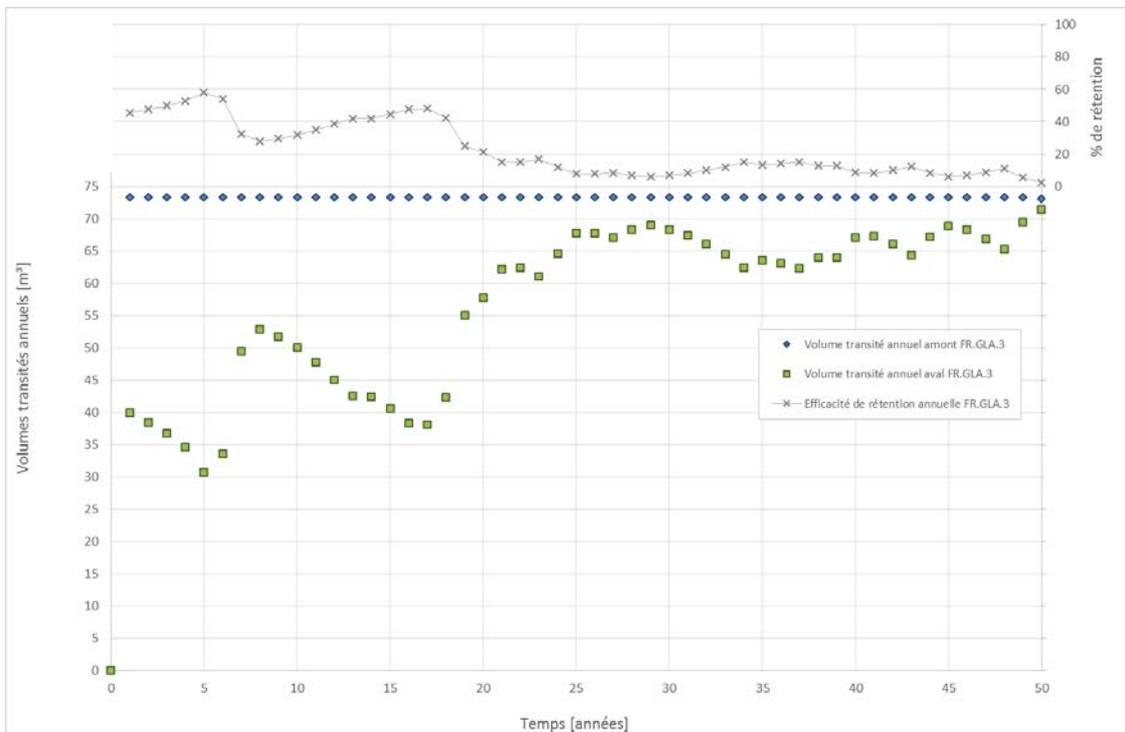


Figure 165:VAR2: Efficacité de rétention de l'installation en fonction du temps

L'ouverture de la vanne lors de débits importants (HQ1 ou supérieur) permet de diriger l'écoulement au centre de l'ouvrage et d'entraîner ainsi une partie des sédiments vers l'aval. Lors

de la mise en place de la vanne, un nouvel état d'équilibre morphologique va s'installer et les 5 premières années les sédiments seront transférés vers l'aval uniquement 60%. L'efficacité de transit s'améliorera ensuite jusqu'à atteindre un taux de transfert des matériaux de 90% après 20 ans.

### c) Conclusion

Cette variante permet de laisser transiter une partie importante du gravier tout en gardant la fonctionnalité de l'ouvrage. L'installation étant suffisamment large, des mesures concernant la migration piscicole (type rampe ou passe à poissons) peuvent être réalisées en rive droite de l'ouvrage. Le coût de la mise en place d'une vanne régulée risque d'engendrer un surcoût par rapport à la variante 1 (suppression de l'ouvrage).

Le coût de cette variante est grossièrement estimé à : **130 000 CHF**

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans l'Annexe 4.

## 11.8.3.5 VAR 3 : Réhabilitation de la vanne existante

### a) Description de la variante

L'installation possède déjà une vanne de vidange. Celle-ci semble toutefois altérée et une remise en état de la vanne devra être envisagée.

Une esquisse de la variante est présentée sur la Figure 166 :

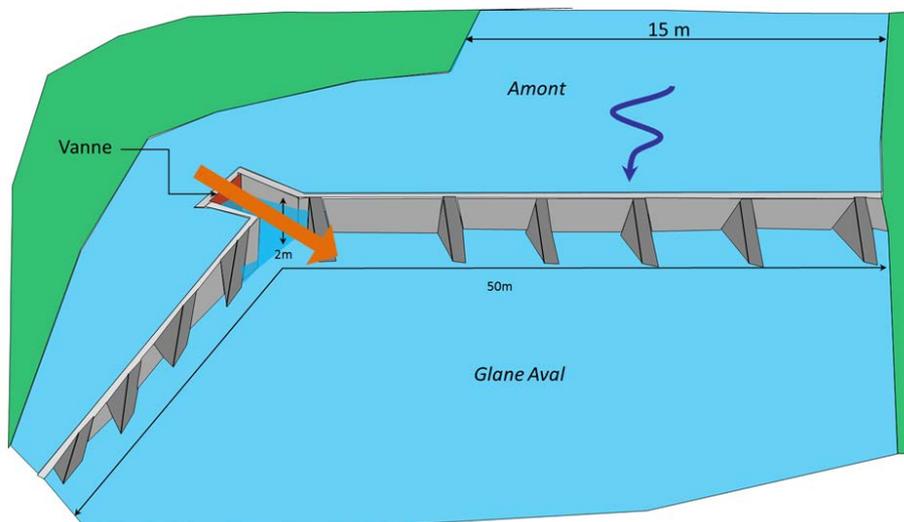


Figure 166: Esquisse de la variante 3 (FR.GLA.3)

### b) Analyse succincte du fonctionnement

Dans le cadre du rétablissement du régime de charriage, le positionnement de cette vanne ne semble pas optimal. En effet, celle-ci se situe sur le chemin secondaire de la Glâne et son efficacité sera probablement réduite par rapport à la mise en place d'une vanne frontale. On estime que le transit est amélioré d'environ 20% par rapport à la situation actuelle.

### c) Conclusion

Cette variante permet de réutiliser l'emplacement de la vanne existante. Cependant, le coût de remise en état de la vanne risque d'être important alors que son efficacité est probablement limitée (en comparaison de la mise en place d'une nouvelle vanne frontale).

Le coût de cette variante est grossièrement estimé à : **110 000 CHF**

Cette estimation tient compte du remplacement et de l'automatisation de la vanne.

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans [l'Annexe 4](#).

#### **11.8.3.6 Synthèse des variantes**

Si le comportement obtenu lors des modélisations s'avère être réel, la solution du statu-quo semble la meilleure car elle ne nécessite aucun aménagement particulier.

En revanche, si des mesures doivent être appliquées sur ce barrage, seule la variante 3 (réhabilitation de la vanne existante) nous semble d'un intérêt limité.

Le choix entre la variante 1 (suppression de l'ouvrage) et la variante 2 (création d'une vanne dans la partie frontale du barrage), dépendra surtout de la volonté de conserver cet ouvrage fonctionnel ou non.

### **11.9 Estimation du potentiel de valorisation**

Sans autres données à disposition, le potentiel de valorisation (Tableau 46) a été estimé en se basant uniquement sur l'amélioration du régime de charriage.

L'état du cours d'eau après renaturation est estimé en supposant que l'ensemble des aménagements proposés dans les étapes 10 et 12 sont appliqués, à savoir :

- Renaturation des secteurs 2 et 3 ;
- Réalisation d'une encoche dans l'ouvrage FR.GLA.5 ;
- Mise en place d'une vanne automatisée sur l'ouvrage FR.GLA.4.

La charge solide future correspond à la charge solide transitant dans l'état APRES RENATURATION (Figure 167).

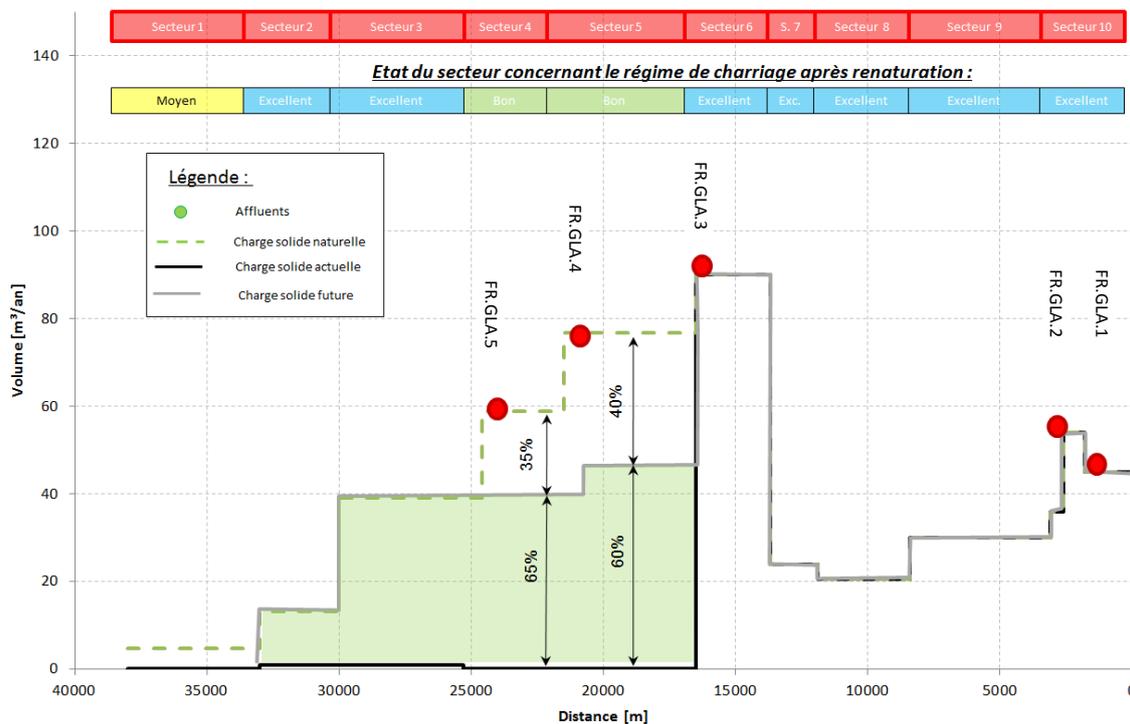


Figure 167: Charge future après renaturation

Le potentiel de valorisation (en termes de régime de charriage uniquement), pour les secteurs ayant une atteinte grave au régime de charriage, est présenté ci-dessous.

Tableau 46: Potentiel de valorisation des secteurs portant des atteintes graves au régime de charriage

Secteur	Etat actuel du tronçon	Etat futur après renaturation	Potentiel de valorisation
2	Mauvais	Excellent	4
3	Mauvais	Excellent	4
4	Mauvais	Bon	3
5	Mauvais	Bon	3

## 12. La Taverna

### 12.1 Description du bassin versant

Les principales caractéristiques de la Taverna sont les suivantes :

Le bassin versant de la Taverna (n° 20-322, selon l'Atlas hydrologique), d'une superficie de 56 km<sup>2</sup>, se situe au nord-est de Fribourg. D'une longueur approximative de 17km, la Taverna prend son origine au nord de la commune de Tafers et se jette dans la Singine à l'aval de Flamatt. Ses deux affluents majeurs sont le Lettswillbach et le Seeligrabebach. Le régime hydrologique de la Taverna est de type pluvial supérieur. La nature quaternaire domine l'ensemble du bassin versant de la Taverna.

Une installation prioritaire est à étudier (point rose sur la Figure 168). Il s'agit d'un dépotoir (FR.TAV 2) situé dans la partie supérieure du bassin versant.

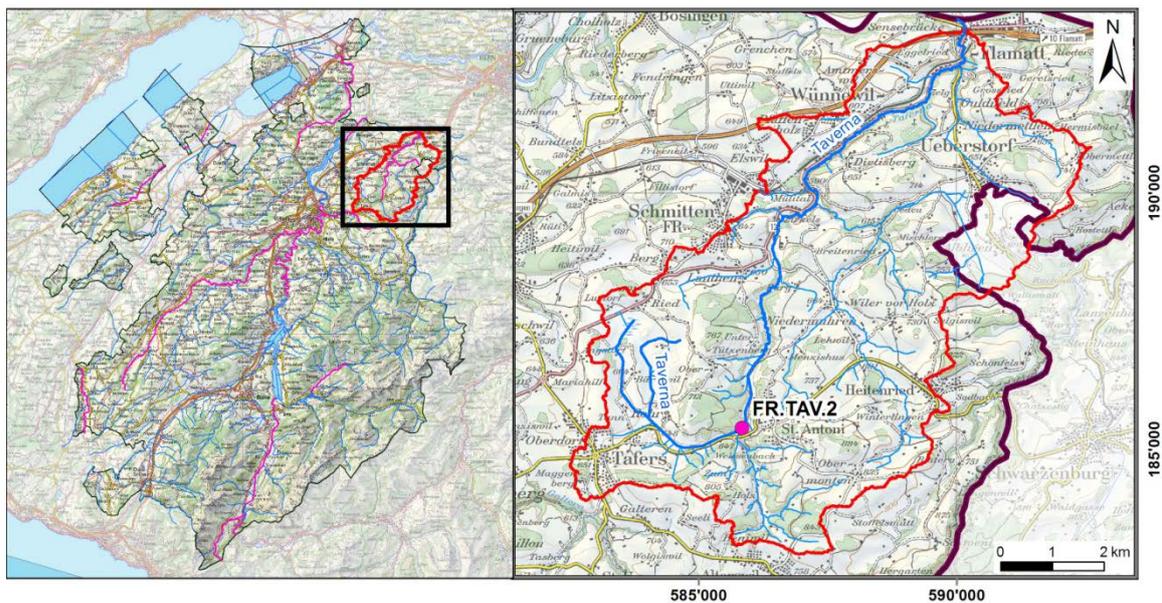


Figure 168: Vue en plan et localisation du bassin versant de la Taverna

### 12.2 Description du cours d'eau et profil en long topographique

#### 12.2.1 Découpage morphologique

Trois faciès d'écoulement généraux sont identifiés le long de la Taverna (Figure 169 et Figure 170).

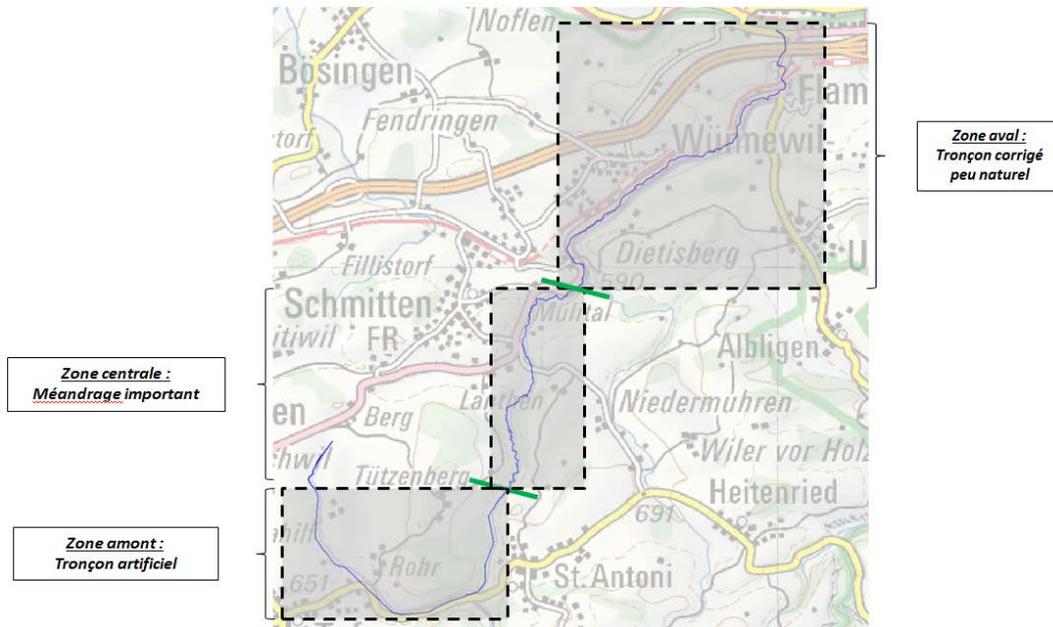


Figure 169: Découpage morphologique de la Taverna

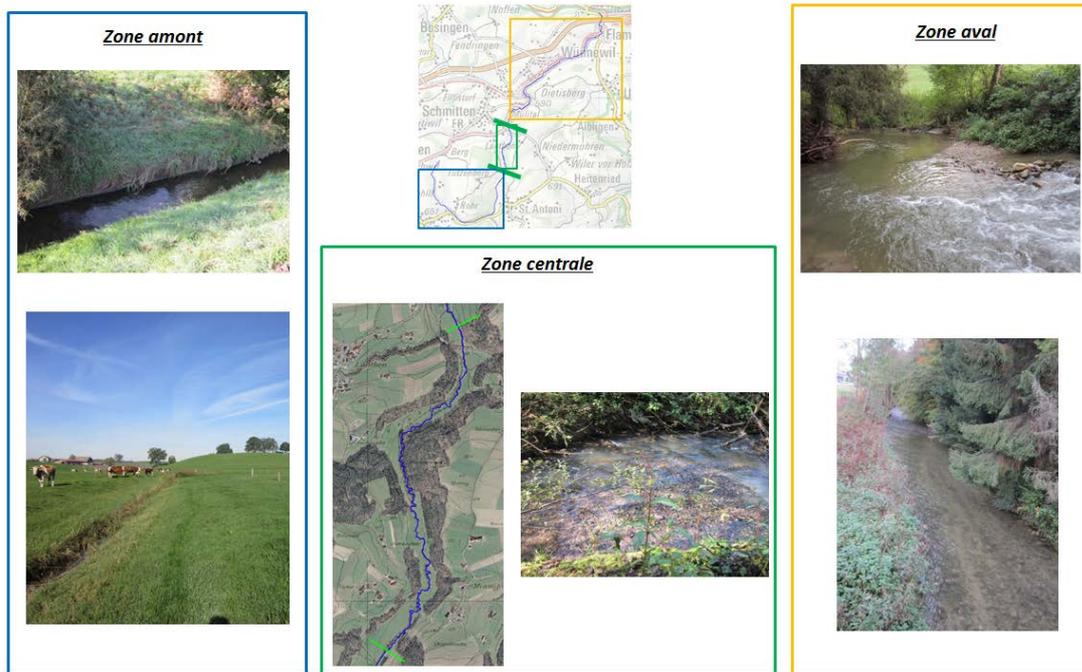


Figure 170: Illustration des faciès morphologiques principaux identifiés sur la Taverna

### 12.2.2 Découpage selon les apports hydrologiques

Un autre niveau de découpage peut être réalisé en fonction des apports hydrologiques de la Taverna (Figure 171).

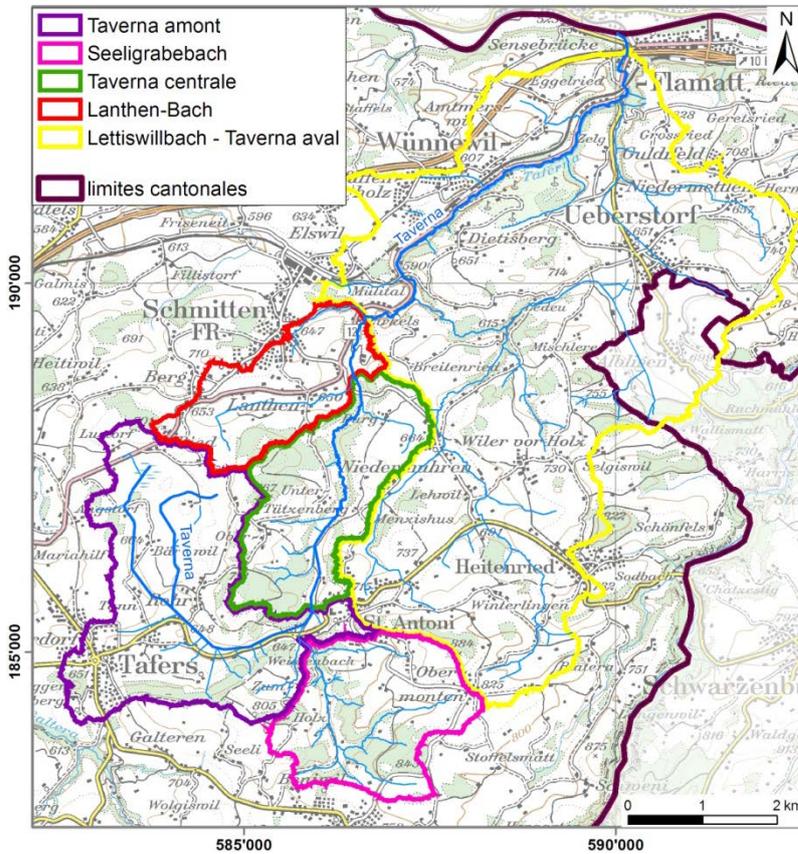


Figure 171: Sous-bassins versants de la Taverna.

### 12.2.3 Découpage en fonction des installations

Le cours de la Taverna peut également être scindé à partir de l'ouvrage identifié, altérant potentiellement le régime de charriage (Figure 168).

### 12.2.4 Découpage en fonction de la pente

Un dernier niveau de découpage est finalement proposé en fonction des variations de pente significatives le long du cours d'eau (Figure 172).

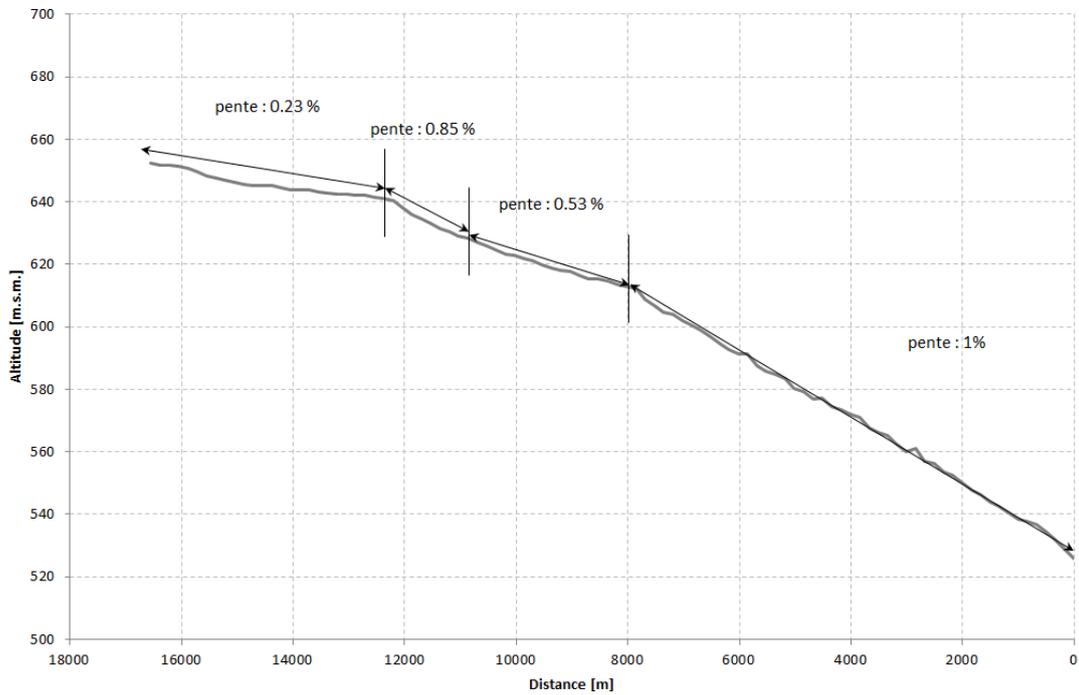


Figure 172: Variations de pente le long de la Taverna

### 12.2.5 Découpage final proposé pour l'étude du charriage de la Taverna

En superposant ces différents découpages, on identifie finalement cinq tronçons homogènes le long de la Taverna (Figure 173).

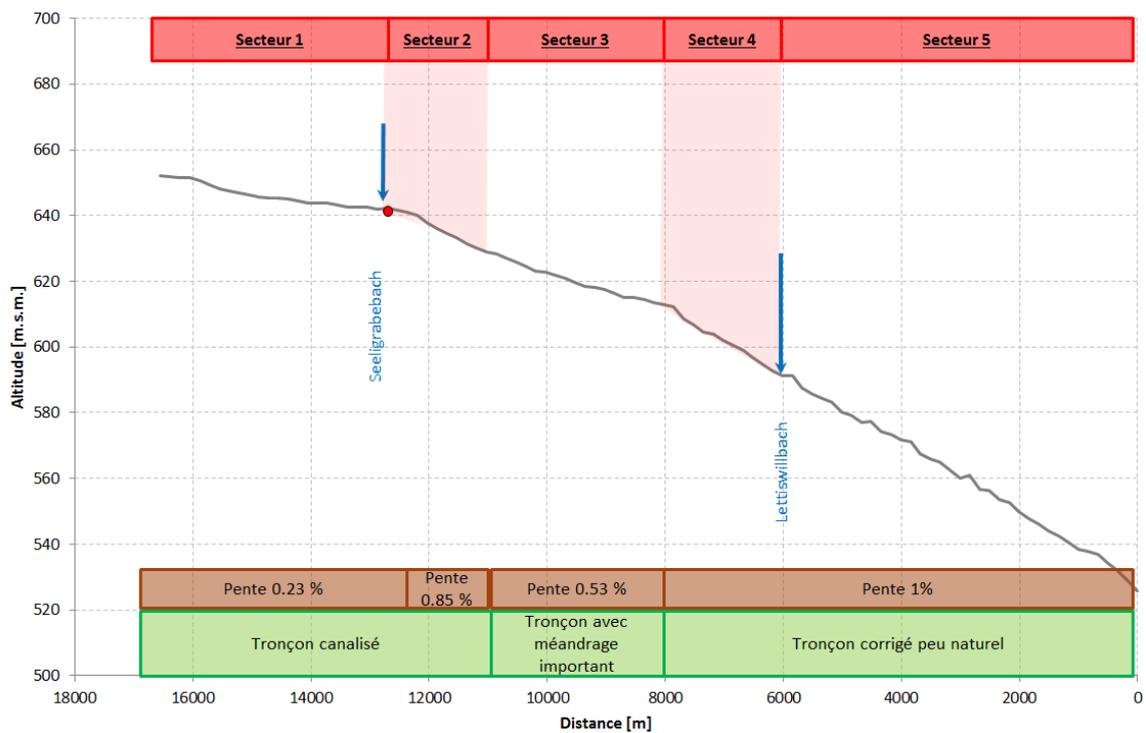


Figure 173: Profil en long topographique et découpage de la Taverna.

## 12.3 Estimation de la charge solide actuelle

### 12.3.1 Calcul de la capacité minimale et maximale

Les capacités de charriage minimale et maximale théoriques sont représentées sur la Figure 174. Les détails du calcul sont présentés en annexe. La courbe des débits classés a été déterminée en utilisant la méthode détaillée dans la Praxishilfe, Hunziker et Lehmann (2013), par ajustement de la courbe grâce aux paramètres estimés dans l'Atlas hydrologique de la Suisse. La courbe granulométrique utilisée est présentée dans l'Annexe 3.2.

La capacité théorique de la Taverna en amont est limitée par la pente très faible du thalweg sur ce secteur. La capacité augmente au fur et à mesure des secteurs, suivant l'augmentation des débits injectés par les affluents.

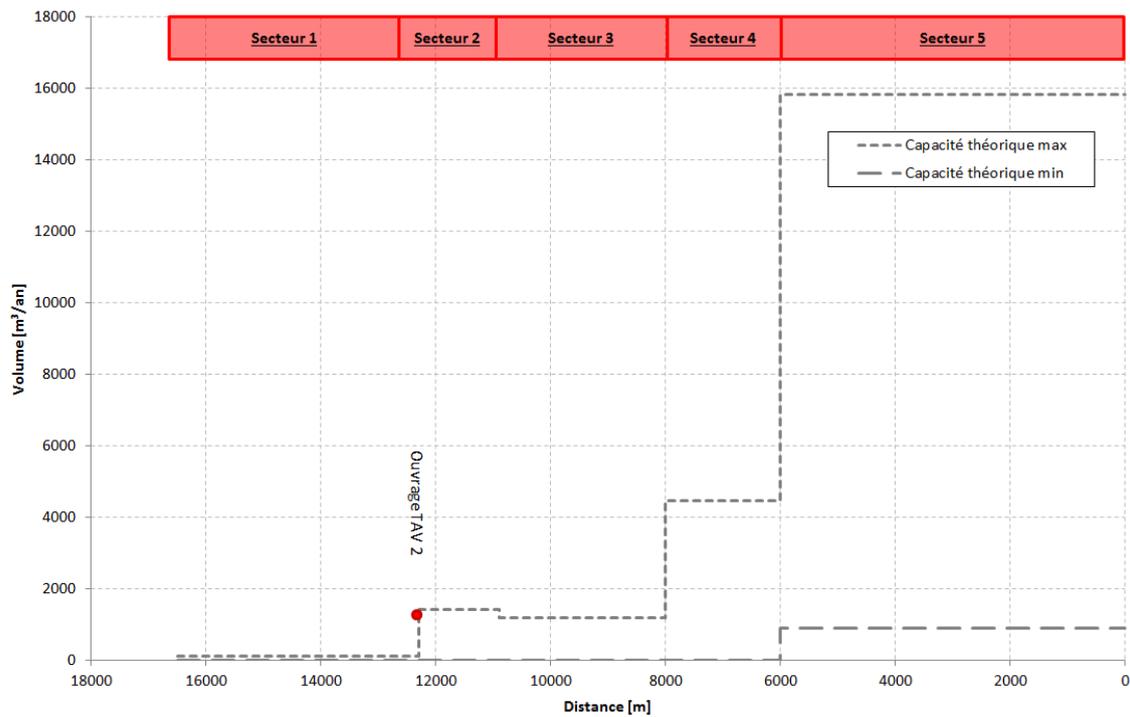


Figure 174: Calcul de la capacité de charriage théorique minimale et maximale pour la Taverna

### 12.3.2 Détermination de la charge solide actuelle

Les observations de terrain révèlent la présence de plusieurs bancs de graviers le long de la Taverna (Figure 175). Les bancs de graviers observés ont cependant un volume très faible, et semblent, dans la majorité des cas, provenir de l'érosion locale des berges (Figure 176). Seuls deux bancs témoignent du charriage dans la Taverna : la photo C de la Figure 177 représente un banc de graviers et galets provenant du Lettiswillbach et la photo D illustre un banc engendré par un élargissement local de la Taverna.



Figure 175: Localisation des bancs de graviers sur la Taverna (points bordeaux) ; lettres = localisation des bancs sur la Figure 176 et la Figure 177.



Figure 176: Erosion locale de berges et bancs de graviers sur la Taverna (localisation sur Figure 175)



Figure 177: Bancs de graviers provoqués par du charriage sur la Taverna (localisation sur Figure 175)

Sur la base des observations de terrain et des courbes de capacité minimale et maximale, nous obtenons la capacité actuelle, représentée sur la Figure 178.

La justification de la charge actuelle, par secteur, est détaillée ci-dessous :

- **Secteur 1** : Le débit est très faible et le lit canalisé : **capacité minimale** retenue pour la charge solide actuelle.
- **Secteur 2** : La capacité augmente (apport hydraulique du Seeligrabebach), mais la charge réelle n'augmente pas car, d'une part, l'ensemble des apports de l'affluent est stoppé par le dépotoir (ouvrage TAV2) et, d'autre part, l'ensemble des berges est canalisé, ce qui empêche tout apport en sédiments : la **capacité minimale** a été retenue pour la charge solide actuelle.
- **Secteur 3** : La Taverna présente un méandrage important dans ce secteur, mais les bancs de graviers observés sur place sont de taille restreinte. La charge solide naturelle est de 600 m<sup>3</sup> (voir paragraphe suivant). Au vu de cette donnée, nous estimons la charge solide actuelle à 300 m<sup>3</sup>.
- **Secteur 4** : Les berges étant protégées de manière systématique, l'apport interne en sédiments est estimé nul et la charge solide actuelle sur ce tronçon est estimée égale à la **charge solide actuelle du tronçon situé en amont**.
- **Secteur 5** : L'apport en sédiments augmente grâce au Lettiswillbach. De plus, les berges présentant un aspect plus naturel, la charge actuelle est estimée de la façon suivante :
  - Charge solide actuelle du tronçon en amont ;
  - Charge solide du Lettiswillbach (estimée également basée sur la capacité min et max et les observations de terrain).

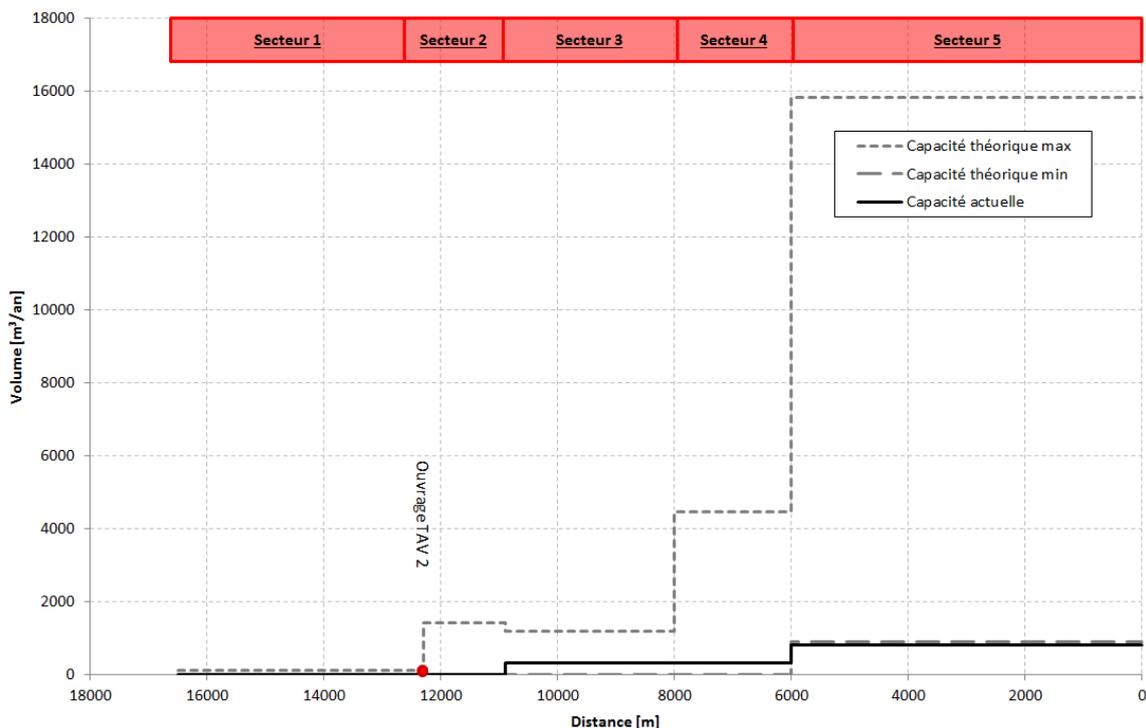


Figure 178: Charge solide actuelle de la Taverna, par rapport à la capacité théorique

### 12.4 Estimation de la charge solide naturelle et nécessaire

Sur l'ensemble de la Taverna, la charge solide naturelle a été estimée en appliquant la méthode de la largeur de régime, selon l'estimation de la taille des bancs si la largeur naturelle du tronçon était atteinte. Cette largeur est calculée en supposant un régime naturel du cours d'eau. La comparaison entre la largeur actuelle et la largeur naturelle est présentée dans le Tableau 47. Les caractéristiques morphologiques de chaque tronçon à l'état naturel sont présentées sur le diagramme de Da Silva (Figure 179). Dans l'état naturel projeté, chaque tronçon se situe dans la partie des bancs de graviers / bancs de graviers alternés.

Tableau 47: Largeur naturelle estimée pour la Taverna

Secteur	Largeur actuelle [m]	Largeur naturelle [m]
● 1	1	4.5
● 2	3	7.45
● 3	2	8.4
● 4	3	9.7
● 5	3	15

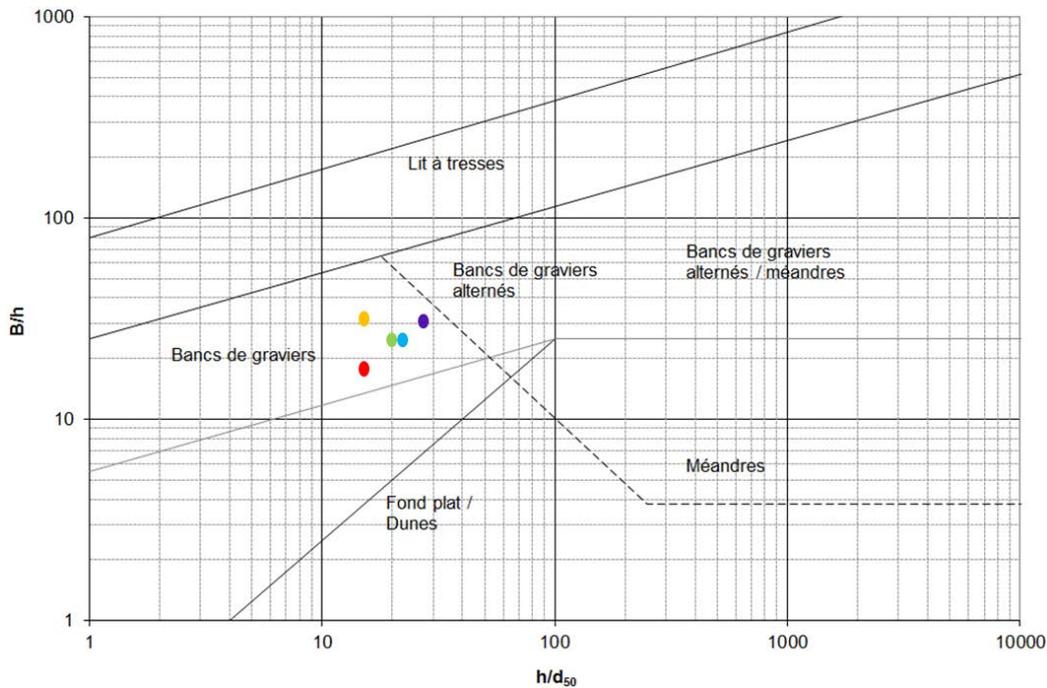


Figure 179: Diagramme de Da Silva et tronçon de la Taverna

La charge solide nécessaire a ensuite été déterminée comme correspondant à 60% de la charge naturelle, visible sur la Figure 181.

### 12.5 Impact des installations sur le régime de charriage

L'ouvrage FR.TAV 2 (situation sur la Figure 180) est un dépotoir géré par la *Unterhaltskommission Obere Taverna* (personne de contact : M. Louis Oberson-Müller). Voici les caractéristiques de ce dépotoir :

- Longueur : 40 mètres ;
- Largeur : 4-5 mètres ;
- Surprofondeur : 0.6 mètre ;
- Nature du seuil : blocs d'enrochement disposés dans le fond du lit (peuvent être scellés par du béton par endroits).

Sa raison d'être est motivée par un important phénomène d'engravement observé à l'aval qui causait des débordements répétés de la Taverna sur les terres agricoles et occasionnait l'enfouissement réguliers des têtes de sorties des drains. De ce fait, les variantes proposées, excepté la n°2, doivent être combinées avec des mesures de revitalisation à l'aval du dépotoir. Dans le cas contraire, la situation initiale de déficit de protection contre les crues serait reconduite.

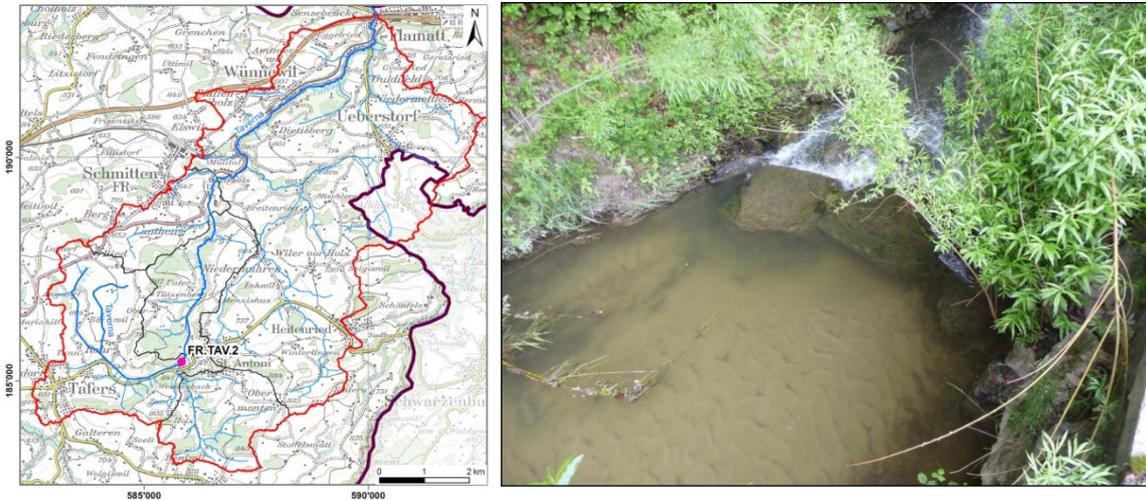


Figure 180: Implantation et illustration de l'installation étudiée sur la Taverna

Le principal point faible de la Taverna est le manque d'apport de sédiments. Ce dépotoir étant situé environ 100 mètres en aval d'un affluent qui génère du transport solide, l'impact de cet ouvrage sur le régime de charriage est considéré comme important.

Des calculs numériques sommaires ont été réalisés afin de connaître l'influence de l'ouvrage sur les diamètres transportables. Les résultats de ces calculs sont présentés en [Annexe 3.2.3](#).

Degré d'atteinte au régime de charriage entre 80% et 100 % : **atteinte très prononcée.**

## 12.6 Profils en long du charriage et détermination des tronçons avec atteinte grave

Dans un premier temps, un bilan de transport est présenté sous forme de profil en long (Figure 181). Ce graphique reprend les données suivantes :

- Charge solide à l'état actuel ;
- Charge solide à l'état naturel ;
- Charge solide estimée nécessaire.

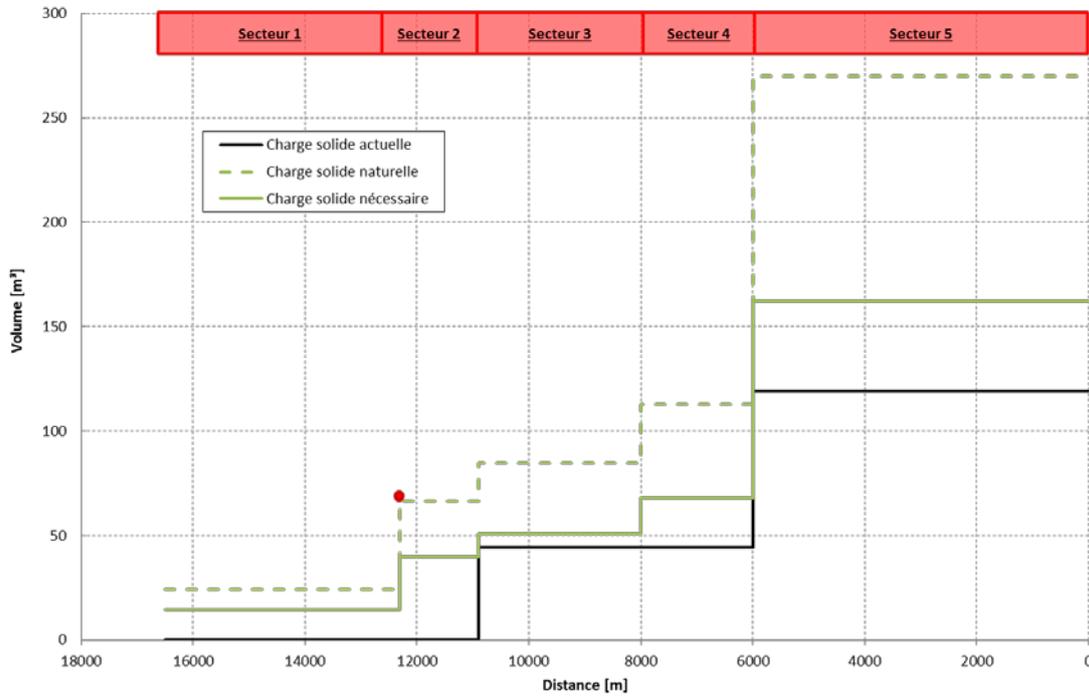


Figure 181: Profil en long du charriage et détermination des tronçons avec atteinte grave au régime de charriage.

Dans un second temps, l'état du tronçon par rapport au régime de charriage a été estimé en comparant l'état actuel et naturel de celui-ci.

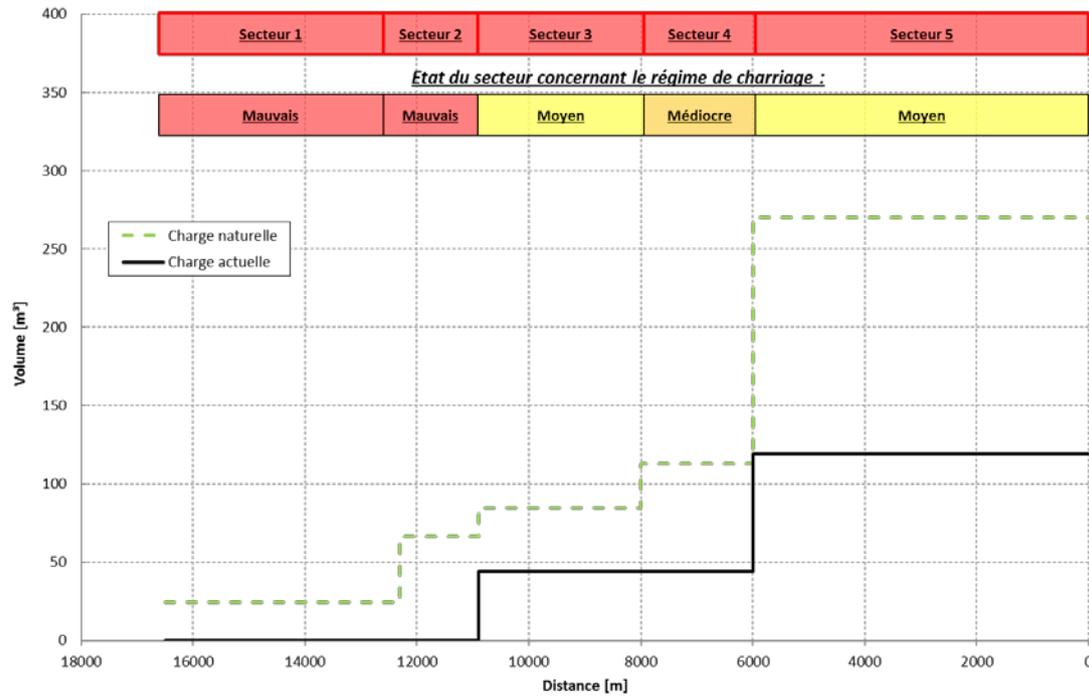


Figure 182: Profil en long du charriage et détermination des tronçons avec atteinte grave au régime de charriage.

Les secteurs 1 et 2 sont les plus atteints. La cause fondamentale de cette atteinte au régime de charriage est le manque d'apports de sédiments.

Le secteur 3 présente un aspect naturel, mais les bancs de graviers observés sur place sont relativement restreints, en raison du manque d'apports de l'amont.

Les secteurs 4 et 5 présentent également une atteinte importante au régime de charriage. Ceci est dû à la canalisation du cours d'eau et au manque d'apports en amont.

## 12.7 Proposition de mesures d'assainissement adéquates

### 12.7.1 Secteur 1

L'assainissement du secteur 1 passerait par une renaturation intégrale du cours d'eau ainsi que de ses affluents, afin de réapprovisionner la Taverna en sédiments. Cependant, la pente du tronçon étant faible, le gain sur ce tronçon semble négligeable par rapport au besoin pour les secteurs situés plus en aval.

### 12.7.2 Secteur 2

Remarque préliminaire : d'après communication téléphonique et électronique avec M. Oberson, la quantité de graviers extraite annuellement dans ce dépotoir est de  $\sim 220 \text{ m}^3$ . C'est cette valeur qui est retenue lors de l'analyse des variantes. Un banc de gravier a été observé sur la Taverna, directement en amont du dépotoir :

Le volume de ce banc est estimé à  $1.35 \text{ m}^3$

Un banc de gravier a été observé sur le Seeligrabebach :

Le volume de ce banc est estimé à  $1.2 \text{ m}^3$

En supposant que ces bancs soient représentatifs du transport solide sur la Taverna, environ  $2.5 \text{ m}^3$  de gravier entrent dans le dépotoir, les  $197.5 \text{ m}^3$  restant seraient uniquement des sédiments fins, sans intérêt pour le rétablissement du régime de charriage

Ce volume pourra être confirmé ou infirmé lors du prochain entretien de ce dépotoir.

Nous notons aussi qu'à l'aval du dépotoir, dans le secteur 2, la Taverna ne s'écoule pas dans son lit naturel.

#### 12.7.2.1 VAR 0 : Conservation de l'installation en l'état

##### d) Description de la variante

Cette variante consiste à laisser l'ouvrage dans son état actuel et d'attendre qu'un nouvel état d'équilibre soit atteint.

Une esquisse de la variante est présentée sur la Figure 183 ci-contre.

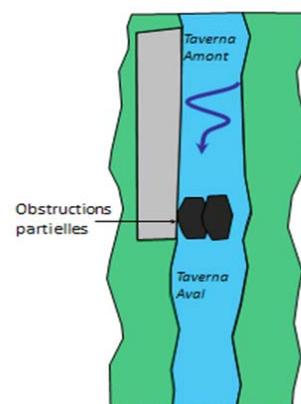


Figure 183: Esquisse de la variante 0 (FR.TAV.2)

### 12.7.2.2 Analyse succincte

L'arrêt de l'extraction du gravier tout en conservant l'installation en l'état aura pour conséquence d'augmenter localement le thalweg en amont de l'obstruction partielle. D'après la carte des inondations fournies dans ce secteur, cette zone est inondable pour la période de retour 100 ans (voir figure ci-après), l'augmentation, même locale du thalweg n'est donc pas souhaitée.

On estime que la charge qui transitera après l'atteinte de l'état d'équilibre sera de 110 m<sup>3</sup>, soit la moitié de la charge amont.

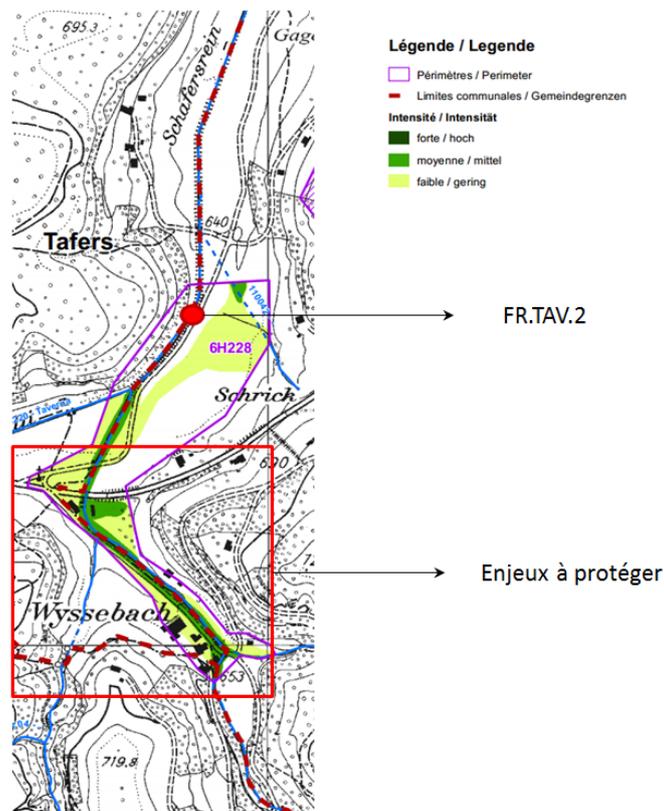


Figure 184 : Extrait de la carte des intensités (HQ100)

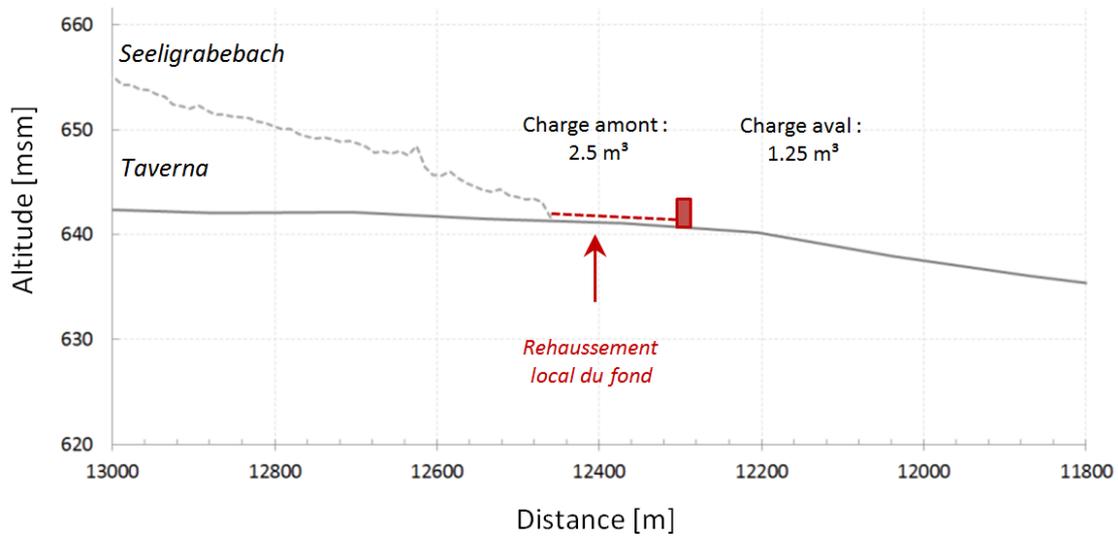


Figure 185:VAR 0 : Transit annuel (charriage) et risque d'inondation

Le coût de cette variante est estimé à : **0 CHF**

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans l'[Annexe 4](#).

### 12.7.2.3 VAR 1 : Suppression de l'obstruction partielle du cours d'eau

e) Description de la variante

Cette variante consiste à supprimer les deux blocs en enrochement qui obstruent le lit de la Taverna.

Une esquisse de la variante est présentée sur la

Figure 186 ci-con

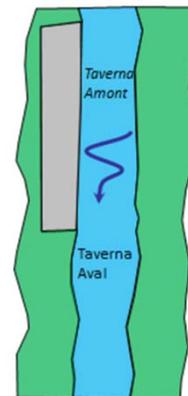


Figure 186 : Esquisse de la variante 1 (FR.TAV.2)

f) Analyse succincte

Cette variante permet de limiter la chute des vitesses due à la présence de l'obstacle et ainsi favoriser le transit des sédiments vers l'aval.

Le profil en long de la Taverna présente une cassure de pente à cet endroit, donc une partie des sédiments pourra se déposer et augmenter légèrement le thalweg. Cette élévation est jugée faible, de plus, en cas de crue importante ces sédiments seront chassés vers l'aval (pseudo-

canalisation du cours d'eau) avec risque d'inondation en aval. De plus, le pourcentage de gravier entrant dans le dépotoir est très faible, le gain serait donc très limité.

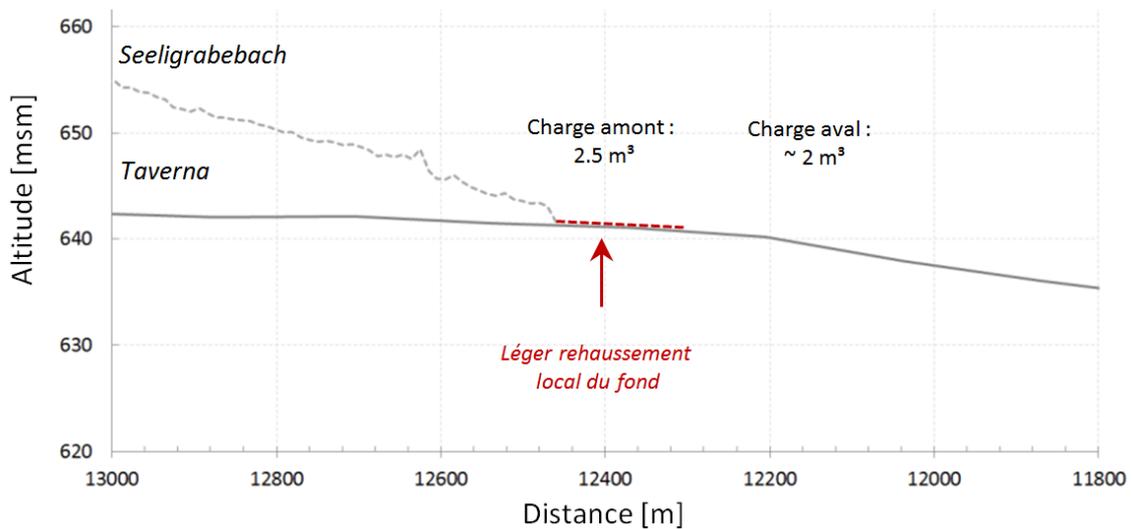


Figure 187: VAR1 : Transit annuel (charriage) et risque d'inondation

Le coût de cette variante est grossièrement estimé à : 5 000 CHF

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans l'Annexe 4.

#### 12.7.2.4 VAR 2 : Prélèvement du gravier en amont de l'ouvrage pour le restituer en aval

##### g) Description de la variante

Cette variante consiste à prélever le gravier retenu dans l'ouvrage et de le restituer à l'aval de celui-ci.

Une esquisse schématique de la variante est présentée sur la Figure 188 ci-contre. Le dépôt se ferait à l'aval de la zone subissant les débordements de la Taverna.

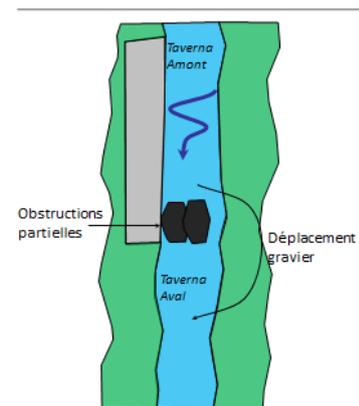


Figure 188 : Esquisse de la variante 2 (FR.TAV.2)

##### h) Analyse succincte

Cette variante présente l'avantage de ne pas augmenter le risque d'inondation tout en rétablissant le régime de charriage en aval de l'installation. Cependant, le coût de cette variante (en comparaison avec le coût de la variante 1) est nettement supérieur, et cette opération devra être effectuée chaque année, ce qui correspondrait d'ailleurs grosso modo aux coûts d'entretien actuel générés par la vidange annuelle du dépotoir. A noter toutefois que le pourcentage de gravier

entrant dans le dépotoir est, semble-t-il, très faible, un tri serait nécessaire et la quantité recouvrée relativement faible. Une analyse granulométrique lors du prochain entretien de ce dépotoir est nécessaire. L'injection de gravier frais semble plus appropriée, or cette option a un surcoût qui n'est pas non plus pris en charge par Swissgrid et reflète la nécessité d'une réflexion plus large de renaturation.

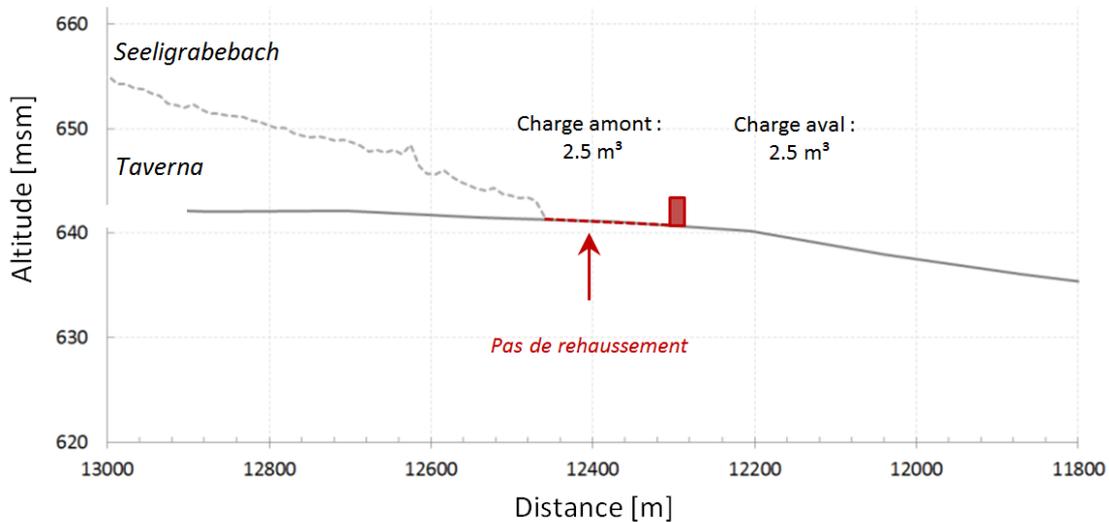


Figure 189: VAR2: Transit annuel (charriage) et risque d'inondation

Le coût de cette variante est grossièrement estimé à : **6 000 CHF /an**

Une fiche synthétique de la variante est présentée dans l'Annexe 4.

### 12.7.2.5 Synthèse des variantes

Au vu du faible coût et du gain escompté (en termes de charriage), la variante 1 semble se distinguer des autres variantes proposées. Cependant, en tenant compte du déficit de protection que créerait la suppression des deux blocs, il n'est pas sûr que cette mesure combinée à une revitalisation à l'aval améliore la situation puisque la pseudo-canalisation de la Taverna favorisant le transit serait supprimée. De ce fait, la variante 2 demeure l'option à privilégier. Mais il faut noter que le potentiel de valorisation en termes de charriage est quasiment nul.

### Secteur 3

La restauration d'un régime de charriage naturel en amont du secteur 3 permettrait de rétablir un régime de charriage qualifié de bon.

### Secteur 4 et 5

Etant donnée la forte anthropisation du cours d'eau aval, il semble difficile de réaliser une véritable renaturation. Cependant, des aménagements locaux peuvent être réalisés dans le cours d'eau (mise en place de blocs d'enrochement, élargissement local du cours d'eau) afin de diversifier l'écoulement.

Remarque : ces aménagements faisant partie de la renaturation du cours d'eau, les coûts n'ont pas été estimés.

## 12.8 Etape 11 : Estimation du potentiel de valorisation

Le potentiel de valorisation a été estimé en se basant uniquement sur l'amélioration du facteur du régime de charriage, tel qu'explicité dans l'aide à l'exécution.

L'état du cours d'eau après renaturation est estimé en supposant que l'ensemble des aménagements proposés dans l'étape 10 et 12 est réalisé, à savoir, la suppression du dépotoir et la renaturation du tronçon.

Remarque : la renaturation du secteur 2 à 70% de la charge naturelle permet d'obtenir un état excellent à bon sur l'ensemble des tronçons en aval.

La charge solide future correspond à la charge solide transitant dans l'état après renaturation (Figure 190).

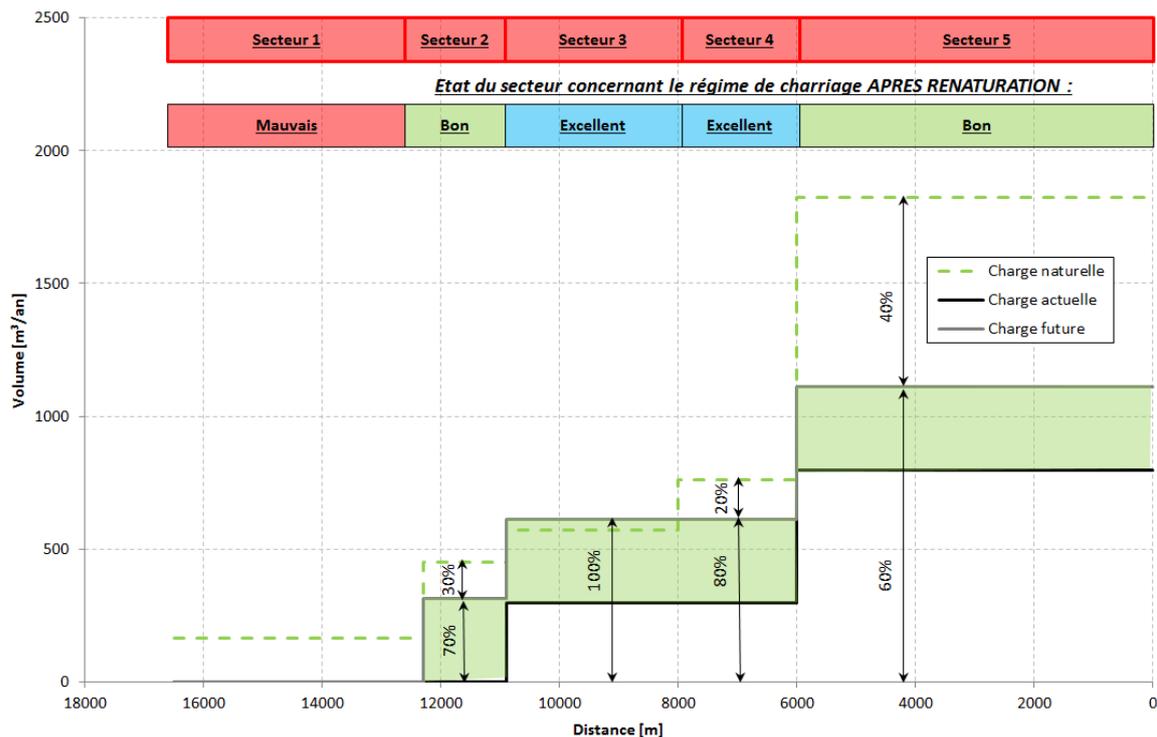


Figure 190: Charge future après renaturation

Le potentiel de valorisation (en termes de charriage uniquement), pour les secteurs renaturés, est présenté dans le Tableau 48.

Tableau 48: Potentiel de valorisation pour les différents secteurs de la Taverna

Secteur	Etat actuel du tronçon	Etat futur après renaturation	Potentiel de valorisation
2	Mauvais	Bon	3
3	Moyen	Excellent	2
4	Médiocre	Excellent	3



Secteur	Etat actuel du tronçon	Etat futur après renaturation	Potentiel de valorisation
5	Moyen	Bon	1

## 13. La Bibera

### 13.1 Description du bassin versant

Le bassin versant de la Bibera est présenté sur la base du résumé établi par ETEC Sàrl (2005).

Le bassin versant de la Bibera (n° 20-510, avec sous-bassins 20-511 et 20-512 selon l'Atlas hydrologique), se situe au nord de Fribourg et à l'est-sud-est du lac de Morat. La rivière (code GEWISS 1933 selon l'Atlas) prend sa source sur la commune de Courtaman, en zone rurale, à un peu moins de 600 m d'altitude. Elle coule en direction du nord pour rejoindre le Grand Canal. Son affluent majeur est la Chappelimatt. La Bibera dans sa partie terminale est d'ailleurs rattachée à cet autre bassin versant n° 20-520, sur lequel elle est dénommée Biberenkanal (code GEWISS 210). La Bibera traverse principalement des zones agricoles plus ou moins intensives.

La superficie du bassin versant est voisine de 55 km<sup>2</sup>. Avec une longueur d'environ 18.5 km et 4.3 km pour le cours aval dans la plaine de la Broye (Biberenkanal), la pente moyenne

de la Bibera est de l'ordre de 0.6 %. Le sous-sol de l'ensemble du bassin versant est de type quaternaire, constitué d'alluvions et moraines. Toujours selon l'Atlas hydrologique, le régime hydrologique de la Bibera est de type pluvial inférieur (faible amplitude de débits, avec plus hautes eaux au printemps et plus basses eaux en automne).

Deux installations prioritaires sont à étudier (points rouges sur la Figure 191) :

- FR.BIB.1 : prise d'eau de l'ancien moulin (plus en activité) ;
- FR.BIB.2 : prise d'eau du moulin actuel.

Deux installations ont écartées suite à l'appréciation sommaire (§ 2) :

- FR.BIB.3 ;
- FR.BIB.4.

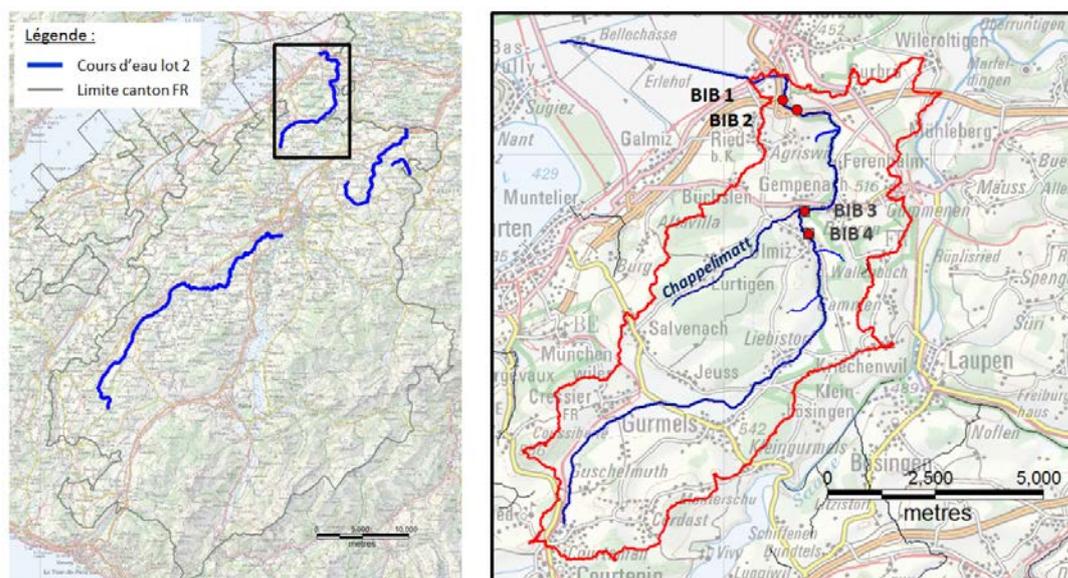


Figure 191: Vue en plan et localisation du bassin versant de la Bibera

### 13.2 Description du cours d'eau et profil en long topographique

#### 13.2.1 Découpage morphologique

Trois faciès d'écoulement généraux sont identifiés le long de la Bibera (Figure 192).

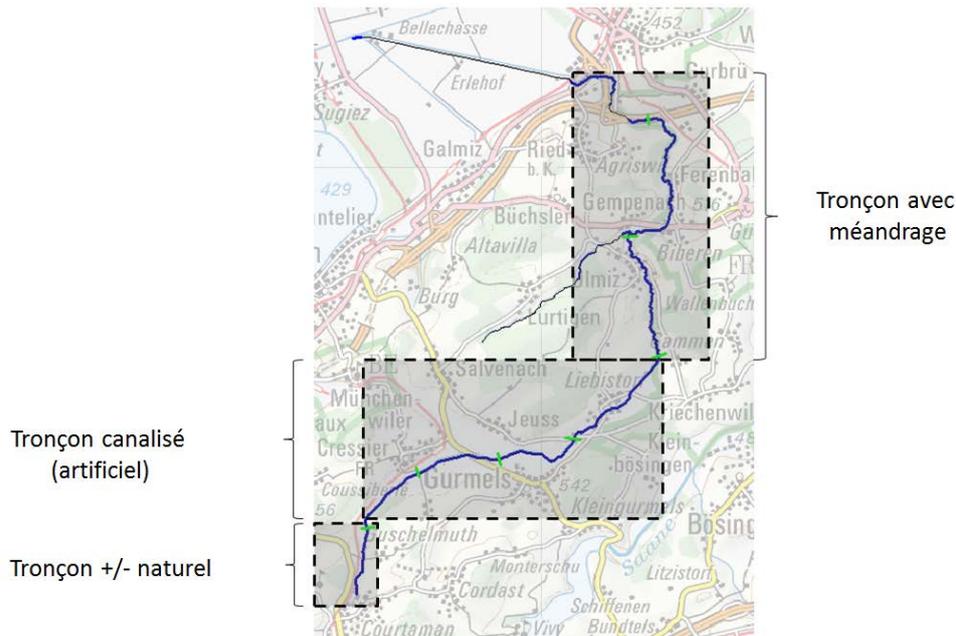


Figure 192: Découpage morphologique de la Bibera.

#### 13.2.2 Découpage selon les apports hydrologiques

Un autre niveau de découpage peut être réalisé selon les apports hydrologiques (Figure 193) de la Bibera.

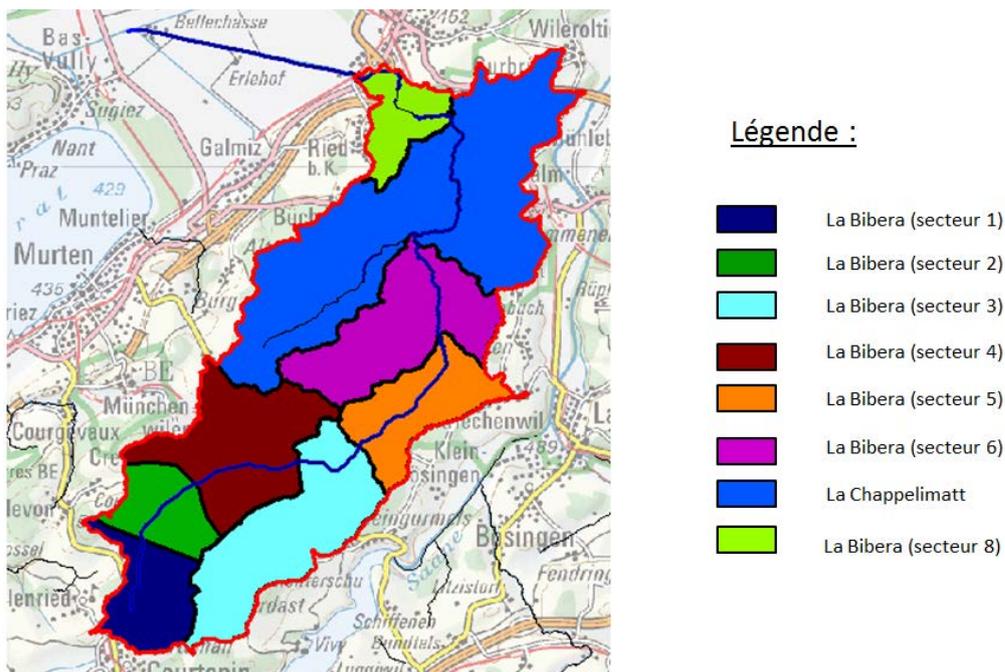


Figure 193: Sous-bassins versants de la Bibera

### 13.2.3 Découpage en fonction des installations

Le cours de la Bibera peut également être scindé à partir des ouvrages identifiés altérant potentiellement le régime de charriage (Figure 191).

### 13.2.4 Découpage en fonction de la pente

Un dernier niveau de découpage est proposé en fonction des variations de pente significatives le long du cours d'eau (Figure 194).

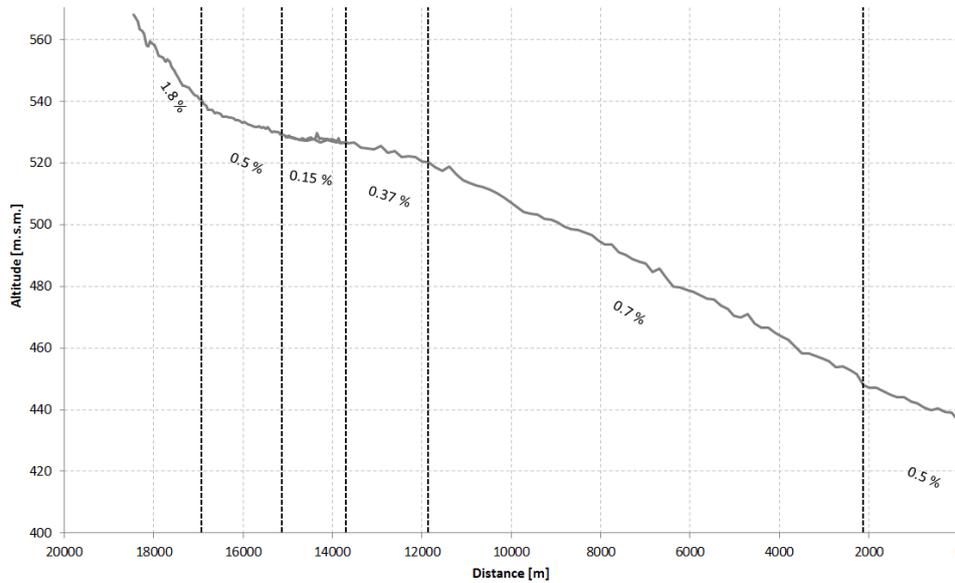


Figure 194: Variations de pente significatives le long de la Bibera.

### 13.2.5 Découpage final proposé pour l'étude du charriage de la Bibera

En superposant ces différents découpages, on identifie finalement huit tronçons homogènes le long de la Bibera (Figure 195).

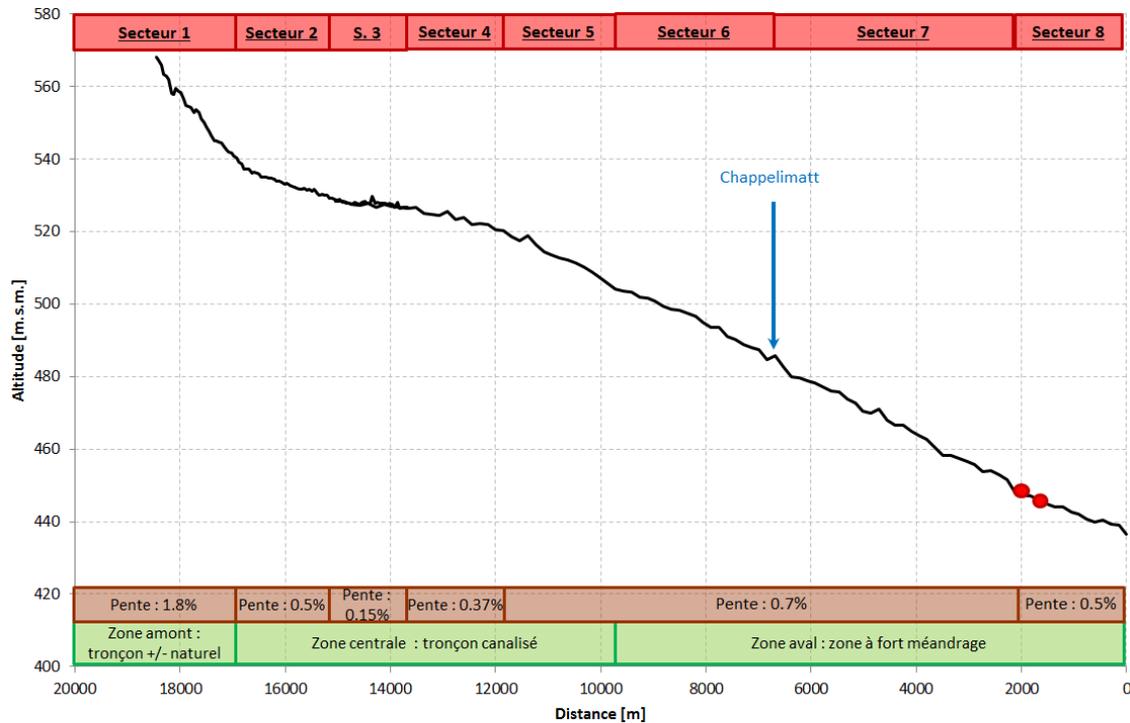


Figure 195: Profil en long topographique de la Bibera et découpage en secteurs homogènes

### 13.3 Estimation de la charge solide actuelle

#### 13.3.1 Calcul de la capacité minimale et maximale

La capacité théorique maximale et minimale est présentée sur la Figure 196.

La courbe des débits classés a été déterminée en utilisant la méthode détaillée dans la Praxishilfe, Hunziker et Lehmann (2013), par ajustement de la courbe grâce aux paramètres estimés dans l'Atlas hydrologique de la Suisse. La granulométrie utilisée est présentée dans l'Annexe 3.3.1

*Remarque* : la courbe minimale est confondue avec l'axe des abscisses, celle-ci est égale à 0 sur l'ensemble du cours d'eau.

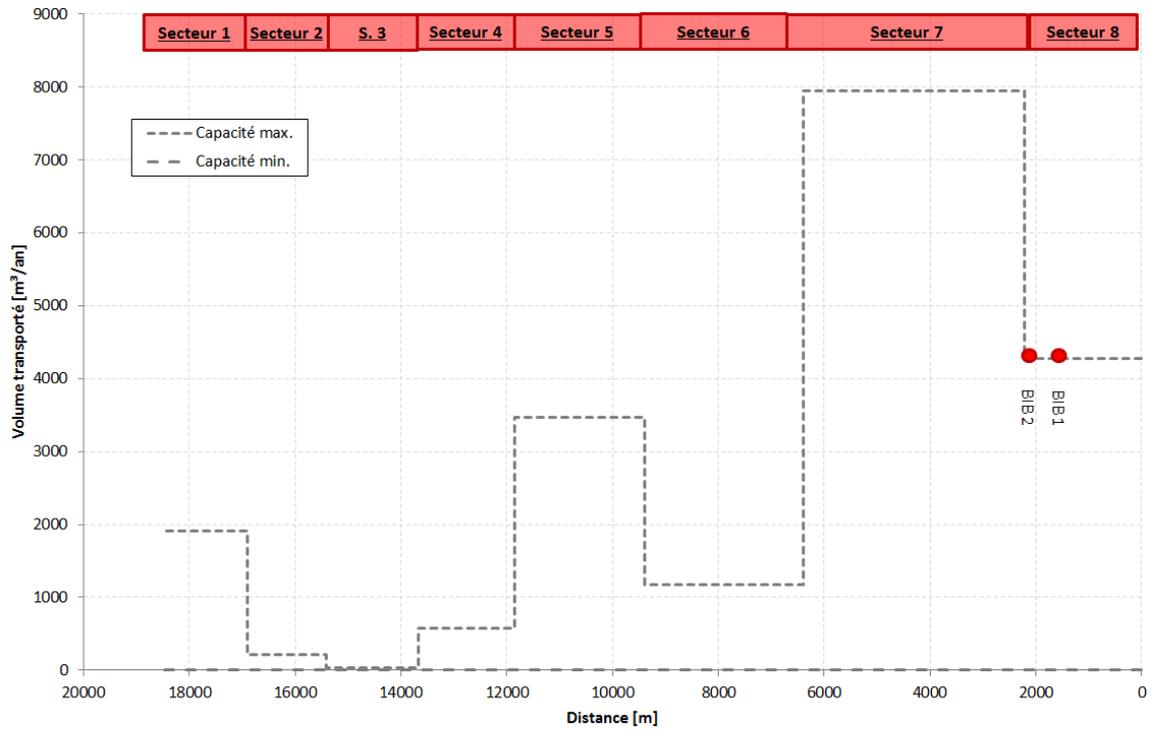


Figure 196: Capacité de charriage théorique, maximale et minimale, de la Bibera

Les valeurs théoriques obtenues ne permettent pas de déterminer avec suffisamment de précision la charge solide actuelle. Celle-ci a donc été déterminée en se basant sur les observations de terrain (voir paragraphe ci-après).

Il est à noter que la capacité de transport chute fortement au niveau des secteurs 2 à 4, car la pente sur ces tronçons est très faible.

### 13.3.2 Détermination de la charge solide actuelle

Très peu de transport solide par charriage a été observé sur le terrain. En effet, sur la majorité du cours d'eau, des protections de berges sont mises en place et le fond de la Bibera est très souvent congloméré, ce qui implique que même la charge solide minimale n'est pas charriée en temps normal. Seules quelques érosions locales ont été observées.

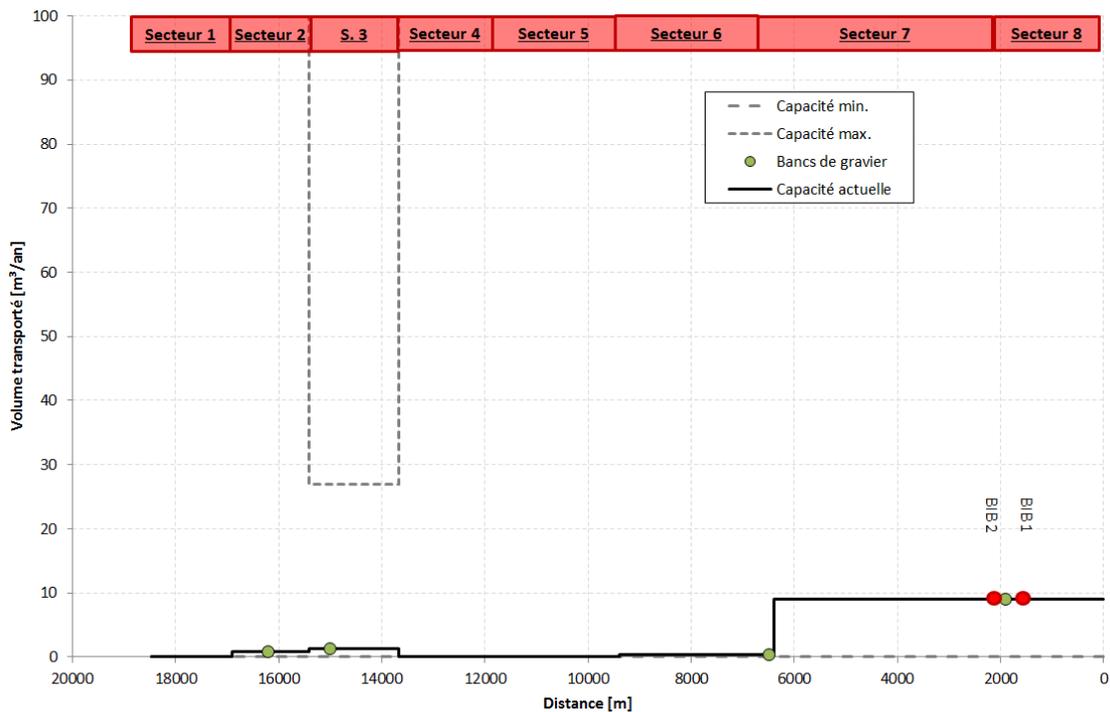


Figure 197: Charge solide actuelle de la Bibera

**Remarque :** Le volume transporté annuellement se situe entre 0 et 100 m³. En effet, le transport solide sur la Bibera est quasi-nul, seules des traces d'érosion très locales des berges ont été observées.

### 13.4 Estimation de la charge solide naturelle et nécessaire

La Bibera étant totalement artificielle, la charge solide naturelle a été déterminée en se basant sur la méthode de la largeur d'équilibre morphologique associée à celle de la taille des bancs pour un état naturel. La largeur naturelle obtenue pour chaque secteur (Tableau 49) est ainsi que le diagramme de Da Silva (Figure 198) sont présentés ci-dessous.

Tableau 49: Largeur naturelle estimée pour la Bibera

Secteur	Largeur actuelle [m]	Largeur naturelle [m]
8	1	3
7	1.5	3.8
6	2.5	6.2
5	3	7.7
4	3	8.6
3	3.5	9.8
2	5	12.2
1	5	12.5

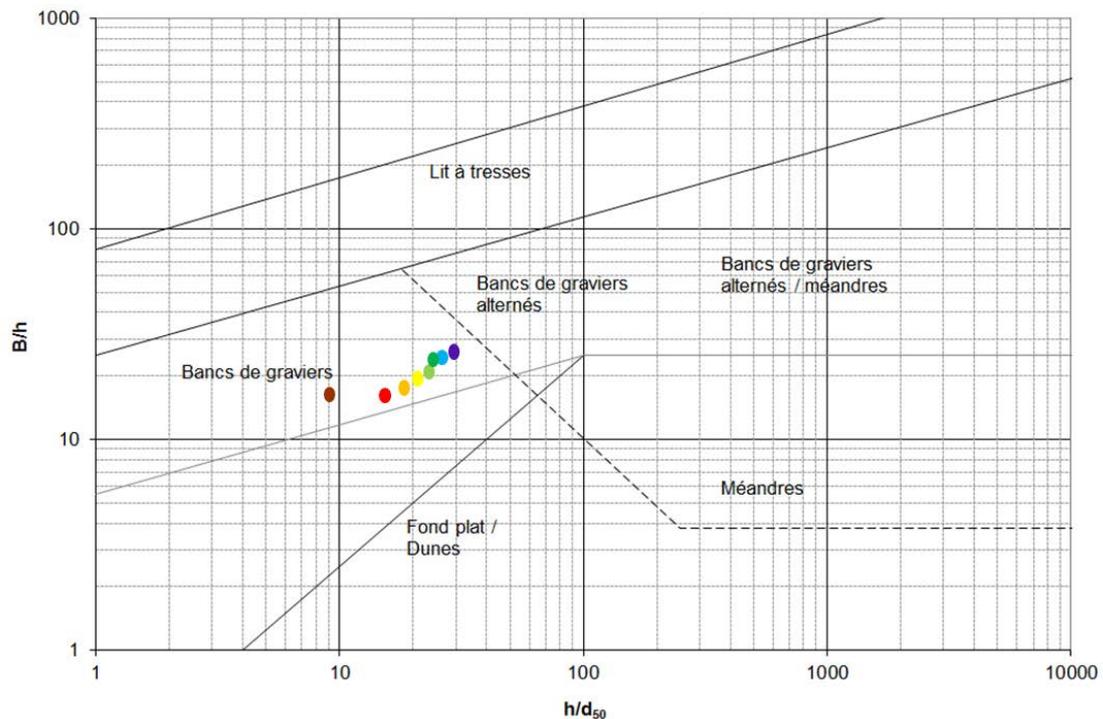


Figure 198: Tronçons de la Bibera situés sur le diagramme de Da Silva.

La charge solide nécessaire a ensuite été estimée comme correspondante à 60% de la charge solide naturelle.

Les deux courbes (charge naturelle et charge nécessaire) sont présentées sur la Figure 199.

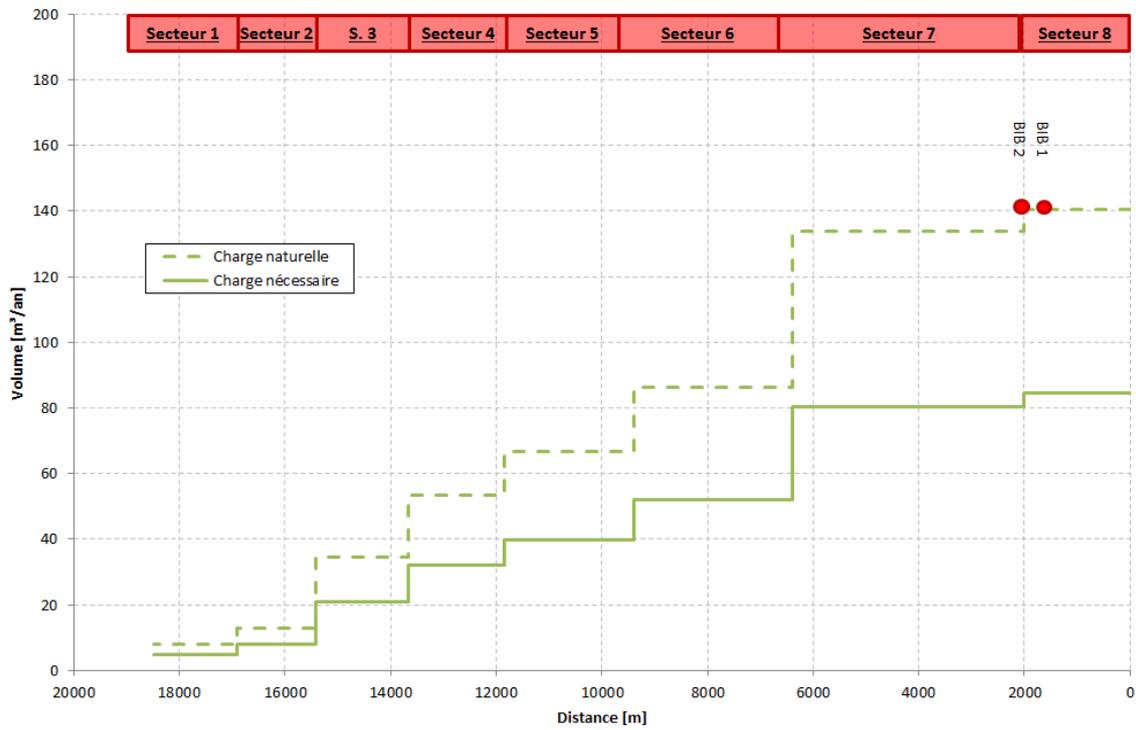


Figure 199: Charges solides naturelle et nécessaire de la Bibera

### 13.5 Impact des installations sur le régime de charriage

#### 13.5.1 Présentation des installations

Deux installations prioritaires sont situées sur la Bibera (Figure 200). Elles sont situées en aval du secteur 7 / début du secteur 8.

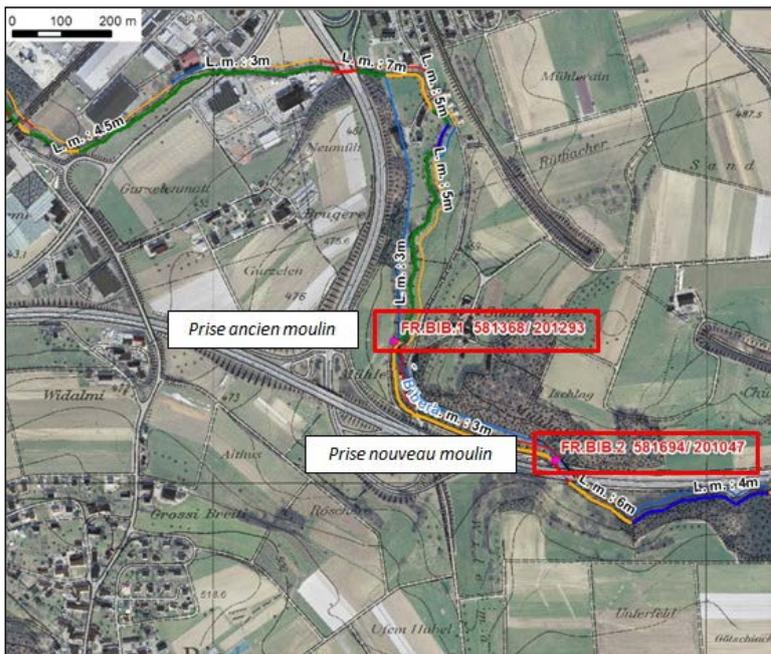


Figure 200: Implantation détaillée des deux installations étudiées sur la Bibera

Installation FR.BIB.1 : Caractéristiques principales de l'ouvrage (Figure 201) :

- Chute : 1 mètre ;
- Estimation du volume retenu : 100 m<sup>3</sup> ;
- Débit prélevé : 0 m<sup>3</sup>/s (moulin plus en activité).



Figure 201: Installation FR.BIB.1 étudiée sur la Bibera

D'après les observations réalisées sur site, le remplissage de l'ouvrage est estimé à environ 80 %.

Installation FR.BIB.2 : Caractéristiques principales de l'installation (Figure 202) :

- Chute : 2.5 mètres ;
- Estimation du volume retenu : 200 m<sup>3</sup> ;
- Débit prélevé : environ 60 l/s (d'après communication avec l'exploitant).



Figure 202: Installation FR.BIB.2 étudiée sur la Bibera

*Remarque importante* : ces données sont issues des observations réalisées par la LCE du canton de Fribourg, nous n'avons pas pu les vérifier sur place, l'accès à l'ouvrage étant difficile.

La hauteur d'eau relevée par le canton de Fribourg lors des campagnes de terrain est de 20 cm. A partir de cette information, le remplissage de l'ouvrage est estimé à 80 %.

### 13.5.2 Influence des installations sur le régime de charriage

L'influence des installations sur le régime de charriage a été estimée sur la base du volume disponible avant d'atteindre un état d'équilibre morphologique.

*Remarque* : la définition de l'équilibre morphologique est détaillée dans l'étape 7 de la Glâne (§ 11.5).

Les installations FR.BIB.1 et FR.BIB.2 étant comblées chacune à 80%, leur influence sur le régime de charriage est estimée négligeable. De même, si un régime de charriage naturel était rétabli, l'influence des deux installations serait également négligeable.

- Ouvrage FR.BIB.1 : degré d'atteinte au régime de charriage inférieur à 20% : aucune atteinte ;
- Ouvrage FR.BIB.2 : degré d'atteinte au régime de charriage inférieur à 20% : aucune atteinte.

### 13.5.3 Evaluation des atteintes à la protection contre les crues

Ces deux installations ont par ailleurs une atteinte nulle ou négligeable à la protection contre les crues selon l'analyse de la carte des dangers.

## 13.6 Profils en long du charriage et détermination des tronçons avec atteinte grave

Dans un premier temps, un bilan de transport est présenté sous forme de profil en long (Figure 203). Ce graphique reprend les données suivantes : la charge solide à l'état actuel, à l'état naturel ainsi que la charge solide nécessaire.

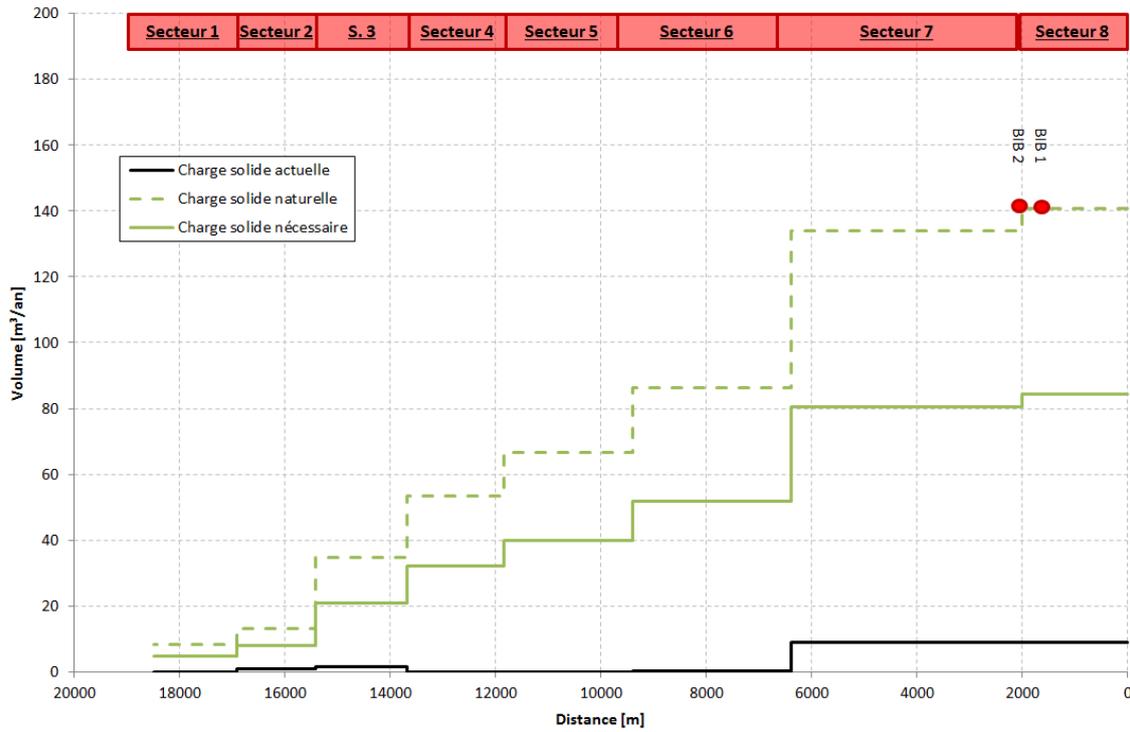


Figure 203: Profil en long du charriage et détermination des tronçons avec atteinte grave au régime de charriage.

Dans un second temps, l'état du tronçon par rapport au régime de charriage a été estimé en comparant l'état actuel et naturel de celui-ci (Figure 204).

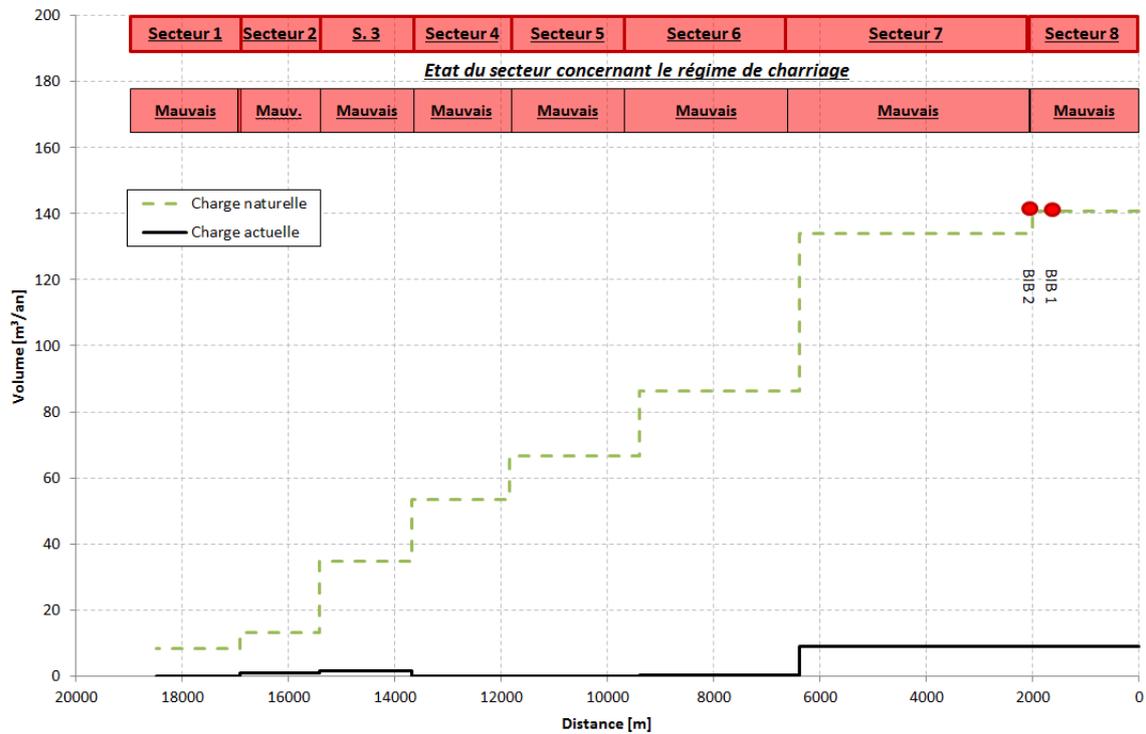


Figure 204: Profil en long du charriage et détermination des tronçons avec atteinte grave au régime de charriage.

### 13.7 Proposition de mesures d'assainissement adéquates

La Bibera est un cours d'eau très altéré en termes de régime de charriage, en raison d'un déficit d'apport de sédiments.

Etant donné la faible quantité d'affluents capables de réapprovisionner la rivière en sédiments, une renaturation complète du cours d'eau semble nécessaire. Cette renaturation paraît plus facilement réalisable sur les secteurs amont, car l'espace y est suffisant pour permettre au cours d'eau de divaguer. En aval, cette mesure semble à priori plus compliquée et plus coûteuse à mettre en œuvre.

### 13.8 Estimation du potentiel de valorisation

Le potentiel de valorisation a été estimé en supposant que l'ensemble des tronçons ait été préalablement renaturé, de manière à obtenir la charge solide nécessaire (Figure 205).

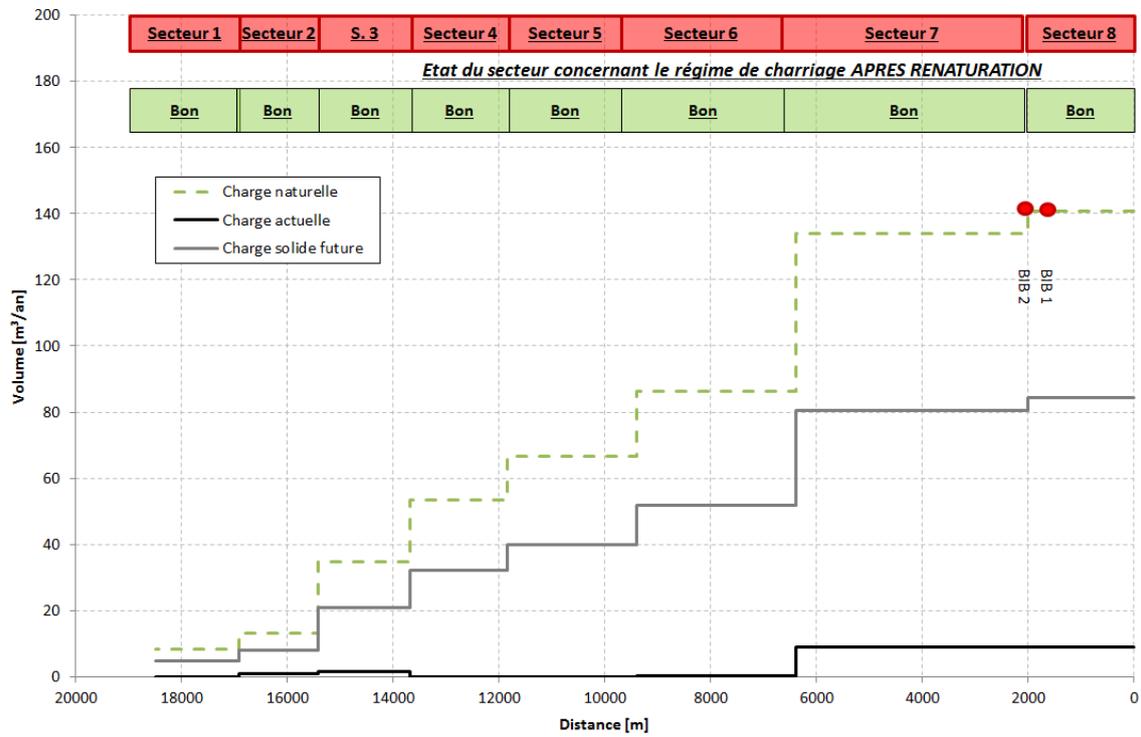


Figure 205: Charge future après renaturation

Le potentiel de valorisation (en termes de charriage uniquement), pour les secteurs renaturés est présenté dans le Tableau 50.

Tableau 50: Potentiel de valorisation pour les différents secteurs de la Bibera

Secteur	Etat actuel du tronçon	Etat futur après renaturation	Potentiel de valorisation
1	Mauvais	Bon	3
2	Mauvais	Bon	3
3	Mauvais	Bon	3
4	Mauvais	Bon	3
5	Mauvais	Bon	3
6	Mauvais	Bon	3
7	Mauvais	Bon	3
8	Mauvais	Bon	3

## 14. Le Ledeubach

### 14.1 Description du bassin versant

Les principales caractéristiques du bassin versant du Ledeubach (Figure 206) sont présentées ci-dessous :

- Taille du bassin versant : ~5 km<sup>2</sup> ;
- Longueur du cours d'eau : ~3.5 km ;
- 1 affluent majeur : le Trümlibach ;
- 1 installation prioritaire à étudier : FR.ZLE.1 : prise d'eau de l'ancien moulin.

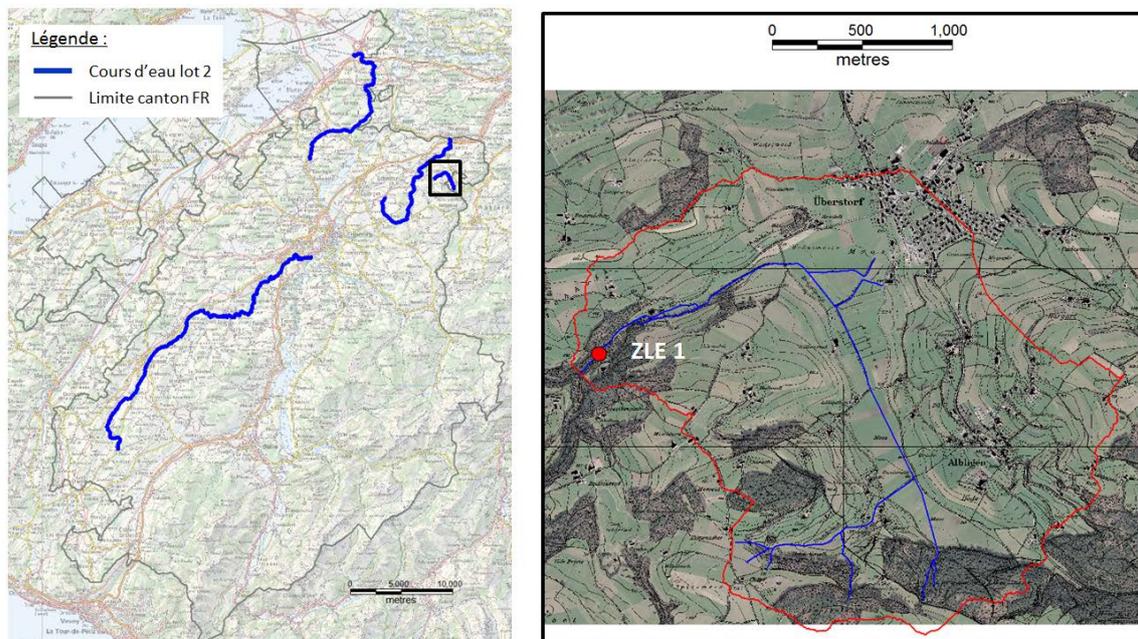


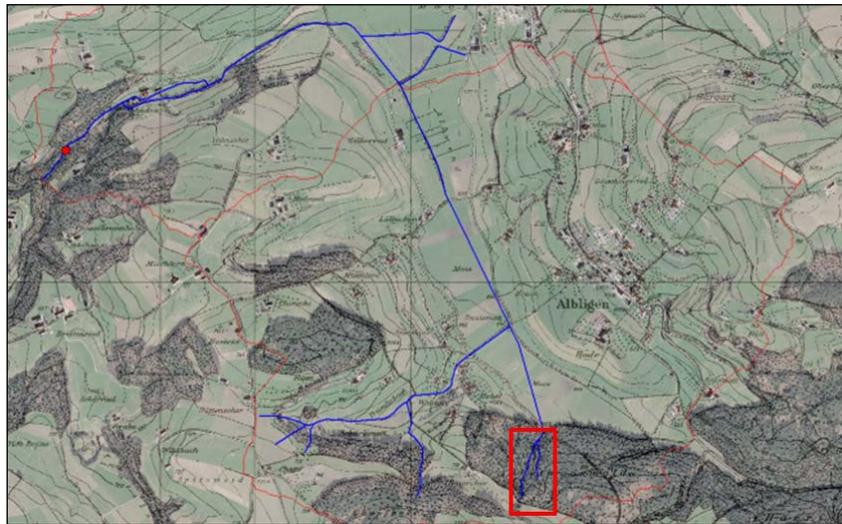
Figure 206: Vue en plan et localisation du bassin versant du Ledeubach

### 14.2 Description du cours d'eau

*Remarque préliminaire : le cas du Ledeubach étant singulier, l'étude de ce cours d'eau ne suit pas entièrement le schéma développé pour les autres cours d'eau.*

Le Ledeubach prend sa source sur territoire bernois, puis est canalisé (canalisation souterraine) jusqu'à son entrée sur territoire fribourgeois (Figure 207 et Figure 208).

Avant la mise sous terre du cours d'eau, celui-ci est très étroit (environ 20 cm). Il passe ensuite à travers un dépotoir (contenant en exclusivité des sédiments fins) puis il entre dans une canalisation.



← Sens de l'écoulement



Entrée du Ledeubach dans la conduite



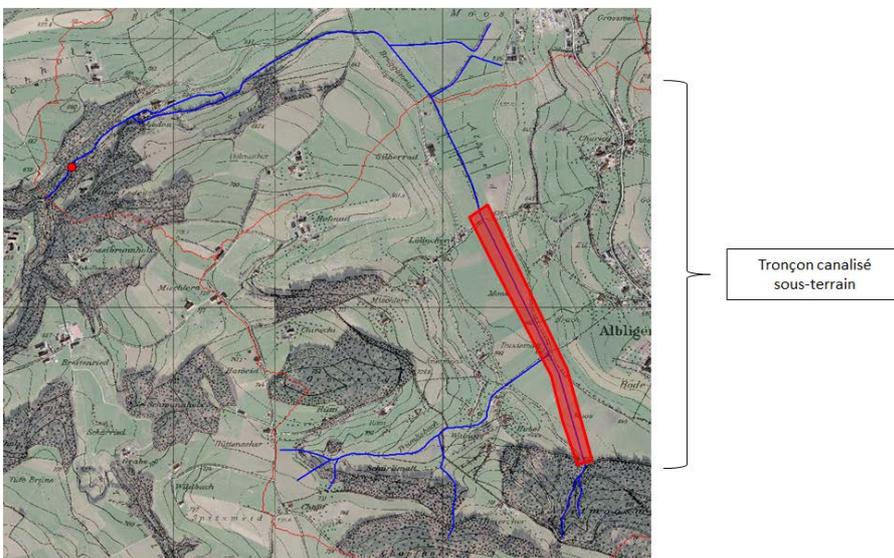
Dépotoir en amont de la canalisation



Ledeubach en amont du dépotoir

Figure 207: Illustration du Ledeubach amont

Le cours d'eau est canalisé sur le linéaire suivant (Figure 208).



Tronçon canalisé sous-terrain

Figure 208: Vue en plan du tronçon souterrain du Ledeubach

Dans la partie centrale du cours d'eau, aucune trace de transport n'a été observée (Figure 209). Ceci est dû d'une part à la canalisation (canalisation à l'air libre) du cours d'eau qui l'empêche d'avoir une largeur naturelle et d'autre part au manque d'apports (mise sous terre de Ledeubach sur le territoire bernois).



Figure 209: Illustration de la partie centrale du Ledeubach

Le Ledeubach est ensuite dévié dans le canal d'amenée du moulin.

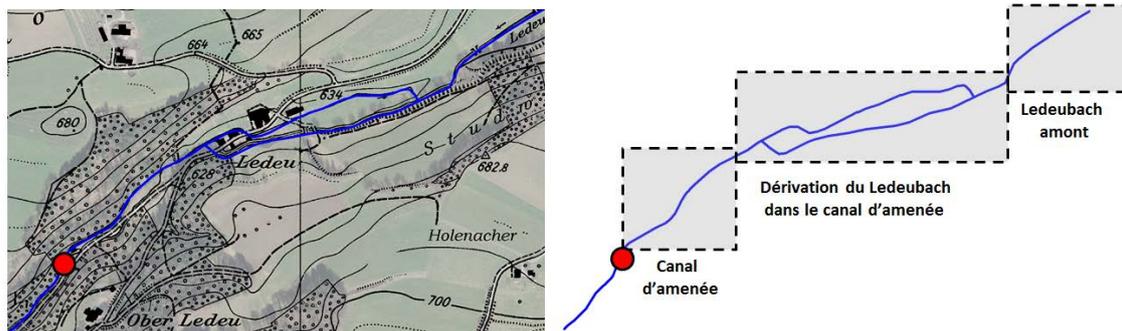


Figure 210: Localisation et schématisation de la dérivation des eaux du Ledeubach dans le canal d'amenée

Le moulin n'étant plus en activité aujourd'hui, deux seuils latéraux ont été mis en place afin de restituer une partie du débit dans le cours d'eau initial. Cependant, il semble que la route forestière existante soit construite dans l'ancien lit mineur du Ledeubach. En effet, le cours d'eau est très restreint (environ 20 cm) et son développement normal semble difficile.

En aval de l'installation, le cours d'eau retrouve un aspect naturel, avec quelques bancs de graviers. Les sédiments transportés proviennent de l'érosion des berges.

### 14.3 Evaluation des atteintes à la protection contre les crues

Aucune atteinte de l'installation à la protection contre les crues n'a été relevée.

### 14.4 Conclusion

Le Ledeubach est un cours d'eau très altéré pour les raisons suivantes :

- En amont : canalisation souterraine, puis à ciel ouvert ;
- Tronçon central : déviation du cours d'eau dans le canal d'amenée et obstruction du lit mineur existant.



Au vu de la situation générale du cours d'eau, une renaturation complète semble à priori nécessaire en amont de l'installation afin de rétablir un régime de charriage naturel.

## 15. Evaluation des cours d'eau cibles et de la responsabilité des installations

La Figure 211 illustre les tronçons de cours d'eau subissant des atteintes dues à une modification du régime de charriage. Cette carte synthétise les analyses menées dans les chapitres 4 à 14 et prend également en compte les résultats de l'étude pilote, concernant l'atteinte sur la Jogne. La classification des atteintes est représentée par quantiles, comme proposé dans l'aide à l'exécution. Il y a une **atteinte grave** à partir d'un **déficit de charriage de 40%** par rapport à l'état naturel (classes d'atteinte *notable*, *prononcée* et *très prononcée*).

Nous soulignons que les modélisations du régime de charriage réalisées par les bureaux d'ingénieurs mettent en évidence des déficits de charriage imputables à des aménagements de 2<sup>ème</sup> priorité, notamment sur la Bibera, la Glâne, la Taverna et le Ledeubach. Ces résultats complètent les analyses SIG menée pour l'identification des aménagements de 2<sup>ème</sup> priorité au § 2.6. Nous renvoyons également aux chapitres qui traitent du régime de charriage de chacun de ces cours d'eau pour de plus amples explications.

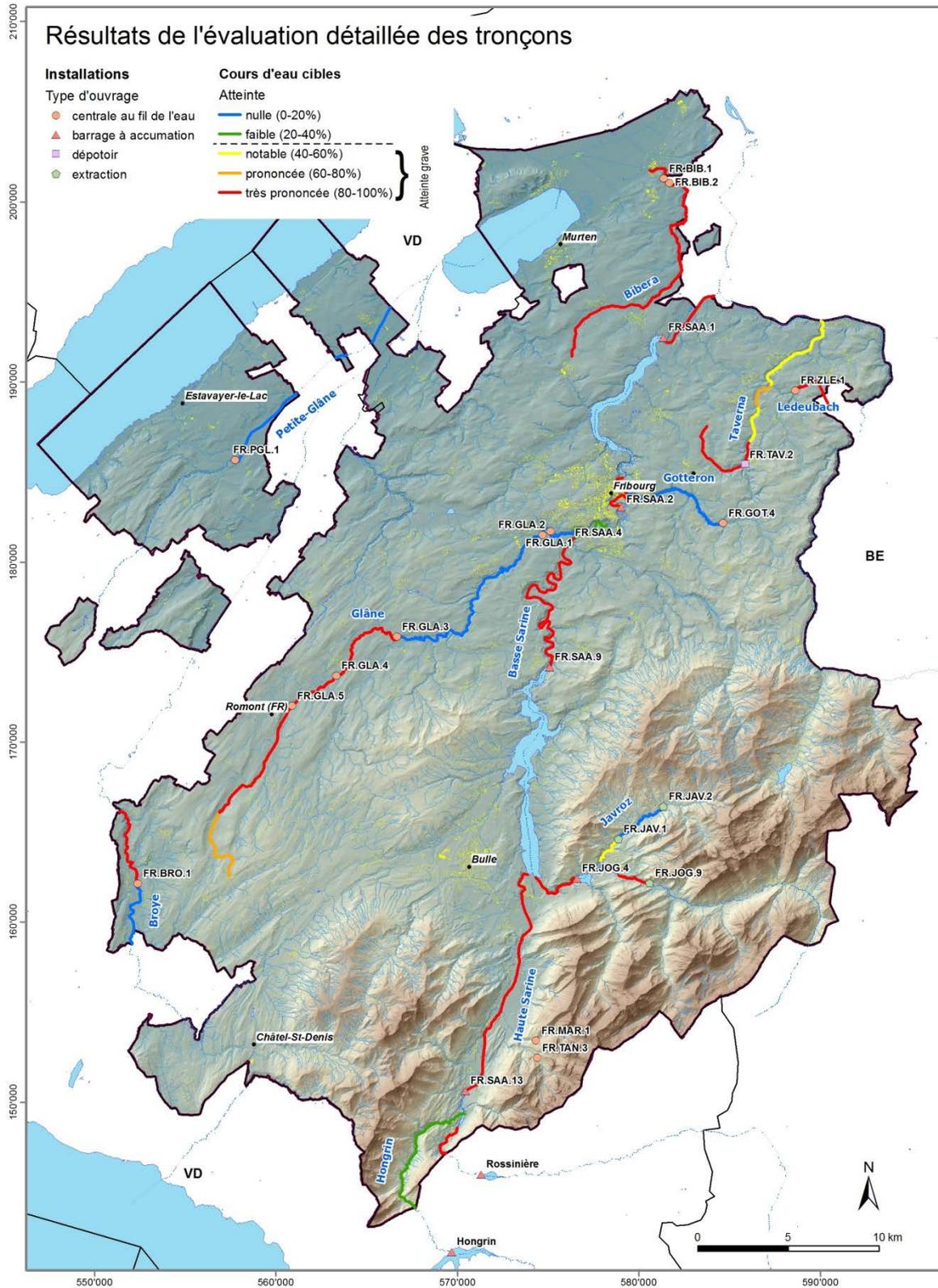


Figure 211: Degré d'atteinte sur les différents tronçons analysés dans l'étude détaillée.

## 16. Installations dont les détenteurs seront vraisemblablement appelés à prendre des mesures d'assainissement et types de mesures proposées

### 16.1 Liste des installations nécessitant potentiellement un assainissement

Le Tableau 51 donne une vue d'ensemble des installations traitées dans le cadre de cette étude en indiquant le résultat des évaluations et la nécessité d'assainissement.

Le potentiel écologique, ou « état écologique potentiel », provient de la définition et de l'élaboration qui en est faite dans la planification stratégique des revitalisations. La méthodologie est décrite au chapitre 3.3. Pour connaître de façon plus détaillé le contexte de la mise en œuvre de cette méthodologie, nous renvoyons à la planification stratégique des revitalisations. Par ailleurs, nous renvoyons à l'étude pilote (Jaeggi, 2013) pour la nécessité d'assainissement et la proposition de mesures pour deux installations sur la Jogne (gravière Rime (FR.JOG.9) et barrage de Montsalvens (FR.JOG.4)).

Tableau 51: Nécessité d'assainissement des installations et potentiel écologique des tronçons. Le potentiel écologique des tronçons qui ne sont pas à assainir est mentionné, de façon indicative, en grisé.

Atteinte	Installation	Potentiel écologique	Nécessité d'assainir	
Atteinte grave	Atteinte très prononcée	FR.SAA.1	Important	Oui
		FR.SAA.2	Important	Oui
		FR.SAA.9	Important	Oui
		FR.SAA.13	Important	Oui
		FR.GLA.3	Important	Oui
		FR.GLA.4	Important	Oui
		FR.GLA.5	Important	Oui
		FR.JOG.4	Important	Oui
		FR.JOG.9	Important	Oui
		FR.TAV.2	Moyen	Oui
Atteinte prononcée	FR.BRO.1	Important	Oui	
	FR.TAT.2	Important	Oui	
Atteinte notable	FR.JAV.1	Moyen	Oui	
	FR.ALB.2	Important	Non	
Atteinte faible	FR.GER.7	Important	Non	
	FR.SAA.4	Important	Non	
	FR.TAN.3	<i>Pourvoyeur de sédiments</i>	Non <sup>18</sup>	
	FR.GOT.4	Moyen	Non	
Atteinte nulle	FR.JAV.2	Important	Non	
	FR.MAR.1	<i>Pourvoyeur de sédiments</i>	Non	
	FR.PGL.1	Moyen à important	Non	
	FR.GLA.1	Important	Non	
	FR.GLA.2	Important	Non	
	FR.BIB.1	Important	Non	
	FR.BIB.2	Important	Non	
	FR.ZLE.1	Moyen	Non	

<sup>18</sup> Nous estimons cependant opportun de restituer la totalité du volume extrait dans la prise à la Tana en aval (§ 10.5)



La Figure 212, ci-après, représente les installations causant atteinte grave et devant être assainies, ainsi que les tronçons altérés.

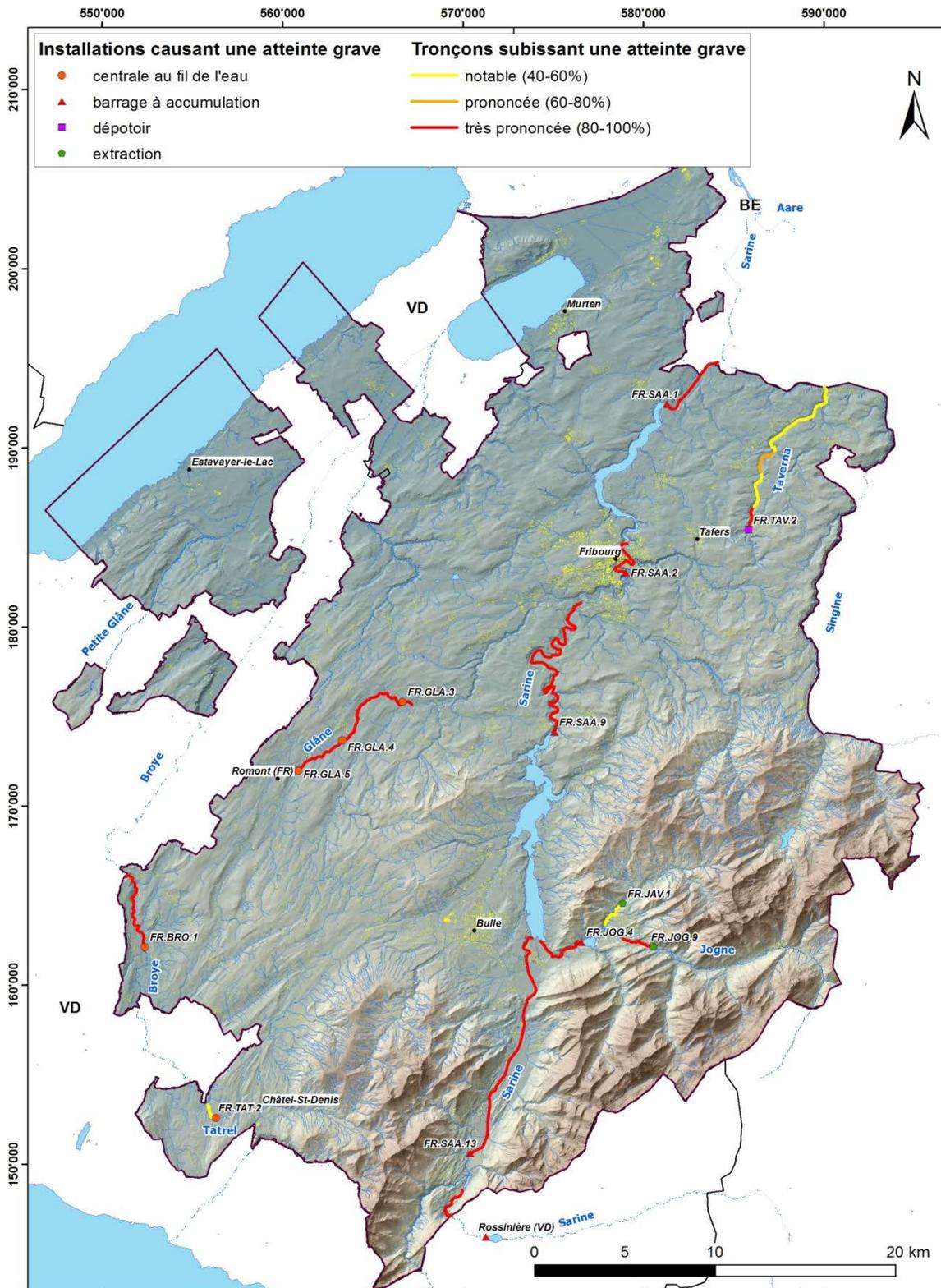


Figure 212 Installations causant une atteinte et tronçons subissant une atteinte



## 16.2 Potentiel écologique des cours d'eau à assainir

Le potentiel écologique des cours d'eau à assainir est la plupart du temps bon, sauf pour certains tronçons de la Jogne et de la Taverna, ainsi qu'une partie de la Sarine en ville de Fribourg. Le potentiel écologique est pris en compte dans Tableau 51 p. 251 et sur la Figure 213 ci-après. Pour la méthodologie du potentiel écologique, nous renvoyons au § 3.3.

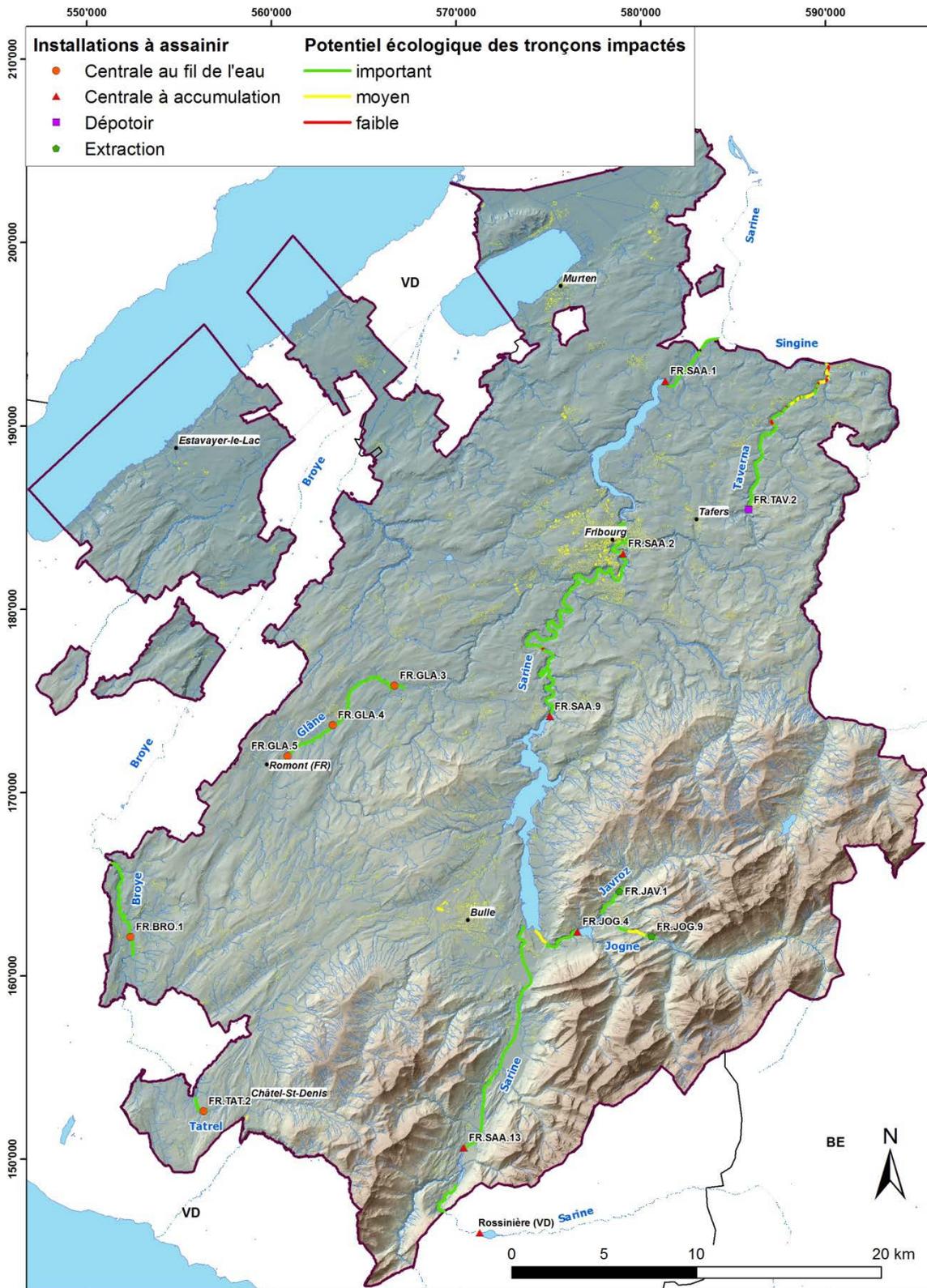


Figure 213 Installations à assainir et potentiel écologique des cours d'eau impactés.

### 16.3 Faisabilité des mesures (excepté la Sarine)

Dans les tableaux suivants (52 et 53), une évaluation des installations concernant la faisabilité des mesures d'assainissement envisageables est faite selon le chapitre 3.10 de Schälchli et Kirchofer (2012). Pour la Sarine, nous renvoyons au § 10.7.3.4, § 10.7.4.4, § 10.7.5.4 et § 10.7.6.4 où ces aspects sont abordés en détails.

Tableau 52: Centrales au fil de l'eau et avec dérivation

CE	Ouvrage	Variante	Description	Score	
Broye	FR.BRO.1	Var0	En l'état	5	
		Var1	Réalisation d'une encoche	16	
		<b>Var2</b>	<b>Réalisation d'une encoche + préexcavation faible</b>	<b>19</b>	
		Var3	Réalisation d'une encoche + préexcavation importante	11	
Glâne	FR.GLA.5	Var0	En l'état	13	
		Var1	Suppression du seuil	14	
		<b>Var2</b>	<b>Réalisation d'une encoche</b>	<b>15</b>	
		Var3	Mise en place d'une vanne gonflable	14	
	FR.GLA.4	Var0	En l'état	9	
		<b>Var1</b>	<b>Suppression du seuil</b>	<b>11</b>	
		<b>Var2</b>	<b>Remise en état et/ou automatisation de la vanne</b>	<b>11</b>	
	FR.GLA.3	Var0	En l'état	6	
		<b>Var1</b>	<b>Suppression du seuil</b>	<b>13</b>	
		Var2	Mise en place d'une nouvelle vanne	9	
		Var3	Remise en état de la vanne existante	5	
	FR.GLA.1	Aucune nécessité d'assainissement			
	FR.GLA.2	Aucune nécessité d'assainissement			
Bibera	FR.BIB.1	Aucune nécessité d'assainissement			
	FR.BIB.2	Aucune nécessité d'assainissement			
Ruisseau de Marais	FR.MAR.1	Aucune nécessité d'assainissement			
Petite Glâne	FR.PGL.1	Aucune nécessité d'assainissement			
Tâna	FR.TAN.3	Aucune nécessité d'assainissement			
Ledeubach	FR.ZLE.1	Aucune nécessité d'assainissement			

Tableau 53: Dépotoirs à alluvions

Cours d'eau	Ouvrage	Variante	Description	Score
Taverna	FR.TAV.2	Var0	En l'état : attente d'un nouvel état d'équilibre	11
		Var 1	Suppression des blocs d'enrochement	11
		Var 2	<b>Restitution de gravier en aval</b>	<b>8</b>
Javro	FR.JAV.1	Var0	Prélèvement annuel de 2'800 m <sup>3</sup>	10
		Var1	<b>Aucun prélèvement</b>	<b>21</b>
		Var2	Prélèvement annuel de 1'500 m <sup>3</sup>	21
Jogne	FR.JOG.9	Var0	Prélèvement de 600 m <sup>3</sup> /an	9
		Var1	Aucun prélèvement	16
		Var2	Prélèvement de 300 m <sup>3</sup> /an	17

#### 16.4 Coûts et potentiel de valorisation des mesures

L'estimation du potentiel de valorisation des mesures concernant le charriage est établie selon la Fig. 13 de Schälchli et Kirchofer (2012). Nous proposons ci-dessous (Tableau 54) une synthèse du potentiel de valorisation des tronçons selon les variantes d'assainissement les plus vraisemblables au stade actuel des investigations.

Tableau 54: Potentiel de valorisation concernant le charriage

Cours d'eau	de à		état actuel		état après mesure	
	km	km	degré de gravité des atteintes	état du cours d'eau par rapport au charriage	état du cours d'eau par rapport au charriage	potentiel de valorisation concernant le charriage
Broye	57.400	53.100	0-20%	excellent	excellent	0
	53.100	46.000	80-100%	mauvais	excellent	4
Gottéron	0.000	7.510	0-20%	excellent	excellent	0
Hongrin	8.400	6.424	20-40%	bon	bon	0
	6.424	0.000	0-20%	excellent	excellent	0
Javroz	5.435	1.850	0-20%	excellent	excellent	0
	1.850	0.000	40-60%	moyen	excellent	2
Petite Glâne	15.675	10.400	0-20%	excellent	excellent	0
	7.450	6.800	0-20%	excellent	excellent	0
	5.200	3.000	0-20%	excellent	excellent	0
Sarine	86.500	81.450	80-100%	mauvais	- <sup>19</sup>	-
	81.450	79.085		Lac Lessoc		
	79.085	74.000	80-100%	mauvais	excellent	4
	74.000	73.000	60-80%	médiocre	excellent	3
	73.000	70.500	40-60%	moyen	excellent	2
	70.500	67.225	20-40%	bon	excellent	1
	67.225	65.000	0-20%	excellent	excellent	0
	65.000	51.550		Lac de la Gruyère		
51.550	38.000	80-100%	mauvais	excellent	4	

<sup>19</sup> Ce tronçon est traité par le canton de Vaud.



Cours d'eau	de à		état actuel		état après mesure	
	km	km	degré de gravité des atteintes	état du cours d'eau par rapport au charriage	état du cours d'eau par rapport au charriage	potentiel de valorisation concernant le charriage
	38.000	36.000	80-100%	mauvais	excellent	4
	36.000	32.800	20-40%	bon	excellent	1
	32.800	30.000		Lac de Péroilles		
	30.000	27.650	80-100%	mauvais	bon	3
	27.650	26.250	80-100%	mauvais	bon	3
	26.250	14.350		Lac de Schiffenen		
	14.350	10.085	80-100%	mauvais	moyen	2
Glâne	38.000	33.000	40-60%	moyen	--	--
	33.000	30.000	80-100 %	mauvais	excellent	4
	30.000	25.000	80-100 %	mauvais	excellent	4
	25.000	22.000	80-100 %	mauvais	bon	3
	22.000	16.500	80-100 %	mauvais	bon	3
	16.500	13.700	0-20%	excellent	excellent	0
	13.700	11.900	0-20%	excellent	excellent	0
	11.900	8.400	0-20%	excellent	excellent	0
	8.400	3.100	0-20%	excellent	excellent	0
3.100	0	0-20%	excellent	excellent	0	
Taverna	16.500	12.300	80-100 %	mauvais	mauvais	
	12.300	10.900	80-100 %	mauvais	mauvais	0
	10.900	8.000	40-60%	moyen	excellent	2
	8.000	6.000	60-80%	médiocre	excellent	3
	6.000	0	40-60%	moyen	bon	1
Bibera	18.500	16.900	80-100 %	mauvais	bon	3
	16.900	14.800	80-100 %	mauvais	bon	3
	14.800	13.700	80-100 %	mauvais	bon	3
	13.700	11.800	80-100 %	mauvais	bon	3
	11.800	9.400	80-100 %	mauvais	bon	3
	9.400	6.400	80-100 %	mauvais	bon	3
	6.400	2.200	80-100 %	mauvais	bon	3
	2.200	0	80-100 %	mauvais	bon	3
Jogne	17.200	15.800	0-20%	excellent	excellent	0
	15.800	8.500	0-20%	excellent	excellent	0
	8.500	7.500	80-100 %	mauvais	bon	3 <sup>20</sup>
	7.500	6.500	80-100 %	mauvais	bon	3 <sup>20</sup>
	6.500	4000	80-100 %	Lac de Montsalvens	--	--
	4000	0	80-100 %	mauvais	bon	3 <sup>20</sup>

<sup>20</sup> Le potentiel de valorisation pour le régime de charriage uniquement n'a pas été réalisé dans le cadre de l'étude pilote. Il s'agit ici d'une approximation.



## 16.5 Délai des assainissements

Les délais et l'urgence de l'assainissement des grands barrages sur la Sarine ont été déterminés dans le cadre du groupe de travail sur les grandes installations. Nous reprenons ci-dessous un tableau du rapport grandes installations partie C *Synthèse*.

Tableau 55 Délais d'assainissement des barrages sur la Sarine

Partie d'installation	Domaine	Complexité	Priorité	Délai de planification	Délai de réalisation	Coordination principale	Remarque
Lessoc	Migration piscicole	1	1	2017-2018	2020	Eclusées	
	Eclusée	1	1	2017-2018	2020	Migration	
	Charriage	1	1	2017-2018	2020	-	
Rossens	Migration piscicole	2	2	2025	2030	Eclusées	
	Charriage	1	2	2017-2018	2020	-	En lien avec la nécessité de crue artificielle Petite Sarine ; délai plus court que les autres thèmes semble réaliste.
Hauterive	Migration piscicole	2	2	2020	2025	Eclusées	
	Eclusées	2	2	2020	2025	Migration	
Maigrauge	Migration piscicole	2	3	2017-2018	2020		Décision déjà prise, délai plus court que les autres thèmes.
	Charriage	1	3	2025	2030		Synergie avec le projet de revitalisation de la Sarine en ville de Fribourg
Oelberg	Eclusées	2	3	2025	2030		Synergie avec le projet de revitalisation de la Sarine en ville de Fribourg
Schiffenen	Migration piscicole	2	1	2017-2018	2020	Eclusées	Réalisable à ce délai sous réserve de connaître déjà suffisamment la mesure éclusées
	Eclusées	2	1	2020	2025	Migration	L'assainissement des éclusées à Schiffenen est une priorité mais sa réalisation risque d'être retardée par la complexité du projet.
	Charriage	2	2	2020	2025	Eclusées	L'assainissement du charriage dépendra du choix de la variante d'assainissement des éclusées.

Pour les installations situées sur les autres cours d'eau, nous proposons les délais de réalisation suivants. A nouveau, une coordination avec la planification des revitalisations est importante pour plusieurs ouvrages. Pour certains ouvrages également concernés pour un assainissement de la migration piscicole, des projets d'assainissement combinés devront être élaborés.

Tableau 56 Délais d'assainissement pour les autres installations

Cours d'eau	Installation	Délai de planification	Délai de réalisation	Coordination principale	Remarque
Broye	FR.BRO.1	2016	2020	Migration piscicole	
Glâne	FR.GLA.3	2016	2020	Revitalisation (+migration)	Un assainissement des installations n'est pas utile tant que les sources de charriage ne sont pas rétablies sur la Glâne supérieure, par des revitalisations
	FR.GLA.4	2020	2025	Revitalisation (+migration)	
	FR.GLA.5	2020	2025	Revitalisation (+migration)	
Jogne	FR.JOG.9	2015	2016		
Javroz	FR.JAV.1	2015	2016		
Taverna	FR.TAV.2	2025	2030	Revitalisation	Protection contre les crues du tronçon situé à l'aval
Tatrel	FR.TAT.2	2020	2025	Migration piscicole	



## 17. Bibliographie

- BWG (2003). "Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten." Berichte des BWG, Serie Wasser, Nr. 4. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern.
- beffa tognacca gmbh (2012). Sanierung Geschiebehaushalt im Einzugsgebiet der Muota. Zwischenbericht. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Brune, Gunnar M. (1953). Trap Efficiency of Reservoirs. Transactions of American Geophysical Union, Vol. 34, No. 3.
- e-dric.ch et al. (2011). Gestion des purges du Lac du Vernex à Rossinière. Notice d'impact sur l'environnement. Rapport technique.
- e-drich.ch (2013). Gestion des crues de la Sarine par les aménagements du Groupe E. Faisabilité technique, éléments clés et scénarios probables. Fribourg, Groupe E.
- ETEC Sàrl (2011). La Broye – Campagne 2010. Etude de l'état sanitaire des cours d'eaux du canton de Fribourg. Etudes de ETEC Sàrl correspondants sur: Le Gottéron – Campagne 2007 (2008); La Jogne – Mandat 2007 / Campagne 2008 (2009); La Petite Glâne – Campagne 2005 (2006); La Haute Sarine – Campagne 2009 (2010); La Basse Sarine – Campagne 2008 (2009); La Gérine – Mandat 2007 / Campagne 2008 (2009)
- Fehr, R. (1987). "Geschiebeanalysen in Gebirgsflüssen." Mitt. Nr. 92, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.
- Flussbau AG (2007). Sense und Saane. Studie über den Geschiebehaushalt. Technischer Bericht.
- Flussbau AG SAH, (2011), "Geschiebehaushalt Einzugsgebiet Sihl – Limmat. Sanierungsbericht". Im Auftrag der Kantone Schwyz, Zug, Zürich und Aargau.
- Gertsch, E. (2003a). BAFU Geschiebemessnetz, Rotenbach, Plaffeien (FR). BAFU (non publié).
- Gertsch, E. (2003b). BAFU Geschiebemessnetz, Schwändlibach, Plaffeien (FR). BAFU (non publié).
- Grandin, A. (2007). La Sarine à l'aval du barrage de Schiffenen. Etat actuel et concept de mesures d'aménagement. EPFL, Master d'étude avancée en Gestion et ingénierie des ressources en eau.
- GREN Sàrl (2013). Renaturation des Eaux. 1<sup>er</sup> diagnostic environnemental. Rapport technique. Direction générale de l'environnement, Canton de Vaud.
- Groupe E (1996 – 2010). Rapport Bathymétrie du Lac de la Gruyère (1996), Lac de Pérolles (2007), Lac du Vernex (2010), Schiffenensee (2007). Rapport technique.
- Guhl, A. (2013). Etude sur la zone alluviale et le charriage à Stersmühle. Impact de l'allongement de la portée du pont. Travail de CAS en revitalisation.
- Hunziker, R. et Lehmann, C. (2013). Abschätzung der mittleren jährlichen Geschiebelieferung in Vorfluter. Praxishilfe. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Jaeggi, M. (1999). Expertise sur le charriage de la Gérine. Rapport technique.



- Jaeggi, M. (2002). Petite-Sarine. Etude sur l'incidence du barrage de Rossens sur la morphologie fluviale, le charriage et l'évolution future de cette zone alluviale. Rapport technique.
- Jaeggi, M. IDEALP, GREN (2013). Assainissement du charriage de la Jogne. Rapport intermédiaire. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- Meyer-Peter, E., und Müller, R. (1948). "Formulas for Bed-Load-Transport." Second Meeting IAHSR, Appendix 2, Stockholm, 39-64.
- Hütte, M., Niederhauser, P. (1998). Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse. Ecomorphologique niveau R (région). Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne, 1998.
- Parker, G. (1979). "Hydraulic Geometry of Active Gravel Rivers." Proc. ASCE, J. of Hydr. Div. 105(HY9), 1185-1201.
- PERSS Ingénieurs-Conseils SA (2009): Le Javroz et ses affluents. Rapport technique.
- Schälchli, Abegg + Hunziker (2005). Geschiebe- und Schwebestoffproblematik in Schweizer Fließgewässern.
- Schälchli U., Kirchofer A. (2012): Assainissement du régime de charriage – Planification stratégique. Un module de l'aide à l'exécution Renaturation des eaux. Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique n° 1226: 71 p.
- Shields, A. (1936). "Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung." Mitt. Nr. 87, Versuchsanstalt für Wasser- und Schiffbau, Berlin.
- Smart, G.M., und Jäggi, M.N.R. (1983). "Sedimenttransport in steilen Gerinnen." Mitt. Nr. 64, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.
- Yalin, M.S. (1992). River Mechanics, Pergamon Press, Oxford.
- Zarn, B., Oplatka, M., Pellandini, S., Mikos, M., Hunziker, R., und Jäggi, M. (1995). "Geschiebehaushalt Alpenrhein." Mitt. Nr. 139, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.