

Analyse des effets des éclusées sur le fonctionnement hydro-sédimentaire des cours d'eau : le cas de la Moesa (GR/TI) et de la Morobbia (TI)

Laura Bernasconi

Sous la direction du Prof. Emmanuel Reynard
et du Prof. Stuart N. Lane
Expert : David Theler



Photo de couverture

La Moesa à Cabbio (GR) pendant le débit plancher

Sauf mention contraire, toutes les illustrations sont des auteurs

Table des matières

TABLE DES FIGURES	VI
RESUME	XVII
ABSTRACT	XVIII
ABREVIATIONS	XIX
REMERCIEMENTS	XX

I^e PARTIE : INTRODUCTION

1. Introduction	3
1.1. Contexte de l'étude	3
1.2. Historique et état des connaissances	7
1.2.1 Recherches sur les effets du marnage et les projets d'assainissement réalisés en Suisse	8
1.2.2 Recherches menées au Sud des Alpes	9
1.2.3 Bases légales	9
2. Problématique	12
2.1. Question générale	12
2.2. Objectifs et hypothèses de travail	13
2.3. Plan de la recherche	14

II^e PARTIE : CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIQUE

3. La géomorphologie fluviale	17
3.1. Les écoulements de surface	17
3.1.1. Les régimes hydrologiques	17
3.1.2. Les réseaux hydrographiques	19
3.1.3. La vitesse du courant et le comportement de l'écoulement	20
3.2. Le système fluvial : définition et fonctionnement	21
3.3. L'action des eaux courantes sur les sédiments : le processus d'érosion, de transport et de sédimentation	23
3.3.1. La dynamique sédimentaire dans les lits mobiles : notions générales	24
3.3.2. Le transport sélectif des sédiments	25
3.3.3. L'usure	27
3.4. Tracé, forme des chenaux mobiles et comportement	28
3.4.1 Les styles fluviaux	28
3.4.2 Les variables de réponse ou d'ajustement	29

4. L'utilisation et l'aménagement du système fluvial	31
4.1. Les impacts directs	31
4.1.1. Les aménagements des cours d'eau	31
4.1.2. Les modifications du débit : le développement de l'hydroélectricité	32
4.1.3. Le marnage et ses effets	34
4.2. Les impacts indirects	37
5. Présentation de la zone d'étude	38
5.1. Situation géographique	38
5.1.1. La Moesa	38
5.1.2. La Morobbia	38
5.2. Contexte géologique	40
5.2.1. Le Tessin dans l'orogénèse alpine	40
5.2.2. Le Val Mesolcina	41
5.2.3. Le Val Morobbia	44
5.3. Contexte géomorphologique	46
5.3.1. Le Val Mesolcina	46
5.3.2. Le Val Morobbia	48
5.4. Les conditions climatiques	49
5.4.1. Cadre général : le climat du Sud des Alpes	49
5.4.2. Conditions climatiques pendant la période 2010/2011	54
5.5. Contexte hydrologique	54
5.5.1. La Moesa	55
<i>L'hydrologie naturelle</i>	55
<i>Les interventions anthropiques au cours du XIX^e et du XX^e siècle</i>	55
5.5.2. La Morobbia	61
<i>L'hydrologie naturelle</i>	61
<i>Les interventions anthropiques au cours du XIX^e et du XX^e siècle</i>	61
5.6. Synthèse	62
6. Cadre méthodologique	63
6.1. Choix des stations d'étude le long des cours d'eau	63
6.1.1. La Moesa	63
6.1.2. L Morobbia	64
6.2. L'approche écomorphologique	65
6.2.1 Généralités	65
6.2.2 Principes de la méthode	65
6.2.3. Mise en œuvre	68
6.3. Analyses hydrologiques	68

6.4. Acquisition des données climatiques	71
6.5. Méthodes pour l'analyse de l'activité sédimentaire	72
6.5.1. Principes de la méthode	72
<i>Analyse de terrain</i>	72
<i>Analyse quantitative de l'activité sédimentaire à l'aide du logiciel Matlab</i>	73
6.5.2. Mise en œuvre	74
6.6. Méthodes pour l'analyse du colmatage	76
6.6.1 Principes de la méthode	76
6.6.2. Mise en œuvre	79

III^e PARTIE : PRESENTATION, ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

7. Résultats	83
7.1. L'état écomorphologique	83
7.1.1. La Moesa	83
7.1.2. La Morobbia	91
7.2. Le fonctionnement hydrologique	95
7.2.1 La Moesa	96
<i>Station de mesure de Soazza (GR)</i>	96
<i>Station de mesure de Cabbio (GR)</i>	96
<i>Station de mesure de Lostallo (GR)</i>	100
<i>Station de mesure de Lumino/Sassello (TI)</i>	104
7.2.2. La Morobbia	108
7.2.3. Synthèse	114
7.3. L'activité sédimentaire	119
7.3.1 La Moesa	119
<i>Campagne automnale</i>	119
A) Station de Cabbio	119
B) Station de Cama/Lostallo	121
C) Station de Grono	122
<i>Campagne hivernale</i>	122
A) Station de Cabbio	122
B) Station de Cama/Lostallo	124
C) Station Grono	125
<i>Campagne du printemps</i>	125
A) Station de Cabbio	126
B) Station de Cama/Lostallo	127
C) Station de Grono	127
D) Station supplémentaire de Lumino/Sassello	127

7.3.2 La Morobbia	127
<i>Campagne automnale</i>	127
<i>Campagne hivernale</i>	129
<i>Campagne du printemps</i>	131
7.3.3 Synthèse	132
7.4. Le colmatage	132
7.4.1. La Moesa	132
7.4.2 La Morobbia	134
7.4.3 Synthèse	135
8. Interprétation et analyse des résultats	136
<hr/>	
8.1. La Moesa	136
8.1.1. Caractérisation du régime hydrologique	136
8.1.2 Caractérisation de l'activité sédimentaire	139
8.1.3. Caractérisation du colmatage	139
8.2. La Morobbia	140
8.2.1. Caractérisation du régime hydrologique	140
8.2.2. Caractérisation de l'activité sédimentaire	141
8.2.3. Caractérisation du colmatage	141
8.3. Synthèse par unité fluviale	142
8.4. Le rôle de la structure du cours d'eau et le type d'exploitation hydroélectrique sur les effets envisagés	149
8.5. L'impact de l'exploitation à éclusées le long de la Moesa et de la Morobbia : quelles solutions pour l'avenir ?	150
8.6. Comparaison avec d'autres études	154
IV^e PARTIE : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE	
9. Conclusions	157
<hr/>	
10. Apports et limites de la recherche	160
<hr/>	
11. Perspectives de recherche	161
<hr/>	
Références bibliographiques	163

Table des figures

Figure 1.1 – Distribution des principales centrales hydroélectriques sur le territoire suisse (Source : Limnex, 2001).....	3
Figure 1.2 – La Moesa à Cabbio (GR), le 26 octobre 2010, pendant le débit plancher (à 09:30) (a) et pendant le débit d'écluse (à 12:45) (b).....	5
Figure 1.3 – Caractéristique d'un régime hydrologique à éclusées (modifié d'après Baumann et Klaus, 2003).....	6
Figure 1.4 – a) Au premier plan, une partie de la surface du lit qui était mouillée pendant le débit d'écluse et qui est restée à sec pendant le débit plancher. Les variations de la largeur du lit mouillé provoquent la formation des zones de marnage (tidal zones) (Brooker, 1981) qui provoquent l'échouage des organismes (b). b) L'image représente une zone qui a été mise à sec pendant le débit plancher, où sont visibles de nombreux individus de Trichoptères.....	7
Figure 3.1 – Régimes hydrologiques de la Suisse (d'après la classification de Aschwanden et Weingartner, 1985).....	19
Figure 3.2 – Vitesses et types des écoulements des cours d'eau. L'image (a) montre un exemple de flux laminaire le long de la Moesa (mouille) (Golena Rosera, GR). L'image (b) illustre un exemple de flux turbulent (seuil) à Cama (GR). D'après les images, nous pouvons percevoir les différences de vitesse d'écoulement et de granulométrie.....	21
Figure 3.3 - Séquence de seuils et mouilles : la profondeur et la vitesse d'écoulement changent en influençant la granulométrie de la section fluviale (d'après Amoros et Petts, 1993).....	21
Figure 3.4 – La zonation de Schumm (1977).....	22
Figure 3.5 – Le lit mineur et moyen (ou bande active) de la Moesa à Leggia (GR).....	23
Figure 3.6 – Type de transport de la charge solide (modifié d'après Charlton, 2009).....	24
Figure 3.7 – La courbe de Hjulstrøm (1935). Une échelle logarithmique est utilisée pour les deux axes (tirée de Morard et al., 2009).....	25
Figure 3.8 – Morphologie des lits fluviaux (d'après Amoros et Petts, 1993).....	28
Figure 3.9 - Restauration localisée d'un tronçon de la Thur à Schafftäli (TG). Dans la partie élargie est visible un dépôt de la charge de fond, dû à une réduction locale des forces tractrices résultant de l'élargissement du chenal (Malavoi et Bravard, 2010 ; Photo : C. Hermann, BHAtteam, Frauenfeld)..	29
Figure 4.1 – Pascoletto (GR), tronçon de la Moesa renaturé en 2001 (OFEG, 2004) (Photo : F. Nollo, Cama).....	32
Figure 4.2 (a, b) – Sédimentation et exhaussement du lit à cause d'un débit liquide insuffisant : le cas de la Borgne d'Arolla (Arolla, VS).....	33

Figure 4.3 – a) Barrage hydroélectrique au fil de l’eau (le Rhône à Lavey, VS). b) Après le barrage, le Rhône est à débit résiduel, la vitesse d’écoulement est nettement inférieure et le transport des sédiments limité, ce qui favorise le colmatage.....	34
Figure 4.4 - La Morobbia (TI), le 27 octobre 2010, pendant le débit plancher (à 07:45) (a) et pendant le débit d’écluse (à 08:30) (b).....	35
Figure 4.5 - Dépôt de poissons dus à l’assèchement du lit (tirée de Consorzio D.R.I.F.T., 2011).....	35
Figure 5.1 – Localisation géographique des deux cours d’eau étudiés.....	39
Figure 5.2 - Principales unités tectoniques présentes dans le val Mesolcina (extrait de la carte tectonique de la Suisse 1 : 500’000 GK500-Tekto).....	43
Figure 5.3 - Principales unités tectoniques présentes dans le val Morobbia (extrait de la carte tectonique de la Suisse 1 : 500’000 GK500-Tekto).....	45
Figure 5.4 – a) Le Lac de Cama (GR), d’origine glaciaire (Photo F. Nollo, Cama) (L’illustration est reproduite avec l’autorisation de l’auteur) ; b) Vue sur le Val Mesolcina (à Soazza, GR), caractérisé par un profil en auge. À gauche est visible un cône de déjection (à Soazza).....	47
Figure 5.5 - Profil en long de la Moesa.....	47
Figure 5.6 - Dernier maximum glaciaire au Sud des Alpes (extrait de la carte de la Suisse pendant le dernier maximum glaciaire (LGM), GK500-LGM). Cette carte représente la plus grande extension des glaciers de la Suisse lors de la dernière période glaciaire, il y a environ 24 000 ans.....	48
Figure 5.7 - Profil en long de la Morobbia.....	49
Figure 5.8 - Distribution des précipitations annuelles moyennes au Tessin pour la période 1961-1990. Source : Cotti et al. (1990 : 157).....	50
Figure 5.9 – Précipitations moyennes mensuelles pour les stations situées dans la zone d’étude (d’après les données de MétéoSuisse, pour la période 1961-1990). Pour la localisation des stations, voir fig. 5.11.....	51
Figure 5.10 - Paramètres climatiques moyens pour la période 1961-1990 pour quelques stations proches des deux vallées (d’après les données MétéoSuisse). Pour la localisation des stations, voir fig. 5.11.....	51
Figure 5.11 - Localisation des stations climatiques et hydrologiques situées à proximité des deux vallées (créée à partir des données MétéoSuisse).....	52
Figure 5.12 - Climogramme pour la station de San Bernardino (GR) (données MétéoSuisse, période 1961-1990).....	53
Figure 5.13 - Climogramme pour la station de Grono (GR) (données MétéoSuisse, période 1961-1990).....	53
Figure 5.14 - Climogramme pour la station de Magadino/Cadenazzo (TI) (données MétéoSuisse, période 1961-1990).....	53
Figure 5.15 – Précipitations journalières des principales stations de mesure présentes dans la zone d’étude (d’après les données de MétéoSuisse).....	54

Figure 5.16 - Débit moyen mensuel de la Moesa d'après les données enregistrées par la station de Lumino/Sassello (d'après les données de l'annuaire hydrologique de la Suisse, 2008 - OFEV, 2009). Pour la localisation de la station voir la figure 5.11.....	55
Figure 5.17 - Réseau hydrographique de la Moesa aménagé pour la production hydroélectrique entre le lac d'Isola et Lostallo (modifié d'après la carte nationale de la Suisse au 1 : 25'000).....	57
Figure 5.18 – Point de restitution des eaux turbinées de la centrale de Soazza.....	57
Figure 5.19 – Point de restitution de la centrale de Lostallo (GR).....	58
Figure 5.20 - Réseau hydrographique de la Moesa aménagé pour la production hydroélectrique entre Lostallo et San Vittore (modifié d'après la carte nationale de la Suisse au 1 : 25'000).....	58
Figure 5.21 – Point de restitution des eaux turbinées par la centrale de Grono (GR).....	59
Figure 5.22 – Point de restitution des eaux de la centrale souterraine de San Vittore (GR).....	59
Figure 5.23 – Centrale au fil de l'eau le long de la Moesa, à Piani di Verdabbio (GR).....	60
Figure 5.24 - Le système hydroélectrique le long de la Morobbia (modifiée d'après Lombardi, 1971 et d'après la carte nationale de la Suisse au 1:25'000).....	61
Figure 5.25 – La centrale de l'Aziende Municipalizzate Bellinzona (AMB) et son point de restitution.....	62
Figure 6.1 – Localisation des quatre stations d'étude le long de la Moesa.....	64
Figure 6.2 – Exemples de renforcement de pied de berge et d'aménagement du lit (Moesa à Cabbio, GR). Dans ce cas, pendant le débit plancher, cet aménagement à gros blocs correspond à un obstacle à la libre circulation des poissons.....	66
Figure 6.3 – Courbes pour la détermination de l'espace nécessaire pour une variabilité de la largeur du lit, prononcée, limitée ou nulle (d'après Hütte et Niederhauser, 1998).....	66
Figure 6.4 – La station hydrologique de Soazza (a) et la station de Giubiasco (b).....	69
Figure 6.5 - Courbe de tarage des hauteurs d'eau en fonction des débits utilisée pour la calibration des deux sondes HyMADD.....	70
Figure 6.6 (a, b) – Clichés pris avant et après le débit d'écluse. Nous pouvons remarquer l'enregistrement des variations de l'activité sédimentaire imposées par le débit d'écluse.....	72
Figure 6.7 – En haut sont visibles les deux clichés pris pendant le travail de terrain, avant et après le débit d'écluse. Après la digitalisation et la quantification de l'activité sédimentaire, le logiciel Matlab crée d'autres images qui montrent le taux de changement du lit.....	74
Figure 6.8 – Matériaux utilisés pour l'évaluation du transport de la charge de fond. Cette technique reste purement qualitative.....	75
Figure 6.9 – Classe 1, à colmatage absent (d'après Schälchli, 2002).....	77
Figure 6.10 – Classe 2, à faible colmatage (d'après Schälchli, 2002).....	77
Figure 6.11– Classe 3, à colmatage moyen (d'après Schälchli, 2002).....	78

Figure 6.12– Classe 4, à fort colmatage (d’après Schälchli, 2002).....	78
Figure 6.13 – Classe 5, à colmatage complet (d’après Schälchli, 2002).....	78
Figure 7.1 - Représentation de l’état écomorphologique de la Moesa, du dernier point de restitution à la confluence avec le Ticino. On note une forte présence d’infrastructures anthropiques le long du tronçon non naturel/artificiel. Les numéros indiquent les différents tronçons envisagés.....	84
Figure 7.2 - a) Le tronçon 10 (Pascoletto), à Grono (GR), renaturé en 2001 (OFEG, 2004). Après la revitalisation, ce tronçon montre une combinaison paysagère nettement diversifiée. Cette amélioration géomorphologique favorise le développement de la faune et de la flore alluviale. L’élargissement du cours d’eau a renforcé les processus dynamiques et a permis la formation de bancs et le tressage. b) le tronçon avant l’intervention de 2001 (Photo : tirée de OFEG, 2004).....	85
Figure 7.3 - Le tronçon 22, près de Cabbio (GR), présente une largeur entre les rives suffisante et une variabilité de la largeur du lit mouillé élevée.....	86
Figure 7.4 - Première unité fluviale, située à la confluence avec le Ticino, caractérisée par un état écomorphologique peu compromis.....	86
Figure 7.5 – Le tronçon 18, Golena Rosera (GR). En 1995, des interventions d’amélioration de la dynamique et de renforcement de la rive droite ont été réalisées pour protéger l’autoroute. Cette unité fluviale est désignée comme zone alluviale d’importance nationale (objet n°161, de l’inventaire fédéral des zones alluviales).....	87
Figure 7.6 – La Moesa à Lumino/Sassello (TI) (tronçon 3), présentant un état écomorphologique très atteint. Sur cette image, nous pouvons observer la variabilité nulle de la largeur du lit mouillé.....	87
Figure 7.7 - La Moesa à Roveredo (GR) (tronçon 7) présentant un état écomorphologique “très atteint” (Classe III). A cause de la présence d’un mur de protection, la largeur des rives est nulle.....	88
Figure 7.8 – La Moesa à Grono (GR) (tronçon 9), présentant un état écomorphologique très atteint. Au contraire de la rive droite, la rive gauche n’est pas aménagée.....	88
Figure 7.9 - La Moesa près de Cabbio (GR). La photo montre l’aménagement du lit (seuils) et le renforcement du pied de la berge.....	89
Figure 7.10 - Un des nombreux seuils présents le long du tronçon 19 (736.131/131.917). Cette photo a été prise pendant le débit plancher.....	89
Figure 7.11 - La Moesa à Lostallo (GR) (tronçon 19). Sur ce tronçon, l’état écomorphologique est très atteint, avec un aménagement du lit correspondant à 10-30% de la surface.....	90
Figure 7.12 - Exemple d’intervention le long de la Moesa à Leggia (732.731/124.151) avec la création d’un bassin refuge.....	90
Figure 7.13 - L’état écomorphologique de la Morobbia, du point de restitution des eaux, jusqu’à la confluence avec le Ticino. Les numéros indiquent les tronçons envisagés. Le point de restitution de la centrale AMB est situé sur le tronçon 5, la station hydrologique de mesure se trouve sur le troisième tronçon.....	91
Figure 7.14 - Le premier tronçon de la Morobbia, à la confluence avec le Ticino, est caractérisé par un état écomorphologique très compromis.....	92

Figure 7.15 – Présence d’un seuil artificiel localisé près de la confluence avec le Ticino (720.188/114.843).....	92
Figure 7.16 - Le troisième tronçon, caractérisé par des rives artificielles.....	93
Figure 7.17 – Le passage sous tuyaux du troisième tronçon (720.472/114.368).....	93
Figure 7.18 – Tronçon numéro 4 pendant le débit d’écluse. La structure et les rives, dont la largeur est insuffisante, sont artificielles.....	94
Figure 7.19 – a) Présence d’un seuil anthropique de 80 centimètres considéré comme un obstacle à la libre circulation des poissons (photo prise en juillet 2010) ; b) le seuil a été remplacé par une rampe à enrochement (photo prise en juin 2011) (720.558/114.230).....	94
Figure 7.20 - Le tronçon numéro 5, présentant un état écomorphologique peu compromis.....	95
Figure 7.21 - Présence d’algues pendant la période hivernale (photo prise le 17.02.2011 à Giubiasco).....	95
Figure 7.22 - Précipitations (mm/jour) et débits (m ³ /s) de la Moesa à Cabbio en octobre 2010. Les précipitations ont été enregistrées par la station de Mesocco (GR), localisée à 815 mètres d’altitude (737.900/139.450) (Fig. 5.11).....	97
Figure 7.23 - Précipitations (mm/jour) et débits (m ³ /s) de la Moesa à Cabbio en janvier 2011. Les précipitations ont été enregistrées par la station de Mesocco (GR), localisée à 815 mètres d’altitude (737.900/139.450) (Fig. 5.11).....	98
Figure 7.24 - Précipitations (mm/jour) et débits (m ³ /s) de la Moesa à Cabbio en avril 2011. Les précipitations ont été enregistrées par la station de Mesocco (GR), localisée à 815 mètres d’altitude (737.900/139.450) (Fig. 5.11).....	99
Figure 7.25 - Précipitations (mm/jour) et débits (m ³ /s) de la Moesa à Lostalio en octobre 2010. Les précipitations ont été enregistrées par la station de Mesocco (GR), localisée à 815 mètres d’altitude (737.900/139.450) (Fig. 5.11). Nous pouvons noter la présence d’une corrélation entre les précipitations du 4-5 octobre 2010 et la croissance du débit enregistrée le 5 octobre 2010.....	101
Figure 7.26 - Précipitations (mm/jour) et débits (m ³ /s) de la Moesa à Lostalio en janvier 2011. Les précipitations ont été enregistrées par la station de Mesocco (GR), localisée à 815 mètres d’altitude (737.900/139.450) (Fig.5.11).....	102
Figure 7.27 - Précipitations (mm/jour) et débits (m ³ /s) de la Moesa à Lostalio en avril 2011. Les précipitations ont été enregistrées par la station de Mesocco (GR), localisée à 815 mètres d’altitude (737.900/139.450) (Fig.5.11).....	103
Figure 7.28 - Précipitations (mm/jour) et débits (m ³ /s) de la Moesa à Lumino/Sassello. Les précipitations ont été enregistrées par la station de Bellinzona (TI), localisée à 225 mètres d’altitude (721.060/116.800) (Fig. 5.11). Nous pouvons souligner la présence de deux événements pluvieux importants (04.10.2011 et 30-31.10.2011), qui expliquent les valeurs maximales du débit de la Moesa.....	104

Figure 7.29 - Précipitations (mm/jour) et débits (m ³ /s) de la Moesa à Lumino/Sassello. Les précipitations ont été enregistrées par la station de Bellinzona (TI), localisée à 225 mètres d'altitude (721.060/116.800) (Fig. 5.11). La station de mesure de Bellinzona n'a pas enregistré d'événements pluviométriques ayant eu un impact important sur le débit de la Moesa.....	105
Figure 7.30 - Précipitations (mm/jour) et débits (m ³ /s) de la Moesa à Lumino/Sassello. Les précipitations ont été enregistrées par la station de Bellinzona (TI), localisée à 225 mètres d'altitude (721.060/116.800) (Fig. 5.11). Une différence hydrologique entre la première semaine et les trois dernières est visible.....	107
Figure 7.31 - Le graphique du haut montre les valeurs pluviométriques (mm/jour) du mois d'octobre 2010. En bas, nous pouvons observer les données relatives au débit (m ³ /s) et à la température (°C). Nous pouvons souligner la présence de deux crues naturelles le 5 octobre 2010 et le 31 octobre 2010. Une correspondance entre les pluies et la réponse du cours d'eau est visible.....	109
Figure 7.32 - Le graphique du haut montre les valeurs pluviométriques (mm/jour) enregistrées pendant le mois de janvier 2011, celui du bas illustre les données relatives au débit (m ³ /s) et à la température (°C). Pendant le mois de janvier, les précipitations sont assez faibles et on note l'absence de crues naturelles. Les oscillations sont liées exclusivement à la production hydroélectrique.....	111
Figure 7.33 - Le graphique du haut montre les valeurs pluviométriques (mm/jour) du mois d'avril 2010. En bas, sont présentées les données relatives au débit (m ³ /s) et à la température (°C). Les précipitations sont très faibles. Les valeurs de température, enregistrées par la station de Giubiasco montrent des variations thermiques assez importantes, d'environ 0.5 - 4 °C.....	112
Figure 7.34 - Graphique illustrant en détail les variations de température lors de l'arrivée de la crue artificielle. Les valeurs, recueillies par la station de Giubiasco, montrent un refroidissement important (p.ex. le 14.04.2011).....	113
Figure 7.35 - Courbes des fréquences du rapport Q_{max}/Q_{min}	118
Figure 7.36 - Courbes des fréquences du rapport Q_{max}/Q_{min}	118
Figure 7.37 - Le débit de la Moesa à Cabbio pendant la semaine d'investigation ; les lettres a, b, c, d, montrent la séquence des photos. Nous soulignons la présence de trois importants pics, de l'ampleur de 15.25 m ³ /s, 12.72 m ³ /s et 14.74 m ³ /s. Entre le 27 octobre et le 28 octobre, le débit d'écluse correspond à 3.50 m ³ /s.....	120
Figure 7.38 - Séquence d'images montrant la méthode appliquée pour l'évaluation de la présence du transport solide. La première image (a) a été prise le 26 octobre 2010 à 09:30, avant l'arrivée de la crue artificielle. La deuxième image (b) a été prise le 27 octobre 2010 à 13:00, la troisième image (c) le 28 octobre 2010 à 13:30 et la quatrième image (d) le 29 octobre à 13:30. Nous soulignons la présence, pendant la semaine d'investigation, d'une activité sédimentaire importante. La surface colorée correspond à 0.25 m ²	120
Figure 7.39 - Le débit de la Moesa enregistré à la station de Lostallo entre le 25 octobre et le 1 ^{er} novembre 2010.....	121

Figure 7.40 - Séquence d'images montrant la méthode appliquée pour l'évaluation du transport sédimentaire. La première image (a) a été prise le 26 octobre 2010 à 07:00, avant l'arrivée de la crue artificielle. La deuxième image (b) a été prise le 27 octobre 2010 à 14:30 et la troisième photo (c) le 28 octobre 2010 à 12:30. La présence d'un faible transport sédimentaire est remarquable à la station de Cama.....	121
Figure 7.41 - Séquence d'images prises à Grono montrant la méthode appliquée pour l'évaluation de la présence du transport solide : le 26 octobre 2010 à 06:45 (a), le 27 octobre 2010 à 15:00 (b), le 28 octobre 2010 à 15:30 (c) et le 29 octobre 2010 à 15:30 (d). Pour cette station, nous n'avons pas décelé de transport sédimentaire.....	122
Figure 7.42 - Valeurs de débit enregistrées pendant la semaine du 24-31 janvier 2011 par la station hydrologique HyMADD localisée à Cabbio. Les lettres a, b, c, d indiquent la séquence des photos prises sur le terrain (comparer avec la Fig. 7.43). Les valeurs maximales du débit atteignent 2.69 m ³ /s.....	123
Figure 7.43 - Séquence d'images prises à Cabbio pendant la campagne hivernale montrant l'absence de transport sédimentaire. La première image (a) a été prise le 25 janvier 2011 à 13:00, la deuxième (b) le 26 janvier 2011 à 13:00, la troisième (c) le 27 janvier 2011 à 13:30 et la quatrième (d) le 28 janvier 2011 à 13:30.....	123
Figure 7.44 - Valeurs de débit enregistrées par la station de Lostallo pendant la semaine du 20 au 27 février 2011. Les lettres a, b, c montrent la séquence des photographies prises à Cama, pendant le travail de terrain (comparer avec la Fig. 7.45).....	124
Figure 7.45 - Séquence d'images prises à Cama le 20 février 2011 à 14:00 (a) ; le 21 février 2011 à 14:00 (b) et le 25 février à 14:30 (c). Le transport de la charge de fond est négligeable.....	124
Figure 7.46 - Séquence d'images prises à Grono montrant que le transport de la charge de fond est négligeable. La première image (a) a été prise le 20 février 2011 à 14:30, la deuxième image (b) le 21 février 2011 à 14:30 et la troisième image (c) le 25 février à 11:30.....	125
Figure 7.47 - Valeurs de débit recueillies à Cabbio pendant la semaine du 4 au 10 avril 2011. Nous remarquons la présence de plusieurs pics importants atteignant 15.50 m ³ /s (le 7, le 8 et le 9 avril 2011). Les lettres a, b, c montrent la séquence d'images prises pendant les analyses. Nous soulignons la présence d'un seul "débit plancher continu" le 6 avril 2011 (c).....	126
Figure 7.48 - Séquence de deux images présentant la méthode qualitative appliquée pour l'évaluation du transport sédimentaire à Cabbio entre le 4 et le 5 avril 2011 : la première image (a) montre les grains colorés posés avant l'arrivée de la crue artificielle, la deuxième image (b) a été prise après le débit d'écluse et indique un transport important des grains.....	126
Figure 7.49 - Débit enregistré de la Morobbia pendant la dernière semaine d'octobre 2010. On note la présence d'une crue naturelle entre le 31 octobre et le 1er novembre (comparer avec la Fig. 7.33)...	128
Figure 7.50 - Séquence d'images prises le long de la Morobbia montrant une activité sédimentaire importante. L'image (a) a été prise le 27 octobre 2010 à 07:45, l'image (b) le 27 octobre 2010 à 15:45 et l'image (c) le 29 octobre 2010 à 14:00.....	128
Figure 7.51 - Débit enregistré par la station IST de Giubiasco, pendant la dernière semaine de janvier 2011. Les lettres a, b, c indiquent la séquence d'images (Fig. 7.52).....	129

Figure 7.52 - Séquence d'images montrant une activité sédimentaire le long de la Morobbia avec la disparition de sédiments suite aux éclusées. La photo (a) a été prise le 23 janvier 2011 à 14:00, la photo (b) le 25 janvier à 14:00 et la photo (c) le 26 janvier 2011 à 14:00.....	129
Figure 7.53 - Débit enregistré entre le 21 février et le 14 mars 2011 par la station de Giubiasco (IST). Les lettres a, b, c montrent la séquence de photos prises pendant les analyses du transport sédimentaire.....	130
Figure 7.54 - Séquence d'images mettant en évidence le transport sédimentaire. La première image (a) a été prise le 21 février 2011 à 14:30 ; la deuxième image (b) le 25 février 2011 à 14:30 et la troisième image (c) le 13 mars 2011 à 15:00. Nous soulignons la présence d'érosion et de transport de la charge solide.....	130
Figure 7.55 - Graphique du débit enregistré entre le 4 et le 10 avril par la station de Giubiasco (IST). Les lettres a et b montrent la séquence de photos prises pendant les analyses du transport sédimentaire.....	131
Figure 7.56 - Séquence des deux images, prises le 6 avril 2011, présentant la méthode qualitative mise en pratique pour l'évaluation du transport sédimentaire le long de la Morobbia : la première image (a) montre les grains colorés posés avant l'arrivée de la crue artificielle (le 6 avril 2011 à 08:00), la deuxième image (b) a été prise après le débit d'éclusee (le 6 avril 2011 à 16:00) et indique un transport important des grains. La flèche jaune montre le caillou de référence.....	131
Figure 7.57 - Degré de colmatage rencontré le long de la Moesa. Est présente également l'état écomorphologique de chaque tronçon.....	133
Figure 7.58 - Degré de colmatage rencontré le long de la Morobbia. Est présente également l'état écomorphologique de chaque tronçon.....	134
Figure 8.1 - Valeurs standardisées des indices Q_{max}/Q_{min} et HP_1 à la station de Cabbio. A gauche, nous pouvons remarquer la présence de faibles différences (p.ex. pour le mois de novembre). A droite, le graphique permet de comprendre la surestimation et/ou la sous-estimation provoquée par le rapport Q_{max}/Q_{min} . Si les valeurs sont positives, le rapport Q_{max}/Q_{min} sous-évalué l'ampleur des oscillations (p.ex. de décembre à mars) et vice versa.....	138
Figure 8.2 - Valeurs standardisées des indices Q_{max}/Q_{min} et HP_1 à la station de Lostallo. A gauche, nous pouvons remarquer la présence de faibles différences (p.ex. pour le mois de novembre). A droite, le graphique permet de comprendre la surestimation et/ou la sous-estimation provoquée par le rapport Q_{max}/Q_{min} . Si les valeurs sont positives, le rapport Q_{max}/Q_{min} sous-évalué l'ampleur des oscillations et vice versa.....	138
Figure 8.3 - Valeurs standardisées des indices Q_{max}/Q_{min} et HP_1 à la station de Lumino/Sassello. A gauche, nous pouvons remarquer la présence de faibles différences. A droite, le graphique permet de comprendre la surestimation et/ou la sous-estimation provoquée par le rapport Q_{max}/Q_{min} . Si les valeurs sont positives, le rapport Q_{max}/Q_{min} sous-évalué l'ampleur des oscillations et vice versa.....	138
Figure 8.4 - Valeurs standardisées des indices Q_{max}/Q_{min} et HP_1 à la station de Giubiasco. A gauche, nous pouvons remarquer la présence d'importantes différences. A droite, le graphique permet de comprendre la surestimation et/ou la sous-estimation provoquée par le rapport Q_{max}/Q_{min} . Si les valeurs sont positives, le rapport Q_{max}/Q_{min} sous-évalué l'ampleur des oscillations et vice versa. On note une surévaluation du phénomène en automne et au printemps et une sous-évaluation en hiver.....	141
Figure 8.5 - Résumé de l'état de santé de la première unité fluviale de la Moesa.....	144

Figure 8.6 - Résumé de l'état de santé de la deuxième unité fluviale de la Moesa.....	145
Figure 8.7 - Résumé de l'état de santé de la troisième unité fluviale de la Moesa.....	146
Figure 8.8 - Résumé de l'état de santé de la quatrième unité fluviale de la Moesa.....	147
Figure 8.9 - Résumé de l'état de santé du tronçon à marnage de la Morobbia.....	148
Figure 8.10 - La Moesa à Cabbio (GR), le 10 mars 2011, pendant le débit plancher. Nous pouvons remarquer un débit très faible, avec des conditions compromises.....	151
Figure 8.11 - Le tronçon de Pascoletto (Moesa, GR) à l'amont du village de Grono (732.613/123.449). La ligne blanche indique la surface qui était mouillée pendant le débit d'écluse.....	152

Tableaux

Tableau 4.1 - Effets, du régime à marnage, mentionnés dans les différentes études (d'après Baumann et Klaus, 2003).....	36
Tableau 5.1 - Résumé de la production des centrales présentes le long de la Moesa.....	60
Tableau 6.1 – Points pour chaque critère, la somme des points permettant de déterminer la classe écomorphologique (d'après Hütte et Niederhauser, 1998).....	67
Tableau 6.2 – Détermination des quatre classes écomorphologique (d'après Hütte et Niederhauser, 1998).....	68
Tableau 6.3 - Résumé des principales analyses pour l'évaluation du transport de la charge de fond....	75
Tableau 6.4 – Indicateurs utilisés pour l'évaluation et la détermination du degré de colmatage (d'après Schälchli, 2002).....	77
Tableau 6.5 - Valeurs du débit enregistrées pendant les analyses pour l'évaluation du degré de colmatage le long des deux cours d'eau d'étude.....	79
Tableau 7.1 - Longueur et pourcentage des tronçons analysés le long de la Moesa. 6.58 % du cours d'eau présente un état écomorphologique naturel/semi-naturel, 26.13 % un état peu atteint, 60.38 % un état écomorphologique fortement compromis et 6.91 % un état écomorphologique considéré comme artificiel/non naturel.....	85
Tableau 7.2 - Longueur et pourcentage des tronçons analysés le long de la Morobbia. 81.59 % présente un état écomorphologique très atteint et le restant, 18.41 %, est désigné par un état écomorphologique peu compromis.....	92
Tableau 7.3 - Résumé des valeurs enregistrées en octobre 2010 à la station de Cabbio. Les valeurs du rapport Q_{max}/Q_{min} se situent entre 1.97 : 1 et 10.38 : 1. L'indice HP_1 présente des valeurs comprises entre 0.81 et 4.82 m ³ /s.....	97
Tableau 7.4 - Résumé des valeurs enregistrées en janvier 2011 à la station de Cabbio. Les rapports Q_{max}/Q_{min} se situent entre 1.12 : 1 et 7.93 : 1. La valeur HP_2 minimale est de 0.62 et la maximale de 3.56 m ³ /s.....	98

Tableau 7.5 - Résumé des valeurs enregistrées en avril 2011 à la station de Cabbio. Les variations hydrologiques sont marquées : le rapport Q_{\max}/Q_{\min} maximal est de 11.16 : 1, l'indice HP_1 de 4.39 m^3/s	100
Tableau 7.6 - Résumé des valeurs enregistrées en octobre 2011 à la station de Lostal. La valeur maximale du facteur Q_{\max}/Q_{\min} correspond à 6.98 : 1. La valeur maximale de l'indice HP_1 est de 4.35 m^3/s	101
Tableau 7.7 - Résumé des valeurs enregistrées en janvier 2011 à la station de Lostal. Les valeurs du rapport Q_{\max}/Q_{\min} se situent entre 1.55 : 1 et 4.20 : 1. L'indice HP_1 présente des valeurs comprises entre 0.49 et 2.31 m^3/s	102
Tableau 7.8 - Résumé des valeurs enregistrées en avril 2011 à la station de Lostal. Les valeurs du rapport Q_{\max}/Q_{\min} se situent entre 2.23 : 1 et 5.50 : 1. L'indice HP_1 présente des valeurs comprises entre 0.85 et 2.07 m^3/s	103
Tableau 7.9 - Résumé des valeurs enregistrées en octobre 2010 à la station de Lumino/Sassello (TI). Le rapport entre le débit d'écluse et le débit plancher se situe entre 1.64 : 1 et 6.93 : 1 ; les valeurs de l'indice HP_1 atteignent 2.41 m^3/s	105
Tableau 7.10 - Résumé des valeurs enregistrées en janvier 2011 à la station de Lumino/Sassello. La valeur maximale du rapport Q_{\max}/Q_{\min} est assez faible (2.69 : 1). Au contraire, les valeurs de l'indice HP_1 se situent entre 2.03 et 3.95 m^3/s	106
Tableau 7.11 - Résumé des valeurs enregistrées en avril 2011 à la station de Lumino/Sassello. Les valeurs Q_{\max}/Q_{\min} se situent entre 1.55 : 1 et 3.10 : 1, l'indice HP_1 montre des valeurs comprises entre 0.44 et 1.45 m^3/s	107
Tableau 7.12 - Résumé des valeurs enregistrés en octobre 2010 à la station de Giubiasco. Les rapports Q_{\max}/Q_{\min} sont très élevés, tout comme les indices HP_1	110
Tableau 7.13 - Résumé des valeurs enregistrées en janvier 2011 à la station de Giubiasco. Les rapports Q_{\max}/Q_{\min} sont très élevés, tout comme les indices HP_1	112
Tableau 7.14 - Résumé des valeurs enregistrées en avril 2011 à la station de Giubiasco. Les rapports Q_{\max}/Q_{\min} sont très élevés, tout comme les indices HP_1	113
Tableau 7.15 - Valeurs moyennes des débits pour la station de Cabbio, le long de la Moesa. Nous soulignons la présence de trois périodes hydrologiques : d'automne (octobre, novembre et décembre), avec des valeurs supérieures à 6 : 1 ; d'hiver (janvier, février et mars), caractérisés par des valeurs nettement plus faibles ne dépassant jamais 3 : 1 ; et le régime du printemps, désigné par des valeurs à nouveau plus élevées.....	114
Tableau 7.16 - Valeurs moyennes des débits pour la station de Lostal. La présence des trois périodes hydrologiques cités auparavant est moins marquée pour cette station.....	115

Tableau 7.17 - Valeurs moyennes des débits pour la station de Lumino/Sassello. Les valeurs Q_{\max}/Q_{\min} ne dépassent jamais 3.16 : 1. Dans ce cas, la distinction entre les trois périodes citées auparavant est moins visible.....	115
Tableau 7.18 - Valeurs moyennes des débits pour la station de Giubiasco, le long de la Morobbia. Les valeurs Q_{\max}/Q_{\min} sont très élevées, entre 7.39 : 1 et 44.41 : 1. Le facteur Q_{\max}/Q_{\min} enregistré en novembre 2010 est faible, principalement à cause du débit plancher moyen assez élevé, dû à deux importantes crues naturelles (Annexe A.7).....	116
Tableau 7.19 - Statistique annuelle le long des deux cours d'eau étudiés (01.10.2010-26.06.2011). On note, pour la Moesa, une atténuation du rapport Q_{\max}/Q_{\min} en se rapprochant de la confluence avec le Ticino (de Cabbio à Lumino/Sassello). Les valeurs de l'indice HP_i suivent une tendance similaire.....	117
Tableau 7.20 - Statistique hivernale (1.01.2011 - 31.03.2011) caractérisée par la présence de valeurs plus faibles par rapport à la statistique annuelle. Le phénomène se présente, le long de la Moesa, avec une ampleur des oscillations moins importante (comparer avec le Tabl. 7.19).....	117
Tableau 7.21 - Degré du colmatage deviné le long de la Moesa et de la Morobbia.....	135

Résumé

Dans les dernières décennies l'hydrologie des écoulements alpins a été fortement altérée par la force hydraulique. Pour produire l'énergie les centrales doivent ouvrir les bassins de stockage situés en altitude et permettre à l'eau de passer à travers les turbines pour être ensuite déversée dans le cours d'eau situé à l'aval du point de restitution. Ce mécanisme, connu sous le nom d'écluse (ou marnage), entraîne des fluctuations du régime journalier au cours d'eau situé à l'aval des centrales hydroélectriques, qui présente des débits minimaux planchers pendant la nuit (faible demande énergétique) et des débits maximaux d'écluse quand la requête est élevée. Ce phénomène a acquis un rôle dominant dans les dernières années, pour son caractère innovant et pour son impact sur l'écosystème aquatique.

L'objectif principal de ce travail de recherche demeure en la contribution de nouvelles connaissances des effets du marnage sur l'hydrologie et sur la dynamique sédimentaire. L'acquisition des données sur le terrain a été effectuée pendant trois campagnes (automne 2010, hiver 2011 et printemps 2011) le long de deux cours d'eau s'écoulant au Sud des Alpes : la Moesa (GR/TI) et la Morobbia (TI). Plusieurs méthodes d'évaluation ont été conduites afin de saisir le fonctionnement du système et de fournir une possible clé d'orientation pour les futurs travaux d'assainissement : (1) la détermination de l'état écomorphologique (Hütte et Niederhauser, 1998) ; (2) les mesures des niveaux d'eau avec des sondes hydrologiques qui ont permis de déterminer les débits ; (3) l'analyse de l'activité sédimentaire à l'aide d'essais colorimétriques ; et (4) l'analyse du colmatage (Schälchli, 2002).

À partir des données hydrologiques nous avons calculé le rapport entre le débit d'écluse maximal et le débit plancher minimal (Q_{\max}/Q_{\min}), le changement du niveau d'eau (Baumann et Klaus, 2003) et les indices HP_1 et HP_2 (Meile *et al.*, 2011).

Les données du régime hydrique, récoltées le long de la Moesa montrent une atténuation de l'ampleur des oscillations (Q_{\max}/Q_{\min} et HP_1) de l'amont vers l'aval et pendant la saison hivernale (à cause de la faible production hydroélectrique). Les rapports Q_{\max}/Q_{\min} moyens mensuels obtenus à Cabbio, la station située plus en amont, atteignent 6.58 : 1 en octobre 2010, 2.77 : 1 en janvier 2011 et 6.40 : 1 en avril 2011. Les rapports Q_{\max}/Q_{\min} moyens mensuels enregistrés à Lumino/Sassello, la station la plus proche de la confluence avec le Ticino, sont de l'ordre de 3.16 : 1 en octobre 2010, 1.89 : 1 en janvier 2011 et 2.28 : 1 en avril 2011. Les données hydrologiques récoltées le long de la Morobbia montrent des variations importantes (Q_{\max}/Q_{\min} moyen = 22.87 : 1). Une même tendance a été devinée par les analyses de l'activité sédimentaire : le long de la Moesa le transport de la charge de fond est présent seulement pendant l'automne et le printemps et sur les sections situées en amont ; le long de la Morobbia le transport sédimentaire a été observé pendant toute la période d'analyse. L'impact de l'exploitation par écluses se vérifie différemment le long des deux cours d'eau : les caractéristiques du bassin versant, la morphologie du cours d'eau et la production hydroélectrique sont les facteurs influençant l'amplitude du phénomène.

Les valeurs hydrologiques nous ont permis de trouver une corrélation intéressante avec l'activité sédimentaire : nous avons décelé que le transport de la charge de fond se produit quand le rapport entre débit d'écluse et débit plancher dépasse le 6 : 1.

L'état écomorphologique du cours d'eau ne donne pas d'informations claires sur l'atténuation ou l'augmentation des effets du marnage, la seule corrélation possible est liée aux unités fluviales élargies (p.ex. Golena Rosera et Pascoletto) qui ont enregistré un haut degré du colmatage. Pour une revitalisation complète, l'assainissement du régime à marnage devrait être effectué.

Les résultats nous ont permis d'apprécier une indication de l'intensité du phénomène sur le fonctionnement hydro-sédimentaire des deux cours d'eau et de proposer, en conclusion, des possibles mesures d'assainissement.

Abstract

In recent decades, the hydrology of alpine streams has been altered by hydroelectric power projects. To produce energy, plants must open storage basins located at high altitude in order to run their turbines. The water is discharged into rivers downstream of the central points of restitution. This mechanism, called hydropeaking, causes an oscillation of the daily regime of the river located downstream of the hydroelectric power plant, passing through minimum flows during the night (low energy demand) to the maximum flow rates when energy demand is high. This phenomenon has acquired a pivotal role in recent years, both for the innovative character and in the extent of his impact on the aquatic ecosystem. The main purpose of this work is to bring a new knowledge to research studying the impact of hydropeaking on hydrological regime and sediment transfer. Fieldworks were conducted during three season (autumn 2010, winter 2011 and spring 2011) along two rivers located in the Southern Alps: the Moesa river (GR/TI) and the Morobbia river (TI). Several evaluation methods were conducted to understand the system and to provide guidance for future restoration works: (1) analysis of the ecomorphology (Hütte & Niederhauser, 1998); (2) the measurements of water level with hydrological gauging stations, which were used to determine discharge rates; (3) analysis of sediment transfer using colorimetric assays; and (4) the clogging's analyses (Schälchli, 2002).

Based on hydrological data, we calculated the ratio between the maximum flow rate and the minimum flow rate (Q_{\max}/Q_{\min}), the change in water level (Baumann & Klaus, 2003) and HP_1 and HP_2 index (Meile *et al.*, 2011).

The hydrological data collected along the Moesa river show us a mitigation of the magnitude of the oscillations (Q_{\max}/Q_{\min} and HP_1) upstream and downstream and during winter season (due to a low energy demand). The difference between the maximal and the minimal discharge at the Cabbio station (GR), located upstream of the river, corresponds to 6.58 : 1 during October 2010, 2.77 : 1 during January 2011 and 6.40 : 1 during April 2011. The Q_{\max}/Q_{\min} recorded at Lumino/Sassello (TI) station, closest to the confluence with the Ticino river, corresponds to 3.16 : 1 during October 2010, 1.89 : 1 during January 2011 and 2.28 : 1 during April 2011. The hydrological data of the Morobbia river shows important variations ($Q_{\max}/Q_{\min} = 22.87 : 1$). The same trend was hypothesised through the analysis of sedimentary activity: along the Moesa river the transport of bedload is present only during autumn and spring seasons and only for the sections located upstream; along the Morobbia river the sediment transport was observed during the entire analysis period.

The impact of hydropeaking is different along the two rivers: the characteristics of the catchment area, the river morphology and the hydropower production are the factors influencing the magnitude of the phenomenon.

The results show us that there is an interesting correlation between the hydrological oscillations and the sedimentary activity: bedload transport occurs only when the discharge ratio exceeds 6:1.

Ecomorphological state does not give clear information concerning the increase or decrease of the effects of hydropeaking. The only possible correlation is linked to units undergoing river restoration (f.ex. Golena Rosera and Pascoletto), that have registered an important clogging degree. For complete river restoration the achievement of a natural hydrological regime is necessary.

The results allowed us to assess the magnitude of the phenomenon on the hydrological regime and sediments transfer of the two rivers and to propose in conclusion, some possible solutions for the mitigation of the effects.

Abréviations

IGUL : Institut de Géographie de l'Université de Lausanne

FSP : Fédération suisse de pêche

STEP : station d'épuration des eaux usées

LFH : Loi fédérale sur l'utilisation des forces hydrauliques du 22 décembre 1916 (RS 721.80)

LACE : Loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau du 21 juin 1991 (RS 721.100)

LEaux : Loi fédérale sur la protection des eaux du 24 janvier 1991 (RS 814.20)

OEaux : Ordonnance fédérale sur la protection des eaux du 28 octobre 1998 (RS 814.201)

OFEFP : Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage

OFEV : Office fédéral de l'environnement

PKi : Coefficient de Pardé

BAGS : Bedload Assessment for Gravels-bed Streams

SBB : Southern Steep Belt

OBS : Stations d'observation manuelle MétéoSuisse

SwissMetNet : Stations automatiques MétéoSuisse

NIME : Stations pluviométriques MétéoSuisse

IST: Istituto di Scienze della Terra, Canobbio (TI)

Matlab: Matrix Laboratory

SIG : Système d'Information Géographique

EAWAG : Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz;

L'Institut de Recherche de l'Eau du Domaine des EPF

CEATE-E : Commission de l'environnement, de l'aménagement du territoire et de l'énergie du conseil des Etats

OIM : Officine Idroelettriche Mesolcina

ELINE : Electricité Industrielle

AMB : Aziende Municipalizzate Bellinzona

Remerciements

Ce travail n'aura pu être conçu sans l'aide précieux de nombreuses personnes aux quelles vont mes remerciements les plus chaleureux.

Un très grand merci à mon directeur de mémoire, le Prof. Emmanuel Reynard, pour m'avoir offert son expérience et ses conseils utiles pour résoudre les difficultés rencontrées pendant ces deux années de Master, pour sa disponibilité, ses nombreuses relectures et remarques ; et pour l'aide sur le terrain pour l'installation des deux sondes hydrologiques.

Je souhaite également remercier le Prof. Stuart N. Lane, co-directeur de ce mémoire, très patient et disponible à répondre à mes nombreuses questions. Merci aussi pour m'avoir initié au monde de Matlab et avoir créé le code nécessaire pour les analyses quantitatives de l'activité sédimentaire.

Merci à David Theler pour avoir accepté l'expertise de ce mémoire et pour tous les conseils utiles pour la planification du travail.

Je tiens à remercier en manière particulière tout le "team IGUL" : Simon Martin, très patient et disponible, pour tous ses conseils cartographiques, géologiques et géomorphologiques données pendant toute la période de mon Master en géographie à l'Université de Lausanne. Laetitia Laigre, pour sa disponibilité, ses conseils, son soutien et pour les aimables journées passées ensemble sur la plaine du Rhône, entre abricotiers, poiriers et paléoîles. Cristian Scapozza, pour tous ses conseils géomorphologiques, géologiques et pour les aimables journées passées ensemble sur le terrain entre cailloux et cailloux. Jean-Michel Fallot, pour sa disponibilité et pour m'avoir dédié son temps pour m'aider à télécharger les données depuis le logiciel Climap. Daniela Balin, pour les nombreux conseils nécessaires pour l'analyse des données hydrologiques. Mariano Bonriposi pour l'aide donnée pendant la réalisation de ce travail, notamment pour la calibration de sondes hydrologiques. Natan Micheletti pour ses conseils nécessaires pour l'analyse des données avec *Matlab*. Manon Rosset, pour ses conseils utiles pour les citations bibliographiques. Gabriela Werren et Jean-Baptiste Bosson pour leur aide pendant le déroulement de mon Master à l'Université de Lausanne.

J'aimerais aussi remercier les collaborateurs de l'*Istituto di Scienze della terra (IST)* à Canobbio, pour la disponibilité montrée pendant la réalisation de ce travail de recherche, tout particulièrement Maurizio Pozzoni, pour m'avoir transmis les données de la station hydrologique le long de la Morobbia et pour sa disponibilité à répondre à mes questions. Mauro Veronesi, pour m'avoir soutenu pendant ma phase de « déstabilisation scientifique » m'offrant ses conseils utiles et une vaste bibliographie nécessaire pour le cadre théorique. Christian Ambrosi pour ses conseils utiles pour le cadre géologique de deux vallées. Mirko Baruffini pour l'aide fourni pendant mes études.

Merci également à Flavio Nollo pour sa disponibilité, ses nombreux conseils et pour l'aimable après-midi passé le long de la Moesa. A Bruno Polli pour sa disponibilité et les nombreux conseils liés à la planification des analyses pendant la réalisation de ce travail. A Jordi Ambrosini, très disponible pour répondre à mes nombreuses questions. A Paolo Oppizzi, pour m'avoir envoyé ses articles sur la géologie du Val Morobbia. A Marco Lanfranchi, pour m'avoir transmis les données relatives aux stations de mesure de Soazza et Grono. A Andrea Salvetti, pour m'avoir transmis les données relatives à la station de mesure de Lumino/Sassello (TI). A Fosco Spinedi pour toutes les informations nécessaires pour le cadre climatologique. A Christian Herrmann pour m'avoir donné l'autorisation d'utiliser sa photo de la Thur.

Un très grand merci à Daniela Papadaniel, très patiente et disponible pour la lecture attentive de ce travail et pour l'hospitalité offerte pendant le premier semestre. A Paolo Coduri et à Marco Castelli pour l'aide pendant la pose des sédiments. L'effort a été bien compensé par la bonne qualité gastronomique ! Merci à Leila Pfund pour l'aide fournie pendant la dernière journée de terrain. Un remerciement à mes collègues et amis rencontrés pendant ce chemin universitaire, je pense en particulier à Nicola Deluigi, qui m'a toujours offert son expérience informatique, indispensable pour la réalisation de ce travail. Une pensée également à Giulia, Valentina, Sara et Laura pour leur soutien impeccable depuis longtemps. Enfin, une dernière pensée ira à mes parents. Merci !

I^e PARTIE
INTRODUCTION

Chapitre 1 : Introduction	p. 3
Chapitre 2 : Problématique	p. 12

1) Introduction

1.1 Contexte de l'étude

En Suisse, comme dans d'autres pays alpins, la gestion des ressources en eau occupe une place centrale en matière environnementale (Reynard *et al.*, 2001 ; Bundi, 2003 ; Reynard *et al.*, 2006 : 2). Depuis la moitié du XIX^e siècle, l'homme a profondément modifié l'écoulement naturel des cours d'eau, intervenant dans un premier temps sur le parcours, avec les grands projets d'aménagement hydrauliques pour la protection contre les crues, et dans un deuxième temps, suite à l'augmentation des besoins en eau et à la production d'énergie hydraulique, sur le débit.

Les caractéristiques topographiques et hydrologiques du territoire suisse ont permis un fort développement de l'industrie hydroélectrique (Fig. 1.1), avec la construction des grands barrages (Grande-Dixence, Emosson, Mauvoisin) en très peu de temps (Reynard *et al.*, 2006 : 130), et en permettant de couvrir actuellement 57 % des besoins du pays en électricité¹ (Fette *et al.*, 2007 ; Schleiss, 2007).

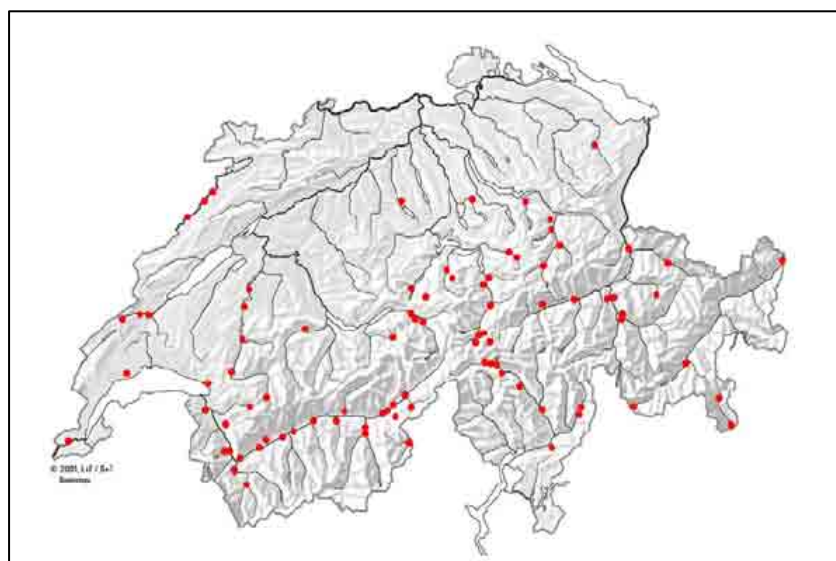


Figure 1.1 – Distribution des principales centrales hydroélectriques sur le territoire suisse (Source : Limnex, 2001).

La croissance de l'intérêt pour ce type de production électrique est liée principalement aux particularités topographiques du territoire suisse, extrêmement favorables à la construction de grands barrages d'accumulation et aux qualités typiques de l'hydroélectricité (absence d'émissions de gaz à effet de serre et énergie renouvelable). Même si cette exploitation peut être considérée comme durable au niveau global, au niveau local, elle provoque des problèmes

¹ Source : site de l'Office fédéral de l'environnement (www.bafu.admin.ch). Consulté le 09.06.2011.

du point de vue environnemental (Bratrich *et al.*, 2004). La construction des réservoirs en altitude constitue un obstacle à la libre circulation des espèces et au transport des substances organiques (Renöfält *et al.*, 2010). En plus des effets néfastes sur le paysage, il faut noter les impacts sur les cours d'eau qui se trouvent à l'aval des prises d'eau et des barrages, caractérisés par des débits résiduels et des conditions écologiques et dynamiques insuffisantes (Baumann et Klaus, 2003 ; Mürle *et al.*, 2003 ; Scheurer et Molinari, 2003 ; Graf, 2006). Ceci n'est pas le seul problème lié à la production de la force hydraulique : les différentes opérations destinées à l'entretien des infrastructures anthropiques, telles que les purges, les vidanges, les rinçages et les curages provoquent des dommages écologiques (Gerster et Rey, 1994 ; Reynard *et al.*, 2006 : 140-141).

La production hydroélectrique n'influence pas exclusivement les cours d'eau situés en aval des prises d'eau et des barrages, mais également les écoulements localisés en aval des centrales hydroélectriques. Pour produire cette énergie, les centrales exploitent la transformation de l'énergie potentielle de l'eau située dans les bassins d'accumulation en énergie cinétique qui va permettre aux alternateurs des usines de la transformer en électricité. Les centrales doivent donc ouvrir les réservoirs de stockage situés en altitude et permettre à l'eau de passer à travers les turbines, pour être ensuite déversée dans le cours d'eau situé en aval du point de restitution. Ce mécanisme, connu sous le nom d'écluse, entraîne des fluctuations du régime journalier du cours d'eau situé à l'aval des centrales hydroélectriques (tronçon à marnage) (Fig. 1.2) en provoquant des modifications substantielles des caractéristiques hydrologiques, de la morphologie fluviale (Baumann et Klaus, 2003 ; Baumann et Meile, 2004 ; Meile, 2006 ; Tockner *et al.*, 2004 ; Limnex, 2004 ; Fette, 2005 ; Siviglia *et al.*, 2008 ; Meile *et al.*, 2011), du transport des sédiments (Eberstaller et Pinka, 2001 ; Baumann et Klaus, 2003 ; Kirchhofer et Breitenstein, 2008) et des écosystèmes aquatiques (Cereghino et Lavandier, 1998 ; Baumann et Klaus, 2003 ; Baumann et Meile, 2004 ; Cereghino *et al.*, 2004 ; Limnex, 2004 ; Fette, 2005 ; Künzli, 2005 ; Alp, 2006 ; Pellaud, 2006 ; Fette *et al.*, 2007 ; Maiolini *et al.*, 2008 ; Consorzio D.R.I.F.T., 2011).

« [...] Le terme « écluse » (ou débit d'écluse), désigne un débit élevé non naturel provoqué par le turbinage d'eau dans une ou plusieurs centrale(s) hydroélectrique(s) située(s) en amont. Par expression « débit plancher » on entend le débit minimum entre les débits d'écluse, c'est-à-dire pendant les périodes où la demande d'électricité est réduite (le plus souvent la nuit et en fin de semaine [...]). La succession de débits différents, autrement dit les variations plus ou moins régulières des niveaux de débit, est appelée régime d'éclusées ou exploitation par éclusées ("hydropeaking", "flow fluctuations") » (Baumann et Klaus, 2003 : 21).

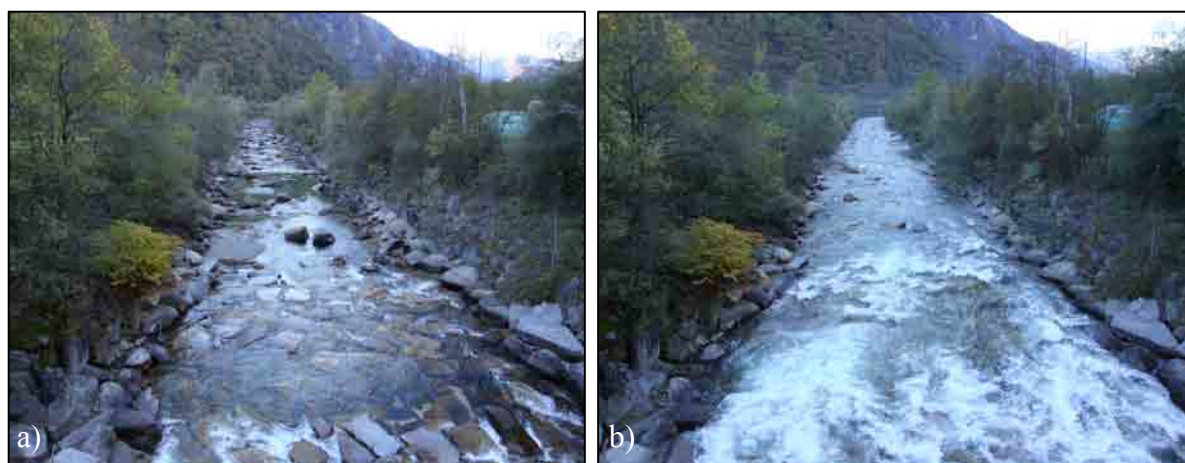


Figure 1.2 – La Moesa à Cabbio (GR), le 26 octobre 2010, pendant le débit plancher (à 09:30) (a) et pendant le débit d'écluse (à 12:45) (b).

Un paramètre hydrologique important pour la caractérisation des régimes à éclusées est la variation du débit (Fig. 1.2). Cette dernière peut être exprimée au moyen de la différence, en m^3/s ou par un rapport ($x : 1$), entre le débit d'écluse maximal et le débit plancher minimal (Baumann et Klaus, 2003). D'autres observations peuvent révéler l'importance du phénomène : la différence de niveau d'eau entre le débit d'écluse maximal et le débit plancher minimal, exprimé en cm ou en m, et la vitesse maximale du changement du débit (taux d'accroissement et de diminution du débit), exprimée en m^3/s par minute (Baumann et Klaus, 2003) (Fig. 1.3). En raison de ces variations du régime journalier, une fluctuation de la largeur de la surface du lit mouillé, de la vitesse et de la profondeur d'écoulement peut être observée (Baumann et Klaus, 2003 ; Limnex, 2004 ; Fette, 2005 ; Meile *et al.*, 2005 ; Pellaud, 2006 ; Pfaundler et Keusen, 2007). Des variations du régime thermique et de la disponibilité en habitats peuvent également être enregistrées (Baumann et Klaus, 2003 ; Siviglia *et al.*, 2008 ; Zolezzi *et al.*, 2010). Ces modifications hydrologiques provoquent, par conséquent, des changements de la dynamique sédimentaire et des biocénoses. Parmi les indicateurs biologiques d'un régime à éclusées, nous pouvons citer la présence de zones inondées exclusivement pendant le débit d'écluse et laissées à sec pendant le débit plancher ("zone de marnage" ou "tidal zone") (Brooker, 1981) (Fig. 1.4), une diminution de la biomasse, de la densité et de la composition de la faune aquatique et une augmentation du phénomène de dérive (*drift*) des macroinvertébrés (Cereghino et Lavandier, 1998 ; Baumann et Klaus, 2003 ; Pellaud, 2006).

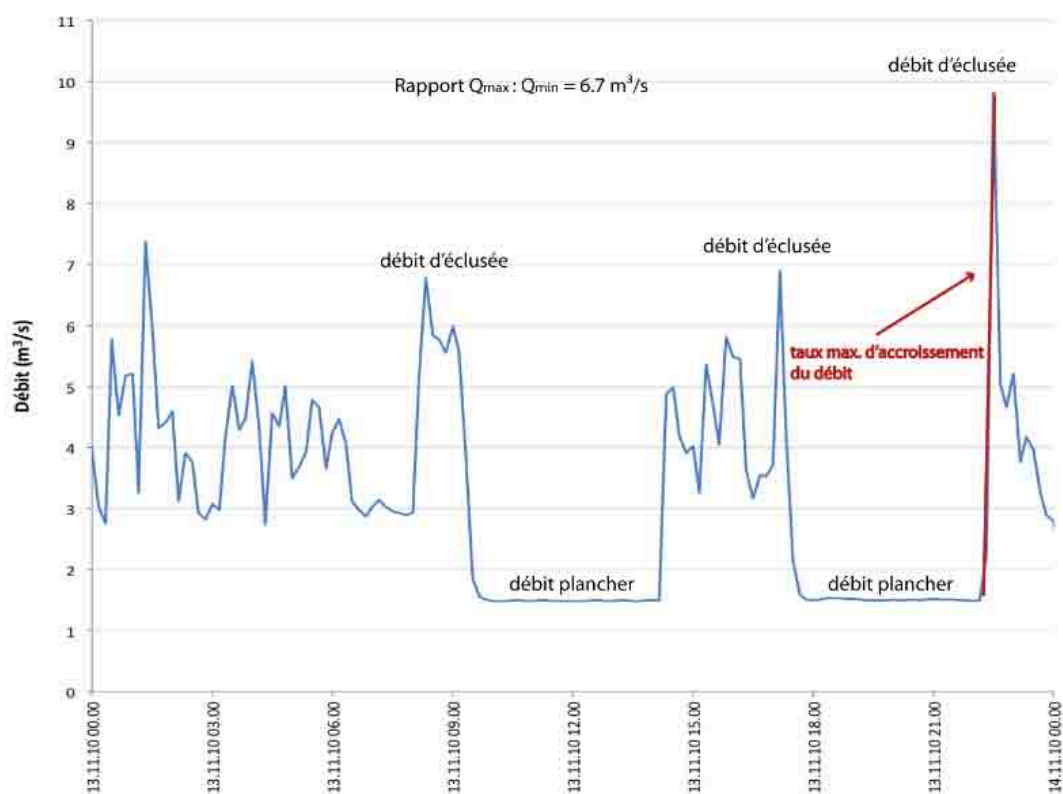


Figure 1.3 – Caractéristique générales d'un cours d'eau à régime hydrologique à éclusées (modifié d'après Baumann et Klaus, 2003).

Le *drift* correspond au transport du phythobenthos et du macrobenthos par le courant (Baumann et Klaus, 2003) et est considéré comme étant un phénomène naturel, se produisant avant l'aube, nécessaire pour la colonisation des zones situées plus à l'aval. Dans le cas d'un régime à marnage, l'arrivée de la crue artificielle (débit d'éclusee) entraîne une dérive incontrôlée, appelée « dérive catastrophique » (Baumann et Klaus, 2003), qui provoque des bouleversements parmi les populations benthiques. L'*hydropeaking* peut également provoquer des impacts sur l'activité sédimentaire, avec une augmentation de l'érosion du lit, un accroissement de la remise en suspension de matières fines (croissance de la turbidité) pendant le débit d'éclusee avec dépôt successif et augmentation du colmatage pendant le débit plancher (Baumann et Klaus, 2003). Le colmatage provoque une imperméabilisation du fond du lit, provoquant une réduction des échanges verticaux avec la nappe phréatique et une diminution des interstices présents entre les graviers (apport d'oxygène réduit, conditions défavorables pour la microfaune) (Schälchli, 2002). Des changements au niveau du charriage (érosion et colmatage) et du régime d'écoulement peuvent perturber la fraye des poissons (Fischnetz, 2004).

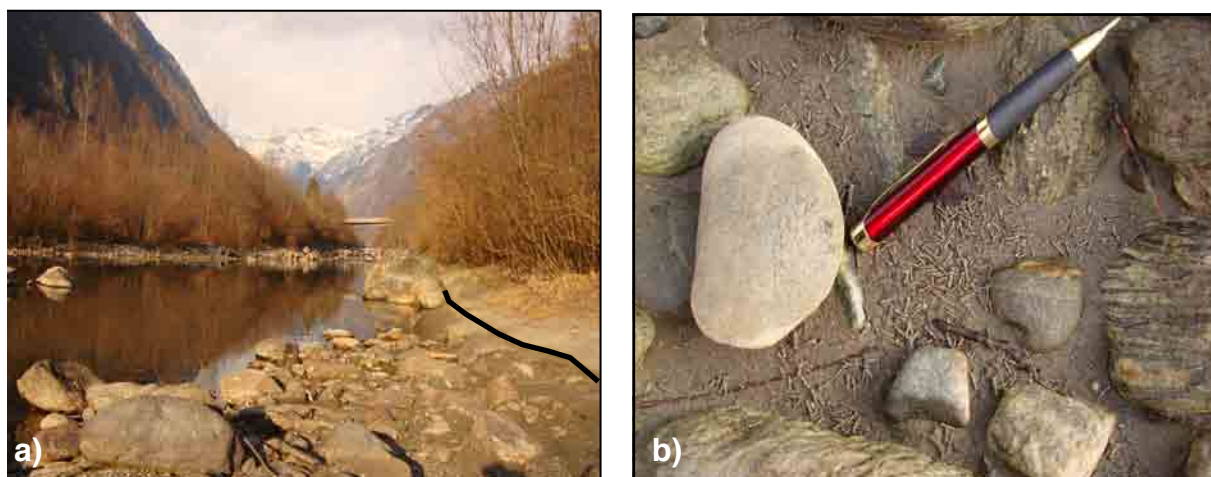


Figure 1.4 – a) Au premier plan, une partie de la surface du lit qui était mouillée pendant le débit d'écluse et qui est restée à sec pendant le débit plancher. Les variations de la largeur du lit mouillé provoquent la formation des zones de marnage (tidal zones) (Brooker, 1981) qui provoquent l'échouage des organismes (b). b) L'image représente une zone qui a été mise à sec pendant le débit plancher, où sont visibles de nombreux individus de Trichoptères.

Au cours des dernières années, le marnage est devenu un phénomène très répandu dans les cours d'eau de taille moyenne à grande, situés dans les vallées alpines et il joue un rôle important sur le territoire suisse. En Suisse, environ 25 % des centrales hydroélectriques de taille moyenne à grande provoquent une variation du régime journalier (Baumann et Klaus, 2003 ; Fischnetz, 2004). La connaissance de ces effets est donc une tâche fondamentale pour l'aménagement futur des cours d'eau. Ce phénomène est actuellement en pleine évolution : la connaissance des effets négatifs, le développement du marché de l'hydroélectricité et les recherches scientifiques ont directement influencé les lois en question (Chap. 1.2.3).

1.2 Historique et état des connaissances

Après cette partie introductive, il est important de situer notre travail dans son contexte historique. La poussée des recherches dans le domaine de la gestion des cours d'eau a évolué en même temps que le développement des initiatives et lois sur la protection des eaux. Dans cette partie du travail seront présentées d'une part l'évolution des connaissances dans ce domaine et de l'autre les principales démarches politiques.

1.2.1 Recherches sur les effets du marnage et projets d'assainissement réalisés en Suisse

Dès le début du XXI^e siècle, à la suite de la libéralisation du marché hydroélectrique, les variations du régime journalier sont devenues plus fréquentes et plus marquées (Baumann et Klaus, 2003). Cette énergie n'est pas cumulable, sa production est étroitement liée à la demande et peut varier selon la saison et le type d'exploitation. Les variations du débit peuvent donc se produire plusieurs fois par jour. L'augmentation de la fréquence et de l'amplitude des oscillations a provoqué une dégradation des habitats favorables pour les fonctions vitales des populations aquatiques.

Le premier bilan des connaissances sur l'exploitation des ressources en eau pour la production hydroélectrique a été établi sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP)² (Limnex, 2001). Ce rapport visait à donner un aperçu général sur les caractéristiques hydrologiques et techniques de ce type d'exploitation. Deux années plus tard, une autre étude (Baumann et Klaus, 2003), toujours commissionnée par l'OFEFP, a complété le rapport Limnex (2001) en saisissant les effets sur la structure et sur la fonction écologique des cours d'eau et l'évaluation de l'efficacité des mesures d'atténuation déjà mises en place. Dans ce rapport, une présentation introductive était consacrée aux principaux travaux menés en Suisse et dans les régions alpines voisines (France, Italie, Autriche). En 2004, une troisième étude, venant compléter les deux premières a été réalisée sur mandat du WWF (Limnex, 2004).

La même année a été publié le rapport final du projet "Réseau suisse poissons en diminution" (Fischnetz, 2004) qui avait pour but de saisir les causes de la diminution, observée depuis les années 1980, de 80 % des prises de pêche de la truite dans la plupart des cours d'eau suisses et l'aggravation simultanée de l'état de santé des poissons dans certains cours d'eau. Dans ce rapport plusieurs hypothèses ont été établies, dans le but de comprendre les origines de ce déclin pour pouvoir ensuite appliquer des mesures d'assainissement. Parmi les différentes pistes a été proposée celle liée aux déficits morphologiques causés par les débits résiduels et par les fluctuations journalières. Une année après la publication du rapport final Fischnetz (2004), les principales associations piscicoles et pour la protection de la nature ont manifesté leur préoccupation et ont sollicité la Fédération suisse de pêche (FSP) pour lancer une initiative populaire appelée « Eaux vivantes » (Reynard *et al.*, 2006 : 146) qui « vise à renforcer la renaturation des cours d'eau en éliminant les déficits d'exécution constatés en matière d'assainissement des cours d'eau et, en même temps, à trouver une solution aux problèmes écologiques imputables aux exploitations hydroélectriques »³. Cette initiative présente la première étape vers une préoccupation croissante concernant l'état des cours d'eau suisses. Actuellement, l'intérêt de la Confédération pour une meilleure connaissance de ces dynamiques et des mesures possibles d'assainissement est toujours présent : l'OFEV et

² Depuis 2006 : OFEV, Office fédéral de l'environnement.

³ Citation: texte de l'initiative fédérale „Eaux vivantes“ (Initiative pour la renaturation).

Agenda 21 pour l'eau (réseau d'acteurs de la gestion des eaux en Suisse) ont organisé une journée spécifique le 9 mars 2009 à Soleure dans le but d'un échange des compétences et expériences entre les différents cantons et nations (Estoppey et Devanthéry, 2009). Cette journée a permis de comprendre l'état de la question liée au marnage dans notre pays et d'ébaucher de possibles solutions. Des mesures d'assainissement ont ainsi déjà été planifiées et effectuées au cours des dernières années, soit sur le débit, grâce à une baisse de la production hydroélectrique (Doubs, NE) (Estoppey et Devanthéry, 2009) ou avec l'intégration de bassins de régulation (Linthal, GL) (Kummer, 2006), soit sur la forme du cours d'eau, avec des élargissements ponctuels ou des interventions sur la micromorphologie (Reuss, UR, construction d'une caverne refuge pour les poissons) (Estoppey et Devanthéry, 2009).

1.2.2 Recherches menées au Sud des Alpes

Les travaux effectués dans le Sud des Alpes concernent exclusivement les dernières années. Deux travaux de diplôme (Künzli, 2005 ; Alp, 2006), consacrés à l'analyse des variations des substances nutritives et des effets sur la faune piscicole, ont été menés le long du Ticino (TI), de la Moesa (GR) et de la Morobbia (TI).

En 2006, une étude visant à la caractérisation hydrologique du marnage le long du Ticino a été menée par Pfaundler et Salvetti (2006). Très récemment, un grand projet de recherche consacré à l'analyse des effets du marnage sur l'hydrologie, la dynamique sédimentaire et l'écologie aquatique le long du Ticino a été publié sur mandat de l'Etat du Tessin (Polli et Solcà, 2008 ; Consorzio D.R.I.F.T., 2011).

À l'heure actuelle, il n'existe pas de travaux le long de la Moesa et de la Morobbia qui étudient les effets sur l'hydrologie et sur la dynamique sédimentaire. Ce constat a été utile pour définir et délimiter la zone d'étude et les objectifs du travail.

1.2.3 Bases légales

L'importance croissante de la volonté de tendre vers une gestion durable des ressources en eau et le caractère innovateur du sujet principal de ce travail, expliquent l'évolution rapide des lois liées à la protection des eaux et à l'aménagement des cours d'eau.

La première loi qui règle l'exploitation des eaux pour la production énergétique est la Loi fédérale sur l'exploitation des forces hydrauliques du 22 décembre 1916 (RS 721.80). Toujours en vigueur aujourd'hui, elle règle notamment l'utilisation rationnelle de la force hydraulique (art. 5), les relations avec d'autres usagers des cours d'eau (art. 21-28) et les concessions d'eau comme instrument central de la politique d'exploitation des forces hydrauliques (art. 33 et suivants) (Reynard *et al.*, 2006 : 56). Pour la protection des

environnements aquatiques, jusqu'en 1991, la législation régula exclusivement la qualité des eaux, d'abord par la Loi sur la protection des eaux de 1955 et l'Ordonnance d'exécution de la loi fédérale sur la protection des eaux contre la pollution du 28 décembre 1956 (RO 1956 1641) (Reynard *et al.*, 2001; Reynard *et al.*, 2006 : 57), puis par la Loi fédérale sur la protection des eaux contre la pollution de 1971, qui généralisa le développement des stations d'épuration des eaux usées (STEP) (Reynard *et al.*, 2006). Le premier pas vers la protection intégrée des environnements aquatiques est fait suite à l'entrée en vigueur simultanée de la Loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau (LACE) du 21 juin 1991 (RS 721.100), qui vise à protéger le maintien des processus hydrologiques naturels et des populations aquatiques, et de la Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) (RS 814.20) du 24 janvier 1991, qui ne prend plus en considération exclusivement la composante qualitative de l'eau, mais également sa composante quantitative, en introduisant la définition de débits résiduels minimaux dans les cours d'eau (art. 31 et suivants) (Reynard *et al.*, 2006 : 59 et 143). L'objectif principal de l'introduction de ces lois (LACE et LEaux) est de garantir les fonctions écologiques des cours d'eau. En application de la Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux), une nouvelle Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) a été promulguée le 28 octobre 1998 (RS 814.201).

Malgré la prise de conscience de la nécessité de sauvegarder la protection des eaux non seulement au niveau qualitatif mais aussi au niveau quantitatif, l'introduction des lois et des ordonnances citées ci-dessus n'a pas permis d'éviter totalement la détérioration des eaux suisses. En outre, les concessions hydroélectriques actuelles ne sont pas concernées par le maintien du débit résiduel prévu dans la LEaux : cette obligation est valable uniquement pour les nouvelles concessions, ce qui ne résout pas le problème de la protection des environnements aquatiques, puisque le retour des principales concessions n'aura lieu qu'à partir des années 2030 (Reynard *et al.*, 2006 : 59).

Les préoccupations des associations pour la protection de la nature et l'initiative populaire « Eaux vivantes » ont montré à l'administration fédérale la nécessité de changer les lois en vigueur. En 2008, la Commission de l'environnement, de l'aménagement du territoire et de l'énergie du Conseil des Etats (CEATE-E) a proposé un contre-projet à l'initiative populaire « Eaux vivantes »⁴. Ce contre-projet, appelé « Protection et utilisation des eaux », poursuit trois objectifs : (1) réduire les effets nuisibles des éclusées et réactiver le régime de charriage des rivières, (2) promouvoir la revitalisation des tronçons compromis ; (3) autoriser des dérogations supplémentaires en matière de débit résiduel au profit d'une utilisation plus intensive de la force hydraulique (p.ex. pour les cours d'eau à faible potentiel écologique). Ce contre-projet reprend substantiellement les demandes de l'initiative populaire fédérale « Eaux vivantes », qui a entre-temps été retirée, concernant les éclusées et le charriage et est le premier pas vers la modification de la Loi sur la protection des eaux (LEaux).

Très récemment, le 1^{er} janvier 2011, le Conseil fédéral a mis en vigueur la Loi modifiée sur la protection des eaux (LEaux). Les nouvelles dispositions approuvées par le Parlement

⁴ Source : site de l'Office fédéral de l'environnement (www.bafu.admin.ch). Consulté le 1^{er} décembre 2011.

prévoient, outre la délimitation de l'espace réservé aux eaux (art. 36a), les interventions de revitalisation (art. 4, art. 37, art. 38a et art. 62b) et la réduction des effets négatifs des éclusées (art. 32, art. 39a et art. 62c). Les autorités cantonales, en collaboration avec les détenteurs de centrales hydroélectriques, sont donc tenues d'éliminer les atteintes causées par les éclusées et de planifier les assainissements nécessaires. Les interventions prévues concernent la réduction et la prévention des effets négatifs de l'exploitation de la force hydraulique, le rétablissement du régime de charriage et de la connectivité fluviale, aussi que la suppression des obstacles à la libre migration des poissons. Accompagnant cette loi, l'Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) a été modifiée le 4 mai 2011 et est entrée en vigueur le 1^{er} juin 2011⁵.

En conclusion, nous pouvons souligner la présence d'une forte modification, au cours des dernières années, des lois sur la protection des environnements aquatiques. Cette évolution normative est due surtout à une transformation des objectifs d'aménagement du territoire et de gestion des ressources naturelles. Si, jusque dans les années 1980, l'économie jouait un rôle prépondérant dans le développement des sociétés, actuellement, l'environnement a acquis une importance croissante et nous arrivons à saisir nos choix en fonction de la protection de ce dernier. Les objectifs de gestion des écoulements sont également modifiés : l'objectif est l'acquisition d'une connaissance de l'ensemble des processus, de l'amont vers l'aval, qui régissent les dynamiques fluviales.

⁵ Source : le site de l'Agenda 21 de l'eau (www.wa21.ch). Consulté le 13.12.2011.

2) Problématique

2.1 Question générale

La problématique du marnage, au caractère très complexe de par ses multiples effets sur l'hydrologie, sur la morphologie et sur l'écologie, est le sujet de plusieurs études dans le domaine de l'aménagement fluvial. Les impacts sur l'environnement sont connus ; par contre, l'ampleur de ces effets et les mesures d'assainissement nécessaires sont encore peu connus et plusieurs aspects doivent encore être étudiés (Estoppey et Devanthéry, 2009). Une bonne connaissance du fonctionnement du système constitue un facteur clé de la réussite des interventions.

Nous l'avons dit à plusieurs reprises : le rôle de la morphologie dans la disponibilité des habitats aquatiques est fondamental (Amoros et Petts, 1993 ; Arge Trübung Alpenrhein, 2001 ; Baumann et Klaus, 2003). En outre, on suppose que l'une des causes de la diminution des prises de pêche est liée aux variations du régime d'écoulement (Fischnetz, 2004). Pour les espèces piscicoles, le type et la qualité du substrat constituent un facteur très important pour la phase reproductive. Selon la dynamique sédimentaire (érosion, transport et sédimentation), les impacts sur le frai et la disponibilité en habitats peuvent être très différents. Une étude dans le domaine de la géomorphologie fluviale s'avère donc indispensable pour la détermination de l'ampleur des effets de l'*hydropeaking*.

La question générale motivant ce travail de mémoire est la suivante :

Quels sont les effets du marnage sur l'hydrologie, sur le transport et le dépôt des sédiments ?

L'objectif est d'apporter de nouveaux éléments qui permettent de mieux comprendre la réponse au marnage des différents tronçons du cours d'eau et d'évaluer les éventuelles situations favorables à l'atténuation des effets cités.

2.2 Objectifs et hypothèses de travail

Dans cette partie du travail, nous allons d'abord illustrer le moteur qui alimente cette recherche. Le but est d'apporter de nouveaux éléments pour la compréhension des environnements aquatiques influencés par les activités anthropiques, notamment la production hydroélectrique. Les trois objectifs principaux sont les suivants :

1) Quantifier les effets du marnage sur le régime hydrologique et sur la dynamique sédimentaire du cours d'eau

Il s'agit de l'objectif prédominant de ce travail. Nous voulons répondre aux questions suivantes. Quel type de variations hydrologiques subit le cours d'eau sujet au marnage ? Quelle est l'intensité du phénomène ? Quel est le rapport entre le débit d'écluse et le débit plancher ? Quelles sont les variations de la dynamique des matériaux fluviaux ? Y a-t-il de l'érosion et du transport de sédiments pendant l'arrivée de la crue artificielle ? Y a-t-il du colmatage ?

Hypothèse : *Le régime d'écoulement est étroitement lié à la demande et à la production hydroélectrique. Le débit varie selon le type de production, d'un jour à l'autre, d'une semaine à l'autre, d'une saison à l'autre. L'intensité du phénomène et la fréquence des pics artificiels influencent la dynamique du lit.*

Il s'agira de quantifier le rapport entre le débit plancher et le débit d'écluse et d'en comprendre la relation avec l'érosion, le transport et la sédimentation des matériaux fluviaux. Cette hypothèse sera vérifiée à l'aide des données des stations hydrologiques et des méthodes appliquées le long des cours d'eau étudiés (Moesa et Morobbia) (Chap. 6).

2) Saisir la relation entre la morphologie du cours d'eau et les effets des écluses

Est-ce qu'il y a un changement entre les différents tronçons du cours d'eau ? L'état écomorphologique joue-t-il un rôle prédominant dans l'atténuation/aggravation des effets ?

Hypothèse: *Chaque tronçon du cours d'eau réagit différemment selon l'état écomorphologique, l'hétérogénéité de l'écoulement et l'offre en habitats aquatiques.*

Pour tester cette hypothèse une intégration de la méthode pour l'analyse écomorphologique (Hütte et Niederhauser, 1998) sera indispensable (Chap. 6.2). Une liaison avec toutes les données acquises sur le terrain est nécessaire.

3) Discuter et comparer les données recueillies le long de deux cours d'eau d'étude avec des études conduites le long d'autres cours d'eau suisses (Ticino, Oberhasli) (Consorzio D.R.I.F.T., 2011 ; Schweizer *et al.*, 2010 ; Schweizer et Weissmann, 2011) et proposer des mesures d'assainissement

Quelle est la situation par rapport à d'autres études et données recueillies ailleurs ? Quelles peuvent être les mesures d'assainissement ? Comment intervenir sur un cours d'eau compromis afin d'améliorer ses qualités hydrologiques, morphologiques et écologiques ?

Hypothèse : *Les résultats peuvent être en accord ou pas avec les autres études.*

Dans cette partie, nous allons relier nos résultats à ceux d'autres études citées dans le chapitre introductif et nous chercherons à saisir les points en commun. Les mesures d'assainissement dépendent du tronçon du cours d'eau, de sa dynamique hydrologique, du type d'exploitation hydroélectrique et de la gestion, voire de l'exploitation anthropique de son bassin versant.

2.3 Plan de la recherche

Cette recherche s'appuiera sur des éléments liés à la compréhension de la dynamique hydrologique et morphologique des cours d'eau exploités par la force hydraulique. Deux études de cas seront présentées. Après l'introduction du cadre général du mémoire (**Chap. 1**), nous avons exposé la problématique, les objectifs et les hypothèses du travail (**Chap. 2**). Les définitions théoriques, liées au domaine de la géomorphologie fluviale, seront traitées dans le troisième et le quatrième chapitre. Le chapitre 5 va se pencher sur la présentation de la zone d'étude, avec une distinction entre les cadres géographique (**Chap. 5.1**), géologique (**Chap. 5.2**), géomorphologique (**Chap. 5.3**), climatique (**Chap. 5.4**) et hydrologique (**Chap. 5.5**). Les méthodes utilisées dans cette étude sont présentées au chapitre 6. Le chapitre 7 est consacré aux résultats obtenus après les analyses de terrain et le chapitre 8 à l'interprétation et à la discussion de ces derniers. Les derniers chapitres (**Chap. 9 - Chap. 11**) permettront de déboucher sur quelques conclusions et d'ébaucher des perspectives pour les travaux futurs.

II^e PARTIE

CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIQUE

Chapitre 3 : La géomorphologie fluviale	p. 17
Chapitre 4 : L'utilisation et l'aménagement du système fluvial	p. 31
Chapitre 5 : Présentation de la zone d'étude	p. 38
Chapitre 6 : Cadre méthodologique	p. 63

3) La géomorphologie fluviale

La **géomorphologie fluviale** est une discipline scientifique s'intéressant principalement à l'étude des processus physiques régissant le fonctionnement des cours d'eau (dynamique fluviale) et les formes qui en résultent (morphologie fluviale) (Malavoi et Bravard, 2010). Les eaux courantes intéressent la quasi-totalité de la surface continentale et sont parmi les plus importants agents de transport (Coque, 2006). Leur rôle, du point de vue géomorphologique, est fondamental en termes d'érosion, de transport et d'accumulation, qui influencent le territoire en modelant le relief. La **morphogenèse fluviale** est un élément essentiel pour comprendre l'évolution d'une région ; en effet elle permet de réfléchir sur la multiplication, manifestée durant les dernières années, des dégâts naturels provoqués par des mutations de la dynamique fluviale, liées d'une part aux changements climatiques, et de l'autre à l'augmentation des activités anthropiques.

Les processus géomorphologiques dépendent des variables hydrologiques ; il est donc nécessaire de donner un aperçu des principales notions (Chap. 3.1), pour plonger ensuite dans le domaine de la géomorphologie fluviale (Chap. 3.2 et suivants).

3.1 Les écoulements de surface

L'**écoulement superficiel** dépend des conditions hydrologiques, telles que le régime des précipitations, l'évaporation, l'évapotranspiration et l'infiltration. Les écoulements présents sur la surface terrestre sont très hétérogènes, car localisés dans des régions ayant des caractéristiques climatiques différentes. Le terme « régime » renseigne sur les fluctuations d'un élément du cycle de l'eau, pendant un certain intervalle de temps (Haller *et al.*, 2007). Dans ce sous-chapitre, nous allons présenter les principaux régimes hydrologiques suisses et leurs variations saisonnières. Le but est de comprendre la variabilité hydrologique présente sur notre terrain d'étude et de considérer les caractéristiques des régimes hydrologiques comme des informations supplémentaires pour la gestion des cours d'eau. Des notions sur les réseaux hydrographiques et sur le comportement des écoulements seront données par la suite.

3.1.1 Les régimes hydrologiques

Le **débit** (Q) correspond à un volume d'eau qui s'écoule à travers une section transversale en un temps déterminé (Charlton, 2009). L'unité de mesure la plus fréquemment utilisée est m^3/s . Durant les dernières années, presque tous les pays ont développé des réseaux de mesure de débits qui permettent d'acquérir des données journalières, mensuelles et annuelles. Grâce aux mesures effectuées pendant une année hydrologique, il est possible de mettre en évidence les

variations saisonnières qui sont contrôlées par le régime des précipitations, par la nature du bassin versant et par la situation géographique. Ces différences saisonnières permettent d'assigner à chaque cours d'eau un **régime hydrologique** qui se définit par les variations du débit mensuel mesuré sur un ensemble d'années et nous renseigne sur le mode d'alimentation, c'est-à-dire sur le type de source de l'écoulement (pluvial, nival, glaciaire).

En Suisse, la régionalisation des écoulements a été effectuée par Aschwanden et Weingartner (1985) sur 95 bassins représentatifs en se basant sur le comportement saisonnier des débits moyens, décrit par le coefficient de Pardé (*PKi*) (Pardé, 1933 ; Haller *et al.*, 2007). Ce dernier est défini de la manière suivante :

$$PKi = \frac{MQ_i \text{ (mensuel)}}{MQ \text{ (annuel)}}$$

Où :

MQ_i (mensuel) est le débit du mois considéré ;

MQ (annuel) est le module⁶ ;

i est le mois considéré.

Le **coefficient de Pardé** permet de distinguer trois types de régimes hydrologiques : le régime simple, caractérisé par un seul type d'alimentation et par une seule alternance annuelle (un maximum et un minimum mensuels pendant une année hydrologique), le régime mixte, caractérisé par deux types d'alimentation, et le régime complexe qui est caractérisé par la succession de plusieurs types d'alimentation de l'amont vers l'aval du bassin versant (Haller *et al.*, 2007). Les régimes hydrologiques suisses ont été divisés en trois groupes : les régimes alpins (a-glaciaire, b-glaciaire, a-glacio-nival, b-glacio-nival, nivo-glaciaire, nival-alpin), les régimes préalpins et jurassiens (nival de transition, nivo-pluvial préalpin, pluvial supérieur, pluvial inférieur, nivo-pluvial jurassien, pluvial jurassien) et les régimes du Sud des Alpes (nival méridional, nivo-pluvial méridional, pluvio-nival méridional, pluvial méridional) (Fig. 3.1).

⁶ Débit moyen inter annuel.

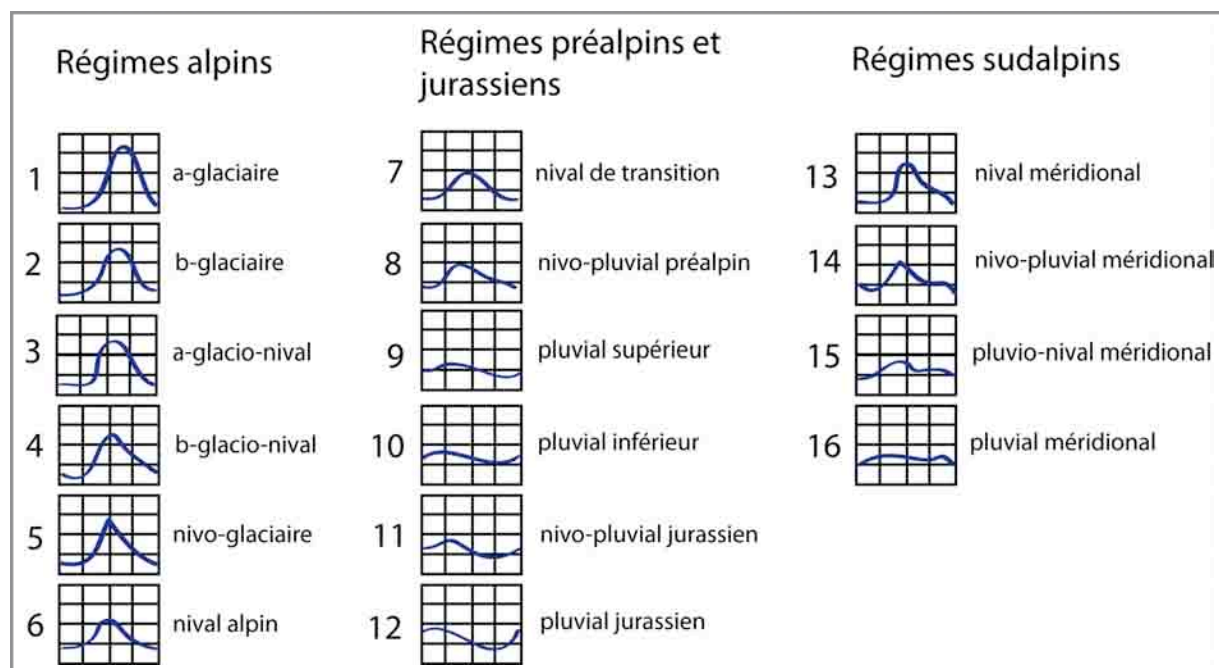


Figure 3.1 – Régimes hydrologiques de la Suisse (d'après la classification de Aschwanden et Weingartner, 1985).

3.1.2 Les réseaux hydrographiques

Même si, dans le langage courant, nous définissons par le terme « cours d'eau » tous les types d'écoulement de surface, il existe une distinction précise selon leur taille et leur débit. Le **ruisseau** est un petit cours d'eau à écoulement pérenne caractérisé par un débit faible. Il se différencie du **torrent**, typique des environnements montagnards, car ce dernier est à écoulement discontinu (ou spasmodique) ; son développement est donc profondément lié à l'apport des précipitations et l'écoulement est limité exclusivement aux périodes arrosées ou à la fonte des neiges. Le torrent est généralement caractérisé par trois éléments principaux : le bassin de réception, le chenal d'écoulement et le cône de déjection (Coque, 2006 ; Reynard et Regolini-Bissig, 2008).

Par le terme de **rivière**, on désigne un écoulement caractérisé par un débit d'importance moyenne à forte. Le **fleuve** est le cours d'eau plus important à écoulement continu et avec une embouchure dans la mer ou l'océan.

Les cours d'eau constituent des **réseaux hydrographiques**, considérés comme des éléments linéaires et hiérarchisés dans lesquels ont lieu des processus de transfert d'eau et de sédiments, qui assurent le drainage d'une portion d'espace délimitée par des lignes de partage des eaux, appelée **bassin versant**, ou bassin hydrographique. Ce dernier est une entité topographique et hydrologique dans laquelle se produisent des entrées en eau sous forme de précipitations (Bravard et Petit, 1997) et est délimitée, de manière générale, par les lignes de crêtes des reliefs.

3.1.3 La vitesse du courant et le comportement de l'écoulement

Puisque les processus géomorphologiques fluviaux dépendent fortement des données hydrodynamiques, connaître le type d'écoulement et son comportement est fondamental. Les méthodes pour la détermination du courant sont multiples et varient selon le débit à mesurer. Notre but n'est pas de donner une liste des principales méthodes de mesure ; les lecteurs intéressés peuvent se référer aux principaux ouvrages de géomorphologie fluviale (Leopold *et al.*, 1995 ; Kondolf et Piégay, 2003 ; Charlton, 2009).

De façon générale, les variations de vitesse se produisent, de manière décroissante, de l'amont vers l'aval (Charlton, 2009). Cette évolution est souvent le résultat d'un changement de pente. Près des zones d'embouchure, la pente diminue fortement, donc la vitesse se réduit et est accompagnée par le dépôt de matériaux fins, avec la formation de deltas ou, dans le cas des systèmes torrentiels, avec la formation de cônes de déjection. D'autres facteurs sont responsables d'un changement de la vitesse : le débit, la largeur de la section et la profondeur de l'eau. La vitesse d'écoulement ne varie pas seulement de l'amont vers l'aval, mais également latéralement dans le chenal. Pour mieux comprendre cette relation, il suffit de marcher dans une rivière : latéralement, près des rives, la vitesse est assez faible et elle augmente en se déplaçant vers le milieu pour atteindre la valeur maximale au centre de l'écoulement (Charlton, 2009). Des changements se produisent aussi verticalement : au niveau du lit fluvial la vitesse est très faible, elle augmente en remontant vers la surface pour atteindre les valeurs maximales juste au-dessous du plan d'eau (gradient vertical de vitesse) (Charlton, 2009 : 75). En général, la vitesse moyenne est localisée environ à 40 % de la profondeur du fil de l'eau (Lane, communication orale 2011).

Les variations décrites jusqu'ici considèrent les changements des vitesses de l'amont vers l'aval et à l'intérieur d'une section transversale (de rive gauche à rive droite, ou vice-versa). Des différences peuvent également être observées à l'intérieur d'une unité fluviale (tronçon), avec la formation de zones caractérisées par des vitesses hétérogènes qui se succèdent l'une après l'autre. Nous pouvons remarquer la présence de **seuils** et de **mouilles**. Les premiers sont caractérisés par une vitesse élevée, une faible profondeur et une granulométrie grossière. Nous pouvons leur associer un écoulement de type turbulent, avec des filets liquides décrivant des trajectoires compliquées. Les seconds présentent une vitesse faible, une profondeur importante et une granulométrie fine, désignée par des filets liquides qui se déplacent plus ou moins parallèlement (Fig. 3.3). La présence de ces zones de vitesses différentes est explicable par le fait que, si nous excluons d'éventuels affluents, le même volume d'eau doit passer dans des sections différentes dans un temps donné (concept de continuum fluvial) (Charlton, 2009 : 76). Les figures 3.2 et 3.3 montrent la différence de vitesses de l'écoulement et de granulométrie.

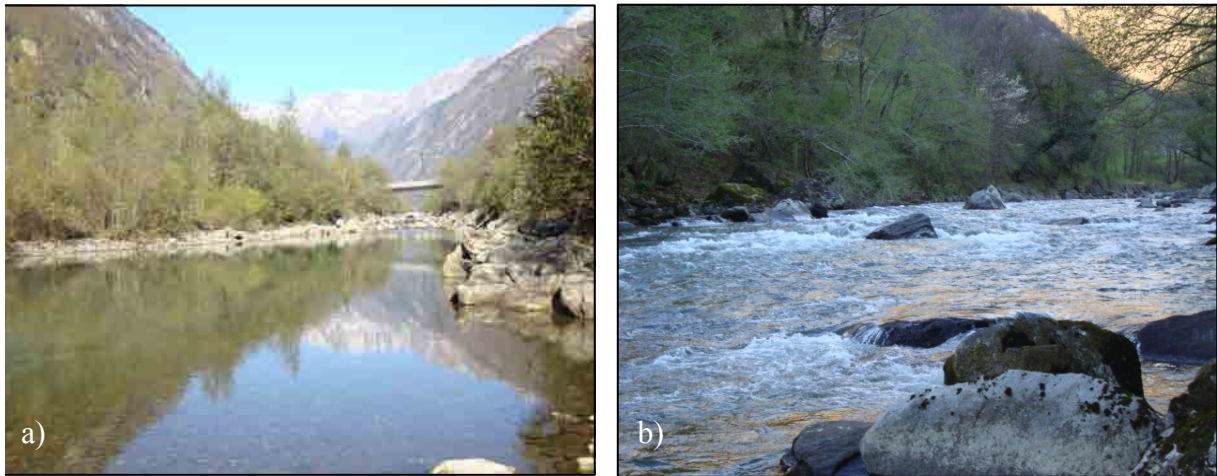


Figure 3.2 – Vitesses et types des écoulements des cours d'eau. L'image (a) montre un exemple de flux laminaire le long de la Moesa (mouille) (Golena Rosera, GR). L'image (b) illustre un exemple de flux turbulent (seuil) à Cama (GR). D'après les images, nous pouvons percevoir les différences de vitesse d'écoulement et de granulométrie.

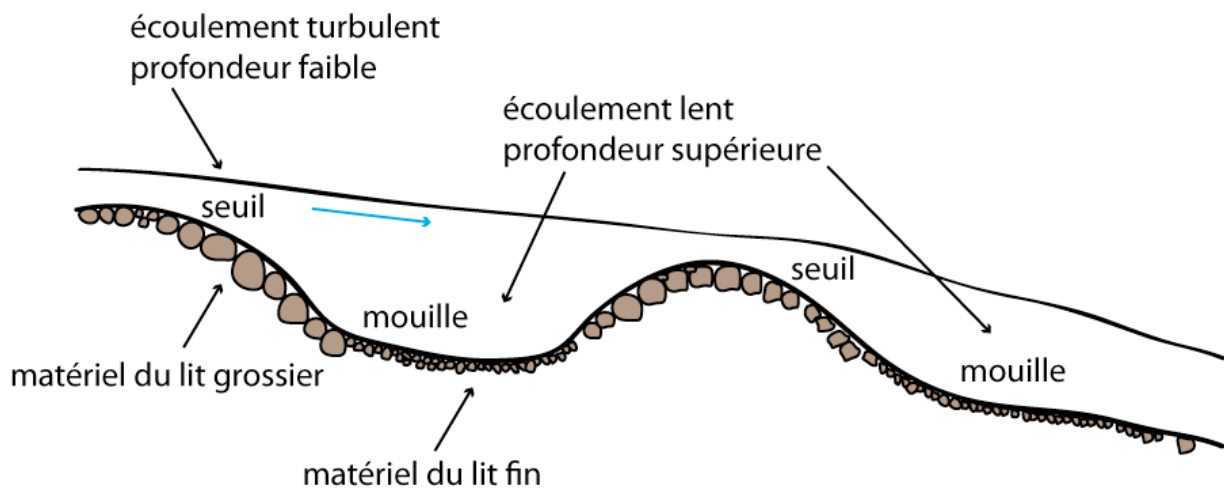


Figure 3.3 - Séquence de seuils et mouilles : la profondeur et la vitesse d'écoulement changent en influençant la granulométrie de la section fluviale (d'après Amoros et Petts, 1993).

3.2 Le système fluvial : définition et fonctionnement

Après les notions générales sur les types d'écoulements et leur comportement, nous élargissons maintenant la vision et prenons en considération les relations entre le **débit liquide** (Q) et le **débit solide** (Q_s), dans un premier temps à petite échelle (méandres), pour passer ensuite à une analyse plus détaillée à grande échelle (lit fluvial).

Un système est un ensemble d'objets liés les uns avec les autres par une boucle de processus (Charlton, 2009). Le concept de **système fluvial** se base sur les relations existant entre le cours d'eau et son bassin versant (Schumm, 1977 ; Amoros et Petts, 1993 ; Charlton, 2009 ; Lane, 2011), il intègre des relations avec les sous-systèmes (concept de hiérarchisation) (Charlton,

2009) et il met en évidence l'organisation spatiale du transport des sédiments le long d'un bassin versant, en se divisant en trois zones (Schumm, 1977) : la zone de production, la zone de transfert et la zone de stockage (Fig. 3.4).

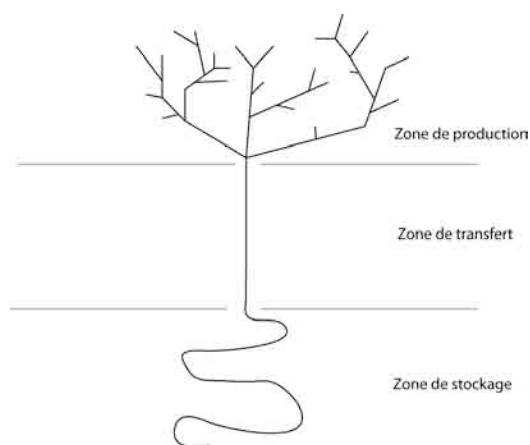


Figure 3.4 – La zonation de Schumm (1977).

La **zone de production**, caractérisée généralement par une forte pente, est constituée par l'ensemble des versants alimente le cours d'eau en matériaux. La **zone de transfert** voit sa pente diminuer vers l'aval et, en s'approchant d'un océan ou d'un bassin lacustre, les processus de sédimentation dominant (**zone de stockage**). Cette division du système fluvial met en évidence l'influence décroissante, de l'amont vers l'aval, des versants sur la dynamique fluviale (Montané, 2009). Plusieurs variables régissent le fonctionnement de ce système. Selon Schumm (1977), dans des conditions naturelles relativement constantes, les cours d'eau tendent à établir une combinaison « dynamiquement stable » entre les **variables de contrôle** (ou variables extrinsèques), telles que le débit liquide et la charge solide, et les **variables de réponse** (variables intrinsèques), telles que la largeur, la sinuosité et la pente (Malavoi et Bravard, 2010). Ces dernières permettent au cours d'eau de s'adapter aux éventuelles mutations des variables de contrôle par le biais des ajustements morphologiques qui se font par les processus d'érosion et de dépôt (Malavoi et Bravard, 2010).

Les échanges d'énergie, de matière et d'organismes qui se produisent à l'intérieur du système fluvial ne se vérifient pas exclusivement longitudinalement, de l'amont vers l'aval, mais également latéralement et verticalement (il faut considérer le cours d'eau comme un système tri-dimensionnel) (Charlton, 2009). Les interactions latérales avec la plaine alluviale et les échanges verticaux avec la nappe phréatique sont très importants pour garantir les fonctions typiques du système, la qualité des habitats et leur connectivité (Amoros et Petts, 1993). Pour connaître ces dynamiques, il faut d'abord introduire le concept d'**hydrosystème fluvial**, qui est un ensemble d'unités spatiales interconnectées (sous-systèmes) et dont l'origine, la structure et l'évolution sont étroitement liées à l'ensemble du système fluvial (Malavoi et Bravard, 2010). Les interactions latérales se produisent à travers les échanges entre le lit mineur, le lit moyen et le lit majeur. Le **lit mineur** correspond à la partie du lit où se concentrent les eaux d'étiage,

délimitée par des berges abruptes, et mouillée pendant toute l'année (Reynard et Regolini-Bissig, 2008) ; le **lit moyen**, équivaut à la partie du lit en eau pour des débits compris entre l'étiage et le **débit à pleins bords** (Fig. 3.5). Ce dernier équivaut au débit maximal qui peut se présenter à l'intérieur du chenal, sans qu'il y ait débordement. Les géomorphologues qui s'intéressent aux paléoenvironnements désignent le lit moyen sous le terme de « **bande active** » (Bravard, 1986) et ils la considèrent comme la zone majeure de stockage temporaire de la charge alluviale de fond (Malavoi et Bravard, 2010). Le **lit majeur** est mis en eau seulement lors des crues exceptionnelles. Lorsque le cours d'eau s'écoule sur un fond rocheux (p.ex. une gorge) le lit mineur et le lit majeur sont souvent confondus et on ne remarque qu'une variation verticale (Reynard et Regolini-Bissig, 2008).



Figure 3.5 – Le lit mineur et moyen (ou bande active) de la Moesa à Leggia (GR).

L'étude du système fluvial et de l'hydrosystème permet de comprendre les relations entre le débit et les sédiments, qui déterminent la morphologie du chenal et les relations avec la plaine alluviale (Amoros et Petts, 1993).

3.3 L'action des eaux courantes sur les sédiments : les processus d'érosion, du transport et de sédimentation

Le comportement des eaux courantes est le résultat d'une série d'interactions sédimentaires complexes : lorsqu'il y a un excédent d'énergie, un processus de transport sédimentaire et d'érosion se met en place ; à l'inverse, un déficit en un point donné se traduit par un dépôt (Charlton, 2009 ; Reynard et Regolini-Bissig, 2008). Ces dynamiques sont différentes selon la nature du lit. Sur un lit rocheux, les processus d'érosion dominent, car la présence de matériaux mobilisables est limitée. Ces cours d'eau sont caractérisés par la création de cavités

et d'incisions (*ripples*) qui ont été érodées par l'action d'abrasion (Charlton, 2009) effectuée par les matériaux transportés. Dans le cas d'un lit formé d'une abondante charge solide, nous pouvons observer des processus d'érosion, de transport et de sédimentation qui vont déterminer la mobilité du chenal et donc sa forme et celle de sa plaine alluviale.

Dans notre travail, nous nous concentrerons sur les processus qui se produisent dans les chenaux fluviaux à lit mobile, car la première situation ne concerne ni notre problématique de recherche, ni notre zone d'étude.

3.3.1 La dynamique sédimentaire dans les lits mobiles : notions générales

Par le terme « débit solide » (ou « charge solide »), nous désignons les matériaux fluviaux transportés par l'activité des eaux courantes. Leur transport dépend principalement de trois forces : la gravité, la force tractrice du courant et les forces ascendantes engendrées par la turbulence, capables d'arracher les matériaux (Charlton, 2009). De manière générale, nous pouvons classer les matériaux fluviaux selon leurs dimensions et leur type de transport : une partie des matériaux transportés est qualifiée de **charge grossière** ou de **charge de fond** ; elle se distingue de la charge en suspension (Reynard et Regolini-Bissig, 2008 ; Charlton, 2009). Le transport de la charge de fond se fait par progression des matériaux sur le fond du lit, soit par roulement des particules individuelles avec éventuellement des sauts (**saltation**), soit par **charriage**, par progression en paquets de l'ensemble du matériau constituant le fond du lit (Bravard et Petit, 1997) (Fig. 3.6). Les particules les plus fines sont entraînées en **suspension**. Une grosse charge en matières en suspension augmente la turbidité de l'eau et diminue sa transparence. Des particules très fines peuvent être dissoutes en solution (Charlton, 2009). Les matériaux qui sont transportés sur le fil de l'eau sont classés comme « flottants » (ex. branche d'arbre) (Bravard et Petit, 1997).

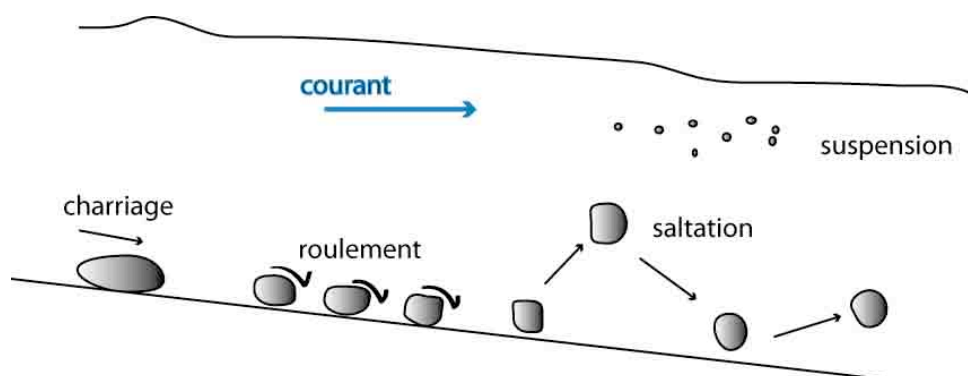


Figure 3.6 – Type de transport de la charge solide (d'après Charlton, 2009).

Les matériaux transportés par charriage jouent un rôle important dans la dynamique fluviale, notamment en provoquant les problèmes de stabilité des lits et des berges (Bravard et Petit, 1997). La distance parcourue par la charge de fond dépend principalement de l'importance et de la durée de la crue mobilisatrice, de la taille du matériau et de la taille du cours d'eau (Bravard et Petit, 1997 ; Robert, 2003 ; Charlton, 2009).

3.3.2 Le transport sélectif des sédiments

Le transport des sédiments s'effectue par différents moyens. La compréhension de la dynamique sédimentaire est intéressante pour l'analyse des éventuels dégâts aux infrastructures anthropiques (routes, ponts) et pour la localisation des éventuelles perturbations aux zones frayères. De nombreux chercheurs ont essayé de définir le seuil nécessaire pour déterminer le type de processus, soit d'érosion, soit de transport, soit de dépôt des particules. Les premières études sur ce sujet ont été menées en 1935 par Filip Hjulstrøm qui a mis en évidence la relation entre la compétence de l'écoulement, qui se définit par le diamètre le plus gros des éléments déplacés, et les débits moyens critiques (Fig. 3.7). Hjulstrøm (1935) considère les vitesses critiques d'érosion et le diamètre des particules comme les éléments délimitant l'écart entre érosion et sédimentation (Reynard et Regolini-Bissig, 2008).

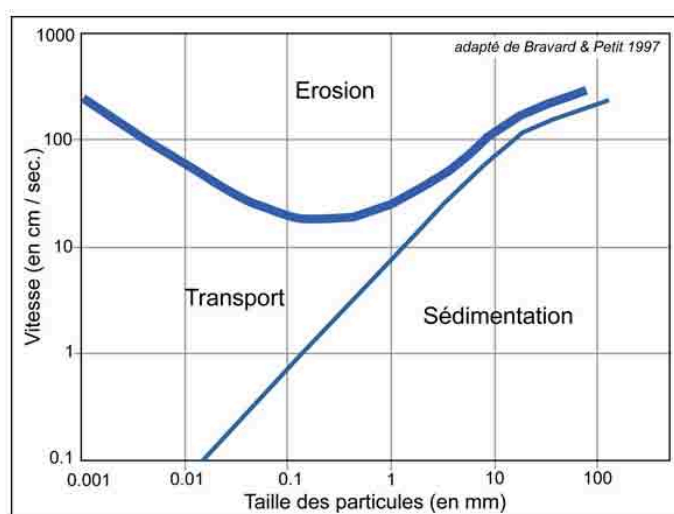


Figure 3.7 – La courbe de Hjulstrøm (1935). Une échelle logarithmique est utilisée pour les deux axes (tirée de Morard et al., 2009).

La figure 3.7 montre la relation mise en évidence par Hjulstrøm (1935). Les courbes indiquent les seuils d'entraînement ou de sédimentation des différentes particules. En général, le diamètre du matériel transportable par une rivière augmente avec la vitesse du courant : le sable est facile à transporter ; pour des sédiments de grande taille, qui ont un poids supérieur, la vitesse d'entraînement doit être plus grande. Pour l'arrachement des particules fines, une vitesse plus élevée est nécessaire parce qu'elles présentent une plus grande cohésion entre

elles (Reynard et Regolini-Bissig, 2008 ; Charlton, 2009). Le dépôt se produit lorsque la compétence diminue, en raison d'une réduction de la pente, du débit ou de la vitesse d'écoulement (Reynard et Regolini-Bissig, 2008). D'autres conditions peuvent produire une augmentation du taux de dépôt : l'augmentation de la section transversale du cours d'eau (élargissement du lit), l'augmentation de la frontière de la résistance (dus par exemple à la végétation) et l'obstruction du débit (Charlton, 2009).

Une approche alternative a été proposée par Albert Shields en 1936 (Charlton, 2009). Cette théorie définit la contrainte de cisaillement critique du lit nécessaire pour le transport des particules. Le paramètre de Shields (τ^*), qui apparaît dans de nombreuses équations de transport, est représenté dans l'équation suivante :

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

Où :

τ est la contrainte de cisaillement ;

ρ_s est la densité des sédiments ;

ρ est la densité de l'écoulement ;

g est l'accélération de gravité ;

D est le diamètre d'une particule caractéristique.

Selon Shields (1936), la contrainte de cisaillement critique augmente avec la taille des particules et la rugosité.

Cependant Hjulstrøm et Shields ont mené leurs analyses en utilisant des sédiments de fond d'une taille unique. De fait, les deux théories ne sont pas représentatives des conditions des chenaux, où les sédiments sont caractérisés par des tailles très variées (Charlton, 2009 : 103). Nous comprenons donc que la détermination de la relation entre l'écoulement et le transport des sédiments est assez complexe à définir et souvent, la quantification du transport sédimentaire est très difficile. La méthode présentée ci-dessous, l'équation de « Du Boys », est souvent utilisée pour estimer la contrainte de cisaillement du débit de l'eau, qui est exprimée comme force par unité de surface en Nm^{-2} . D'après cette méthode, il est possible d'observer la relation entre la vitesse d'écoulement et la contrainte de cisaillement exercée sur le lit : elle augmente avec le débit et la pente du chenal (Charlton, 2009 : 69).

$$\tau_0 = \rho g R S$$

Où :

τ_0 qui est la moyenne spatiale de cisaillement ;

ρ est la densité de l'eau ;

g est l'accélération par gravité ;

R est la hauteur de l'eau

S est la pente.

Récemment, d'autres auteurs (Wilcock et Crowe, 2003) ont proposé une méthode, créée à partir d'expériences physiques de laboratoire, qui permet de quantifier les processus qui régissent le lit et de déterminer le volume de sédiments transportés (Lane, 2011). Cette méthode semble être très efficace et elle est actuellement utilisée pour un modèle, appelé BAGS (*Bedload Assessment for Gravels-bed Streams*) (Pitlick *et al.*, 2009), qui permet de quantifier le transport des sédiments à partir des données recueillies sur le terrain, telles que la mesure de la section transversale, la granulométrie, le débit et la contrainte de cisaillement. L'avantage de cette méthode pour l'estimation du volume de sédiments transportés est très intéressante, car elle prend en considération une distribution hétérogène des grains, avec une taille granulométrique différente, ce qui n'as pas été pris en compte par Hjulstrøm (1935) et Shields (1936).

Nous comprenons d'abord que la quantification des sédiments transportés est assez complexe et difficile à déterminer.

3.3.3 L'usure

L'usure est une autre action géomorphologique produite par l'action des eaux courantes et correspond à la tendance à arrondir les galets pendant leur transport. Elle est contrôlée par la lithologie, la composition minéralogique, la taille des grains (Montané, 2009) et elle est l'une des causes de la diminution du diamètre vers l'aval (Coque, 2006). Récemment, une étude menée le long du Rhône (Montané, 2009; Montané *et al.*, 2010) a montré que cette diminution du gradient longitudinal vers l'aval n'est pas toujours réalisée : les causes principales sont liées aux apports latéraux (cours d'eau et/ou laves torrentielles), aux processus liés à l'écoulement du cours d'eau et à l'influence de la pente sur la dynamique sédimentaire (formation de cônes). Des perturbations du profil granulométrique peuvent également être liées à la présence de barrages ou d'autres ouvrages anthropiques, qui peuvent entraîner une augmentation du dépôt des sédiments. à l'aval des ouvrages. Normalement, sans la présence de ces déséquilibres, la réduction de la charge sédimentaire se fait de manière régulière de l'amont vers l'aval.

3.4 Tracés, forme des chenaux mobiles et comportement

Dans cette partie du travail, nous allons d'abord expliquer les processus géomorphologiques qui gouvernent la dynamique des lits mobiles. Charlton (2009) a souligné l'importance d'effectuer une analyse des formes fluviales à des échelles différentes : (1) celle du bassin versant, qui vise à la compréhension des dynamiques dans leur ensemble ; (2) celle des méandres (ou des tronçons) ; (3) celle d'un tronçon ; (4) celle de la structure sédimentaire et (5) celle des sédiments. Dans ce sous-chapitre, nous allons d'abord nous intéresser aux formes présentes à l'échelle des différents tronçons, pour approfondir ensuite le cadre en présentant les microformes existantes à l'échelle des structures sédimentaires, telles que le lit fluvial et les berges.

3.4.1 Les styles fluviaux

Les lits de cours d'eau peuvent se modifier et subir des changements importants de leur morphologie, qui vont dépendre du type d'apport liquide et solide (variables de contrôle) (Charlton, 2009). Les formes d'ajustement sont le résultat d'un processus de rétroaction qui existe entre le chenal, le débit liquide et le débit solide. Les styles fluviaux peuvent être différenciés selon le type et le nombre de chenaux (Fig. 3.8).

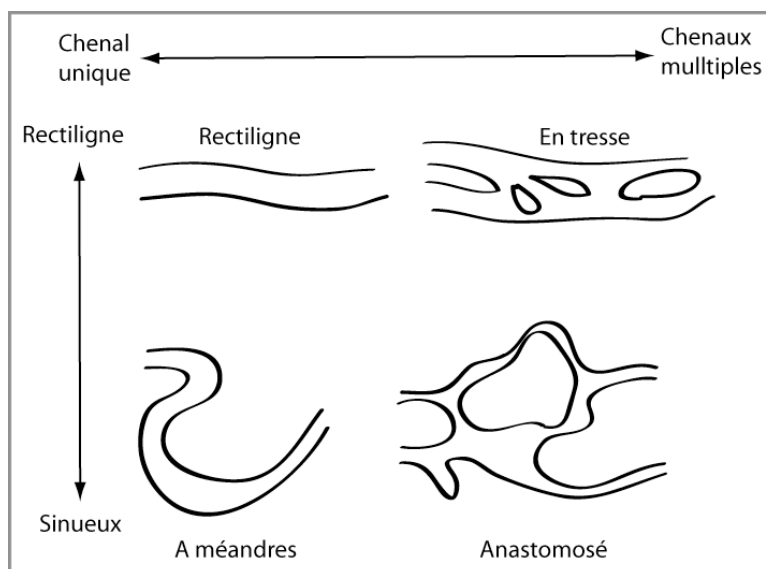


Figure 3.8 – Morphologie des lits fluviaux (d'après Amoros et Petts, 1993).

Selon la multiplicité des chenaux, nous pouvons distinguer entre cours d'eau rectilignes, à méandres, tressés et anastomosés (Amoros et Petts, 1993). Les deux premiers types possèdent un chenal d'écoulement unique, les deux derniers sont désignés par la présence de plusieurs chenaux. Les chenaux du style fluvial en tresse sont caractérisés par des bancs alluviaux pas ou peu végétalisés (Malavoi et Bravard, 2010).

Le chenal rectiligne est souvent l'indice d'un aménagement anthropique avec des conditions hydrodynamiques et écologiques altérées (Malavoi et Bravard, 2010).



Figure 3.9 - Restauration localisée d'un tronçon de la Thur à Schöffäuli (TG). Dans la partie élargie est visible un dépôt de la charge de fond, dû à une réduction locale des forces tractrices résultant de l'élargissement du chenal (Malavoi et Bravard, 2010 ; Photo : C. Hermann, BHAtteam, Frauenfeld).

3.4.2 Les variables de réponse ou d'ajustement

Les cours d'eau sont des éléments du paysage en évolution continue, qui changent dans l'espace et dans le temps. Nous avons dit que les caractéristiques des variables de contrôle régissent les processus fluviaux et les formes qui en résultent (Malavoi et Bravard, 2010). Les cours d'eau s'ajustent grâce à un certain nombre de variables de réponse, telles que la **pente (profil en long)**, la **largeur (profil en travers)** et le **style fluvial**. L'ajustement du profil en long se traduit par une forme concave vers le ciel avec une pente décroissante de l'amont vers l'aval (Reynard et Regolini-Bissig, 2008 ; Malavoi et Bravard, 2010). L'évolution de la pente se fait par rapport à un « niveau de base », c'est-à-dire le point plus bas du bassin versant (point de réception avec un affluent ou un bassin), par **érosion régressive** vers une pente idéale théorique appelée **profil d'équilibre**. L'érosion régressive désigne une érosion qui s'effectue de l'aval vers l'amont : lorsqu'un cours d'eau érode un point du profil, la pente augmente et, par conséquent, la vitesse d'écoulement s'accélère. La vitesse d'écoulement étant directement liée à la pente, il en résulte une boucle de rétroaction : l'érosion à un point donné augmente la pente et la vitesse d'écoulement, qui par conséquent accroissent l'érosion, qui se propage de proche en proche vers l'amont (Reynard et Regolini-Bissig, 2008). L'érosion régressive peut augmenter lorsque le niveau de base descend pour des raisons naturelles ou anthropiques. Au contraire, si le niveau de base monte, le profil en long subit un exhaussement, par remblaiement du chenal. Des modifications du profil en long peuvent être

amenées même à partir d'un changement des apports liquides et solides. Dans le cas où il existe un déficit sédimentaire, le profil en long s'adapte ensuite à une incision généralisée sous le processus d'**érosion progressive**. Les cours d'eau, dissipant moins d'énergie dans le transport des sédiments, disposent de plus de compétence pour éroder le fond de son lit. L'érosion est faite de l'amont vers l'aval, jusqu'à retrouver des conditions qui ne permettent plus le transport (faible pente, augmentation de la taille des sédiments) (Malavoi et Bravard, 2010). Dans la réalité, il existe des facteurs supplémentaires qui impliquent des ajustements supplémentaires des cours d'eau et, par conséquent, le profil d'équilibre n'est presque jamais atteint.

L'ajustement au moyen d'un changement du profil en long n'est pas le seul type d'évolution : les cours d'eau peuvent aussi modifier le profil en travers par le biais des changements de style fluvial (Fig. 3.9).

4) L'utilisation et l'aménagement du système fluvial

La morphogénèse anthropique est le résultat des actions d'adaptation entraînées par une modification de l'équilibre naturel provoquée par l'homme (Tricart et Cailleux, 1962). Le régime des cours d'eau a été, et il l'est encore actuellement, sujet à de nombreuses modifications liées aux activités anthropiques. Il suffit de penser à l'aménagement effectué le long des grandes rivières, qui ont été privées de leur tressage naturel pour être endiguées et permettre une amélioration de la navigation et de la sécurité contre les crues. Suite au développement des sociétés et des activités agricoles, l'exploitation des eaux concerne également l'irrigation des cultures et, dans les dernières années, la production hydroélectrique. Dans ce chapitre seront présentées les principales modifications anthropiques qui influencent les écoulements naturels. Nous pouvons les diviser en deux catégories : les impacts directs qui modifient les formes et/ou le débit, et les impacts indirects, qui sont liés à des changements des conditions environnantes qui vont affecter le système fluvial. Pour le premier sous-chapitre une distinction sera faite entre les interventions sur le parcours et celles sur le débit, en donnant une importance particulière aux aménagements hydroélectriques.

4.1 Les impacts directs

4.1.1 Les aménagements des cours d'eau

L'un des premiers exemples d'aménagement des écoulements est lié à la nécessité de se protéger contre les crues. À partir du XVIII^e siècle, le territoire suisse a été sujet des premières grandes corrections fluviales (Kander, Linth, Rhin, Rhône, Eaux du Jura, Birse, Glatt, Aar, Reuss, Broye, Emme, Tessin) (Reynard *et al.*, 2006 : 195) consacrées à l'endiguement et au redressement des cours d'eau. La vision à la base de cette pensée considérait les cours d'eau comme des éléments dangereux et néfastes pour les activités agricoles et industrielles ; leur correction était donc indispensable afin de réduire l'aléa et augmenter le potentiel d'exploitation. Malgré ces mesures de redressement des cours d'eau, de nombreuses inondations ont été enregistrées dans toute la Suisse au cours des dernières années. On a ainsi compris que les interventions effectuées dans le passé ne garantissaient pas une protection totale contre les crues (Zaugg Stern, 2002 ; Peter, 2006 ; Zaugg Stern, 2006 ; Thomi *et al.*, 2008).

Les objectifs d'aménagement du territoire ont beaucoup changé grâce à la prise de conscience de l'importance du rôle écologique des cours d'eau et de la vision de ces derniers non seulement comme élément du paysage, mais également comme corridors écologiques qui lient

les paysages entre eux et qui permettent un échange entre les biotopes. Les cours d'eau sont actuellement sujets de nombreux projets d'élargissement du lit fluvial, qui visent à redonner la dynamique naturelle aux eaux (p.ex. Pascoletto, GR) (Fig. 4.1).

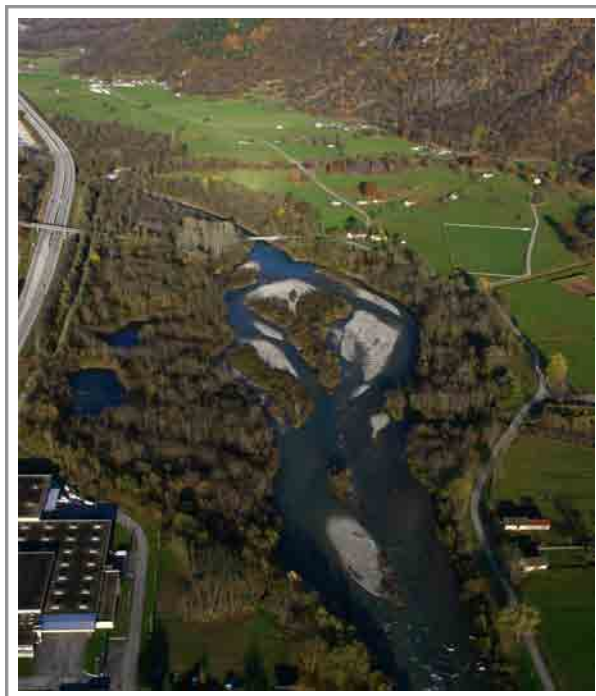


Figure 4.1 – Pascoletto (GR), tronçon de la Moesa renaturé en 2001 (OFEG, 2004) (Photo : F. Nollo, Cama).

L'homme n'est pas intervenu exclusivement sur la forme des cours d'eau : l'évacuation des galets et des sables pour améliorer la navigabilité, pour la maintenance de la sécurité hydraulique et pour l'exploitation des graviers pour des activités anthropiques est présente depuis longtemps. Le retrait des matériaux fluviaux provoque une modification du substrat fluvial qui peut déstabiliser les habitats aquatiques et les frayères (Szabó, 2010).

4.1.2 Les modifications du débit : le développement de l'hydroélectricité

L'exploitation de l'énergie hydraulique représente actuellement l'impact le plus important sur la plupart des écoulements alpins (Weingartner et Aschwanden, 1994 ; Kiefer *et al.*, 1997). Suite à l'utilisation des forces hydrauliques, les débits des cours d'eau ont été de plus en plus influencés par des prélèvements et des restitutions (Haller *et al.*, 2007). En relation avec les usines hydroélectriques, il est possible d'effectuer une distinction entre le **cours supérieur**, le **cours moyen** et le **cours inférieur** des cours d'eau (Weingartner et Aschwanden, 1994). Le premier correspond aux tronçons situés en amont des bassins d'accumulation et des prises d'eau et qui sont caractérisés par un régime naturel. Avec le terme « cours moyen », nous définissons les tronçons localisés à l'aval des prises et des barrages, qui sont caractérisés par des débits fortement réduits à cause des prélèvements pour la production hydroélectrique. Le cours inférieur correspond aux tronçons situés en aval des centrales hydroélectriques, caractérisés donc par des variations journalières du régime hydrologique (tronçons à marnage)

(Weingartner et Aschwanden, 1994).

Les impacts liés aux tronçons à marnage (cours inférieur) seront présentés dans le sous-chapitre successif (Chap. 4.1.3) ; dans cette partie, nous donnons une importance particulière aux conséquences enregistrées dans les cours moyens.

Avec la construction des prises d'eau et le prélèvement d'une part importante de l'eau, l'environnement est affecté de manière importante. Les débits sont fortement réduits et le transport de la charge solide est, dans certains cas, nul. Une altération du bilan sédimentaire est donc perceptible : une diminution de la vitesse d'écoulement entraîne une diminution de la capacité de transport et un accroissement du taux de sédimentation, avec exhaussement du lit fluvial (Charlton, 2009 ; Lane communication orale 2011). Le cas de la Borgne d'Arolla (Arolla, VS) (Fig. 4.2) est un très bon exemple permettant de comprendre cette situation. Des études menées par les étudiants des Universités de Lausanne et de Durham (UK) ont montré, grâce aux mesures effectuées récemment, un exhaussement du lit très marqué. Ceci implique une augmentation du risque d'inondation qui peut compromettre la sécurité des infrastructures du village d'Arolla. Ce cas a une importance particulière si nous pensons à l'évolution possible des processus dans les prochaines années : avec le réchauffement climatique progressif et le recul des glaciers, la surface de la marge proglaciaire va augmenter et, par conséquent, nous pouvons observer une croissance de la quantité de sédiments susceptible d'être transportée (augmentation de la source de la charge solide). Nous comprenons donc l'importance particulière de cette thématique en termes d'aménagement des cours d'eau et de dangers naturels actuels et futurs.



Figure 4.2 (a, b) – Sédimentation et exhaussement du lit à cause d'un débit liquide insuffisant : le cas de la Borgne d'Arolla (Arolla, VS).

D'autres perturbations peuvent se vérifier le long des cours d'eau exploités par une centrale au fil de l'eau : l'écoulement après le barrage provoque un débit résiduel, un transport des sédiments limité ce qui favorise le colmatage (Fig. 4.3).



Figure 4.3 – a) Barrage hydroélectrique au fil de l'eau (le Rhône à Lavey, VS). b) Après le barrage, le Rhône est à débit résiduel, la vitesse d'écoulement est nettement inférieure et le transport des sédiments limité, ce qui favorise le colmatage.

4.1.3 Le marnage et ses effets

Le mécanisme pour produire l'énergie hydroélectrique implique l'ouverture des bassins de retenue en altitude pour permettre à l'eau de passer à travers les conduites et les turbines et être déversée, ensuite, dans le cours d'eau situé en aval du point de restitution de la centrale. Le cours d'eau inférieur subit des oscillations journalières, conformément à la consommation d'électricité, en recevant une quantité d'eau plus ou moins importante provenant d'une autre partie du système. Dans le cas de l'aménagement de la Grande-Dixence (VS) par exemple, l'eau est recueillie le long de plusieurs kilomètres, jusqu'à recouvrir plusieurs bassins versants, et être déversée ensuite dans le Rhône.

Les cours d'eau à marnage sont désignés par des variations du débit, de la hauteur d'eau, de la vitesse d'écoulement et de la largeur du lit mouillé (Fig. 4.4). Ces changements peuvent se faire en un temps très court, de l'ordre de vingt minutes, avec un taux d'accroissement de l'écoulement très élevé. Les oscillations journalières du régime hydrologique impliquent des changements de la dynamique sédimentaire et des biocénoses. Les conditions hydrologiques, sédimentaires et écologiques d'un cours d'eau à marnage peuvent changer notablement et provoquer certaines des conséquences mentionnées dans le tableau 4.1. Nous pouvons citer, parmi les effets sur les sédiments, l'augmentation du transport de la charge de fond et l'augmentation des matières en suspension (Baumann et Klaus, 2003). L'arrivée de la crue artificielle (débit d'écluse) entraîne une augmentation de la capacité de transport. Le mouvement de la charge de fond provoque des perturbations aux frayères : les oeufs déposés par les poissons peuvent être détruits. Parmi les modifications de la dynamique des matières en suspension, nous pouvons citer la croissance de la concentration des particules, et donc de la turbidité, pendant le débit d'écluse. Au contraire, pendant le débit plancher, la sédimentation des matières fines peut provoquer un colmatage du lit. Ce dernier provoque l'imperméabilisation du lit conduisant à une diminution des interstices présents entre les

graviers qui entraîne une réduction des échanges verticaux (apport d'oxygène réduit, conditions défavorables pour la microfaune et la reproduction des poissons) (Schälchli, 2002).

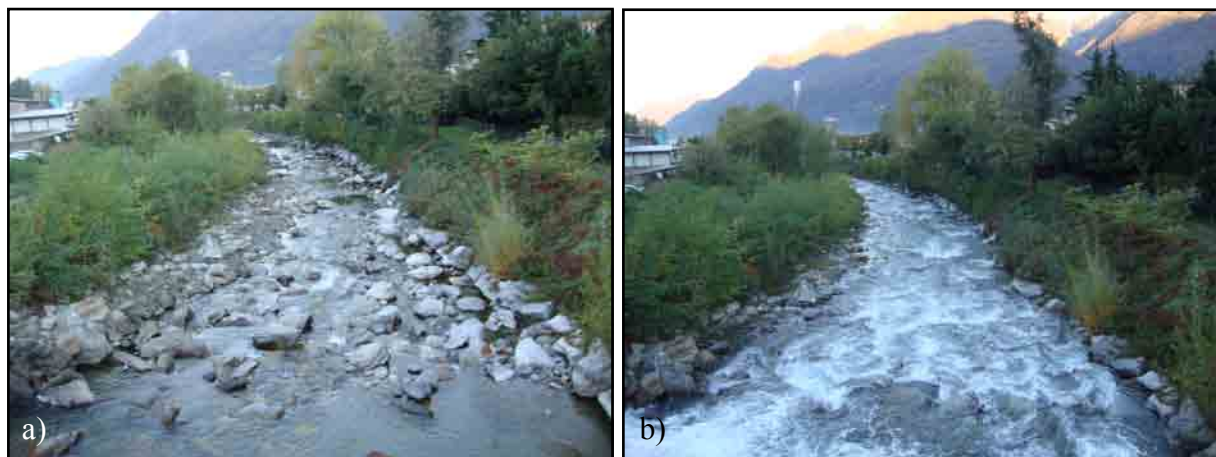


Figure 4.4 - La Morobbia (TI), le 27 octobre 2010, pendant le débit plancher (à 07:45) (a) et pendant le débit d'éclusee (à 08:30) (b).

Parmi les effets sur la biocénose, nous pouvons mentionner la présence des “zones de marnage” qui sont inondées exclusivement pendant le débit d'éclusee et sont laissées à sec pendant le débit plancher. De nombreux organismes de petite taille, notamment les macroinvertébrés et les jeunes poissons, peuvent être poussés par le courant et laissés à sec pendant un laps de temps indéterminé, notamment jusqu'à la prochaine crue artificielle (Fig. 4.5).

Ces organismes subissent également le phénomène de dérive, à savoir une colonisation forcée des zones situées plus en aval qui provoque un bouleversement des organismes.

Il est clair qu'à cause de ces nombreux effets sur l'hydrologie et sur la morphologie, la disponibilité en habitats est fortement réduite ; par conséquent la composition de la biomasse aquatique peut être compromise (Baumann et Klaus, 2003 ; Fischnetz, 2004).

Des effets sur la qualité de l'eau, notamment de ses caractéristiques chimiques et physiques, notamment le changement de température (Siviglia *et al.*, 2008) et de la concentration d'oxygène peuvent également être observés.



Figure 4.5 - Dépôt de poissons dus à l'assèchement du lit (tirée de Consorzio D.R.I.F.T., 2011).

PARAMETRES	TYPE D'EFFET
Morphologie	Largeur du lit Profondeur
Paramètres hydrauliques	Ecoulement Ecoulement à proximité du fond
Qualité de l'eau	Caractéristiques chimiques Température Concentration d'oxygène Matières en suspension, turbidité
Sédiments	Composition granulométrique Dépôt/remise en suspension Colmatage/limonage Abrasion/érosion du fond du lit Quantité/qualité des eaux souterraines
Habitats aquatiques	Offre en habitats (hydraulique) Qualité des habitats Teneur en débris/matière organique Cours d'eau latéraux Formation de glace
Ensemble de la biocénose : structure	Colonisation de la zone de marnage
Ensemble de la biocénose : fonction	Production Mortalité Dérive Echouage/assèchement
Végétation des rives : structure	Nombre d'espèces/diversité Etat de santé/vitalité
Macrophytes aquatiques : structure	Densité
Macrophytes aquatiques : fonction	Production
Phytobenthos : structure	Fréquence/densité Biomasse
Macrozoobenthos : structure	Fréquence/densité Biomasse Composition Nombre d'espèces/diversité Etat de santé/vitalité
Macrozoobenthos : fonction	Production Offre et ingestion d'aliments Dérive "Immigration"/Colonisation Activité/comportement Echouage/assèchement
Peuplement piscicole : structure	Fréquence/densité Biomasse Composition Nombre d'espèces/diversité Etat de santé/vitalité
Peuplement piscicole : fonction	Production Croissance/développement Offre et ingestion d'aliments Dérive Migrations Activité/comportement Echouage/assèchement Reproduction
Jeunes poissons : structure	Fréquence/densité Biomasse
Jeunes poissons : fonction	Croissance/développement Mortalité Dérive Activité/comportement Stress/physiologie Echouage/assèchement

Tableau 4.1 - Effets, du régime à marnage, mentionnés dans les différentes études (d'après Baumann et Klaus, 2003).

4.2 *Les impacts indirects*

L'homme n'est pas intervenu exclusivement de manière directe sur les écoulements, en modifiant la forme et le débit, mais également indirectement : l'impact anthropique sur le territoire a entraîné une augmentation des aléas hydrologiques. Les causes de ces derniers peuvent être distinguées en deux phases : (1) à partir du Moyen-Age et, avec une intensité plus importante, à partir du XIX^e siècle, suite à un fort développement des activités agricoles et à la demande accrue de terrains, l'exploitation intensive et le défrichement des forêts ont provoqué une érosion du sol plus grande et une augmentation de la torrencialité et du transport des écoulements (Reynard *et al.*, 2006 : 186); (2) à partir du XX^e siècle, la forte croissance démographique et l'urbanisation ont exercé une imperméabilisation excessive des sols qui a conduit à une situation semblable à la précédente, avec une augmentation des débits de pointe. Il faut souligner qu'une éventuelle modification dans la partie « haute » du bassin versant, c'est-à-dire dans la zone de production (Schumm, 1977), peut provoquer un changement de tout le système fluvial avec une hausse de l'érosion suivie d'une augmentation de l'apport de sédiments. Ce type d'impact, qui peut paraître marginal dans la gestion de la dynamique des cours d'eau, s'avère au contraire être une partie essentielle pour un aménagement durable des cours d'eau (Lane, 2011). La gestion d'un système fluvial doit être menée à partir de la plus petite échelle, avec l'analyse des processus géomorphologiques qui affectent les versants du bassin hydrologique d'analyse. Il faut prendre en considération le modèle de réponse du système (Lane, 2011), qui vise à identifier les causes du comportement de ce dernier et, en s'attachant aux racines du problème, rechercher une gestion à l'échelle du bassin versant.

5) Présentation de la zone d'étude

Tout travail consacré à la géomorphologie nécessite un cadre général qui s'appuie sur les principaux facteurs de contrôle de la morphogenèse, tels que les conditions géologiques, géomorphologiques et climatiques. Pour les études concernant la géomorphologie fluviale, la présentation d'un cadre hydrologique est fondamentale. Dans ce chapitre, nous allons d'abord préciser les caractéristiques principales des deux cours d'eau étudiés, lesquels nous apparaissent idéaux pour notre recherche. Après une introduction générale, concernant la délimitation et le cadre géographique (Chap. 5.1), nous présentons les conditions géologiques (Chap. 5.2), géomorphologiques (Chap. 5.3), climatiques (Chap. 5.4) et hydrologiques (Chap. 5.5).

5.1 Situation géographique

5.1.1 La Moesa

La Moesa (Fig. 5.1) prend sa source dans le Val Vignun (GR), près du village de San Bernardino à 2600 mètres d'altitude. Son tracé de 44 km se fait long du Val Mesolcina, sur le territoire des cantons des Grisons (32.1 km) et du Tessin (11.9 km), jusqu'à sa confluence avec le Ticino près d'Arbedo (TI). Les principaux villages de la vallée sont, à partir du nord : Mesocco (GR), Soazza (GR), Lostallo (GR), Cama (GR), Leggia (GR), Grono (GR), Roveredo (GR), San Vittore (GR), Lumino (TI) et Arbedo (TI).

La Calancasca, située près de Grono, et la Traversagna, près de Roveredo, sont les deux principaux affluents.

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes limités à l'analyse du tronçon à marnage, à partir de Soazza jusqu'à la confluence avec le Ticino.

5.1.2 La Morobbia

La Morobbia (Fig. 5.1) prend sa source sur le Passo San Jorio (TI) à 2012 mètres d'altitude, dans le Canton du Tessin. Après avoir parcouru la vallée du même nom sur 12.4 km, elle conflue avec le Ticino près de la ville de Giubiasco. Son affluent principal est la Melera.

Notre tronçon d'étude se limite aux deux dernières kilomètres, à partir du point de restitution des eaux jusqu'à la confluence avec le Ticino.

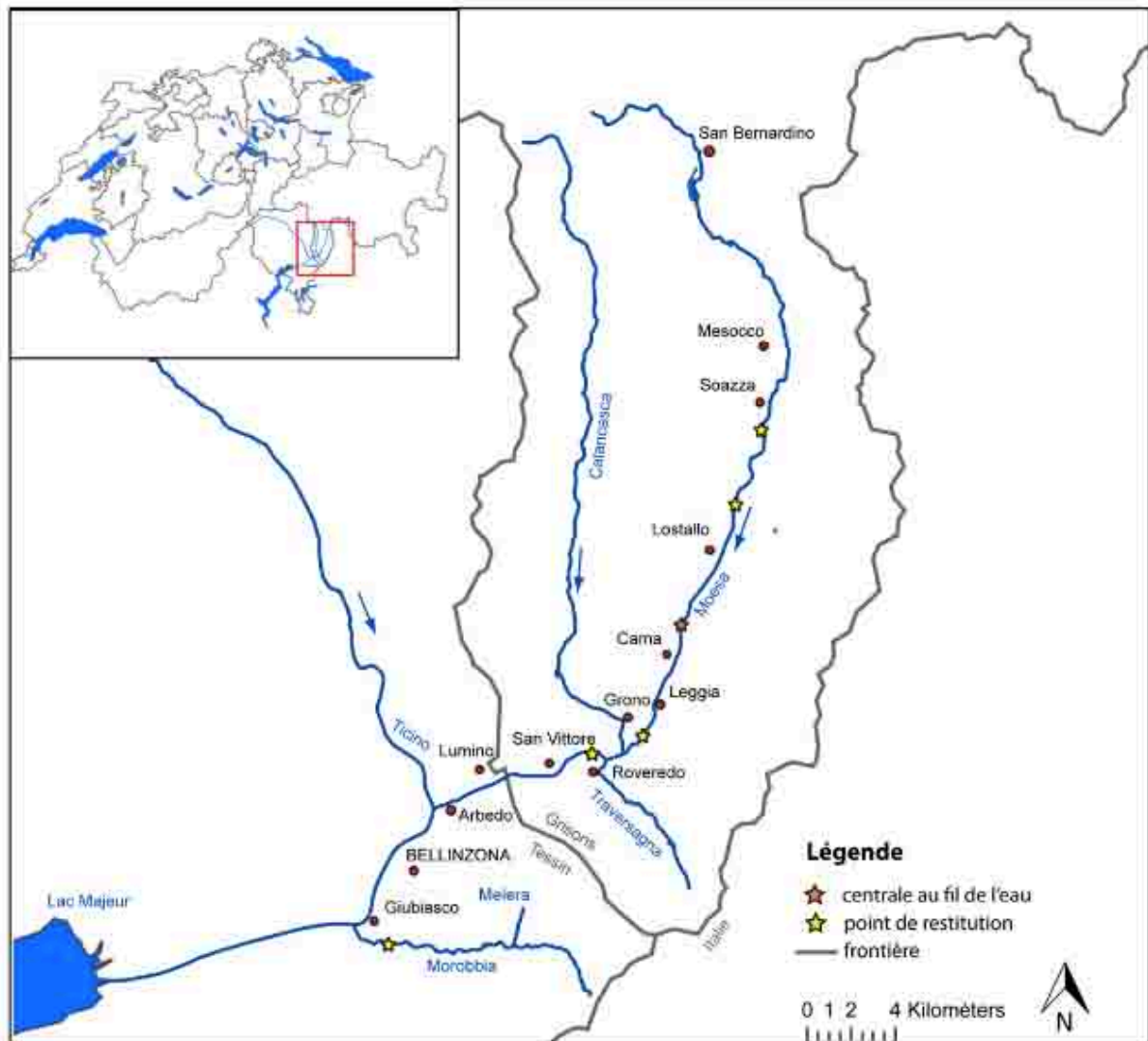


Figure 5.1 – Localisation géographique des deux cours d'eau étudiés.

5.2 Contexte géologique

Les roches qui constituent les reliefs actuels sont le résultat d'une longue histoire géologique. Dans le but de comprendre les structures géologiques caractérisant la région d'étude, un cadre général sera donné (Chap. 5.2.1), pour entrer, par la suite, dans les détails et présenter les unités tectoniques des deux vallées (Chap. 5.2.2 - 5.2.3).

5.2.1 Le Tessin dans l'orogénèse alpine

Note : Pour cette partie du travail, nous nous sommes basés principalement sur les travaux de Cotti et al., (1990) et Marthaler (2002).

A la fin du Paléozoïque, il y a environ 250 millions d'années, les terres émergées avaient une disposition totalement différente, car elles étaient réunies en un seul grand continent, la Pangée. Au début du Mésozoïque, pendant le Trias (de 251 à 200 millions d'années), le mégacontinent Pangée a commencé à se diviser en deux parties, appelées continent *Laurasien* et continent *Gondwanien*, en produisant deux grands océans : l'Atlantique central et la Téthys alpine (Marthaler, 2002). Le grand bassin de la Téthys a favorisé la formation des principales roches sédimentaires présentes le long de l'arc alpin : pendant le Jurassique (de 210 à 140 millions d'années), ce vaste océan a atteint son élargissement maximal, qui a permis la sédimentation de certaines roches que nous trouvons sur le territoire tessinois (Cotti et al., 1990). Pendant le Crétacé inférieur (de 140 à 65 millions d'années), l'Atlantique nord a commencé à s'ouvrir en créant un nouveau bassin : l'océan valaisan. Simultanément, le nord de la plaque africaine (qui faisait partie du continent *Gondwana*) se morcelait en isolant une petite plaque dite apulienne. A la fin du Crétacé et au début du Paléogène, la Téthys se referme et le rapprochement entre l'Europe et l'Apulie provoque le début du plissement alpin par subduction. La formation des Alpes, se déroule en trois phases distinctes. La première, appelée phase éoalpine, débute il y a 110 millions d'années et concerne principalement les roches qui se trouvent aux bords de la marge africaine et européenne et les roches du fond de l'océan Téthys. Pendant cette phase, les premières nappes se développent. La deuxième phase, dite mésoalpine (entre 60 et 30 millions d'années, au début du Tertiaire), se caractérise par des mouvements tectoniques très complexes et par la mise en place des nappes penniques. La troisième phase, dite néoalpine, a eu lieu il y a 30 millions d'années. Responsable d'une grande métamorphisme alpin, elle constitue la période la plus importante pour la formation des roches métamorphiques du relief tessinois, surtout dans le Sopraceneri (Cotti et al., 1990). Après cette période, les Alpes n'ont plus vécu de mouvements tectoniques importants.

L'histoire du Quaternaire, sera présentée dans le chapitre consacré au cadre géomorphologique (Chap. 5.3).

Au niveau tectonique, le territoire du Tessin et des Grisons italiens abrite, en proportions très variées, les quatre grands domaines géologiques des Alpes : l'Helvétique, le Pennique,

l'Austroalpin et les Alpes méridionales (Decuyper et Antognini, 2008). Les deux premiers domaines appartiennent, géologiquement, au secteur européen et les deux derniers au secteur africain. Les unités tectoniques qui intéressent notre zone d'étude font partie du domaine Pennique et des Alpes méridionales.

5.2.2. Le Val Mesolcina

Note : Dans cette partie du travail, nous avons pris comme base la carte tectonique et pétrographique des Alpes Lépontines Centrales (Berger et Mercolli, 2006) et sa notice explicative (Berger et al., 2007).

Le Val Mesolcina fait partie du **domaine pennique**, plus exactement des Alpes lépontines, partie géologique des Alpes suisses et italiennes délimitée au nord par les massifs cristallins externes de l'Aar et du Gothard et au sud par la plaine du Pô. Il est caractérisé par la présence de grandes unités de roches métamorphiques qui ont été poussées, suite à la collision néoalpine entre la plaque européenne et la plaque africaine. Nous distinguons la présence de deux domaines continentaux (marge européenne, Briançonnais), d'un domaine océanique (Valais), une unité « tectonique mélangée » (sans position paléogéographique uniforme) et d'une unité caractérisée par la présence de roches tertiaires intrusives. Ci-dessous, nous donnons un bref aperçu des principales unités tectoniques présentes dans la région.

A) Le Briançonnais

Sur le territoire du Val Mesolcina, nous retrouvons deux nappes appartenant au domaine du Briançonnais: les **nappes de Tambo et Suretta**, localisées dans la partie nord-est du Val Mesolcina (Fig. 5.2). On suppose que ces deux nappes ont une origine paléogéographique et une évolution géodynamique semblables. Cette dernière, avec la couverture sédimentaire de la nappe de Suretta (métacarbonates du Trias), montre une évolution sédimentaire typique du domaine briançonnais (Boudin *et al.*, 1993 ; Boudin et Marquer, 1993). Le socle des deux nappes est caractérisé par la présence de roches métamorphiques (quartzites et métacarbonates) de déformation pré-alpine.

B) L'océan valaisan

Le domaine de l'océan valaisan est localisé, avec une orientation N-S et NNO-SSE, à partir de Splügen-San Bernardino jusqu'à Mesocco. Nous y retrouvons la **nappe de Tomül** et la **nappe de Grava**, constituées par des métasédiments (Fig. 5.2). La composition des sédiments dépend de la variation dans l'abondance des composants principaux (carbonates, quartz et argiles). La nappe de Tomül est située uniquement dans la partie orientale du Val Mesolcina. La base des nappes de Tomül et de Grava est marquée par deux structures lithologiques et tectoniques, appelées respectivement Mélange de Grava et de Tomül (Steinmann, 1994).

Dans la région d'étude est également présente la **nappe Aul**, formée de marbres avec des lentilles de serpentines.

C) Paleogene Tectonic Accretion Channel (TAC) Units

Cette unité tectonique est composée par différentes nappes.

Le complexe de **la nappe de l'Adula**, qui s'étend en direction N-S depuis Vals jusqu'à l'est de Bellinzona, est l'un des éléments principaux des Alpes lépontines centrales (Berger *et al.*, 2007) (Fig. 5.2). Le complexe se divise en neuf sous-unités, qui représentent trois associations lithologiques : la première, caractérisée par des gneiss granitiques avec des petites bandes de gneiss rubané ; la deuxième, caractérisée par un mélange d'unités avec le socle formé par de gneiss séparés par des marbres et des éclogites ; la troisième marquée par des gneiss et des métasédiments. Nous pouvons donc considérer la nappe de l'Adula comme un mélange tectonique de sous-unités. Ce complexe repose sur le toit de la nappe du Simano. Près de Bellinzona, nous trouvons une unité faisant partie de la « Southern Steep Belt » (SBB) ; c'est la **zone de Bellinzona-Dascio, Arbedo-Mergoscia et Orselina**, caractérisée par une dominance de gneiss (haute déformation) (Fig. 5.2). Un petit appendice, appelé **nappe Cima Lunga**, est localisé dans la partie nord de Bellinzona et est caractérisé par différents gneiss avec des lentilles d'éclogite, amphibolite, marbre et roches ultramaphiques.

D) Le domaine européen

Nous retrouvons le domaine européen, qui se prolonge dans le Val Léventine, uniquement en rive droite de la Moesa. La **nappe du Simano**, caractérisée par une intercalation d'orthogneiss et de paragneiss, se trouve dans la partie la plus profonde de la zone helvétique (Fig. 5.2). Entre la nappe du Simano et celle de l'Adula, nous retrouvons la **nappe de la Soja**, une nappe de couverture indifférenciée et constituée par des intercalations de paragneiss, schistes et occasionnellement par des métaconglomérats.



Figure 5.2 - Principales unités tectoniques présentes dans le val Mesolcina (extrait de la carte tectonique de la Suisse 1 : 500'000 GK500-Tekto).

5.2.3 *Le Val Morobbia*

Au niveau géologique, le Val Morobbia est assez complexe, car situé à proximité de la ligne insubrienne, l'une des plus importantes failles tectoniques des Alpes. Cette dernière est composée d'une série de plissements et chevauchements qui se sont formés à l'Oligocène-Miocène (25 ma), avec un déplacement de 60 kilomètres (Fumasoli, 1974 ; Heitzmann, 1975). La ligne insubrienne sépare les unités qui ont participé à l'orogénèse alpine : les roches situées au sud n'ont été touchées que partiellement (Cotti *et al.*, 1990).

Pour le Val Morobbia, nous pouvons différencier les unités tectoniques suivantes.

A) **Le domaine de l'Adria**

La **série du Tonale**, au nord de la ligne insubrienne (en rive droite du cours d'eau Morobbia), est caractérisée par un substrat à paragneiss et amphibolites partiellement déformés dans des conditions assez fragiles, à cause des mouvements tectoniques situés près de la ligne insubrienne. En rive gauche de la Morobbia plongent des roches appartenant à la **zone Strona-Ceneri** (Oppizzi, 1999 ; Berger *et al.*, 2007), qui est formée par une unité métapélitique et une unité gneissique (Fig. 5.3). Dans cette zone, les roches sont principalement des gneiss, des amphibolites, des schistes micacés et des roches calco-silicatées.

La **zone du Val Colla**, présente sur une petite surface, est constituée de roches très semblables à celles de la zone Strona-Ceneri, comme les amphibolites, les micaschistes et les paragneiss.

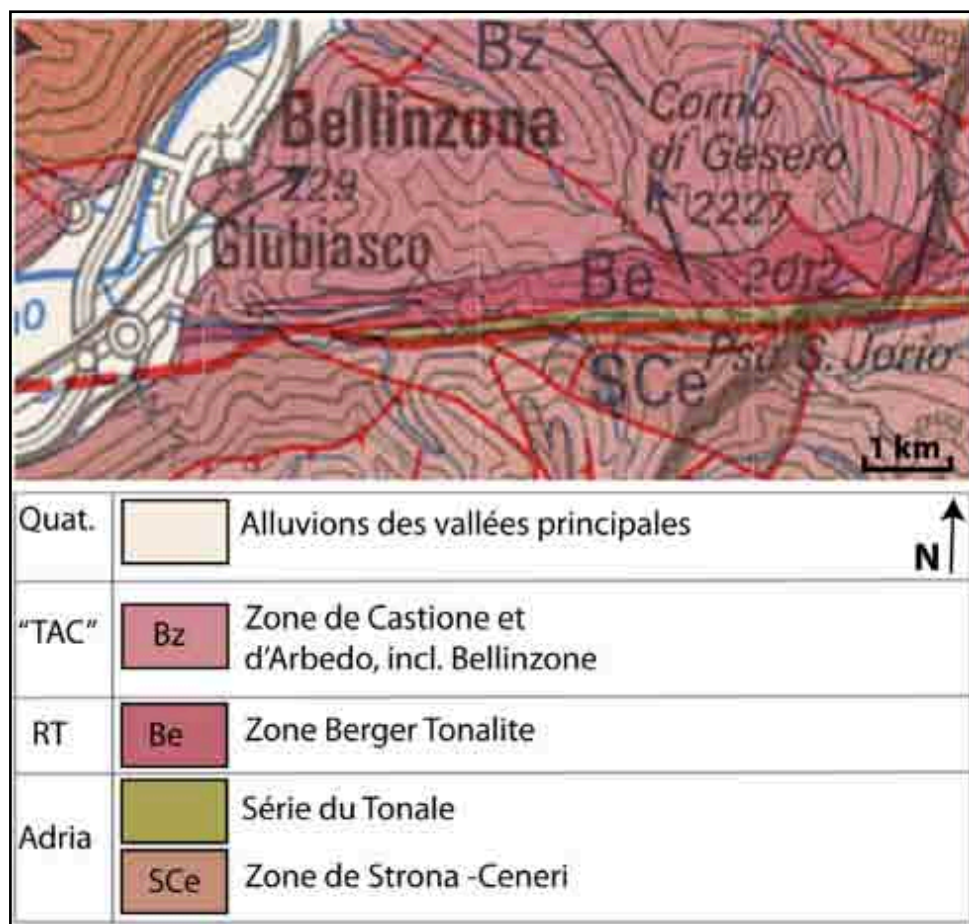


Figure 5.3 - Principales unités tectoniques présentes dans le val Morobbia (extrait de la carte tectonique de la Suisse 1 : 500'000 GK500-Tekto).

B) Paleogene Tectonic Accretion Channel (TAC) Units

Près de Bellinzona, nous retrouvons une unité faisant partie de la « Southern Steep Belt » (SBB) : la **zone de Bellinzona-Dascio, Arbedo-Mergoscia et Orselina**, à dominance de gneiss (haute déformation) (Fig. 5.3).

Dans le Val Morobbia prédominent les gneiss à muscovite avec des intercalations de micaschistes, hornblendes et amphibolites.

C) Roches intrusives du Tertiaire (RT)

Des petites lentilles de roche appartenant à la **zone Berger Tonalite** (Fig. 5.3), composées de tonalite et de granodiorite, avec de petites traces de gabbro, hornblende et granite aplitique, ont également été détectées.

5.3 Contexte géomorphologique

Les formes du relief au Sud des Alpes frappent par leur diversité : chaque vallée a sa propre physionomie par rapport à sa structure géologique, son histoire géomorphologique et son climat. Il suffit de penser à la différence considérable existant entre le Sopraceneri, où les versants sont très raides, et le Sottoceneri où les reliefs sont beaucoup moins élevés (Billet, 1972; Campana, 1988 ; Cotti *et al.*, 1990 ; Spinedi et Isotta, 2004). Ces deux régions tessinoises sont séparées par la ligne insubrienne (Chap. 5.2.3). Le type de modelé s'explique par le travail géomorphologique : le Sopraceneri a connu une forte action de l'érosion glaciaire qui a modelé le territoire en lui donnant des parois assez raides, des vallées suspendues et des cirques glaciaires ; par contre, le Sottoceneri a vécu une activité d'accumulation glaciaire qui a laissé de grandes formes, comme le complexe morainique de Melide, et de profonds bassins creusés par les glaciers et occupés actuellement par le lac de Lugano et le lac Majeur.

Sans entrer dans les détails, nous allons proposer un bref cadre géomorphologique des deux vallées, pour comprendre l'histoire du Quaternaire.

5.3.1 Le Val Mesolcina

Le Val Mesolcina est marqué par une longue histoire géomorphologique pendant laquelle plusieurs processus ont modifié le relief jusqu'à lui donner l'aspect actuel. Les versants sont assez raides, souvent proches de la verticalité et caractérisés par de nombreuses cascades de raccordement glaciaire et des formes de creusement. Dans le passé, l'érosion glaciaire a été un épisode important dans l'élaboration des formes du relief et pour l'organisation du réseau hydrographique, notamment dans la formation des petits lacs des vallées latérales (Fig. 5.4a). Pendant le Würm (extension maximale des glaciers, il y a 21 000 ans), toute la région était recouverte par le glacier de la Moesa, qui descendait du San Bernardino et entraînait en confluence, près de Bellinzona, avec le glacier du Ticino (Fig. 5.6). A cause de la présence du glacier, le profil longitudinal de la vallée est très irrégulier, car constitué d'une succession de verrous et d'ombilics (Billet, 1972). Le profil transversal de la vallée est en auge, caractéristique des vallées d'origine glaciaire (Fig. 5.4b).

Des cônes de déjection (Fig. 5.4b), liés au caractère torrentiel des affluents, distinguent les pieds des versants.



Figure 5.4 – a) Le Lac de Cama (GR), d'origine glaciaire (Photo F. Nollo, Cama) ; b) Vue sur le Val Mesolcina (à Soazza, GR), caractérisé par un profil en auge. À gauche est visible un cône de déjection (à Soazza).

La partie située au sud de Soazza (GR), présente des dépôts alluviaux (Fig. 5.2) (sables et graviers) formés par la Moesa, quand son écoulement n'était pas encore corrigé et endigué. D'autres formes géomorphologiques sont visibles dans cette région : des processus gravitaires, actuellement encore actifs, ont permis la mobilisation des matériaux.

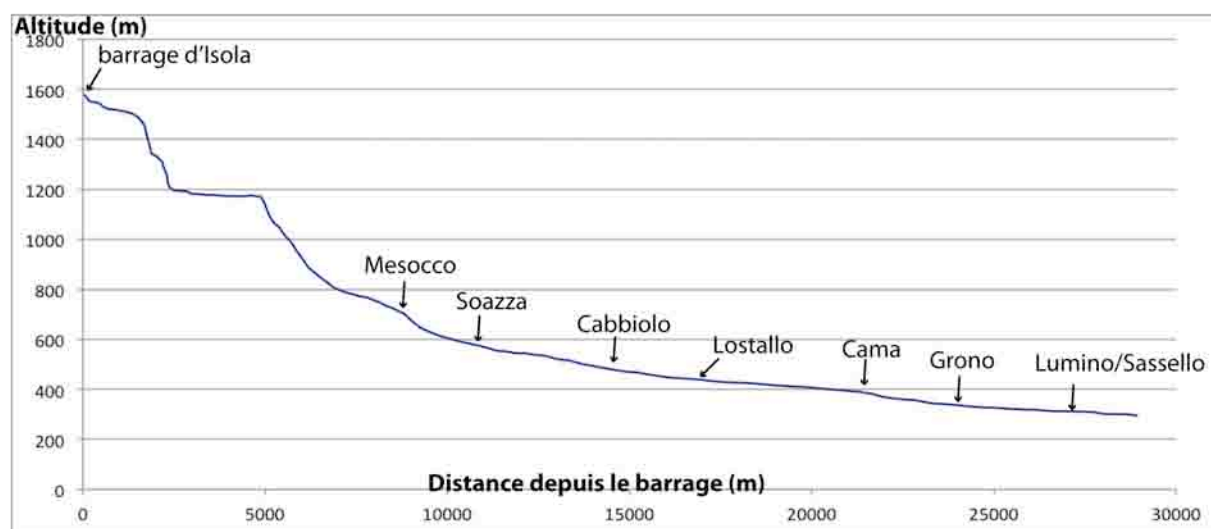


Figure 5.5 - Profil en long de la Moesa.

La figure 5.5 montre le profil longitudinal de la Moesa. La partie haute de son parcours, très raide et irrégulière, suivie ensuite par un replat (Pian San Giacomo) et une partie beaucoup plus douce et plate vers le bas de la vallée, à partir de Mesocco. Le replat de Pian San Giacomo est un ombilic (dépression glaciaire) qui a été comblé, après le retrait du glacier, par des alluvions fluviales jusqu'à former une plaine.

5.3.2 Le Val Morobbia

Le Val Morobbia a connu une histoire légèrement différente par rapport à celle du Val Mesolcina. Pendant le Würm, le glacier du Ticino occupait toute la plaine de Magadino (Fig. 5.6) ; le Val Morobbia, qui a ce moment-là était complètement envahi par le glacier, a acquis sa forme caractéristique en V après le recul du Ticino. La ligne insubrienne a orienté le tracé du cours d'eau et influencé la morphogenèse du relief. Aujourd'hui, le Val Morobbia est couramment connu pour ses parois raides et pour le tracé irrégulier du cours d'eau. La zone située près de l'embouchure avec le Ticino est caractérisée par la présence de dépôts fluvio-lacustres du Quaternaire : le lac Majeur occupait, il y a environ 15 000 ans, une partie de la plaine de Magadino. Au niveau géomorphologique, le Val Morobbia n'est pas caractérisé par la présence d'importants dépôts appartenant au Quaternaire, exception faite d'un cône de déjection situé à Giubiasco. Des processus gravitaires sont également visibles. Le substrat géologique et la présence de la ligne insubrienne sont responsables du modelé.

La figure 5.7 représente le profil longitudinal de la Morobbia, du barrage hydroélectrique jusqu'à la confluence avec le Ticino. On note la présence de plusieurs ruptures de pente dues probablement à la présence d'importantes failles tectoniques.

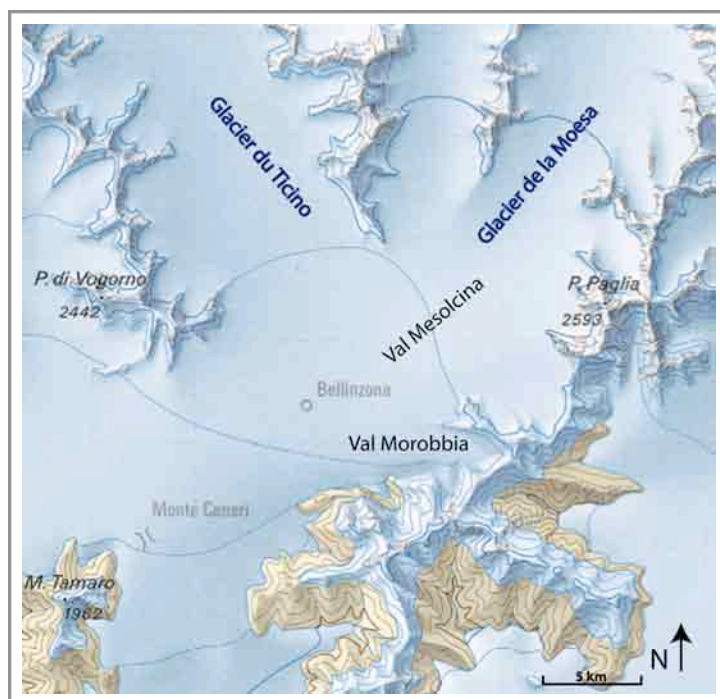


Figure 5.6 - Dernier maximum glaciaire au Sud des Alpes (extrait de la carte de la Suisse pendant le dernier maximum glaciaire (LGM), GK500-LGM'). Cette carte représente la plus grande extension des glaciers de la Suisse lors de la dernière période glaciaire, il y a environ 24 000 ans.

⁷ Source de la carte : Portail Swisstopo (map.geo.admin.ch). Consulté le 28 juillet 2011.

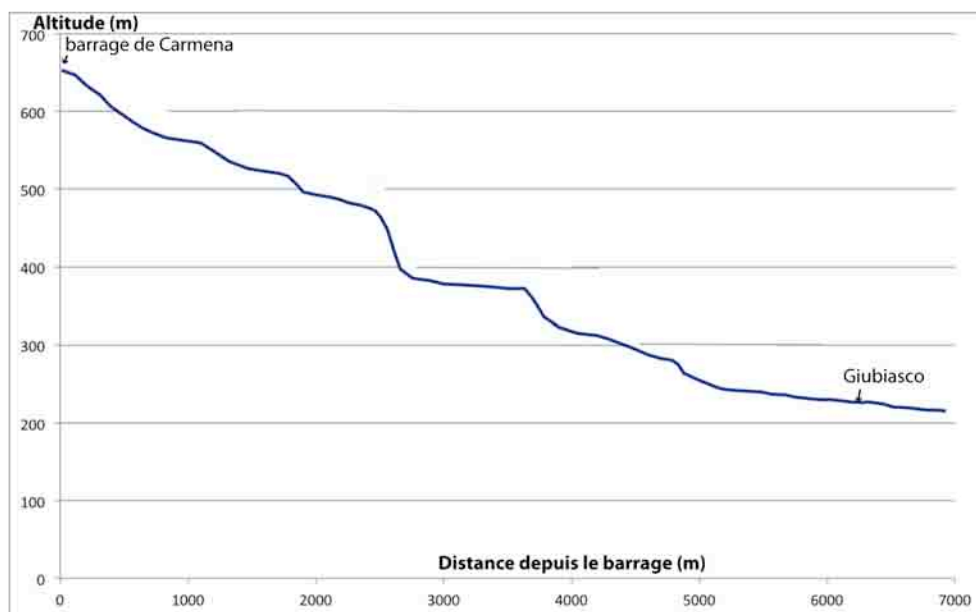


Figure 5.7 - Profil en long de la Morobbia.

5.4 Les conditions climatiques

Le cycle hydrologique est le moteur de l'hydrologie (Schleiss, 2008) et il dépend des précipitations, de l'évaporation et de l'évapotranspiration de la végétation, du ruissellement et du stock en eau. Un cadre climatique est donc indispensable pour tout travail consacré à la géographie physique, en particulier, à la géomorphologie fluviale.

Après une description générale du climat du Sud des Alpes, nous précisons les conditions atmosphériques pendant la période où les analyses de terrain ont été faites.

5.4.1 Cadre général : le climat du Sud des Alpes

La Suisse méridionale, grâce à sa topographie, est marquée par des conditions météorologiques particulières qui se différencient elles-mêmes entre le Sopraceneri et le Sottoceneri (Spinedi et Isotta, 2004). Les flux des courants atmosphériques sont modifiés de manière plus ou moins marquée par la présence de la chaîne alpine. Les courants occidentaux d'origine atlantique, à caractère humide, sont souvent déplacés vers le nord. Les incursions d'air polaire venant des latitudes septentrionales perdent leur humidité sur les reliefs en traversant les Alpes, et deviennent plus sèches. Les masses d'air qui arrivent du secteur S-SO peuvent rejoindre le Sud des Alpes sans rencontrer de gros obstacles, avant d'être confrontés à l'obstacle orographique des Alpes, qui donnera souvent naissance à des précipitations intenses (Spinedi et Isotta, 2004). Les courants continentaux d'est, caractérisés par de l'air sec, influencent la région avec l'apport d'air froid en hiver et chaud en été (Spinedi, 2000). De

manière générale, le Sud des Alpes, est caractérisé par des hivers très secs et ensoleillés (foehn du nord et parfois des précipitations neigeuses), par des étés très chauds et orageux et par des automnes et printemps marqués par de fortes précipitations. C'est au mois de mai que la plupart des pluies se produisent à cause de la fréquence des situations de barrage. Les mois les plus secs sont décembre et janvier grâce à la présence de situations anticycloniques (Spinedi et Isotta, 2004). L'influence des grands lacs caractérise la région du Sud des Alpes comme un climat insubrien (Cotti *et al.*, 1990) qui est un cas particulier du climat subméditerranéen, surtout à cause des hivers doux.

Les précipitations annuelles se produisent au printemps et en automne et sont quasiment absentes en hiver (Fig. 5.9). La répartition des précipitations est déterminée par l'orographie : les vallées internes (Val Blenio ; Val Mesolcina) sont plus sèches et la zone du lac Majeur et des Centovalli est la plus arrosée (Spinedi et Isotta, 2004) (Fig. 5.8). Si nous prenons les stations de San Bernardino (GR), Grono (GR) et Magadino/Cadenazzo (TI) (Fig. 5.12 ; 5.13 et 5.14) comme référence, le climat du Sud des Alpes correspond, selon la classification de De Martonne (1940) au type danubien à caractère semi-continental, qui est défini par de hautes températures en été et par deux maxima des précipitations au printemps et en automne (bien

visibles sur la Fig. 5.9). Un autre aspect de ce type de climat est l'amplitude thermique annuelle qui est comprise entre 15 et 20 °C ; dans le cas de la station de Grono par exemple, elle atteint une moyenne de 18.4°C (d'après les données de MétéoSuisse).

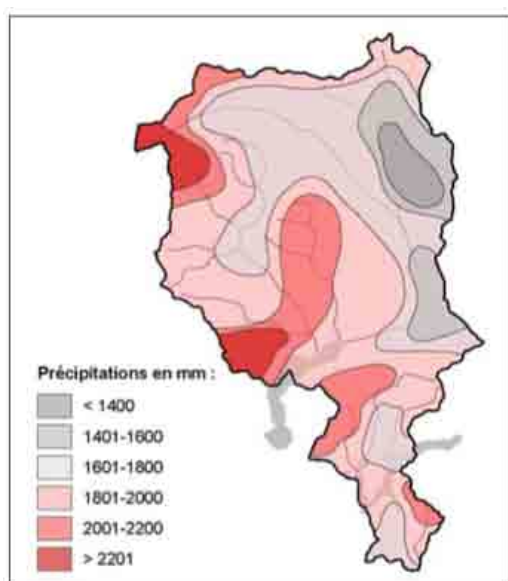


Figure 5.8 - Distribution des précipitations annuelles moyennes au Tessin pour la période 1961-1990. Source : Cotti *et al.* (1990 : 157).

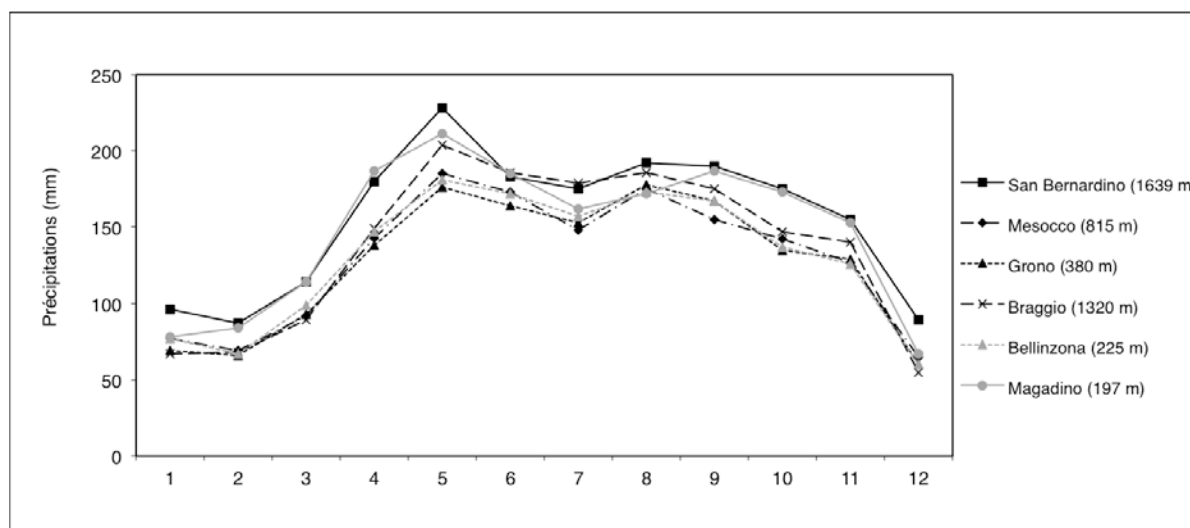


Figure 5.9 – Précipitations moyennes mensuelles pour les stations situées dans la zone d'étude (d'après les données de MétéoSuisse, pour la période 1961-1990). Pour la localisation des stations, voir fig. 5.11.

Station	Altitude (m/mer)	Temp. moyenn. annuelles (°C)	Précip. moyenn. annuelles (mm)	Jours de pluie (>1mm)	Précip. par jour de pluie (mm/jour)
San Bernardino	1639	3.2	1864	128	-
Mesocco	815	-	1550	103	15.0
Grono	380	11.1	1527	102	15.0
Braggio	1320	-	1646	97	17.0
Bellinzona	225	-	1563	103	15.2
Magadino	197	10.5	1772	103	-

Figure 5.10 - Paramètres climatiques moyens pour la période 1961-1990 pour quelques stations proches des deux vallées (d'après les données MétéoSuisse). Pour la localisation des stations, voir fig. 5.11.

La figure 5.11 montre la localisation des stations au sol de MétéoSuisse les plus proches des deux vallées. En jaune sont représentées les stations d'observation manuelle (OBS) équipées d'instruments, en rose les stations automatiques (*SwissMetNet*) et en bleu les stations pluviométriques (NIME). Une seule station d'observation manuelle (Grono ; 732.100/123.700) est présente dans la région et mesure les principaux paramètres météorologiques (température, précipitations, pression de l'air, ...) trois fois par jour. Les stations automatiques *SwissMetNet*, au San Bernardino (734.120/147.270) et à Magadino/Cadenazzo (715.475/113.162), mesurent tous les paramètres météorologiques et transmettent automatiquement les données. Dans les stations pluviométriques, à Mesocco (737.900/139.450), à Braggio (729.975/128.600) et à Bellinzona (721.060/116.800), les précipitations (pluies et neige) sont relevées manuellement.

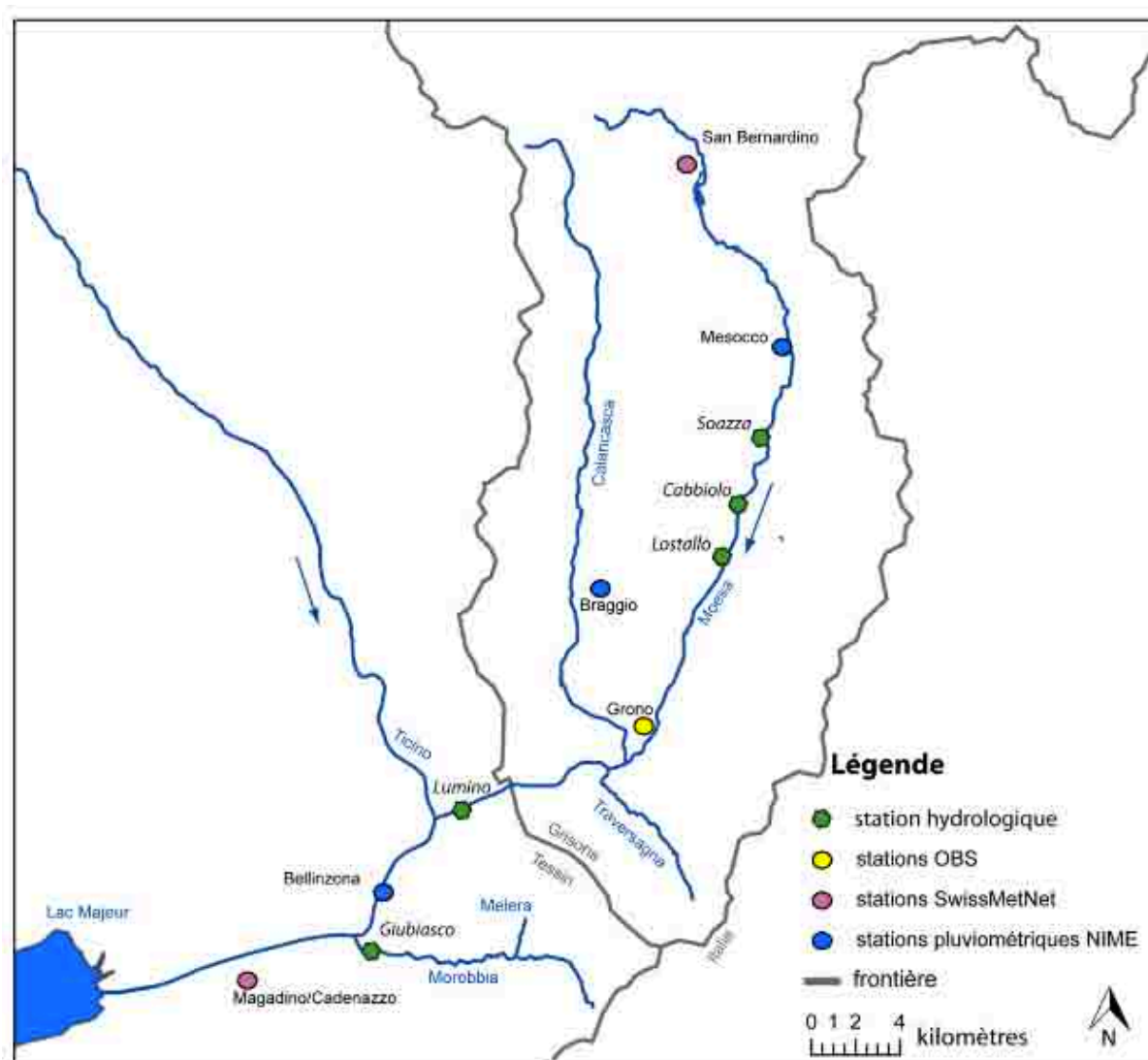


Figure 5.11 - Localisation des stations climatiques et hydrologiques situées à proximité des deux vallées (créée à partir des données MétéoSuisse).

Les climogrammes pour les stations de San Bernardino (Fig. 5.12), Grono (Fig. 5.13) et Magadino/Cadenazzo (Fig. 5.14) pour la période 1961-1990 confirment l'humidité globale de la région. L'évolution des températures est semblable pour les trois stations, même si San Bernardino enregistre des valeurs moins élevées, à cause de son altitude (1639 m) (Fig. 5.10 ; 5.12). L'évolution des précipitations est analogue pour les trois stations, avec des valeurs très proches.

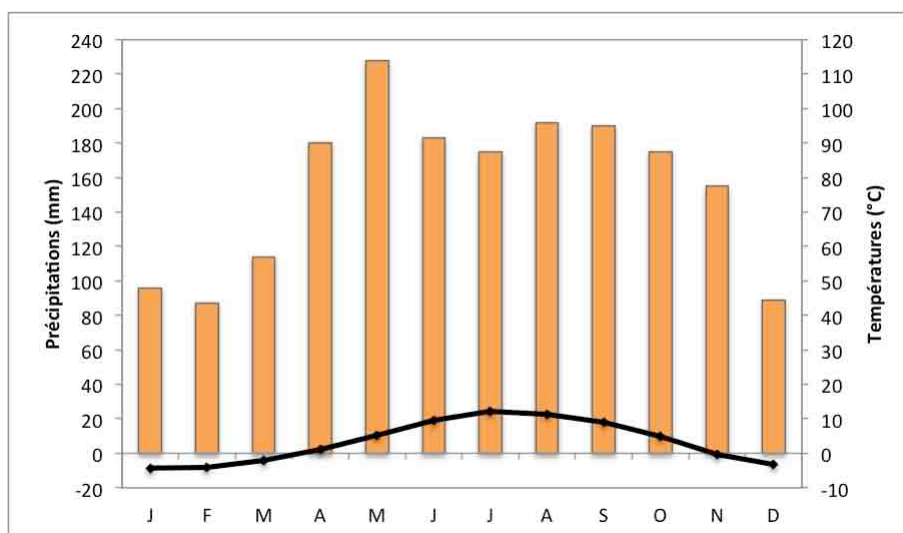


Figure 5.12 - Climogramme pour la station de San Bernardino (GR) (données MétéoSuisse, période 1961-1990).

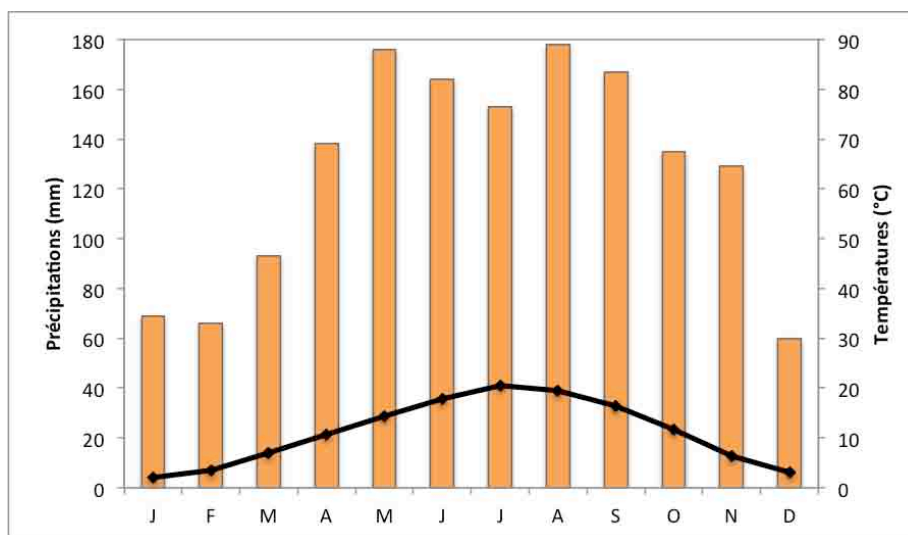


Figure 5.13 - Climogramme pour la station de Grono (GR) (données MétéoSuisse, période 1961-1990).

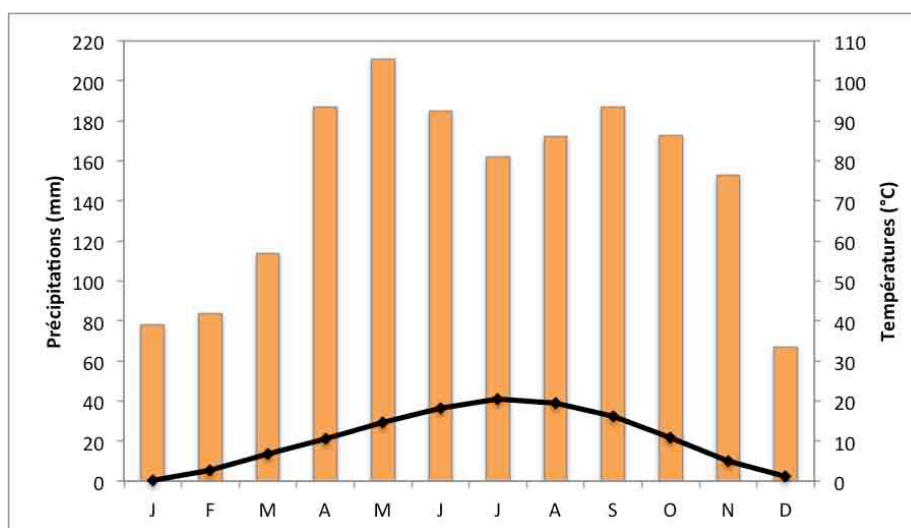


Figure 5.14 - Climogramme pour la station de Magadino/Cadenazzo (TI) (données MétéoSuisse, période 1961-1990).

5.4.2 Conditions climatiques pendant la période 2010/2011

Dans ce chapitre, nous allons d'abord donner une description des conditions pluviométriques mesurées pendant la période étudiée. La connaissance d'un cadre plus spécifique pendant les analyses de terrain est importante. Les données seront reprises à nouveau dans les chapitres consacrés aux méthodes, aux résultats et à leur interprétation. Le graphique de la figure 5.15 montre les valeurs des précipitations mesurées par jour (mm) pendant la période de septembre 2010 à avril 2011 dans les principales stations présentes dans notre zone d'étude.

Nous remarquons une période assez arrosée pendant l'automne, caractérisé par plusieurs événements avec des valeurs qui atteignent 80 mm/jour, pour la station de Magadino/Cadenazzo. L'hiver est caractérisé, de manière générale, par des périodes sèches (janvier et février).

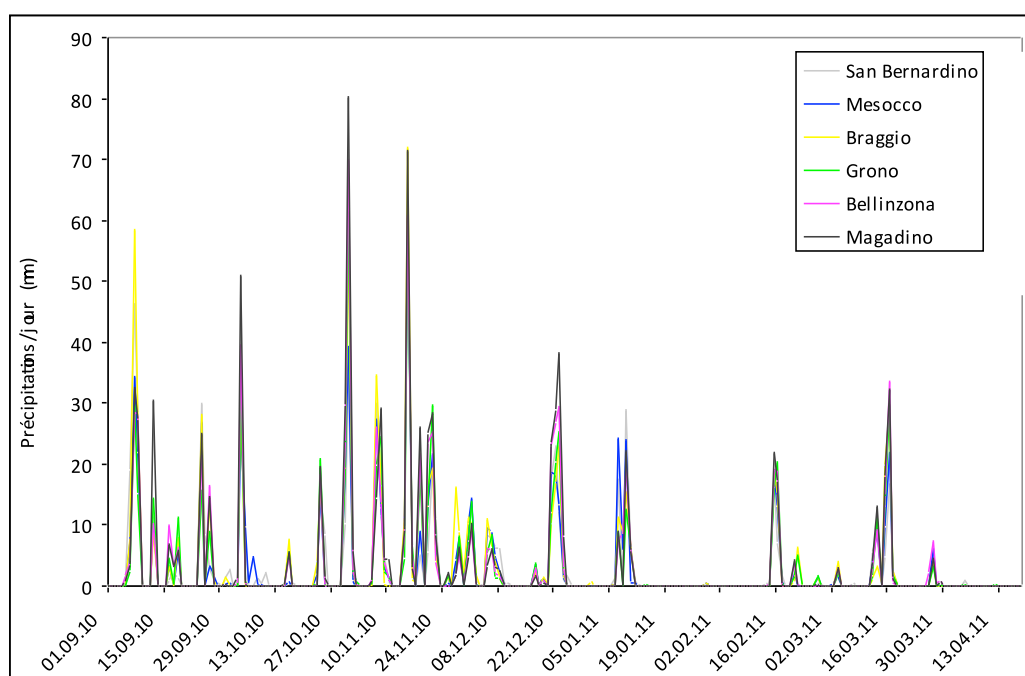


Figure 5.15 – Précipitations journalières des principales stations de mesure présentes dans la zone d'étude (d'après les données de MétéoSuisse).

5.5 Contexte hydrologique

Dans cette partie du travail, nous allons revenir sur certaines notions présentées dans le troisième chapitre. Il faut d'abord se souvenir que le débit d'un cours d'eau dépend de plusieurs facteurs : que les caractéristiques de son bassin hydrographique et les caractéristiques pluviométriques qui ont été présentées auparavant. Dans ce chapitre, nous donnons une importance particulière à l'histoire de l'écoulement, notamment aux interventions anthropiques effectuées dans les derniers siècles.

5.5.1 La Moesa

L'hydrologie naturelle

Le régime hydrologique de la Moesa est de type nival-méridional au nord de Soazza et de type nivo-pluvial méridional au sud (Haller *et al.*, 2007) (Fig. 5.16) avec un débit moyen annuel d'environ 15,5 m³/s, d'après la station fédérale de mesure à Lumino/Sassello (TI). La Moesa, dont le bassin hydrographique couvre une surface de 471 km² (Haller *et al.*, 2007), présente un degré de hiérarchisation 4 de Strahler (1957).

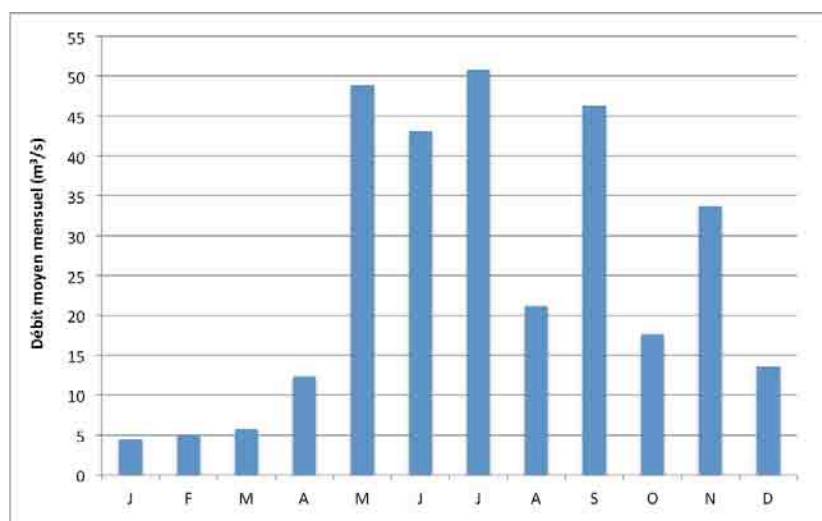


Figure 5.16 - Débit moyen mensuel de la Moesa d'après les données enregistrées par la station de Lumino/Sassello (d'après les données de l'annuaire hydrologique de la Suisse, 2008 - OFEV, 2009). Pour la localisation de la station voir la figure 5.11.

Le long de la Moesa sont présentes deux stations cantonales de mesures hydrologiques, à Grono (732.640/123.460) et à Soazza (736.630/134.160) et une station fédérale à Lumino/Sassello (724.765/120.360).

Les interventions anthropiques au cours du XIX^e et du XX^e siècle

L'écoulement de la Moesa n'a pas toujours été comme nous pouvons l'observer aujourd'hui : au cours du XIX^e siècle des corrections anthropiques ont modifié son parcours naturel. La protection de la route et du chemin de fer, localisées à proximité de la Moesa, est certainement un facteur de ce changement. Suite au redressement, la Moesa n'a pas seulement perdu son hétérogénéité morphologique, mais a également subi un abaissement de son lit et, par conséquent, une baisse de la nappe phréatique. Le premier cas d'aménagement, documenté par les archives cantonales d'hydraulique, remonte à 1884. A partir de 1911, l'écoulement de la Moesa a été systématiquement endigué avec la suppression des méandres (Kantonaales Amt für Natur und Umwelt, 2008).

A partir des années 1950, des travaux ont également affecté le débit : le Val Mesolcina, grâce à ses caractéristiques topographiques, a été l'objet d'un intérêt croissant pour la production hydroélectrique. Dans ces années, les premiers grands projets hydroélectriques ont permis le développement de l'exploitation de la force hydraulique dans la vallée, jusqu'à l'obtention, à l'heure actuelle, de cinq centrales (quatre barrages en altitude et un ouvrage au fil de l'eau) (Fig. 5.1). Selon Haller *et al.* (2007), la Moesa est exploitée avec une intensité moyenne à forte (type B).

Les barrages sont localisés dans les vallées latérales et reçoivent, grâce à un réseau de conduites, les apports des affluents environnants. La connaissance du type d'exploitation et surtout la localisation des usines est, dans notre cas, fondamentale pour comprendre l'altération anthropique du régime hydrologique. Les figures 5.1, 5.17 et 5.20 montrent la localisation des centrales hydroélectriques et des points de restitution. La complexité du système est bien visible : pour la production hydroélectrique, les interventions ont été effectuées le long de plusieurs affluents, en obtenant comme résultat des tronçons à marnage (cours inférieur) et des tronçons à débit résiduel (cours moyen). Les tronçons à régime naturel se trouvent en amont des prises d'eau et des barrages et n'ont pas été touchés au niveau hydrologique.

L'usine localisée la plus au nord se trouve à Soazza (GR) (Fig. 5.17; 5.18). Elle exploite le barrage-voûte-poids d'Isola, situé juste au sud du village de San Bernardino et avec une retenue d'environ 5.9 millions de m³ (Tabl. 5.1) Sa production annuelle moyenne est de 245 GWh. Quelques kilomètres plus en aval se trouve la centrale de Lostallo (Fig. 5.17; 5.19), avec une capture du bassin hydrologique (lac Darbola) de 37 km² et une production annuelle moyenne de 71 GWh.

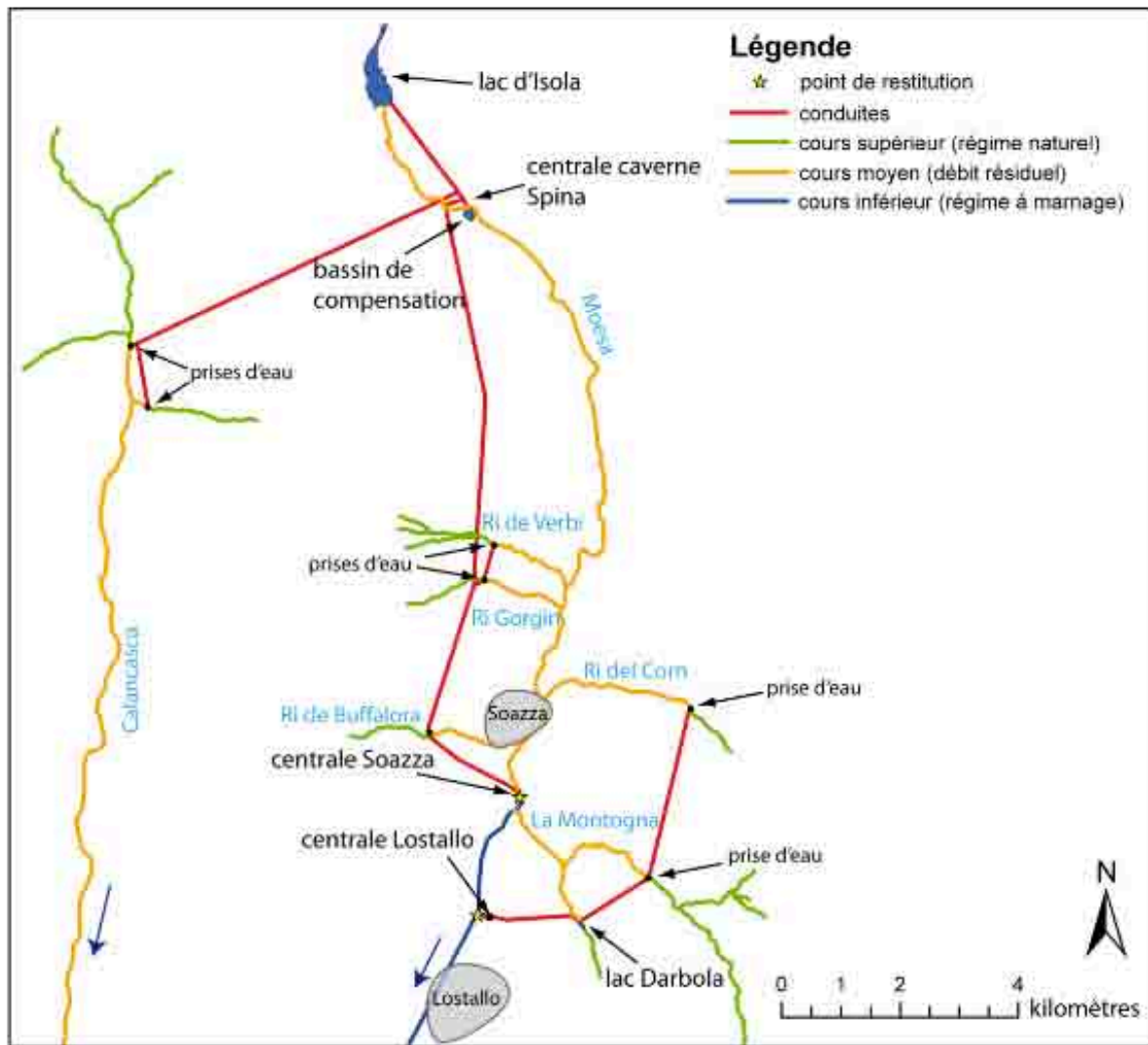


Figure 5.17 - Réseau hydrographique de la Moesa aménagé pour la production hydroélectrique entre le lac d'Isola et Lostallo (modifié d'après la carte nationale de la Suisse au 1 : 25'000).



Figure 5.18 – Point de restitution des eaux turbinées de la centrale de Soazza.

À Grono se trouve une centrale avec une production annuelle moyenne de 94 GWh qui exploite le bassin de retenue située à Roggiasca (Fig. 5.20 ; 5.21).



Figure 5.19 – Point de restitution de la centrale de Lostallo (GR).

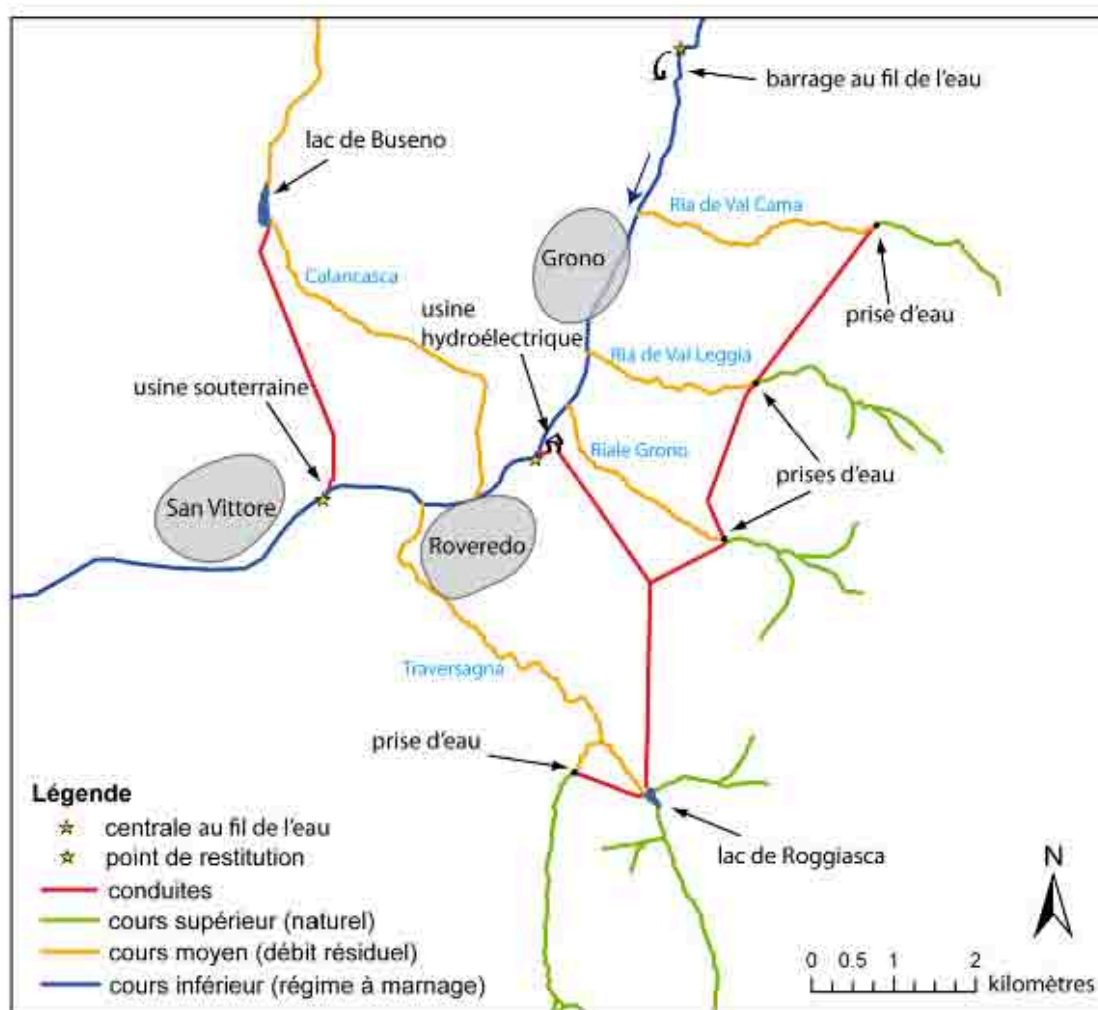


Figure 5.20 - Réseau hydrographique de la Moesa aménagé pour la production hydroélectrique entre Lostallo et San Vittore (modifié d'après la carte nationale de la Suisse au 1 : 25'000).



Figure 5.21 – Point de restitution des eaux turbinées par la centrale de Grono (GR).

Plus au sud, près de San Vittore, se situe le point de restitution des eaux turbinées de la centrale à accumulation à haute pression de la Calancasca, dont la siège est à Roveredo (GR) (Fig. 5.20 et 5.22). Cette centrale exploite les eaux stockées dans le bassin d'accumulation de Buseno, situé dans le Val Calanca (GR) (Fig. 5.20). Sa production annuelle moyenne s'élève à 89 GWh (Tabl. 5.1).



Figure 5.22 – Point de restitution des eaux de la centrale souterraine de San Vittore (GR).

Il faut ajouter, le long de la Moesa, la présence d'une centrale au fil de l'eau à basse pression située à Piani di Verdabbio (GR) (Fig. 5.1 ; 5.20 ; 5.23), près de Cama, qui a été réalisée dès 1836 pour fournir la force motrice à une forge. En 1957, cette installation a été transformée en centrale hydroélectrique. Les installations ont été rénovées et largement automatisées en 1987. Environ 500 m en amont de la centrale de Piani di Verdabbio, l'eau de turbinage est prélevée dans la Moesa, amenée par un canal à ciel ouvert dans un petit bassin de compensation

aménagé à la hauteur de la centrale et turbinée en continu dans la centrale de Piani di Verdabbio, avec une hauteur de chute maximale de 14 m. La production annuelle moyenne s'élève à 1.3 GWh. Le bassin de retenue a un volume utile de 400 m³.



Figure 5.23 – Centrale au fil de l'eau le long de la Moesa, à Piani di Verdabbio (GR).

La présence de plusieurs centrales hydroélectriques montre l'existence d'une variabilité dans l'espace et dans le temps de l'activité de production : les périodes de production sont probablement différentes selon la requête et la vente de l'énergie (Tabl. 5.1).

Centrale	Société	Q max. turbiné (m ³ /s)	Puissance turbines (MW)	Production moyenne (GWh)	Bassin de retenue (m ³)
Soazza	OIM SA	14	83	54.10 (hiver)/191 (été)	5.9 millions (Isola) et 120 000 (Corina)
Lostallo	Eline SA	4	25	19.40 (hiver)/52.30 (été)	110 000
Grono	Eline SA	6.6	37.5	27.40 (hiver)/66.52 (été)	500 000
Piani di Verdabbio	Tecnicama SA	3.5	0.3	0.43 (hiver)/0.87 (été)	400
Roveredo	Calancasca AG	6	20.8	29.60 (hiver)/59.80 (été)	640 000

Tableau 5.1 - Résumé de la production des centrales présentes le long de la Moesa⁸.

⁸ Source : OFEN, 2011 et le site du groupe Axpo (www.axpo.ch). Consulté le 11.10.2011.

5.5.2 La Morobbia

L'hydrologie naturelle

La Morobbia est un cours d'eau de dimensions moyennes (indice de Strahler 4), avec un régime hydrologique nivo-pluvial méridional (Haller *et al.*, 2007). La surface de son bassin hydrographique correspond à 45.2 km². La station hydrologique de Giubiasco (720.591/114.304), de propriété de l'IST-Istituto di Scienze della terra (Canobbio), a été installée en 2009.

Les interventions anthropiques au cours du XIX^e et du XX^e siècle

Comme beaucoup d'autres cours d'eau suisses, la Morobbia a connu, au XIX^e siècle un aménagement de son parcours et de son écoulement, près du centre urbain de Giubiasco. L'exploitation hydroélectrique (Fig. 5.24) le long de la Morobbia est nettement inférieure à celle de la Moesa. L'intérêt d'exploiter ses eaux est né à la fin du XIX^e siècle, plus précisément le 30 décembre 1888 lors d'une assemblée de la commune de Bellinzona où les citoyens ont montré la volonté de vouloir produire cette énergie pour garantir l'éclairage de la ville (Lombardi, 1971).

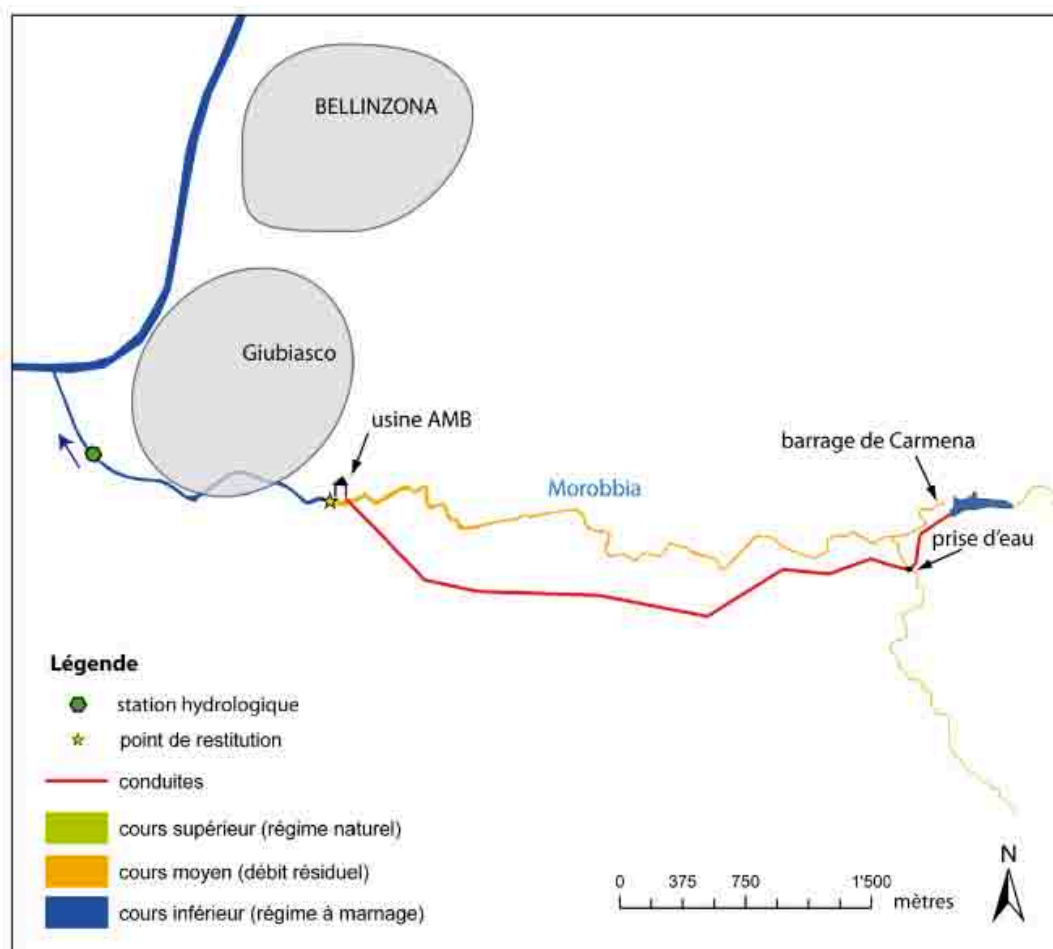


Figure 5.24 - Le système hydroélectrique le long de la Morobbia (modifiée d'après Lombardi, 1971 et d'après la carte nationale de la Suisse au 1:25'000).

La Morobbia est exploitée par une seule centrale hydroélectrique (*AMB - Aziende Municipalizzate di Bellinzona*) (Fig. 5.24 et Fig. 5.25) située à 2 km de la confluence avec le Ticino (721.893/114.181). Son régime hydrologique n'est donc influencé, du point de vue anthropique, que par cette centrale.

Le système est caractérisé par la présence d'un barrage (de Carmena) et d'une prise captant les eaux d'un tributaire de la Morobbia. Nous pouvons souligner la présence d'un grand tronçon à débit résiduel de la Morobbia, situé entre le barrage et le point de restitution de la centrale, et d'un autre petit tronçon à débit résiduel d'un tributaire de la Morobbia (Fig. 5.24). Le débit maximal turbiné est de 5 m³/s, la puissance des turbines de 15.50 MW et la production moyenne escomptée de 14.70 GWh en hiver et 27.20 GWh en été (OFEN, 2011).



Figure 5.25 – La centrale de l'Aziende Municipalizzate Bellinzona (AMB) et son point de restitution.

5.6 Synthèse

D'après cette présentation, nous pouvons souligner que les deux cours d'eau étudiés présentent des caractéristiques semblables pour ce qui concerne le cadre géologique (dans les deux vallées prévaut la présence de roches cristallines) et climatique. Par contre, une distinction des histoires géomorphologique et hydrologique, notamment pour l'exploitation hydroélectrique, est possible. Ces deux vallées ont des caractéristiques géomorphologiques différentes, car les variables qui ont déterminé leur aspect actuel ont des origines différentes. Si nous pensons à la forte relation entre la géomorphologie, la topographie et l'exploitation hydroélectrique, nous pouvons d'abord souligner que dans le cas de la Moesa l'histoire glaciaire a indirectement influencé l'installation des infrastructures anthropiques pour la production d'énergie hydroélectrique. La présence du glacier de la Moesa, par son action érosive, a permis la formation des parois étroites et des vallées suspendues qui ont déterminé des caractéristiques topographiques idéales pour la construction des barrages de retenue. Au contraire, la Morobbia, petite vallée latérale, a permis un aménagement beaucoup plus petit.

6) Cadre méthodologique

L'objectif principal de ce chapitre est la présentation des méthodes utilisées dans le cadre de ce travail de recherche. La problématique étudiée nécessite, en raison de sa complexité, la mise en œuvre de plusieurs méthodes, utilisées de manière complémentaire, qui peuvent être qualitatives ou quantitatives. Dans une première partie (Chap. 6.1) sera présenté le choix qui a permis la subdivision en stations d'étude le long des deux cours d'eau. Par la suite seront présentées les méthodes appliquées ; une distinction sera effectuée entre les méthodes d'analyse écomorphologique (approche cartographique) (Chap. 6.2), les méthodes hydrologiques (Chap. 6.3), les méthodes climatologiques (Chap. 6.4) et les méthodes sédimentologiques (Chap. 6.5 - 6.6).

6.1 Choix des stations d'étude le long des cours d'eau

6.1.1 La Moesa

La Moesa a été divisée en 4 sections d'étude (Fig. 6.1). De l'amont vers l'aval nous trouvons : (1) la station de Cabbio (GR) (736.839/133.523 - 735.493/130.452), (2) la station de Lostallo/Cama (GR) (735.493/130.452 - 732.631/123.482), (3) la station de Grono (GR) (732.631/123.482 - 728.981/121.667), (4) la station de Lumino/Sassello (TI) (728.981/121.667 - 723.512/119.844). Les raisons qui gouvernent ce découpage en quatre sections sont liées à trois facteurs : (1) la morphologie ; (2) la proximité avec les points de restitution ; et (3) l'accessibilité au site. Le premier critère permet de saisir des informations nécessaires pour la compréhension de la relation entre la structure (largeur du lit, variabilité de la largeur du lit mouillé, aménagement du fond du lit, renforcement des berges) du cours d'eau et les effets des éclusées : pour répondre aux questions de départ, il est indispensable d'étudier des unités fluviales différentes, car les effets du marnage peuvent se manifester de manière semblable ou différente. Le deuxième facteur permet de saisir les impacts des centrales sur les tronçons : connaître la distance entre les points de restitution et les sections d'étude s'avère un point très utile pour le déroulement de cette recherche. La station 1 est localisée à environ deux kilomètres du point de restitution de Soazza et est influencée exclusivement par la production d'une seule centrale (OIM), la deuxième station est située à environ deux kilomètres du point de restitution de la centrale de Lostallo (Eline) et 4 kilomètres de la centrale de Soazza (OIM), la troisième station est caractérisée par la présence du point de restitution de la centrale de Grono (Eline) et la quatrième station subit l'influence de toutes les centrales hydroélectriques présentes le long du cours d'eau (Tabl. 5.1). L'accessibilité est considérée exclusivement pour des raisons pratiques.

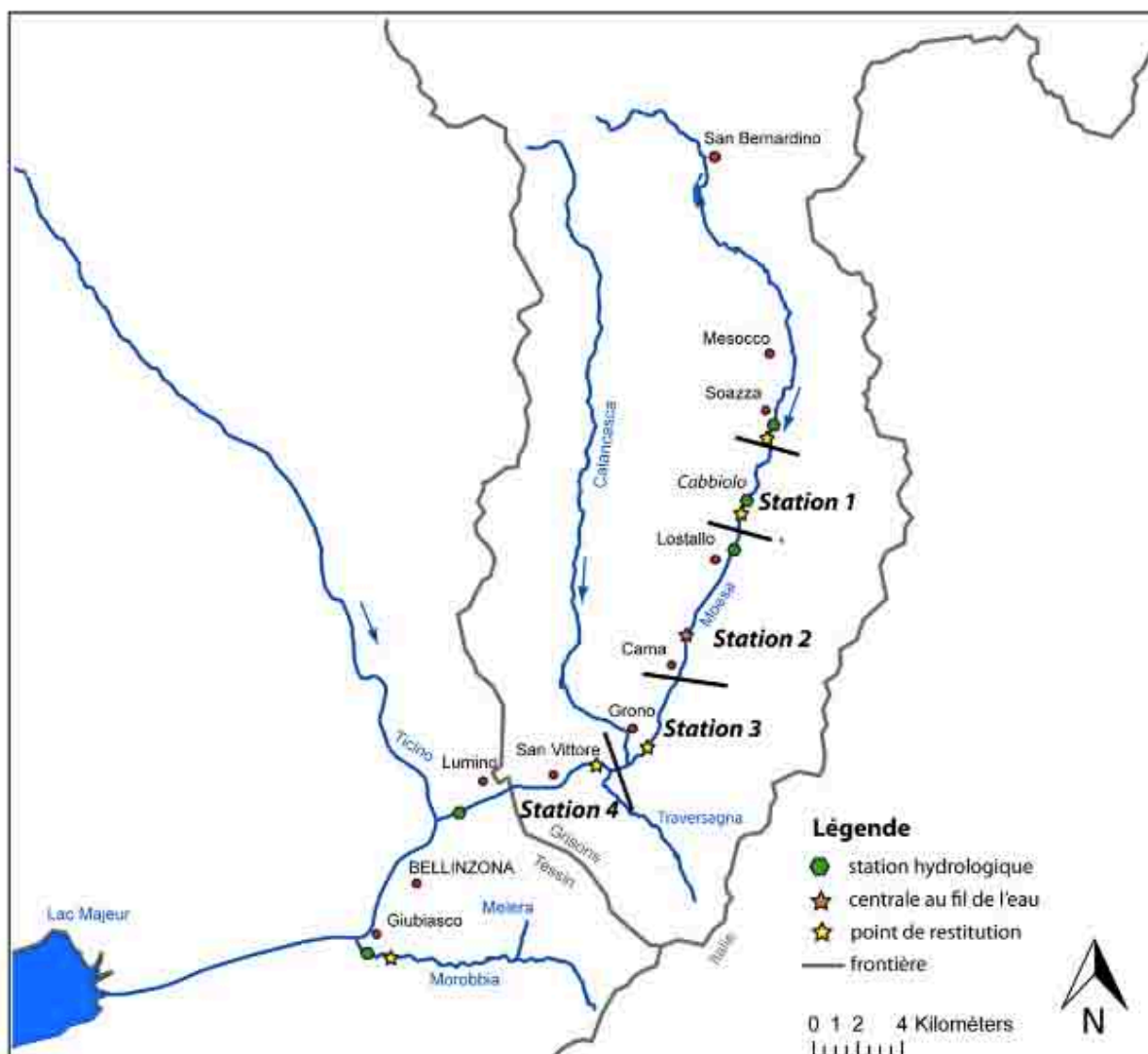


Figure 6.1 – Localisation des quatre stations d'étude le long de la Moesa.

6.1.2 La Morobbia

La Morobbia, en considérant ses dimensions nettement inférieures à celles de la Moesa, n'a pas été divisée en stations d'étude et les analyses ont été menées le long des deux kilomètres du cours d'eau à marnage, à partir du point de restitution des eaux jusqu'à la confluence avec le Ticino.

6.2 L'approche écomorphologique

6.2.1. Généralités

Les deux cours d'eau ont fait l'objet d'une analyse écomorphologique au moyen de la méthode publiée par l'OFEFP (Hütte et Niederhauser, 1998), actuellement utilisée pour toute analyse d'appréciation des cours d'eau en Suisse. « *Le terme « écomorphologie » comprend la totalité des conditions structurelles dans l'eau et à son voisinage : la morphologie des eaux proprement dite, les mesures d'aménagement hydraulique (endiguement des berges, aménagement du lit, barrages, etc.) et les conditions environnantes (constructions, exploitation du sol, végétation) »* (Hütte et Niederhauser, 1998 : 6). Cette méthode, basée sur la compilation de formulaires et la cartographie des formes structurales ponctuelles, permet de saisir d'éventuels déficits des unités fluviales.

6.2.2 Principes de la méthode

Le but premier de cette démarche est de servir de point de départ pour toute procédure d'analyse de l'état naturel des cours d'eau. L'appréciation des conditions structurelles se fait par le biais de cinq paramètres, qui représentent les principales particularités hydrologiques et morphologiques des cours d'eau et permettent de saisir les caractéristiques écologiques. Le premier facteur est la **largeur du lit**, qui correspond à la zone mouillée pendant les eaux moyennes (lit moyen) et est identifiable comme la distance entre les pieds des berges en rive gauche et droite (Fig. 3.5). Ce critère permet de caractériser la taille du cours d'eau et de déterminer le besoin d'espace de ce dernier (Fig. 6.3). Le deuxième critère est la **variabilité de la largeur du lit mouillé**, qui donne des renseignements sur la diversité structurelle du lit et sur les liaisons eau-terre. De manière générale, plus la variabilité est élevée et plus la diversité structurelle du lit est grande. Nous pouvons distinguer entre une variabilité nulle, limitée ou prononcée. Un tronçon entre deux berges rectilignes, par exemple, présente généralement une variabilité de la largeur du lit mouillé nulle. Le troisième critère, l'**aménagement du fond du lit** (Fig. 6.2), constitue l'une des atteintes les plus graves à la capacité fonctionnelle d'un cours d'eau parce qu'elle empêche le déplacement de sédiments, entraîne le colmatage du lit par des matériaux fins et la suppression des échanges entre le cours d'eau et la nappe phréatique (Hütte et Niederhauser, 1998). En cas d'aménagement du fond, il faut estimer le pourcentage de surface et le type d'impact (blocs, béton, etc.). Le quatrième critère est le **renforcement du pied de la berge**, considéré comme le développement des mesures techniques de stabilisation entre le lit et la berge (Fig. 6.2). En Suisse, de nombreux cours d'eau sont caractérisés par la présence d'un renforcement du pied de la berge, dans le but d'empêcher l'érosion latérale du cours d'eau (Hütte et Niederhauser, 1998). Dans ce cas aussi, il faut estimer le pourcentage des secteurs aménagés.



Figure 6.2 – Exemples de renforcement de pied de berge et d'aménagement du lit (Moesa à Cabiolo, GR). Dans ce cas, pendant le débit plancher, cet aménagement à gros blocs correspond à un obstacle à la libre circulation des poissons.

Le dernier critère correspond à la **largeur et la nature des rives**, définies comme l'espace compris entre le pied de berge et la zone intensive d'utilisation du sol (routes, zones agricoles, zones bâties) considérées sur une largeur maximale de 15 mètres. Ce caractère renseigne sur la surface à disposition des cours d'eau. La zone entourant un cours d'eau a une grande importance pour l'écologie des eaux, car lors des inondations, des échanges intenses ont lieu entre les eaux et la terre (Hütte et Niederhauser, 1998). L'évaluation se fait en fonction de leur étendue (nulle, insuffisante, suffisante) en se basant sur les dimensions du cours d'eau, notamment la largeur du lit (la distance entre les deux berges) (Fig. 6.3).

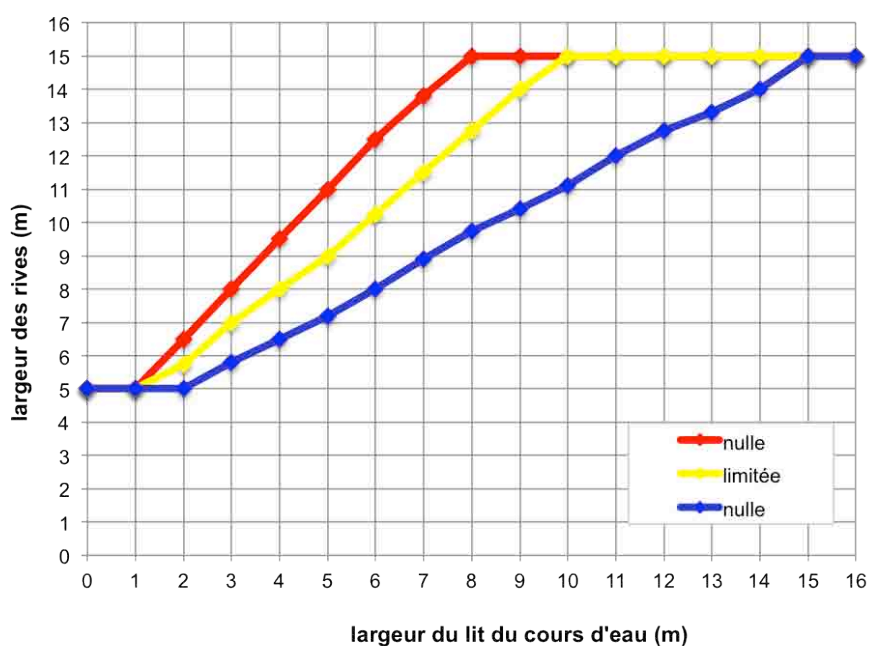


Figure 6.3 – Courbes pour la détermination de l'espace nécessaire pour une variabilité de la largeur du lit, prononcée, limitée ou nulle (d'après Hütte et Niederhauser, 1998).

Sur la base des conditions écomorphologiques, le cours d'eau est divisé en tronçons à l'intérieur desquels les caractéristiques sont constantes. Les tronçons sont classés en fonction du nombre total de points obtenus (Tabl. 6.1), ce qui permet d'obtenir une division en classes d'évaluation (I naturel/semi-naturel, II peu atteint, III très atteint ou IV non naturel/artificiel), représentées avec des couleurs différents (bleu, vert, jaune et rouge) (Fig. 6.2). Les critères sont pondérés selon leur niveau d'importance (Hütte et Niederhauser, 1998). Les valeurs pour le renforcement du pied de la berge et des rives sont d'abord déterminées pour chaque rive, divisées ensuite par deux et arrondies au nombre entier. La somme des points est arrondie au nombre entier le plus proche et 0.5 est arrondi vers le haut (Hütte et Niederhauser, 1998).

Critère	Description		Points
Variabilité de la largeur du lit mouillé	Importance		
	prononcée		0.0
	limitée		2.0
	nulle		3.0
Aménagement du fond du lit	Degré d'aménagement	Type d'aménagement	
	nul	-	0.0
	< 10%	-	1.0
	10-30 %	-	2.0
	> 30 %	empierrement, enrochement	2.0
	< 30 %	tous autres matériaux	3.0
Renforcement du pied de la berge	Degré de renforcement	Perméabilité	
	< 10%	perméable	0.0
		imperméable	0.0
	10-30%	perméable	0.5
		imperméable	1.0
	30-60%	perméable	1.5
		imperméable	2.0
	> 60%	perméable	2.5
imperméable		3.0	
Rives	Largeur	Nature	
			typiques d'un cours d'eau
	suffisante		atypiques d'un cours d'eau
		artificielles	3.0
	insuffisante	typiques d'un cours d'eau	2.0
		atypiques d'un cours d'eau	3.0
		artificielles	3.0
nulle	-	3.0	

Tableau 6.1 – Points pour chaque critère, la somme des points permettant de déterminer la classe écomorphologique (d'après Hütte et Niederhauser, 1998).

Somme des points	Classe	Etat ou type d'atteinte
0 et 1	I	naturel/semi-naturel
2 à 5	II	peu atteint
6 à 9	III	très atteint
10 à 12	IV	non naturel/artificiel

Tableau 6.2 – Détermination des quatre classes écomorphologique (d'après Hütte et Niederhauser, 1998).

6.2.3. Mise en œuvre

Les analyses de terrain, effectuées pendant l'automne 2010, ont été menées de la confluence avec le Ticino vers l'amont, jusqu'au dernier point de restitution des eaux turbinées (centrale de Soazza) (Fig. 6.1). Chaque cours d'eau a été divisé en plusieurs tronçons, à l'intérieur desquels les caractéristiques écomorphologiques sont constantes. De manière générale, chaque fois qu'une spécificité subit un changement, il faut considérer l'unité fluviale qui suit comme différente de la précédente (Hütte et Niederhauser, 1998). Pour les relevés, nous avons utilisé des cartes au 1 : 5'000 et au 1 : 25'000 qui ont été utiles pour reporter les limites des tronçons et la localisation des atteintes ponctuelles, telles que les seuils et les points de restitution. Pour chaque tronçon a été cartographiée de manière détaillée la présence des perturbations à la libre circulation des espèces.

La largeur du lit a été mesurée, quand cela était possible, à l'aide d'une chevillière en traversant le cours d'eau de rive à rive. Malheureusement, les conditions n'ont pas toujours été favorables, car la hauteur et la vitesse d'écoulement peuvent atteindre des valeurs importantes. Dans ce cas, la largeur du lit a été calculée au moyen des outils de mesure présents dans le logiciel *ESRI ArcGIS 9.3* à partir d'une orthophoto. La hauteur des seuils a été estimée qualitativement.

Tous les données ont été recueillies sous la forme d'un formulaire électronique (fichier Excel) et cartographiées au moyen du logiciel *ESRI ArcGIS 9.3*.

6.3 Analyses hydrologiques

À partir du 1863, la Commission suisse d'hydrométrie a mis en place un réseau de mesures pour l'observation systématique des niveaux des lacs et des rivières (Emmenegger, 1988; Haller *et al.*, 2007). Depuis le début des années 2000, les stations de mesure sont devenues de plus en plus nombreuses, munies de limnigraphes qui fournissent des enregistrements continus montrant l'évolution des niveaux d'eau. Par le terme d'**hydrométrie**, on désigne l'ensemble des techniques de mesures des différents paramètres caractérisant les cours d'eau. Il est possible faire une distinction entre la mesure du niveau d'eau, souvent exprimée en mètres sur

le niveau de la mer (m.s.n.m.) où en mètres (c'est le domaine de la **limnimétrie**) et le débit (Q) (domaine de la **débimétrie**) (Musy et Higy, 2004).

Pour répondre aux questions de départ, une analyse des données hydrologiques est indispensable. La présence d'un réseau de mesure bien développé le long de la Moesa et de la Morobbia a permis une acquisition des données assez satisfaisante. Grâce aux autorités cantonales, nous avons obtenu les données mesurées par une station cantonale, située à Soazza, et par une station fédérale (à Lumino). Les stations de Soazza (736.630/134.160) et de Lumino/Sassello (724.765/120.360) mesurent la hauteur du niveau d'eau (m.s.m.n.) et le débit (m^3/s). Le long de la Morobbia est présente une station de mesure, propriété de l'*IST (Istituto di Scienze della terra)*, localisée à Giubiasco (720.591/114.304), à environ 1 km du point de restitution. Elle mesure la hauteur du niveau d'eau (m), le débit (m^3/s) et la température ($^{\circ}C$).



Figure 6.4 – La station hydrologique de Soazza (a) et la station de Giubiasco (b).

En complément des stations existantes, nous avons installé deux sondes hydrologiques du type *HyMADD* (produites par la firme *MADDtechnologies*), localisées à Cabbio (736.134/132.112), 2 kilomètres à l'aval du point de restitution de la centrale de Soazza (OIM), et l'autre à Lostalio (735.472/130.414) à 2 kilomètres du point de restitution de la centrale de Lostalio (Eline), soit 4 kilomètres de la station de Soazza (OIM) (Fig. 6.1). Les stations de mesure ont été installées pendant le mois d'août et ont été programmées, au moyen du logiciel *UniMADD*, pour enregistrer la température et la hauteur de l'eau toutes les dix minutes. Elles ont été en service jusqu'à fin juin 2011.

Nous ne disposons donc pas d'une mesure directe et continue des débits, mais d'un enregistrement des variations du niveau d'eau. Dans ce cas, on passe de la courbe des hauteurs d'eau en fonction du temps à celle des débits, au moyen d'une courbe de tarage. Nombreuses sont les possibilités pour le faire. La méthode la plus utilisée est le jaugeage au sel, qui permet de connaître le débit grâce au temps d'arrivée d'un nuage de sel, dilué plus en amont. L'application de cette méthode n'était pas possible dans notre cas, car les dimensions élevées du cours d'eau nécessitent une quantité de sel trop élevée. Nous avons choisi de calibrer nos données au moyen des formules hydrauliques en utilisant la méthode de la superficie partielle,

qui prend en compte des coefficients de frottement des matériaux (lit et berges), de la géométrie de la section et de la pente (Bezzola, 2008). La courbe du débit est décrite par une fonction puissance $f(h) = 63.479h^{1.69}$ (Fig. 6.5), où h est la hauteur de l'eau.

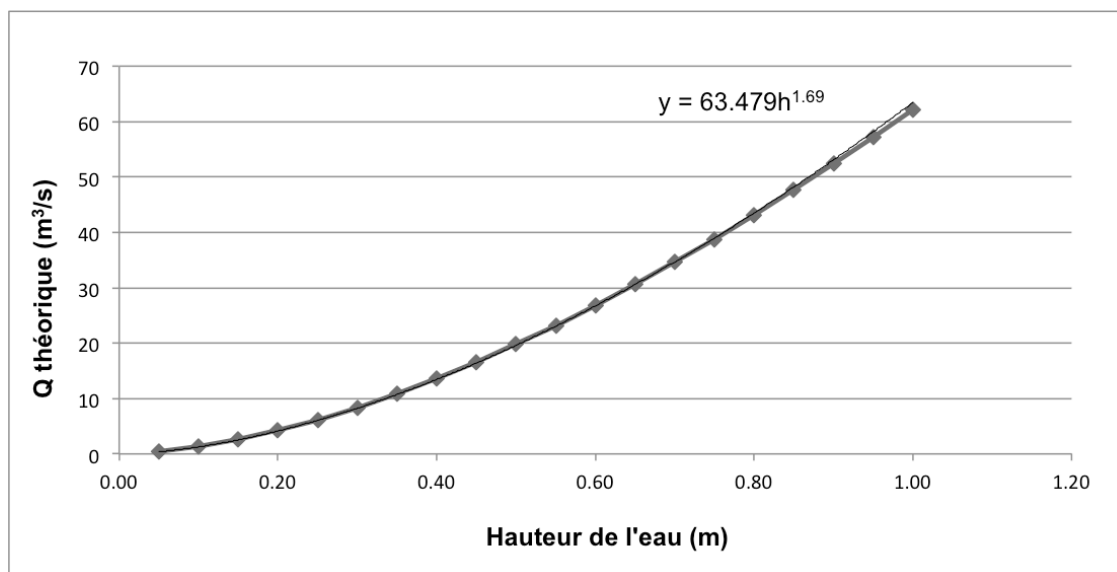


Figure 6.5 - Courbe de tarage des hauteurs d'eau en fonction des débits utilisée pour la calibration des deux sondes HyMADD.

A partir des données hydrologiques recueillies, il est possible de saisir l'importance des variations du niveau d'eau, du débit et également celles de la température (pour les stations HyMADD et pour la station propriété de l'IST). Cette dernière, permet d'enregistrer des informations sur le régime thermique, utiles pour mettre en évidence d'éventuelles perturbations pour les poissons (très sensibles aux oscillations de température).

Une évaluation de l'intensité du marnage a pu être effectuée grâce au rapport entre débit d'éclusee et débit plancher (Q_{\max}/Q_{\min}), exprimée par un rapport $x : 1$, à la différence du niveau d'eau (ΔN) (Baumann et Klaus, 2003) et à l'application de la méthode présentée par Meile *et al.* (2011). Cette dernière propose des indicateurs permettant de décrire le régime d'écoulement caractérisé par la présence des ouvrages hydroélectriques. Les auteurs suggèrent d'évaluer l'intensité des variations journalières au moyen des indicateurs HP_{1j} (*hydropeaking indicator*) et HP_{2j} (*flow ramping rate*). Le premier calcule la différence entre le débit d'éclusee maximal ($Q_{\max j}$) et le débit plancher ($Q_{\min j}$), normalisée par le débit moyen journalier ($Q_{\text{mean } j}$) qui permet de tenir compte des différences entre les échelles du cours d'eau. Le deuxième indicateur décrit le gradient de changement du débit de l'eau entre deux observations successives. De manière générale, plus le gradient de changement est élevé et plus les conditions pour la faune aquatique peuvent être compromises.

L'indicateur HP_{1j} est défini comme suit :

$$HP_{1j} = \frac{Q_{maxj} - Q_{minj}}{Q_{meanj}}$$

Où j correspond au jour [$1 \leq j \leq 365$ (366)].

L'indicateur HP_{2j} est défini comme suit :

$$HP_{2j} = \frac{Q_i - Q_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$$

Où Q_i est le débit mesuré au temps t_i et Q_{i-1} est le débit mesuré au temps t_{i-1} .

L'application de ces indicateurs a permis de déterminer quantitativement l'intensité du marnage le long des deux cours d'eau étudiés.

6.4 Acquisition des données climatiques

Les informations pluviométriques sont indispensables pour tout travail consacré à l'étude du régime hydrologique. Dans le cadre de notre recherche, une importance particulière est attribuée aux analyses des événements météorologiques qui se sont produits pendant la période d'analyse. Le but est de saisir d'éventuels phénomènes météorologiques particuliers liés à des précipitations intenses pour pouvoir les exclure des causes possibles du transport de la charge solide.

Les stations de mesure prises en considération sont, du nord au sud : San Bernardino (1639 m.s.n.m.), Mesocco (815 m.s.n.m.), Braggio (1320 m.s.n.m.), Grono (380 m.s.n.m.), Bellinzona (225 m.s.n.m.), Magadino/Cadenazzo (197 m.s.n.m.) (Fig. 5.10 - 5.14). Pour chaque station fluviale (Cabiolo, Lostallo/Cama, Grono, Lumino/Sassello) (Chap. 6.1), nous avons considéré les valeurs enregistrées par la station la plus proche. Dans certains cas, les données pluviométriques manquaient : dans cette situation, nous avons utilisé les données de la station la plus proche de celle de référence pour la section fluviale. Les précipitations ont été exprimées en rapportant l'unité horizontale (mm) à l'unité de temps (jour) en faisant la somme de l'eau tombée pendant toute la journée. En Suisse, toute précipitations supérieure à 0.5 mm est considérée comme pluie effective (Musy et Higy, 2004).

6.5 Méthodes pour l'analyse de l'activité sédimentaire

6.5.1 Principes de la méthode

La mesure du transport des matériaux fluviaux est très compliquée et difficile à mettre en œuvre (Bravard et Petit, 1997) car les méthodologies à appliquer sont assez coûteuses et la mesure des sédiments situés au centre du cours d'eau impliquent une difficulté technique et un certain danger pendant les analyses (la vitesse et la profondeur du courant d'un cours d'eau à marnage peuvent par exemple changer rapidement). Pour répondre aux questions de départ, le but est de trouver une technique qui permette de saisir l'activité sédimentaire avant et après le débit d'écluse. Pour ce faire, nous avons appliqué une technique, assez simple et bon marché, qui s'inspire des travaux déjà menés le long d'autres cours d'eau suisses (Kirchhofer et Breitenstein, 2008 ; Consorzio D.R.I.F.T., 2011).

Analyses de terrain

La méthode consiste à faire un marquage colorimétrique des cailloux présents sur place ("matériel autochtone"). Le coloriage est effectué pendant le débit plancher au moyen d'un carré d'une surface de 0.25 m² et d'un spray. Une photo est prise avant et après l'arrivée du débit d'écluse, afin de documenter les éventuelles variations de l'activité sédimentaire (Fig. 6.6), lors de l'écluse.

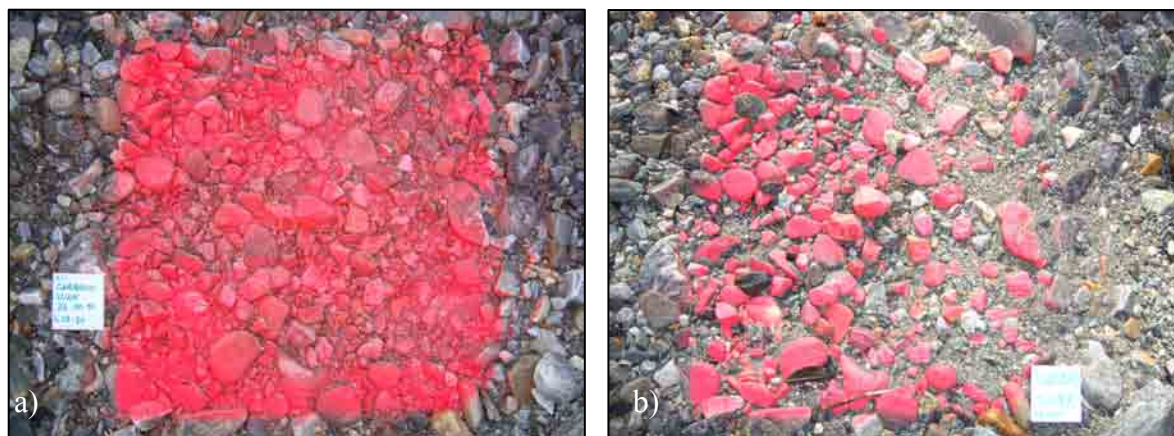


Figure 6.6 (a, b) – Clichés pris avant et après le débit d'écluse. Nous pouvons remarquer l'enregistrement des variations de l'activité sédimentaire imposées par le débit d'écluse.

Cette technique permet de connaître d'un part les conditions du débit nécessaires à la mise en mouvement et d'autre part d'estimer, quand cela est possible, les distances parcourues par la charge de fond. Quand le transport n'est pas trop élevé, il est possible de localiser le mouvement des cailloux et de le documenter.

Les avantages de cette technique sont la possibilité d'être effectuée in situ (donc sans qu'il y ait déstructuration des matériaux ou la nécessité de prélever des sédiments), la facilité de la mise en œuvre et son caractère économique.

Analyse quantitative de l'activité sédimentaire à l'aide du logiciel Matlab (Matrix Laboratory)

Les données ont été analysées au moyen du logiciel *Matlab*, un logiciel très performant créé dans le but de toute analyse de calcul, visualisation graphique, analyse et élaboration des données, simulation et modélisation, et programmation. À l'aide d'un code de programmation, créé par le Prof. Stuart N. Lane, nous avons quantifié l'activité sédimentaire à partir des clichés pris pendant le travail de terrain. Le logiciel permet d'appliquer plusieurs fonctions qui permettent l'analyse des images (format *.jpeg* ou *.tiff*). Ces dernières sont composées de trois couleurs fondamentales : le rouge, le vert et le bleu (*RGB*). Les appareils photo numériques codent chaque pixel sous la forme d'un triplet de valeurs correspondant aux trois couleurs. Dans une première étape, il est nécessaire d'effectuer un « géoréférencement » de deux images (Fig. 6.7). C'est le même principe qui gouverne les Systèmes d'Information Géographique (SIG) : dans les SIG, il est nécessaire de gérer des cartes ayant le même système de coordonnées ; dans notre cas les deux images, pour être analysées, doivent avoir une échelle identique. Dans le code de programmation est également présente une partie consacrée au géoréférencement ; il suffit de cliquer sur des points présents dans les deux images et le code *Matlab* transforme automatiquement les deux images à la même échelle.

L'étape suivante permet de quantifier les différences entre les photos prises avant et après le débit d'écluse. Le logiciel, gouverné par le code de programmation, indique le taux d'activité sédimentaire⁹, exprimé en pourcentage, et la marge d'erreur. Cette méthode, quantitative, s'avère très intéressante et permet d'obtenir des informations sur les effets de l'*hydropeaking* sur l'activité sédimentaire.

⁹ L'activité sédimentaire indique un taux de changement du lit fluvial, sans préciser si nous avons du transport, de l'érosion ou du dépôt.

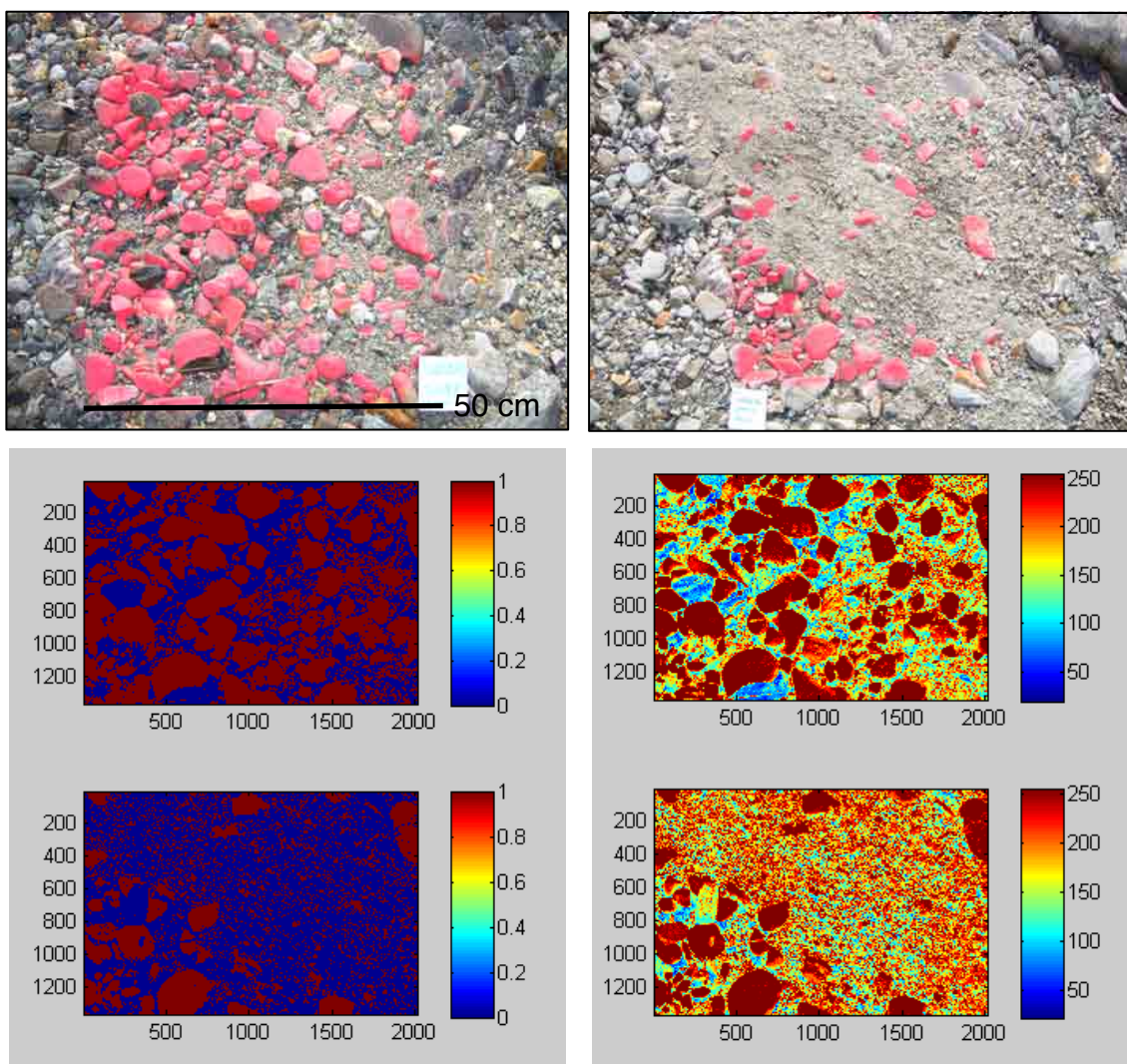


Figure 6.7 – En haut sont visibles les deux clichés pris pendant le travail de terrain, avant et après le débit d'écluse. Après la digitalisation et la quantification de l'activité sédimentaire, le logiciel Matlab crée d'autres images qui montrent le taux de changement du lit.

6.5.2 Mise en œuvre

La technique du marquage colorimétrique a été appliquée pendant l'automne 2010, l'hiver 2011 et le printemps 2011 (Tabl. 6.3). Les analyses ont été menées pendant des périodes d'une semaine caractérisée par des conditions météorologiques favorables (absence de précipitations), car le substrat fluvial à colorier doit être sec.

Pour la station de Lumino/Sassello (station 4), cette méthode n'as pas pu être appliquée, car il n'y avait pas de substrat sec disponible pendant le débit plancher (le lit fluvial était complètement mouillé pendant le débit plancher). Malgré cette situation, la volonté de comprendre les effets du marnage dans cette section d'étude a permis de rechercher d'autres techniques permettant de déterminer, même de manière qualitative, un éventuel changement du transport de la charge solide. Pour cette station, une autre méthodologie a été mise en

oeuvre : des cailloux déjà colorés d'une granulométrie comprise entre 7 et 40 mm¹⁰ ont été posés sur le lit du cours d'eau pendant le débit minimal (Fig. 6.8). Une observation purement descriptive a permis d'appréhender la présence ou l'absence de transport de la charge solide. La principale lacune de cette technique est liée au fait que les données recueillies pendant le travail de terrain ne peuvent pas être analysées au moyen du code de programmation *Matlab*, et la méthode reste purement qualitative.



Figure 6.8 – Matériaux utilisés pour l'évaluation du transport de la charge de fond. Cette technique reste purement qualitative.

Moesa		
	Date	Lieu
Campagne d'automne	26, 27, 28, 29 octobre 2010	Station de Cabbio
	26, 27, 28 octobre 2010	Station de Cama
	26, 27, 28, 29 octobre 2010	Station de Grono
Campagne d'hiver	25, 26, 27, 28 janvier 2011	Station de Cabbio
	20, 21, 25 janvier 2011	Station de Cama
	20, 21, 25 janvier 2011	Station de Grono
Campagne de printemps	04, 05, 06 avril 2011	Station de Cabbio
	04, 05, 06 avril 2011	Station de Cama
	04, 05, 06 avril 2011	Station de Grono
	04, 05, 06 avril 2011	Station de Lumino/Sassello
Morobbia		
	Date	
Campagne d'automne	27, 28, 29 octobre 2010	
Campagne d'hiver	23, 25, 26 janvier 2011	
	21, 26 février et 14 mars 2011	
Campagne de printemps	04, 05, 06 avril 2011	

Tableau 6.3 - Résumé des principales analyses pour l'évaluation du transport de la charge de fond.

¹⁰ Le choix de cette taille granulométrique est lié principalement aux conditions de frai des poissons.

6.6 Méthodes pour l'analyse du colmatage

6.6.1 Principes de la méthode

Le colmatage est une conséquence de l'altération de la dynamique sédimentaire provoquée par la présence d'un régime d'écluse (Chap. 4.1.3; Tabl. 4.1). Le terme « colmatage » indique une augmentation de l'apport de sédiments fins entre les interstices du substrat plus grossier qui conduit à une imperméabilisation du lit, une réduction des échanges entre le cours d'eau et la nappe phréatique et une diminution d'apport d'oxygène qui implique des répercussions sur la faune benthique et sur les poissons (p. ex. dysfonctionnement des frayères et des habitats) (Baumann et Klaus, 2003 ; Schälchli, 2002). Une distinction entre deux types de colmatage est possible. Le **colmatage externe** correspond au dépôt des sédiments fins à la surface du lit, le **colmatage interne** à l'accumulation des sédiments fins dans les pores du lit et des graviers (Fischnetz, 2004). Dans le cas d'un régime à marnage, l'augmentation du gradient hydraulique pendant le débit d'écluse, provoque un accroissement des matériaux fins transportés par suspension. Pendant le débit plancher, les sédiments vont se déposer et entraîner le colmatage.

Il existe actuellement de nombreuses méthodes pour l'évaluation de l'état du colmatage, mais aucune n'est, pour le moment normalisée (Malavoi et Bravard, 2010). Les méthodes existantes comportent des coûts d'investigation (temps et argent) différents. La technique utilisée dans ce travail de recherche consiste à évaluer visuellement le colmatage de surface et de l'emboîtement des particules grossières dans une matrice plus fine. Elle a été choisie pour des questions de facilité de la mise en oeuvre et de coût. D'autres études consacrées à l'analyse des effets du marnage (Schälchli, 2006 ; Consorzio D.R.I.F.T., 2011) ont déjà utilisé cette technique le long du Rhône et du Ticino.

Pour examiner le degré du colmatage, nous avons appliqué la méthode mise au point par l'*Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz* (EAWAG) (Schälchli, 2002), qui consiste dans l'appréciation visuelle du lit fluvial pour la détermination du degré de colmatage interne. L'analyse, très simple, consiste dans le retrait de la première couche du substrat et l'évaluation du niveau de colmatage entre les graviers et les matériaux fins. Les analyses doivent être effectuées quand le débit est minimal et la surface d'investigation majeure (dans nos cas, pendant la période hivernale) (Tabl. 6.5). Dans le tableau 6.4 est visible la subdivision en classes nécessaire pour déterminer le niveau de colmatage. Elle montre l'importance des différents sédiments pour la caractérisation de la classe (les limons et argiles jouent un rôle important à cause de leur haut degré de cohésion). Les figures 6.9 à 6.13 représentent les classes de référence proposées par les auteurs (Schälchli, 2002).

Classe	Degré	Indicateurs
1	Colmatage absent	Substrat à matériaux grossiers (pierres, graviers) Faible quantité de sable et absence de dépôts cohésifs (limon, argile) Interstices vides dominants
2	Faible colmatage	Substrat non consolidé (pierres, graviers, sable) Absence de dépôts cohésifs (limon, argile) Interstices vides dominants, différence évidente par rapport à la classe 1
3	Colmatage moyen	Substrat faiblement consolidé Présence de dépôts cohésifs (limon, argile) La surface de contact correspond à 25% de particules fines et de 75% vides
4	Fort colmatage	Substrat considérablement consolidé (renforcé) La surface de contact correspond à 50% de particules fines et 50% de sable Localement sont visibles encore des vides
5	Colmatage complet	Substrat fortement consolidé Surface de contact totalement remplie par des particules fines cohésives Absence de vides visibles

Tableau 6.4 – Indicateurs utilisés pour l'évaluation et la détermination du degré de colmatage (d'après Schälchli, 2002).

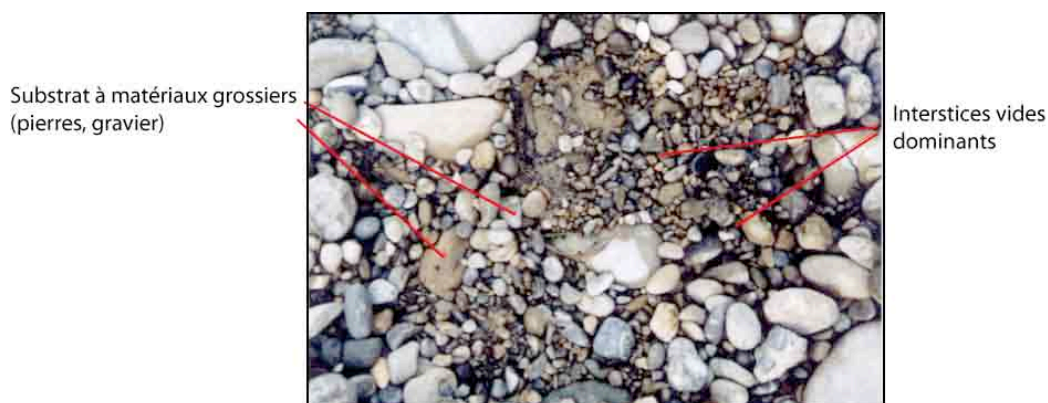


Figure 6.9 – Classe 1, à colmatage absent (d'après Schälchli, 2002).

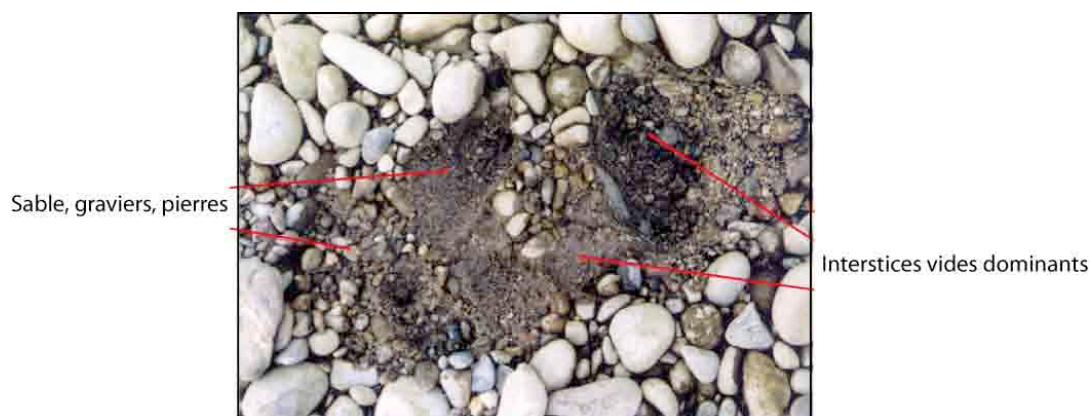


Figure 6.10 – Classe 2, à faible colmatage (d'après Schälchli, 2002).

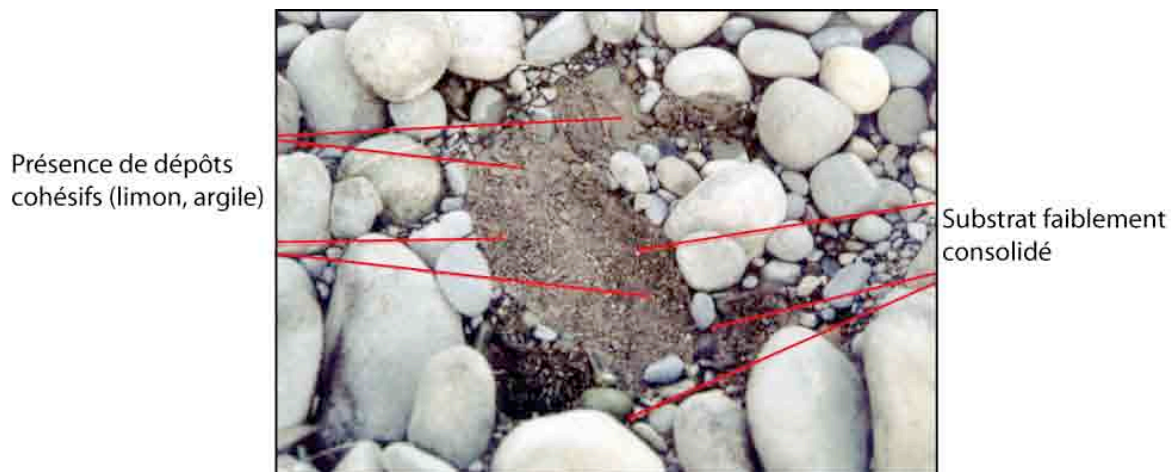


Figure 6.11– Classe 3, à colmatage moyen (d'après Schälchli 2002).

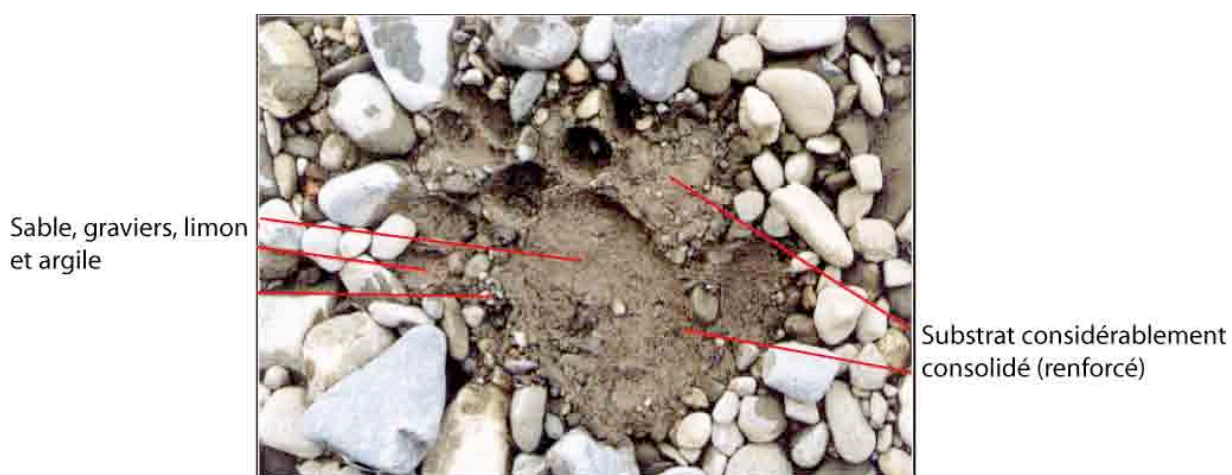


Figure 6.12– Classe 4, à fort colmatage (d'après Schälchli, 2002).

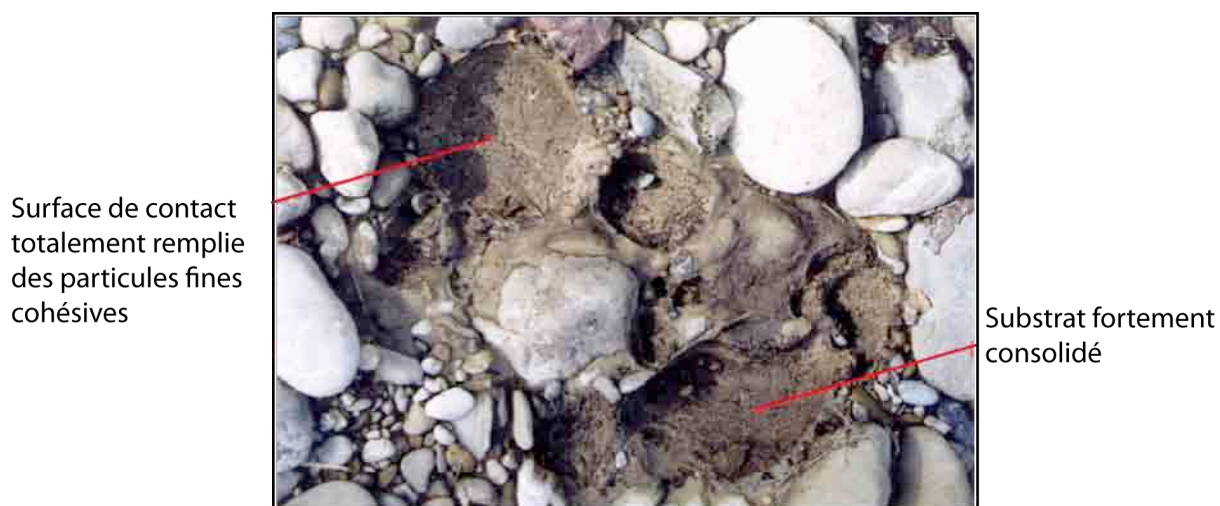


Figure 6.13 – Classe 5, à colmatage complet (d'après Schälchli, 2002).

6.6.2 Mise en œuvre

Les observations de terrain ont été effectuées pendant la période où le débit est minimal. L'acquisition des données a été menée en marchant le long du cours d'eau, depuis le dernier point de restitution des eaux, jusqu'à la confluence avec le Ticino. Les informations recueillies (classe de degré du colmatage, localisation et observations) ont été reportées sur des formulaires de terrain. L'évaluation a été faite en faisant référence au tableau 6.4 et aux images de référence (Fig. 6.9 - 6.13).

Date	Lieu	Débit (m ³ /s)
06.03.11	Soazza	0.8
25.01.11	Cabbio	1.53
26.01.11	Golena Rosera	1.53
26.01.11	Leggia	1.53
27.01.11	Cama	1.53
07.02.11	Pascoletto (Grono)	7
21.02.11	Roveredo	7
21.02.11	San Vittore	6
06.03.11	Lumino	5
23.01.11	Morobbia	0.3

Tableau 6.5 - Valeurs du débit enregistrées pendant les analyses pour l'évaluation du degré de colmatage le long des deux cours d'eau d'étude.

III^e PARTIE
PRESENTATION, ANALYSE ET DISCUSSION DES
RESULTATS

Chapitre 7 : Résultats	p. 83
Chapitre 8 : Interprétation et analyse des résultats	p. 136

7) Résultats

7.1 L'état écomorphologique

La partie qui suit, présente l'état écomorphologique des deux cours d'eau, en illustrant les principales structures relevées. Les lecteurs intéressés à des informations supplémentaires peuvent se référer aux formulaires remplis sur le terrain (Annexes A.1 - A.4).

7.1.1 La Moesa

La Moesa comporte 23 tronçons (Fig. 7.1 et Tabl. 7.1), qui représentent les quatre classes écomorphologiques proposées par la méthode de Hütte et Niederhauser (1998). Nous trouvons deux unités fluviales (tronçons 10 et 22) appartenant à la première classe (naturel/semi-naturel), 6 tronçons (1, 4, 8, 16, 17, 18) classés dans la deuxième classe (peu atteint), 14 tronçons (2, 3, 5, 6, 7, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 20, 21, 23) dans la troisième classe, dont l'état écomorphologique est très atteint, et une unité fluviale, le tronçon 19, appartenant à la dernière classe et qualifiée avec un état "non naturel/artificiel".

Les deux tronçons de la première classe écomorphologique (naturel/semi-naturel) ont une largeur moyenne du lit très élevée qui atteint environ 80 mètres, une variabilité de la largeur prononcée et ils ne sont pas aménagés. La largeur des rives est suffisante et mesure environ 15 mètres. Le pied des berges n'est, dans les deux cas, pas renforcé. Le tronçon numéro 10, dit *Pascoletto* (Fig. 7.2), a fait l'objet, d'une revitalisation en 2001 (OFEG, 2004) : le cours d'eau a été libéré de ses digues pour permettre les échanges avec la zone alluviale et redonner une dynamique plus naturelle au système. Dans le troisième chapitre (Chap. 3.4), nous avons illustré les adaptations des cours d'eau aux changements des variables de contrôle et de réponse. Dans ce cas, la suppression des digues a permis un élargissement et de la formation d'une zone de tressage qui favorise la reconquête de la dynamique sédimentaire (Fig. 4.1 ; Fig. 7.2). À la fin du tronçon restauré, les eaux sont à nouveau rassemblées et des gros blocs de pierre ont été posés pour éviter l'érosion du lit (OFEG, 2004).

Les points de déversement des eaux turbinées sont localisés sur le tronçon 6 (Calancasca, Roveredo) (729.509/122.132), le tronçon 9 (Eline, Grono) (732.089/122.551), le tronçon 20 (Eline, Lostallo) (736.109/131.640) et le tronçon 23 (OIM, Soazza) (736.831/133.586). Les stations hydrologiques *HyMADD* ont été installées le long des tronçons 19 (Cabbio, 736.134/132.132.112) et 20 (Lostallo 130.414/735.472), la station fédérale de Lumino/Sassello est située le long du tronçon 2 (724.765/120.360).

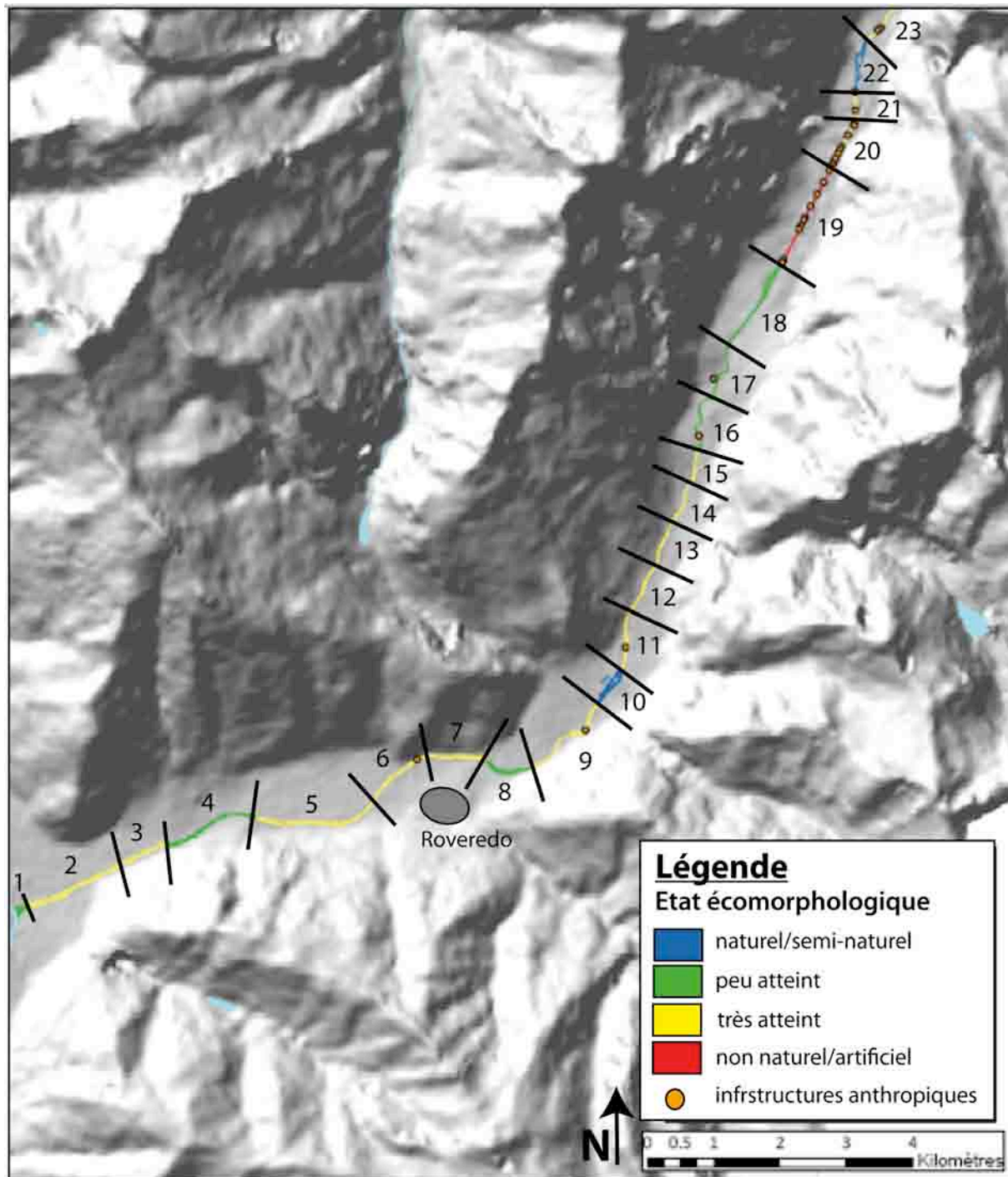


Figure 7.1 - Représentation de l'état écomorphologique de la Moesa, du dernier point de restitution à la confluence avec le Ticino. On note une forte présence d'infrastructures anthropiques le long du tronçon non naturel/artificiel. Les numéros indiquent les différents tronçons envisagés.

Numéro tronçon	Longueur (m)	%	Etat écomorphologique
1	180	0.81	peu atteint
2	710	3.21	très atteint
3	1590	7.20	très atteint
4	1480	6.70	peu atteint
5	1850	8.37	très atteint
6	896	4.06	très atteint
7	1100	4.98	très atteint
8	678	3.07	peu atteint
9	1428	6.46	très atteint
10	661	2.99	naturel/semi-naturel
11	478	2.16	très atteint
12	1128	5.11	très atteint
13	1108	5.02	très atteint
14	472	2.14	très atteint
15	461	2.09	très atteint
16	782	3.54	peu atteint
17	1113	5.04	peu atteint
18	1540	6.97	peu atteint
19	1526	6.91	non naturel/artificiel
20	1047	4.74	très atteint
21	274	1.24	très atteint
22	792	3.59	naturel/semi-naturel
23	798	3.61	très atteint
Total	22092	100	

Tableau 7.1 - Longueur et pourcentage des tronçons analysés le long de la Moesa. 6.58 % du cours d'eau présente un état écomorphologique naturel/semi-naturel, 26.13 % un état peu atteint, 60.38 % un état écomorphologique fortement compromis et 6.91 % un état écomorphologique considéré comme artificiel/non naturel.

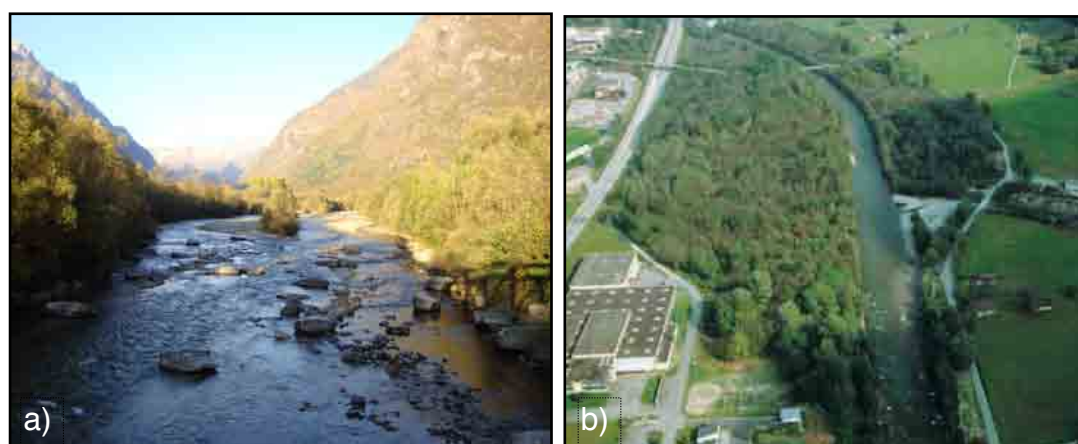


Figure 7.2 - a) Le tronçon 10 (Pascoletto), à Grono (GR), renaturé en 2001 (OFEG, 2004). Après la revitalisation, ce tronçon montre une combinaison paysagère nettement diversifiée. Cette amélioration géomorphologique favorise le développement de la faune et de la flore alluviale. L'élargissement du cours d'eau a renforcé les processus dynamiques et a permis la formation de bancs et le tressage. b) le tronçon avant l'intervention de 2001 (Photo : tirée de OFEG, 2004).



Figure 7.3 - Le tronçon 22, près de Cabiolo (GR), présente une largeur entre les rives suffisante et une variabilité de la largeur du lit mouillé élevée.

Les tronçons appartenant à la deuxième classe écomorphologique (peu atteint, p. ex. Fig. 7.4 et 7.5) présentent, en général, une variabilité du lit mouillé limitée ou prononcée, et un aménagement nul du lit. Le renforcement du pied des berges, la largeur du lit moyen et la largeur moyenne des rives varient selon les cas (Annexes A.1 - A.4).



Figure 7.4 - Première unité fluviale, située à la confluence avec le Ticino, caractérisée par un état écomorphologique peu compromis.



Figure 7.5 – Le tronçon 18, Golena Rosera (GR). En 1995, des interventions d’amélioration de la dynamique et de renforcement de la rive droite ont été réalisées pour protéger l’autoroute. Cette unité fluviale est désignée comme zone alluviale d’importance nationale (objet n°161, de l’inventaire fédéral des zones alluviales¹¹).

Les tronçons qualifiés par un état écomorphologique “très atteint” sont caractérisés par une variabilité nulle de la largeur du lit et une largeur insuffisante des rives (sauf quelques exceptions). Fréquemment, la proximité d’infrastructures anthropiques confère au cours d’eau une structure artificielle des rives. Le renforcement du pied des berges est présent dans tous les cas (de 10 % à 100 %).



Figure 7.6 – La Moesa à Lumino/Sassello (TI) (tronçon 3), présentant un état écomorphologique très atteint. Sur cette image, nous pouvons observer la variabilité nulle de la largeur du lit mouillé.

¹¹ Source : Site de l’Office fédéral de l’environnement (www.bafu.admin.ch). Consulté le 19.11.2011.



Figure 7.7 - La Moesa à Roveredo (GR) (tronçon 7) présentant un état écomorphologique “très atteint” (Classe III). A cause de la présence d’un mur de protection, la largeur des rives est nulle.



Figure 7.8 – La Moesa à Grono (GR) (tronçon 9), présentant un état écomorphologique très atteint. Au contraire de la rive droite, la rive gauche n’est pas aménagée.

Le tronçon 19 (Fig. 7.9 - Fig. 7.11), situé entre Lostallo et Cabbio, présente un état écomorphologique considéré comme “non naturel/artificiel” (Classe écomorphologique IV). Il est caractérisé par une largeur du lit de 20 mètres, une variabilité nulle et un aménagement du lit moyen (10-30 %). Le pied des berges est renforcé sur la totalité des deux rives. Ce tronçon comporte la présence de plusieurs seuils d’une hauteur de 20-30 cm (Fig. 7.10).



Figure 7.9 - La Moesa près de Cabiolo (GR). La photo montre l'aménagement du lit (seuils) et le renforcement du pied de la berge.



Figure 7.10 - Un des nombreux seuils présents le long du tronçon 19 (736.131/131.917). Cette photo a été prise pendant le débit plancher.



Figure 7.11 - La Moesa à Lostallo (GR) (tronçon 19). Sur ce tronçon, l'état écomorphologique est très atteint, avec un aménagement du lit correspondant à 10-30% de la surface.



Figure 7.12 - Exemple d'intervention le long de la Moesa à Leggia (732.731/124.151) avec la création d'un bassin refuge.

Le long de la Moesa, il faut souligner la présence d'un bassin refuge à Leggia (732.731/124.151) (Fig. 7.12) permettant aux espèces aquatiques de trouver abri pendant les crues.

7.1.2 La Morobbia

La Morobbia comprend cinq tronçons (Fig. 7.13).

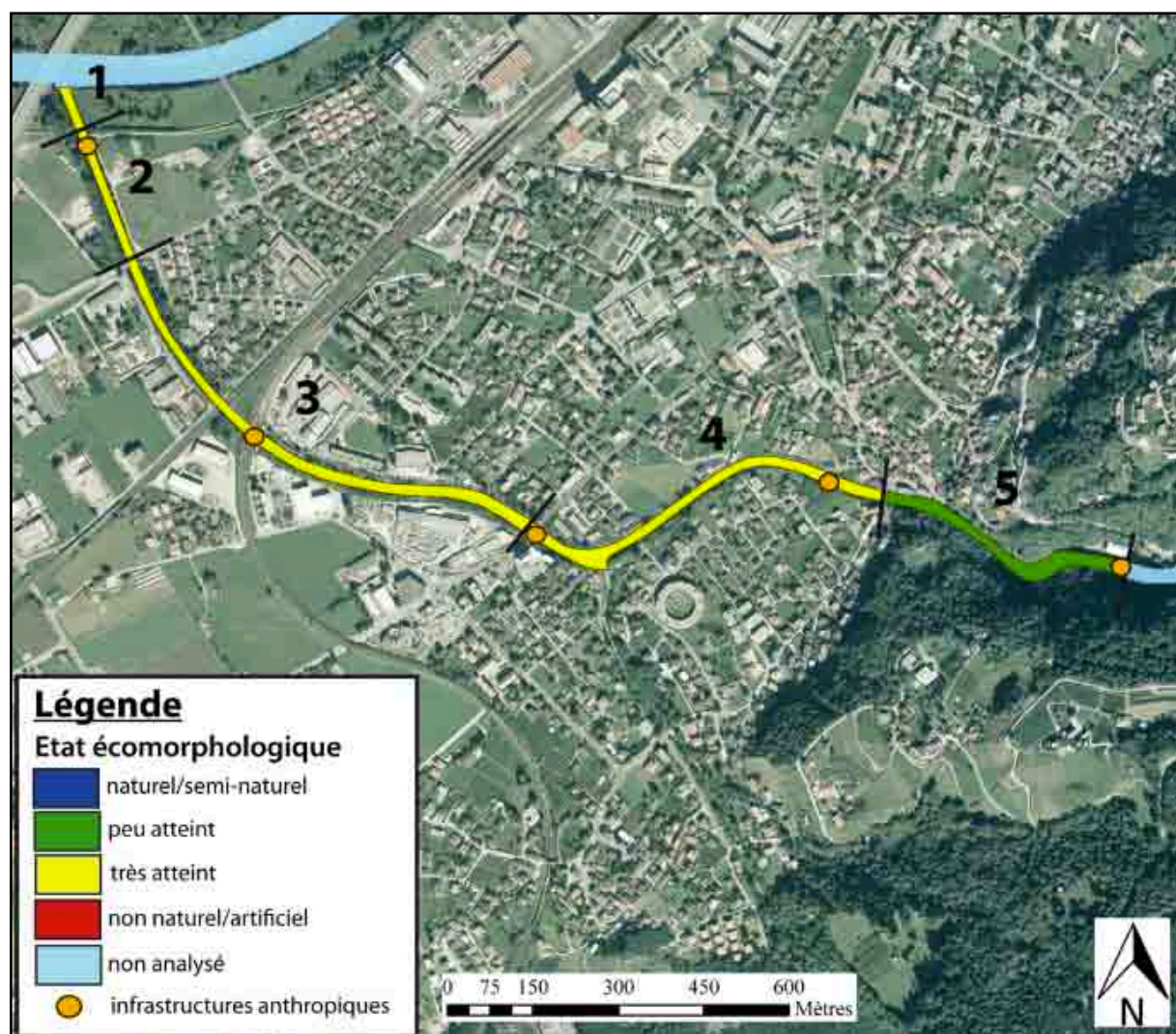


Figure 7.13 - L'état écomorphologique de la Morobbia, du point de restitution des eaux, jusqu'à la confluence avec le Ticino. Les numéros indiquent les tronçons envisagés. Le point de restitution de la centrale AMB est situé sur le tronçon 5, la station hydrologique de mesure se trouve sur le troisième tronçon.

La première unité fluviale (Fig. 7.14) est caractérisée par une largeur moyenne du lit d'environ 12 mètres, la variabilité de la largeur et l'aménagement du lit sont nuls. Le pied des berges est entièrement renforcé par des pierres naturelles et par des gros blocs. La largeur des rives est insuffisante. Ce premier tronçon, peut être considéré dans un état écomorphologique "très atteint" (Classe III). Il en va de même pour la deuxième unité fluviale, qui présente des caractéristiques identiques et est qualifiée de tronçon avec un état écomorphologique "très atteint" (Classe III). Pour ce tronçon on trouve un seuil artificiel, localisé près de la confluence avec le Ticino (Fig. 7.15).

Numéro tronçon	Longueur (m)	%	Etat écomorphologique
1	74	3.36	très atteint
2	227	10.32	très atteint
3	879	39.95	très atteint
4	615	27.95	très atteint
5	405	18.41	peu atteint
Total	2200	100	

Tableau 7.2 - Longueur et pourcentage des tronçons analysés le long de la Morobbia. 81.59 % présente un état écomorphologique très atteint et le restant, 18.41 %, est désigné par un état écomorphologique peu compromis.



Figure 7.14 - Le premier tronçon de la Morobbia, à la confluence avec le Ticino, est caractérisé par un état écomorphologique très compromis.



Figure 7.15 – Présence d'un seuil artificiel localisé près de la confluence avec le Ticino (720.188/114.843).

Le troisième tronçon (Fig. 7.16) est caractérisé par une largeur moyenne du lit d'environ 10 mètres et une variabilité de la largeur du lit nulle. Le tronçon se trouve dans la localité de

Giubiasco et la largeur des rives est étroitement limitée par la présence des infrastructures anthropiques. Pour la protection des ces dernières, le cours d'eau a été aménagé, en lui donnant une structure artificielle.



Figure 7.16 - Le troisième tronçon, caractérisé par des rives artificielles.

Ce tronçon, est caractérisé par la présence d'un passage sous tuyaux (Fig. 7.17) et de la station hydrologique de mesure de l'IST, qui indiquent un aménagement du lit localisé. Les critères recueillis sur le terrain permettent d'assigner à ce tronçon la troisième classe écomorphologique (très atteint).



Figure 7.17 – Le passage sous tuyaux du troisième tronçon (720.472/114.368).



Figure 7.18 – Tronçon numéro 4 pendant le débit d'éclusée. La structure et les rives, dont la largeur est insuffisante, sont artificielles.

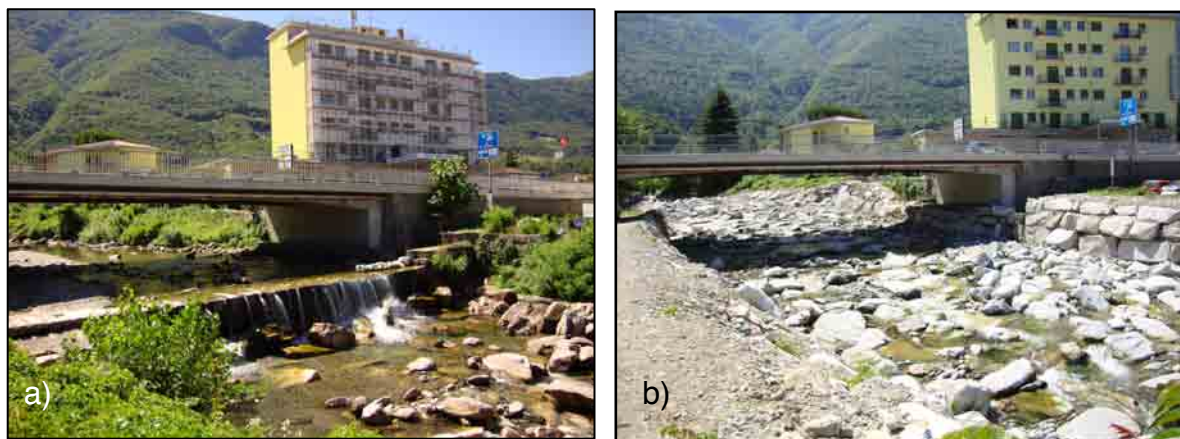


Figure 7.19 – a) Présence d'un seuil anthropique de 80 centimètres considéré comme un obstacle à la libre circulation des poissons (photo prise en juillet 2010) ; b) le seuil a été remplacé par une rampe à enrochement (photo prise en juin 2011) (720.558/114.230).

La quatrième unité fluviale (Fig. 7.18) a une largeur moyenne du lit de 15 mètres, une variabilité limitée de la largeur du lit et un aménagement nul du lit. Le renforcement du pied des berges est total sur les deux rives. La largeur de ces dernières est limitée par la présence d'un chemin pédestre, de la route et de bâtiments. Ce tronçon appartient à la classe écomorphologique "très atteint" (Classe III). Il a fait l'objet, au début 2011, d'une intervention pour l'amélioration de la libre circulation : un important seuil d'une hauteur d'environ 80 cm a été remplacé par une rampe à enrochement (Fig. 7.19).

Sur le tronçon numéro 5 (Fig. 7.20), la largeur moyenne du lit est d'environ 10 mètres, la variabilité et l'aménagement du lit sont nuls. Les deux rives sont différentes : la rive droite a subi un renforcement localisé du pied de la berge et présente une largeur insuffisante ; la rive gauche présente, au contraire, une largeur suffisante. Ce tronçon est qualifié par un état écomorphologique "peu atteint" (Classe II).

En général, la Morobbia, ne présente pas d'algues, sauf pendant la période hivernale (Fig. 7.21).

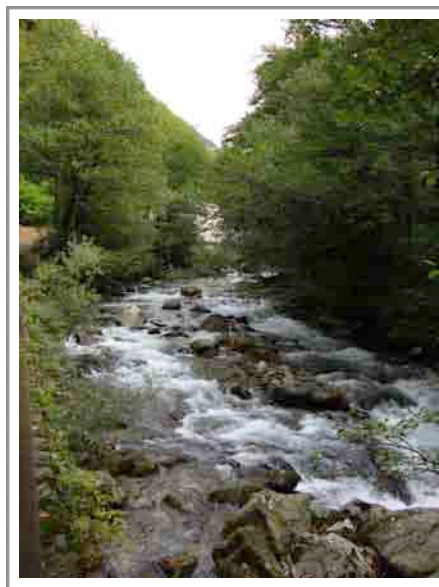


Figure 7.20 - Le tronçon numéro 5, présentant un état écomorphologique peu compromis.

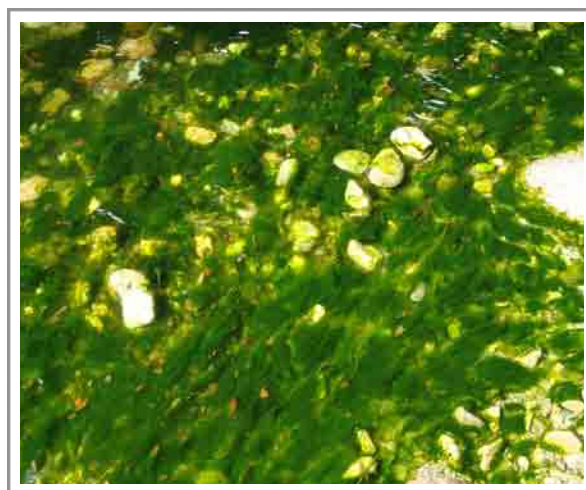


Figure 7.21 - Présence d'algues pendant la période hivernale (photo prise le 17.02.2011 à Giubiasco).

7.2 Le fonctionnement hydrologique

Dans cette partie du travail, nous allons présenter et discuter les données enregistrées à partir des réseaux hydrologique et pluviométrique pendant la période d'octobre 2010 à juin 2011. A cause de la grande quantité de données recueillies, dans ce chapitre, nous nous sommes limités exclusivement aux mois d'octobre (pour le régime d'automne), de janvier (pour le régime hivernal) et d'avril (pour le régime du printemps). Ce choix est lié à la possibilité de les associer aux mesures pour la quantification de l'activité sédimentaire (Tabl. 6.3 ; Chap. 7.3).

Pour les tronçons à régime d'éclusées, nous proposons des tableaux résumant les valeurs maximales et minimales du débit (Q_{\max} et Q_{\min}), ainsi que le rapport (Q_{\max}/Q_{\min}), le changement du niveau d'eau (ΔN) et quand les données étaient disponibles, la fluctuation de

température (ΔT). Nous avons choisi de montrer également les indicateurs HP_1 (*hydropeaking indicator*) et HP_2 , (*flow-ramping rate*) proposés par Meile *et al.* (2011) (Chap. 6.3).

Le chapitre 7.2.3 propose une synthèse représentant les valeurs moyennes mensuelles recueillies pendant toute la période d'étude (octobre 2010 - juin 2011) et un tableau résumant les valeurs moyennes annuelles (statistique annuelle et hivernale).

7.2.1 La Moesa

Station de mesure de Soazza (GR)

La station de Soazza (GR) (736.630/134.160) mesure le niveau d'eau et le débit de la Moesa à l'amont du point de restitution des eaux turbinées par la centrale OIM de Soazza. Les valeurs moyennes mensuelles du débit sont de 1.13 m³/s en janvier 2011 et de 1.08 m³/s en avril 2011. Nous n'avons malheureusement pas enregistré les données du mois d'octobre 2010.

Station de mesure de Cabbio (GR)

A partir du tronçon de Cabbio (GR), jusqu'à la confluence avec le Ticino, le régime de la Moesa est à marnage.

Pendant le mois d'octobre, les précipitations atteignent une valeur maximale de 39.5 mm/jour (Fig. 7.22 et Tabl. 7.3). Nous pouvons noter la présence d'une corrélation entre les précipitations du 4-5 octobre 2010 et la croissance du débit enregistrée le 5 octobre 2010 (20.82 m³/s).

A partir du tableau 7.3, nous pouvons noter que le rapport Q_{\max}/Q_{\min} atteint la valeur maximale de 10.38 : 1, le 26 octobre 2010. L'indicateur HP_1 , proposé par Meile *et al.*, (2011), a des valeurs qui se situent entre 0.81 et 4.82 m³/s : plus la valeur est élevée et plus l'amplitude des oscillations est grande. Une corrélation non linéaire entre les valeurs Q_{\max}/Q_{\min} et HP_1 est remarquable. La raison de ces faibles discordances entre l'indice Q_{\max}/Q_{\min} , proposé par Baumann et Klaus (2003), et l'indice HP_1 , présenté par Meile *et al.* (2011), s'explique par le fait que le deuxième indice prend en considération également le débit moyen journalier (Q_{mean}) (Chap. 6.3). Plus le débit moyen journalier est élevé, plus le rapport HP_1 est faible et les oscillations journalières sont moins importantes.

Dans la colonne " HP_2 " est représenté le taux de changement du débit entre deux observations espacées, dans notre cas, d'une heure. Si la valeur est négative, le débit subit une décroissance, et plus la valeur est proche de zéro, plus le changement est faible. Le taux de changement le plus important a été enregistré le 8 octobre 2010 (valeur de 11.57 m³/s/h). Le niveau d'eau varie entre 0 et 0.50 m, avec un changement maximal de 0.41 m.

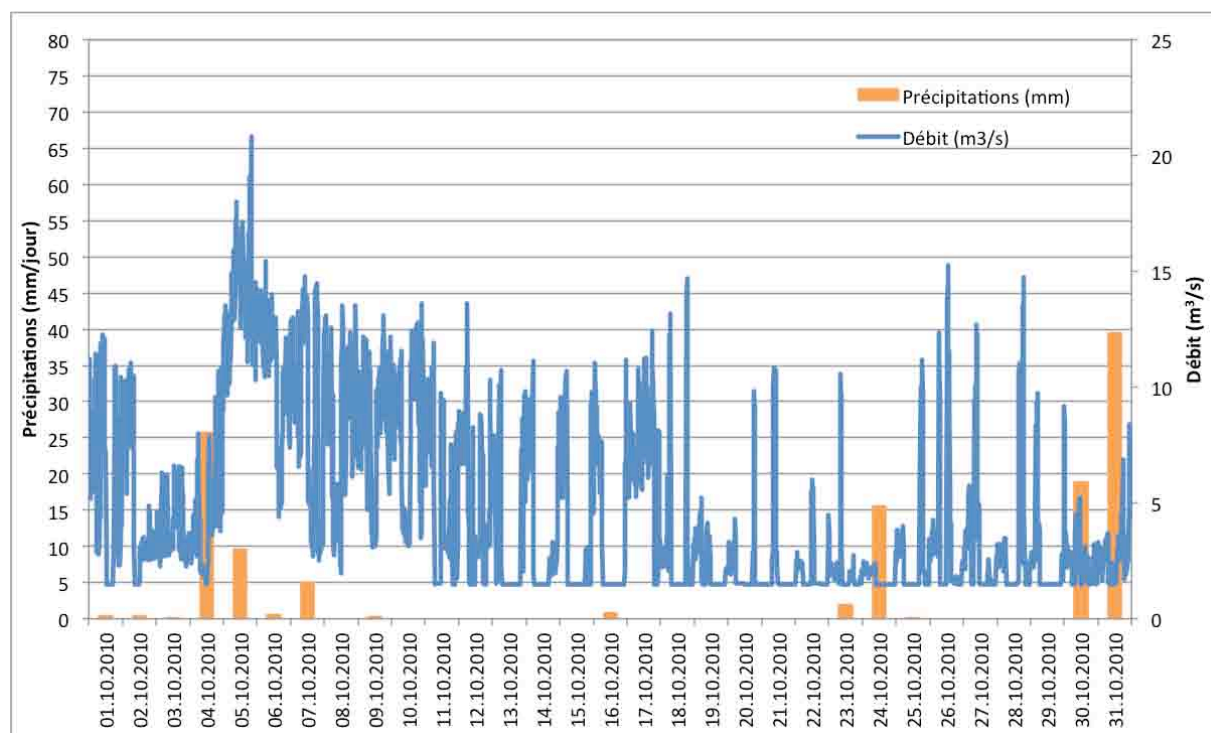


Figure 7.22 - Précipitations (mm/jour) et débits (m^3/s) de la Moesa à Cabiolo en octobre 2010. Les précipitations ont été enregistrées par la station de Mesocco (GR), localisée à 815 mètres d'altitude (737.900/139.450) (Fig. 5.11).

Date	Q_{max} (m^3/s)	Q_{min} (m^3/s)	Q_{max}/Q_{min}	Q_{mean}	HP_1	HP_2	N_{max} (m)	N_{min} (m)	ΔN (m)	P (mm/jour)
01.10.10	12.24	1.49	8.23	6.00	1.79	6.00	0.35	0.01	0.34	0.5
02.10.10	11.03	1.49	7.41	4.90	1.94	-9.00	0.33	0.01	0.32	0
03.10.10	6.62	2.26	2.93	3.81	1.14	3.55	0.23	0.08	0.15	0.1
04.10.10	10.88	1.49	7.29	4.50	2.08	3.81	0.32	0.01	0.32	25.8
05.10.10	20.82	9.27	2.25	13.99	0.83	-0.11	0.50	0.29	0.21	9.6
06.10.10	15.43	4.41	3.50	10.86	1.01	-0.49	0.41	0.16	0.25	0.6
07.10.10	14.80	2.54	5.82	8.76	1.40	5.61	0.40	0.09	0.31	5
08.10.10	13.52	1.95	6.93	8.37	1.38	11.57	0.38	0.06	0.32	0
09.10.10	13.09	3.10	4.23	8.62	1.16	4.57	0.37	0.12	0.25	0.3
10.10.10	13.63	3.15	4.33	8.34	1.26	6.79	0.38	0.12	0.26	0
11.10.10	11.93	1.49	8.02	4.94	2.11	6.79	0.35	0.01	0.34	0
12.10.10	13.63	1.48	9.22	5.09	2.39	5.67	0.38	0.01	0.37	0
13.10.10	10.73	1.47	7.30	3.61	2.56	3.12	0.32	0.00	0.32	0
14.10.10	11.13	1.47	7.57	3.59	2.69	-9.54	0.33	0.00	0.33	0
15.10.10	10.68	1.47	7.27	3.34	2.76	9.20	0.32	0.00	0.32	0
16.10.10	11.17	1.48	7.53	3.48	2.79	9.69	0.33	0.01	0.32	0.8
17.10.10	12.45	1.48	8.41	6.93	1.58	8.37	0.36	0.01	0.35	0
18.10.10	14.69	1.47	9.99	2.74	4.82	9.73	0.40	0.00	0.40	0
19.10.10	5.21	1.47	3.55	2.22	1.69	1.67	0.19	0.00	0.19	0
20.10.10	9.82	1.48	6.66	2.17	3.85	5.64	0.30	0.00	0.30	0
21.10.10	10.83	1.47	7.37	2.32	4.03	7.77	0.32	0.00	0.32	0
22.10.10	5.98	1.47	4.07	2.04	2.21	4.38	0.21	0.00	0.21	0
23.10.10	10.58	1.48	7.15	2.06	4.42	9.08	0.32	0.01	0.31	2
24.10.10	2.91	1.48	1.97	1.77	0.81	0.03	0.11	0.01	0.10	15.6
25.10.10	11.17	1.47	7.60	2.59	3.75	8.51	0.33	0.00	0.33	0.1
26.10.10	15.26	1.47	10.38	3.39	4.07	11.40	0.41	0.00	0.41	0
27.10.10	12.72	1.47	8.65	3.18	3.53	6.73	0.36	0.00	0.36	0
28.10.10	14.74	1.48	9.99	3.20	4.14	8.53	0.40	0.00	0.39	0
29.10.10	9.73	1.47	6.62	2.29	3.81	0.62	0.30	0.00	0.30	0
30.10.10	9.18	1.48	6.21	2.54	3.03	1.35	0.29	0.01	0.28	18.9
31.10.10	8.38	1.47	5.70	2.91	2.38	0.89	0.27	0.00	0.27	39.5

Tableau 7.3 - Résumé des valeurs enregistrées en octobre 2010 à la station de Cabiolo. Les valeurs du rapport Q_{max}/Q_{min} se situent entre 1.97 : 1 et 10.38 : 1. L'indice HP_1 présente des valeurs comprises entre 0.81 et 4.82 m^3/s .

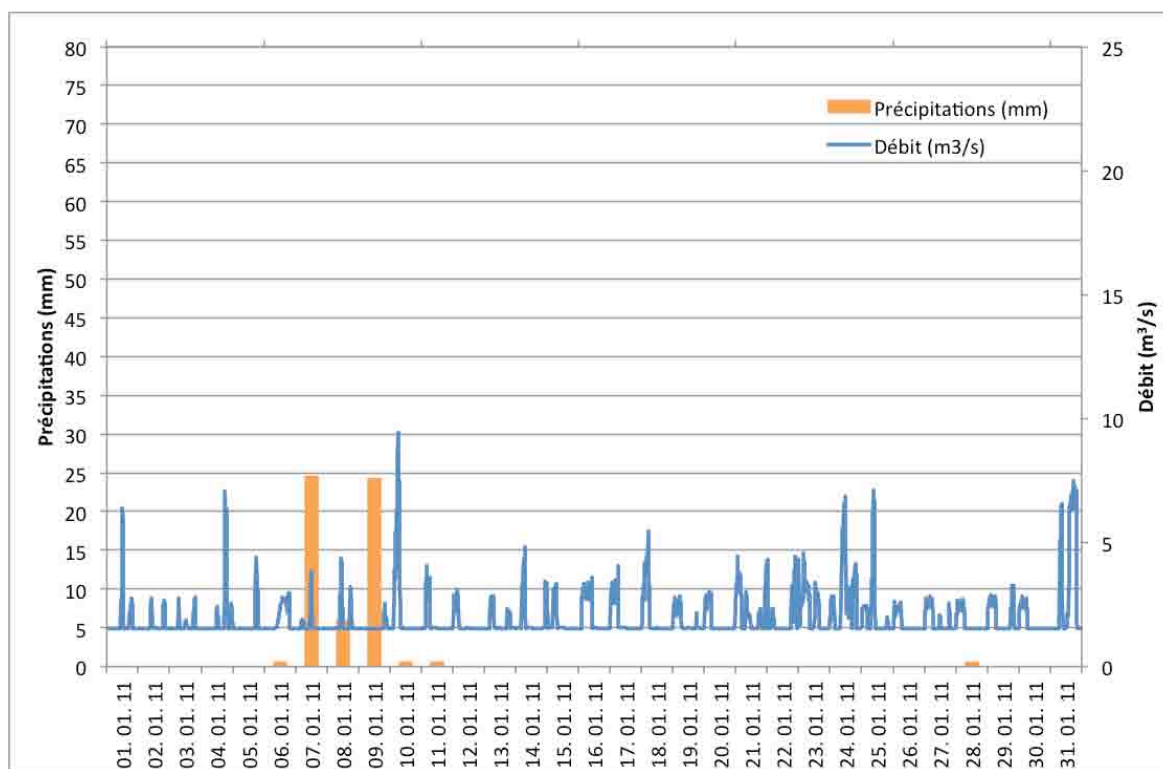


Figure 7.23 - Précipitations (mm/jour) et débits (m³/s) de la Moesa à Cabbio en janvier 2011. Les précipitations ont été enregistrées par la station de Mesocco (GR), localisée à 815 mètres d'altitude (737.900/139.450) (Fig. 5.11).

Date	Qmax (m ³ /s)	Qmin (m ³ /s)	Qmax/Qmin	Qmean	HP ₁	HP ₂	Nmax (m)	Nmin (m)	ΔN (m)	P (mm/jour)
01.01.11	6.41	1.53	4.88	1.83	2.67	4.00	0.22	0.00	0.22	0
02.01.11	2.75	1.53	1.22	1.66	0.73	1.12	0.10	0.00	0.10	0
03.01.11	2.81	1.53	1.28	1.66	0.77	0.13	0.10	0.00	0.10	0
04.01.11	7.07	1.53	5.54	1.87	2.97	3.55	0.24	0.00	0.24	0
05.01.11	4.41	1.53	2.88	1.70	1.70	2.88	0.18	0.00	0.18	0
06.01.11	2.97	1.53	1.44	1.92	0.75	0.31	0.11	0.00	0.11	0.6
07.01.11	3.88	1.53	2.95	1.64	1.44	2.32	0.14	0.00	0.14	24.5
08.01.11	4.38	1.53	2.84	1.78	1.60	2.84	0.16	0.00	0.16	6
09.01.11	2.52	1.53	0.99	1.60	0.62	0.98	0.09	0.00	0.08	24.2
10.01.11	9.46	1.53	7.93	2.23	3.56	1.74	0.29	0.00	0.29	0.6
11.01.11	4.05	1.53	2.52	1.74	1.45	2.51	0.15	0.00	0.15	0.6
12.01.11	3.11	1.53	1.58	1.72	0.92	0.00	0.11	0.00	0.11	0
13.01.11	2.86	1.53	1.33	1.74	0.76	1.15	0.10	0.00	0.10	0
14.01.11	4.81	1.53	3.28	1.87	1.75	2.36	0.17	0.00	0.17	0
15.01.11	3.35	1.53	1.82	1.76	1.04	0.31	0.12	0.00	0.12	0
16.01.11	3.61	1.53	2.08	2.02	1.03	1.37	0.13	0.00	0.13	0
17.01.11	4.08	1.53	2.55	1.92	1.33	-2.53	0.15	0.00	0.15	0
18.01.11	5.48	1.53	3.95	2.04	1.94	0.00	0.19	0.00	0.19	0
19.01.11	2.84	1.54	1.30	1.78	0.73	0.07	0.10	0.00	0.10	0
20.01.11	3.02	1.53	1.49	1.80	0.83	-1.21	0.11	0.00	0.11	0
21.01.11	4.44	1.53	2.91	2.19	1.33	1.46	0.18	0.00	0.18	0
22.01.11	4.47	1.57	2.90	1.97	1.47	-0.01	0.16	0.00	0.16	0
23.01.11	4.58	1.53	3.03	2.22	1.36	-1.37	0.17	0.00	0.17	0
24.01.11	6.87	1.53	5.34	2.70	1.98	3.19	0.23	0.00	0.23	0
25.01.11	7.11	1.53	5.58	2.16	2.59	3.58	0.24	0.00	0.24	0
26.01.11	2.65	1.53	1.12	1.72	0.65	-0.60	0.09	0.00	0.09	0
27.01.11	2.84	1.53	1.31	1.83	0.71	-1.05	0.10	0.00	0.10	0
28.01.11	2.71	1.53	1.18	1.75	0.67	0.06	0.10	0.00	0.10	0
29.01.11	3.30	1.53	1.77	1.95	0.91	1.24	0.12	0.00	0.12	0.6
30.01.11	2.86	1.53	1.33	1.77	0.75	-1.07	0.10	0.00	0.10	0
31.01.11	7.51	1.53	5.98	3.18	1.88	3.74	0.25	0.00	0.25	0

Tableau 7.4 - Résumé des valeurs enregistrées en janvier 2011 à la station de Cabbio. Les rapports Q_{max}/Q_{min} se situent entre 1.12 : 1 et 7.93 : 1. La valeur HP_1 minimale est de 0.62 et la maximale de 3.56 m³/s.

La figure 7.23 et le tableau 7.4 illustrent les données recueillies en janvier 2011. Les précipitations sont faibles, avec une valeur maximale de 24.5 mm/jour. Aucune importante crue naturelle n'a été enregistrée.

Le débit plancher est caractérisé par une valeur de $1.53 \text{ m}^3/\text{s}$, le débit d'écluse présente un maximum de $9.46 \text{ m}^3/\text{s}$, avec un rapport de $7.93 : 1$ et une différence entre le niveau d'eau minimal et maximal de 0.29 m , le 10 janvier 2011. Les valeurs HP_1 se situent entre 0.62 et $3.56 \text{ m}^3/\text{s}$. La valeur HP_1 la plus élevée a été enregistrée le 10 janvier 2011. En janvier, les variations du débit sont moins fréquentes (un seul grand pic par jour) et sont caractérisées par une amplitude (Q_{\max}/Q_{\min}) nettement inférieure (Fig. 7.23). Le taux de changement (HP_2) est faible, avec une valeur maximale de $4 \text{ m}^3/\text{s/h}$.

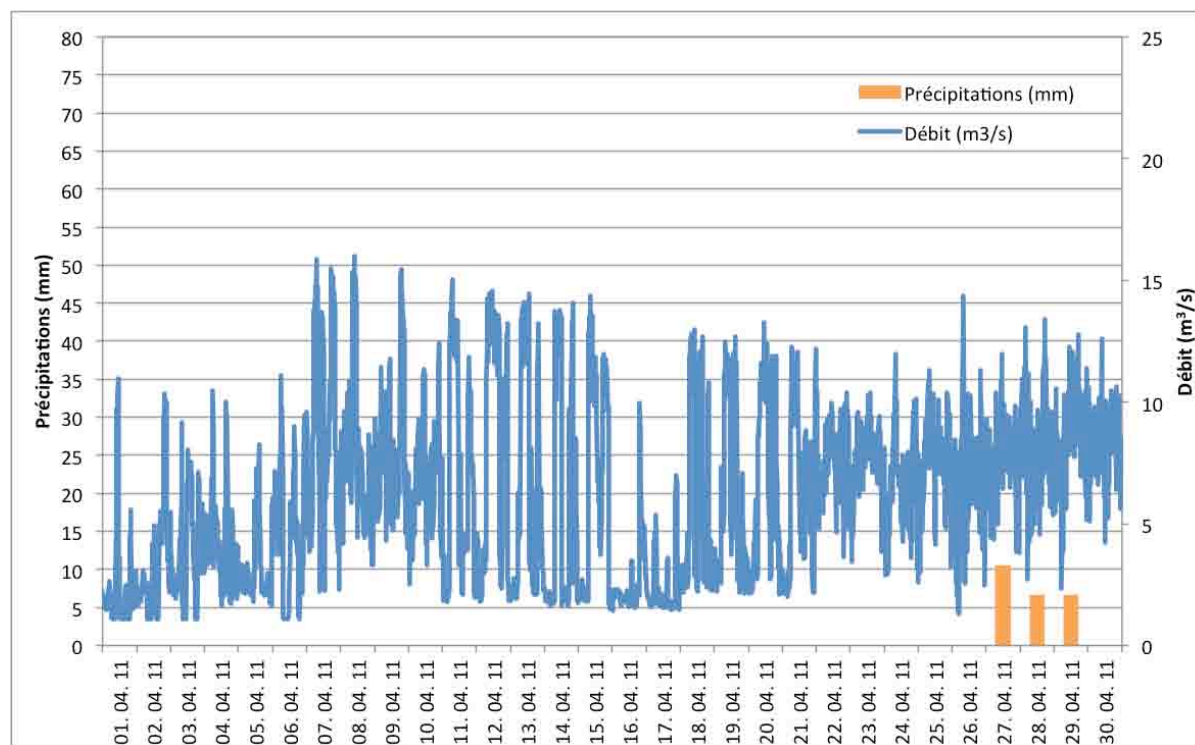


Figure 7.24 - Précipitations (mm/jour) et débits (m^3/s) de la Moesa à Cabbio en avril 2011. Les précipitations ont été enregistrées par la station de Mesocco (GR), localisée à 815 mètres d'altitude (737.900/139.450) (Fig. 5.11).

Le mois d'avril (Fig. 7.24 ; Tabl. 7.5) est caractérisé à nouveau par des variations bien marquées. Le rapport Q_{\max}/Q_{\min} maximal a été enregistré le 26 avril 2011, avec une valeur correspondant à $11.16 : 1$ et une différence du niveau d'eau de 0.31 m . Les valeurs HP_1 se situent entre 0.90 et $4.39 \text{ m}^3/\text{s}$. Le taux de changement HP_2 a des valeurs qui atteignent $11.36 \text{ m}^3/\text{s/h}$.

Date	Q _{max} (m ³ /s)	Q _{min} (m ³ /s)	Q _{max} /Q _{min}	Q _{mean}	HP ₁	HP ₂	N _{max} (m)	N _{min} (m)	ΔN (m)	P (mm/jour)
01.04.11	10.99	1.08	10.17	2.26	4.39	8.80	0.20	0.00	0.20	0
02.04.11	10.34	1.08	9.57	3.31	2.80	4.12	0.10	0.00	0.10	0
03.04.11	9.15	1.08	8.47	3.76	2.15	5.68	0.11	0.00	0.11	0
04.04.11	10.49	1.64	6.41	4.05	2.18	-6.88	0.14	0.00	0.14	0
05.04.11	8.25	1.62	5.09	3.07	2.16	1.63	0.10	0.00	0.10	0
06.04.11	11.09	1.08	10.26	4.54	2.20	-4.75	0.13	0.00	0.13	0
07.04.11	15.86	2.20	7.23	8.75	1.56	11.26	0.18	0.00	0.18	0
08.04.11	15.98	3.30	4.85	7.75	1.64	8.30	0.17	0.00	0.17	0
09.04.11	15.45	3.99	3.87	8.25	1.39	0.97	0.16	0.00	0.16	0
10.04.11	12.43	2.50	4.98	6.87	1.45	5.30	0.11	0.00	0.11	0
11.04.11	15.04	1.78	8.44	6.56	2.02	11.36	0.11	0.00	0.11	0
12.04.11	14.58	1.78	8.18	7.93	1.61	10.19	0.12	0.00	0.12	0
13.04.11	14.47	1.83	7.89	6.39	1.99	7.48	0.14	0.03	0.11	0
14.04.11	14.07	1.62	8.68	5.51	2.26	11.32	0.13	0.00	0.13	0
15.04.11	14.35	1.46	9.81	6.74	1.91	10.26	0.13	0.00	0.13	0
16.04.11	9.95	1.44	6.92	2.61	3.26	7.70	0.15	0.00	0.15	0
17.04.11	6.98	1.46	4.77	5.70	0.97	0.50	0.23	0.00	0.23	0
18.04.11	12.97	2.17	5.96	5.75	1.88	7.77	0.17	0.00	0.17	0
19.04.11	12.70	2.13	5.95	5.95	1.77	6.89	0.16	0.00	0.16	0
20.04.11	13.30	2.09	6.35	6.60	1.70	5.44	0.15	0.00	0.15	0
21.04.11	12.27	2.02	6.09	6.12	1.68	8.90	0.09	0.00	0.09	0
22.04.11	10.54	3.66	2.88	7.65	0.90	-0.72	0.20	0.00	0.20	0
23.04.11	10.39	3.43	3.03	7.53	0.92	1.43	0.21	0.00	0.21	0
24.04.11	11.96	2.90	4.12	6.53	1.39	2.90	0.10	0.00	0.10	0
25.04.11	11.29	2.61	4.32	7.40	1.17	0.45	0.22	0.00	0.22	0
26.04.11	14.35	1.29	11.16	6.45	2.03	5.43	0.31	0.00	0.31	0
27.04.11	11.96	3.81	3.14	7.62	1.07	-2.19	0.15	0.00	0.15	10.4
28.04.11	13.40	2.73	4.91	8.16	1.31	-1.12	0.13	0.00	0.13	6.4
29.04.11	12.75	2.36	5.39	8.56	1.21	-0.60	0.21	0.00	0.21	6.8
30.04.11	12.59	4.24	2.97	8.41	0.99	0.34	0.29	0.00	0.29	0

Tableau 7.5 - Résumé des valeurs enregistrées en avril 2011 à la station de Cabbio. Les variations hydrologiques sont marquées : le rapport Q_{\max}/Q_{\min} maximal est de 11.16 :1, l'indice HP_1 de 4.39 m³/s.

Station de mesure à Lostallo (GR)

La figure 7.25 présente les données recueillies en octobre par la sonde située à Lostallo (735.472/130.414). Nous pouvons observer une corrélation entre les précipitations et le débit. Le rapport Q_{\max}/Q_{\min} le plus important a été enregistré le 18 octobre 2010 (6.98 : 1), avec un changement du niveau d'eau de 0.37 m. Les valeurs HP_1 se situent entre 1.03 et 4.35 m³/s. Une faible discordance entre les rapports Q_{\max}/Q_{\min} et les valeurs HP_1 est remarquable. Le taux de changement maximal correspond à 8.39 m³/s/h (Tabl. 7.6).

En janvier (Fig. 7.26 ; Tabl. 7.7), nous pouvons lire une situation semblable à celle enregistrée à Cabbio : les oscillations des pics sont plus faibles, avec une valeur maximale de 4.20 : 1, le 25 janvier 2011 et un changement du niveau d'eau de 0.25 m. Les valeurs HP_1 sont faibles (valeur maximale de 2.31 m³/s). Le taux de changement maximal (HP_2) correspond à 3.79 m³/s/h

En avril (Fig. 7.27 ; Tabl. 7.8), la valeur Q_{\max}/Q_{\min} maximale est de 5.50 :1 et un changement de 0.31 m du niveau d'eau. La valeur HP_1 maximale est de 2.07 m³/s, enregistrée le 1^{er} avril 2011. Le taux de changement maximal (HP_2) correspond à 8.31 m³/s/h.

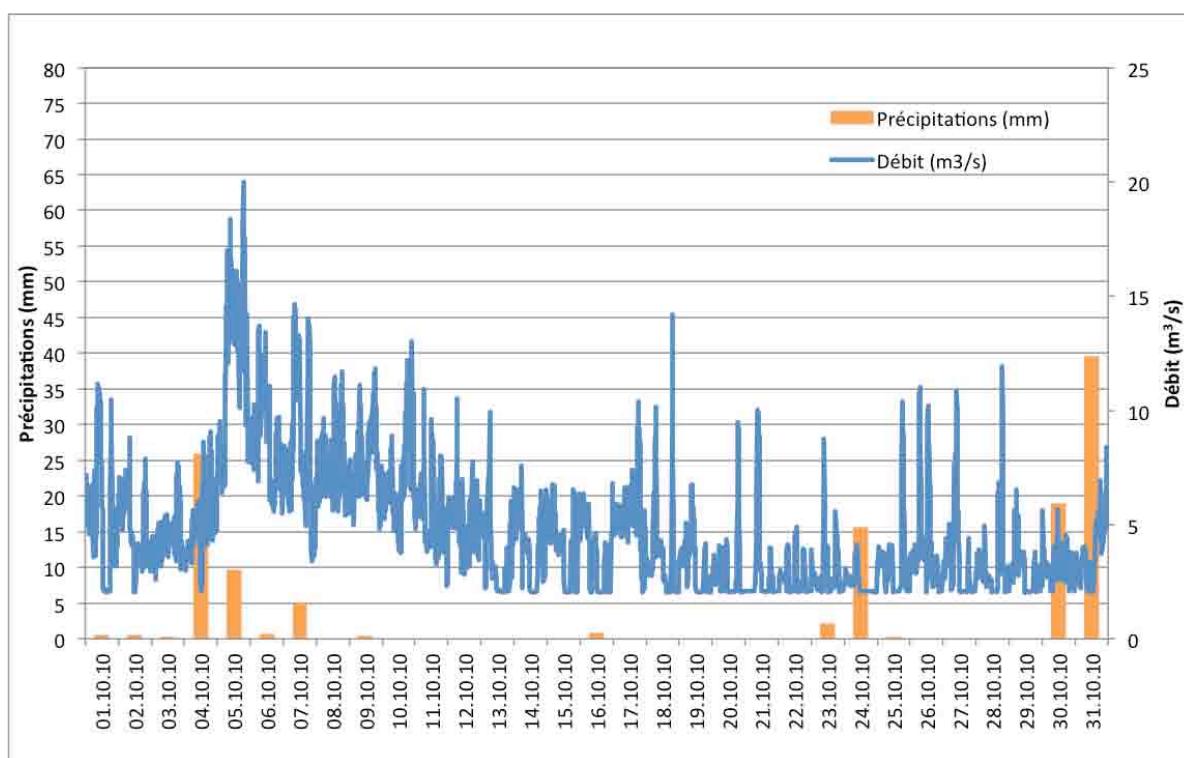


Figure 7.25 - Précipitations (mm/jour) et débits (m³/s) de la Moesa à Lostallo en octobre 2010. Les précipitations ont été enregistrées par la station de Mesocco (GR), localisée à 815 mètres d'altitude (737.900/139.450) (Fig. 5.11). Nous pouvons noter la présence d'une corrélation entre les précipitations du 4-5 octobre 2010 et la croissance du débit enregistrée le 5 octobre 2010.

Date	Qmax (m ³ /s)	Qmin (m ³ /s)	Qmax/Qmin	Qmean	HP ₁	HP ₂	Nmax (m)	Nmin (m)	ΔN (m)	P (mm/jour)
01.10.10	11.18	2.06	5.43	5.28	1.68	8.39	0.32	0.02	0.30	0.5
02.10.10	8.82	2.06	4.29	4.87	1.58	2.47	0.27	0.02	0.25	0
03.10.10	7.70	2.60	2.96	4.39	1.72	4.28	0.24	0.06	0.18	0.1
04.10.10	9.08	2.06	4.41	4.95	1.59	5.58	0.27	0.02	0.26	25.8
05.10.10	19.99	6.40	3.12	12.03	4.35	1.82	0.48	0.21	0.27	9.6
06.10.10	13.67	5.48	2.50	8.79	3.28	-1.17	0.37	0.18	0.19	0.6
07.10.10	14.66	3.39	4.32	8.12	2.61	5.61	0.39	0.11	0.28	5
08.10.10	11.70	5.41	2.16	7.67	2.91	0.52	0.33	0.18	0.15	0
09.10.10	11.85	4.82	2.46	7.61	2.86	1.31	0.33	0.16	0.17	0.3
10.10.10	13.04	3.75	3.48	6.97	2.67	-3.43	0.36	0.12	0.24	0
11.10.10	10.92	2.30	4.76	5.41	1.81	4.62	0.31	0.04	0.27	0
12.10.10	10.54	2.79	3.78	5.08	2.05	4.30	0.31	0.08	0.23	0
13.10.10	9.93	2.05	4.86	3.66	1.62	-6.69	0.29	0.01	0.28	0
14.10.10	7.58	2.04	3.71	4.04	1.49	-3.40	0.24	0.01	0.23	0
15.10.10	6.77	2.04	3.33	3.89	1.42	-3.97	0.22	0.01	0.21	0
16.10.10	6.81	2.04	3.34	3.61	1.43	-3.81	0.22	0.01	0.21	0.8
17.10.10	10.40	2.04	5.11	5.44	1.64	3.67	0.30	0.01	0.29	0
18.10.10	14.22	2.04	6.98	3.53	1.74	3.20	0.38	0.01	0.37	0
19.10.10	6.77	2.03	3.33	3.21	1.42	1.18	0.22	0.01	0.21	0
20.10.10	9.48	2.03	4.67	2.94	1.60	6.44	0.28	0.01	0.27	0
21.10.10	10.03	2.05	4.90	2.90	1.63	7.62	0.30	0.01	0.28	0
22.10.10	4.91	2.05	2.39	2.62	1.19	2.32	0.16	0.02	0.15	0
23.10.10	6.74	2.03	4.30	2.96	1.56	-0.03	0.27	0.01	0.26	2
24.10.10	4.14	2.04	2.03	2.42	1.03	0.82	0.14	0.01	0.12	15.6
25.10.10	10.40	2.04	5.10	3.24	1.64	5.46	0.30	0.01	0.29	0.1
26.10.10	11.02	2.04	5.41	3.89	1.66	6.15	0.32	0.01	0.30	0
27.10.10	10.93	2.05	5.29	3.47	1.66	3.82	0.31	0.01	0.30	0
28.10.10	11.91	2.04	5.85	3.33	1.69	8.91	0.33	0.01	0.32	0
29.10.10	6.55	2.02	3.25	2.95	1.40	-1.20	0.21	0.01	0.20	0
30.10.10	5.67	2.05	2.77	3.17	1.31	1.96	0.19	0.02	0.17	18.9
31.10.10	8.40	2.03	4.14	3.81	1.54	1.07	0.26	0.01	0.25	39.5

Tableau 7.6 - Résumé des valeurs enregistrées en octobre 2011 à la station de Lostallo. La valeur maximale du facteur Q_{max}/Q_{min} correspond à 6.98 : 1. La valeur maximale de l'indice HP_1 est de 4.35 m³/s.

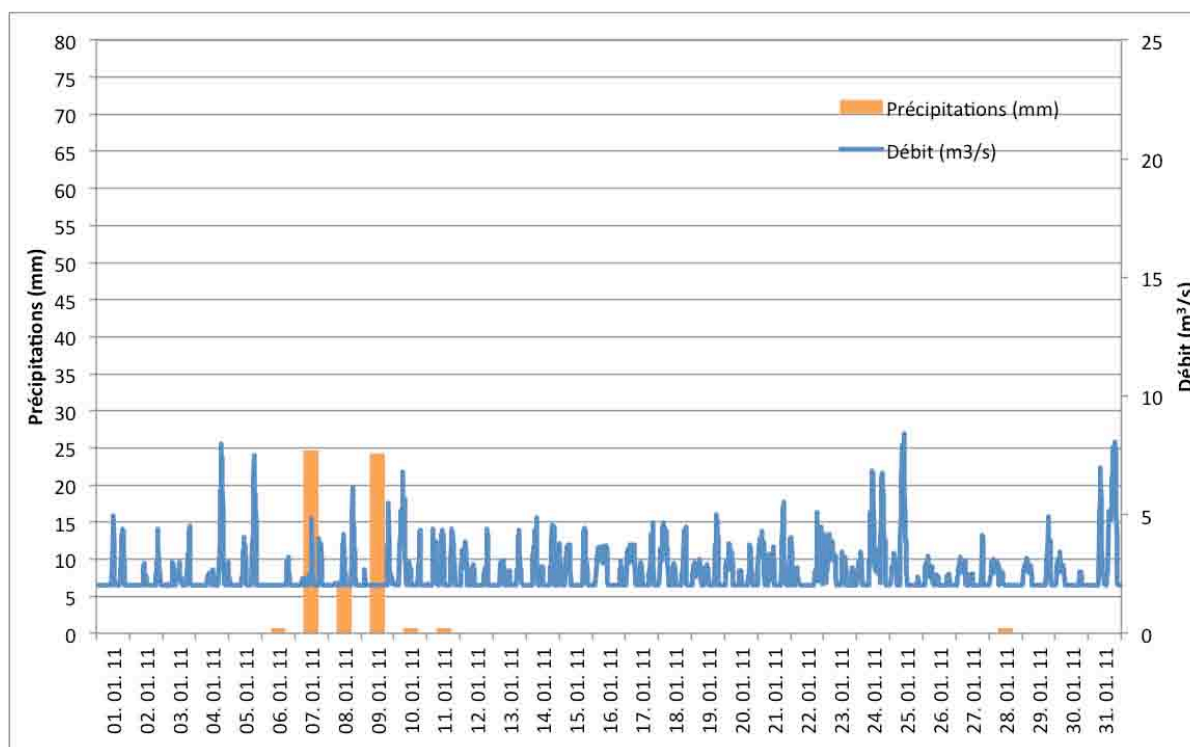


Figure 7.26 - Précipitations (mm/jour) et débits (m³/s) de la Moesa à Lostallo en janvier 2011. Les précipitations ont été enregistrées par la station de Mesocco (GR), localisée à 815 mètres d'altitude (737.900/139.450) (Fig. 5.11).

Date	Qmax (m ³ /s)	Qmin (m ³ /s)	Qmax/Qmin	Qmean	HP ₁	HP ₂	Nmax (m)	Nmin (m)	ΔN (m)	P (mm/jour)
01.01.11	4.94	2.01	2.46	2.36	1.24	1.96	0.16	0.00	0.16	0
02.01.11	4.41	2.02	2.19	2.20	1.09	0.22	0.15	0.01	0.14	0
03.01.11	4.52	2.00	2.26	2.28	1.11	0.77	0.15	0.00	0.15	0
04.01.11	7.98	2.01	3.97	2.58	2.31	3.78	0.25	0.01	0.24	0
05.01.11	7.50	2.01	3.73	2.61	2.11	2.04	0.24	0.01	0.23	0
06.01.11	3.22	2.01	1.60	2.10	0.58	0.15	0.10	0.01	0.09	0.6
07.01.11	4.82	2.02	2.39	2.30	1.22	1.62	0.16	0.01	0.15	24.5
08.01.11	6.16	2.00	3.07	2.39	1.74	1.81	0.20	0.00	0.20	6.0
09.01.11	5.48	2.01	2.72	2.19	1.58	3.46	0.18	0.01	0.17	24.2
10.01.11	6.81	2.00	3.40	2.70	1.78	3.05	0.22	0.00	0.22	0.6
11.01.11	4.38	2.01	2.18	2.60	0.91	2.01	0.14	0.00	0.14	0.6
12.01.11	4.41	2.00	2.20	2.40	1.00	1.10	0.15	0.00	0.14	0
13.01.11	4.33	2.01	2.15	2.29	1.01	-0.14	0.14	0.01	0.14	0
14.01.11	4.88	2.00	2.43	2.57	1.12	-1.84	0.16	0.00	0.16	0
15.01.11	4.44	2.01	2.21	2.46	0.99	-0.75	0.15	0.00	0.14	0
16.01.11	3.68	2.00	1.83	2.50	0.67	0.12	0.12	0.00	0.11	0
17.01.11	4.64	2.00	2.32	2.63	1.00	1.37	0.15	0.00	0.15	0
18.01.11	4.64	2.00	2.32	2.73	0.97	-1.53	0.15	0.00	0.15	0
19.01.11	5.00	2.00	2.50	2.48	1.21	-2.68	0.17	0.00	0.16	0
20.01.11	3.80	2.00	1.90	2.40	0.75	1.29	0.12	0.00	0.12	0
21.01.11	5.54	2.00	2.77	2.74	1.29	1.07	0.18	0.00	0.18	0
22.01.11	5.09	2.00	2.54	2.40	1.29	2.52	0.17	0.00	0.17	0
23.01.11	4.22	2.01	2.10	2.63	0.84	0.50	0.14	0.00	0.13	0
24.01.11	6.85	2.01	3.41	3.21	1.51	1.61	0.22	0.00	0.22	0
25.01.11	8.44	2.01	4.20	2.95	2.18	2.69	0.26	0.01	0.25	0
26.01.11	3.26	2.00	1.63	2.26	0.56	-0.39	0.10	0.00	0.10	0
27.01.11	4.14	2.01	2.06	2.32	0.92	1.18	0.14	0.00	0.13	0
28.01.11	3.14	2.02	1.55	2.27	0.49	-0.27	0.09	0.01	0.08	0
29.01.11	4.91	2.01	2.45	2.44	1.19	2.79	0.16	0.00	0.16	0.6
30.01.11	3.42	2.01	1.70	2.24	0.63	-0.56	0.11	0.00	0.10	0
31.01.11	8.06	2.01	4.02	3.40	1.78	3.79	0.25	0.00	0.25	0

Tableau 7.7 - Résumé des valeurs enregistrées en janvier 2011 à la station de Lostallo. Les valeurs du rapport Q_{max}/Q_{min} se situent entre 1.55 : 1 et 4.20 : 1. L'indice HP_1 présente des valeurs comprises entre 0.49 et 2.31 m³/s.

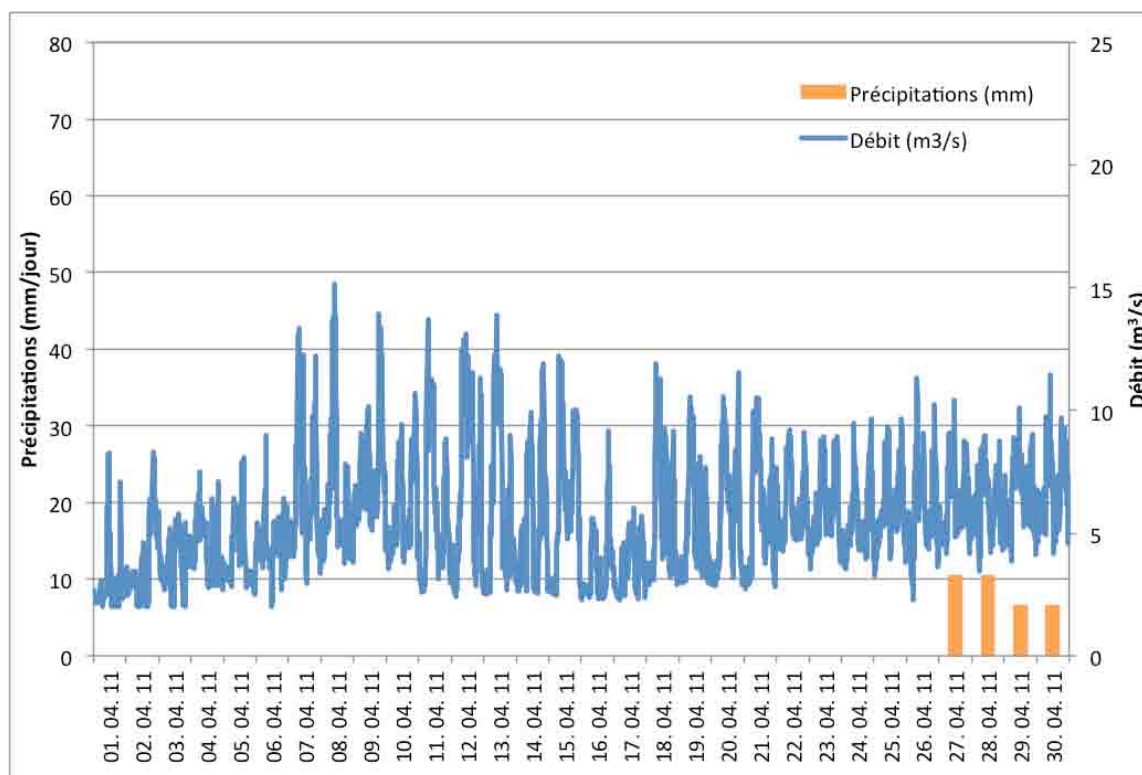


Figure 7.27 - Précipitations (mm/jour) et débits (m^3/s) de la Moesa à Lostallo en avril 2011. Les précipitations ont été enregistrées par la station de Mesocco (GR), localisée à 815 mètres d'altitude (737.900/139.450) (Fig. 5.11).

Date	Qmax (m^3/s)	Qmin (m^3/s)	Qmax/Qmin	Qmean	HP ₁	HP ₂	Nmax (m)	Nmin (m)	ΔN (m)	P (mm/jour)
01.04.11	8.27	2.00	4.14	3.03	2.07	2.84	0.26	0.00	0.26	0
02.04.11	8.31	2.00	4.16	3.76	1.68	1.58	0.26	0.00	0.26	0
03.04.11	5.88	2.00	2.93	3.77	1.03	0.80	0.19	0.00	0.19	0
04.04.11	7.50	2.67	2.81	4.53	1.07	0.84	0.24	0.07	0.17	0
05.04.11	8.10	2.50	3.25	4.15	1.35	1.51	0.25	0.06	0.19	0
06.04.11	9.00	2.01	4.49	4.52	1.55	-4.61	0.27	0.00	0.27	0
07.04.11	13.35	2.96	4.52	6.74	1.54	-2.36	0.36	0.08	0.28	0
08.04.11	15.16	3.77	4.02	6.36	1.79	6.26	0.40	0.12	0.27	0
09.04.11	13.94	4.33	3.22	7.47	1.29	0.71	0.37	0.14	0.23	0
10.04.11	10.68	3.56	3.00	5.94	1.20	1.19	0.31	0.11	0.20	0
11.04.11	13.73	2.60	5.27	6.07	1.83	8.31	0.37	0.06	0.31	0
12.04.11	13.14	2.42	5.42	6.95	1.54	2.01	0.36	0.05	0.31	0
13.04.11	13.89	2.53	5.50	6.09	1.87	2.79	0.37	0.06	0.31	0
14.04.11	11.91	2.57	4.63	5.38	1.74	0.80	0.33	0.06	0.27	0
15.04.11	12.21	2.36	5.18	6.26	1.57	6.87	0.34	0.05	0.29	0
16.04.11	9.17	2.27	4.04	3.70	1.87	3.07	0.28	0.04	0.24	0
17.04.11	6.02	2.26	2.66	3.70	1.01	2.17	0.20	0.04	0.16	0
18.04.11	11.91	2.90	4.11	5.54	1.63	3.01	0.33	0.08	0.25	0
19.04.11	10.54	2.92	3.61	5.41	1.41	3.19	0.31	0.08	0.22	0
20.04.11	11.56	2.84	4.06	5.76	1.51	1.44	0.33	0.08	0.25	0
21.04.11	10.49	2.74	3.83	5.72	1.36	2.37	0.31	0.07	0.23	0
22.04.11	9.21	4.14	2.23	6.01	0.85	1.39	0.28	0.14	0.14	0
23.04.11	8.95	3.53	2.53	6.10	0.89	2.74	0.27	0.11	0.16	0
24.04.11	9.66	3.51	2.75	5.51	1.12	0.59	0.29	0.11	0.18	0
25.04.11	9.66	3.28	2.94	5.93	1.08	2.03	0.29	0.10	0.19	0
26.04.11	11.31	2.27	4.98	6.02	1.50	2.60	0.32	0.04	0.28	0
27.04.11	10.45	4.16	2.51	6.31	1.00	0.92	0.30	0.14	0.17	10.4
28.04.11	9.00	3.46	2.60	6.25	0.89	0.13	0.27	0.11	0.16	6.4
29.04.11	10.12	3.87	2.61	6.71	0.93	-1.15	0.30	0.13	0.17	6.6
30.04.11	11.46	4.19	2.74	6.75	1.08	2.13	0.33	0.14	0.19	0

Tableau 7.8 - Résumé des valeurs enregistrées en avril 2011 à la station de Lostallo. Les valeurs du rapport Q_{max}/Q_{min} se situent entre 2.23 : 1 et 5.50 : 1. L'indice HP₁ présente des valeurs comprises entre 0.85 et 2.07 m^3/s .

Station de mesure de Lumino/Sassello (TI)

La figure 7.28 montre les valeurs de précipitations et de débit enregistrées pendant le mois d'octobre 2010 par la station de Lumino/Sassello (724.765/120.360). Les valeurs des pluies ont été récoltées par la station de mesure de Bellinzona (721.060/116.800) (TI) (Fig. 5.11). Nous pouvons souligner la présence de deux événements pluvieux importants, avec des valeurs qui atteignent 39.7 mm/jour, au début du mois, et 70 mm/jour pendant la dernière semaine (Fig. 7.28 et Tabl. 7.9). En lien avec ces deux phénomènes, le débit de la Moesa atteint des valeurs maximales de 60.81 m³/s le 5 octobre 2010 et de 47.02 m³/s le 31 octobre 2010.

Le rapport Q_{\max}/Q_{\min} (Tabl. 7.9), est faible, avec des valeurs qui se situent entre 1.64 : 1 et 6.93 : 1. Il est de même pour les valeurs HP_1 , assez faibles, situées entre 0.53 et 2.41 m³/s. Le niveau d'eau subit des variations minimales de 0.11 m et maximales de 0.68 m. La valeur maximale du taux de changement (HP_2), entre débit plancher et débit d'écluse, est de 7.79 m³/s/h.

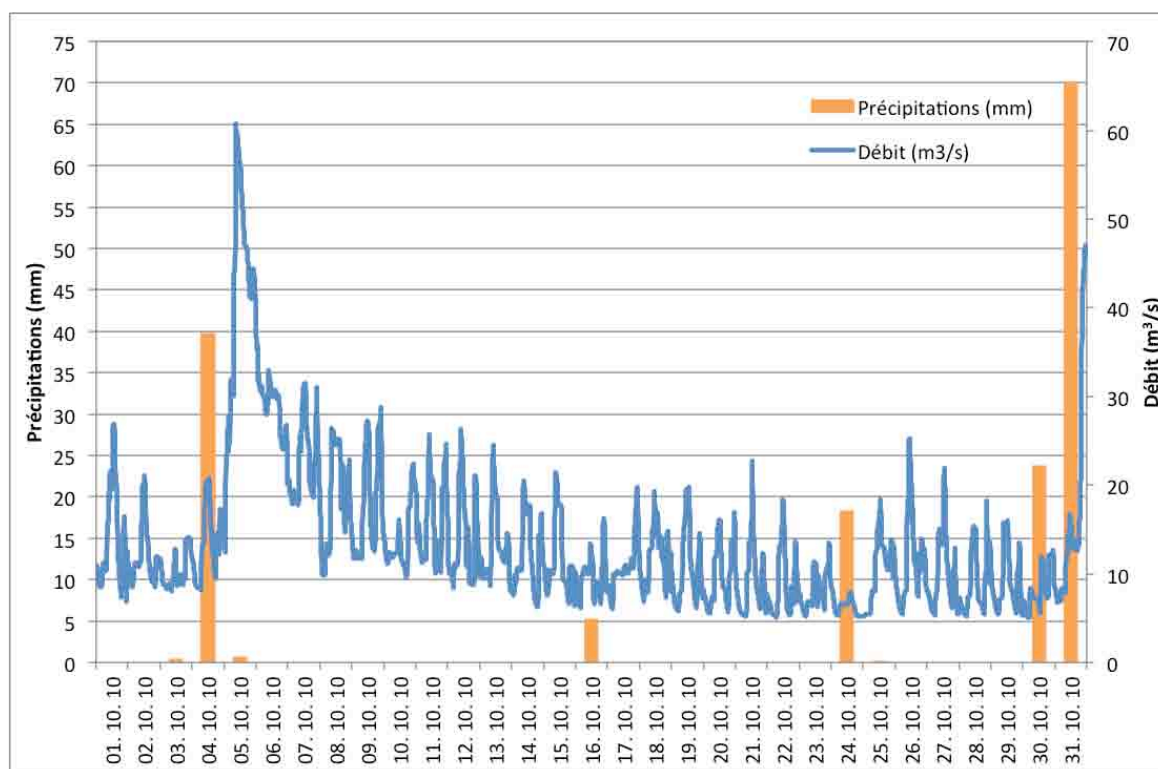


Figure 7.28 - Précipitations (mm/jour) et débits (m³/s) de la Moesa à Lumino/Sassello. Les précipitations ont été enregistrées par la station de Bellinzona (TI), localisée à 225 mètres d'altitude (721.060/116.800) (Fig. 5.11). Nous pouvons souligner la présence de deux événements pluvieux importants (04.10.2011 et 30-31.10.2011), qui expliquent les valeurs maximales du débit de la Moesa.

Date	Qmax (m ³ /s)	Qmin (m ³ /s)	Qmax/Qmin	Qmean	HP ₁	HP ₂	Nmax (m.s.n.m)	Nmin (m.s.n.m)	ΔN (m)	P (mm/jour)
01.10.10	27.04	6.86	3.94	13.91	1.45	3.24	240.03	239.58	0.44	0
02.10.10	21.07	8.50	2.48	11.87	1.05	3.14	239.93	239.64	0.30	0
03.10.10	14.18	7.99	1.77	10.29	0.60	0.88	239.79	239.62	0.17	0.4
04.10.10	20.84	8.16	2.55	13.47	0.94	2.88	239.93	239.63	0.30	39.7
05.10.10	60.81	12.44	4.89	41.23	1.17	7.79	240.40	239.75	0.65	0.6
06.10.10	37.76	20.13	1.88	29.22	0.60	1.79	240.17	239.92	0.25	0
07.10.10	31.54	17.80	1.77	22.85	0.60	3.57	240.09	239.87	0.22	0
08.10.10	28.37	9.71	2.71	18.35	0.91	4.52	240.02	239.67	0.34	0
09.10.10	28.74	11.70	2.46	17.82	0.96	4.26	240.05	239.73	0.32	0
10.10.10	22.33	9.61	2.32	13.91	0.91	2.77	239.95	239.67	0.28	0
11.10.10	25.77	9.98	2.58	16.16	0.98	5.87	240.01	239.68	0.33	0
12.10.10	26.25	8.40	3.13	13.94	1.28	6.52	240.02	239.63	0.38	0
13.10.10	24.52	8.05	3.05	13.01	1.27	7.77	239.99	239.62	0.37	0
14.10.10	20.53	6.25	3.29	12.19	1.17	3.04	239.92	239.56	0.36	0
15.10.10	21.47	6.44	3.33	11.56	1.30	3.80	239.94	239.57	0.37	0
16.10.10	16.19	6.11	2.65	9.88	1.04	-0.06	239.84	239.56	0.28	5.2
17.10.10	19.82	6.03	3.29	10.80	1.28	3.91	239.91	239.56	0.35	0
18.10.10	19.41	6.90	2.81	11.72	1.07	1.07	239.90	239.59	0.32	0
19.10.10	19.82	5.78	3.43	10.62	1.32	3.68	239.91	239.55	0.36	0
20.10.10	16.97	5.55	3.06	9.60	1.19	2.79	239.86	239.54	0.32	0
21.10.10	22.76	5.25	4.33	9.14	1.92	2.95	239.96	239.53	0.43	0
22.10.10	18.37	5.13	3.58	8.81	1.50	2.88	239.88	239.52	0.36	0
23.10.10	13.65	5.15	2.65	8.14	1.04	1.36	239.78	239.53	0.26	0
24.10.10	8.58	5.21	1.64	6.37	0.53	0.73	239.64	239.53	0.11	18.3
25.10.10	18.34	5.28	3.49	10.43	1.25	2.19	239.88	239.53	0.35	0.1
26.10.10	25.29	5.45	4.64	11.51	1.72	5.13	240.00	239.54	0.47	0
27.10.10	21.87	5.39	4.06	9.90	1.66	3.27	239.95	239.53	0.41	0
28.10.10	18.21	5.19	3.51	8.97	1.45	3.18	239.88	239.53	0.35	0
29.10.10	16.02	5.20	3.08	9.10	1.19	4.21	239.84	239.53	0.31	0
30.10.10	12.73	5.03	2.53	8.18	0.94	2.96	239.76	239.52	0.24	23.8
31.10.10	47.02	6.78	6.93	16.69	2.41	3.38	240.27	239.58	0.68	70

Tableau 7.9 - Résumé des valeurs enregistrées en octobre 2010 à la station de Lumino/Sassello (TI). Le rapport entre le débit d'éclusee et le débit plancher se situe entre 1.64 : 1et 6.93 : 1 ; les valeurs de l'indice HP₁ atteignent 2.41 m³/s.

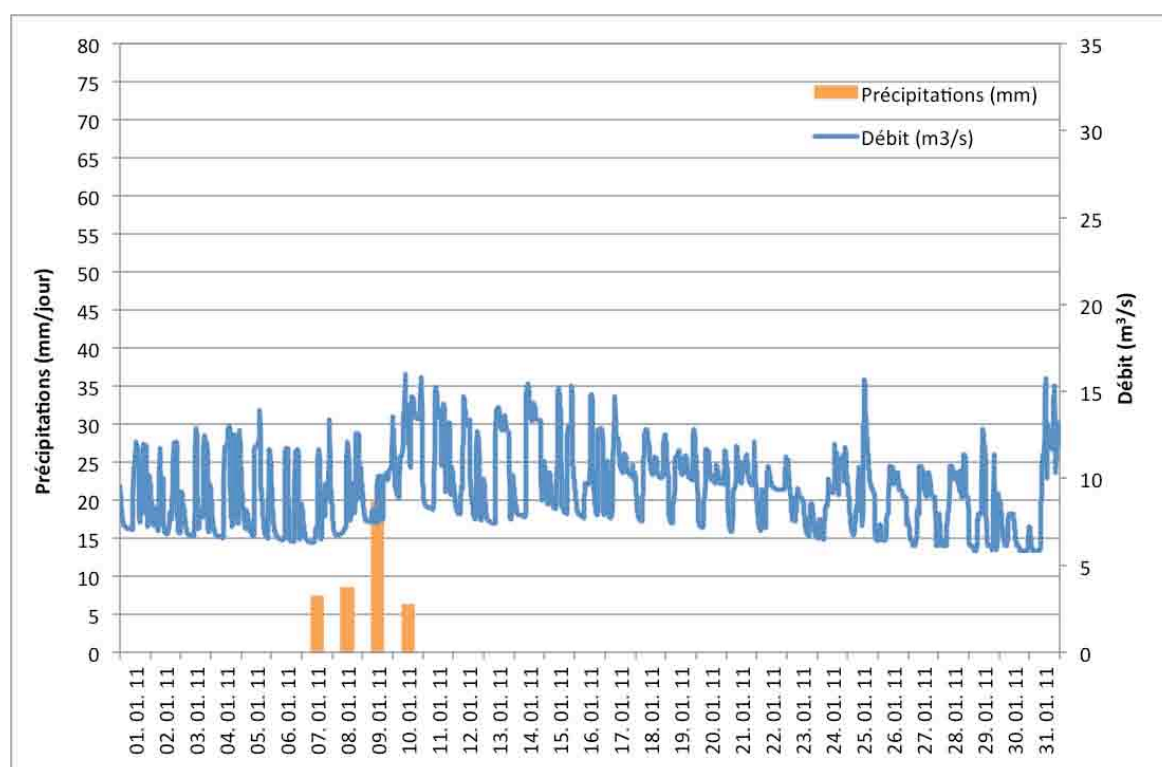


Figure 7.29 - Précipitations (mm/jour) et débits (m³/s) de la Moesa à Lumino/Sassello. Les précipitations ont été enregistrées par la station de Bellinzona (TI), localisée à 225 mètres d'altitude (721.060/116.800) (Fig. 5.11). La station de mesure de Bellinzona n'a pas enregistré d'événements pluviométriques ayant eu un impact important sur le débit de la Moesa.

Date	Q _{max} (m ³ /s)	Q _{min} (m ³ /s)	Q _{max} /Q _{min}	Q _{mean}	HP ₁	HP ₂	N _{max} (m.s.n.m)	N _{min} (m.s.n.m)	ΔN (m)	P (mm/jour)
01.01.11	12.12	7.05	1.72	9.10	0.56	1.67	239.74	239.59	0.15	0
02.01.11	12.09	6.80	1.78	8.47	0.62	2.15	239.74	239.58	0.16	0
03.01.11	12.91	6.62	1.95	8.51	0.74	1.88	239.76	239.58	0.19	0
04.01.11	13.01	6.59	1.98	9.24	0.69	2.91	239.77	239.58	0.19	0
05.01.11	13.94	6.54	2.13	8.84	0.84	1.02	239.79	239.57	0.21	0
06.01.11	11.73	6.35	1.85	8.05	0.67	2.57	239.73	239.57	0.16	0
07.01.11	13.35	6.29	2.12	8.00	0.88	2.22	239.77	239.57	0.21	7.4
08.01.11	12.56	6.71	1.87	8.72	0.67	2.49	239.75	239.58	0.17	8.5
09.01.11	13.57	7.40	1.83	8.89	0.69	1.30	239.78	239.60	0.18	19.8
10.01.11	15.99	8.87	1.80	12.49	0.57	1.00	239.84	239.65	0.19	6.3
11.01.11	15.24	8.21	1.86	10.91	0.64	3.50	239.82	239.63	0.19	0
12.01.11	14.68	7.58	1.94	10.03	0.71	1.74	239.81	239.61	0.20	0
13.01.11	14.13	7.35	1.92	10.44	0.65	3.25	239.79	239.60	0.19	0
14.01.11	15.50	7.79	1.99	11.25	0.69	3.70	239.83	239.61	0.21	0
15.01.11	15.29	7.96	1.92	10.38	0.71	2.29	239.82	239.62	0.20	0
16.01.11	14.88	7.73	1.92	9.90	0.72	2.59	239.81	239.61	0.20	0
17.01.11	14.74	7.70	1.91	10.51	0.67	2.25	239.81	239.61	0.20	0
18.01.11	12.87	7.55	1.71	10.39	0.51	2.41	239.76	239.61	0.16	0
19.01.11	12.88	7.39	1.74	10.29	0.53	2.31	239.76	239.60	0.16	0
20.01.11	11.69	7.20	1.62	9.75	0.46	2.18	239.73	239.60	0.13	0
21.01.11	12.07	6.92	1.75	9.78	0.53	-0.79	239.74	239.59	0.15	0
22.01.11	11.23	6.94	1.62	9.16	0.47	0.19	239.72	239.59	0.13	0
23.01.11	11.04	6.56	1.68	8.24	0.54	-0.67	239.71	239.57	0.14	0
24.01.11	11.98	6.50	1.84	9.30	0.59	0.55	239.74	239.57	0.16	0
25.01.11	15.72	6.44	2.44	9.28	1.00	3.89	239.83	239.57	0.26	0
26.01.11	10.66	6.38	1.67	8.62	0.50	1.33	239.70	239.57	0.13	0
27.01.11	10.66	6.14	1.74	8.38	0.54	1.26	239.70	239.56	0.14	0
28.01.11	11.37	6.14	1.85	8.86	0.59	1.34	239.72	239.56	0.16	0
29.01.11	12.82	5.85	2.19	7.51	0.93	2.42	239.76	239.55	0.21	0
30.01.11	8.96	5.85	1.53	6.75	0.46	-0.89	239.65	239.55	0.10	0
31.01.11	15.75	5.85	2.69	9.92	1.00	2.51	239.83	239.55	0.28	0

Tableau 7.10 - Résumé des valeurs enregistrées en janvier 2011 à la station de Lumino/Sassello. La valeur maximale du rapport Q_{max}/Q_{min} est assez faible (2.69 : 1). Au contraire, les valeurs de l'indice HP_1 se situent entre 2.03 et 3.95 m³/s.

Le mois de janvier (Fig. 7.29 ; Tabl. 7.10), caractérisé par des précipitations faibles, les variations de débit se situent entre 5.85 m³/s (Q_{min}) et 15.75 m³/s (Q_{max}). Le rapport Q_{max}/Q_{min} est assez faible, avec une valeur maximale de 2.69 : 1, enregistrée le 31 janvier 2011. Le changement du niveau d'eau est également peu important, avec des différences du niveau qui se situent entre 0.10 m et 0.28 m. Les valeurs HP_1 sont faibles, situés entre 0.46 et 1 m³/s. Le taux de changement du débit (HP_2) maximal est de 3.89 m³/s/h.

Le mois d'avril (Fig. 7.30 ; Tabl. 7.11), caractérisé par des événements arrosés faibles, indique que le rapport Q_{max}/Q_{min} a des valeurs comprises entre 1.55 : 1 et 3.10 : 1. Le changement le plus important du niveau de l'eau équivaut à 0.32 m, enregistré le 15 avril 2011. Les valeurs HP_1 sont situées entre 0.44 et 1.45 m³/s. Le taux de changement du débit (HP_2) est assez faible, avec des valeurs maximales de 4.97 m³/s/h.

La figure 7.30, indique également une différence entre le comportement hydrique de la première semaine et des trois dernières, avec une croissance générale du débit.

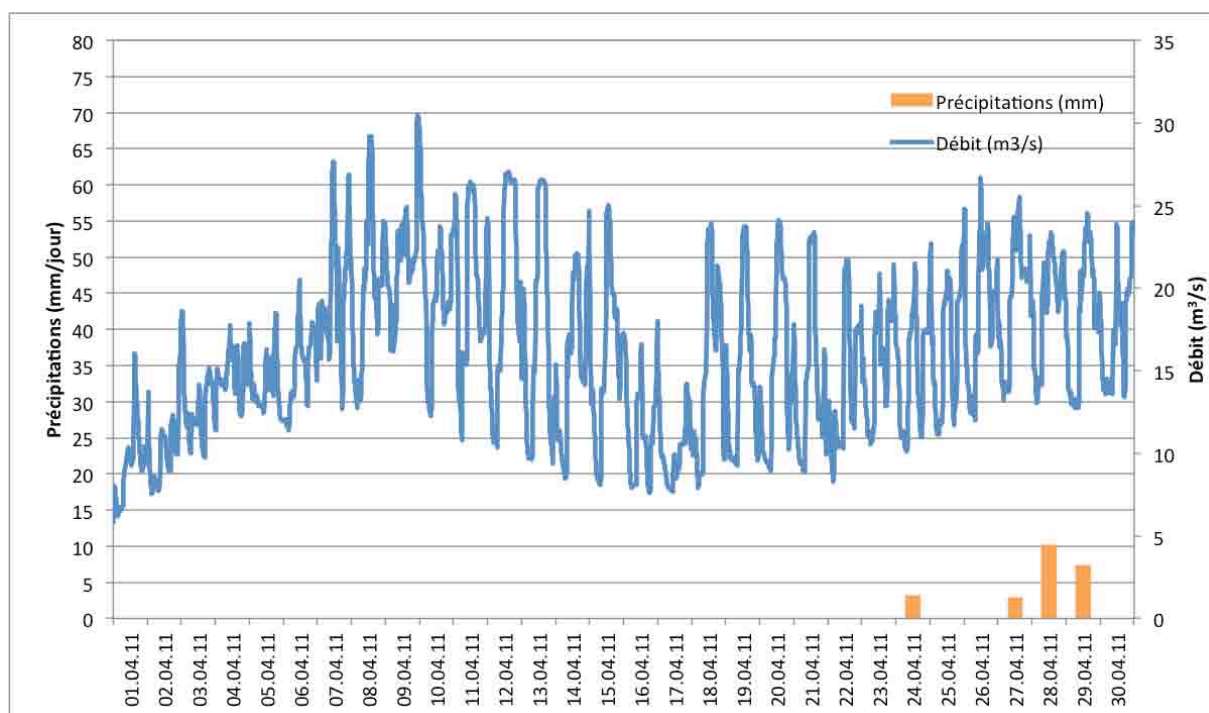


Figure 7.30 - Précipitations (mm/jour) et débits (m^3/s) de la Moesa à Lumino/Sassello. Les précipitations ont été enregistrées par la station de Bellinzona (TI), localisée à 225 mètres d'altitude (721.060/116.800) (Fig. 5.11). Une différence hydrologique entre la première semaine et les trois dernières est visible.

Date	Qmax (m^3/s)	Qmin (m^3/s)	Qmax/Qmin	Qmean	HP ₁	HP ₂	Nmax (m.s.n.m)	Nmin (m.s.n.m)	ΔN (m)	P (mm/jour)
01.04.11	16.03	5.83	2.75	9.35	1.09	0.52	239.84	239.60	0.24	0
02.04.11	18.03	7.51	2.40	10.29	1.02	1.84	239.87	239.65	0.22	0
03.04.11	18.59	9.74	1.91	12.85	0.69	1.91	239.88	239.71	0.18	0
04.04.11	17.76	11.34	1.57	14.76	0.44	0.79	239.87	239.75	0.12	0
05.04.11	18.52	11.94	1.55	14.16	0.47	-0.28	239.88	239.76	0.12	0
06.04.11	20.52	11.42	1.80	15.15	0.60	2.00	239.91	239.75	0.17	0
07.04.11	27.67	12.68	2.18	20.10	0.75	3.07	240.02	239.77	0.25	0
08.04.11	29.18	12.77	2.29	12.77	1.29	2.98	240.04	239.78	0.26	0
09.04.11	30.51	16.16	1.89	16.16	0.89	1.07	240.06	239.84	0.22	0
10.04.11	29.12	12.25	2.38	12.25	1.38	3.39	240.04	239.76	0.27	0
11.04.11	26.46	10.80	2.45	10.80	1.45	4.97	240.00	239.73	0.27	0
12.04.11	27.07	10.36	2.61	19.80	0.84	1.43	240.01	239.72	0.29	0
13.04.11	26.59	9.40	2.83	17.00	1.01	3.63	240.01	239.70	0.31	0
14.04.11	24.68	8.48	2.91	15.65	1.04	1.89	239.98	239.68	0.30	0
15.04.11	25.04	8.08	3.10	15.93	1.06	1.84	239.98	239.67	0.32	0
16.04.11	18.01	7.59	2.37	11.45	0.91	2.76	239.87	239.65	0.22	0
17.04.11	16.02	7.66	2.09	10.23	0.82	1.19	239.84	239.66	0.18	0
18.04.11	23.92	7.93	3.02	15.20	1.05	2.25	239.97	239.66	0.30	0
19.04.11	23.74	9.23	2.57	14.58	1.00	3.39	239.96	239.70	0.27	0
20.04.11	24.13	8.92	2.71	15.27	1.00	2.68	239.97	239.69	0.28	0
21.04.11	23.40	8.88	2.64	15.39	0.94	2.36	239.96	239.69	0.27	0
22.04.11	21.75	8.28	2.63	14.27	0.94	5.47	239.93	239.67	0.26	0
23.04.11	21.42	10.55	2.03	15.42	0.71	3.48	239.93	239.73	0.20	0
24.04.11	21.50	10.08	2.13	15.00	0.78	3.32	239.93	239.72	0.21	3.1
25.04.11	23.24	11.13	2.09	16.71	0.72	3.72	239.96	239.74	0.22	0
26.04.11	26.68	12.03	2.22	18.64	0.79	1.00	240.01	239.76	0.25	0
27.04.11	25.50	13.22	1.93	19.40	0.63	1.30	239.99	239.78	0.21	2.8
28.04.11	23.45	13.02	1.80	19.12	0.55	-1.22	239.96	239.78	0.18	10.1
29.04.11	24.54	12.70	1.93	18.14	0.65	3.42	239.99	239.77	0.20	7.3
30.04.11	23.97	13.39	1.79	17.39	0.61	1.40	239.97	239.79	0.18	0

Tableau 7.11 - Résumé des valeurs enregistrées en avril 2011 à la station de Lumino/Sassello. Les valeurs Q_{max}/Q_{min} se situent entre 1.55 : 1 et 3.10 : 1, l'indice HP_1 montre des valeurs comprises entre 0.44 et 1.45 m^3/s .

7.2.2 La Morobbia

La station hydrologique située à Giubiasco a permis de recueillir une quantité de données très satisfaisante, concernant le débit, le niveau de l'eau et la température.

Les valeurs du débit du mois d'octobre (Fig. 7.31 ; Tabl. 7.12) montrent des fluctuations journalières régulières. De manière générale, les valeurs atteignent $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant les heures nocturnes, pour atteindre $5 \text{ m}^3/\text{s}$ aux premières heures du matin et pendant toute la matinée. Le taux d'accroissement du débit (HP_2) maximal est assez élevé et a été calculé avec un intervalle de 20 minutes, à cause de la proximité du point de déversement des eaux.

Le débit présente des valeurs proches de $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant les premières heures de l'après-midi jusqu'au jour suivant. Certaines exceptions peuvent être remarquées : les 2 et 3 octobre (samedi, dimanche), le débit avait des valeurs assez constantes ($0.2 \text{ m}^3/\text{s}$). Une situation semblable, avec des valeurs similaires, se répète les 16 et 17 (samedi et dimanche), le jeudi 21 et le dimanche 24 octobre. Nous pouvons également souligner que, pendant la nuit du 5 octobre, le débit de la Morobbia a atteint $7 \text{ m}^3/\text{s}$ et le 31 octobre, le débit a atteint la valeur maximale de $16 \text{ m}^3/\text{s}$. Il faut noter que des précipitations importantes ont eu lieu le 4 et le 31 octobre 2011. Une correspondance entre les pluies et la réponse du cours d'eau peut être remarquée le 5 et le 31 octobre 2011.

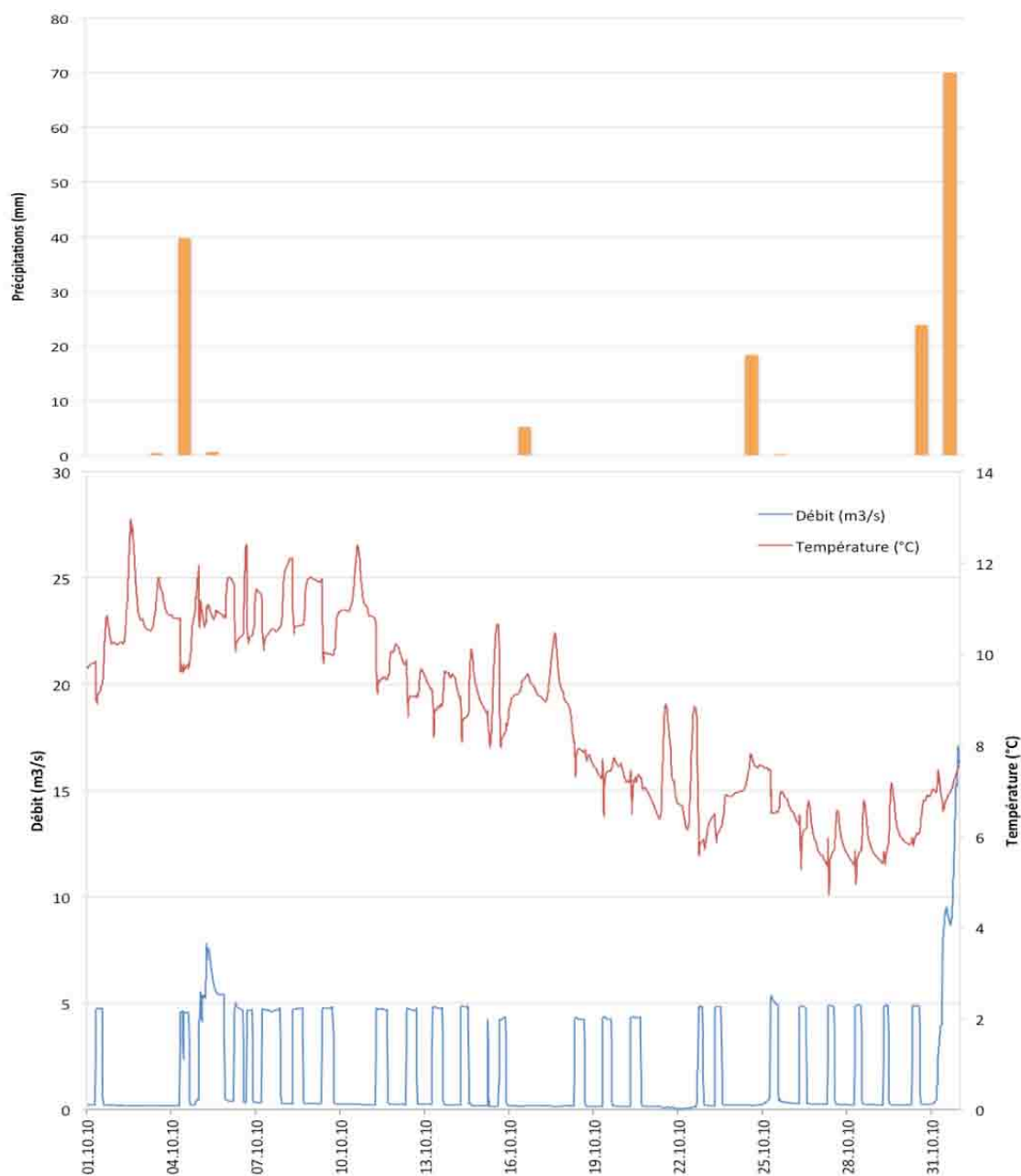


Figure 7.31 - Le graphique du haut montre les valeurs pluviométriques (mm/jour) du mois d'octobre 2010. En bas, nous pouvons observer les données relatives au débit (m^3/s) et à la température ($^{\circ}\text{C}$). Nous pouvons souligner la présence de deux crues naturelles le 5 octobre 2010 et le 31 octobre 2010. Une correspondance entre les pluies et la réponse du cours d'eau est visible.

Date	Q _{max} (m ³ /s)	Q _{min} (m ³ /s)	Q _{max} /Q _{min}	Q _{mean}	HP ₁	HP ₂	N _{max} (m)	N _{min} (m)	ΔN (m)	T _{max} (°C)	T _{min} (°C)	ΔT (°C)	P (mm/jour)
01.10.10	4.78	0.19	24.62	1.34	3.43	10.86	0.66	0.24	0.42	10.85	8.92	1.93	0
02.10.10	0.21	0.18	1.11	0.20	0.11	0.00	0.25	0.23	0.01	12.95	10.19	2.76	0
03.10.10	0.20	0.19	1.09	0.20	0.09	-0.01	0.25	0.23	0.01	11.89	10.51	1.18	0.4
04.10.10	4.62	0.19	24.55	1.68	2.63	21.84	0.66	0.24	0.42	11.94	9.58	2.38	39.7
05.10.10	7.81	0.42	18.59	5.23	1.41	-1.14	0.76	0.36	0.40	11.61	10.58	1.03	0.6
06.10.10	5.05	0.33	15.39	2.71	1.74	-0.41	0.67	0.32	0.36	12.41	10.04	2.37	0
07.10.10	4.75	0.29	16.16	3.22	1.39	0.00	0.66	0.30	0.36	11.59	10.07	1.52	0
08.10.10	4.78	0.27	17.96	1.94	2.32	22.13	0.66	0.28	0.38	12.11	10.44	1.67	0
09.10.10	4.86	0.26	18.61	2.14	2.15	21.99	0.67	0.28	0.39	11.67	9.80	1.87	0
10.10.10	0.26	0.23	1.14	0.25	0.13	-0.05	0.28	0.26	0.02	12.40	10.91	1.49	0
11.10.10	4.75	0.22	21.21	2.09	2.16	-0.05	0.66	0.26	0.40	10.89	9.13	1.76	0
12.10.10	4.75	0.22	21.40	1.90	2.38	22.18	0.66	0.26	0.40	10.21	8.62	1.59	0
13.10.10	4.89	0.22	22.41	1.93	2.41	9.94	0.67	0.25	0.41	9.64	8.17	1.47	0
14.10.10	4.89	0.17	29.08	1.55	3.05	12.62	0.67	0.22	0.45	10.10	8.06	2.04	0
15.10.10	4.36	0.14	30.89	1.34	3.14	20.14	0.65	0.20	0.45	10.66	7.95	2.71	0
16.10.10	0.21	0.16	1.30	0.18	0.26	-0.02	0.25	0.21	0.03	9.56	8.80	0.76	5.2
17.10.10	0.19	0.16	1.21	0.17	0.19	-0.01	0.24	0.21	0.02	10.46	8.95	1.51	0
18.10.10	4.33	0.15	29.05	1.68	2.48	13.40	0.65	0.21	0.44	8.97	7.31	1.66	0
19.10.10	4.38	0.15	30.01	1.53	2.77	13.45	0.65	0.21	0.44	7.73	6.43	1.30	0
20.10.10	4.38	0.15	28.82	1.71	2.47	13.33	0.65	0.21	0.44	7.52	6.48	1.04	0
21.10.10	0.16	0.01	11.71	-0.11	1.33	0.05	0.22	0.06	0.16	8.90	6.37	2.53	0
22.10.10	4.86	0.06	79.62	1.00	4.79	13.84	0.67	0.13	0.54	8.84	5.58	3.26	0
23.10.10	4.86	0.19	25.84	1.35	3.45	16.00	0.67	0.24	0.43	6.93	5.86	1.07	0
24.10.10	0.26	0.18	1.43	0.22	0.36	0.04	0.28	0.23	0.05	7.81	6.92	0.89	18.3
25.10.10	4.89	0.25	19.62	4.89	0.95	23.77	0.67	0.27	0.39	6.77	5.28	1.49	0.1
26.10.10	4.89	0.25	19.62	1.41	3.29	22.75	0.67	0.27	0.39	6.77	5.28	1.49	0
27.10.10	4.91	0.22	22.13	1.39	3.37	23.23	0.67	0.26	0.41	6.57	4.72	1.85	0
28.10.10	4.94	0.22	22.35	1.39	3.39	23.11	0.67	0.26	0.41	6.79	4.95	1.84	0
29.10.10	4.94	0.22	22.35	1.00	4.72	23.13	0.67	0.26	0.41	7.18	5.38	1.80	0
30.10.10	4.91	0.22	22.23	1.55	3.02	23.42	0.67	0.26	0.41	6.94	5.78	1.16	23.8
31.10.10	17.10	0.26	66.52	7.41	2.27	3.23	1.00	0.28	0.72	7.55	6.54	1.01	70

Tableau 7.12 - Résumé des valeurs enregistrés en octobre 2010 à la station de Giubiasco. Les rapports Q_{max}/Q_{min} sont très élevés, tout comme les indices HP_1 .

Les valeurs de température sont moins régulières que les changements de débit. A partir du graphique, il est possible de saisir des variations pendant tout le mois d'octobre : au début du mois, les valeurs étaient presque le double de celles enregistrées à la fin. Des variations sont également enregistrées à l'échelle de la journée : on peut remarquer une diminution de la température au moment de l'arrivée de la crue artificielle (débit d'éclusée). Le rapport entre le débit maximal et le débit minimal (Q_{max}/Q_{min}) (Tabl. 7.12) atteint la valeur maximale de 79.62 : 1, le changement majeur du niveau d'eau correspond à 0.72 m et la variation majeure de température est de 3.26 °C. Les valeurs HP_1 sont situées entre 0.09 et 4.79 m³/s. La valeur HP_2 maximale est de 23.42 m³/s/h. De manière générale, les valeurs faibles ont été enregistrées pendant le week-end, en l'absence de production hydroélectrique.

Pendant le mois de janvier (Fig. 7.32 ; Tabl. 7.13), les précipitations sont assez faibles, avec des valeurs maximales de 19.8 mm/jour. Le comportement hydrologique est très semblable aux autres exemples (Fig. 7.31 ; Fig. 7.35), avec des oscillations journalières en moyenne de 0.5 m³/s à 5.3 m³/s. Cela n'est pas le cas pour le 2, le 9, le 16, le 22, le 23, le 29 et le 30 janvier 2011. Le rapport Q_{max}/Q_{min} atteint la valeur maximale de 18.04 : 1, avec un changement du niveau d'eau de 0.38 m, le 31 janvier 2011. Les valeurs HP_1 sont situées entre 0.09 et 4.84 m³/s. La température est caractérisée par des valeurs comprises entre 1° C et 5 °C pendant tout le mois, avec une fluctuation maximale de 1.42 °C.

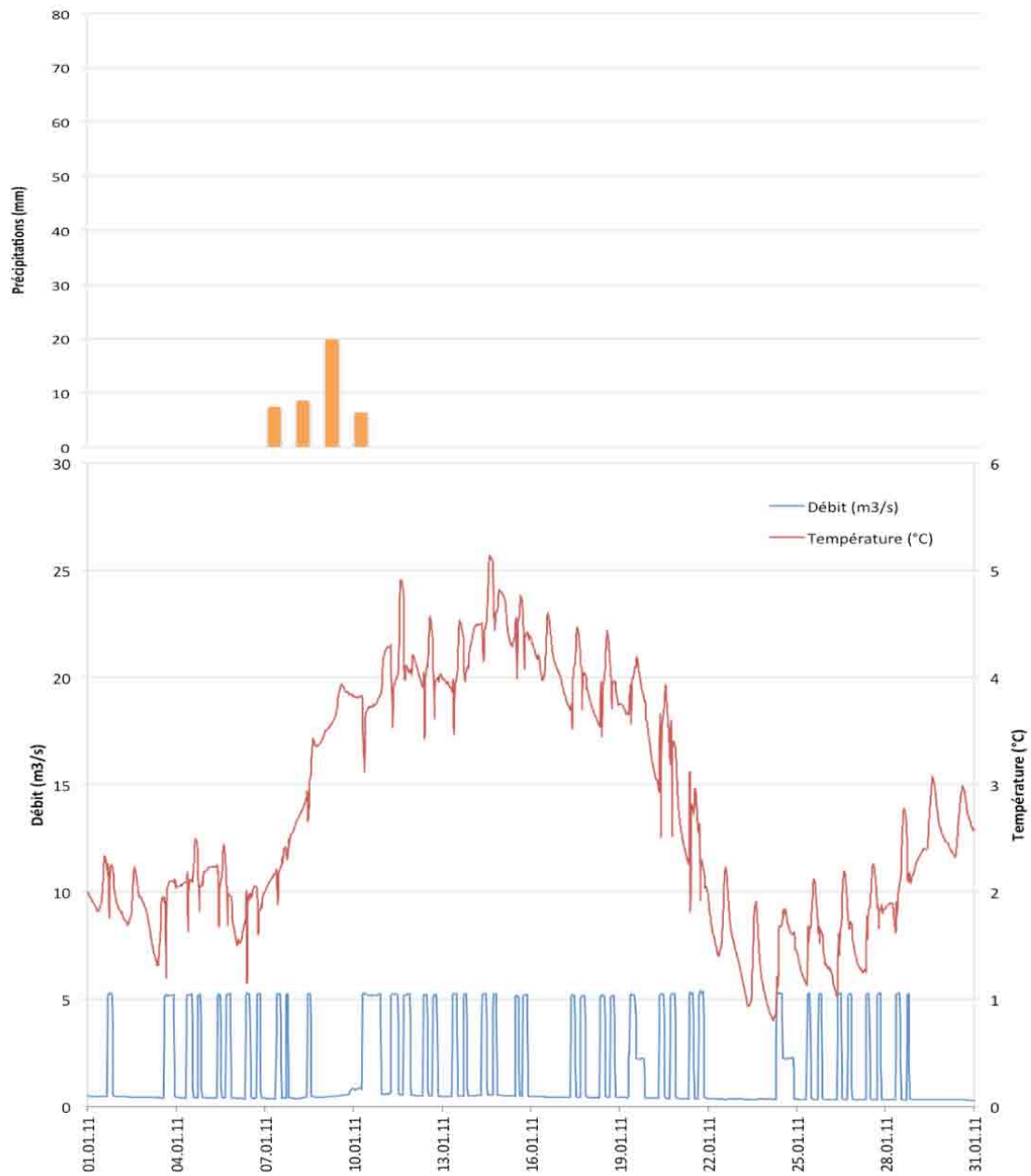


Figure 7.32 - Le graphique du haut montre les valeurs pluviométriques (mm/jour) enregistrées pendant le mois de janvier 2011, celui du bas illustre les données relatives au débit (m^3/s) et à la température ($^{\circ}C$). Pendant le mois de janvier, les précipitations sont assez faibles et on note l'absence de crues naturelles. Les oscillations sont liées exclusivement à la production hydroélectrique.

Date	Qmax (m ³ /s)	Qmin (m ³ /s)	Qmax/Qmin	Qmean	HP ₁	HP ₂	Nmax (m)	Nmin (m)	ΔN (m)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	ΔT (°C)	P (mm/jour)
01.01.11	5.30	0.45	11.88	1.27	3.82	23.71	0.68	0.37	0.31	2.34	1.76	0.58	0
02.01.11	0.47	0.43	1.09	0.44	0.09	-0.01	0.38	0.37	0.02	2.23	1.69	0.54	0
03.01.11	5.22	0.40	13.10	2.00	2.41	23.48	0.68	0.35	0.33	2.12	1.20	0.92	0
04.01.11	5.24	0.40	13.17	2.00	2.42	23.65	0.68	0.35	0.33	2.49	1.63	0.86	0
05.01.11	5.27	0.39	13.66	1.79	2.73	23.83	0.68	0.35	0.33	2.44	1.60	0.84	0
06.01.11	5.33	0.36	14.76	1.79	2.78	24.08	0.68	0.33	0.35	2.06	1.15	0.91	0
07.01.11	5.24	0.36	14.69	1.51	3.24	24.24	0.68	0.33	0.35	2.59	1.88	0.71	7.4
08.01.11	5.27	0.36	14.52	1.01	4.84	23.91	0.68	0.34	0.35	3.45	2.60	0.85	8.5
09.01.11	0.86	0.43	1.99	0.53	0.81	-0.01	0.46	0.37	0.09	3.94	3.46	0.48	19.8
10.01.11	5.30	0.57	9.31	3.55	1.33	20.89	0.68	0.42	0.26	4.12	3.12	1.00	6.3
11.01.11	5.24	0.53	9.95	2.88	1.63	22.87	0.68	0.41	0.27	4.91	3.53	1.38	0
12.01.11	5.24	0.48	10.99	2.06	2.31	23.24	0.68	0.39	0.29	4.57	3.43	1.14	0
13.01.11	5.27	0.45	11.71	1.86	2.59	23.79	0.68	0.38	0.30	4.53	3.47	1.06	0
14.01.11	5.27	0.51	10.44	1.90	2.51	19.71	0.68	0.40	0.28	5.14	4.15	0.99	0
15.01.11	5.22	0.47	11.03	1.85	2.57	23.42	0.68	0.39	0.29	4.80	3.99	0.81	0
16.01.11	0.48	0.43	1.11	0.45	0.10	0.00	0.39	0.37	0.02	4.60	3.97	0.63	0
17.01.11	5.22	0.42	12.42	2.00	2.40	23.63	0.68	0.36	0.32	4.47	3.52	0.95	0
18.01.11	5.22	0.41	12.88	1.99	2.42	23.81	0.68	0.36	0.32	4.44	3.45	0.99	0
19.01.11	5.24	0.39	13.56	2.01	2.42	22.96	0.68	0.35	0.33	4.19	3.45	0.74	0
20.01.11	5.30	0.37	14.48	1.98	2.49	24.03	0.68	0.34	0.35	3.93	2.51	1.42	0
21.01.11	5.38	0.36	15.08	2.00	2.51	24.24	0.68	0.33	0.35	3.12	1.81	1.31	0
22.01.11	0.37	0.33	1.11	0.35	0.10	-0.01	2.23	1.40	0.83	0.34	0.32	0.02	0
23.01.11	0.35	0.33	1.07	0.34	0.07	-0.01	0.33	0.32	0.01	1.91	0.93	0.98	0
24.01.11	5.30	0.33	15.87	2.08	2.39	24.67	0.68	0.32	0.36	1.84	0.80	1.04	0
25.01.11	5.30	0.32	16.72	1.54	3.23	24.44	0.68	0.31	0.37	2.20	1.03	1.17	0
26.01.11	5.30	0.32	16.72	1.54	3.23	24.62	0.68	0.31	0.37	2.20	1.03	1.17	0
27.01.11	5.30	0.31	17.26	1.54	3.24	24.60	0.68	0.31	0.38	2.26	1.25	1.01	0
28.01.11	5.30	0.30	17.78	1.54	3.26	24.66	0.68	0.30	0.38	2.78	1.62	1.16	0
29.01.11	0.33	0.31	1.06	0.32	0.06	0.00	0.32	0.31	0.01	3.08	2.23	0.85	0
30.01.11	0.32	0.29	1.11	0.31	0.10	-0.06	0.32	0.30	0.02	2.99	2.32	0.67	0
31.01.11	5.22	0.29	18.04	1.50	3.29	24.49	0.68	0.30	0.38	3.30	2.10	1.20	0

Tableau 7.13 - Résumé des valeurs enregistrées en janvier 2011 à la station de Giubiasco. Les rapports Q_{max}/Q_{min} sont très élevés, tout comme les indices HP_1 .

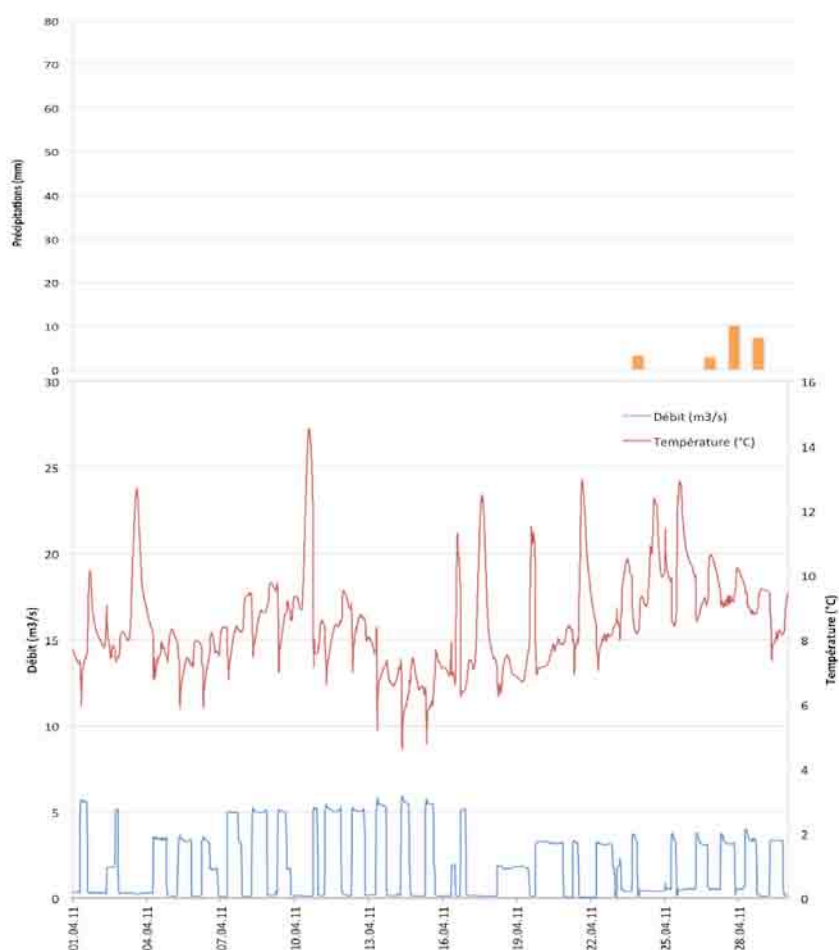


Figure 7.33 - Le graphique du haut montre les valeurs pluviométriques (mm/jour) du mois d'avril 2010. En bas, sont présentées les données relatives au débit (m³/s) et à la température (°C). Les précipitations sont très faibles. Les valeurs de température, enregistrées par la station de Giubiasco montrent des variations thermiques assez importantes, d'environ 0.5 - 4 °C.

Pendant le mois d'avril (Fig. 7.33 ; Tabl. 7.14), les précipitations ont été très faibles, presque nulles, et atteignent 10.1 mm/jour. Les variations entre le débit plancher et le débit d'éclusee sont caractérisées par des valeurs minimales de 0.02 m³/s et maximales de 5.93 m³/s. Le rapport Q_{\max}/Q_{\min} maximal équivaut à 157.48 : 1, enregistré le 20 avril 2011. Les valeurs HP_1 sont situées entre 0.54 et 4.73 m³/s. Les changements de température sont très marqués, avec une différence maximale de 7.40 °C, le 10 avril 2011.

Date	Qmax (m ³ /s)	Qmin (m ³ /s)	Qmax/Qmin	Qmean	HP ₁	HP ₂	Nmax (m)	Nmin (m)	ΔN (m)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	ΔT (°C)	P (mm/jour)
01.04.11	5.73	0.30	19.09	1.87	2.90	20.68	0.70	0.30	0.39	10.15	5.93	4.22	0
02.04.11	5.16	0.29	17.73	1.41	3.45	16.22	0.68	0.30	0.38	9.07	7.32	1.75	0
03.04.11	0.30	0.25	1.21	0.28	0.19	-0.02	0.30	0.27	0.03	12.69	7.97	4.72	0
04.04.11	3.56	0.12	28.97	1.71	2.02	11.33	0.61	0.19	0.43	8.96	6.73	2.23	0
05.04.11	3.66	0.08	44.61	1.81	1.98	17.38	0.62	0.15	0.47	8.17	5.87	2.30	0
06.04.11	3.61	0.09	41.02	1.71	2.06	15.28	0.62	0.16	0.46	8.39	5.88	2.51	0
07.04.11	5.10	0.09	58.67	2.71	1.85	24.39	0.67	0.16	0.52	9.43	6.76	2.67	0
08.04.11	5.27	0.09	59.90	3.16	1.64	24.25	0.68	0.16	0.52	9.78	7.46	2.32	0
09.04.11	5.19	0.13	39.00	2.25	2.24	21.29	0.68	0.20	0.48	9.73	7.00	2.73	0
10.04.11	5.30	0.11	49.06	1.10	4.73	25.05	0.68	0.17	0.51	14.55	7.15	7.40	0
11.04.11	5.47	0.14	40.21	3.43	1.56	24.94	0.69	0.20	0.49	9.53	6.60	2.93	0
12.04.11	5.33	0.10	51.72	2.82	1.85	24.27	0.68	0.17	0.51	9.15	7.00	2.15	0
13.04.11	5.82	0.14	43.07	2.34	2.43	24.46	0.70	0.20	0.50	8.37	5.18	3.19	0
14.04.11	5.93	0.12	49.02	2.05	2.83	26.13	0.70	0.19	0.52	7.45	4.60	2.85	0
15.04.11	5.82	0.12	48.46	1.98	2.87	26.71	0.70	0.19	0.52	7.68	4.77	2.91	0
16.04.11	5.19	0.11	45.50	1.52	3.35	24.49	0.68	0.18	0.50	11.31	6.23	5.08	0
17.04.11	0.16	0.09	1.73	0.12	0.54	-0.03	0.21	0.16	0.05	12.49	7.08	5.41	0
18.04.11	1.91	0.11	16.75	1.70	1.05	0.09	0.53	0.18	0.36	7.52	6.22	1.30	0
19.04.11	3.31	0.10	33.07	1.97	1.63	14.90	0.60	0.17	0.44	11.49	6.89	4.60	0
20.04.11	3.31	0.02	157.48	2.37	1.38	-13.43	0.60	0.07	0.53	8.43	7.17	1.26	0
21.04.11	3.40	0.03	109.65	0.83	4.07	15.50	0.61	0.09	0.52	12.96	6.93	6.03	0
22.04.11	3.26	0.03	95.94	2.44	1.32	15.90	0.60	0.09	0.51	9.00	7.05	1.95	0
23.04.11	3.73	0.07	50.41	1.15	3.17	-0.02	0.62	0.14	0.48	10.52	7.98	2.54	0
24.04.11	0.85	0.38	2.20	0.44	1.06	-0.02	0.46	0.35	0.11	12.39	9.02	3.37	3.1
25.04.11	3.78	0.51	7.41	1.84	1.77	16.07	0.62	0.40	0.22	10.65	8.56	2.09	0
26.04.11	3.78	0.51	7.41	1.84	1.77	16.30	0.62	0.40	0.22	10.65	8.56	2.09	0
27.04.11	3.78	0.15	26.06	2.14	1.70	16.20	0.62	0.20	0.42	10.23	9.00	1.23	2.8
28.04.11	4.03	0.09	44.72	1.74	2.26	16.46	0.63	0.16	0.48	9.85	8.78	1.07	10.1
29.04.11	3.40	0.11	32.37	1.88	1.75	15.90	0.61	0.17	0.44	9.50	7.34	2.16	7.3
30.04.11	3.42	0.07	46.24	2.52	1.33	15.51	0.61	0.14	0.47	9.30	7.13	2.17	0

Tableau 7.14 - Résumé des valeurs enregistrées en avril 2011 à la station de Giubiasco. Les rapports Q_{\max}/Q_{\min} sont très élevés, tout comme les indices HP_1 .

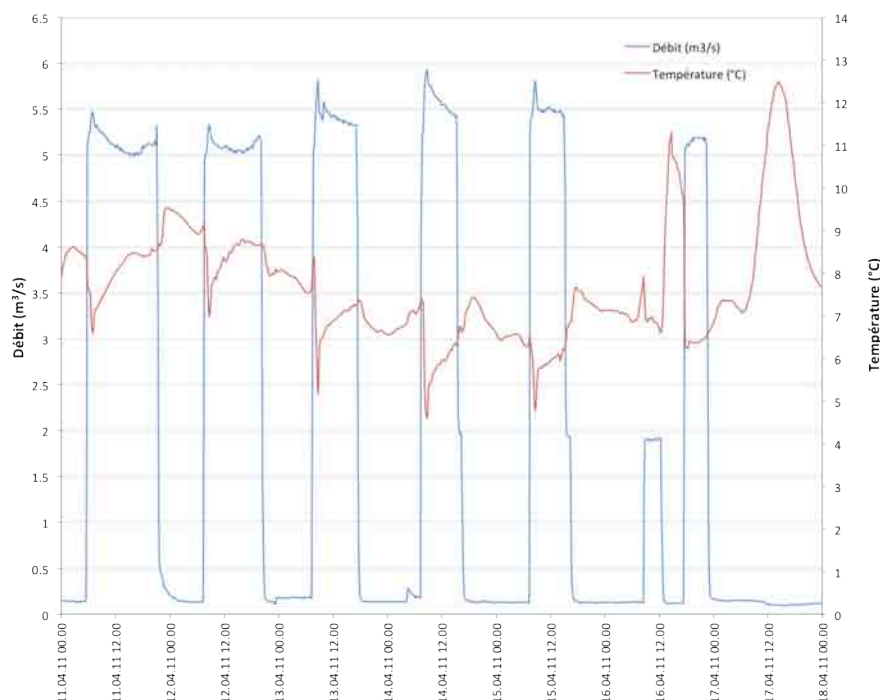


Figure 7.34 - Graphique illustrant en détail les variations de température lors de l'arrivée de la crue artificielle. Les valeurs, recueillies par la station de Giubiasco, montrent un refroidissement important (p.ex. le 14.04.2011).

La figure 7.36 montre les valeurs de débit et de température enregistrées entre le 11 et le 18 avril 2011. Nous notons d'importantes oscillations d'environ 0.5 - 4 °C au moment de l'arrivée de la crue artificielle.

7.2.3 Synthèse

Nous avons exposé jusqu'à ici les données relatives aux mois d'octobre, de janvier et d'avril enregistrées par les stations de Cabbio, Lostallo, Lumino/Sassello et Giubiasco. Les résultats obtenus ont été accompagnés par les données pluviométriques qui nous ont permis d'observer la présence, dans certains cas, de crues naturelles.

Dans ce chapitre, nous proposons un résumé des données recueillies pendant toute la période d'étude : dans une première partie nous donnons de l'importance des valeurs moyennes mensuelles pour chaque station d'étude, pour présenter par la suite les statistiques annuelles et hivernales. Le but est de comprendre de possibles différences hydrologiques entre les trois périodes considérées (automne, hiver, printemps).

Les données recueillies par les sondes *HyMADD* de Cabbio et de Lostallo, montrent des valeurs qui ne respectent pas les lois hydrologiques : les débits enregistrés à Lostallo, sonde localisée plus en aval, sont plus faibles que ceux recueillis à Cabbio (en absence de prélèvements d'eau). Afin de comprendre cette différence et de saisir de possibles erreurs, nous avons calculé l'écart-type¹² (Tabl. 7.15 et 7.16).

	Q_{\max} (m ³ /s)	Q_{\min} (m ³ /s)	Q_{\max}/Q_{\min} (x:1)	HP ₁ (m ³ /s)	Q_{mean} (m ³ /s)	ΔN (m)
Octobre	11.45 ± 3.46	2.00 ± 1.51	6.58	2.49	4.66 ± 2.97	0.30 ± 0.07
Novembre	13.95 ± 4.68	2.09 ± 1.54	7.45	2.29	5.92 ± 3.27	0.33 ± 0.07
Décembre	10.17 ± 4.11	1.53 ± 0.01	6.64	2.83	3.04 ± 1.09	0.30 ± 0.09
Janvier	4.30 ± 1.77	1.53 ± 0.01	2.77	1.38	1.93 ± 0.33	0.15 ± 0.06
Février	2.87 ± 1.23	1.12 ± 0.01	2.56	1.24	1.33 ± 0.18	0.11 ± 0.05
Mars	4.60 ± 1.83	1.54 ± 0.04	3.00	1.40	2.14 ± 0.51	0.16 ± 0.06
Avril	12.33 ± 2.25	2.21 ± 0.93	6.40	1.80	6.23 ± 1.86	0.16 ± 0.06
Mai	15.87 ± 4.42	4.79 ± 3.42	4.32	1.10	10.80 ± 3.79	0.25 ± 0.05
Juin	26.26 ± 15.62	9.93 ± 7.26	3.55	0.93	17.83 ± 7.80	0.27 ± 0.11

Tableau 7.15 - Valeurs moyennes des débits pour la station de Cabbio, le long de la Moesa. Nous soulignons la présence de trois périodes hydrologiques : d'automne (octobre, novembre et décembre), avec des valeurs supérieures à 6 : 1 ; d'hiver (janvier, février et mars), caractérisés par des valeurs nettement plus faibles ne dépassant jamais 3 : 1 ; et le régime du printemps, désigné par des valeurs à nouveau plus élevées.

Le tableau 7.15 montre les données moyennes mensuelles recueillies par la station *HyMADD* de Cabbio. Les rapports Q_{\max}/Q_{\min} révèlent la présence de trois périodes hydrologiques : d'automne (octobre, novembre et décembre), avec des valeurs supérieures à 6 : 1 ; d'hiver (janvier, février et mars), caractérisés par des valeurs nettement plus faibles, ne dépassant jamais 3 : 1 ; et du printemps (avril, mai et juin) désigné par des valeurs situées entre 3.55 : 1 et 6.40 : 1. Les valeurs de mai et de juin montrent de faibles différences par rapport au mois

¹² L'écart-type mesure la dispersion d'une série de valeurs, dans nos cas les débits, autour de leur moyenne.

d'avril, avec une diminution du rapport Q_{\max}/Q_{\min} . Cette situation pourrait être liée à la présence d'une période très arrosée qui a augmenté le débit du cours d'eau en affaiblissant l'ampleur des oscillations (Annexe A.6).

	Q_{\max} (m ³ /s)	Q_{\min} (m ³ /s)	Q_{\max}/Q_{\min} (x:1)	HP ₁ (m ³ /s)	Q_{mean} (m ³ /s)	ΔN (m)
Octobre	9.92 ± 3.25	2.64 ± 1.22	4.01	1.86	4.72 ± 2.20	0.24 ± 0.06
Novembre	12.46 ± 4.73	3.07 ± 1.45	4.36	1.56	6.24 ± 2.74	0.17 ± 0.04
Décembre	9.52 ± 3.28	2.02 ± 0.02	4.71	2.19	3.32 ± 0.81	0.24 ± 0.06
Janvier	5.07 ± 1.46	2.01 ± 0.01	2.53	1.20	2.50 ± 0.29	0.16 ± 0.05
Février	3.72 ± 1.20	2.01 ± 0.01	1.85	0.74	2.23 ± 0.16	0.11 ± 0.05
Mars	4.20 ± 1.29	2.01 ± 0.03	2.09	0.85	2.50 ± 0.37	0.13 ± 0.06
Avril	10.49 ± 2.33	2.95 ± 0.73	3.69	1.37	5.55 ± 1.14	0.23 ± 0.05
Mai	12.88 ± 3.27	4.74 ± 2.08	2.95	1.02	8.35 ± 2.77	0.20 ± 0.04
Juin	19.68 ± 11.63	6.85 ± 4.22	3.06	1.04	12.43 ± 6.64	0.25 ± 0.08

Tableau 7.16 - Valeurs moyennes des débits pour la station de Lostalio. La présence des trois périodes hydrologiques cités auparavant est moins marquée pour cette station.

Le tableau 7.16 montre les données recueillies par la station *HyMADD* de Lostalio. Les rapports Q_{\max}/Q_{\min} relèvent moins précisément la présence de trois périodes hydrologiques. Le régime d'automne est caractérisé par des rapports Q_{\max}/Q_{\min} supérieures à 4 : 1, le régime d'hiver par des rapports nettement plus faibles (1.85 : 1 - 2.53 : 1) et le régime du printemps par des rapports à nouveau légèrement plus élevés (2.95 : 1 - 3.69 : 1). Les valeurs de l'indice HP₁ ne montrent pas une division nette en périodes hydrologiques.

Les valeurs des débits moyens et des écarts-type (Tabl. 7.15 et 7.16) se situent dans la même "plage" : les faibles différences, visibles dans les tableaux, sont donc liées (1) à la présence de possibles erreurs de mesure (à cause de la précision relative de la sonde, qui correspond à 0.5 %¹³ et à cause d'une estimation peu fiable de l'*offset*¹⁴) ; (2) à la présence de sédiments entre la sonde et le tube de protection de cette dernière¹⁵ et (3) la présence des lâchers de la centrale de Lostalio, qui peuvent augmenter la variabilité hydrologique enregistrée par la sonde de Lostalio.

	Q_{\max} (m ³ /s)	Q_{\min} (m ³ /s)	Q_{\max}/Q_{\min} (x:1)	HP ₁ (m ³ /s)	Q_{mean} (m ³ /s)	ΔN (m)
Octobre	23.36	7.79	3.16	1.18	13.53	0.34
Novembre	32.17	15.60	2.23	0.74	22.85	0.27
Décembre	18.44	8.22	2.24	0.86	11.64	0.25
Janvier	13.08	6.94	1.89	0.66	9.35	0.18
Février	11.38	5.32	2.14	0.85	7.12	0.19
Mars	12.12	4.70	2.64	1.01	7.33	0.20
Avril	23.23	10.45	2.28	0.85	15.11	0.23
Mai	32.84	13.78	2.60	0.83	23.09	0.30
Juin	51.00	22.13	2.43	0.84	33.26	0.32

Tableau 7.17 - Valeurs moyennes des débits pour la station de Lumino/Sassello. Les valeurs Q_{\max}/Q_{\min} ne dépassent jamais 3.16 : 1. Dans ce cas, la distinction entre les trois périodes citées auparavant est moins visible.

¹³ Source : le site de la firme *MADDTechnologies* (www.jdc.ch). Consulté le 08.12.2011.

¹⁴ *Offset* : la distance entre le fond du lit et la sonde.

¹⁵ Au moment de la récupération de la sonde (26 juin 2011), nous avons observé la présence de sédiments entre la sonde et le tube de protection qui ont pu causer des problèmes pendant l'acquisition des données.

Le tableau 7.17 expose les données recueillies par la station fédérale de Lumino/Sassello. Les rapports Q_{\max}/Q_{\min} ne dépassent jamais 3.16 : 1. Les valeurs du débit moyen (Q_{mean}) et du débit plancher (Q_{\min}) sont supérieures par rapport à celles enregistrées à Cabbio et à Lostallo, à cause de l'influence des tributaires. Pour cette station hydrologique, la distinction entre les trois périodes citées auparavant est difficile à détecter : les valeurs des deux indices (Q_{\max}/Q_{\min} et HP_1) confirment ce constat.

La Morobbia (Tabl. 7.18) présente des valeurs du coefficient Q_{\max}/Q_{\min} très élevées atteignant 21.55 :1 en octobre, 10.92 : 1 en janvier et 42.29 : 1 en avril. La différence du niveau d'eau (ΔN) est également importante, avec des valeurs comprises entre 22 et 45 cm. Le rapport entre le débit d'écluse et le débit plancher enregistré en novembre est faible, à cause du débit plancher élevé dû à deux importantes crues naturelles (Annexe A.7). Les valeurs de l'indice HP_1 se situent entre 0.96 et 3.02 m³/s.

Malgré la présence d'importantes pluies pendant le mois de mai (Annexe A.8), pour la Morobbia nous n'avons pas enregistré un affaiblissement du rapport Q_{\max}/Q_{\min} (à comparer avec les résultats obtenus à Cabbio et à Lostallo, Tabl. 7.15-7.16). Cette situation est explicable par le comportement différent des deux bassins hydrologiques : la réponse aux mêmes événements pluvieux change en fonction de ses caractéristiques, telles que la taille (la surface), la forme, l'élévation, la pente, l'orientation et la couverture végétale. La surface du bassin versant de la Morobbia est nettement inférieure par rapport à celle de la Moesa (45.2 km² pour la Morobbia et 471 km² pour la Moesa). L'effet d'un épisode pluviométrique provoque ainsi une augmentation du débit nettement plus faible.

	Q_{\max} (m ³ /s)	Q_{\min} (m ³ /s)	Q_{\max}/Q_{\min} (x:1)	HP_1 (m ³ /s)	Q_{mean} (m ³ /s)	ΔN (m)
Octobre	4.23	0.21	21.55	1.12	1.77	0.34
Novembre	7.81	2.66	7.39	0.96	5.36	0.22
Décembre	4.74	0.51	10.50	2.03	2.13	0.27
Janvier	4.18	0.39	10.92	2.17	1.55	0.29
Février	3.65	0.26	13.72	3.02	0.89	0.30
Mars	3.73	0.30	14.38	2.64	1.22	0.28
Avril	3.95	0.15	42.29	2.09	1.84	0.42
Mai	3.94	0.10	44.41	2.62	1.54	0.44
Juin	5.60	0.49	37.14	2.64	2.57	0.45

Tableau 7.18 - Valeurs moyennes des débits pour la station de Giubiasco, le long de la Morobbia. Les valeurs Q_{\max}/Q_{\min} sont très élevées, entre 7.39 : 1 et 44.41 : 1. Le facteur Q_{\max}/Q_{\min} enregistré en novembre 2010 est faible, principalement à cause du débit plancher moyen assez élevé, dû à deux importantes crues naturelles (Annexe A.7).

	MOESA			MOROBBIA
	Cabbiolo	Lostallo	Lumino/Sassello	
Q_{mean} (m ³ /s)	6.18	5.32	15.92	2.10
Q_{max} (m ³ /s)	11.31	9.75	24.18	4.65
Q_{min} (m ³ /s)	2.97	3.14	10.55	0.56
$Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}}$ (x:1)	4.81	3.25	2.40	22.48
HP ₁ (m ³ /s)	1.51	1.28	0.87	2.39
ΔN (m)	0.23	0.19	0.25	0.33
dQ/dt (m ³ /s/h)	11.36	8.39	7.77	4.75
"-dQ/dt (m ³ /s/h)	-9.00	-6.69	-2.97	-4.44
N°pics par jour	1-2	1-2	1-2	1

Tableau 7.19 - Statistique annuelle le long des deux cours d'eau étudiés (01.10.2010-26.06.2011). On note, pour la Moesa, une atténuation du rapport $Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}}$ en se rapprochant de la confluence avec le Ticino (de Cabbiolo à Lumino/Sassello). Les valeurs de l'indice HP₁ suivent une tendance similaire.

	MOESA			MOROBBIA
	Cabbiolo	Lostallo	Lumino/Sassello	
Q_{mean} (m ³ /s)	1.80	2.41	7.94	1.22
Q_{max} (m ³ /s)	3.92	4.33	12.19	3.85
Q_{min} (m ³ /s)	1.40	2.01	5.65	0.32
$Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}}$ (x:1)	2.77	2.54	2.22	13.01
HP ₁ (m ³ /s)	1.39	1.06	0.84	3.02
ΔN (m)	0.14	0.13	0.19	0.29
dQ/dt (m ³ /s/h)	3.74	2.43	3.70	4.76
"-dQ/dt (m ³ /s/h)	-1.37	-1.52	-3.65	-4.78
N°pics par jour	1	1	1	1

Tableau 7.20 - Statistique hivernale (1.01.2011 - 31.03.2011) caractérisée par la présence de valeurs plus faibles par rapport à la statistique annuelle. Le phénomène se présente, le long de la Moesa, avec une ampleur des oscillations moins importante (comparer avec le Tabl. 7.19).

Les tableaux 7.19 et 7.20 illustrent les valeurs moyennes récoltées pendant toute la période d'étude le long des deux cours d'eau. Ils indiquent une atténuation de l'ampleur des oscillations de l'amont vers l'aval : les rapports $Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}}$ et les valeurs de l'indice HP₁ enregistrés à Cabbiolo sont supérieurs à ceux relevés à Lostallo et, surtout, à Lumino/Sassello. Les données hivernales (Tabl. 7.20) montrent un affaiblissement du phénomène artificiel pendant la période hivernale : les rapports entre le débit d'éclusee et le débit plancher sont plus bas.

Pour conclure, nous pouvons souligner que les données du régime hydrique, récoltées le long de la Moesa, montrent une atténuation de l'ampleur des oscillations ($Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}}$) de l'amont vers l'aval et selon la saison. Les rapports moyens mensuels obtenus à Cabbiolo atteignent 6.58 : 1 en octobre, 2.77 : 1 en janvier et 6.40 : 1 en avril. Les rapports moyens mensuels enregistrés à Lumino/Sassello, la station plus proche de la confluence avec le Ticino, sont de l'ordre de 3.16 : 1 en octobre, 1.89 : 1 en janvier et 2.28 : 1 en avril. Les données hydrologiques récoltées le long de la Morobbia, montrent des rapports $Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}}$ toujours élevés, avec un rapport moyen annuel de 22.48 : 1. Les valeurs du rapport entre le débit d'éclusee et le débit plancher atteignent 21.55 : 1 en octobre, 10.92 : 1 en janvier et 42.29 : 1 en avril.

Les deux cours d'eau présentent des différences hydrologiques importantes : les rapports entre le débit d'éclusee et le débit plancher enregistrés le long de la Moesa sont nettement plus

faibles par rapport à ceux observés le long de la Morobbia (Fig. 7.35 et Fig. 7.36). Nous pouvons également remarquer un écart important entre les débits minimaux de la Moesa (Q_{\min} moyen = 2 m³/s) et ceux de la Morobbia (Q_{\min} moyen = 0.52 m³/s). Ces différences hydrologiques pourraient être expliquées par : (1) la différence de la surface du bassin versant qui implique une différence de surface d'alimentation (la Moesa a un bassin hydrologique d'une surface de 471 km² ; le bassin versant de la Morobbia est de 45.2 km²) ; (2) une production hydroélectrique différente, qui pourrait augmenter ou atténuer le rapport des oscillations¹⁶.

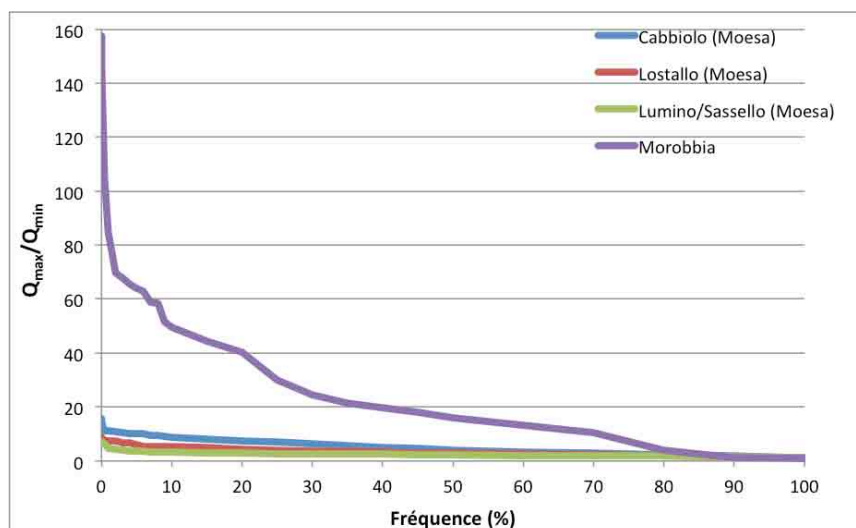


Figure 7.35 - Courbes des fréquences du rapport Q_{\max}/Q_{\min} .

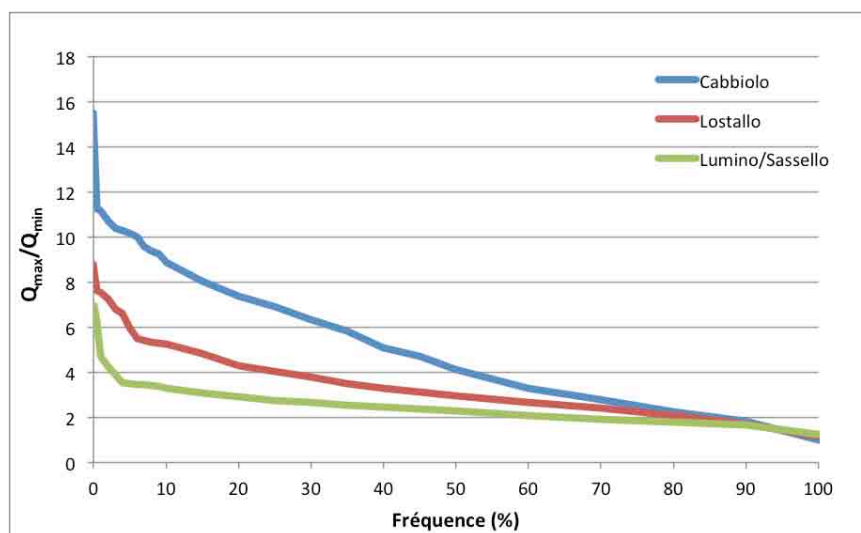


Figure 7.36 - Courbes des fréquences du rapport Q_{\max}/Q_{\min} .

¹⁶ Pour la Moesa, l'amplitude des oscillations varie en fonction de la saison ; pour la Morobbia, nous n'avons pas décelé des différences considérables pendant l'automne, l'hiver et le printemps.

7.3 L'activité sédimentaire

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats obtenus à partir des méthodes sédimentologiques, nécessaires pour saisir l'activité sédimentaire du tronçon d'étude. La présentation des résultats sera effectuée par période d'analyse (automne, hiver et printemps), mais également par section fluviale d'étude. Cette partie du travail a nécessité l'utilisation de techniques particulières sur le terrain (peinture des sédiments) et à l'ordinateur, pour l'analyse et le traitement des données (au moyen du logiciel *Matlab*). Pour chaque campagne d'analyse, nous présentons également des informations sur le débit enregistré pendant la semaine d'investigation.

7.3.1. La Moesa

Campagne automnale

A) Station de Cabbio

La figure 7.37 montre les valeurs de débit récoltées pendant la semaine du 25 octobre au 1^{er} novembre 2010. Nous avons collecté, pendant la semaine d'analyse, une série d'images correspondant aux différents jours. Les lettres *a*, *b*, *c*, *d* indiquent la séquence de la prise des différentes photos. Pour le 25 octobre, nous n'avons pas pu effectuer d'analyses, car le débit d'écluse s'est présenté avant notre arrivée sur le terrain. Nous pouvons remarquer que, entre la photo du 26 octobre (Fig. 7.38a) et celle du 27 octobre (Fig. 7.38b), trois importants pics, de 15.25 m³/s, 12.72 m³/s et 14.74 m³/s, ont été enregistrés. Le rapport Q_{\max}/Q_{\min} maximal est de 10.38 : 1, entre le 26 et le 27 octobre 2010. Entre le 27 octobre (Fig. 7.38b) et le 28 octobre (Fig. 7.38c), le débit d'écluse correspond à 3.50 m³/s. Il faut souligner que, pendant cette semaine, les stations de mesure MétéoSuisse n'ont pas enregistré de précipitations importantes : l'ampleur des variations est donc attribuable exclusivement à la production hydroélectrique. Les investigations le long de la station de Cabbio montrent une activité sédimentaire¹⁷ correspondant à 47.59 %, avec une erreur de 4.16 %, entre le 26.10.2010 à 09:30 (Fig. 7.38a) et le 27.10.2010 à 13:00 (Fig. 7.38b); de 37.60 %, avec une erreur de 12.60 %, entre le 27 octobre 2010 à 13:30 (Fig. 7.38b) et le 28 octobre 2010 à 13:30 (Fig. 7.38c) et une valeur d'activité sédimentaire de 38.22 % (erreur de 11.21 %) entre le 28 octobre 2010 à 13:30 (Fig. 7.38c) et le 29 octobre 2010 à 13:30 (Fig. 7.38d)¹⁸. Ces valeurs ont été obtenues au moyen du code *Matlab*.

¹⁷ L'activité sédimentaire indique un taux de changement du lit fluvial, sans préciser s'il s'agit de transport, d'érosion ou de dépôt.

¹⁸ Entre les images a et b, le rapport Q_{\max}/Q_{\min} équivaut à 3.50 : 1 et nous remarquons la présence de dépôt sédimentaire.

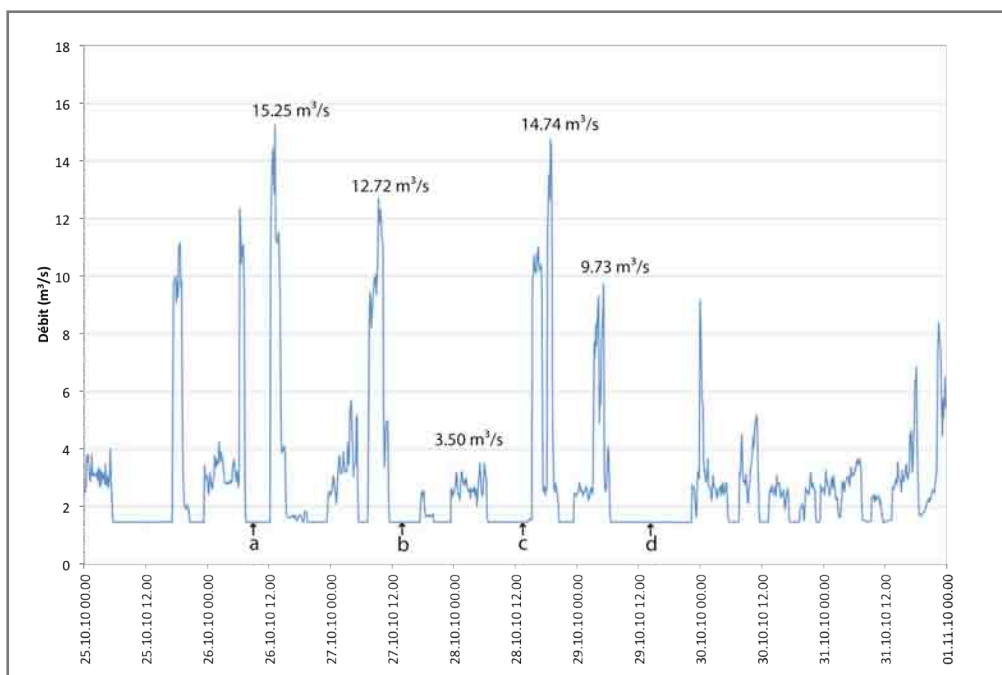


Figure 7.37 - Le débit de la Moesa à Cabiolo pendant la semaine d'investigation ; les lettres a, b, c, d, montrent la séquence des photos. Nous soulignons la présence de trois importants pics, de l'ampleur de $15.25 \text{ m}^3/\text{s}$, $12.72 \text{ m}^3/\text{s}$ et $14.74 \text{ m}^3/\text{s}$. Entre le 27 octobre et le 28 octobre, le débit d'éclusee correspond à $3.50 \text{ m}^3/\text{s}$.

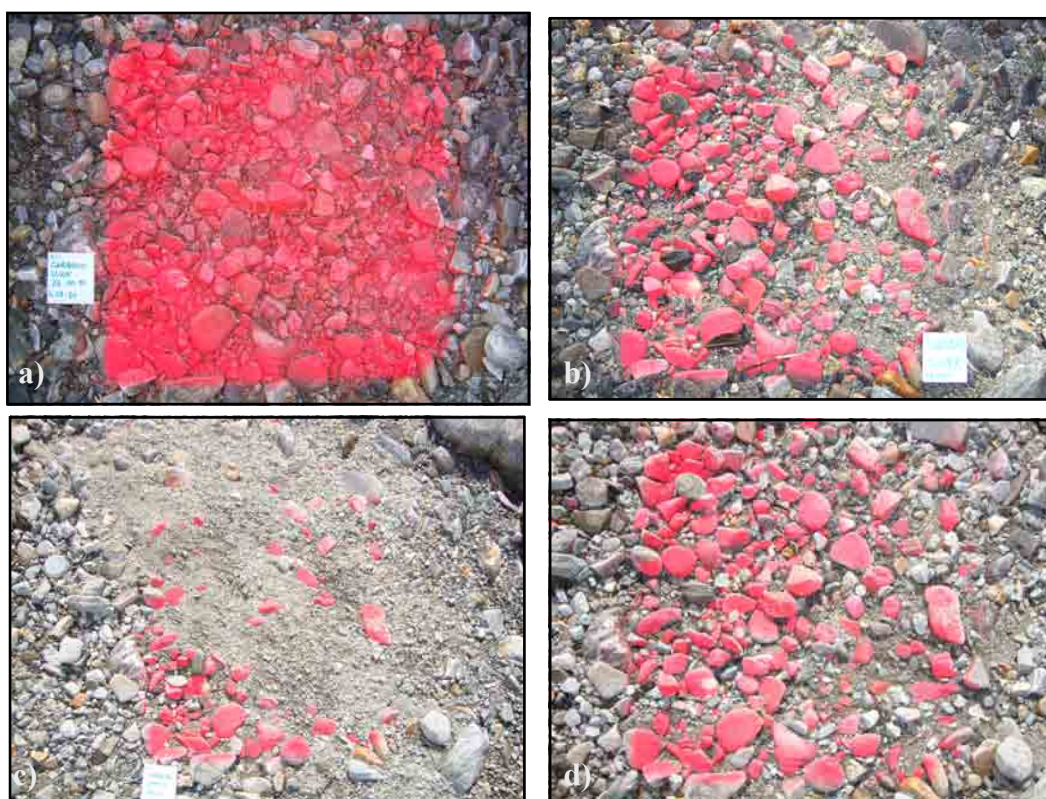


Figure 7.38 - Séquence d'images montrant la méthode appliquée pour l'évaluation de la présence du transport solide. La première image (a) a été prise le 26 octobre 2010 à 09:30, avant l'arrivée de la crue artificielle. La deuxième image (b) a été prise le 27 octobre 2010 à 13:00, la troisième image (c) le 28 octobre 2010 à 13:30 et la quatrième image (d) le 29 octobre à 13:30. Nous soulignons la présence, pendant la semaine d'investigation, d'une activité sédimentaire importante. La surface colorée correspond à 0.25 m^2 .

B) Station de Cama/Lostallo

Après l'analyse, au moyen du logiciel *Matlab*, nous avons mesuré une activité de 24.47 %, avec une erreur de 5.72 %, à la station de Cama. Les analyses ont été conduites le 26, le 27 et le 28 octobre 2010 (Fig. 7.40 a,b,c). Pour la mesure du débit, nous faisons référence à la station de Lostallo (Fig. 7.39).

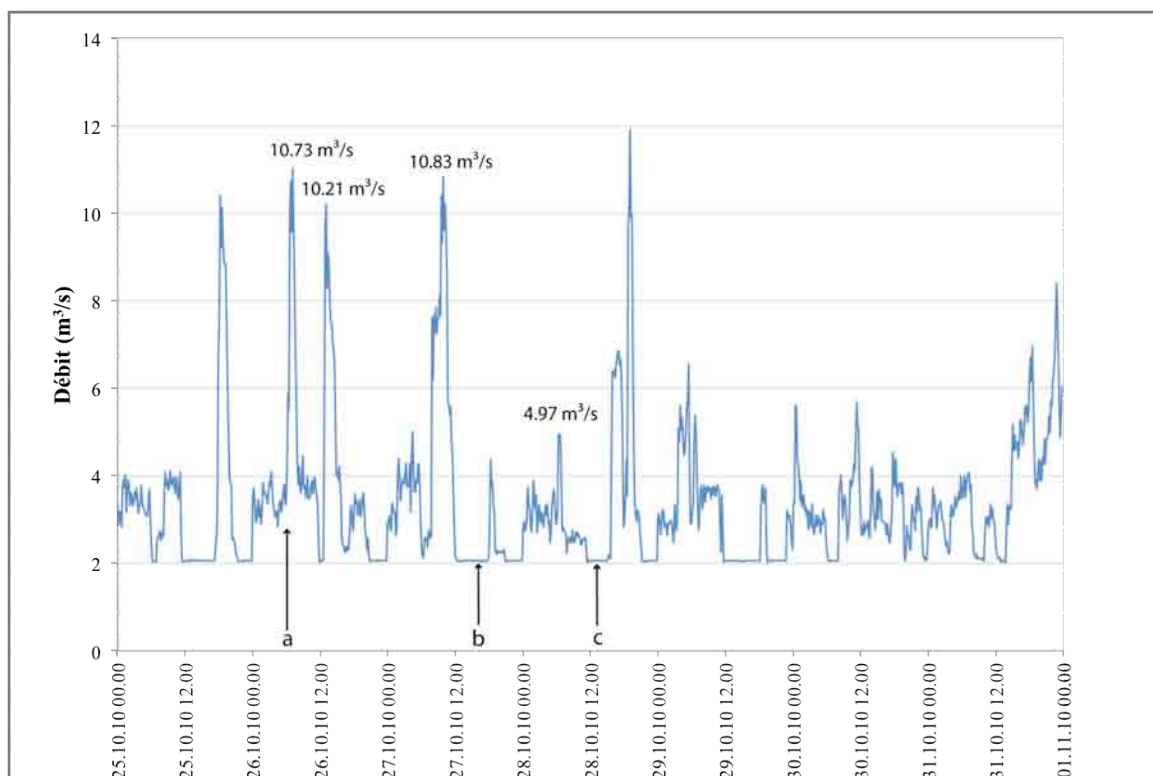


Figure 7.39 - Le débit de la Moesa enregistré à la station de Lostallo entre le 25 octobre et le 1^{er} novembre 2010.



Figure 7.40 - Séquence d'images montrant la méthode appliquée pour l'évaluation du transport sédimentaire. La première image (a) a été prise le 26 octobre 2010 à 07:00, avant l'arrivée de la crue artificielle. La deuxième image (b) a été prise le 27 octobre 2010 à 14:30 et la troisième photo (c) le 28 octobre 2010 à 12:30. La présence d'un faible transport sédimentaire est remarquable à la station de Cama.

C) Station de Grono

Pour la station d'étude de Grono, nous n'avons pas enregistré de transport de la charge solide (Fig. 7.41). Pour la mesure du débit, nous faisons référence à la station de Lostallo (Fig. 7.39)

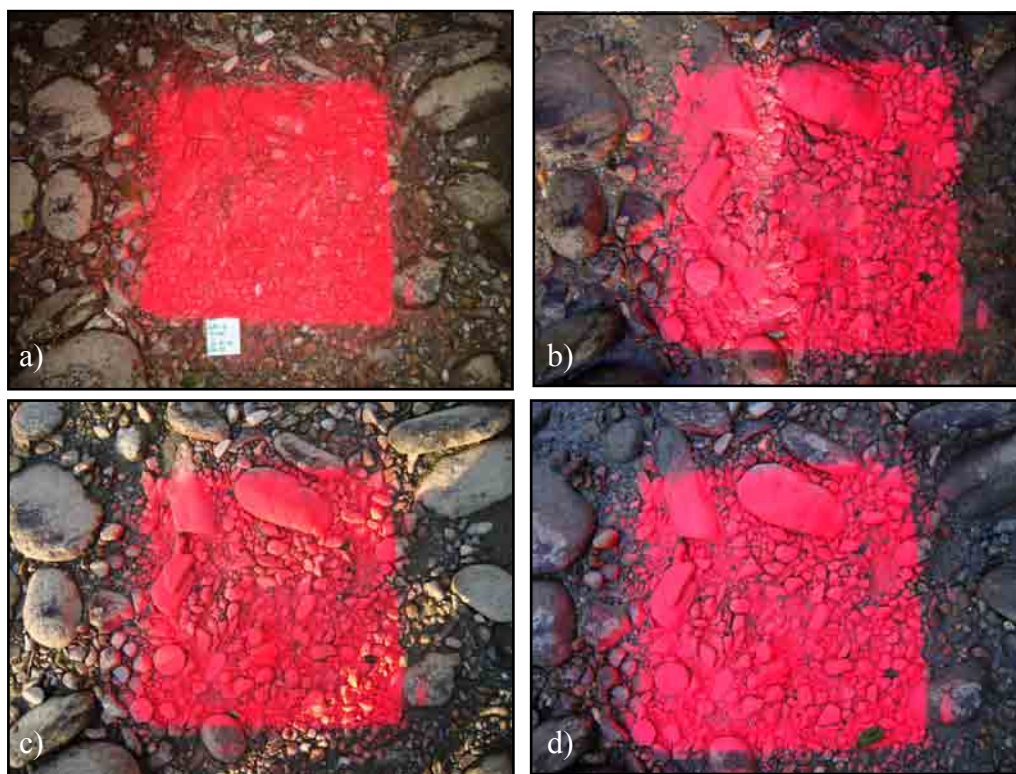


Figure 7.41 - Séquence d'images prises à Grono montrant la méthode appliquée pour l'évaluation de la présence du transport solide : le 26 octobre 2010 à 06:45 (a), le 27 octobre 2010 à 15:00 (b), le 28 octobre 2010 à 15:30 (c) et le 29 octobre 2010 à 15:30 (d). Pour cette station, nous n'avons pas décelé de transport sédimentaire.

*Campagne hivernale**A) Station de Cabbio*

La figure 7.43 montre les essais colorimétriques menés à Cabbio entre le 25 et le 28 janvier 2011. Aucune mesure n'a été effectuée le 24 janvier, car le cours d'eau présentait un débit d'écluse qui empêchait le marquage du substrat. La figure 7.42 montre les valeurs de débit enregistrées pendant la semaine d'analyse. Les lettres *a*, *b*, *c*, *d* indiquent la séquence des photos prises sur le terrain (Fig. 7.43).

Nous pouvons remarquer que l'activité sédimentaire est négligeable. Le débit enregistré ne permettait pas la prise en charge et le transport des grains.

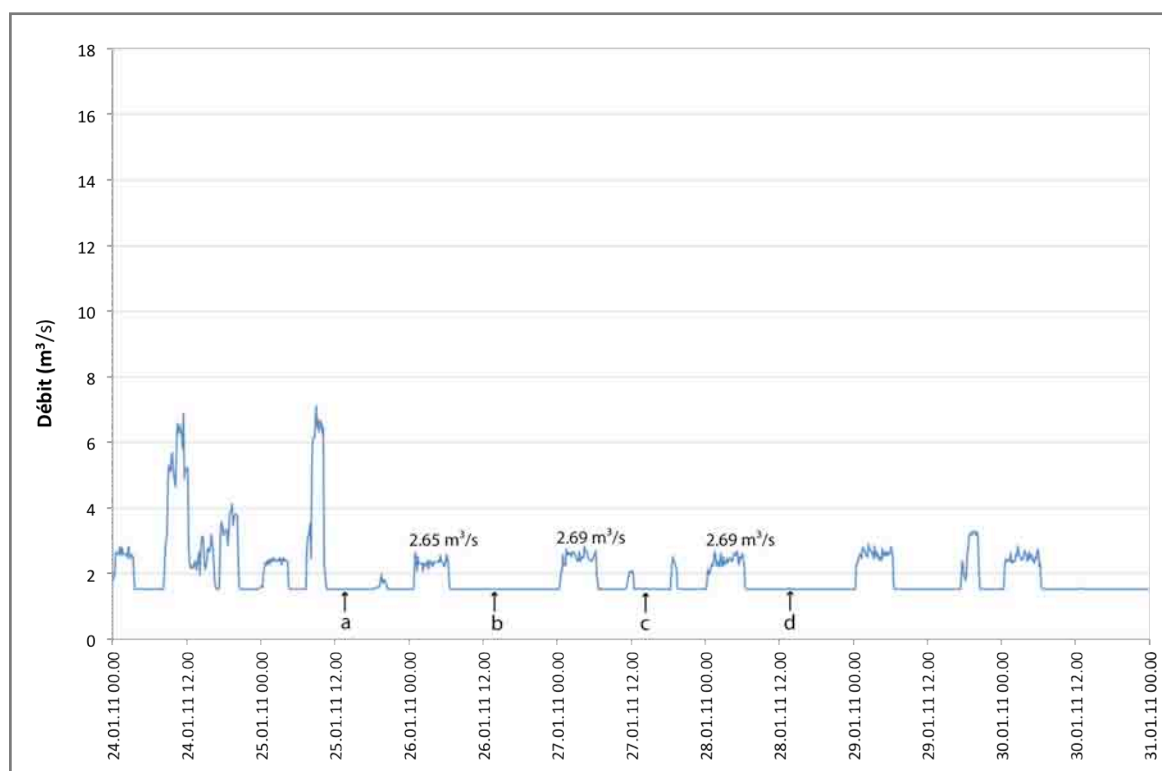


Figure 7.42 - Valeurs de débit enregistrées pendant la semaine du 24-31 janvier 2011 par la station hydrologique HyMADD localisée à Cabbio. Les lettres a, b, c, d indiquent la séquence des photos prises sur le terrain (comparer avec la Fig. 7.43). Les valeurs maximales du débit atteignent $2.69 \text{ m}^3/\text{s}$.

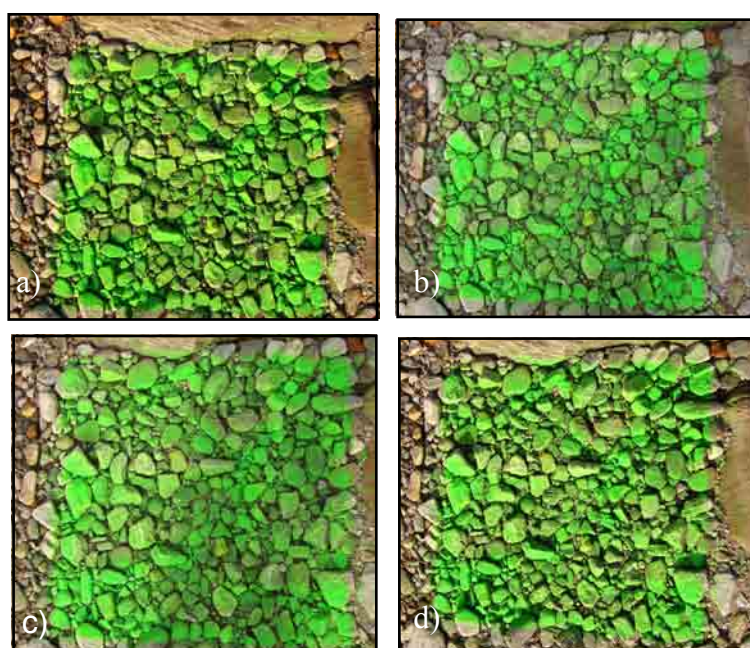


Figure 7.43 - Séquence d'images prises à Cabbio pendant la campagne hivernale montrant l'absence de transport sédimentaire. La première image (a) a été prise le 25 janvier 2011 à 13:00, la deuxième (b) le 26 janvier 2011 à 13:00, la troisième (c) le 27 janvier 2011 à 13:30 et la quatrième (d) le 28 janvier 2011 à 13:30.

C) Station de Cama/Lostallo

Le long de la station de Cama, les mesures hivernales ont été effectuées le 20, le 21 et le 25 février 2011 (Fig.7.44-7.45). L'activité sédimentaire apparaît négligeable et ne peut pas être quantifiée (Fig. 7.45). Les rapports entre le débit d'éclusee et le débit plancher sont faibles pendant toute la semaine d'analyse (Fig. 7.44).

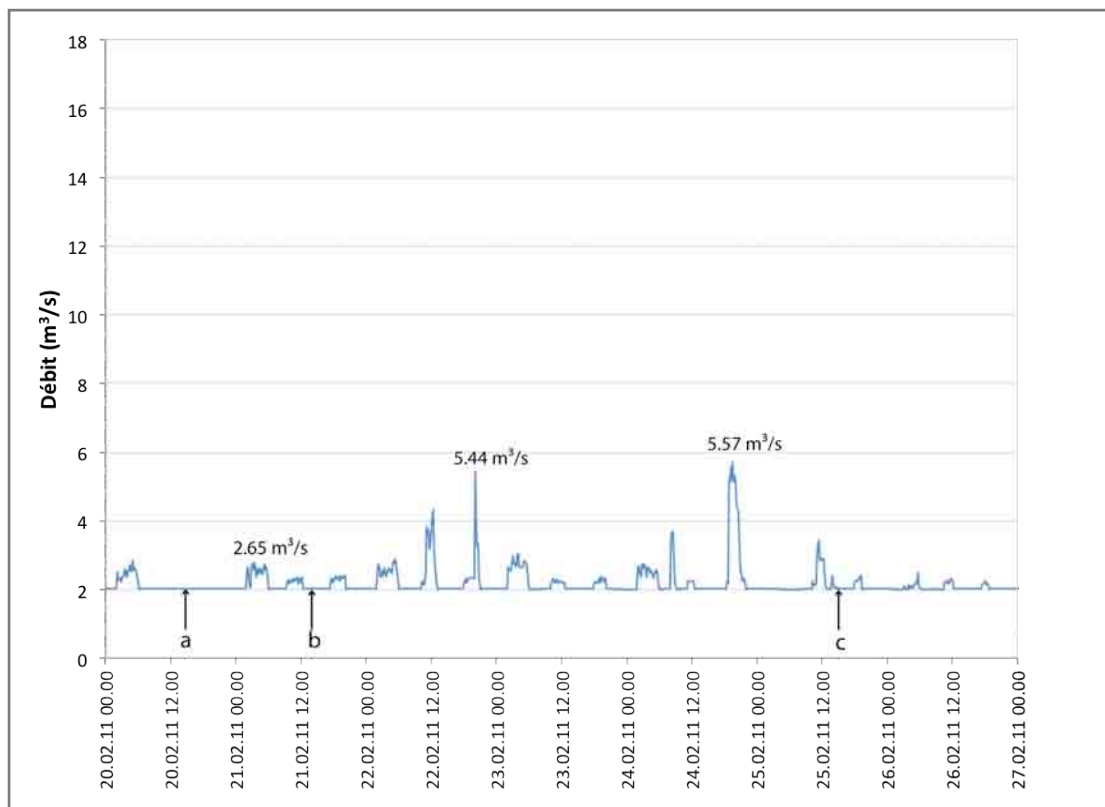


Figure 7.44 - Valeurs de débit enregistrées par la station de Lostallo pendant la semaine du 20 au 27 février 2011. Les lettres a, b, c montrent la séquence des photographies prises à Cama, pendant le travail de terrain (comparer avec la Fig. 7.45).



Figure 7.45 - Séquence d'images prises à Cama le 20 février 2011 à 14:00 (a) ; le 21 février 2011 à 14:00 (b) et le 25 février à 14:30 (c). Le transport de la charge de fond est négligeable.

D) Station de Grono

Pour la station de Grono, nous n'avons pas décelé d'activité sédimentaire importante pendant le mois de février 2011 (Fig. 7.46). Pour les données de débit, nous faisons référence à la sonde de Lostallo (Fig. 7.44).



Figure 7.46 - Séquence d'images prises à Grono montrant que le transport de la charge de fond est négligeable. La première image (a) a été prise le 20 février 2011 à 14:30, la deuxième image (b) le 21 février 2011 à 14:30 et la troisième image (c) le 25 février à 11:30.

Campagne de printemps

Pendant la campagne d'investigation d'avril 2011, le débit de la Moesa était un peu plus élevé que à celui enregistré en automne. La figure 7.50 montre les valeurs de débit enregistrées pendant la semaine d'investigation, du 4 au 10 avril 2011. Les lettres a, b, c montrent la séquence des analyses sédimentaire. Nous remarquons l'absence d'un débit plancher constant, car de oscillations faibles étaient présentes également pendant les premières heures du matin. L'importance du débit et l'absence d'un débit plancher constant (exception faite pour le 6 avril 2011) nous ont empêché de colorier les sédiments du substrat autochtone¹⁹. Nous avons donc opté pour la pose de sédiments allochtones d'une taille granulométrique spécifique comprise entre 7 et 40 mm²⁰ (Chap. 6.5 ; Fig. 6.8 et Fig. 7.48).

Ce type d'analyse permet de saisir la présence ou l'absence de transport sédimentaire, mais ces investigations restent purement de type qualitatif/descriptif et l'analyse quantitative avec le logiciel *Matlab* n'a pas été possible.

¹⁹ Pour le faire, la présence d'un substrat sec est indispensable (Chap. 6.5).

²⁰ Le choix de cette taille granulométrique est lié principalement aux conditions de frai des poissons.

A) Station de Cabbio

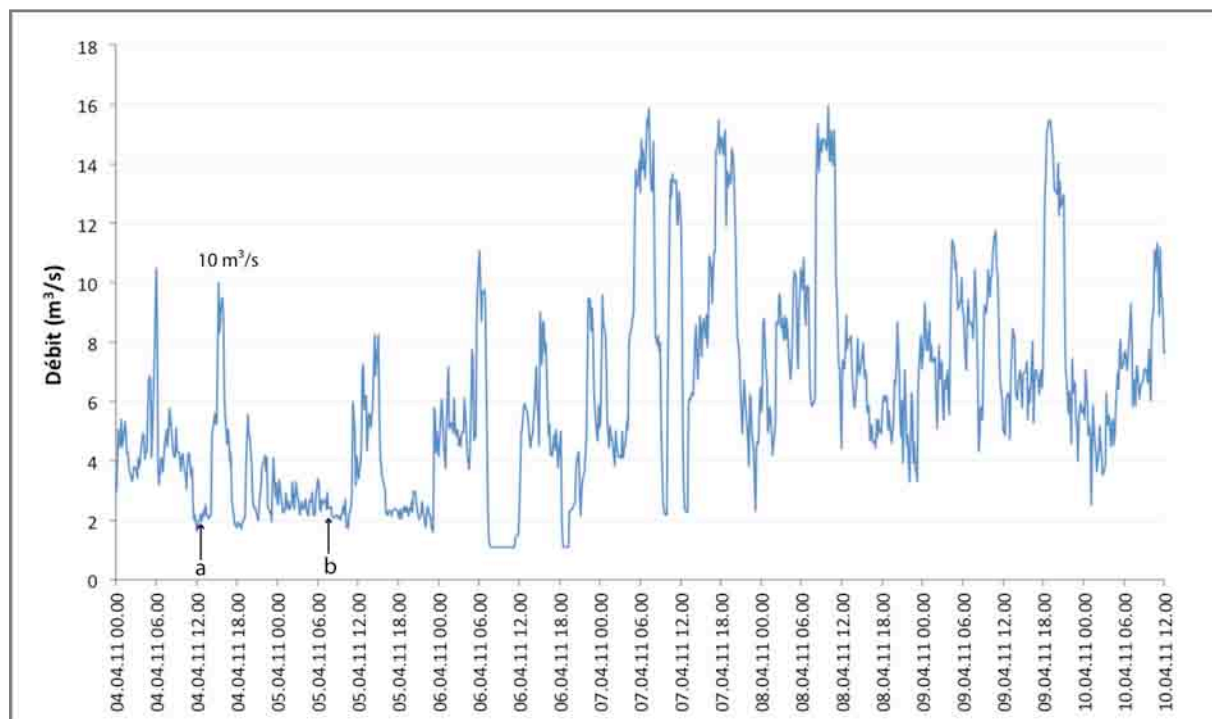


Figure 7.47 - Valeurs de débit recueillies à Cabbio pendant la semaine du 4 au 10 avril 2011. Nous remarquons la présence d'un pic important atteignant $10 \text{ m}^3/\text{s}$ le 4 avril 2011. Les lettres a et b montrent la séquence d'images prises pendant les analyses.

Nous avons observé un déplacement de particules de la charge de fond d'environ 12 mètres (Fig. 7.48). La figure 7.48a illustre la situation avant le débit d'écluse : les grains colorés ont été déposés sur le fond du lit. La figure 7.48b témoigne de la présence de transport sédimentaire.

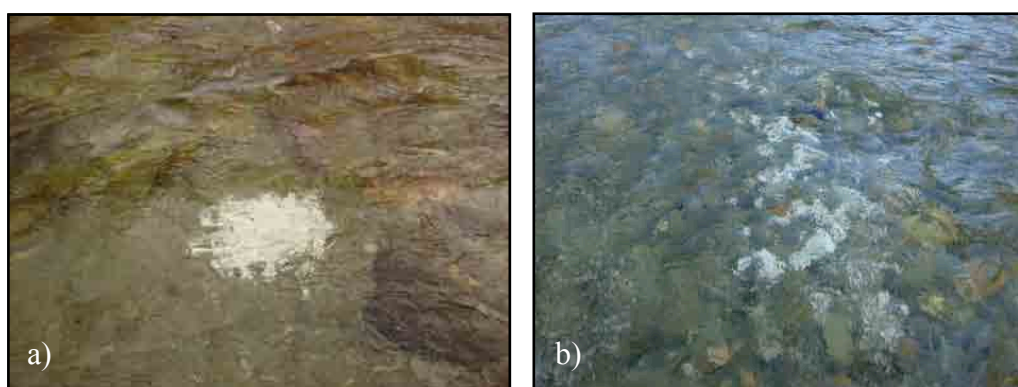


Figure 7.48 - Séquence de deux images présentant la méthode qualitative appliquée pour l'évaluation du transport sédimentaire à Cabbio entre le 4 et le 5 avril 2011 : la première image (a) montre les grains colorés posés avant l'arrivée de la crue artificielle, la deuxième image (b) a été prise après le débit d'écluse et indique un transport important des grains.

A) Station de Cama/Lothallo

A Cama, nous n'avons pas décelé de transport de la charge solide avant et après l'arrivée de la crue artificielle (Annexe A.9). La technique utilisée est la même présentée précédemment (Fig. 7.48).

B) Station de Grono

Pour la station de Grono également, nous n'avons pas observé d'activité sédimentaire. La technique utilisée est la même présentée précédemment (Fig. 7.48).

*D) Station **supplémentaire** de Lumino/Sassello*

Pendant le mois d'avril, nous avons choisi d'observer également le transport présent près de la confluence avec le Ticino et donc, à la station de Lumino/Sassello. Les analyses menées nous montrent un taux d'activité sédimentaire non quantifiable. (Annexe A.10).

7.3.2 La Morobbia

Campagne automnale

L'activité sédimentaire obtenue pour la Morobbia, correspond à 42.60 %, avec une erreur de 11.34 % (Fig. 7.50). L'activité sédimentaire est, dans ce cas, importante. Les valeurs de débit (Fig. 7.49) montrent la présence d'un débit d'écluse qui atteint dans tous les cas près de 5 m³/s.

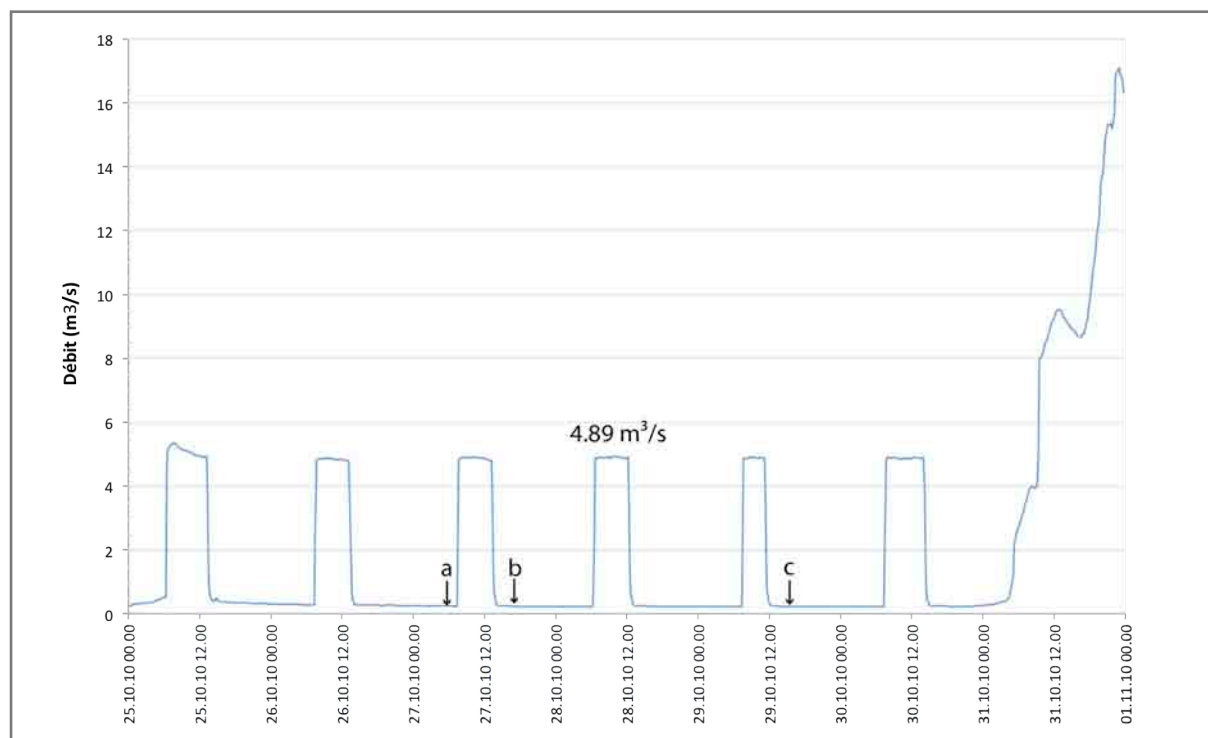


Figure 7.49 - Débit enregistré de la Morobbia pendant la dernière semaine d'octobre 2010. On note la présence d'une crue naturelle entre le 31 octobre et le 1^{er} novembre (comparer avec la Fig. 7.31).



Figure 7.50 - Séquence d'images prises le long de la Morobbia montrant une activité sédimentaire importante. L'image (a) a été prise le 27 octobre 2010 à 07:45, l'image (b) le 27 octobre 2010 à 15:45 et l'image (c) le 29 octobre 2010 à 14:00.

Campagne hivernale

Pendant les analyses menées en janvier le long de la Morobbia, nous avons observé un transport de la charge solide (Fig. 7.52; Fig. 7.54). Les investigations, qui ont été menées en janvier, février et mars 2011, montrent une activité sédimentaire correspondant à 14.70 %, avec un erreur de 1.41 %, entre le 23.01.2011 à 14:00 (Fig. 7.52a) et le 25.01.2011 à 14:00 (Fig. 7.52b) ; de 15.61 %, avec une erreur de 1.01 % entre le 25.01.2011 à 14:00 (Fig. 7.52b) et le 26.01.2011 à 14:00 (Fig. 7.52c).

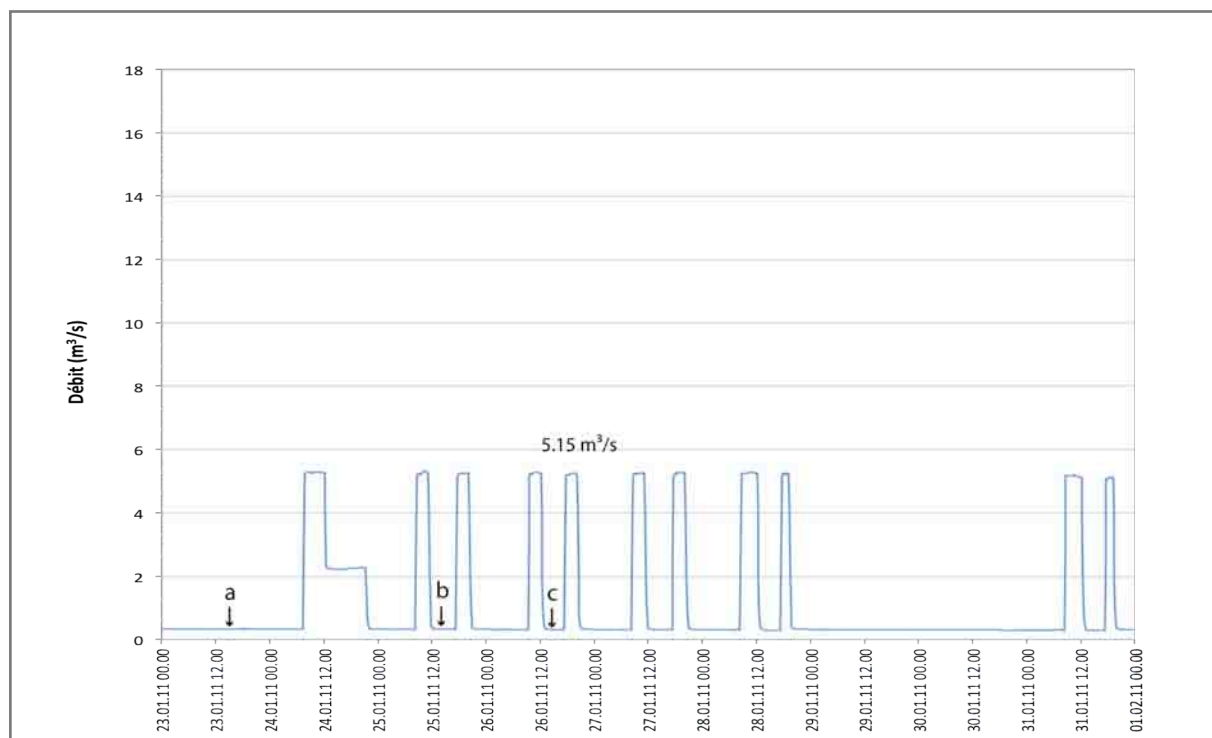


Figure 7.51 - Débit enregistré par la station IST de Giubiasco, pendant la dernière semaine de janvier 2011. Les lettres a, b, c indiquent la séquence d'images (Fig. 7.52).

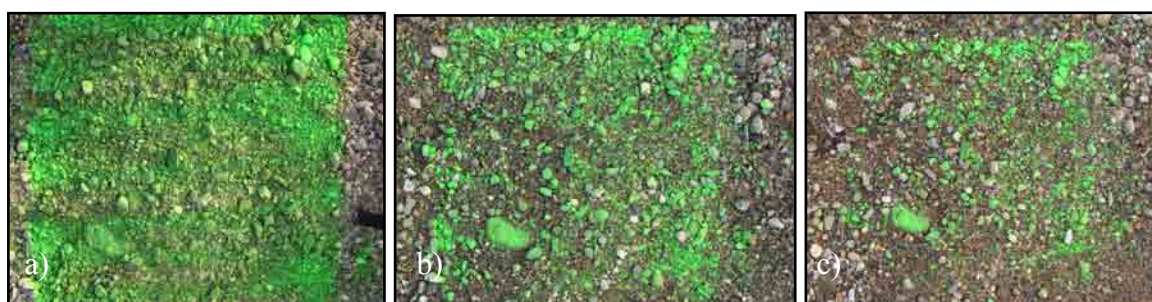


Figure 7.52 - Séquence d'images montrant une activité sédimentaire le long de la Morobbia avec la disparition de sédiments suite aux éclusées. La photo (a) a été prise le 23 janvier 2011 à 14:00, la photo (b) le 25 janvier à 14:00 et la photo (c) le 26 janvier 2011 à 14:00.

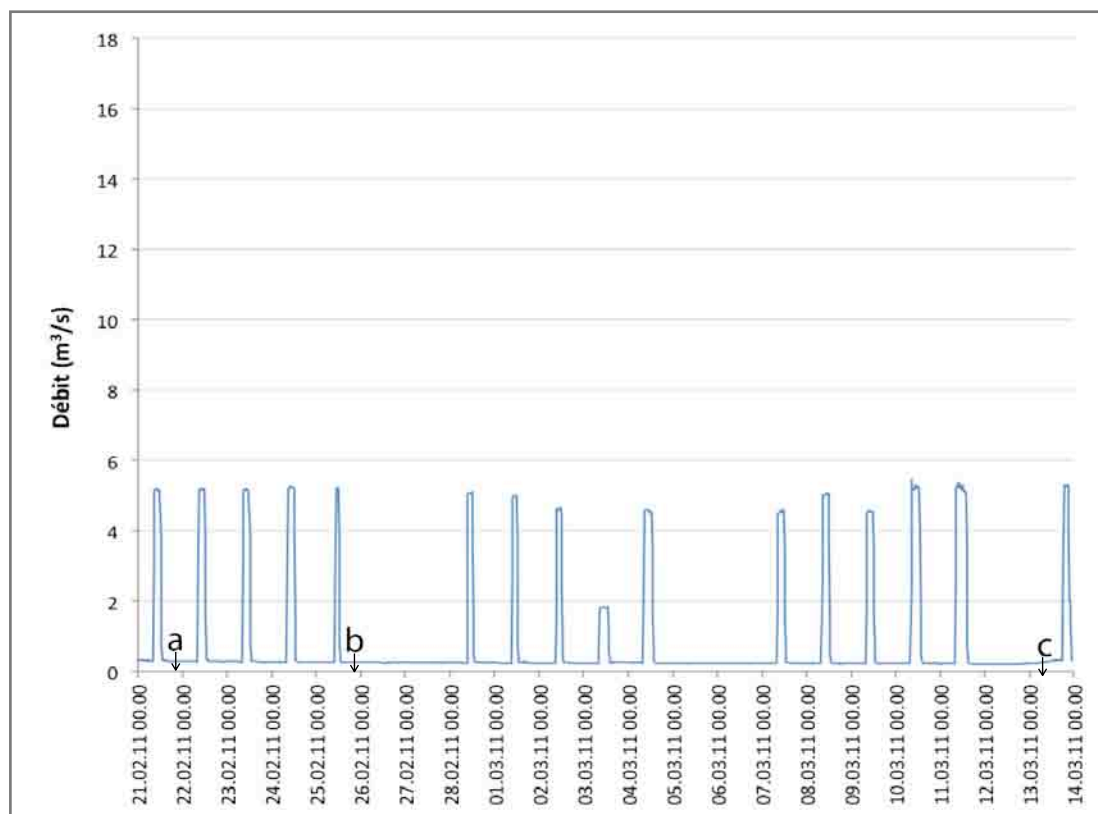


Figure 7.53 - Débit enregistré entre le 21 février et le 14 mars 2011 par la station de Giubiasco (IST). Les lettres a, b, c montrent la séquence de photos prises pendant les analyses du transport sédimentaire.



Figure 7.54 - Séquence d'images mettant en évidence le transport sédimentaire. La première image (a) a été prise le 21 février 2011 à 14:30 ; la deuxième image (b) le 25 février 2011 à 14:30 et la troisième image (c) le 13 mars 2011 à 15:00. Nous soulignons la présence d'érosion et de transport de la charge solide.

En février, l'activité sédimentaire correspond à 27.2 %, avec une erreur de 3.24 %, entre le 21 février 2011 à 14:30 (Fig. 7.54a) et le 13 mars 2011 à 15:00 (Fig. 7.54c).

Campagne du printemps

Pendant la dernière semaine de mars, nous avons posé des sédiments déjà colorés pendant le débit plancher, pour vérifier la présence de transport (Fig. 7.56).

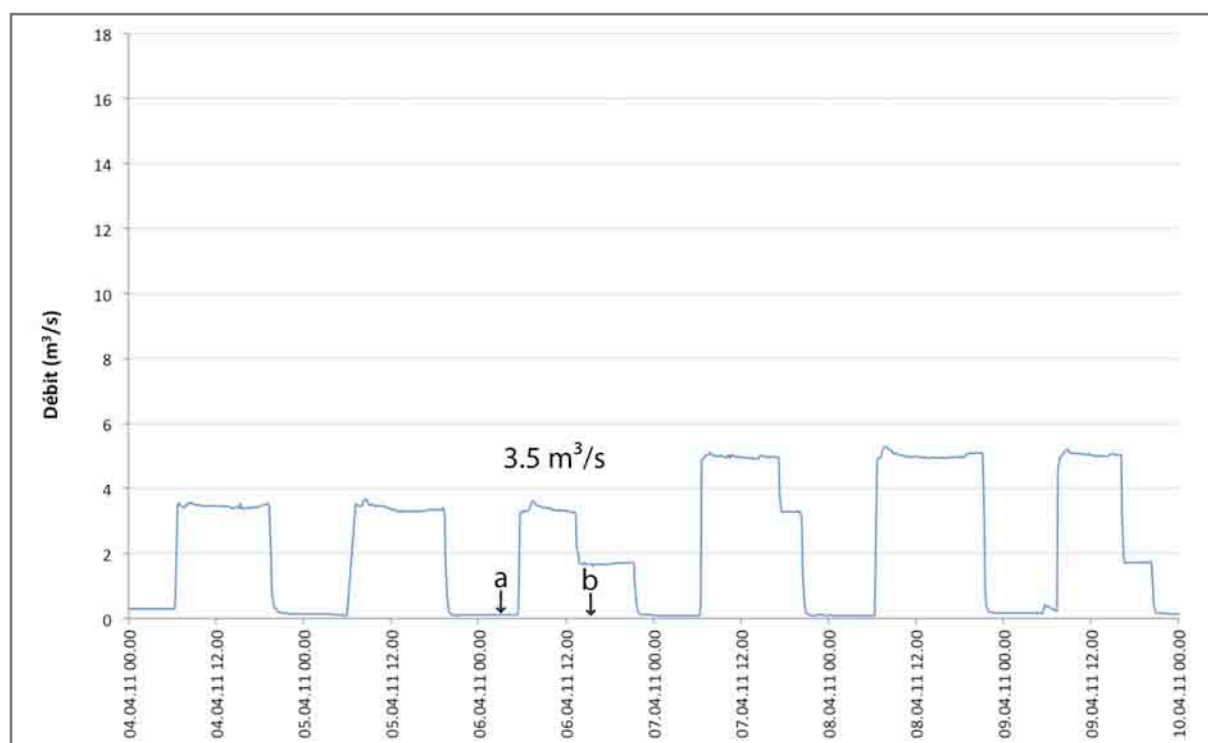


Figure 7.55 - Graphique du débit enregistré entre le 4 et le 10 avril par la station de Giubiasco (IST). Les lettres a et b montrent la séquence de photos prises pendant les analyses du transport sédimentaire.

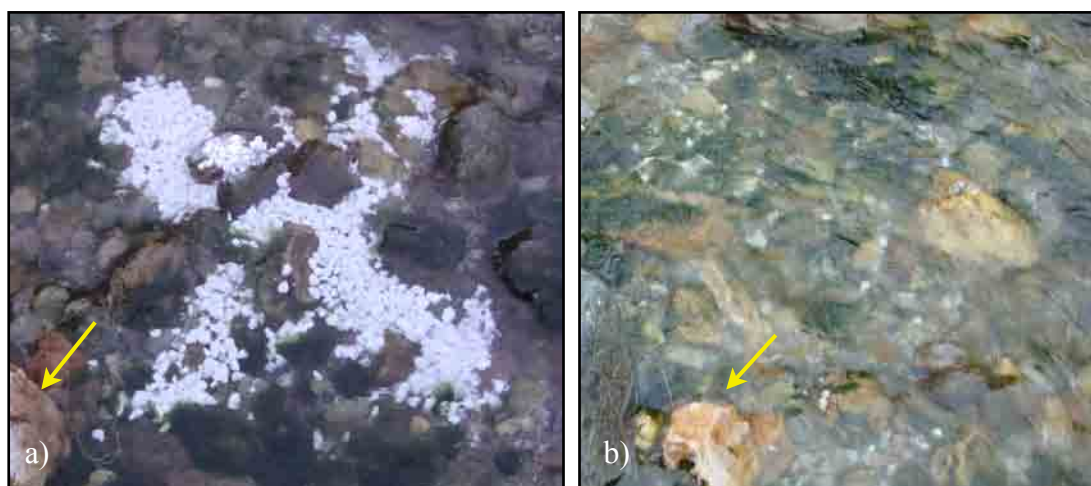


Figure 7.56 - Séquence des deux images, prises le 6 avril 2011, présentant la méthode qualitative mise en pratique pour l'évaluation du transport sédimentaire le long de la Morobbia : la première image (a) montre les grains colorés posés avant l'arrivée de la crue artificielle (le 6 avril 2011 à 08:00), la deuxième image (b) a été prise après le débit d'éclusee (le 6 avril 2011 à 16:00) et indique un transport important des grains. La flèche jaune montre le caillou de référence.

7.3.3 Synthèse

Le transport sédimentaire est différent selon le cours d'eau, la section d'étude et la saison. Le long de la Moesa, nous avons détecté la présence de transport de la charge de fond exclusivement pendant les analyses d'automne et de printemps, quand les rapports Q_{\max}/Q_{\min} se situent à environ 6 m³/s, et exclusivement pour les unités fluviales situées en amont (Cabiolo-Lostallo). Pour la station de Cama, nous n'avons enregistré du transport sédimentaire remarquable qu'en octobre 2010. A Lumino/Sassello, nous n'avons pas observé de transport sédimentaire.

Le long de la Morobbia, la situation est différente : le transport de la charge solide est présent pendant toute la période d'investigation (automne, hiver, printemps). Les rapports Q_{\max}/Q_{\min} sont, pour ce cours d'eau, très élevés pendant toutes les périodes d'analyse (Tabl. 7.18).

7.4 Le colmatage

7.4.1 La Moesa

Note : Les données présentées ici représentent une "image" de la situation pendant la période hivernale 2011. De possibles divergences avec des études utilisant d'autres méthodes et/ou effectuées pendant une autre période d'investigation sont possibles. Une importante crue naturelle peut par exemple conduire une prise en charge des fines déposées sur le lit et fausser le degré de colmatage (qui sera moins important) (Consorzio D.R.I.F.T., 2011).

La figure 7.57, illustre les résultats obtenus suite aux investigations menées le long de la Moesa. Le degré de colmatage du tronçon situé en amont du point de restitution de la centrale de Soazza, est qualifié d'absent, avec un substrat de matériaux grossiers (pierres et graviers), une faible quantité de sable et l'absence de dépôts cohésifs tels que limons et argiles. A Cabiolo (tronçons 21-22), le colmatage est variable, avec une caractérisation de faible à forte. Le substrat est caractérisé par la présence d'interstices vides bien visibles et, dans certains cas, par un substrat fortement consolidé avec une surface de contact formée de 50 % de particules fines et de 50 % de vides. Le long de la Golena Rosera (tronçon 18), nous avons enregistré un fort degré de colmatage avec un substrat consolidé. A Leggia (tronçon 12) et à Pascoletto (tronçon 10), le substrat est caractérisé par un colmatage moyen à fort. Le tronçon de Cama (tronçon 14) est qualifié de faiblement influencé. A Roveredo (tronçon 7), le colmatage est moyen, avec un substrat faiblement consolidé et la présence de dépôts cohésifs. Une situation semblable a été constatée à San Vittore (tronçon 6). A Lumino/Sassello (tronçon 4), le colmatage est "absent" ou "faible".

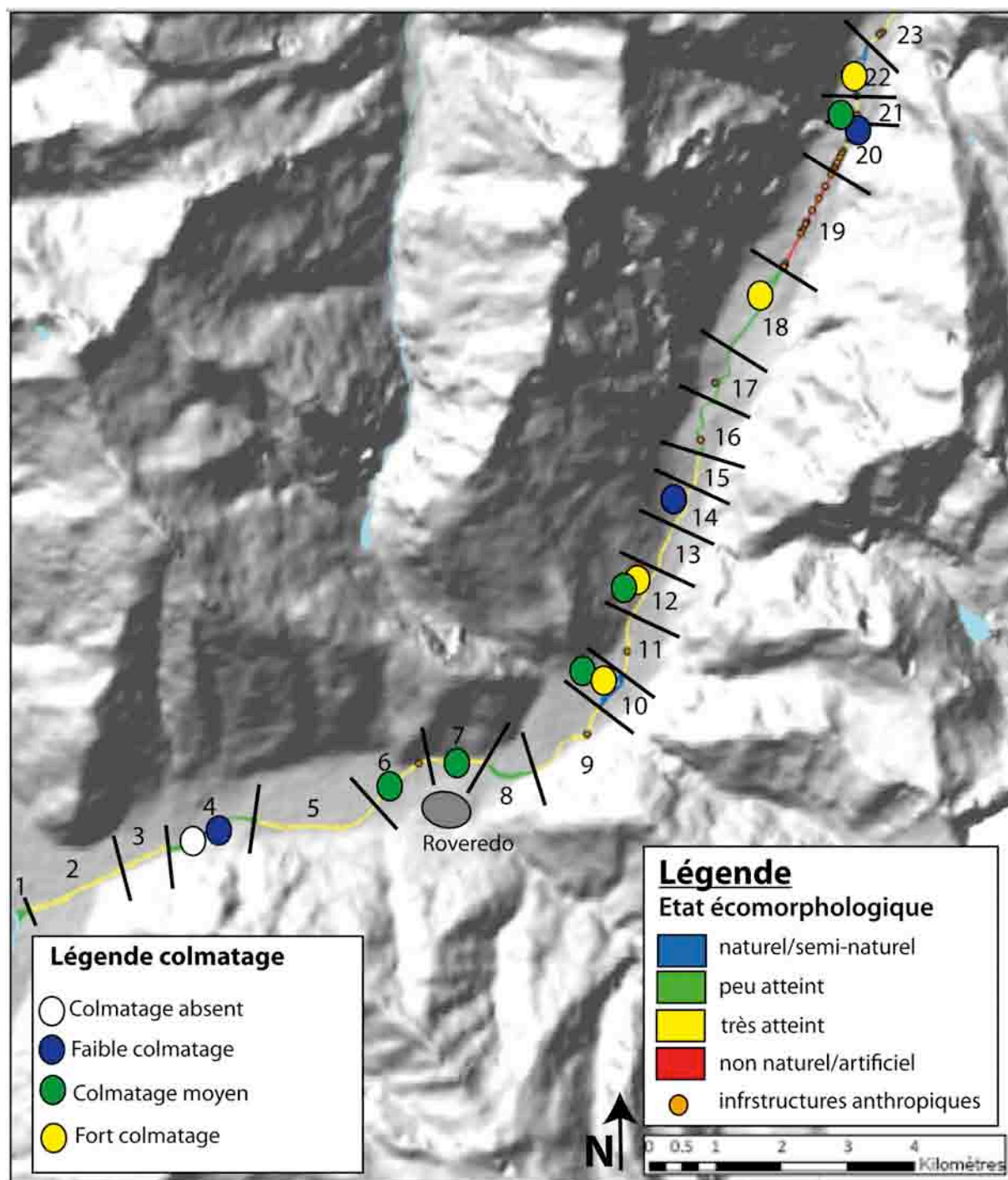


Figure 7.57 - Degré de colmatage rencontré le long de la Moesa. Est présente également l'état écomorphologique de chaque tronçon.

Les stations hydrologiques ont été installées sur le tronçon 19 (Lostallo) et sur le tronçon 20 (Cabbio). La station de mesure fédérale de Lumino/Sassello est localisée sur le tronçon 2.

Les analyses pour l'évaluation de l'activité sédimentaire (Chap. 7.3) ont été menées le long des tronçons 19 et 20 (station 1, Cabbio), les tronçons 14 et 18 (station 2, Lostallo/Cama), les tronçons 9 et 11 (stations 3, Grono) et les tronçons 2, 3 et 4 (station 4, Lumino/Sassello).

7.4.2 La Morobbia

Le long des deux kilomètres de la Morobbia, le colmatage a été analysé sur les cinq tronçons d'étude et il a été qualifié d'absent à faible (Fig. 7.58).

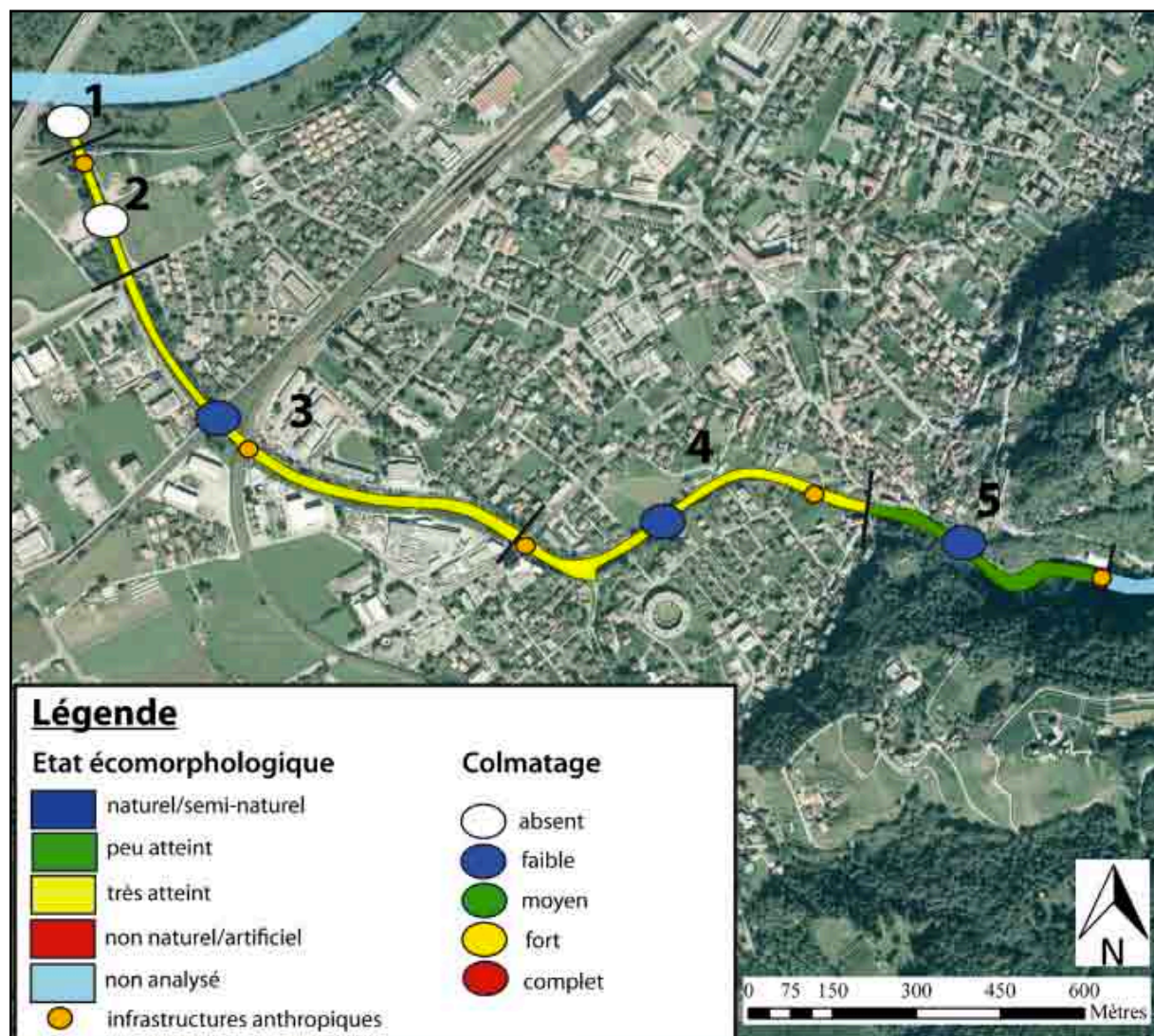


Figure 7.58 - Degré de colmatage rencontré le long de la Morobbia. Est présente également l'état écomorphologique de chaque tronçon.

La station de mesure de Giubiasco est localisée sur le troisième tronçon.

Les analyses consacrées à l'évaluation de la présence du transport sédimentaire ont été effectuées tout le long du cours d'eau, exception faite pour le cinquième tronçon.

7.4.3 Synthèse

Le degré du colmatage se présente différemment le long des deux cours d'eau. Nous présentons ci-dessous un tableau (Tabl. 7.21) résumant les résultats obtenus.

MOESA	Degré du colmatage
Soazza	colmatage absent
Cabbio	colmatage de faible à fort
Golena Rosera	fort colmatage
Cama	faible colmatage
Leggia	colmatage de moyen à fort
Pascoletto	colmatage de moyen à fort
Roveredo	colmatage moyen
San Vittore	colmatage moyen
Lumino/Sassello	colmatage absent et faible

MOROBIA	Degré du colmatage
Tronçon 1	colmatage absent
Tronçon 2	colmatage absent
Tronçon 3	faible colmatage
Tronçon 4	faible colmatage
Tronçon5	faible colmatage

Tableau 7.21 - Degré du colmatage deviné le long de la Moesa et de la Morobbia.

8) Interprétation et analyse des résultats

Dans la partie qui suit, nous abordons l'interprétation et l'analyse des résultats obtenus, pour répondre, dans le chapitre suivant aux questions de départ. Dans un premier temps, nous allons présenter une interprétation des résultats (Chap. 8.1-8.2), suivie d'une analyse plus détaillée (Chap. 8.3 - Chap. 8.6) en nous référant aux sections d'étude présentées dans le chapitre méthodologique (Chap. 6.1).

8.1 La Moesa

8.1.1 Caractérisation du comportement hydrologique

Le comportement hydrologique de la Moesa montre des oscillations de débit assez variables, de l'amont vers l'aval et selon la saison (automne, hiver et printemps).

Le tronçon situé en amont de Soazza, qui n'est pas sujet au phénomène du marnage, présente des débits moyens de 1.13 m³/s en janvier 2011 et 1.08 m³/s en avril 2011. Par contre, les tronçons situés en aval de Soazza présentent un régime d'éclusées. Sur les graphiques des stations de Cabbio et, de manière moins marquée, de Lostallo, on distingue trois grandes périodes hydrologiques : le régime d'automne, le régime d'hiver et le régime de printemps. La première et la troisième période montrent une amplitude des oscillations importante, avec des minima à Cabbio d'environ 1.50 m³/s et des maxima d'environ 15 m³/s (en excluant les crues naturelles) ; la deuxième période, qui concerne le régime hivernal, se distingue de manière évidente, avec des débits atteignant une valeur maximale de 9.46 m³/s. C'est une situation assez normale au Sud des Alpes (Aschwanden et Weingartner, 1985), due à de faibles précipitations qui restent stockées sous forme de neige. En hiver, on observe également une moindre fréquence et amplitude des pics : **la production hydroélectrique est inférieure par rapport à celle enregistrée en automne et au printemps**. A Cabbio, par exemple, le rapport moyen mensuel entre le débit plancher et le débit d'éclusée (Q_{\max}/Q_{\min}) correspond à 6.58 : 1 en octobre 2010, à 2.77 : 1 en janvier 2011, et à 6.40 : 1 en avril 2011²¹. Il en est de même pour l'indice HP₁, qui présente des valeurs de 2.49 m³/s en octobre 2010, 1.38 m³/s en janvier 2011 et 1.80 m³/s en avril 2011. Une situation semblable a été enregistrée par la station de Lumino/Sassello, avec un rapport Q_{\max}/Q_{\min} de 3.16 : 1 en octobre 2010, 1.89 : 1 en janvier 2011 et 2.28 : 1 en avril 2011²². Les valeurs de l'indice HP₁ équivalent à 1.18 m³/s en octobre 2010, 0.66 m³/s en janvier 2011 et 0.85 m³/s en avril 2011. Pour cette station hydrologique, pendant le mois d'avril, la différence entre débit d'éclusée et débit plancher est faiblement inférieure à celle enregistrée pendant le mois d'octobre. Cela pourrait être expliqué par le

²¹ Voir les données moyennes mensuelles (Tabl. 7.15).

²² Voir les données moyennes mensuelles (Tabl. 7.17).

régime hydrologique de la Moesa : au sud de Soazza, elle est influencée par un régime de type nivo-pluvial méridional (Haller *et al.*, 2007), avec un maximum au printemps. Cet apport liquide, permet d'accroître le débit plancher du cours d'eau et par conséquent, de réduire le rapport Q_{\max}/Q_{\min} . Au moyen des données hydrologiques, nous avons également établi l'existence de variations de l'amont vers l'aval, pendant la même période d'analyse (même jour). Les rapports Q_{\max}/Q_{\min} enregistrés à Cabbio sont plus importants que ceux relevés par la station de Lumino/Sassello : **une atténuation progressive du régime d'éclusées est présente au fur et à mesure qu'on se rapproche du point de confluence avec le Ticino**. Les raisons de cette tendance peuvent être liées à l'éloignement du point de restitution des eaux turbinées et plus particulièrement à l'influence des affluents et des eaux de ruissellement. Les valeurs du débit plancher augmentent vers l'aval et provoquent une diminution du rapport Q_{\max}/Q_{\min} : **le rôle du débit minimal semble être important car il permet d'augmenter le débit plancher et de réduire par conséquent l'ampleur des oscillations Q_{\max}/Q_{\min}** . Une même tendance a été mise en évidence par l'indice HP_1 , qui montre des valeurs plus faibles près de la confluence avec le Ticino.

Les sondes hydrologiques utilisées à Cabbio et à Lostalio ont permis d'obtenir également des valeurs de température. Malheureusement, à cause des fortes variations du niveau d'eau, les sondes sont restées à sec pendant le débit plancher, en enregistrant les valeurs de la température de l'air et nous ont empêché d'enregistrer des données fiables, de façon continue. A cause de ce manque, l'analyse du régime thermique d'octobre et de janvier est lacunaire, pour la station de Cabbio et nous avons choisi de ne pas reporter les données.

Les indices présentés auparavant (Q_{\max}/Q_{\min} et HP_1) montrent un comportement hydrologique du cours d'eau identique : les oscillations s'affaiblissent de l'amont vers l'aval et selon la saison (en hiver). Malgré cela, nous avons saisi certaines différences entre les deux indices que nous aimerions analyser et interpréter (Fig. 8.1 - 8.4). Pour chaque station, nous avons proposé deux graphiques : à gauche, nous présentons les valeurs standardisées des deux indices ; à droite, la différence entre l'indice HP_1 et le rapport Q_{\max}/Q_{\min} , qui permet de saisir la possible surévaluation et/ou sous-évaluation du rapport Q_{\max}/Q_{\min} . Si le résultat est positif, le rapport Q_{\max}/Q_{\min} a sous-estimé l'ampleur des oscillations ; si, au contraire, le résultat est négatif, le rapport Q_{\max}/Q_{\min} a été sur-estimé.

Au moyen des graphiques (Fig. 8.1 - 8.3), nous comprenons que l'évaluation de l'ampleur des oscillations le long de la Moesa, est assez semblable, si nous employons l'indice Q_{\max}/Q_{\min} ou HP_1 . La différence entre les valeurs calculées au moyen du rapport Q_{\max}/Q_{\min} et de l'indice HP_1 est faible.

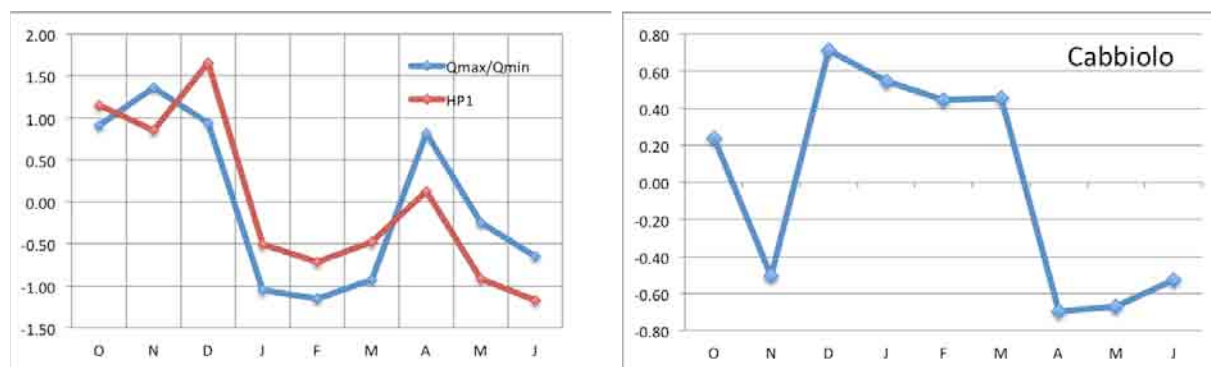


Figure 8.1 - Valeurs standardisées des indices Q_{max}/Q_{min} et HP_1 à la station de Cabbio. A gauche, nous pouvons remarquer la présence de faibles différences (p.ex. pour le mois de novembre). A droite, le graphique permet de comprendre la surestimation et/ou la sous-estimation provoquée par le rapport Q_{max}/Q_{min} . Si les valeurs sont positives, le rapport Q_{max}/Q_{min} sous-évalué l'ampleur des oscillations (p.ex. de décembre à mars) et vice versa.

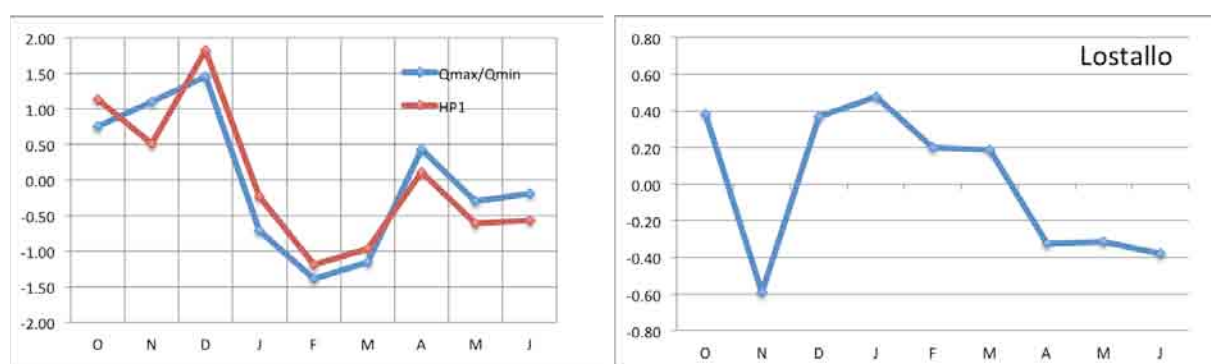


Figure 8.2 - Valeurs standardisées des indices Q_{max}/Q_{min} et HP_1 à la station de Lostalio. A gauche, nous pouvons remarquer la présence de faibles différences (p.ex. pour le mois de novembre). A droite, le graphique permet de comprendre la surestimation et/ou la sous-estimation provoquée par le rapport Q_{max}/Q_{min} . Si les valeurs sont positives, le rapport Q_{max}/Q_{min} sous-évalué l'ampleur des oscillations et vice versa.

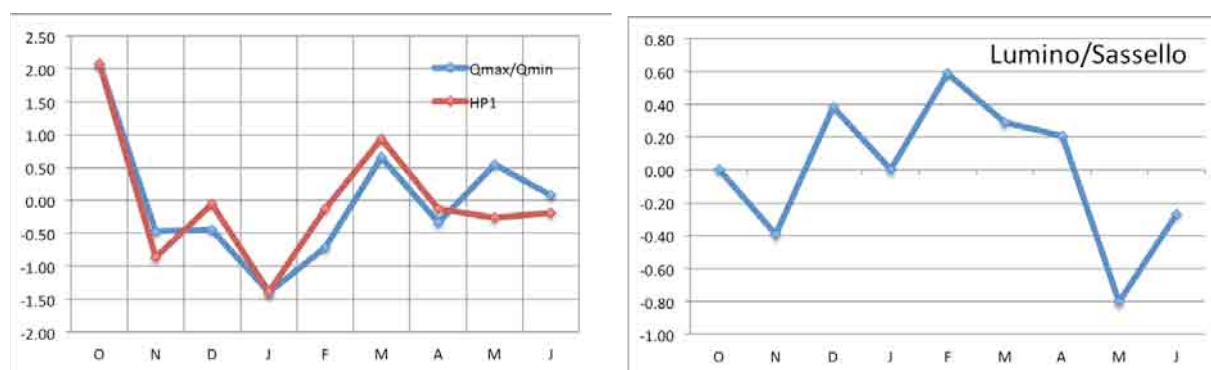


Figure 8.3 - Valeurs standardisées des indices Q_{max}/Q_{min} et HP_1 à la station de Lumino/Sassello. A gauche, nous pouvons remarquer la présence de faibles différences. A droite, le graphique permet de comprendre la surestimation et/ou la sous-estimation provoquée par le rapport Q_{max}/Q_{min} . Si les valeurs sont positives, le rapport Q_{max}/Q_{min} sous-évalué l'ampleur des oscillations et vice versa.

8.1.2 Caractérisation de l'activité sédimentaire

L'influence du marnage sur l'activité sédimentaire semble aller de pair avec celle des variations hydrologiques, avec **une diminution des effets sur le transport de la charge solide, de l'amont vers l'aval et selon la saison.**

Les analyses menées permettent de noter la présence de transport sédimentaire à Cabbio (station 1) pendant les mois d'octobre et d'avril. En descendant vers aval, déjà à partir de Cama (station 2), l'activité sédimentaire devient plus faible, pour atteindre des valeurs presque nulles à Grono (station 3) et à Lumino/Sassello (station 4). Cela signifie que, comme dans le cas du comportement hydrologique, **au fur et à mesure que l'on s'approche de la confluence avec le Ticino, les effets du marnage sur la prise en charge des sédiments s'affaiblissent.** Une explication peut être fournie par les variations des amplitudes entre Q_{\max}/Q_{\min} : si la différence entre le débit d'écluse et le débit plancher n'est pas élevée (faible rapport), le transport de la charge solide est réduit. **En hiver, nous avons une activité sédimentaire négligeable sur toutes les sections d'étude : la diminution du débit, de l'amplitude et de la fréquence des oscillations ne permet pas le transport des matériaux fluviaux.**

Les résultats montrent une variabilité de l'activité sédimentaire dans l'espace et dans le temps (selon la saison d'étude) ; cette variabilité nous a permis d'identifier un "rapport seuil hypothétique" avec lequel des changements de la dynamique sédimentaire se produisent avant et après le débit d'écluse. Les graphiques et tableaux présentés auparavant (Chap. 7.2), montrent que la section fluviale de Lumino/Sassello comporte, en excluant les crues naturelles, des rapports Q_{\max}/Q_{\min} inférieurs à 6 m³/s. Pour cette station, nous n'avons pas décelé de transport sédimentaire. Pour la section fluviale de Cabbio, une certaine activité sédimentaire a été enregistrée en automne et au printemps, uniquement quand la production hydroélectrique était importante et le rapport Q_{\max}/Q_{\min} supérieur à 6 : 1. Grâce à ces données, nous avons pu repérer une différence d'activité sédimentaire et **déterminer le "rapport seuil" à 6 : 1, au-dessus duquel, on enregistre du transport de la charge de fond le long de la Moesa.** Chaque fois que ce rapport n'atteignait pas cette valeur (en hiver, ou pour les stations situées plus en aval), aucun transport de sédiments n'a été enregistré.

8.1.3 Caractérisation du colmatage

Le degré du colmatage est assez variable le long de la Moesa. En général, nous avons noté que dans les unités fluviales signalées par une largeur du lit importante, notamment la zone alluviale de Golena Rosera (tronçon 18) et celle de Pascoletto (tronçon 10), le colmatage est de type cohésif (degré de colmatage important), avec une dominance de matériaux fins tels que l'argile et le limon. Au contraire, pour les unités à lit plus étroit (Cama - tronçon 14, Lumino/Sassello - tronçon 10), le colmatage est moins marqué.

Nous pouvons conclure que, après une correction fluviale, notamment un élargissement du parcours, le cours d'eau s'adapte aux nouvelles conditions, en modifiant sa dynamique sédimentaire : les tronçons élargis voient la vitesse d'écoulement diminuer et par conséquent, la capacité de transport est fortement réduite, ce qui permet le dépôt de sédiments et la formation de bancs. **Dans les sections fluviales où le lit a été élargi, la tendance à la sédimentation des matériaux augmente (Chap. 3 ; Fig. 3.9).** Les cours d'eau renaturés qui subissent un régime à marnage, présentent des variations importantes de la surface mouillée (différence élevée entre débit d'éclusee et débit plancher). Nous pouvons supposer que les changements de la vitesse et de la surface d'écoulement augmentent le colmatage : pendant le débit d'éclusee, les sédiments fins sont pris en charge par le courant et sont déposés au fur et à mesure que la vitesse diminue, provoquant une augmentation du degré du colmatage (qui s'enregistre pendant le débit plancher).

8.2 La Morobbia

8.2.1 Caractérisation du comportement hydrologique

Les données hydrologiques recueillies pendant la période d'analyse, indiquent que les variations du débit sont régulières dans le temps (saison, semaine et jour). Le débit d'éclusee atteint toujours, à l'exception des crues naturelles, environ 5 m³/s et le débit plancher ne dépasse pas 0.3 m³/s (même si de faibles oscillations sont enregistrées), avec un débit plancher pendant le weekend, la nuit et en fin d'après-midi et un débit d'éclusee pendant la journée. **A l'inverse de la Moesa, la Morobbia ne subit pas de variations saisonnières du débit** (Q_{\max}/Q_{\min} moyen mensuel = 21.55 : 1 en octobre 2010, 10.92 : 1 en janvier 2011 et 42.29 : 1 en avril 2011 ; HP_1 moyen mensuel = 1.12 m³/s en octobre 2010, 2.17 m³/s en janvier 2011 et 2.09 m³/s en avril 2011). **Seul fait saillant : au printemps, le débit d'éclusee persiste plus longtemps pendant la journée.**

Les données hydrologiques récoltées le long de la Morobbia, fournissent également des informations intéressantes sur la température qui semble subir de rapides diminutions à l'arrivée de la crue artificielle. Comme déjà indiqué par Baumann et Klaus (2003), des variations peuvent se produire le long des tronçons à marnage. Dans les quatre graphiques présentés (Fig. 7.31 - 7.34), une diminution d'environ 1 à 4 °C pendant l'arrivée du débit d'éclusee a été mesurée. **Il faut donc conclure que le régime thermique de la Morobbia subit des variations importantes liées à la production d'énergie hydroélectrique.** La courbe naturelle de la température, en fait, devrait présenter une forme sinusoïdale avec des valeurs plus basses pendant la nuit et le matin et des valeurs maximales en début de soirée (Baumann et Klaus, 2003), ce qui n'est pas le cas pour la Morobbia.

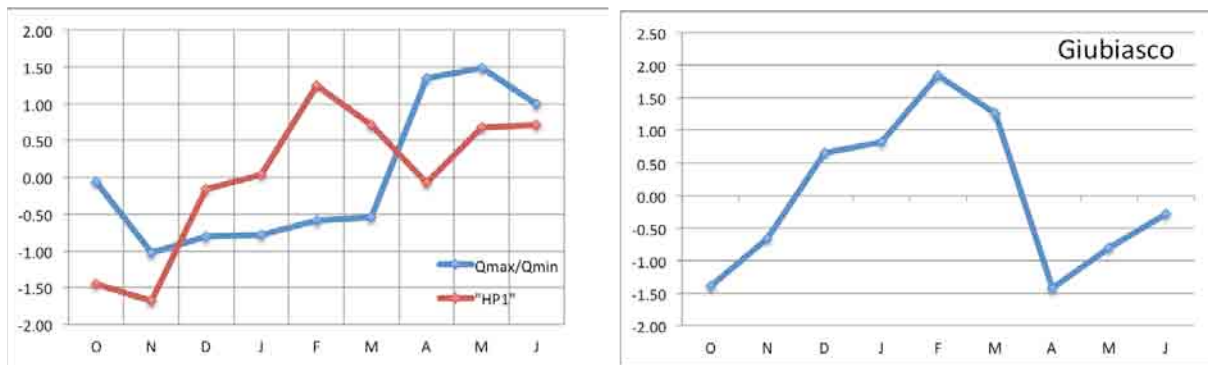


Figure 8.4 - Valeurs standardisées des indices Q_{max}/Q_{min} et HP_1 à la station de Giubiasco. A gauche, nous pouvons remarquer la présence d'importantes différences. A droite, le graphique permet de comprendre la surestimation et/ou la sous-estimation provoquée par le rapport Q_{max}/Q_{min} . Si les valeurs sont positives, le rapport Q_{max}/Q_{min} sous-évalue l'ampleur des oscillations et vice versa. On note une surévaluation du phénomène en automne et au printemps et une sous-évaluation en hiver.

La figure 8.4 montre d'importants contrastes entre les valeurs obtenues à partir de l'indice HP_1 et du rapport Q_{max}/Q_{min} . La différence entre les deux est, pour le cas de la Morobbia, très élevée et nous remarquons une surévaluation du phénomène (en octobre, novembre, avril, mai et juin) et, plus particulièrement, une sous-évaluation (pendant l'hiver, de décembre à mars). Cela signifie que le facteur Q_{max}/Q_{min} sous-évalue l'amplitude des oscillations en hiver. Les raisons pourraient être liées à l'importance du débit moyen, beaucoup plus faible en hiver, qui est considéré par l'indice HP_1 et qui permet de proportionner l'intensité du phénomène.

8.2.2 Caractérisation de l'activité sédimentaire

Les analyses consacrées à la quantification de l'activité sédimentaire montrent la présence du transport de la charge solide pendant toute la période d'analyse. Nous pouvons relier ce constat aux valeurs du débit enregistrées : l'ampleur et la fréquence des variations sont élevées pour les trois saisons examinées, avec un facteur Q_{max}/Q_{min} toujours supérieur à 6 m³/s, exceptés les jours à production hydroélectrique nulle (le week-end).

D'après les données recueillies pour la Morobbia, nous pouvons **confirmer le "rapport seuil" de 6 :1, presque tout le temps dépassé, relevé pour la Moesa.**

8.2.3 Caractérisation du colmatage

Le long de la Morobbia, nous n'avons pas enregistré de zones à haut degré de colmatage. Le fait que ce cours d'eau a un lit très étroit, environ 10 m, ne permet pas une grande variabilité de la surface mouillée entre le débit d'écluse et le débit plancher, et nous fait supposer que le colmatage est empêché.

8.3 Synthèse par unité fluviale

Note importante : dans le chapitre 7, nous avons présenté des tableaux résumant les valeurs maximales et minimales du débit, du niveau d'eau et de la température. Nous avons également calculé le rapport entre le débit d'éclusee et le débit plancher (Q_{max}/Q_{min}), proposé par Baumann et Klaus (2003), les indicateurs HP_1 et HP_2 , présentés par Meile et al., (2011), la variation du niveau d'eau et la variation de la température. Ici nous ne donnons de l'importance qu'au rapport Q_{max}/Q_{min} et aux variations du niveau d'eau et de la température, en faisant abstraction des indicateurs HP_1 et HP_2 . La motivation de ce choix est liée aux critères cités par l'Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux), modifiée le 4 mai 2011, qui prévoient l'analyse d'éventuelles atteintes graves au système au moyen des valeurs obtenues à partir du rapport Q_{max}/Q_{min} . En utilisant l'indice proposé par Baumann & Klaus (2003), il sera ainsi possible de se relier aux actes législatifs et de donner une évaluation sur les effets du marnage le long des deux cours d'eau étudiés.

Dans le cadre méthodologique (Chap. 6.1), nous avons présenté la division en quatre stations d'étude (respectivement quatre unités fluviales) le long de la Moesa. La Morobbia, au contraire, vu sa longueur d'investigation, n'a pas été divisé en unités fluviales. Afin de mettre en lumière les impacts du marnage, l'ensemble des informations recueillies le long des cours d'eau a été reporté dans des tableaux résumant "l'état de santé" de chaque unité fluviale (Fig. 8.5 - 8.9). Pour chaque section sont reportés les traits suivants : une description et localisation de l'unité étudiée, l'état écomorphologique général et les effets du régime à marnage sur l'hydrologie et sur la dynamique sédimentaire. L'évaluation des effets du régime à éclusee est possible grâce à la division en trois classes (et trois couleurs) : faible impact du marnage (en vert), impact moyen (en jaune), et fort impact (en rouge). Lorsque les données étaient lacunaires, il n'a pas été possible d'effectuer une évaluation des effets et aucune couleur n'a été donnée (en blanc).

Moesa - section 1 (Fig. 8.5) : La station la plus au Nord, située entre Soazza et Lostallo, subit de manière marquée les effets du régime à marnage : le point de restitution de la centrale de Soazza (Q_{max} turbiné = 14 m³/s) (Tabl. 5.1), influence notablement le régime hydrique. La centrale de Lostallo (Q_{max} turbiné = 4 m³/s) (Tabl. 5.1) a une moindre importance. Nous pouvons distinguer trois périodes hydrologiques : (1) le régime d'automne, comportant une amplitude des oscillations importantes (Q_{max}/Q_{min} moyen = 6.58 : 1 en octobre 2010) ; (2) le régime d'hiver, caractérisé par une production hydroélectrique fortement réduite et désigné par un rapport Q_{max}/Q_{min} moyen de 2.77 : 1 en janvier 2011 ; et (3) le régime du printemps, présentant des oscillations journalières importantes (Q_{max}/Q_{min} moyen = 6.40 : 1 en avril 2011). En hiver, les valeurs très faibles du débit plancher provoquent certainement des conséquences négatives à la disponibilité en habitats et à l'écologie (Fig. 8.10).

L'analyse du régime thermique présente des données incomplètes et peu fiables. À cause du grand manque de données, il est clair toutefois que la situation enregistrée à Cabbio n'est pas représentative de l'état thermique de la rivière et nous ne pouvons pas nous prononcer sur les effets du marnage sur la température.

L'activité sédimentaire est fortement dépendante du régime hydrique : le transport de la charge solide est visible seulement pendant l'automne et le printemps. En hiver, aucun transport de la charge solide n'a été observé.

Le colmatage ne présente pas de déficits importants.

Des faiblesses sont également enregistrables au niveau structurel, avec un aménagement du fond du lit localisé et une monotonie de la disponibilité en habitats (structure endiguée, état écomorphologique fortement compromis/artificiel) (Fig. 7.1).

Moesa - section 2 (Fig. 8.6) : La morphologie des tronçons appartenant à cette station fluviale est meilleure par rapport à la précédente, avec des tronçons peu compromis (Golena Rosera et la zone de Norantola) et des tronçons fortement compromis (de Norantola à Leggia) (Fig. 7.1). Les effets des éclusées sont assez semblables à ceux observés sur la première unité : les rapports Q_{\max}/Q_{\min} sont, en général, élevés en automne et au printemps (Q_{\max}/Q_{\min} moyen = 4.01 : 1 en octobre 2010 et 3.69 : 1 en avril 2011) et sont plus faibles en hiver (Q_{\max}/Q_{\min} moyen = 2.53 : 1 en janvier 2011). Le transport sédimentaire est peu présent le long de cette unité fluviale. Le colmatage relève des insuffisances le long des tronçons à grande variabilité de la surface du lit, désignés par un haut degré de cohésion. D'autres zones moins influencées, à faible colmatage, sont présentes à Cama et à Leggia (Fig. 7.57 ; Tabl. 7.21).

Moesa - section 3 (Fig. 8.7) : Pour cette unité fluviale, nous avons pris en considération les oscillations hydrologiques mesurées par la station de Lostallo (section 2). Les effets sur le transport de la charge de fond sont absents ; au contraire, l'influence sur le colmatage est marquée (de moyen à fort) (Fig. 7.57 et Tabl. 7.21). L'état écomorphologique est assez satisfaisant, grâce à la revitalisation de Pascoletto et à la présence, en général, d'une grande variabilité de la surface mouillée, qui accroît la diversité des habitats.

Moesa - section 4 (Fig. 8.8) : Cette section fluviale subit de manière fortement atténuée les effets du régime à marnage. Le rapport entre le débit d'éclusee et le débit plancher correspond à 3.16 : 1 en octobre 2010, à 1.89 : 1 en janvier 2011 et à 2.28 : 1 en avril 2011 (Tabl. 7.17). Aucun mouvement des grains du lit n'a été enregistré. Le colmatage ne présente pas de points excessivement négatifs. Au niveau morphologique, cette unité témoigne d'une variabilité satisfaisante, surtout à proximité du Ticino.

La Morobbia (Fig. 8.9) : Le régime hydrique de la Morobbia est fortement influencé par le marnage, avec des valeurs du débit plancher de 0.3 m³/s et des valeurs du débit d'éclusee d'environ 5 m³/s. Par conséquence, les rapports Q_{\max}/Q_{\min} sont assez élevés (valeur moyenne annuelle = 22.87 : 1) (Tabl. 7.19).

Au niveau thermique, le marnage a des effets remarquables : la température diminue d'environ 1 - 4 °C pendant l'arrivée du débit d'éclusee. Nous avons observé du transport sédimentaire pendant toute la période d'investigation. Au contraire, pour ce qui concerne le colmatage, nous n'avons pas enregistré de zones à haut degré cohésif.

Ce cours d'eau, pauvrement structuré, présente des dysfonctionnements morphologiques et hydriques importants.

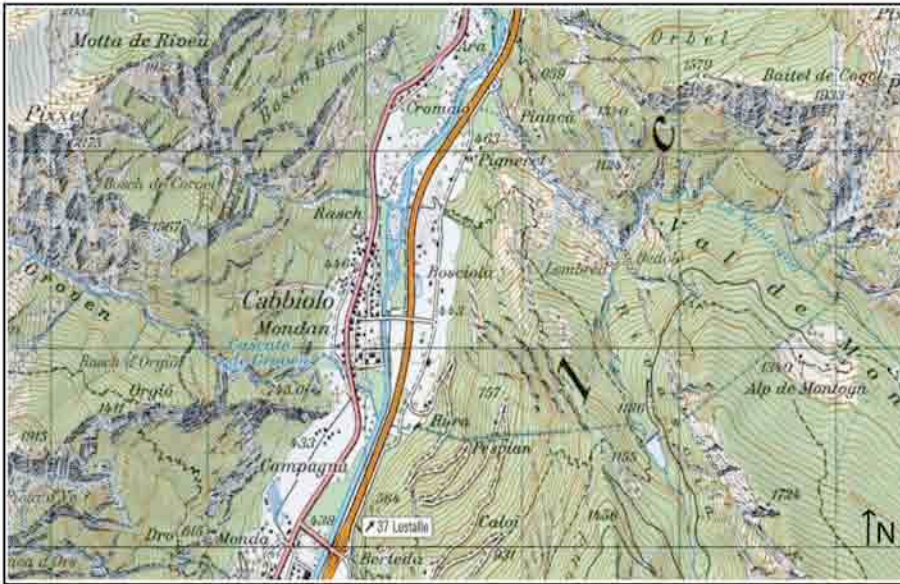
Section 1	Du point de restitution de la centrale de Soazza (GR) jusqu'au village de Lostalio (GR) (pont)	
Localisation	736'839 / 133'523 - 735'493 / 130'452	22'092- 19'181 m
Caractéristiques	<p>Présence du point de restitution de la centrale de Soazza (OIM) et celle de Lostalio (Elina SA)</p> <p>Affluents: La montogna ; Ri de Rasch ; Ria di Mondan ; Ria de Bogiasch</p> <p>Longueur : 2.9 km</p>	
		
Etat général		
Ecomorphologie		Présence de lacunes morphologiques importantes. Les tronçons situés entre Soazza et Lostalio présentent un état fortement compromis (existence d'obstacles à la libre circulation des poissons) malgré l'introduction des gros blocs favorisant la formation des zones de mouille. Le Q_{min} limite fortement la disponibilité en habitats.
Régime hydrique		Le régime hydrique est fortement compromis, caractérisé par un débit plancher persistant en hiver et des oscillations journalières importantes en automne et au printemps (Q_{max}/Q_{min} moyen = 6.58 : 1 en octobre; 6.40 : 1 en avril).
Température		Les données mesurées sur cette section fluviale ne donnent pas d'informations fiables et représentatives pour la période d'été.
Colmatage		Le degré de colmatage est assez variable, avec une caractérisation de faible à forte.
Activité sédimentaire		Pendant l'automne et le printemps, l'activité sédimentaire est notable (transport maximal journalier de 12 m). Au contraire, en hiver l'impact du régime à marnage sur la charge solide est inexistant.

Figure 8.5 - Résumé de l'état de santé de la première unité fluviale²³ de la Moesa.

²³ Source de la carte : Carte nationale de la Suisse 1 : 25'000. Feuille 1274 Mesocco. Wabern : Office fédéral de la topographie, 2008.

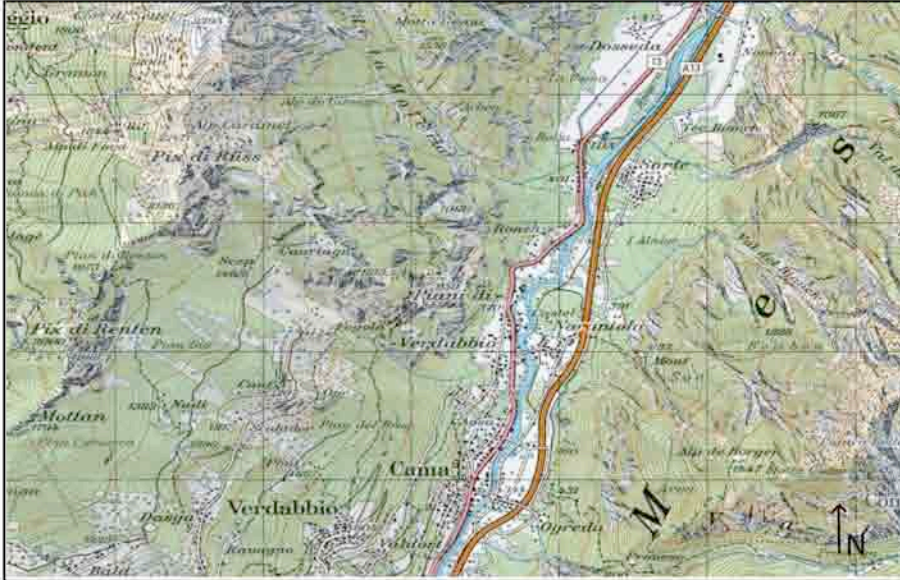
Section 2	Du village de Lostallo (GR) (pont de la route) jusqu'à Grono (GR), à l'amont de Pascoletto	
Localisation	735'493 / 130'452 - 732'631 / 123'482	19'181 - 10'573 m
Caractéristiques	 <p>A environ 4 km du point de restitution de la centrale à Soazza (OIM) et à environ 2 km du point de restitution de la centrale de Lostallo (Eline SA)</p> <p>Affluents : Riò de la Molera Riò de Val Cama; Riò de Val Leggia</p> <p>Longueur : 8.6 km</p>	
Etat général		
Ecomorphologie		Cette section fluviale est constituée de tronçons appartenant à la deuxième et à la troisième classe écomorphologique. Nous soulignons la présence d'une zone alluviale d'importance nationale (Golena Rosera, n°161 ; Source : OFEV).
Régime hydrique		Régime hydrique moyennement compromis (Q_{max}/Q_{min} moyen = 4.01 : 1 en octobre 2010 ; 2.53 : 1 en janvier 2011 et 3.69 : 1 en avril 2011).
Température		Les données mesurées sur cette section fluviale sont lacunaires et ne donnent pas d'informations représentatives pour la période d'étude.
Colmatage		Le degré de colmatage est assez variable, avec une caractérisation de faible à forte.
Activité sédimentaire		Pendant toute la période d'analyse menée le long de cette station fluviale, nous avons observé la présence d'une faible activité sédimentaire pendant le régime d'automne et le régime de printemps.

Figure 8.6 - Résumé de l'état de santé de la deuxième unité fluviale²⁴ de la Moesa.

²⁴ Source de la carte : Carte nationale de la Suisse au 1 : 25'000. Feuille 1294 Grono. Wabern : Office fédéral de la topographie, 2008.

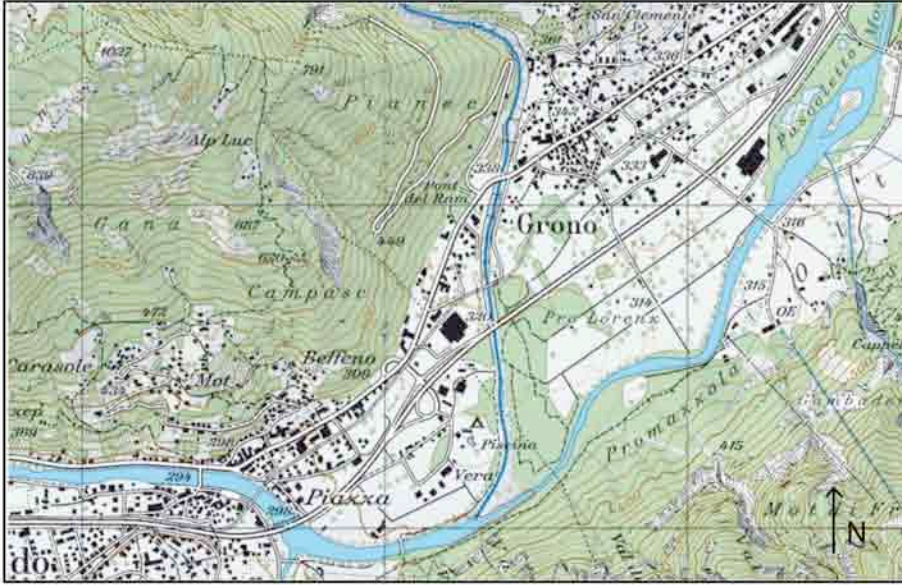
Section 3	De Grono (GR), à l'amont de Pascoletto, jusqu'à San Vittore, à l'amont du point de restitution de la centrale caverne (Calancasca SA)	
Localisation	732'631 / 123'482 - 728'981 / 121'667	10'573 - 6'706 m
Caractéristiques	 <p>Présence du point de restitution de la centrale Grono (Eline SA)</p> <p>Affluents : Rià della Boga; Calancasca</p> <p>Longueur : 3.9 km</p>	
Etat général		
Ecomorphologie		Cette section fluviale est caractérisée par des tronçons présentant un état écomorphologique naturel (Pascoletto), peu compromis (tronçon 8) et moyennement compromis (tronçon 7).
Régime hydrique		Le régime hydrologique est moyennement compromis (Q_{max}/Q_{min} moyen = 4.01 : 1 en octobre 2010 ; 2.53 : 1 en janvier 2011 et 3.69 : 1 en avril 2011).
Température		Les données mesurées sur cette section fluviale sont lacunaires et ne donnent pas d'informations représentatives pour la période d'étude.
Colmatage		Le degré du colmatage est assez variable, avec une caractérisation de moyen à forte.
Activité sédimentaire		Pendant toute la période d'analyse menée le long de cette station fluviale, nous avons enregistré une activité sédimentaire négligeable.

Figure 8.7 - Résumé de l'état de santé de la troisième unité fluviale²⁵ de la Moesa.

²⁵ Source de la carte : Carte nationale de la Suisse au 1 : 25'000. Feuille 1294 Grono. Wabern : Office fédéral de la topographie, 2008.

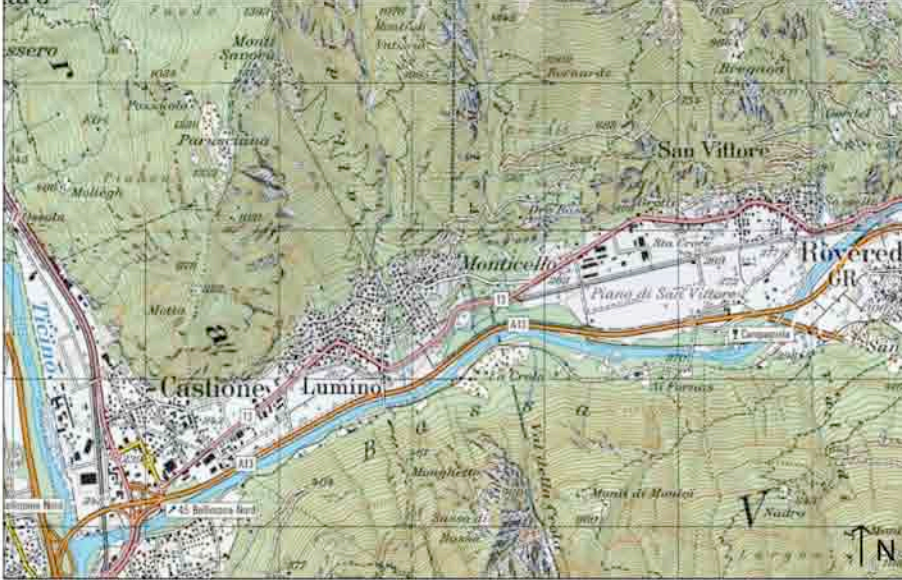
Section 4	Du point de restitution de la centrale caverne de Roveredo (Calancasca SA) jusqu'à la confluence avec le Ticino	
Localisation	728'981 / 121'667 - 723'512 / 119'844	6'706 - 0 m
Caractéristiques	 <p>Présence du point de restitution de la centrale de Roveredo (Calancasca SA)</p> <p>Affluents : Biò Grande</p> <p>Longueur : 6.7 km</p>	
Etat général		
Ecomorphologie		La majeure partie de la section fluviale présente un état écomorphologique moyennement compromis (Classe III), à cause de la largeur insuffisante des rives (proximité des infrastructures anthropiques). A la confluence avec le Ticino, les conditions sont assez favorables (état écomorphologique peu compromis).
Régime hydrique		Le régime hydrologique est moyennement compromis (Q_{\max}/Q_{\min} moyen = 3.16 : 1 en octobre 2010 ; 1.89 : 1 en janvier 2011 et 2.28 : 1 en avril 2011).
Température		Pour cette station fluviale, nous n'avons pas enregistré de données concernant le régime thermique.
Colmatage		Pour ce qui concerne le colmatage, les analyses ont montré une situation assez satisfaisante.
Activité sédimentaire		Pendant les analyses de terrain, nous n'avons pas remarqué la présence de transport de la charge de fond.

Figure 8.8 - Résumé de l'état de santé de la quatrième unité fluviale²⁶ de la Moesa.

²⁶ Source de la carte : Carte nationale de la Suisse au 1 : 25'000. Feuille 1313 Bellinzona. Wabern : Office fédéral de la topographie, 2008.

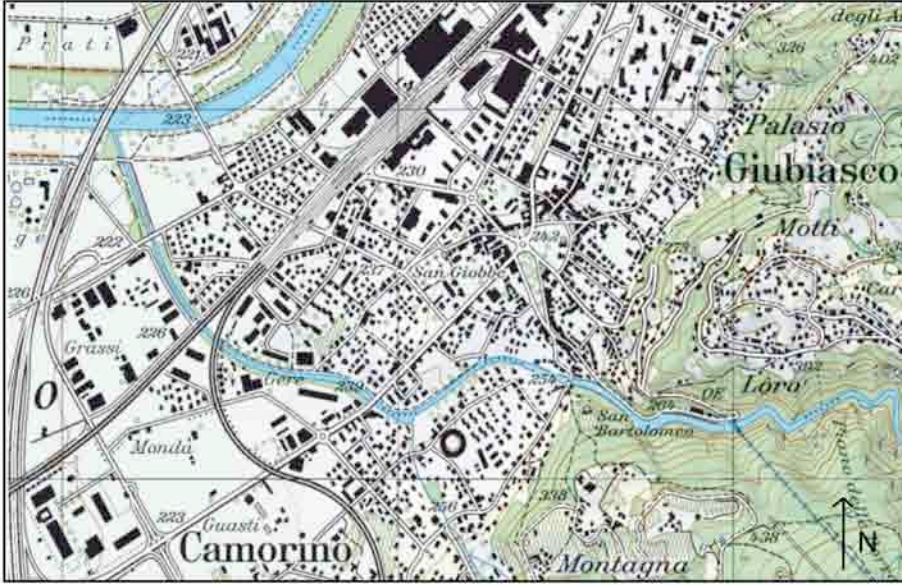
Morobbia	De la confluence avec le Ticino jusqu'au point de restitution (usine AMB)	
Localisation	728'981 / 121'667 - 723'512 / 119'844	km 0 - 2.2
Caractéristiques	 <p>Présence du point de restitution de la centrale AMB (Giubiasco)</p> <p>Affluents : absence d'importants tributaires</p> <p>Longueur : 2.2 km</p>	
Etat général		
Ecomorphologie		L'état écomorphologique est fortement compromis.
Régime hydrique		Le régime hydrologique est fortement compromis (Q_{max}/Q_{min} moyen = 21.55 : 1 en octobre 2010 ; 10.92 : 1 en janvier 2011 et 42.29 : 1 en avril 2011).
Température		Le régime thermique est compromis ($\Delta T = 1.97$ °C (annuel) et 1.30 °C (hiver)).
Colmatage		Nous n'avons pas enregistré de points critiques.
Activité sédimentaire		Pendant toute la durée des analyses menées le long de ce cours d'eau, nous avons enregistré un important taux d'activité sédimentaire.

Figure 8.9 - Résumé de l'état de santé du tronçon à marnage de la Morobbia²⁷.

²⁷ Source de la carte : Carte nationale de la Suisse au 1 : 25'000. Feuille 1313 Bellinzona. Wabern : Office fédéral de la topographie, 2008 et la Carte nationale de la Suisse au 1 : 25'000. Feuille 1314 Passo San Iorio. Wabern : Office fédéral de la topographie, 2008.

8.4 Le rôle de la structure du cours d'eau et du type d'exploitation hydroélectrique sur les effets envisagés

A partir des données écomorphologiques, nous remarquons des différences structurales entre la Moesa et la Morobbia. La première est largement plus hétérogène, avec des unités fluviales qui ont été renaturées (Golena Rosera et Pascoletto) (Fig. 7.1). La Morobbia présente, au contraire, une structure fortement compromise à cause, principalement, de la proximité des infrastructures anthropiques (Fig. 7.13). L'intervention survenue au printemps 2011, en faveur de la libre migration des espèces (Fig. 7.19), est certainement une valeur ajoutée qui améliore la situation du cours d'eau. Parmi les questions de départ, l'une portait sur la recherche d'éventuelles différences dans les effets du marnage sur la dynamique sédimentaire, selon le type d'exploitation et selon la structure du cours d'eau. Nous pouvons confirmer que la production hydroélectrique influence de manière considérable le débit : conformément à la demande énergétique, ce dernier subit des variations plus ou moins importantes. La Moesa présente une production plus forte en automne et au printemps avec, comme conséquence, des effets différents sur le charriage. L'hiver est caractérisé par une faible production d'énergie hydroélectrique le long de la Moesa. La Morobbia présente une production importante pendant toutes les saisons envisagées.

L'activité sédimentaire est influencée par le débit, mais également par la forme de la section fluviale : un élargissement du lit provoque une réduction locale des forces tractrices et une relative sédimentation des matériaux, avec, dans certains cas, la formation locale de bancs et puis de tresses. Pour les sections élargies, un haut degré de colmatage a été constaté. **Une corrélation entre la morphologie et la présence/absence du colmatage est possible.**

La structure joue un rôle considérable également dans le transport de la charge solide : pour les unités fluviales où le taux d'activité sédimentaire est important (Cabbio, Lostallo et la Morobbia), la sinuosité est nulle (redressement de l'unité fluviale).

La détermination de la capacité de transport est complexe, car il faut prendre en considération plusieurs variables, telles que le débit, la section fluviale, la pente et la sinuosité.

8.5 L'impact de l'exploitation à éclusée le long de la Moesa et de la Morobbia : quelles solutions pour l'avenir ?

Comprendre les effets des activités anthropiques est une tâche indispensable pour obtenir des informations utiles sur le système et planifier par la suite des mesures d'assainissement. Le succès d'une intervention n'est possible qu'à partir d'une compréhension des changements physiques du système (Graf, 2006). Les effets liés à l'exploitation à éclusées constituent l'une des principales questions pour ce qui concerne la gestion des écoulements superficiels. Dans le cadre théorique, nous avons présenté les principaux impacts anthropiques liés à l'utilisation et à l'aménagement du système fluvial (Chap. 4). Les conséquences des activités humaines sur les tronçons moyens, situés entre les prises d'eau (ou les barrages) et les centrales hydroélectriques, ont été réglées au niveau législatif grâce à l'article 31 de LEaux du 24 janvier 1991, qui fixe l'exigence d'une augmentation des débits résiduels. Pour ce qui concerne les tronçons inférieurs, caractérisés par un régime à éclusées, la modification de LEaux du 1^{er} janvier 2011, constitue l'outil normatif fondamental pour une gestion complète des environnements aquatiques. Ce changement du texte législatif introduit des critères pour l'assainissement des tronçons touchés de manière importante par le marnage (Art. 39a). La version modifiée de l'OEaux est entrée en vigueur le 1^{er} juin 2011. L'article 41f, prévoit la planification de mesures d'assainissement des éclusées : les cantons sont tenus de remettre, d'ici à la fin 2012, à l'OFEV un premier rapport intermédiaire montrant un plan des mesures destinées à assainir les centrales hydroélectriques provoquant un régime d'éclusées. Pour aider les administrations cantonales en la détermination de l'importance des effets, l'OFEV a mis en consultation le rapport sur la planification stratégique pour l'assainissement des éclusées (OFEV, 2011). La première étape pour la détermination de la gravité de l'atteinte est proposée par l'article 41e de l'OEaux : *« les éclusées portent gravement atteinte à la faune et à la flore indigènes et à leurs biotopes lorsque : (a) le débit d'éclusée d'un cours d'eau est au moins 1.5 fois supérieur à son débit plancher ; et que (b) la taille, la composition et la diversité des biocénoses végétales et animales typique de la station sont altérées, en particulier en raison de phénomènes artificiels survenant régulièrement, comme l'échouage de poissons, la destruction de frayères, la dérive d'animaux aquatiques, l'apparition de pointes de turbidité dans l'eau ou la variation non admissible de la température de l'eau »*. Une importance particulière est également donnée au régime de charriage (Art. 42a de l'OEaux) qui : *« porte gravement atteinte à la faune et à la flore indigènes et à leurs biotopes lorsque des installations telles que des centrales hydroélectriques [...] modifient durablement les structures morphologiques ou la dynamique de la morphologie des eaux »*. Nous pouvons donc confirmer **la présence, pour les stations d'étude 1 et 2 (Cabbiole et Lostallo) de la Moesa (Fig. 6.1), d'importantes atteintes sur le régime hydrologique et le régime de charriage en automne et en printemps**. Ces deux sections sont caractérisées, par des **rappports supérieurs à 1.5 : 1** pendant la période d'analyse (sauf quelques exceptions en hiver). La présence du transport de la charge solide pendant l'automne et le printemps pourrait comporter une

destruction des possibles frayères. D'autres conséquences négatives, pendant l'hiver, sont également observables pour les sections fluviales de Cabbio (station 1) et de Lostallo (station 2) : la présence d'un débit trop faible conduit à des conditions écologiques insuffisantes (Fig. 8.10). Ces tronçons, canalisés et avec un aménagement du lit localisé, pourraient présenter un haut potentiel de restauration.



Figure 8.10 - La Moesa à Cabbio (GR), le 10 mars 2011, pendant le débit plancher. Nous pouvons remarquer un débit très faible, avec des conditions compromises.

Les **sections d'étude 3 et 4** (Fig. 6.1) **subissent des variations journalières réduites**, avec des rapports, mesurés par la station de Lumino/Sassello, situés, en général, entre 1.5 : 1 et 5 : 1. **Aucune atteinte importante n' a été observée sur l'activité sédimentaire, avant et après l'arrivée du débit d'éclusee.**

Pour ce qui concerne le colmatage, **les unités fluviales de Golena Rosera (station 2) et de Pascoletto (station 3), présentent une vaste zone qui reste à sec pendant le débit plancher, entraînant un haut degré de colmatage et d'échouage des organismes²⁸.** La figure 8.11 montre le tronçon de Pascoletto pendant le débit plancher : une vaste zone délimitée par la ligne blanche montre la surface qui était mouillée pendant le débit d'éclusee et qui est restée à sec pendant le débit plancher.

La situation de la Morobbia est assez semblable à celle enregistrée à Cabbio sur la Moesa : les rapports entre débit d'éclusee et débit plancher dépassent toujours 6 : 1. Le régime hydrologique et la dynamique sédimentaire sont fortement perturbés sur 2 km et pendant toute la période d'investigation. Ce cours d'eau présente aussi des lacunes au niveau structurel, avec un état très compromis : des synergies entre l'assainissement du régime à éclusee et l'amélioration écomorphologique pourraient être établies.

²⁸ Pendant les analyses de terrain, nombreux individus de Trichoptères échoués ont été observés dans cette zone.

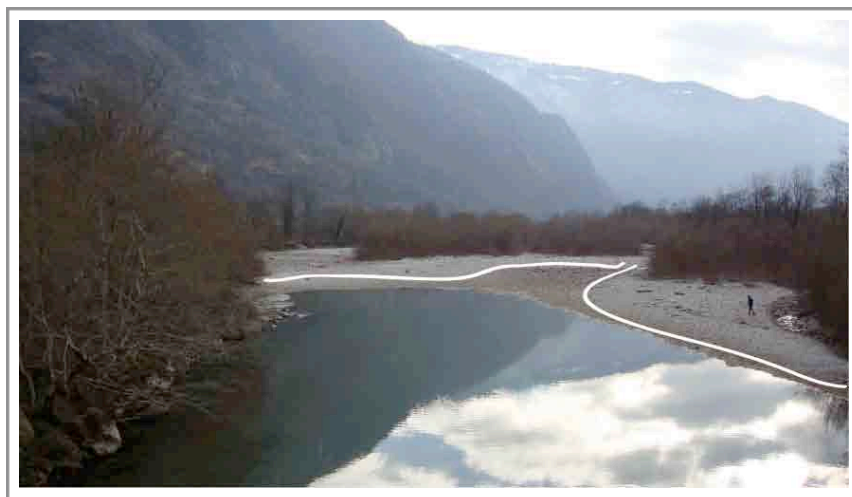


Figure 8.11 - Le tronçon de Pascoletto (Moesa, GR) à l'amont du village de Grono (732.613/123.449). La ligne blanche indique la surface qui était mouillée pendant le débit d'éclusee.

Les constatations présentées dans ce chapitre, permettent de comprendre la complexité du phénomène et la multitude des effets qui peuvent être enregistrés. **Plusieurs facteurs, tels que le rapport entre le débit d'éclusee et le débit plancher, la largeur du lit, la sinuosité et la pente déterminent les effets du marnage sur la dynamique sédimentaire.** Le transport des sédiments provoque, d'une part, une instabilité du fond du lit et une diminution de la disponibilité en habitats et de l'autre, une possible destruction des zones de frai. Les effets néfastes liés à un haut degré de colmatage sont également importants, notamment pour la disponibilité en habitats (réduction d'oxygène) et pour les échanges avec la nappe phréatique. Connaître les influences des activités anthropiques sur le système s'avère indispensable pour la proposition de mesures d'assainissement. Malgré l'absence de mesures directes pour évaluer l'atteinte des centrales hydroélectriques sur les populations aquatiques (p.ex. pêche électrique, analyse du *drift*), nous avons détecté des perturbations du fonctionnement hydro-sédimentaire. Pour les réduire, nous proposons des solutions possibles en essayant de répondre aux exigences, plus ou moins complexes, du système.

L'atténuation des effets des éclusées peut se faire en modifiant les caractéristiques du cours d'eau ou l'exploitation par éclusées elle-même. Les élargissements du lit, avec la suppression des digues, comportent certainement des avantages liés à la croissance de la variété des structures morphologiques et des habitats. Cependant, des inconvénients liés à l'augmentation de la zone asséchée pendant le débit plancher ont été relevés, notamment l'échouage des organismes (macroinvertébrés et jeunes poissons) et le colmatage.

Les deux cours d'eau subissent différemment les effets du régime d'éclusee. Dans les deux cas, une augmentation du débit plancher et/ou une diminution du débit d'éclusee, permettrait d'abaisser l'ampleur des variations du régime, pour permettre aux organismes aquatiques de s'adapter plus facilement aux changements et pour éviter le transport de la charge solide et la destruction des habitats. Pour le faire, trois solutions peuvent être proposées : (1) augmenter le débit résiduel en négociant un prélèvement d'eau plus faible (Baumann et Klaus, 2003) ; (2)

diminuer la production hydroélectrique ; (3) construire un bassin de compensation permettant de provoquer une crue d'écluse "préventive", avant l'arrivée de la vraie crue artificielle (Schweizer, 2009). Les deux premières propositions, peuvent être appliquées à n'importe quel cours d'eau, mais elles limiteraient, de manière plus ou moins importante, les entrées économiques des centrales. La troisième solution permettrait de gérer les eaux déversées en augmentant doucement le débit plancher avant l'arrivée de l'eau déversée par les centrales. Le taux d'accroissement du débit sera fortement réduit, comme également l'ampleur des variations journalières, sans toucher négativement le revenu des centrales. Pour réaliser ce type de projet, qui présente un impact sur le paysage, l'espace à disposition doit être suffisant. Pour la Moesa, les tronçons de Cabbio et Lostallo présentent, d'après nos analyses, une priorité d'assainissement à cause des conséquences importantes sur le régime hydrologique et sur le charriage. Des interventions doivent être planifiées également pour les zones alluviales de Golena Rosera et Pascoletto. Pour ces unités, une atténuation de l'ampleur des oscillations provoquerait certainement une amélioration du système, avec un bénéfice important. Selon les caractéristiques de la Moesa, notamment son contexte géographique, nous proposons une synergie d'interventions, avec la réalisation d'un bassin de compensation, entre Cabbio et Soazza, et des mesures structurelles visant à l'amélioration de l'état écomorphologique, notamment avec la suppression des seuils des tronçons entre Lostallo et Cabbio et l'introduction des refuges à la faveur de la faune piscicole. Le bassin permettrait une atténuation de l'ampleur des pics, une amélioration du régime hydrologique et du régime de charriage tout au long du cours d'eau, avec des bénéfices importants pour les zones alluviales qui seront moins touchées par le colmatage et l'échouage des organismes.

Pour la Morobbia, la situation est complètement différente. L'importance des effets sur le fonctionnement hydro-sédimentaire a été démontré : des interventions d'assainissement s'avèrent indispensables. Le cours d'eau est situé dans une zone fortement urbanisée, ce qui ne permettrait pas la réalisation d'un bassin de compensation (espace limité). Pour réduire l'ampleur des pics, une modification de l'exploitation est probablement la seule solution. Des améliorations structurelles, liées à la création de zones à écoulement moins turbulent (refuges), pourraient favoriser l'écologie le long de la Morobbia.

8.6 Comparaison avec d'autres études

L'étude menée le long du Ticino (Conorzio D.R.I.F.T., 2011), le principal cours d'eau s'écoulant sur le territoire tessinois, a été publiée en juillet 2011. Ce rapport, présentant les données recueillies pendant deux années (30.09.2008-01.10.2010), montre, pour ce qui concerne le régime hydrologique, une situation assez semblable à celle enregistrée le long de la Moesa, avec une atténuation de l'ampleur des oscillations (rapports Q_{\max}/Q_{\min}) de l'amont vers la confluence avec le Lac Majeur. Pour le cas du Ticino, l'influence des principaux affluents (Brenno, Moesa, Morobbia) peut être positive (en atténuant les effets) ou négative (en les augmentant), en fonction de la présence ou non des oscillations hydriques le long des affluents (ces derniers étant soumis au régime à éclusée). Pour la Moesa, l'influence des tributaires est toujours positive, car ils ne subissent pas de variations journalières du régime hydrologique.

Les deux kilomètres à marnage de la Morobbia ne subissent aucun adoucissement du phénomène, à cause de l'absence d'importants affluents : les deux kilomètres à marnage subissent l'exploitation à éclusée avec la même intensité.

Pour ce qui concerne le régime thermique du Ticino, les auteurs (Conorzio D.R.I.F.T., 2011) ont recueilli des données intéressantes qui montrent une variation de la vitesse d'augmentation et de diminution des températures en se rapprochant de la confluence. La température diminue de 1.9 -2.2 °C (valeurs moyennes annuelles) pendant le débit d'éclusée : pour les unités fluviales situées en amont, les variations sont plus marquées par rapport aux stations situées en aval. Un seul cas d'augmentation a été enregistré pendant l'été. Les données recueillies le long de la Morobbia confirment cette tendance, avec une différence de température équivalent à 1.97 °C (valeurs moyennes annuelles ; Annexe A.11), même si dans certains cas, la différence est beaucoup plus marquée (en avril par exemple ; Fig. 7.33 ; Tabl. 7.14)

Le transport sédimentaire le long du Ticino ne présente pas de résultats négatifs (pas de mouvement) et au niveau du colmatage, les relevés de terrain ont montré une situation très variable, avec un degré de faible à fort (Conorzio D.R.I.F.T., 2011). Au contraire, les cours d'eau envisagés dans ce travail présentent une activité sédimentaire remarquable (en automne et en printemps pour la Moesa ; pendant toute l'année pour la Morobbia). Le colmatage est variable le long des deux cours d'eau.

Le régime d'écoulement du Ticino (Conorzio D.R.I.F.T., 2011) et celui du Rhin alpin (Arge Trübung Alpenrhein, 2001) au cours de l'hiver sont fortement influencés par les éclusées. Cette situation n'a pas été détectée le long de la Moesa et de la Morobbia. La Moesa, au contraire, présente, pendant la période hivernale, des rapports Q_{\max}/Q_{\min} plus faibles par rapport aux autres périodes envisagées.

IV^e PARTIE
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Chapitre 9 : Conclusions	p. 157
Chapitre 10 : Apports et limites de la recherche	p. 160
Chapitre 11 : Perspectives de recherche	p. 161

9) Conclusions

Dans le contexte de la gestion des systèmes aquatiques, le problème des effets du régime à éclusées s'avère d'actualité et d'importance particulière. Les derniers mois ont été particulièrement intenses pour les acteurs de la gestion des eaux en Suisse : pendant la rédaction de ce travail de Master, une nouvelle législation concernant la protection des eaux et l'aménagement des cours d'eau est entrée en vigueur. En outre, suite aux nombreuses préoccupations et pressions environnementales, le Conseil fédéral s'est prononcé pour une sortie du nucléaire au moyen terme, situation qui favorisera la force hydraulique pour couvrir les besoins en électricité. L'importance de la connaissance des environnements aquatiques et de l'influence des activités anthropiques sur leur fonctionnement s'avère indispensable.

Ce travail de recherche a permis l'acquisition de nouvelles connaissances sur deux cours d'eau à marnage, même si dans certains cas particuliers, les données recueillies sont peu fiables ou incomplètes (notamment celles concernant le régime thermique de la Moesa).

Nous reviendrons ici aux questions de départ et nous pouvons finalement confirmer ou non les hypothèses présentées (Chap. 2). Dans cette partie du travail, l'objectif est de proposer une synthèse des principaux enseignements en présentant le développement des interrogations exposées dans la première partie.

1) Quantifier les effets du marnage sur le régime hydrologique et sur la dynamique sédimentaire du cours d'eau

Suivant la demande énergétique, les variations hydrologiques se présentent, de manière différente le long des deux cours d'eau. La Moesa est caractérisée par des variations qui se font d'une heure à l'autre, d'un jour à l'autre et d'une saison à l'autre. L'intensité du marnage est différente, de l'amont vers l'aval : l'ampleur entre le débit d'éclusee et le débit plancher à Cabbio est importante ; par contre, au fur et à mesure que l'on s'approche de la confluence avec le Ticino, le phénomène est atténué par l'influence des affluents et par l'éloignement des points de restitution. Des différences sont également notables selon la saison d'investigation : les effets sur le régime hydrique sont moins marqués en hiver. Pour la Morobbia, au contraire, les oscillations sont plus régulières avec une amplitude de pics assez semblable d'une saison à l'autre et pendant la semaine. Les effets sur le lit sont étroitement liés aux variations du régime. Une situation semblable peut être observée pour la dynamique sédimentaire : le long de la Moesa, le transport solide est fortement présent sur les tronçons situés à l'amont du système, notamment à Cabbio et Lostallo, et seulement pendant l'automne et le printemps. Les effets sont affaiblis au fur et à mesure que l'on descend vers l'aval, ainsi qu'en hiver. Le long de la Moesa, aucun effet important sur le transport de la charge solide n'a été observé entre janvier et avril 2011. Pour la Morobbia, nous avons enregistré une activité sédimentaire importante pendant toutes les saisons envisagées et le long des 2 km à marnage.

L'ampleur et la fréquence des pics influencent de manière claire la dynamique sédimentaire : plus la différence entre le débit plancher et le débit d'écluse est élevée et plus importants seront les effets sur le transport de la charge solide. À partir des analyses de terrain, nous avons pu établir un "rapport seuil", correspondant à 6 : 1, pour lequel nous avons enregistré un changement du lit avant et après le débit d'écluse. Lorsque ce rapport a été dépassé, nous avons observé un changement de la dynamique sédimentaire.

Les tronçons de la Moesa situés à l'amont du système, notamment les sections d'étude 1 et 2 (Cabiolo-Lostallo), sont fortement influencés par l'exploitation à écluses au niveau hydrologique et sédimentaire. Les unités fluviales renaturées, notamment Golena Rosera et Pascoletto, subissent une grande variabilité de la surface mouillée entre débit d'écluse et débit plancher, ce qui provoque l'augmentation du colmatage et de l'échouage des organismes. La Morobbia présente des conséquences importantes sur le régime hydrique, le transport des sédiments et le régime thermique.

2) Saisir la relation entre la morphologie du cours d'eau et les effets des écluses

Le phénomène du marnage est visible le long de deux cours d'eau de manière différente, selon la structure et le type d'exploitation. Une réflexion a été menée, afin de comprendre le rôle de ces deux facteurs dans l'atténuation ou l'amplification des effets.

La morphologie peut aussi bien atténuer que renforcer les effets, avec une augmentation du dépôt de sédiments pour les sections élargies et un accroissement de l'érosion là où la largeur est rectiligne et étroite.

Le long de la Moesa, nous avons observé la présence d'un haut degré de colmatage pour les sections fluviales caractérisées par une largeur du lit importante, notamment les tronçons qui ont fait l'objet d'un élargissement des rives (p.ex. Golena Rosera, Pascoletto). Les données récoltées pendant cette étude confirment la nécessité de la prise en compte du colmatage le long des cours d'eau renaturés qui subissent le régime à marnage : pour une revitalisation complète, l'assainissement des écluses devrait être effectué.

3) Discuter et comparer les données recueillies le long de deux cours d'eau d'étude avec des études conduites le long d'autres cours d'eau suisses (Ticino, Oberhasli) (Consorzio D.R.I.F.T., 2011 ; Schweizer *et al.*, 2010 ; Schweizer et Weissmann, 2011) et proposer des mesures d'assainissement

Les données recueillies le long de la Moesa ont montré une situation semblable à celle enregistrée le long du Ticino, avec une atténuation de l'ampleur des oscillations (rapports Q_{\max}/Q_{\min}) de l'amont vers l'aval. Les deux kilomètres à marnage de la Morobbia ne subissent

aucun adoucissement du phénomène, à cause de l'absence d'importants affluents : les deux kilomètres à marnage, subissent l'exploitation à éclusée avec la même intensité. Le transport sédimentaire le long du Ticino ne présente pas de résultats négatifs (pas de mouvement). Au contraire, les cours d'eau envisagés dans ce travail présentent une activité sédimentaire remarquable (en automne et en printemps pour la Moesa ; pendant toute l'année pour la Morobbia). Le colmatage est variable le long des trois cours d'eau.

Le régime d'écoulement du Ticino (Conorzio D.R.I.F.T., 2011) et celui du Rhin alpin (Arge Trübung Alpenrhein, 2001) au cours de l'hiver sont fortement influencés par les éclusées. Cette situation n'a pas été détecté le long de la Moesa et de la Morobbia. La Moesa, au contraire, présente, pendant la période hivernale, des rapports Q_{\max}/Q_{\min} plus faibles par rapport aux autres périodes envisagées.

Des mesures d'assainissement sur la morphologie, notamment avec des améliorations structurelles et la création des zones à écoulement moins turbulents pourraient favoriser l'écologie le long des deux cours d'eau. Pour la Moesa, la création d'un bassin de compensation pourrait être planifié.

10) Apports et limites de la recherche

Cette recherche a permis d'une part la connaissance du fonctionnement hydro-sédimentaire de deux cours d'eau subissant l'exploitation par éclusées et de l'autre l'acquisition de plusieurs connaissances dans le domaine de la gestion des cours d'eau. La possibilité de travailler et discuter avec des experts de différents secteurs (géomorphologues, hydrologues, ingénieurs, biologistes, géologues) m'a permis d'apprendre les enjeux de l'aménagement fluvial et d'ajouter des enseignements fondamentaux à mon bagage de compétences. Nombreuses sont les difficultés rencontrées pendant la planification et la mise en oeuvre de ce travail, mais elles ont toujours porté à l'acquisition de nouvelles notions et à l'extension de ma propre expérience.

Ce travail a permis la collecte de nombreuses données sur le régime hydrique et sur le taux d'activité sédimentaire qui permettent de saisir les perturbations dues à la production hydroélectrique sur le fonctionnement hydro-sédimentaire et de deviner les tronçons compromis. Pour une déclaration définitive du fonctionnement écologique des cours d'eau, d'autres investigations sont nécessaires : il faut considérer ce travail de recherche comme une clé d'orientation pour les prochains travaux.

Une année après le début de ce travail, il est possible de souligner des lacunes et de lancer certaines critiques à la recherche, liées surtout au travail d'acquisition des données. Je pense notamment à l'absence d'utilisation d'un équipement hydrologique particulier (le moulinet) qui aurait permis d'effectuer des mesures ponctuelles des vitesses d'eau et de confirmer la calibration des sondes hydrologiques *HyMADD* (en ajout au modèle proposé par Bezzola, 2008). En outre, l'analyse statistique des paramètres hydrologiques recueillis avant et après la construction des barrages et des infrastructures anthropiques permettrait de comprendre, avec une meilleure facilité, l'impact du système hydroélectrique sur tout le bassin versant : l'idée d'un débit naturel en opposition au débit "artificiel" permet de discuter plus largement sur le contexte des influences anthropiques.

Une critique est également lancée pour la partie concernant les analyses quantitatives de l'activité sédimentaire à l'aide du logiciel *Matlab* : des compétences personnelles plus vastes sur l'utilisation de cet outil auraient permis une analyse beaucoup plus approfondie.

Des questions de recherche qui pourraient compléter ce travail seront proposées dans le chapitre suivant (Chap. 11).

11) Perspectives de recherche

Ce travail de recherche nous a permis de comprendre les relations qui régissent un système fluvial fortement influencé par les activités anthropiques et de répondre aux questions de départ. Toutefois, vu la complexité du sujet traité, le champ d'interrogation est encore très vaste.

Y a-t-il une relation entre le colmatage et les matières fines en suspension ? Est-ce que l'absence du colmatage est exclusivement attribuable à la morphologie du cours d'eau ?

L'apport de matières en suspension ne dépend pas que de la capacité de transport (et donc du débit), mais aussi de la disponibilité en matières fines. L'installation de capteurs pour l'enregistrement continu de la turbidité, ajoutée à des mesures ponctuelles (échantillonnage, filtrage de l'eau et mesure de la concentration des fines) permettrait d'avoir une réponse plus précise en ce qui concerne la présence/absence du colmatage. De plus, la nature des roches du bassin versant joue-t-elle un rôle important pour la fourniture de sédiments ?

Définir, avec une meilleure précision, les effets de l'exploitation à éclusées sur le régime thermique

Des mesures plus approfondies du régime thermique, avec l'introduction de plusieurs capteurs (du tronçon de référence jusqu'à la confluence avec le Ticino), permettraient de comprendre de manière plus précise la relation entre la température et l'exploitation à éclusées. Les connaissances de ces variations sont encore, en partie, méconnues.

Quels sont les effets sur les populations aquatiques ? Est-ce que les deux cours d'eau d'études présentent une modification de la densité et de la diversité des organismes (p.ex. de l'amont en aval pour la Moesa) ?

Comme montré dans l'étude menée le long de la Hasliaare (Schweizer, 2009; Schweizer *et al.*, 2010 ; Schweizer et Weissmann, 2011) et celle le long du Ticino (Consorto D.R.I.F.T., 2011), des mesures de la dérive des macroinvertébrés peuvent porter à la détermination du débit seuil provoquant des effets sur ces organismes. Une analyse ciblée des taxons pourrait indiquer une éventuelle détérioration de la biodiversité.

Application d'un modèle physique pour la détermination du transport de la charge solide

L'application d'un modèle physique pourrait compléter les données recueillies dans ce travail et confirmer le débit seuil à partir duquel les particules vont se mettre en mouvement.

Saisir la relation entre les débits et le taux d'activité sédimentaire

Est-ce que le colmatage pourrait être réduit par l'augmentation du débit plancher et/ou du débit d'écluse ?

Références bibliographiques

Aschwanden H., et Weingartner R. (1985). *Die Abflussregimes der Schweiz*. (Publikation Gewässerkunde, Nr.65), Bern: Geographisches Institut der Universität, 237 p.

Alp M. (2006). *Nahrungsökologie der Bachforelle in alpinen Flüssen mit Schwallbetrieb*. Mémoire de diplôme non publié. Humbolt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Institut für Biologie, EAWAG Aquatic research, Berlin/Zürich, 83 p.

Arge Trübung Alpenrhein (2001). *Trübung und Schwall im Alpenrhein*. Rapport final, rapport spéciaux et étude bibliographique sur le mandat de la Commission internationale pour la protection du Rhin. Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie. Vaduz : IRKA115 p.

Amoros C., et Petts G. A. (1993). *Hydrosystèmes fluviaux*, Paris : Masson, 300 p.

Baumann P., et Klaus I. (2003). *Conséquences écologiques des éclusées, étude bibliographique*. (Inf.conc. Pêche no. 75). Berne : Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, 112 p.

Baumann P., et Meile T., (2004). Makrozoobenthos und Hydraulik in ausgewählten Querprofilen der Rhone. *Wasser Energie Luft*, 11/12, 320-325.

Berger A., et Mercolli I. (2006). *Tectonic and Petrographic Map of the Central Lepontine Alps*, (Carta geologica speciale N. 127, Map sheet 43 Sopra Ceneri). Berne : Office fédéral de topographie Swisstopo.

Berger A., Mercolli I., et Engi M. (2007). *Explanatory notes of Tectonic and Petrographic Map of the Central Lepontine Alps*. Berne : Office fédéral de topographie Swisstopo, 38 p.

Bezzola G.R. (2008). *Flussbau*. [Polycopié]. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule.

Billet J. (1972). *Le Tessin: un versant méridional des Alpes centrales : essai de géographie régionale*. Grenoble : Allier, 533 p.

Boudin T., et Marquer D. (1993). Métamorphisme et déformation dans la nappe de Tambo (Alpes centrales suisses) : évolution de la substitution phengitique au cours de la déformation alpine. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 73, 285-299.

Boudin T., Marquer D., et Persoz F. (1993). Basement-cover relationships in the Tambo nappe (Central Alps): Geometry, structure and kinematics. *Journal of Structural Geology*, 15, 543-553.

Bratrich C., Truffer B., Jorde K., Markard J., Meier W., Peter A., Schneider M., et Wehrli B. (2004). Green hydropower: a new assessment procedure for river management. *River Research and Applications*, 20, 865-882.

Bravard J., P. (1986). *Le Rhône, du Léman à Lyon*. Lyon : La Manufacture, 451 p.

Bravard J.-P., et Petit F. (1997). *Les cours d'eau : dynamique du système fluvial*. Paris : Colin, 222 p.

Brooker M.P. (1981). The impact of impoundments on the downstream fisheries and general ecology of rivers. *Adv. Appl. Biol.*, 6, 91-152.

Bundi U. (2003). La richesse en eau des Alpes au centre de multiples enjeux. *Eawag News*, 55, 3-6.

Campana B. (1988). *Un geologo parla del suo paese*. Losone: Tipografia Poncioni, 451 p.

Cereghino R., et Lavandier P. (1998). Influence of hydropeaking on the distribution and larval development of the Plecoptera from a mountain stream. *River Research and Applications*, 14, 297-309.

Cereghino R., Legalle M., et Lavandier P. (2004). Drift and benthic population structure of the mayfly *Rhithrogena semicolorata* (Heptageniidae) under natural and hydropeaking condition. *Hydrobiologia*, 519, 127-133.

Charlton R. (2009). *Fundamentals of fluvial geomorphology*. London: Routledge, 234 p.

Consorzio D.R.I.F.T. (2011). *Studio degli effetti delle variazioni di portata indotti dalla regimazione idroelettrica lungo il fiume Ticino - Rapporto di sintesi*. Bellinzona: Dipartimento del territorio, Ufficio della caccia e della pesca, 79 p.

Cotti G., Felber M., Fossati A., Lucchini G., Steiger E., Zanon P.L. (1990). *Introduzione al paesaggio naturale del Cantone Ticino. Tomo primo: le componenti naturali*. Bellinzona: Dipartimento dell' Ambiente, 484 p.

- Coque R. (2006). *Géomorphologie*. Paris : A. Colin, 502 p.
- Decuyper H., et Antognini M. (2008). *Magie di pietra: paesaggi geologici del Ticino*. Locarno: Armando Dadò Editore, 159 p.
- De Martonne E. (1940). *Traité de géographie physique: Tome 1*. Paris : A. Colin.
- Eberstaller J., et Pinka P. (2001). *Trübung und Schwall Alpenrhein – Einfluss auf Substrat, Benthos, Fische*. Internationale Regierungskommission Alpenrhein, Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie, Wien : Universität für Bodenkultur, 57 p.
- Emmenegger C. (1988). 125 ans d'hydrométrie en Suisse – Rétrospective. *Mitteilung der Landeshydrologie und – Geologie*, 9, 1-24.
- Estoppey R., et Devanthery D. (2009). *Exploitation hydroélectrique par éclusées: aperçu de la situation en Suisse*. Journée organisée par l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage et l'Agenda 21 pour l'eau, le 09.03.2009, Soleure.
- Fette M.W. (2005). *Tracer Studies of River-Groundwater Interaction under Hydropeaking Conditions*. Thèse de doctorat non publiée (Dissertation Nr. 16103), Zürich : Eidgenössische Technische Hochschule, 117 p.
- Fette M., Weber C., Peter A., et Wehrli B. (2007). Hydropower production and river rehabilitation: A case of study on an alpine river. *Environmental Modelling et Assessment*, 12, 257-267.
- Fischnetz (2004). *Sur la trace du déclin piscicole*. Rapport final. Dübendorf/Berne : EAWAG/OFEFP, 198 p.
- Fumasoli M.W. (1974). Geologie des Gebietes nördlich und südlich der Jorio-Tonale-Linie im Western von Gravedona (Como, Italia). *Mitt. Geol. Inst.. ETH et Univ. Zürich*, 194, 230 pp.
- Gerster S. et Rey P. (1994). *Conséquences écologiques des curages dans les bassins de retenue*. Cahier de l'environnement no. 219. Berne : Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, 47 p.
- Graf W.L. (2006). Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology*, 79, 336-360.

Haller T., Hauser F., et Weingartner R. (2007) : *Atlas hydrologique de la Suisse*. Berne : Université, Institut de géographie.

Heitzmann P. (1975). Zur Metamorphose und Tektonik im südöstlichen Teil der Lepontinischen Alpen (Provincia di Como, Italia). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt*, 55, 467-522.

Hjulström F. (1935). Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. *Bulletin of the Geological Institute of Uppsala*, 25, 221-527.

Hütte M., et Niederhauser P. (1998). *Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse. Ecomorphologie – niveau R (région)*. (L'environnement pratique n° 27). Berne : Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, 49 p.

Kantonales Amt für Natur und Umwelt (2008). *Gewässerraum Moesa*. Entwurf Bericht 70542, Chur.

Kiefer B., Elsener J., et Muntwyler R. (1997). *EIE des aménagements hydroélectriques. Mesures pour la protection de l'environnement*. (L'environnement en pratique). Berne : Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, 182 p.

Kirchhofer A., et Breitenstein M. (2008). Schwall-Sunk in der Linth (GL) – ein neuer Ansatz zur Reduktion der Auswirkungen auf das Flussökosystem. *6th Swiss Geoscience Meeting*, Lugano. [En ligne] www.sghl.ch/downloads/06-SGM2008_Kirchhofer.pdf. Consulté le 15.12.2011.

Kondolf G.M., et Piégay H. (2003). *Tools in Fluvial Geomorphology*. Chichester: J. Wiley, 688 p.

Kummer M. (2006). Le régime des éclusées, source des problèmes. *Environnement*, 4, 24-28.

Künzli M. (2005). *Fischökologische Untersuchung in vier schwallbeeinflussten Schweizer Fließgewässern*. Mémoire de diplôme non publié, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 109 p.

Lane S. N. (2011). Aménagement fluvial. [Polycopié]. Lausanne : Université, Institut de géographie, 53 p.

Leopold L.B., Wolman M.G., et Miller J.P., (1995). *Fluvial Processes in Geomorphology*. New York: Dover Publications, 522 p.

Limnex AG (2001). *Schwall/Sunk-Betrieb in schweizerischen Fliessgewässern*. Berne : Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, 30 p.

Limnex AG (2004). *Auswirkungen des Schwallbetriebes auf das Ökosystem der Fliessgewässer: Grundlagen zur Beurteilung*. Zürich: WWF, 35 p.

Lombardi G. (1971). Il potenziamento dell'impianto idroelettrico della Morobbia dell'azienda elettrica comunale di Bellinzona. *Rivista tecnica della Svizzera italiana*, 16 p.

Maiolini B., Bruno M.C., Carolli M., Silveri L., Zolezzi G., Bellin A., et Siviglia A. (2008). Eco-hydrological impacts of hydropower production in the Adige river system. *6th Swiss Geoscience Meeting*, Lugano. [En ligne] www.sghl.ch/downloads/7-SGM2008_Maiolini.pdf. Consulté le 18.12.2011.

Malavoi J.R., et Bravard J.P. 2010. *Eléments d'hydromorphologie fluviale*. Paris : Onema, 224 p.

Marthaler M. (2002). *Le Cervin est-il africain? Une histoire géologique entre les Alpes et notre planète*. Le Mont-sur Lausanne : Editions LEP, 96 p.

Meile T. (2006). Hydropeaking on watercourses. *Eawag News*, 61e, 28-29.

Meile T., Fette M., et Baumann P. (2005). *Synthesebericht Schwall/Sunk*. Publikation des Rhone-Thur Projektes. Kastanienbaum: EAWAG, 48 p.

Meile T., Boillat J.-L., et Schleiss A.J. (2011). Hydropeaking indicators for characterization of the Upper-Rhone River in Switzerland. *Aquatic Sciences*, 73, 171-182.

Montané A. (2009). *Approche morpho-sédimentaire et statistique du gradient granulométrique du Rhône*. Mémoire de master non publié, Université Paris Diderot-Paris 7, 96 p.

Montané A., Arnaud-Fassetta G., et Reynard E. 2010. Analyse statistique et modélisation de la variabilité longitudinale du gradient granulométrique du Rhône suisse. *Bull. Murithienne* 127, 19-27.

Morard S., Scapozza C., Duhem V., Reynard E., et Delaloye R. (2009). *Géomorphologie de la montagne - fiches pour l'enseignant*. Société Suisse de Géomorphologie (SSGm), [En ligne] <http://www.unifr.ch/geoscience/geographie/montagne>. Consulté le 23.07.2011.

Musy A., et Higy C. (2004). *Hydrologie: une science de la nature*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, Collection Gérer l'environnement, 314 p.

Mürle U., Ortlepp J., et Zahner M. (2003). Effects of experimental flooding on riverine morphology, structure and riparian vegetation: The River Spöl, Swiss National Park. *Aquatic Sciences*, 65, 191-198.

OFEG (2004). *Grono : La reconquête d'une zone alluviale*. [En ligne] www.bwg.admin.ch. Consulté le 19.11.2011.

OFEN (2011). Statistique des aménagements hydroélectriques de la Suisse - Etat au 1.1.2011. Banque de données en ligne, publiée par l'Office fédéral de l'énergie, Berne. [En ligne] http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00491/index.html?lang=fr&dossier_id=01049. Consulté le 13.12.2011.

OFEV (2009). *Annuaire hydrologique de la Suisse 2008*. Connaissance de l'environnement n° 0921. Office fédéral de l'environnement, Berne, 578 p.

OFEV (2011). Assainissement des éclusées. Planification stratégique (version mise en consultation : état au 5 août 2011). Office fédéral de l'environnement, Berne, 96 p. [En ligne] <http://www.bafu.admin.ch/umsetzungshilfe-renaturierung/index.html?lang=fr> / Aide à l'exécution «Renaturation des eaux» / case Eclusées / planification stratégique - août 2011. Consulté le 21.12.2011.

Oppizzi P. (1999). La Valle Morobbia (Cantone Ticino, Svizzera): geologia generale e geologia mineraria. *Minaria Helvetica*, 19b, 50-62.

Pardé M. (1933). *Fleuves et rivières*. Paris : Colin, 224 p.

Pellaud M., (2006). Ecological response of a multi-purpose river development project using macro-invertebrates richness and fish habitat value. Thèse de doctorat. Lausanne : Ecole Polytechnique Fédérale, Faculté de l'environnement naturel, architectural et construit, Laboratoire des systèmes écologiques, 197 p.

Peter A. (2006). Revitalisations : dans quel but et dans quel cadre ? *Eawag News*, 61f, 4-8.

Pitlick J., Cui Y., et Wilcock P. (2009). *Manual for computing bed load transport using BAGS (Bedload Assessment for Gravels-bed Streams) Software. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-223.* Fort Collins, CO : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 45 p.

Pfaundler M., et Keusen M. (2007). *Veränderungen von Schwall-Sunk. Hydrologische Datenanalyse zur Charakterisierung von Schwall-Sunk Phänomenen in der Schweiz.* (Umwelt-Wissen Nr 0712). Bern : Bundesamt für Umwelt, 110 p.

Pfaundler M., et Salvetti A. (2006). *Technischer Bericht zur Schwall-Sunk Analyse am unteren Ticino.* Bellinzona, Bern: Ufficio dei corsi d'acqua (Dipartimento del Territorio) et Bundesamt für Umwelt.

Polli B., et Solcà L. (2008). Hydropeaking on the Ticino River: Analysis, Impacts and Mitigations Strategies. 6th *Swiss Geoscience Meeting*, Lugano. [En ligne] www.sghl.ch/downloads/10-SGM2008_Polli.pdf. Consulté le 18.12.2011.

Renöfält B., Jansson R., et Nilsson C. (2010). Effects of hydropower generation and opportunities for environmental flow management in Swedish riverine ecosystem. *Freshwater Biology*, 55, 49-67.

Reynard E., Mauch C., et Thorens A. (2001). Développement historique des régimes institutionnels de l'eau en Suisse entre 1870 et 2000. In : *Knoepfel P., Kissling-Näf I., et Varone F. (eds): Institutionnelle Regime für natürliche Ressourcen : Boden, Wasser und Wald im Vergleich - Régimes institutionnels de ressources naturelles : analyse comparée du sol, de l'eau et de la forêt* (Reihe Oekologie et Gesellschaft Nr. 17), Basel/Frankfurt : Helbing und Lichtenhahn, 101-139.

Reynard E., Bissig G., Stäubli S., Theler D., et Thomi L. (2006). *Gestion de l'eau dans les Alpes* [Polycopié]. Lausanne : Université, Institut de géographie, 218 p.

Reynard E., et Regolini-Bissig G. (2008). *Géomorphologie*. Vol.1. [Polycopié]. Lausanne : Université, Institut de géographie, 124 p.

Robert A. (2003). *River processes : an introduction to fluvial dynamics*. London: Arnold, 214 p.

Schälchli, Abegg, et Hunzinger (2002). *Kolmation: Methoden zur Erkennung und Bewertung*. Dübendorf/Zürich: EAWAG, 24 p.

Schälchli, Abegg, et Hunzinger (2006). 3. Rhonekorrektio. *Sachbereich Kolmation, Zwischenbericht 1, Situationanalyse Rhone Brig-Bex*. Zürich: EAWAG, 17 p.

Scheurer T., et Molinari P. (2003). Experimental floods in the River Spöl, Swiss National Park: Framework, objectives and design. *Aquatatic Science*, 65, 183-190.

Schleiss A. (2007). *Aménagements de cours d'eau* [Polycopié]. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne : Laboratoire de constructions hydrauliques, 126 p.

Schleiss A. (2008). *Aménagements hydrauliques* [Polycopié]. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne : Laboratoire de constructions hydrauliques, 484 p.

Schumm S.A. (1977). *The Fluvial System*. New York: Wiley. 338 p.

Schweizer S. (2009). *Trotz Ausbau der Kraftwerksleistung – deutlich geringere Pegelschwankungen in der Hasliaare*. Journée organisée par l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage et Agenda 21 pour l'eau, le 09.03.2009, Soleure.

Schweizer S., Meyer M., Heuberger N., Brechbühl S., et Ursin M. (2010). Zahlreiche gewässerökologische Untersuchungen im Oberhasli. Wichtige Unterstützung des partizipativen Begleitprozesses von KWoplus. *Wasser Energie Luft*, 4, 289-300.

Schweizer S., et Weissmann H.Z. (2011). Restwassersanierung der genutzten Gewässer im Oberhasli. *Wasser Energie Luft*, Heft 1, 25- 30.

Shields A. (1936). *Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung* (Report 26, Milleil Preuss). Berlin: Versuchsant. Wasserbau und Schiffsbau.

Siviglia A., Salvaro M., Zolezzi G., Maiolini B., Carolli M., et Bruno M.C. (2008). Thermopeaking from power plant releases in regulated Alpine stream. *6th Swiss Geoscience Meeting, Lugano*. [En ligne] www.sghl.ch/downloads/12-SGM2008_Siviglia.pdf. Consulté le 18.12.2011.

Spinedi F. (2000). *La stazione meteorologica di Grono*. Locarno-Monti: Centro meteorologico di Meteo Svizzera, 16 p.

Spinedi F., et Isotta F. (2004). Il clima del Ticino negli ultimi 50 anni. In: *Dati, statistiche e società*. Bellinzona: Ufficio di Statistica del Canton Ticino, 4/2, 4-39.

Steinmann M.C. (1994). *Die nordpenninischen Bündnerscheifer der Zentralalpen Graubündens: Tektonik, Stratigraphie und Beckenentwicklung*. Thèse de doctorat non publiée. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule.

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 8, 913–920.

Szabó J. (2010). Water Management, In: J. Szabó, L. Dàvid, D. Lóczy (eds.), *Anthropogenic Geomorphology: a guide to man-made landforms*. London: Springer and Business Media, 155-178.

Thomi L., Reynard E., Zaugg Stern M. (2008). *Fallstudie in der Stadt Bern (1999 bis 2007)*. Rapport thématique du projet “Impact des inondations en Suisse”, COST C19. Lausanne : Université, Institut de géographie, 132 p.

Tockner K., Karaus U., Paetzold A., et Blaser S. (2004). Ökologischer Zustand der Rhone: Benthische Evertébraten und Unterfauna. *Wasser Energie Luft*, 11/12, 315-317.

Tricart J., et Cailleux A. (1962). *Introduction à la géomorphologie climatique*. Vol 1. Paris : SEDES, 306 p.

Weingartner R., et Aschwanden H. (1994). Quantification des débits des cours d'eau des Alpes suisses et des influences anthropiques qui les affectent. *Revue de géographie alpine*, 82, 2, 45-57.

Wilcock P., et Crowe J. (2003). Surface-based transport model for mixed-size sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129, 120-128.

Zaugg Stern M. (2002). More space for running waters: Negotiating institutional change in the Swiss flood protection system. *GeoJournal*, 58, 275-284.

Zaugg Stern M. (2006). De la décision d'expert au dialogue sur les risques. *Eawag News*, 61f, 12-14.

Zolezzi G., Siviglia A., Toffolon M., et Maiolini B. (2010). Thermopeaking in Alpine strams: event characterization and time scales. *Ecohydrology*, 2, 564-576.

Actes législatifs et règlements

- Loi fédérale sur l'exploitation des forces hydrauliques du 22 décembre 1916 (RS 721.80).
- Ordonnance d'exécution de la loi fédérale sur la protection des eaux contre la pollution du 28 décembre 1956 (RO 1956 1641).
- Loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (LEaux) (RS 814.20).
- Loi fédérale sur la pêche (LFSP) du 21 juin 1991 (RS 923.0).
- Loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau (LACE) du 21 juin 1991 (RS 721.100).
- Ordonnance sur l'aménagement des cours d'eau (OACE), du 2 novembre 1994 (RS 721.100.1).
- Regolamento di applicazione della legge Legge cantonale sulla pesca e sulla protezione dei pesci e dei gamberi indigeni (del 15 ottobre 1996) (RS 8.5.2.1.1).
- Ordonnance fédérale sur la production des Eaux (OEaux), du 28 octobre 1998 (RS 814.201).
- Initiative parlementaire. Protection et utilisation des eaux. Contre projet à l'initiative populaire « Eaux vivantes ». Schaffhouse, 26.06.2008.
- Ordinanza concernente la protezione delle zone golenali d'importanza nazionale (Ordinanza sulle zone golenali), modifica del 15 giugno 2001 (RS 451.31).
- Modification de la Loi sur la protection des eaux (LEaux) du 1^{er} janvier 2011 (RS 814.20).
- Modification de l'Ordonnance pour la protection des eaux (OEaux) du 4 mai 2011 (RS 814.201).

Webographie

- <http://www.axpo.ch>

Site du groupe Axpo, un leader du secteur de l'énergie en Suisse. Dernière consultation le 13.12.2011.

- <http://www.bafu.admin.ch>

Site de l'Office fédéral de l'environnement, où il est possible de télécharger les actes législatifs et les publications. Ce site a été consulté pendant toute la durée de ce travail de recherche. Dernière consultation le 13.12.2011.

- www.swissdams.ch

Site du comité suisse des barrages. Dernière consultation le 13.12.2011.

- www.geo.admin.ch

Portail de Swisstopo où il est possible de consulter les cartes géologiques, tectoniques et celle du dernier maximum glaciaire. Dernière consultation le 13.12.2011.

- www.grande-dixence.ch

Site de l'entreprise Grande-Dixence SA (VS). Dernière consultation le 13.12.2011.

- www.mathworks.ch

Site suisse dédié au logiciel Matlab. Dernière consultation le 13.12.2011.

- www.jdc.ch

Site de l'entreprise MADD technologies. Dernière consultation le 13.12.2011.

- www.wa21.ch

Site de l'Agenda 21 pour l'eau. Dernière consultation le 13.12.2011.

Sources cartographiques

Carte nationale de la Suisse au 1 : 25'000. Feuille 1313 *Bellinzona*. Wabern : Office fédéral de la topographie, 2008.

Carte nationale de la Suisse au 1 : 25'000. Feuille 1314 *Passo San Iorio*. Wabern : Office fédéral de la topographie, 2008.

Carte nationale de la Suisse au 1 : 25'000. Feuille 1294 *Grono*. Wabern : Office fédéral de la topographie, 2008.

Carte nationale de la Suisse au 1 : 25'000. Feuille 1274 *Mesocco*. Wabern : Office fédéral de la topographie, 2008.

Atlas géologique de la Suisse au 1 : 25'000. Feuille 1313 *Bellinzona*, 1974.

Carte tectonique générale, carte au 1 : 500'000, Suisse, 2005.

Carte tectonique et petrographique des Alpes Lépointines. Feuille 43 *Sopra Ceneri* (N. 127). Wabern : Office fédéral de la topographie, 2006.

Orthophotos

Orthophoto SWISSIMAGE, 50 cm, tuiles 1313-11 à 1313-44 *Bellinzona*. Wabern : Office fédéral de la topographie, 2004.

Orthophoto SWISSIMAGE, 50 cm, tuiles 1314-11 à 1314-41 *Passo San Iorio*. Wabern : Office fédéral de la topographie, 2004.

Orthophoto SWISSIMAGE, 50 cm, Level 1, tuiles 1294-11 à 1294-22 *Grono*. Wabern : Office fédéral de la topographie, 2005.

Orthophoto SWISSIMAGE, 50 cm, tuiles 1294-23 à 1294-44 *Grono*. Wabern : Office fédéral de la topographie, 2004.

Orthophoto SWISSIMAGE, 50 cm, Level 1, tuiles 1274-11 à 1274-44 *Mesocco*. Wabern : Office fédéral de la topographie, 2005.

ANNEXES

Cours d'eau	Moesa
--------------------	--------------

Numéro de tronçon	1	2	3	4	5	6
Date de relevé	25.10.10	25.10.10	25.10.10	25.10.10	25.10.10	25.10.10
Début du tronçon (m)	0 m	180 m	890 m	2480 m	3960 m	5810 m
Fin du tronçon (m)	180 m	890 m	2480 m	3960 m	5810 m	6706 m
Largeur moyenne du lit (m)	90 m	50 m	60 m	50 m	50 m	40 m
Mise sous terre	0	0	0	0	0	0
Nombreux seuils naturels	0	0	0	0	0	0
Variabilité de la largeur du lit mouillé	1 (prononcée)	2 (limitée)	3 (nulle)	2 (limitée)	2 (limitée)	2 (limitée)
Variabilité de la profondeur	2 (moyenne)	2 (limitée)	3 (nulle)	2 (moyenne)	2 (limitée)	2 (limitée)
Aménagement du lit	1 (nul)	1 (nul)	1 (nul)	1 (nul)	2 (localisé 0-10%)	1 nul
Matériau de l'aménagement du lit	1 (pierres naturelles)	1 (pierres naturelles)	1 (pierres naturelles)	1 (pierres naturelles)	2 (blocs)	2 (blocs)
Renforcement du pied de la berge gauche	4 (fort 30-60%)	3 (moyen 10-30%)	2 (localisé 0-10%)	1 (nul)	3 (moyen 10-30%)	3 (moyen 10-30%)
Renforcement du pied de la berge droite	4 (fort 30-60%)	5 (prépondérant > 60%)	6 (total)	3 (moyen 10-30%)	5 (prépondérant > 60%)	5 (prépondérant > 60%)
Matériau du renforcement du pied de la berge gauche	1 (pierres naturelles)	1 (pierres naturelles)	1 (pierres naturelles)	2	3 (blocs)	3 (blocs)
Matériau du renforcement du pied de la berge droite	1 (pierres naturelles)	1 (pierres naturelles)	1 (pierres naturelles)	2	3 (blocs)	3 (blocs)
Largeur moyenne des rives (gauche)	15 m	10 m	15 m	15 m	15m	10 m
Largeur moyenne des rives (droit)	10 m	7 m	8 m	10 m	10 m	10 m
Nature des rives (gauche)	2 (atypique)	2 (atypique)	1 (typique)	2 (atypique)	3 (atypique)	3 (artificielle)
Nature des rives (droit)	2 (atypique)	3 (artificielle)	3 (artificielle)	3 (artificielle)	3 (artificielle)	3 (artificielle)
Peuplement d'algues	1	1	1	1	1	1
Peuplement de macrophytes	1	1	1	1	1	1
Bois mort	2	1	2	1	1	1

ETAT ECOMORPHOLOGIQUE	Classe II (peu atteint)	Classe III (très atteint)	Classe III (très atteint)	Classe II (peu atteint)	Classe III (très atteint)	Classe III (très atteint)
-----------------------	-------------------------	---------------------------	---------------------------	-------------------------	---------------------------	---------------------------

Annexe A.1 - Evaluation écomorphologique des tronçons de 1 à 6 le long de la Moesa.

Cours d'eau	Moesa
--------------------	--------------

Numéro de tronçon	7	8	9	10	11	12
Date de relevé	25.10.10	27.10.10	27.10.10	27.10.10	27.10.10	27.10.10
Début du tronçon (m)	6706 m	7806 m	8484 m	9912 m	10573 m	11051 m
Fin du tronçon (m)	7806 m	8484 m	9912 m	10573 m	11051 m	12179 m
Largeur moyenne du lit (m)	30 m	40 m	35 m	80 m	30 m	30 m
Mise sous terre	0	0	0	0	0	0
Nombreux seuils naturels	0	0	0	0	0	0
Variabilité de la largeur du lit mouillé	3 (nulle)	2 (limitée)	2 (limitée)	1 (prononcée)	2 (limitée)	2 (limitée)
Variabilité de la profondeur	3 (nulle)	2 (limitée)	3 (nulle)	1 (prononcée)	3 (nulle)	2 (limitée)
Aménagement du lit	1 (nul)	1 (nul)	1 (nul)	1 (nul)	2 (localisée < 10%)	1 (nul)
Matériau de l'aménagement du lit	1 (pierres naturelles)	1 (pierres naturelles)	1 (pierres naturelles)	1 (pierres naturelles)	2 (blocs)	1 (pierres naturelles)
Renforcement du pied de la berge gauche	5 (prépondérant > 60%)	2 (localisé 0-10%)	3 (moyen 10-30%)	1 (nul)	4 (fort 30-60%)	6 (prépondérant > 60%)
Renforcement du pied de la berge droite	5 (prépondérant > 60%)	2 (localisé 0-10%)	5 (prépondérant > 60%)	1(nul)	4 (fort 30-60%)	4 (fort 30-60%)
Matériau du renforcement du pied de la berge gauche	6 (mur)	2 (pierres naturelles)	2 (pierres naturelles)	2 (pierres naturelles)	3 (blocs)	3 (blocs)
Matériau du renforcement du pied de la berge droite	6 (mur)	2 (pierres naturelles)	3 (blocs)	3 (blocs)	3 (blocs)	3 (blocs)
Largeur moyenne des rives (gauche)	0 m	15 m	15 m	15 m	15 m	10 m
Largeur moyenne des rives (droit)	0 m	10:00 m.	10 m	15 m	15 m	10 m
Nature des rives (gauche)	3 (artificielle)	2 (atypique)	3 (artificielle)	1 (typique)	2 (atypique)	3 (artificielle)
Nature des rives (droit)	3 (artificielle)	2 (atypique)	2 (atypique)	1 (typique)	3 (artificielle)	3 (artificielle)
Peuplement d'algues	1	1	1	1	1	1
Peuplement de macrophytes	1	1	1	1	1	1
Bois mort	1	1	1	2	1	1

ETAT ECOMORPHOLOGIQUE	Classe III (très atteint)	Classe II (peu atteint)	Classe III (très atteint)	Classe I (naturel-semi/naturel)	Classe III (très atteint)	Classe III (très atteint)
-----------------------	---------------------------	-------------------------	---------------------------	---------------------------------	---------------------------	---------------------------

Annexe A.2 - Evaluation écomorphologique des tronçons de 7 à 12 le long de la Moesa.

Cours d'eau	Moesa
--------------------	--------------

Numéro de tronçon	13	14	15	16	17	18
Date de relevé	27.10.10	27.10.10	29.10.10	29.10.10	29.10.10	29.10.10
Début du tronçon (m)	12179 m	13287 m	13759 m	14220 m	15002 m	16115 m
Fin du tronçon (m)	13287 m	13759 m	14220 m	15002 m	16115 m	17655 m
Largeur moyenne du lit (m)	20 m	20 m	25 m	30 m	20 m	25 m
Mise sous terre	0	0	0	0	0	0
Nombreux seuils naturels	0	0	0	1	1	0
Variabilité de la largeur du lit mouillé	3 (nulle)	3 (nulle)	3 (nulle)	1 (prononcée)	1 (prononcée)	1 (prononcée)
Variabilité de la profondeur	3 (nulle)	3 (nulle)	3 (nulle)	1 (prononcée)	1 (prononcée)	1 (prononcée)
Aménagement du lit	1 (nul)	1 (nul)	1 (nul)	1 (nul)	1 (nul)	1 (nul)
Matériau de l'aménagement du lit	1 (pierres naturelles)	1 (pierres naturelles)	1 (pierres naturelles)	1 (pierres naturelles)	1 (pierres naturelles)	1 (pierres naturelles)
Renforcement du pied de la berge gauche	6 (prépondérant > 60%)	6 (prépondérant > 60%)	6 (prépondérant > 60%)	2 (localisé > 10%)	2 (localisé > 10%)	4 (fort 30-60%)
Renforcement du pied de la berge droite	6 (prépondérant > 60%)	6 (prépondérant > 60%)	6 (prépondérant > 60%)	2 (localisé > 10%)	2 (localisé > 10%)	2 (localisé > 10%)
Matériau du renforcement du pied de la berge gauche	3 (blocs)	3 (blocs)	3 (blocs)	3 (blocs)	3 (blocs)	3 (blocs)
Matériau du renforcement du pied de la berge droite	3 (blocs)	3 (blocs)	3 (blocs)	3 (blocs)	3 (blocs)	3 (blocs)
Largeur moyenne des rives (gauche)	15 m	10 m	15 m	15 m	15 m	15 m
Largeur moyenne des rives (droit)	15 m	10 m	10 m	10 m	15 m	15 m
Nature des rives (gauche)	3 (artificielle)	3 (artificielle)	3 (artificielle)	2 (atypique)	2 (atypique)	2 (atypique)
Nature des rives (droit)	3 (artificielle)	3 (artificielle)	3 (artificielle)	2 (atypique)	2 (atypique)	2 (atypique)
Peuplement d'algues	1	1	1	1	1	1
Peuplement de macrophytes	1	1	1	1	1	1
Bois mort	1	1	1	1	1	1

ETAT ECOMORPHOLOGIQUE	Classe III (très atteint)	Classe III (très atteint)	Classe III (très atteint)	Classe II (peu atteint)	Classe II (peu atteint)	Classe II (peu atteint)
-----------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------

Annexe A.3 - Evaluation écomorphologique des tronçons de 13 à 18 le long de la Moesa.

Cours d'eau	Moesa
--------------------	--------------

Numéro de tronçon	19	20	21	22	23
Date de relevé	29.10.10	29.10.10	29.10.10	29.10.10	29.10.10
Début du tronçon (m)	17655 m	19181 m	20228 m	20502 m	21294 m
Fin du tronçon (m)	19181 m	20228 m	20502 m	21294 m	22092 m
Largeur moyenne du lit (m)	20 m	20 m	20 m	90 m	25 m
Mise sous terre	0	0	0	0	0
Nombreux seuils naturels	0	0	1	0	0
Variabilité de la largeur du lit mouillé	3 (nulle)	2 (limitée)	3 (nulle)	1 (prononcée)	3 (nulle)
Variabilité de la profondeur	3 (nulle)	3 (nulle)	3 (nulle)	1 (prononcée)	3 (nulle)
Aménagement du lit	3 (moyen 10-30%)	2 (localisé < 10 %)	1 (nul)	1 (nul)	1 (nul)
Matériau de l'aménagement du lit	2 (blocs)	2 (blocs)	2 (blocs)	1 (pierres naturelles)	1 (pierres naturelles)
Renforcement du pied de la berge gauche	3 (moyen 10-30%)	6 (total)	6 (prépondérant > 60%)	1 (nul)	5 (prépondérant > 60%)
Renforcement du pied de la berge droite	6 (total)	6 (total)	6 (prépondérant > 60%)	1(nul)	6 (total)
Matériau du renforcement du pied de la berge gauche	3 (blocs)	3 (blocs)	3 (blocs)	2 (pierres naturelles)	3 (blocs)
Matériau du renforcement du pied de la berge droite	3 (blocs)	3 (blocs)	3 (blocs)	2 (pierres naturelles)	3 (blocs)
Largeur moyenne des rives (gauche)	10 m	10 m	15 m	15 m	15 m
Largeur moyenne des rives (droit)	15 m	10 m	15 m	15 m	15 m
Nature des rives (gauche)	3 (artificielle)	3 (artificielle)	3 (artificielle)	1 (typique)	3 (artificielle)
Nature des rives (droit)	3 (artificielle)	3 (artificielle)	3 (artificielle)	1 (typique)	3 (artificielle)
Peuplement d'algues	1	1	1	1	1
Peuplement de macrophytes	1	1	1	1	1
Bois mort	2	2	1	2	2

ETAT ECOMORPHOLOGIQUE	Classe IV (non naturel/artificiel)	Classe III (très atteint)	Classe III (très atteint)	Classe I (naturel(semi-naturel)	Classe III (très atteint)
-----------------------	------------------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------------	---------------------------

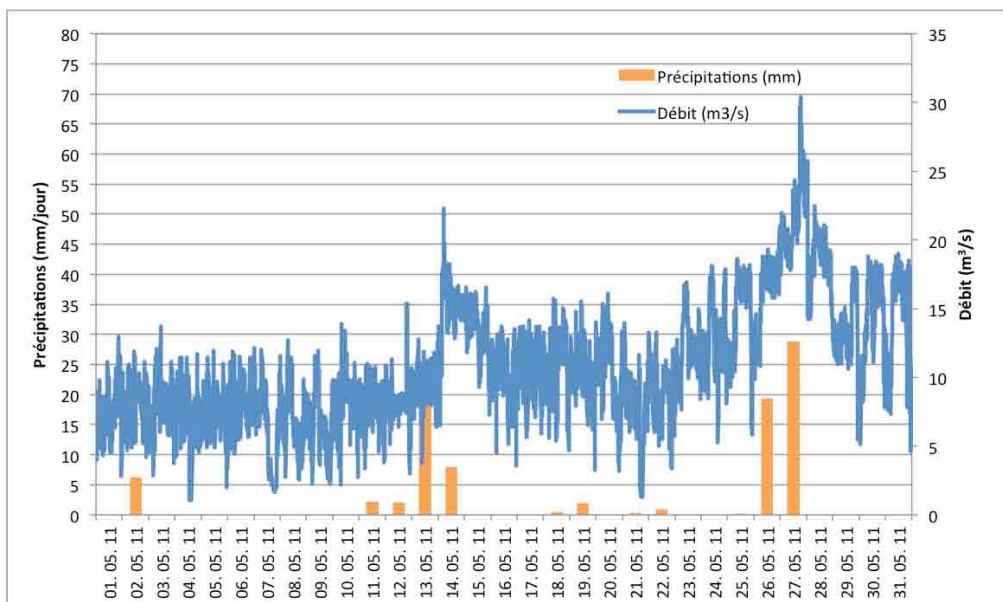
Annexe A.4 - Evaluation écomorphologique des tronçons de 19 à 23 le long de la Moesa.

Cours d'eau	Morobbia
--------------------	-----------------

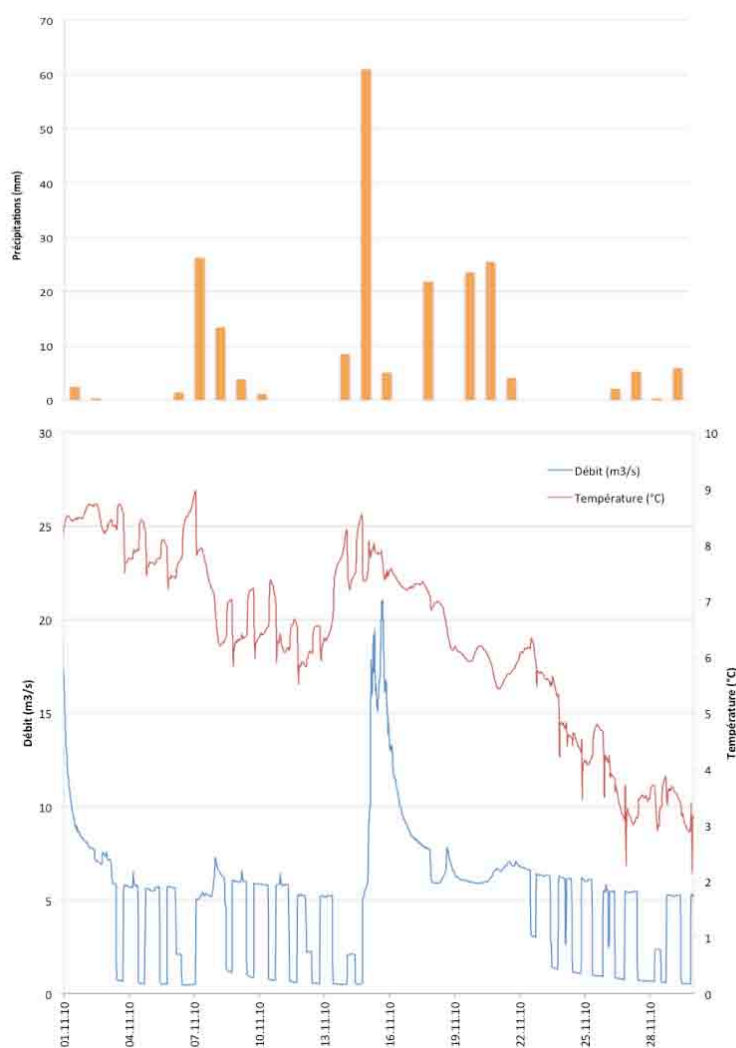
Numéro de tronçon	1	2	3	4	5
Date de relevé	01.10.10	01.10.10	01.10.10	01.10.10	01.10.10
Début du tronçon (m)	0 m	74 m	301 m	1180 m	1795 m
Fin du tronçon (m)	74 m	301 m	1180 m	1795 m	2200 m
Largeur moyenne du lit (m)	12 m	12 m	10 m	15 m	10
Mise sous terre	0	0	0	0	0
Nombreux seuils naturels	0	0	0	0	0
Variabilité de la largeur du lit mouillé	3 (nulle)	3 (nulle)	3 (nulle)	2 (limitée)	2
Variabilité de la profondeur	3 (nulle)	3 (nulle)	3 (nulle)	3	2
Aménagement du lit	1 (nul)	1 (nul)	1 (nul)	1 (nul)	1
Matériau de l'aménagement du lit	2 (blocs)	2 (blocs)	2 (blocs)	1 (pierres naturelles)	1
Renforcement du pied de la berge gauche	6 (total)	6 (total)	6 (total)	6 (total)	1 (nul)
Renforcement du pied de la berge droite	6 (total)	6 (total)	6 (total)	6 (total)	2 (localisé <10 %)
Matériau du renforcement du pied de la berge gauche	2 (pierres naturelles) et 3 (blocs)	2 (pierres naturelles) et 3 (blocs)	2 (pierres naturelles) et 3 (blocs)	2 (pierres naturelles) et 3 (blocs)	1 (pierres naturelles)
Matériau du renforcement du pied de la berge droite	3 (pierres naturelles) et 3 (blocs)	3 (pierres naturelles) et 3 (blocs)	2 (pierres naturelles) et 3 (blocs)	2 (pierres naturelles) et 3 (blocs)	3 (blocs)
Largeur moyenne des rives (gauche)	15 m	15 m	10 m	10 m	15 m
Largeur moyenne des rives (droit)	15 m	10 m	10 m	10 m	7 m
Nature des rives (gauche)	3 (artificielle)	3 (artificielle)	3 (artificielle)	3	1 (typique pour un cours d'eau)
Nature des rives (droit)	3 (artificielle)	3 (artificielle)	3 (artificielle)	3	3 (artificielle)
Peuplement d'algues	1 (en hiver!!)	1 (en hiver!!)	1 (en hiver!!)	1 (en hiver!!)	1 (en hiver!!)
Peuplement de macrophytes	1	1	1	1	1
Bois mort	1	1	1	1	1

ETAT ECOMORPHOLOGIQUE	Classe III (très atteint)	Classe III (très atteint)	Classe III (très atteint)	Classe III (très atteint)	Classe II (peu atteint)
-----------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	-------------------------

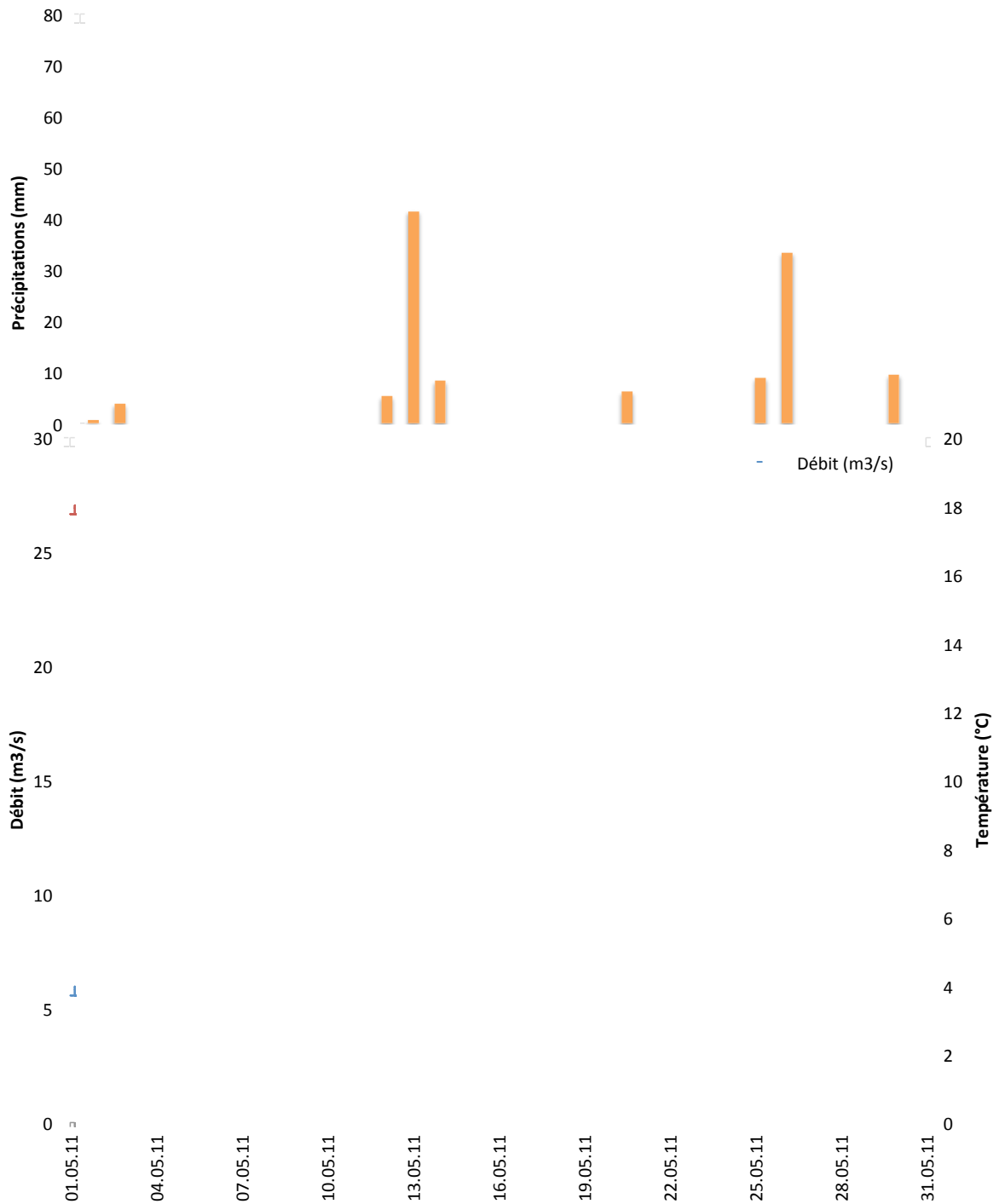
Annexe A.5 - Evaluation écomorphologique des tronçons le long de la Morobbia.



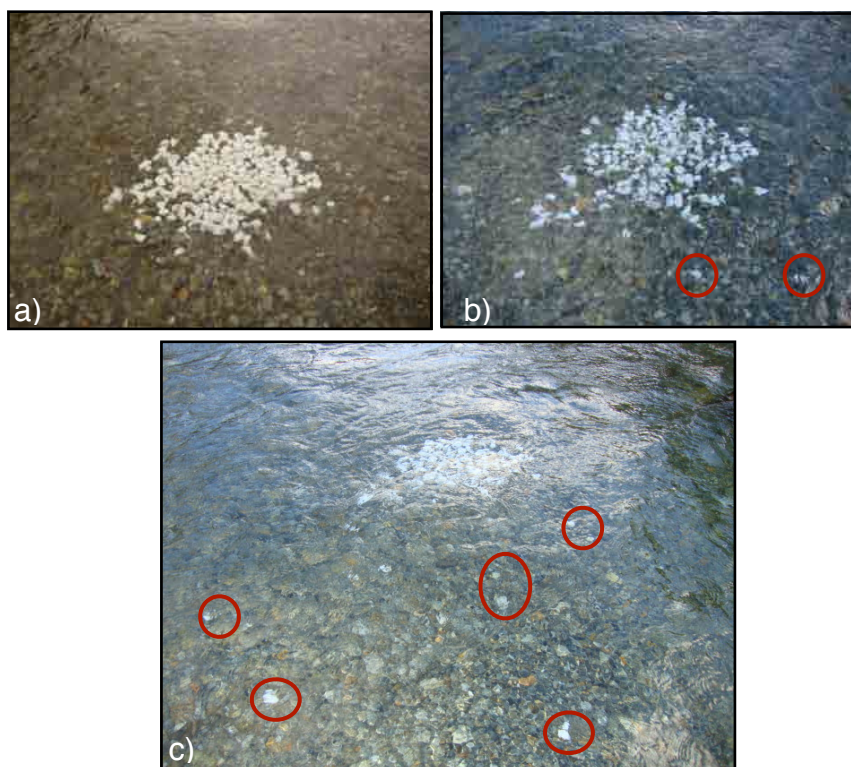
Annexe A.6 - Précipitations et débits mesurés à Cabiolo en mai 2011. Deux crues importantes sont présentes pendant la deuxième et la dernière semaine de mai ; leur présence pourrait expliquer les faibles valeurs des indices Q_{max}/Q_{min} et HP_1 .



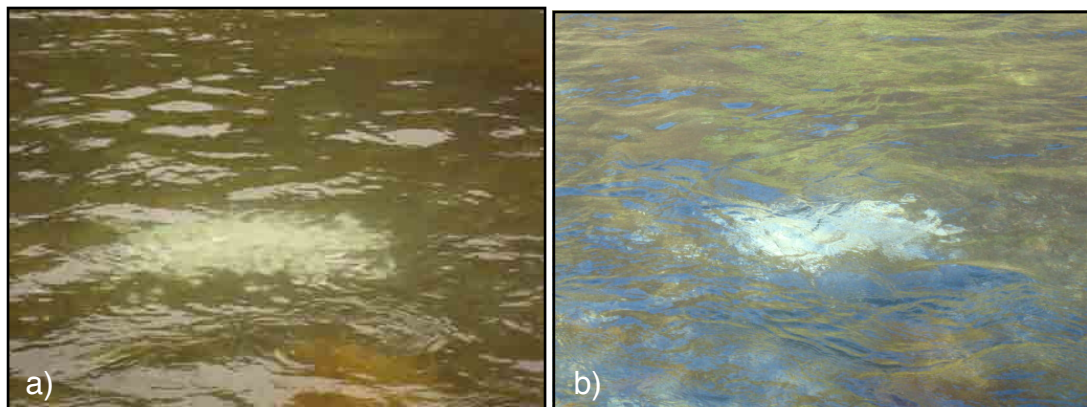
Annexe A.7- Précipitations et débits de la Morobbia mesurés en novembre 2010. Nous remarquons la présence de précipitations importantes qui ont abaissé les valeurs du rapport Q_{max}/Q_{min} (7.39 : 1) et de l'indice HP_1 (0.96 m³/s).



Annexe A.8 - Précipitations et débits de la Morobbia mesurés en mai 2011. Pour les mêmes quantités des pluies (comparer avec l'annexe A.6), nous n'avons pas enregistré de crues importantes. La surface du bassin versant de la Morobbia (45.2 km²) permettrait d'expliquer cette situation. Les caractéristiques du bassin hydrologique influencent la réponse du cours d'eau à des sollicitations, telles que les pluies.



Annexe A. 9 - Série d'essais pour l'évaluation de la présence du transport sédimentaire à Lostallo, a proximité du point de restitution des eaux turbinées par la centrale Eline SA. a) image prise le 4 avril 2011 pendant le débit plancher ; b) image prise le 6 avril après l'arrivée du débit d'éclusée. Dans l'image du bas (c), les cercles rouges indiquent la présence de certains grains qui se sont déplacés d'environ 1-2 mètres à cause de la fluctuation journalière des débits.



Annexe A. 10 - Série d'essais pour l'évaluation de la présence du transport sédimentaire à Lostallo, a proximité du point de restitution des eaux turbinées par la centrale Eline SA. a) image prise le 4 avril 2011 pendant le débit plancher ; b) image prise le 6 avril après l'arrivée du débit d'éclusée.

	Morobbia
T_{mean} (°C)	6.06
T_{max} (°C)	6.87
T_{min} (°C)	4.90
ΔT_{mean} (°C)	1.97

Annexe A.11 - Valeurs moyennes annuelles des températures enregistrées par la station de Giubiasco.