

*Sur mandat de l'Office fédéral de l'Environnement
Division Eaux, Prévention des dangers
et Espèces, écosystèmes, paysages*

Espace nécessaire aux grands cours d'eau de Suisse



La Sarine et le village de Neirivue FR

RAPPORT 2020

*Grégory Paccaud, Tamara Ghilardi, Christian Roulier
Expertise: Lukas Hunzinger, Flussbau AG SAH*

Impressum

Mandant

Office fédéral de l'environnement (OFEV), division Eaux, CH-3003 Berne. L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC)

Mandataires

Service conseil Zones alluviales SCZA et CSD ingénieurs SA,
Avenue des Sports 14, 1400 Yverdon-les-Bains

Auteurs

Grégory Paccaud, Ing. env. EPFL, SCZA, Yverdon-les-Bains
Dr Tamara Ghilardi, Ing. env. EPFL, CSD SCZA, Yverdon-les-Bains
Dr Christian Roulier, Biologiste, CSD SCZA, Yverdon-les-Bains
Dr Lukas Hunzinger, Ing. civ. ETHZ, Flussbau AG SAH, Bern

Accompagnement

Ulrich von Blücher (direction du projet), Katharina Edmaier, division Eaux
Paul Dändliker, anciennement division Prévention des dangers naturels
Stephan Lussi, division Espèces, écosystèmes, paysages

Citation

Paccaud G., Ghilardi T., Roulier C., Hunzinger L. 2020. Espace nécessaire aux grands cours d'eau de Suisse. Rapport CSD Ingénieurs SA et SCZA sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne: 122 p.

Indication

Le présent rapport a été élaboré sur mandat de l'OFEV et traduit en allemand. Les mandataires sont seuls responsables de son contenu.

© OFEV 20.02.2020

TABLE DES MATIERES

	Glossaire des termes utilisés	1
	Résumé	7
1	Introduction	9
2	But du travail	10
3	L'espace cours d'eau en Suisse	10
4	Fonctions de l'espace réservé aux eaux	14
4.1	Milieu aquatique	15
4.1.1	<i>Transport de l'eau et des sédiments</i>	15
4.1.2	<i>Connectivité longitudinale aquatique</i>	16
4.1.3	<i>Capacité d'autoépuration</i>	17
4.1.4	<i>Diversité structurelle du fond du lit</i>	18
4.1.5	<i>Maintien des espèces typiques du milieu aquatique</i>	18
4.2	Milieu amphibien	19
4.2.1	<i>Connectivité transversale (ou latérale)</i>	19
4.2.2	<i>Alimentation des nappes phréatiques</i>	20
4.2.3	<i>Diversité structurelle du milieu amphibien</i>	21
4.3	Milieu terrestre	22
4.3.1	<i>Connectivité longitudinale terrestre</i>	22
4.3.2	<i>Effet tampon</i>	24
4.3.3	<i>Diversité structurelle du milieu terrestre</i>	27
4.3.4	<i>Dynamique d'inondation</i>	28
4.3.5	<i>Développement de communautés végétales typiques</i>	29
4.3.6	<i>Conservation des espèces terrestres typiques</i>	36
4.3.7	<i>Capacité de résilience des peuplements</i>	37
4.4	Fonctions sociales	37
4.4.1	<i>Espace récréatif</i>	37
4.4.2	<i>Paysage</i>	38
4.5	Fonctions retenues	38
5	Caractéristiques du cours d'eau	41
5.1	Style fluvial	41

5.1.1	<i>Styles fluviaux</i>	41
5.1.2	<i>Détermination du style fluvial naturel d'un cours d'eau corrigé</i>	44
5.2	Estimation des largeurs du fond du lit et des berges	45
5.2.1	<i>Largeur naturelle du fond du lit L_{fl} et largeur à pleins bords L_{pb}</i>	45
5.2.2	<i>Largeur naturelle des berges</i>	46
6	Évaluation des fonctions	47
<hr/>		
6.1	Méthode multicritère	47
6.2	Courbes de satisfaction	48
6.2.1	<i>Milieu aquatique</i>	48
6.2.2	<i>Milieu amphibien</i>	49
6.2.3	<i>Milieu terrestre</i>	50
6.3	Pondération des fonctions	56
6.3.1	<i>Table de pondération</i>	56
6.3.2	<i>Styles fluvial</i>	57
6.3.3	<i>Importance relative des fonctions</i>	57
6.4	Exigences des zones alluviales	58
6.4.1	<i>Forêts à bois durs</i>	58
6.4.2	<i>Bande de divagation</i>	58
7	Compartiments de l'espace réservé aux eaux	60
<hr/>		
7.1	Espace de mobilité	60
7.2	Espace des berges	62
7.3	Zone inondable	62
7.4	Espace boisé	62
7.5	Espace extensif	63
7.6	Zone construite	63
7.7	Profil moyen	63
8	Procédure	65
<hr/>		
8.1	Fonctiogramme	65
8.1.1	<i>Cas général : fond de vallée large</i>	65
8.1.2	<i>Fond de vallée étroit</i>	66
8.2	Profil moyen	68
8.2.1	<i>Évaluation de l'état actuel ou de l'état projeté</i>	68
8.2.2	<i>Définition de l'espace réservé à partir des objectifs écologiques</i>	71
8.3	Grand projet	72
9	Analyse de sensibilité de trois paramètres	73
<hr/>		
9.1	Débit morphogène	73

9.2	Pente du lit	74
9.3	Style fluvial	74
9.4	Conclusion	75
10	Application à six cas d'étude	76
<hr/>		
10.1	La Birse entre Soyhières et Liesberg	76
10.1.1	<i>Style fluvial</i>	76
10.1.2	<i>Objectif écologique</i>	77
10.1.3	<i>Fonctiogramme de l'espace de mobilité</i>	77
10.1.4	<i>Évaluation</i>	79
10.2	L'Aar entre Büren et Soleure	80
10.2.1	<i>Style fluvial naturel</i>	80
10.2.2	<i>Profils moyens</i>	81
10.2.3	<i>Profil normal actuel</i>	82
10.2.4	<i>Évaluation</i>	83
10.3	La Kleine Emme à Malters	84
10.3.1	<i>Style fluvial</i>	84
10.3.2	<i>Fonctiogramme de l'espace de mobilité</i>	85
10.3.3	<i>Evaluation</i>	86
10.4	La Maggia à Someo	88
10.4.1	<i>Style fluvial naturel</i>	89
10.4.2	<i>Test de la validité de la procédure</i>	89
10.4.3	<i>Commentaire des résultats</i>	93
10.5	L'Aar entre Thoune et Berne	93
10.5.1	<i>Trois compartiments</i>	94
10.5.2	<i>Secteur choisi</i>	95
10.5.3	<i>Style fluvial</i>	95
10.5.4	<i>Évaluation</i>	97
10.5.5	<i>Évaluation des deux scénarios</i>	98
10.6	La Sarine en amont du Lac de la Gruyère	100
10.6.1	<i>Évaluation du style fluvial naturel</i>	100
10.6.2	<i>Profil moyen de l'état actuel</i>	102
10.6.3	<i>Évaluation</i>	104
10.6.4	<i>Commentaire</i>	104

11	Conclusions	105
<hr/>		
12	Bibliographie	107
<hr/>		
13	ANNEXES	113
<hr/>		
ANNEXE 1	L'espace cours d'eau en France	113
ANNEXE 2	L'espace cours d'eau en Autriche	114
ANNEXE 3	L'espace cours d'eau en Allemagne	114
ANNEXE 4	Directive cadre sur l'eau	115

Glossaire des termes utilisés

Amplitude naturelle des méandres A_{nat}

L'amplitude naturelle des méandres (A_{nat}) définit l'espace total touché par le lit d'un cours d'eau en méandres en conditions naturelles (cf. chap. 5.1.1).

Facteurs abiotiques et biotiques du système cours d'eau

On désigne sous le terme de facteurs abiotiques les éléments non vivants d'un écosystème et sous le terme de facteurs biotiques les éléments vivants. Les facteurs abiotiques influençant le système cours d'eau sont entre autres le débit morphogène, la granulométrie des sédiments, la disponibilité de sédiments. Ces aspects génèrent une certaine morphologie (style fluvial) de cours d'eau et influencent la dynamique abiotique du système (érosion, sédimentation, migration latérale du chenal). Les facteurs biotiques sont caractérisés par la faune typique, la végétation, etc. Dans un écosystème, les interactions naturelles entre le non-vivant et le vivant prennent de l'espace. Dans la détermination de l'espace nécessaire aux cours d'eau, divers aspects biotiques et abiotiques doivent être pris en compte pour évaluer les fonctions écologiques du cours d'eau.

Bancs alternés

Les bancs alternés désignent une structure intermédiaire entre un écoulement rectiligne et un début de divagation en tresse ou en méandres migrants, souvent induite par des contraintes spatiales. Des bancs de gravier se forment le long du cours d'eau et se déplacent en alternance sur les deux côtés de la berge (cf. p.ex. Jäggi 1979). La morphologie en bancs alternés constitue un stade initial des méandres migrants, souvent contraints par des stabilisations de berges (cf. chap. 5.1.1).

Bande de divagation

La bande (ou corridor) de divagation permet d'assurer au cours d'eau une dynamique naturelle dans laquelle il peut remplir ses diverses fonctions et s'intégrer dans le paysage. Y sont indiquées les zones de protection (p. ex. zone alluviale d'importance nationale) et les zones d'exploitation extensive (p. ex. espace récréatif). L'espace en forme de bande réserve assez de place pour développer des méandres et des tresses. L'érosion des berges est possible jusqu'à un certain degré (OFEG et al. 2000).

La bande de divagation préconisée dans le dépliant abaque (*ibidem*) correspond à 5 – 6 fois la largeur du fond du lit pour tous les cours d'eau ;

pour faire le lien avec le présent rapport, ce coefficient correspond approximativement à $3.5 L_{pb}$ pour les communautés typiques et les structures du milieu terrestre des cours en tresses. Par contre pour les cours en méandres, la norme du dépliant abaque (*ibidem*) ne suffit pas ; une bande de divagation d'une largeur égale à l'amplitude naturelle des méandres est préconisée ; cette exigence se fonde sur le besoin d'espace des structures du milieu terrestre ($100 \% A_{nat}$) et partiellement sur les exigences de la dynamique d'inondation (5 fois L_{pb}) et est nécessaire dans les biotopes d'importance nationaux et cantonaux (p. ex. de zones alluviales).

Courbe de satisfaction

Les courbes de satisfaction (ou fonction de préférence) employées indiquent pour chaque valeur d'une fonction écologique (p. ex. avec le paramètre « développement des communautés végétales typiques ») le degré de satisfaction correspondant. Les courbes permettent d'identifier le pourcentage de satisfaction de chaque fonction naturelle du cours d'eau. La note varie entre 0 (valeur seuil minimum : fonction non satisfaite) et 100% (valeur seuil maximum : fonction entièrement satisfaite). Entre ces deux extrêmes, la note varie en identifiant une satisfaction partielle de la fonction évaluée (cf. chap. 6.2).

Débit morphogène

Le débit morphogène est à l'origine de la formation et de la dynamique des faciès d'écoulement et des remaniements morphologiques (transformation du milieu par érosion, déposition, etc. ; cf. « dynamique »). Ce débit peut varier d'un style fluvial à l'autre et correspond au débit de plein bord qui remplit le lit mineur. Le débit morphogène correspond généralement à un HQ_5 (crue quinquennale) pour les cours en tresses et les méandres migrants, ou un $HQ_1 - HQ_2$ (crue biennale) pour les méandres développés.

Dynamique morphologique

À l'état naturel, un cours d'eau se trouve continuellement dans un ajustement écomorphologique autour d'un équilibre dynamique. Ces ajustements structurels se traduisent par de l'érosion combinée avec du dépôt de matériaux dans le lit, de l'érosion latérale et le déplacement du lit, le remaniement des plaines alluviales (dynamique de rajeunissement) etc. Cette dynamique contribue au maintien de la biodiversité inféodée.

Dynamique de rajeunissement

La dynamique de rajeunissement est particulièrement propice au maintien d'une grande biodiversité car elle remanie périodiquement les terrasses alluviales. En période de crue, les bancs de gravier sont

inondés, la végétation moins bien enracinée emportée par le courant et les sédiments déplacés d'un endroit à l'autre.

Espace de mobilité E_{mob}

L'espace de mobilité (E_{mob}) est l'espace compris entre deux stabilisations de berge. Il désigne l'ensemble de la surface remaniée par le déplacement du lit du cours d'eau. Dans cet espace, les milieux aquatiques, amphibiens et terrestres peuvent évoluer de manière naturelle. Cet espace n'est pas stabilisé par des protections de berge ou de lit. (cf. chap. 7 et Figure 15).

Forêts alluviales et formations à bois durs

Les formations à bois durs se trouvent dans les zones les plus éloignées de la rivière ainsi que sur les terrasses supérieures de la zone alluviale ; elles sont principalement constituées par le frêne, l'orme de montagne et l'érable sycomore. Les formations à bois durs sont sous l'influence permanente ou temporaire de la nappe phréatique et des inondations lors des crues exceptionnelles (adapté de Hausammann et al. 2005).

Forêts alluviales et formations à bois tendres

Les formations à bois tendre colonisent les îles des cours d'eau ainsi que la zone située entre le lit mineur et la forêt alluviale à bois durs. Ces formations ligneuses pionnières sont dominées par les saules, les aulnes et les peupliers. Elles sont généralement alimentées par la nappe phréatique et par les hautes eaux supérieures aux crues biennales à quinquennales (HQ_2 à HQ_5) (adapté de Hausammann et al. 2005).

Largeur à pleins bords L_{pb}

La largeur à pleins bords (L_{pb}) lors d'un débit morphogène dans un cours d'eau naturel est prise comme paramètre de base dans la procédure. Elle correspond à la largeur du miroir du cours d'eau lors d'un débit défini et contient les milieux aquatiques et amphibiens. La largeur à pleins bords peut être déterminée de plusieurs façons (cf. chap. 5.2.1) et dépend du débit et de la forme du lit (Figure 5). Le débit morphogène peut varier d'un style fluvial à l'autre et correspond au débit qui remplit le lit mineur (cf. « débit morphogène »). Le débit à pleins bords vaut un HQ_5 (crue quinquennale) pour les cours en tresses et les méandres migrants, un HQ_1 - HQ_2 (crue biennale) pour les méandres développés (Paccaud et Roulier 2010).

Largeur naturelle du fond du lit L_{fi}

La largeur naturelle du fond du lit (L_{fi}) est la largeur naturelle moyenne du fond du lit d'un cours d'eau dans un tronçon donné. Le fond du lit est la zone qui est en général mobilisée par débit morphogène (crue moyenne de retour de 2 à 5 ans) et donc dépourvue de plantes supérieures aquatiques ou terrestres. Les cours d'eau aménagés ou approfondis ne disposent généralement pas d'une largeur de lit naturelle. Le fond de leur lit est plus étroit et offre une variabilité de largeur faible, limitée ou inexistante. Il existe plusieurs méthodes pour calculer la largeur naturelle du fond du lit.

Structures morphologiques

Les différentes conditions hydrauliques (profondeur d'eau, vitesse de l'écoulement, etc.) de chaque tronçon fractionnent le cours d'eau en diverses structures d'habitat et respectivement de milieux naturels. Plus la diversité de ces structures est élevée, plus la diversité des biocénoses (communautés) sera élevée. Les structures du fond du lit sont multiples, et incluent notamment l'alternance de chutes et bassins (*step-pool*), radiers et bassins (*riffle-pool*), la présence d'affouillements, de bancs de gravier ou de sable, de ramifications.

Style fluvial

On appelle style fluvial la forme générale du lit. Le style fluvial d'un cours d'eau dépend principalement de la pente et de la structure du fond du lit, de la puissance du cours d'eau (débit morphogène), des forces nécessaires aux transports des sédiments et l'apport de sédiments du cours d'eau (granulométrie des sédiments). Dans ce document, 5 styles fluviaux sont identifiés (torrents et cours rectilignes ; cours encaissés ; tresses ; méandres migrants ; méandres développés). Des styles intermédiaires existent également (bancs alternés). Pour l'application de la présente méthode, il sera nécessaire d'attribuer un style fluvial précis au cours d'eau étudié.

Styles fluviaux

- « **Cours rectilignes et torrents** »

Les torrents et les cours rectilignes sont caractérisés par une forte pente. En général, ils suivent la ligne de pente. Les cours rectilignes subissent peu de migration latérale et n'ont donc pas besoin de beaucoup d'espace pour remplir leurs fonctions naturelles. Ces dernières sont d'ailleurs limitées, autant dans le milieu aquatique que terrestre (cf. chap. 5.1.1).

- **« Cours encaissés »**

Les cours encaissés se sont, au fil du temps, enfoncés dans la roche par érosion progressive du fond de leur lit. Le fond du lit est généralement constitué de graviers. Il peut s'agir de gorges ou de méandres de fond de vallée. Le lit est peu mobile et se déplace très lentement car la roche offre une grande résistance à l'érosion. L'espace riverain est donc limité par la topographie ; les fonctions naturelles se concentrent essentiellement dans les milieux aquatiques et amphibiens (cf. chap. 5.1.1).

- **« Tresses » (style en tresses)**

Les cours en tresses se développent sous des conditions de pente relativement élevées avec un apport solide important et suffisamment d'espace. Ils sont caractérisés par des chenaux multiples entrelacés. Les cours en tresses abritent, grâce notamment à la présence d'îles et de bancs de sédiments de hauteurs variables, une mosaïque d'habitats riches et diversifiés (cf. chap. 5.1.1). Souvent se forme un chenal principal, mais celui-ci varie continuellement sa géométrie et son emplacement dans l'espace du cours d'eau.

- **« Méandres migrants » (style en méandres migrants)**

Les méandres migrants se développent sous des conditions de pente moyenne à faible, avec un charriage relativement important. Les méandres migrants évoluent dans des terrains relativement peu cohésifs et ne peuvent donc pas se développer complètement. Ils érodent la berge du côté aval et déposent leurs sédiments sur la berge amont. Ils migrent ainsi vers l'aval sans trop se déformer, atteignent une sinuosité modérée et ne se court-circuitent pas. La zonation végétale des systèmes en méandres migrants est proche de celle des cours en tresses (cf. chap. 5.1.1).

- **« Méandres développés » (style en méandres développés)**

Les méandres développés sont caractéristiques des terrains plats à faible charriage. Les berges sont cohésives et les méandres peuvent se développer complètement jusqu'à se court-circuiter, ce qui génère la formation de bras morts, un point important. Les méandres tortueux débordent facilement et entretiennent une bande humide dans l'espace riverain (rive). Des inondations régulières ainsi que des remontées de la nappe phréatique maintiennent une humidité élevée et influencent la végétation dans les terrains bordant les cours d'eau et dans toute la plaine alluviale (cf. chap. 5.1.1).

Résumé

Ce rapport traite de l'espace nécessaire aux grands cours d'eau de Suisse. Une procédure est proposée aux gestionnaires des cours d'eau en charge d'appliquer l'ordonnance fédérale sur la protection des eaux (OEaux ; nouvelle teneur du 4 mai 2011, en vigueur depuis le 1^{er} juin 2011). Sur la base du style fluvial et des dimensions du cours d'eau, une note synthétique reflétant une situation donnée concernant l'espace à disposition du cours d'eau est calculée. La procédure permet aussi de comparer des situations ou des variantes de projets de revitalisation (chapitres 1 à 3).

Les bases scientifiques relatives au besoin d'espace des cours d'eau dont la largeur du fond du lit est de plus de 15 m sont présentées, de même que les fonctions et les exigences de cet espace. Les fonctions naturelles des cours d'eau sont présentées et discutées afin d'identifier celles qui dépendent de l'espace à disposition (chapitre 4).

Les caractères du cours d'eau qui doivent être connus pour appliquer la méthode figurent sous chapitre 5 alors que les fondements théoriques, les courbes de satisfaction, leur pondération et les exigences particulières des zones alluviales et des bandes de divagation sont exposées sous chapitre 6. La méthode donne le pourcentage des fonctions naturelles remplies selon l'espace à disposition. Jusqu'à un certain seuil, plus l'espace à disposition est important, plus la proportion de fonctions naturelles satisfaites est élevée.

L'espace de mobilité représente l'espace réservé au cours d'eau pour évoluer naturellement sans aucune intervention humaine, ni stabilisation des berges ou du lit. Certaines fonctions peuvent être remplies à l'extérieur de l'espace de mobilité (chapitre 7).

La procédure permet d'optimiser l'espace nécessaire aux eaux et aux compartiments du cours d'eau. Elle se compose des étapes suivantes (chapitre 8) :

- **Fonctiogramme** : ce graphique est généré individuellement pour chaque tronçon homogène d'un cours d'eau ; il présente les fonctions remplies pour chaque largeur de l'espace et indique une note synthétique (% de satisfaction) ;
- **Profil type** : un profil technique d'un tronçon homogène, transformé en profil moyen pour être traité par la méthode, reçoit une note reflétant la valeur de la situation ;
- **Grand projet** : pour les aménagements de plusieurs kilomètres de cours d'eau, une note synthétique reflétant la valeur moyenne du projet est générée.

Une analyse de sensibilité est réalisée sur trois paramètres de base : le débit, la pente du lit et le style fluvial (chapitre 9).

Au final, six cas d'étude illustrent l'application de la procédure afin de mettre en évidence son fonctionnement, ses qualités et ses limites. Les tronçons de cours d'eau choisis sont : la Birse à Soyhières, l'Aar entre Büren et Soleure, la Kleine Emme entre Malters et Littau, la Maggia en aval de Someo, l'Aar entre Thoune et Berne et la Sarine en amont du Lac de la Gruyère (chapitre 10).

*La procédure est disponible pour tous les utilisateurs sous la forme d'un **outil internet** :*

<http://www.zones-alluviales.ch/OutilGCE/accueil-espace-ce-fr.html>

1 Introduction

La loi fédérale sur la protection des eaux (art. 36a LEaux ; RS 814.20) et son ordonnance (art. 41a OEaux ; RS 814.201) demandent aux cantons de définir un espace réservé aux eaux. L'ordonnance précise les dimensions de cet espace pour les cours d'eau dont la largeur naturelle du lit est inférieure à 15 m (art. 41a, al. 2 OEaux) ainsi que pour les cours d'eau situés dans un biotope ou un site paysager d'importance nationale ou cantonale (art. 41a, al. 1 OEaux).

Art. 41a OEaux - Espace réservé au cours d'eau

1. Dans les biotopes d'importance nationale, les réserves naturelles cantonales, les sites marécageux d'une beauté particulière et d'importance nationale, les réserves d'oiseaux d'eau et d'oiseaux migrateurs d'importance internationale ou nationale, ainsi que dans les sites paysagers d'importance nationale et dans les sites paysagers cantonaux dont les buts de protection sont liés aux eaux, la largeur de l'espace réservé au cours d'eau mesure au moins :

- a. 11 m pour les cours d'eau dont la largeur naturelle du fond du lit est inférieure à 1 m ;
- b. six fois la largeur du fond du lit +5 m pour les cours d'eau dont la largeur naturelle du fond du lit mesure entre 1 et 5 m ;
- c. la largeur du fond du lit +30 m pour les cours d'eau dont la largeur naturelle du fond du lit est supérieure à 5 m.

Pour des cours d'eau dont la largeur du fond du lit est de plus de 15 m, cette délimitation doit se faire au cas par cas, par les cantons.

Toujours à l'art. 41a (al. 3, lit. b) OEaux, l'ordonnance mentionne que l'espace réservé aux cours d'eau doit être augmenté (calculé d'après art 41a, al. 1 et 2), si nécessaire, afin d'assurer l'espace requis pour une revitalisation. Une des difficultés majeures de l'application de cette disposition est le manque de bases pour définir le besoin d'espace des revitalisations.

La procédure proposée est une approche systématique, mais pragmatique, évaluant l'espace nécessaire aux grands cours d'eau. Elle est systématique, car elle prend en considération les principales fonctions de l'espace nécessaire au cours d'eau. Elle est pragmatique, car elle fait des choix et des simplifications afin d'être applicable à tous les grands cours d'eau.

La méthode de calcul de l'espace nécessaire au cours d'eau ici présentée fixe des largeurs plus élevées dans les biotopes et sites d'importance nationale et cantonale liés aux milieux aquatiques, et dans les tronçons où l'installation d'une bande de divagation est visée.

Le terme de « grand cours d'eau » s'applique aux cours d'eau dont la largeur naturelle du fond du lit est supérieure à 15 m ; ainsi, un cours d'eau corrigé de 8 m de largeur est susceptible d'appartenir à cette catégorie, en partant du fait que la largeur naturelle du lit d'un cours d'eau corrigé compte le double (donc 16 m au lieu de 8 m). La présente étude est valable pour les moyens et grands cours d'eau.

2 But du travail

La présente étude collecte les bases théoriques sur le besoin d'espace des cours d'eau dont la largeur naturelle du fond du lit est de plus de 15 m, et constitue une aide à la décision pour la délimitation de cet espace à tenir compte dans les projets d'aménagement de cours d'eau, en l'occurrence lors de mesures de revitalisation.

La procédure proposée se fonde sur les principales fonctions de l'espace cours d'eau ; ces fonctions sont traduites en courbes de satisfaction et aboutissent à une note.

3 L'espace cours d'eau en Suisse

La première publication de la Confédération sur le thème de l'espace cours d'eau date de l'an 2000. Quatre offices fédéraux (OFEG, OFEFP, OFAG et OFDT 2000) avaient alors collaboré pour produire une brochure dépliant intitulée « *Réserver l'espace pour les cours d'eau* ». Cette brochure contient notamment un abaque, bien connu actuellement, permettant de déterminer la largeur de la zone riveraine ; l'abaque constitue une référence pour délimiter l'espace des cours d'eau dont la largeur du fond du lit est de moins de 15 m (Figure 1).

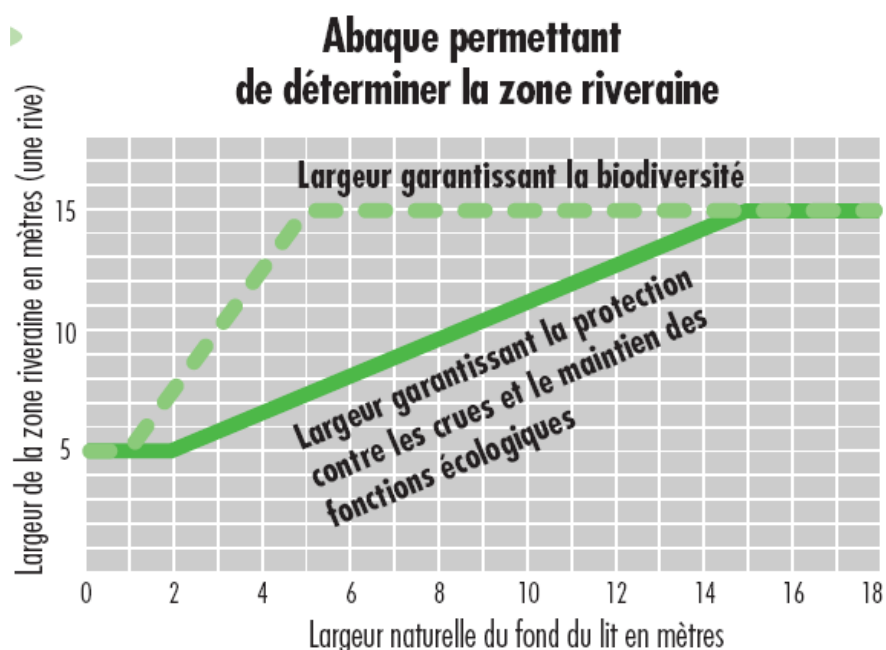


Figure 1. Abaque servant à réserver l'espace nécessaires aux cours d'eau mesurant jusqu'à 15 m de largeur de lit.

Cet abaque a été largement utilisé et l'est encore puisque la courbe de « la largeur garantissant la protection contre les crues et le maintien des fonctions écologiques » est inscrite dans l'OEaux comme méthode

de référence pour définir l'**espace minimum à réserver aux eaux** des cours d'eau dont la largeur du fond du lit est de moins de 15 m (art. 41a al. 1 et 2 OEaux).

On constate qu'il existe deux courbes : celle qui exige le plus d'espace identifie la largeur minimale garantissant la biodiversité, alors que la largeur minimale servant à garantir le maintien des fonctions écologiques a des exigences inférieures. La brochure de l'an 2000 spécifie que « les valeurs obtenues selon l'abaque (ligne verte continue) représentent l'espace minimum recommandé. Ce dernier ne devrait pas être inférieur à ces valeurs qui garantissent la mise en réseau des habitats ainsi que la protection contre les crues. Pour favoriser la diversité naturelle des communautés animales et végétales, une augmentation est nécessaire (ligne verte en tirets) ».

Le document mentionne également l'existence d'une **bande de divagation**, qui est égale à 5 ou 6 fois la largeur du fond du lit, pour permettre la formation de méandres.

En 2003, les quatre mêmes offices fédéraux cités ci-dessus publient un document intitulé « *Idées directrices, cours d'eau suisses, pour une politique de gestion durable de nos eaux* ». On y trouve une page consacrée à l'« espace suffisant réservé aux cours d'eau » qui reprend la plupart des éléments de la brochure de 2000, et notamment l'abaque. On y voit également quelques nouveaux éléments qui sont proches de l'actuelle OEaux. Parmi les fonctions de l'espace cours d'eau, on notera deux fonctions supplémentaires :

- la diversité structurelle des milieux aquatiques, amphibiens et terrestres
- le développement d'espèces typiques

Le document ci-dessus précise que la bande de divagation vise à la formation de méandres et de bras latéraux ainsi qu'à une érosion modérée des rives de manière à ce que le cours d'eau puisse se développer naturellement dans l'espace et dans le temps. Mais la principale nouveauté réside dans le fait qu'on tient compte du statut de protection du cours d'eau pour définir son espace. Dans les biotopes et sites classés d'importance nationale ou cantonale (cf. art. 41a, al. 1 OEaux), on préconise la courbe de la biodiversité comme espace minimum, voire même une bande de divagation (dans la mesure où des objectifs ont été fixés à ce sujet).

La LEaux ne donne pas de définition de l'espace réservé aux eaux mais dit à quoi il sert (art. 36a), alors que l'Ordonnance dit comment le délimiter et quelles sont les activités qui y sont tolérées ou interdites. Les buts de l'espace nécessaire aux eaux superficielles (espace réservé aux eaux) sont de garantir :

- a. leurs fonctions naturelles
- b. la protection contre les crues

c. leur utilisation

Dans cette étude sont employés les termes de *fonctions naturelles* et de *fonctions écologiques* comme synonymes.

Un extrait du rapport explicatif (OFEV 2011) sur l'initiative parlementaire (07.492 Protection et utilisation des eaux) qui donne des précisions sur l'utilité et les fonctions de l'espace à réserver aux eaux (art. 41a OEaux) est reporté ci-dessous :

« L'art. 41a OEaux concrétise l'espace réservé au cours d'eau. L'espace dont les cours d'eau ont besoin est défini dans « *Idées directrices – Cours d'eau suisses* » (op. cit). Il comprend la place occupée par le fond du lit à l'état naturel et les deux zones riveraines. Il constitue un couloir, dont le lit du cours d'eau n'occupe pas nécessairement le centre. En cas de besoin, il peut toutefois être délimité par des bandes latérales de largeur fixe à gauche et à droite du cours d'eau (alignements dans une zone urbanisée, p. ex.). L'autorité dispose donc d'une certaine latitude pour déterminer l'espace réservé aux eaux. Donner à cet espace la forme d'un couloir permet de l'adapter aux réalités des alentours immédiats (bâtiments, routes, surfaces d'assèchement, etc.). L'espace réservé à un cours d'eau est toujours à sa disposition et lui permet de remplir ses fonctions naturelles: **transporter l'eau et les alluvions**, créer une **variété structurelle** naturelle dans les milieux aquatiques, amphibiens et terrestres, permettre le développement de **biocénoses typiques** de la station, assurer la **dynamique** du cours d'eau et la **connectivité des biotopes**. L'espace réservé aux cours d'eau assure également la **protection contre les crues**. Un espace suffisant permet en effet de prévenir les dangers et de construire les ouvrages nécessaires à la protection à un coût nettement moindre. Il offre aussi des **lieux de détente** à la population et constitue un élément marquant du **paysage** rural. Le respect d'une distance suffisante entre le cours d'eau et l'agriculture intensive **évite** en outre **l'apport de nutriments et de polluants** ».

On constate que les fonctions naturelles de l'espace à réserver aux eaux sont sensiblement les mêmes que celles citées dans les *Idées directrices*. Une nouvelle fonction apparaît :

- assurer la dynamique du cours d'eau.

Au préalable, cette fonction n'avait jamais été mentionnée de façon explicite dans les documents précédents, et elle nécessitera quelques approfondissements dans les chapitres suivants. Dans les manuels de conventions-programmes de l'OFEV (2018), l'importance du rétablissement de la dynamique propre des eaux est soulignée à maintes reprises.

Dans le cas des revitalisations, des dispositions particulières sont prévues. En effet, l'art 41a, al. 3, lit. b de l'OEaux mentionne que « la largeur de l'espace réservé au cours d'eau (...) doit être augmentée, si nécessaire, afin d'assurer (...) l'espace requis pour une revitalisation ».

Les revitalisations et l'espace réservé au cours d'eau sont donc fortement liés et interdépendants.

La LEaux donne une définition de la revitalisation (art. 4, lit. m) :

« Le rétablissement, par des travaux de construction, des fonctions naturelles d'eaux superficielles endiguées, corrigées, couvertes ou mises sous terre ».

Les buts des revitalisations rejoignent les buts de l'espace réservé aux eaux, la plupart des fonctions naturelles à rétablir ou à garantir sont similaires, on y trouve en plus, parmi les aspects environnementaux :

- l'alimentation des nappes phréatiques
- l'autorégulation et la capacité de résilience des peuplements

Dans un registre différent, l'EAWAG a publié un « Manuel de suivi des revitalisations fluviales » (Woolsey et al. 2005). Cette fois, le but n'est pas d'évaluer l'espace cours d'eau a priori, mais d'évaluer le succès d'une revitalisation. Pour cette démarche, il est nécessaire de lister de manière exhaustive ce qu'on peut attendre d'un projet de revitalisation et d'indiquer quelles sont les objectifs à atteindre et comment les mesurer. Ce document donne une liste de fonctions naturelles obtenues suite à une revitalisation et une méthode d'évaluation basée sur différents indicateurs.

Le Manuel de suivi de l'EAWAG propose quatre indicateurs sur le thème de la végétation, ainsi que des méthodes pour les mesurer :

- espèces végétales typiquement alluviales
- succession et régénération
- mosaïque temporelle
- composition des communautés végétales

Certains indicateurs de ce manuel seront présentés plus en détail par la suite (chap. 4) car fondamental pour la définition et l'évaluation du besoin d'espace de certaines fonctions naturelles.

Dans le domaine de la planification, plusieurs importants cours d'eau de Suisse en cours de réaménagement ou déjà réaménagés ont fait l'objet de réflexions concernant l'espace qui leur est nécessaire. Parmi ceux-ci, le Rhône sur le territoire valaisan et vaudois (3^e Correction du Rhône, cf. Roulier et al. 2007) ainsi que l'Aar entre Thoun et Berne (Bonnard et Witschi 2012) ont fait l'objet d'une procédure relative au besoin d'espace. Les résultats de ces deux travaux sont valorisés dans ce rapport.

Les ANNEXES présentent l'approche retenue par les pays limitrophes et par l'Union Européenne.

4 Fonctions de l'espace réservé aux eaux

L'objectif de cette étude est de proposer une démarche objective et systématique pour définir judicieusement l'espace réservé aux eaux (extension et qualité) pour les cours d'eau dont la largeur naturelle du lit est de plus de 15 m, de manière à remplir les fonctions écologiques du cours d'eau. Cet espace doit être fixé sur les besoins de l'écosystème, tenant compte aussi bien des aspects abiotiques (morphologie, dynamique) que des aspects biotiques (faune typique, végétation, etc.), tout en respectant le cadre légal, qui énonce les buts de l'espace réservé aux eaux (art. 36a LEaux), qui sont de garantir :

- a. leurs fonctions naturelles ;
- b. la protection contre les crues ;
- c. leur utilisation.

Les développements de cette étude concernent le premier point, à savoir les fonctions naturelles. En effet, c'est le thème le moins documenté et le plus intéressant, car les fonctions naturelles des cours d'eau sont très variées et méritent d'être analysées en détail.

La **protection contre les crues** est aussi un aspect très important, mais les connaissances actuelles en modélisation hydraulique sont déjà suffisamment avancées pour estimer cet espace avec précision. De plus, dans la majorité des cas, le besoin d'espace pour garantir les fonctions naturelles du cours d'eau est supérieur à l'espace nécessaire pour garantir la protection contre les crues. On suppose donc qu'en général, si les fonctions naturelles sont garanties, la sécurité est garantie par rapport aux risques de crues et d'inondation. Mais des exceptions sont possibles ; en conséquence, on n'oubliera jamais cet aspect lors de la délimitation de l'espace à réserver aux eaux, car ce dernier doit permettre de garantir la protection contre les crues dans tous les cas.

L'**utilisation des eaux** désigne fondamentalement la production d'électricité d'origine hydraulique. L'espace à réserver pour garantir l'utilisation des eaux ne concerne pas directement les installations hydro-électriques, mais plutôt les mesures destinées à réduire leurs impacts. L'idée est que l'on peut garantir une utilisation durable des eaux, à condition de prévoir suffisamment de mesures qui en limitent les effets négatifs. D'après le rapport explicatif sur l'initiative parlementaire (cf. chap. 3), il s'agit de « l'espace qui sera nécessaire pour réaliser des mesures destinées à atténuer les effets néfastes des éclusées (bassin de compensation dans le cas de centrales à accumulation, bassins pour l'accumulation par pompage) ou de la création de ruisseaux de contournement de centrales hydro-électriques ou de barrages ». Comme cette fonction nécessite des emprises ponctuelles et localisées, il n'est pas pertinent de l'inclure dans la

procédure systématique. Ces aménagements, et l'espace qu'ils requièrent, devront faire l'objet d'une planification spécifique. Ils ne pourront cependant pas avoir un impact négatif sur les fonctions écologiques.

Le Tableau 1 récapitule les différentes **fonctions naturelles** de l'espace réservé aux eaux citées dans les documents de référence (cf. chap. 3).

	Milieu	Fonction
Fonctions naturelles	Aquatique	Transport de l'eau et des sédiments Connectivité longitudinale aquatique Capacité d'auto-épuration Diversité structurelle du fond du lit Maintien des espèces typiques
	Amphibien	Connectivité transversale Alimentation des nappes phréatiques Diversité structurelle des berges
	Terrestre	Connectivité longitudinale terrestre Effet tampon Diversité structurelle du milieu terrestre Dynamique d'inondation Développement des communautés typiques Maintien des espèces typiques Capacité de résilience des peuplements
Autres fonctions	Global	Paysage Espace récréatif Protection contre les crues Utilisation des eaux

Tableau 1. Liste des fonctions de l'espace réservé aux eaux.

La plupart de ces fonctions ne peuvent être remplies que si aucune intervention humaine n'a lieu. On appellera l'espace sans intervention humaine l'« **espace de mobilité** », à l'intérieur duquel le cours d'eau et les écosystèmes annexes peuvent évoluer de manière naturelle.

Dans les chapitres qui suivent, les différentes fonctions naturelles sont abordées en détail et celles qui permettent de définir le besoin d'espace des grands cours d'eau sont identifiées.

4.1 Milieu aquatique

4.1.1 Transport de l'eau et des sédiments

Le transport de l'eau est la fonction la plus triviale d'un cours d'eau. Elle dépend du gabarit hydraulique et d'éventuels obstacles situés dans le lit. On ne peut pas relier directement cette fonction à une largeur précise: en effet, on observe qu'un cours d'eau qui n'a pas à sa disposition une largeur suffisante a tendance à éroder le fond de son

lit, ce qui maintient son gabarit d'écoulement. Cela a des conséquences négatives sur d'autres fonctions, mais pas sur le transport de l'eau.

Garantir le transport contrôlé de l'eau jusqu'à un certain débit est nécessaire pour assurer la protection contre les crues. Dans l'abaque, valable pour les cours d'eau dont la largeur naturel du fond du lit est inférieure à 15 m, l'espace nécessaire à assurer la protection contre les crues est une fonction linéaire qui dépend uniquement de la largeur du cours d'eau, mais il faut être conscient que cela reste approximatif et qu'il ne serait pas prudent de fonder des études hydrauliques uniquement sur cet abaque, d'autres paramètres doivent être considérés, comme la rugosité du lit ou la pente du lit..

Légalement, il n'est pas autorisé de laisser un cours d'eau avec un gabarit hydraulique insuffisant. La Loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau (art. 3 ; RS 721.100) recommande un entretien qui maintient le niveau de protection constant et préserve la capacité d'écoulement. Comme les exigences vis-à-vis de la protection contre les crues sont élevées, on peut supposer que les dispositions visant à assurer la protection contre les crues sont suffisantes pour garantir le transport de l'eau en tant que fonction naturelle.

Concernant le transport des sédiments il y a deux conditions préalables :

1. Il faut que des sédiments arrivent de l'amont (par charriage ou en suspension), c'est-à-dire que le bassin versant soit alimenté en matériaux ;
2. Il faut des débits relativement importants, avec des vitesses d'écoulement assez élevées pour les transporter.

Si ces conditions sont réunies, le transport des sédiments est assuré, pour autant qu'il n'y ait pas d'obstacles dans le lit du cours d'eau. Cette fonction de transport (contrairement au dépôt de sédiments) n'est pas corrélée positivement avec l'espace à disposition du cours d'eau. Le transport de sédiments est par exemple plus efficace pour des lits étroits et incisés que pour des lits larges et peu profonds. La question du dépôt des sédiments sera abordée dans le chapitre consacré à la diversité structurelle du fond du lit (cf. chap. 4.1.4).

Pour la suite de la procédure, on considèrera que le transport de l'eau et des sédiments est assuré dans les cours d'eau naturels lorsque la largeur du cours d'eau est égale à la largeur naturelle du fond du lit. Cette dernière assure, de même, une certaine protection contre les crues.

4.1.2 Connectivité longitudinale aquatique

La connectivité longitudinale est l'une des fonctions principales des cours d'eau. Pour les organismes aquatiques, elle dépend

essentiellement de la présence d'obstacles dans le lit du cours d'eau et d'éventuels aménagements permettant de franchir ces obstacles.

Selon Hefti (2012), la survie d'une population de poissons et, à long terme, la pérennité de l'espèce, dépendent intimement des possibilités de déplacement le long du cours d'eau principal et de ses affluents. De plus, une réduction de la largeur du lit entraînant une augmentation des vitesses d'écoulement peut empêcher des poissons de remonter le courant. En termes fonctionnels, on parle de « continuum longitudinal ». Le rétablissement de la libre migration du poisson le long des cours d'eau aménagés (ainsi d'ailleurs qu'entre le cours d'eau principal et ses affluents) constitue une mesure fondamentale en matière de conservation des espèces. Elle n'est pertinente que là où des obstacles artificiels interrompent la circulation naturelle du poisson ; rendre franchissable un obstacle naturel ne présente aucun sens du point de vue biologique et peut même être contre-productif en termes de biodiversité.

De bonnes structures au fond du lit permettent dans certains cas d'améliorer la connectivité longitudinale, surtout si la vitesse du courant représente un obstacle à la migration des poissons. En effet, des structures diversifiées induisent des variations de courant (et des zones calmes). Les poissons sont capables d'exploiter des champs de vitesses variables, voire des contre-courants, pour remonter les rivières avec un minimum d'efforts. Ces habitats de différentes vitesses, profondeurs d'eau, substrats garantissant la connectivité longitudinale aquatique (Staas et Paulusch 2010) ; les besoins des poissons varient en fonction des espèces et de l'âge des individus (Pedroli et al. 1991, Zaugg et al. 2003, Büttiker 2008).

Dans le Recueil des fiches sur l'aménagement et l'écologie des cours d'eau (OFEV 2012), l'étude de différentes espèces aquatiques (Chabot, gammare, éphémères) et terrestres (Criquet des iscles, Tamarin des Alpes ou myricaire) typiques montre que la stabilité des populations d'espèces typiques dépend notamment des connectivités longitudinale, latérale et verticale.

On admettra que la connectivité longitudinale aquatique est assurée si le transport de l'eau et des sédiments est assuré et qu'il n'y a pas d'obstacles d'origine humaine à cette connectivité. L'espace à disposition du cours d'eau n'est donc pas prépondérant pour cette fonction.

4.1.3 Capacité d'autoépuration

L'autoépuration des rivières est réalisée par des microorganismes, des algues et des macrophytes (plantes aquatiques de grande taille) vivant au fond du lit et à l'interface terre – eau. Ces organismes sont capables de dégrader la matière organique, de manière analogue au

fonctionnement des stations d'épuration. Pour les favoriser, il est nécessaire d'avoir des habitats adaptés et diversifiés, ainsi qu'un lit non colmaté et de bonnes conditions physico-chimiques. La majorité de l'autoépuration est réalisée par voie aérobie.

Cette fonction est corrélée aux structures du fond du lit et dans une moindre mesure à celle des berges.

4.1.4 Diversité structurelle du fond du lit

La diversité des structures du fond du lit est une fonction très importante. Plus les structures sont diverses et nombreuses, plus le cours d'eau pourra accueillir une quantité élevée d'espèces. Ainsi, la diversité structurelle et le nombre d'habitats conditionnent la diversité des milieux aquatiques. Gostner (2012) a montré que les rivières naturelles avec des structures diversifiées étaient aptes à offrir des habitats variés et favorables en permanence, ceci pour des plages de débits très étalées. A l'inverse, les cours d'eau avec une morphologie banalisée peuvent convenir à certaines espèces pour des débits précis, mais la diversité des habitats varie beaucoup selon les débits et n'est pas assurée durablement.

Si un cours d'eau a suffisamment d'espace à disposition et que le charriage est suffisant pour développer une largeur naturelle (largeur de régime), les diverses structures se mettent en place spontanément. On peut compter plusieurs structures différentes, qui se différencient les unes des autres par rapport aux vitesses d'écoulement, à la profondeur de l'eau et au type de substrat (Spreafico et al. 2001, Ahmari et da Silva 2011). Les structures les plus fréquentes sont notamment les bancs de sédiments, les radiers (*riffles*) et les mouilles (*pools*).

Il est clair que pour assurer cette fonction, l'espace à disposition du cours d'eau joue un rôle important (espace de mobilité). Les cours d'eau corrigés avec un espace insuffisant (fonds du lit et berges stabilisés) n'ont généralement aucune diversité structurelle. Le profil d'écoulement est uniforme, avec peu de variation de vitesses et de profondeur d'eau. Pour atteindre tout son potentiel, un cours d'eau doit avoir à sa disposition la largeur qu'il aurait en conditions naturelles.

En résumé, la diversité structurelle des milieux aquatiques est assurée si l'espace non stabilisé à disposition est supérieur ou égal à la largeur naturelle du fond du lit et si l'apport solide est garanti.

4.1.5 Maintien des espèces typiques du milieu aquatique

Les espèces typiques les plus significatives des milieux aquatiques lotiques sont les poissons. D'autres organismes, comme les macro-invertébrés benthiques, ont également leur importance car ils font partie

de la chaîne alimentaire et certains sont utilisés comme indicateurs de la qualité des eaux.

On ne peut pas dire que la présence de poissons soit directement liée à l'espace disponible. En effet, il serait faux de penser que les truites ont besoin d'un cours d'eau de 5 m de large, les Vairons de 7 m et les Chevaines de 9 m. Par contre, on sait que les exigences des poissons diffèrent selon les espèces et l'âge des individus, en matière de vitesse du courant, de profondeur d'eau, de température et de type de substrat (Pedroli et al. 1991, Zaugg et al. 2003). Or, ces variations des paramètres abiotiques sont mises en place aux divers étages altitudinaux grâce à la diversité des structures morphologiques. Plus les structures sont variées, plus les habitats conviendront à un nombre élevé d'espèces. Les espèces typiques des milieux aquatiques sont donc fortement dépendantes des structures du lit du cours d'eau. Dans le Recueil des fiches sur l'aménagement et l'écologie des cours d'eau (OFEV 2012), l'étude de différentes espèces aquatiques (chabot, gammare, éphémères) et terrestres (Criquet des îles, Tamarin des Alpes) typiques montre que la stabilité des populations d'espèces typiques dépend des connectivités (cf. chap. 4.1.2) et de la qualité et de la diversité des habitats aquatiques et terrestres.

En résumé, l'espace nécessaire au maintien des espèces typiques du milieu aquatique est suffisant s'il permet de maintenir des structures au fond du lit aussi diversifiées qu'elles le seraient en conditions naturelles.

4.2 Milieu amphibien

4.2.1 Connectivité transversale (ou latérale)

La connectivité transversale, appelée aussi latérale, permet à différentes espèces d'accéder au cours d'eau depuis des biotopes situés en dehors de la zone riveraine, puis de regagner ces derniers. Les besoins varient selon les espèces. La connectivité transversale est assurée par une végétation continue depuis le bord du cours d'eau jusqu'à l'extérieur de la bande riveraine. L'absence d'obstacle infranchissable (digues, murs en béton) est également une condition de connectivité latérale pour certaines espèces (Ward et Stanford 1995, Ward et al. 1999). Bien que la connectivité latérale puisse être localement interrompue par des berges raides, en général, l'alternance des berges abruptes et des berges en pente douce garantit généralement cette connectivité pour les organismes terrestres et amphibiens.

Des études récentes (cf. chap. 12, site internet du Laboratoire d'écologie des hydrosystèmes naturels et anthropisés de l'Université de Lyon) montrent que les végétaux, grâce à leurs exigences

écologiques, permettent d'établir des cartes de connectivité hydrologique des milieux aquatiques et des sites paysagers avec le cours d'eau ou les eaux souterraines. Les amphibiens sont utilisés comme indicateurs pour concevoir des cartes de connectivité fonctionnelle qui rendent compte de la structure spatiale des corridors biologiques. Pour les poissons, les échanges entre compartiments fluviaux (chenal principal, bras morts, zones humides) revêtent une importance primordiale tant du point de vue du refuge lors des crues que de leur nutrition ou de leur reproduction. Ces connexions contribuent au maintien des populations piscicoles à long terme.

La Figure 2 illustre la complexité des connexions latérales liées à un cours d'eau. À défaut de renseignements plus précis pour mesurer la connectivité, il est supposé que la connectivité transversale est en partie incluse dans la qualité des structures des berges (diversité structurelle du milieu amphibien, cf. chap. 4.2.3) et en partie dans la connectivité longitudinale terrestre (cf. chap. 4.3.1).

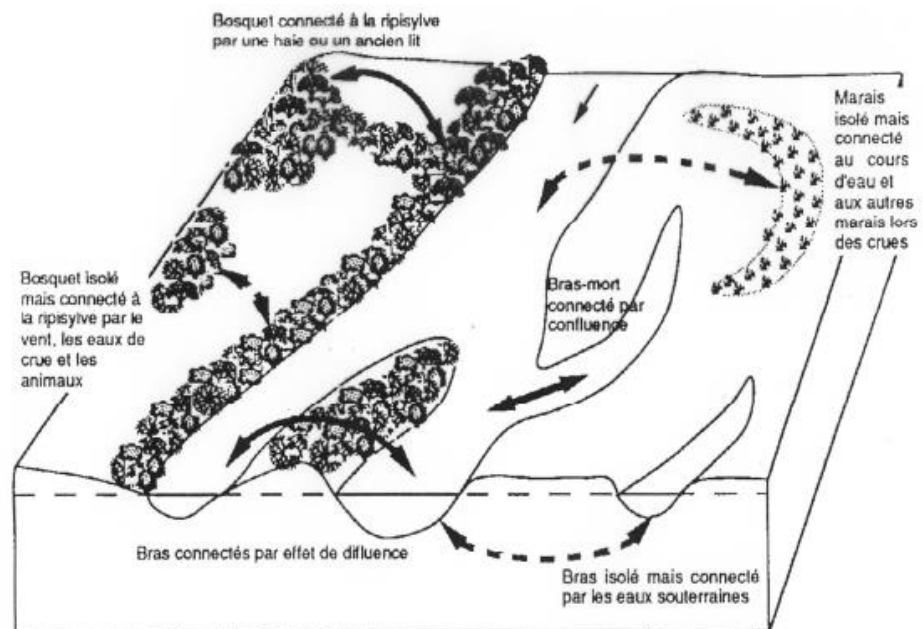


Figure 2. Connexions participant à la connectivité latérale. (Gautier 2009).

4.2.2 Alimentation des nappes phréatiques

L'alimentation des nappes phréatiques se fait par des échanges hydriques qui interviennent dans le lit mineur, soit au fond du lit, soit à travers les berges. Cela exige que le lit ne soit pas colmaté et que les berges ne soient pas imperméables. De plus, le débit doit être suffisant. Les échanges hydriques se font dans les deux sens. En période d'étiage, c'est la nappe qui alimente le cours d'eau et fournit un débit de base. En période de crue, lorsque que le niveau d'eau dans le cours d'eau est plus élevé que le niveau de la nappe, une partie du débit peut

s'infiltrer et recharger la nappe (Sophocleus 2002). Cette fonction est partiellement dépendante de l'espace à disposition. En effet, les cours d'eau corrigés avec une largeur inférieure à leur largeur naturelle ont tendance à éroder le fond de leur lit (incision) ce qui abaisse le niveau des nappes phréatiques avoisinantes. La fonction dépend également d'autres paramètres, notamment de la géologie du sol et du régime des débits : les crues sont nécessaires pour décolmater le fond du lit et il faut suffisamment d'eau pour recharger les nappes. La présence d'exploitation de gravier dans le lit ou un déficit de charriage peut accroître les problèmes d'incision.

Cette fonction est attribuée prioritairement au milieu amphibien. Cela correspond à une situation courante, dans laquelle le fond du lit est plus bas que le niveau moyen de la nappe phréatique et donc le substrat situé sous le fond du lit est saturé en eau. Dans cette situation, l'alimentation des nappes se produit lorsque le niveau d'eau dans le cours d'eau est plus élevé que celui de la nappe et le transfert hydrique se fait notamment à travers la berge, soit le milieu amphibien. Mais il existe aussi des cas où le niveau de la nappe phréatique se trouve en dessous du fond du lit ; dans ce cas, l'alimentation de la nappe se fait essentiellement par le fond du lit.

On supposera que la fonction est incluse dans l'espace des structures des milieux aquatiques et amphibiens. Ce qui signifie que si l'espace à disposition est suffisant pour obtenir des structures de bonne qualité, il est également suffisant pour permettre l'alimentation des nappes phréatiques. Selon la Protection des Eaux de l'OFEV, les conditions actuelles de l'espace des lits des cours d'eau permettent encore un échange d'eau suffisant avec la nappe phréatique. Cette fonction de l'espace cours d'eau ne semble donc pas être la plus importante.

4.2.3 Diversité structurelle du milieu amphibien

Dans un cours d'eau, le milieu amphibien est caractérisé par une humidité variable. Il est soumis aux variations du niveau de l'eau. On peut considérer que le milieu amphibien correspond aux berges du lit mineur, entre le fond du lit et le début de la zone terrestre. Les éléments structurels importants sont les niches d'érosion (berges verticales) et les berges en pente douce. Le revêtement de ces berges a des conséquences pour le milieu amphibien. Les berges stabilisées en dur peuvent nuire à plusieurs fonctions naturelles car les stabilisations limitent les échanges entre le milieu aquatique et le milieu terrestre et ne constituent pas un substrat adéquat pour les organismes qui vivent dans cette interface. La connectivité transversale, la capacité d'autoépuration et l'alimentation des nappes phréatiques peuvent être considérablement affaiblies par ces stabilisations (Woosley et al. 2005). La diversité structurelle optimale est obtenue avec des berges

naturelles soumises à la dynamique du cours d'eau. Les processus d'érosion et de sédimentation entretiennent les structures des berges et assurent la qualité du milieu amphibien.

Sous l'angle de la végétation, cet intervalle peut être partiellement occupé par des groupements végétaux à durée de vie inférieure à 5 ans (Roulier et al. 2007), à savoir par des communautés d'espèces herbacées pionnières, des roselières fluviatiles et de jeunes fourrés de saules.

Cette fonction est directement dépendante de l'espace à disposition. L'état optimal est obtenu si les berges sont naturelles, ce qui implique que les stabilisations de berges, si elles sont nécessaires, soient éloignées du lit mineur. Certaines stabilisations de berges permettent d'obtenir une assez bonne diversité structurelle (épis, génie biologique ; cf. Zeh 2010, Frossard et al. 2014).

4.3 Milieu terrestre

4.3.1 Connectivité longitudinale terrestre

La connectivité longitudinale terrestre permet le déplacement des espèces le long du cours d'eau. Elle requiert une bande riveraine avec une végétation continue et dense, servant à la fois d'abri et de source de nourriture pour la faune en déplacement. Cette fonction est dépendante de l'espace à disposition. Plus la bande riveraine est large, plus elle conviendra à un nombre élevé d'espèces, jusqu'à atteindre une largeur maximum pour laquelle les exigences des espèces les plus difficiles seront satisfaites. La plupart des études sur le sujet sont d'ordre qualitatif et ne donnent pas de valeurs chiffrées de l'espace nécessaire à la connectivité. Werth et al. (Fiche 2, in OFEV 2012) présentent des distances de dispersion de quelques organismes riverains, sans préciser en détail les besoins des organismes pour se déplacer. Roulier et al. (2007) ont documenté les besoins de 18 animaux (distance maximale, qualité des milieux) en matière de connectivité longitudinale le long du Rhône.

La connectivité longitudinale terrestre est prise en considération notamment lors de la définition des réseaux écologiques. Quatre sources d'information ont été utilisées :

- le réseau écologique national REN (Berthoud et al. 2004)
- le Concept directeur du réseau écologique de la Plaine du Rhône (Delarze 2005)
- le réseau écologique de la Basse Plaine du Rhône (Plumettaz et al. 2010)
- le réseau écologique du canton de Vaud (BEB SA 2012)

La « Carte simplifiée des principaux réseaux écologiques potentiels et de leurs connexions » du REN met en évidence le réseau aquatique constitué par les grands cours d'eau de Suisse. Le réseau aquatique répond aux besoins des organismes aquatiques, surtout des poissons. Par contre, les axes de déplacements de la grande faune se trouvent en général sur d'autres tracés que ceux des cours d'eau ; ils suivent notamment les grands massifs forestiers. Il n'y a pas de normes concernant la largeur minimale, ou optimale des éléments du réseau. Des guildes d'invertébrés (groupes d'espèces présentant des exigences analogues), fondées sur les données du Centre Suisse de Cartographie de la Faune (Info fauna – CSCF), sont citées pour évaluer la fonctionnalité du réseau.

Le réseau écologique de la Plaine du Rhône susmentionné présente une approche à plus grande échelle. Plusieurs sous-réseaux ont été identifiés selon les milieux (par exemple : eaux courantes, forêts mésophiles) et les espèces végétales et animales cibles. Des largeurs minimales ont été exprimées pour assurer les fonctions de liaison (couloirs offrant des conditions favorables aux espèces) ou de relais (« stepstones »), par exemple :

- liaisons amphibies : 10 m
- liaisons aquatiques avec « stepstones » secs : 15 m
- liaisons polyvalentes sur tracés de canal : 10 m
- relais alluvial : largeur : 20 m (surface : 5 ha) ; ce biotope comprend une partie du lit, les berges et les premiers stades de la végétation alluviale

Le réseau écologique vaudois (BEB SA 2012) donne des chiffres sur le dimensionnement des liaisons biologiques en fonction de leur importance locale, régionale ou supra-régionale. Pour les liaisons d'importance régionale, une largeur de 40 à 150 m est préconisée (couloir central et bandes latérales). Pour les liaisons d'importance supra-régionale, une largeur de 100 à 400 m est préconisée. Ces valeurs sont à mettre en comparaison avec l'espace nécessaire au cours d'eau dans son ensemble, à savoir l'emprise des milieux aquatiques, amphibiens et terrestres réunis.

On admet que la fonction de connectivité longitudinale terrestre le long d'un cours d'eau est davantage dépendante de la structure du peuplement végétal (strates d'herbes, de buissons et d'arbres) que de sa qualité (composition d'espèces). L'architecture du peuplement (apte à assurer les fonctions de déplacement et de refuge) est plus importante que sa composition. En conséquence, une végétation boisée non alluviale bien structurée remplit le même rôle qu'un boisement typiquement alluvial. Par contre, certains types d'utilisation agricole extensive du sol mentionnés par l'OEaux ne sont pas aptes à remplir cette fonction, par exemple les chemins ou les prairies

extensives non boisées. Il en sera tenu compte lors de l'évaluation. Ces aspects sont discutés au chapitre 7.

4.3.2 Effet tampon

Cette fonction est assurée par la bande riveraine. Elle vise à préserver la qualité des eaux en limitant l'intrusion de substances polluantes ou nuisibles. Quatre types d'intrants faisant normalement le sujet d'études détaillées (CORPEN 2007) sont présentés par la suite : les matières en suspension (MES), le phosphore, l'azote et les produits phytosanitaires.

Les matières en suspension (MES, sol emporté)

Les nuisances dues aux MES peuvent être l'envasement des plans d'eau, une augmentation de la turbidité de l'eau et la dégradation des habitats des organismes aquatiques (colmatage). De plus, les MES peuvent servir de support à d'autres substances polluantes. Ces MES proviennent de l'érosion des sols par la pluie et elles sont transportées par le ruissellement. Les zones tampons ont deux effets qui limitent le transport des MES. Premièrement, la rugosité des zones tampons permet de ralentir les vitesses d'écoulement et, comme pour les lits mineurs des cours d'eau, lorsque les vitesses diminuent, la capacité de transport diminue et le dépôt de sédiments augmente. Deuxièmement, les zones tampons favorisent l'infiltration de l'eau et, si toute l'eau issue du ruissellement peut s'infiltrer, les MES se déposent dans la zone tampon.

Le phosphore

Le phosphore peut poser des problèmes d'eutrophisation, déjà à des concentrations relativement faibles (quelques dizaines de $\mu\text{g/l}$). Les sources de phosphores sont diverses (activités industrielles et domestiques, élevage d'animaux). Les zones tampons constituent une protection efficace contre le phosphore contenu dans les eaux de ruissellement des sols agricoles. Le phosphore existe sous deux formes, le phosphore dissous et le phosphore particulaire. En général, le phosphore dissous représente une petite proportion du phosphore, mais il s'agit de la seule forme sous laquelle il est directement biodisponible pour les plantes vasculaires et les algues. Le phosphore particulaire est, quant à lui, fixé sur des particules de sols. L'eau qui s'infiltré en profondeur perd l'essentiel de son phosphore qui est facilement fixé sur les surfaces solides. De ce fait, les eaux souterraines sont en général pauvres en phosphore (quelques $\mu\text{g/l}$). Dans les zones tampons le destin du phosphore particulaire est associé aux MES; le phosphore dissous est en partie fixé sur le sol et en partie absorbé par les végétaux.

L'azote

Les nitrates sont susceptibles de polluer les eaux. En Suisse, les eaux souterraines destinées à être potables ne doivent pas présenter une concentration en nitrate supérieure à 25 mg/l. De plus, les nitrites et

l'ammonium sont toxiques pour les organismes aquatiques. La concentration maximale tolérée dans les cours d'eau pour l'ammonium est de 0.2 mg/l d'azote pour des températures supérieures à 10°C. Enfin, tout comme le phosphore, l'azote contribue à l'eutrophisation des milieux. Le nitrate est la forme d'azote principalement absorbée par les végétaux. Contrairement au phosphore, il n'est que très peu fixé par le sol et les particules. En général, le transfert d'azote depuis les parcelles agricoles se fait par voie souterraine et superficielle. Le flux d'azote dans les eaux de ruissellement reste faible. Les principaux processus d'élimination de l'azote de l'eau sont l'absorption par les végétaux et la dénitrification (formation d'azote gazeux). La dénitrification intervient essentiellement dans des milieux hydromorphes anaérobiques, tels que des prairies de bas-fond et des ripisylves. Le pouvoir épurateur des nitrates est donc dépendant de la largeur de la zone tampon.

Les produits phytosanitaires

Les produits tels que des insecticides, herbicides ou fongicides sont conçus dans le but d'être toxiques (pour certains organismes). Il n'est donc pas étonnant qu'ils puissent engendrer d'importantes pollutions s'ils se trouvent dans l'eau à des concentrations élevées. Ils sont essentiellement entraînés sous forme dissoute ou colloïdale : leur transfert est à mettre en relation avec le ruissellement et l'infiltration plus qu'avec l'érosion. Certains produits ont un coefficient d'adsorption élevé et peuvent aussi être transportés fixés sur des matières en suspension, mais ce processus est minoritaire. Les produits phytosanitaires qui migrent directement en profondeur sont peu retenus et se retrouvent dans la nappe phréatique. En revanche, ceux qui sont transférés latéralement, à travers le ruissellement ou les écoulements à faible profondeur, sont susceptibles d'être retenus et dégradés par la zone tampon. Les zones tampons présentent une réelle aptitude à intercepter les produits phytosanitaires.

4.3.2.1 Composition d'une zone tampon

Le type de végétation qui constitue la zone tampon joue un rôle dans l'atténuation des intrants nocifs. Cela dit, il n'est pas possible de dire qu'il y ait une association végétale qui soit meilleure que les autres. Chaque groupe d'espèces a des propriétés particulières sous l'angle de l'effet tampon. Les graminées, par exemple, présentent une forte densité de tiges, ce qui freine l'écoulement et permet de retenir les MES. La végétation ligneuse est la plus efficace pour favoriser l'infiltration de l'eau dans la zone tampon, et un feuillage dense protège le sol contre l'érosion engendrée par la pluie. La dénitrification est assurée par la plupart des végétaux sauf les résineux. D'après le rapport CORPEN (2007), la zone tampon la plus efficace est probablement une **combinaison d'une bande herbeuse à l'extérieur (côté champ) et une bande boisée à l'intérieur (côté cours d'eau)**,

mais peu d'études sont disponibles à ce sujet. A défaut de renseignements plus précis et par simplification, il est considéré qu'à largeurs égales, une bande boisée a le même pouvoir tampon qu'une bande herbeuse.

4.3.2.2 Dimensionnement des zones tampons

Pour des questions pratiques, il est commode de définir une largeur de la zone tampon dans une direction perpendiculaire au cours d'eau. L'efficacité de la zone tampon dépend néanmoins de la distance parcourue par l'eau dans la zone tampon et de la durée de ce trajet. Ainsi, les versants très en pente ont besoin d'une zone tampon plus large car l'eau de ruissellement atteint rapidement le cours d'eau. La topographie a donc une grande influence puisqu'elle conditionne le ruissellement.

L'efficacité d'une zone tampon peut être significativement réduite en cas de concentration du ruissellement (chenaux d'érosion). Si la plaine agricole est drainée et que le cours d'eau est utilisé comme collecteur principal des eaux de drainages, alors, comme s'il s'agissait d'un affluent, les eaux de ruissellement vont atteindre le cours d'eau sans interagir avec la zone tampon. Dans ce cas, son efficacité est presque nulle. Dans une moindre mesure, des ravines ou des chenaux d'écoulement préférentiels présentent le même inconvénient.

Si le terrain est très perméable, toutes les précipitations s'infiltrent et vont directement dans la nappe phréatique. Là encore la zone tampon est moins efficace car elle n'interagit pas avec l'eau chargée en polluants.

Les conditions d'humidité du sol influencent également le fonctionnement des zones tampon. Si le sol est déjà saturé en eau, l'infiltration sera nulle et une grande partie du ruissellement atteindra le cours d'eau, sans être filtrée par la zone tampon. Par contre, un sol saturé en eau est favorable à la dénitrification.

Le but ultime des zones tampons est de limiter la concentration des polluants dans le cours d'eau. Or la concentration est le rapport entre la quantité de substance et le volume de l'eau. Ainsi pour un même apport de polluants, les concentrations seront plus élevées pour des petits ou moyens cours d'eau que pour des cours à grands débits. Donc, dans le but de respecter un standard de qualité de l'eau qui se fonde sur des valeurs de concentrations, les exigences de la fonction de zone tampon devraient être plus élevées pour des cours d'eau de petite et moyenne taille que pour de grands fleuves. Conceptuellement, l'importance de la zone tampon est inversement proportionnelle à la largeur du cours d'eau.

4.3.2.3 Besoin d'espace des zones tampons

En Suisse selon l'art. 21 et l'annexe 1, ch. 9.6 de l'Ordonnance sur les paiements directs (OPD ; RS 910.13), des bordures (zones) tampons de 6 m de large sur chaque rive sont obligatoires dans le cadre des PER (prestations écologiques requises). Ces bandes doivent être clairement couvertes de végétation herbacée sur toute leur largeur (6 m) et leur longueur pendant toute l'année. Tout produit phytosanitaire est interdit sur une largeur minimale de 6 m et tout épandage d'engrais est interdit sur une largeur de 3 m. Si le cours d'eau est bordé d'une haie ou berge boisée continue, la mesure des 6 m sans produits phytosanitaires commence à partir du bord du lit du cours d'eau et inclut les boisements riverains, indépendamment de la pente de la berge. Le boisement est lui-même bordé d'une bande herbeuse de 3 m, sans fumure ni produits phytosanitaires (Agridea 2009).

Des valeurs basées sur des expériences en conditions moyennes sont présentées dans le Tableau 2 (CORPEN 2007). Ces valeurs moyennes doivent être relativisées selon les remarques du chapitre précédent ; elles sont sujettes à une grande variabilité.

Largeur de la zone tampon [m]	Suffisante pour :
0	-
5	MES
10	Phosphore part. et azote
15	Phosphore dissous
20	Quelques produits phytosanitaires

Tableau 2. Largeurs de la zone tampon et type de substance filtrée (source : rapport CORPEN 2007).

Dans cette approche pragmatique visant une simplification de l'hypothèse, nous admettons que l'effet filtre est satisfait à 100% avec une bande tampon de 20 m de largeur. Cette bordure doit être appliquée sur les berges de chaque côté du cours d'eau. Les micropolluants ne sont pas pris en compte dans cette méthode.

4.3.3 Diversité structurelle du milieu terrestre

La dynamique de rajeunissement par les processus d'érosion et de sédimentation entretient la diversité des structures du milieu terrestre. On distingue principalement deux types de structures. Les terrasses alluviales et les bas-fonds humides. Les bas-fonds humides, parfois inondés, sont dus au passage d'un ancien chenal d'écoulement. Ils ne sont plus connectés en permanence au cours d'eau principal et sont alimentés par la nappe phréatique. Les terrasses alluviales sont, quant à elles, mises en place par des dépôts de sédiments intervenant lors

des crues importantes, lorsque le cours d'eau chargé de sédiments déborde du lit mineur. Plusieurs travaux décrivent la formation et les fonctions des terrasses alluviales et des annexes hydrauliques (Amoros et Petts 1993, Amoros et Bornette 2002, Piégay et al. 2003)

Les structures du milieu terrestre dépendent du style fluvial du cours d'eau ainsi que des sédiments transportés. Les terrasses alluviales sont associées prioritairement aux cours en tresses et les bras morts aux cours d'eau en méandres. Il est fréquent de trouver des systèmes intermédiaires où les deux types de structures sont présents.

Dans les cours en tresses et à fort transport solide, ce sont les inondations par des débits importants (supérieurs à HQ_5) qui provoquent des dépôts de sédiments en dehors du lit mineur, ce qui mène à la formation des terrasses alluviales. L'espace nécessaire pour la formation de terrasses alluviales dépend de l'étendue des débordements et de la topographie.

Les cours en méandres développés à l'état naturel se court-circuitent lorsque que le méandre a atteint son amplitude maximale, cela conduit à la formation de bras morts qui contribuent à la richesse des structures du milieu terrestre (Paccaud et al. 2010). Pour qu'un méandre se court-circuite, il est nécessaire qu'il ait atteint un stade de croissance avancé, et cela nécessite beaucoup d'espace. Pour que cette fonction soit remplie, il faut que l'espace non stabilisé à disposition soit égal à l'amplitude qu'auraient les méandres en conditions naturelles. Bien qu'un bras mort soit un milieu alimenté par la nappe phréatique, il n'est pas considéré comme un milieu amphibien ou aquatique car il est déconnecté du cours principal : sa structure fait partie du milieu terrestre une fois que le cours d'eau s'est déplacé.

Dans les zones alluviales d'importance nationale, on trouve de nombreuses annexes hydrauliques ou leurs traces topographiques, en marge de la zone alluviale, voire même à l'extérieur du périmètre des objets. Ces anciens bras morts occupent l'espace de divagation maximum de Malavoi et al. (1998) ; c'est le cas notamment des zones alluviales « Les Iles de Villeneuve FR VD » (objet 52 de l'inventaire fédéral des zones alluviales), « Eggrank-Thurspitz ZH SH » (obj. 5) ainsi que des bras morts situés dans la plaine de l'Aar BE SO.

4.3.4 Dynamique d'inondation

Les inondations influencent les milieux voisins du cours d'eau. Dans les systèmes des plaines alluviales ou tourbeuses à faible charriage, les inondations influencent la végétation riveraine favorisant les prairies humides et la végétation marécageuse. Généralement, les terrains plats sont constitués de matériaux fins peu perméables, ce qui augmente la durée de submersion de la végétation riveraine. De plus, ce type de relief plat accroît l'extension latérale des débordements, la

bande influencée par le cours d'eau peut atteindre plusieurs fois la largeur du lit mineur. La dynamique d'inondation peut concerner aussi des systèmes stabilisés ; l'inondation peut survenir soit par débordement, si des déversoirs latéraux ont été mis en place, soit par remontée de la nappe phréatique. La fréquence de ce genre d'inondation doit être suffisamment élevée pour avoir une influence significative sur la végétation de la zone inondable. Le débit à partir duquel une inondation se produit est de l'ordre de HQ_1 ou HQ_2 (Paccaud et al. 2010).

4.3.5 Développement de communautés végétales typiques

L'observation des systèmes alluviaux naturels ou peu transformés a été mise à profit pour décrire des situations servant d'exemple ; les zones alluviales de l'inventaire fédéral constituent à ce titre d'utiles références spatiales.

La relation entre l'espace à disposition du cours d'eau et la diversité des communautés végétales a été approchée sous trois formes au cours des dernières années.

4.3.5.1 Approche par les transects

Dans le cadre du « *Forschungsprojekt Rhone-Thur* » (2001 – 2005), plusieurs transects de végétation au bord du Rhône et de la Thur ont été analysés. Les résultats établissent de manière empirique et générale la relation entre le facteur d'élargissement des deux cours d'eau corrigés (Rhône, Thur) et la diversité de la végétation (apparition des différents compartiments caractérisant les systèmes alluviaux) colonisant les zones élargies (Roulier et Vadi 2004, Vadi et al. 2006). En comparaison avec les élargissements du lit mineur de la Thur et du Rhône (2 premières lignes du Tableau 3), l'abaissement du lit majeur de la Thur à Warth-Weiningen TG (3^e ligne du tableau) et l'organisation de la zone alluviale de Finges (4^e ligne du tableau) ont été étudiés ; dans ce dernier cas, on constate que le développement de l'ensemble des compartiments alluviaux requiert un espace équivalent environ à 3 fois la largeur du lit mineur « peu corrigé ». Ces quatre exemples donnent une idée générale de la relation entre la largeur du lit et la dimension de l'espace nécessaire au cours d'eau.

Lit mineur corrigé élargi 1.5 à 2x	Apparition des communautés pionnières herbacées sur les bancs de sédiments ; une telle largeur est proche de la largeur de régime définie par les hydrauliciens ; les surfaces terrestres font l'objet d'un rajeunissement par les crues d'occurrence biennale à quinquennale
Lit mineur corrigé élargi 2 à 3x	Apparition des communautés pionnières herbacées sur les bancs de sédiments et de formations à bois tendres sur les terrasses alluviales bordant le lit mineur
Pas d'élargissement du lit mineur, abaissement du lit majeur corrigé	Lit mineur : pas de communautés herbacées Lit majeur corrigé : apparition de formations à bois tendres
Zone alluviale de Finges : lit mineur peu corrigé (250 m), lit majeur intact (700 m)	Développement de tous les constituants de la zone alluviale : formations alluviales herbacées, à bois tendre et à bois durs , compartiments xériques (prairies sèches, pinèdes), eaux calmes

Tableau 3. Lien entre le facteur d'élargissement du lit mineur corrigé et la diversité de la végétation des zones élargies (Roulier et Vadi 2004, Vadi et al. 2006).

4.3.5.2 Approche par les cartes de la végétation : le Rhin aux Grisons

Les cartes de la végétation établies, pour chaque zone alluviale d'importance nationale par l'OFEV, reflètent l'organisation de la mosaïque des unités de la végétation. Décrites dans Gallandat et al. (1993), 22 unités sont cartographiées selon le même système depuis 1987 jusqu'à actuellement. Les cartes de la végétation sont complétées par des cartes des utilisations et des atteintes ; les digues et les stabilisations de berges y sont localisées. Ces documents permettent de connaître le contenu des objets, d'évaluer leur valeur naturelle, de les comparer et de les classer et, finalement, de documenter leur évolution temporelle.

Pour les besoins de la 3^e correction du Rhône, on a examiné des secteurs représentatifs du Rhin entre Rhäzüns et Mastrils GR afin d'identifier les besoins écologiques, en espace et en temps, de la végétation de ce type de système alluvial (systèmes collinéens des Alpes centrales, cf. Hausammann et al. 2005).

À titre d'exemple, six situations sont présentées et sommairement interprétées ci-dessous. Ces 6 fragments de cartes permettent, comme dans le chapitre précédent, d'identifier une relation générale entre la dimension du cours d'eau et l'espace permettant le développement des compartiments alluviaux (Figure 3).

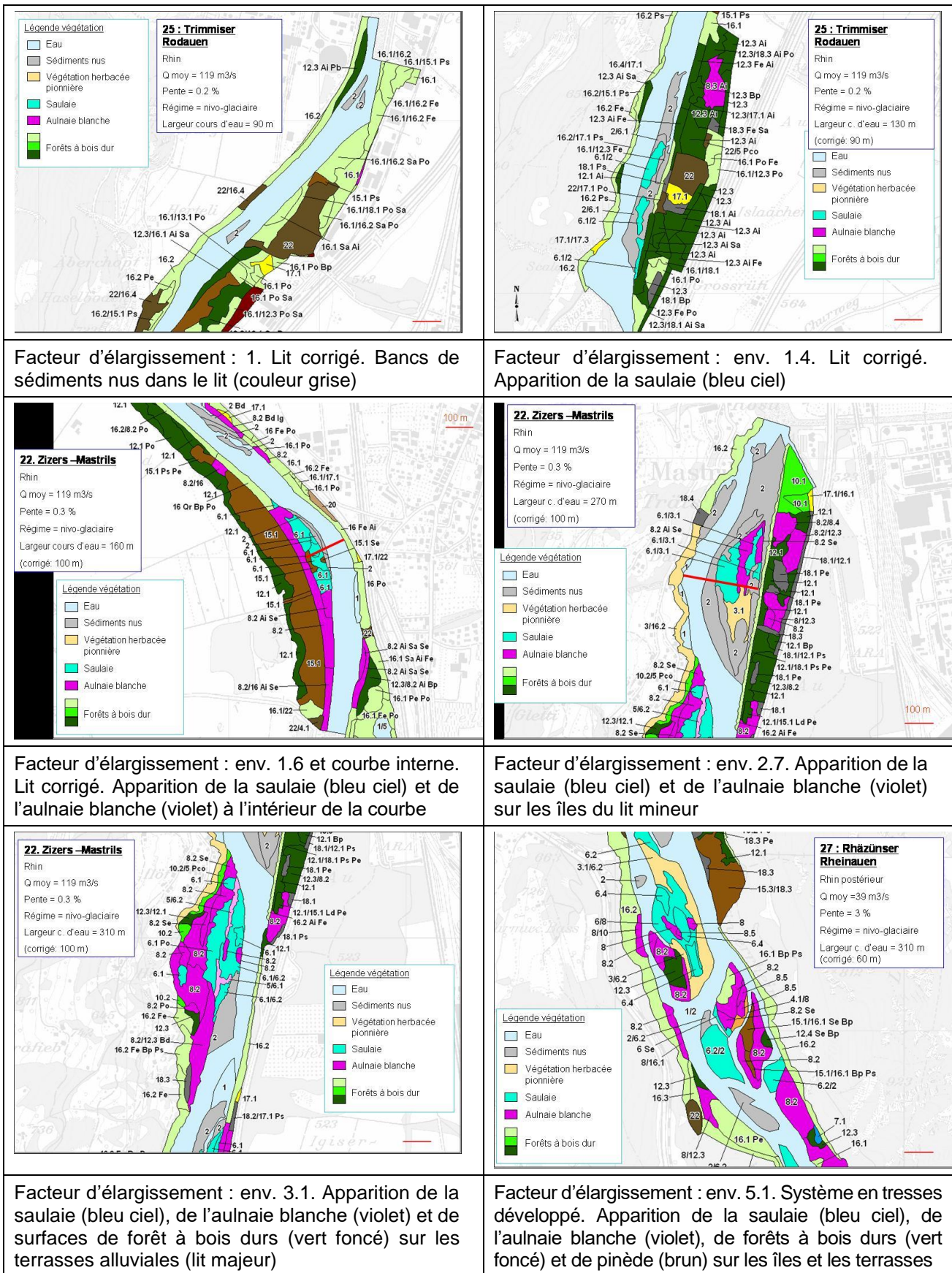


Figure 3. Lien entre le facteur d'élargissement du lit mineur et la composition de la mosaïque des unités de la végétation typiques des zones alluviales (fondé sur Roulier et al. 2007).

Tableau 4 résume la succession des formations végétales typiques des zones alluviales.

Lit mineur corrigé non élargi	Apparition de bancs de sédiments nus lors des basses eaux
Lit mineur corrigé élargi 1.4 à 1.6 x	Apparition des communautés pionnières herbacées et de formations à bois tendres sur les bancs de sédiments et sur les terrasses alluviales bordant le lit mineur
Lit mineur corrigé élargi 2.7 à 3.1 x	Apparition des communautés pionnières herbacées et de formations à bois tendres sur les bancs de sédiments et sur les terrasses alluviales bordant le lit mineur. Aussi petites surfaces de formations à bois durs
Zone alluviale de Rhäzüns : système en tresses correspondant à un élargissement de 5 x le lit mineur corrigé	Formations alluviales herbacées, à bois tendre et à bois durs , compartiments xériques (prairies sèches, pinèdes)

Tableau 4. Lien entre le facteur d'élargissement du lit mineur et la présence des formations végétales typiques des zones alluviales.

Cette approche empirique présente quelques limites, car elle ne distingue pas les styles en méandres et en tresses ; de plus, la largeur naturelle du fond du lit dans les cas présentés n'est pas connue avec précision. Par contre, l'approche décrit une situation évolutive de la végétation du lit. En outre, elle met bien en évidence le besoin d'espace des formations alluviales typiques et la relation avec la largeur du cours d'eau.

4.3.5.3 Approche par les cartes de la végétation : l'Aar entre Thoune et Berne

Bonnard et Witschi (2012) ont évalué le besoin d'espace de la végétation alluviale le long de l'Aar entre Thoune et Berne. Pour ce faire, les auteurs ont analysé 110 profils en travers des cartes de la végétation de 5 zones alluviales (de l'Aar, de la Reuss et du Rhône en aval du Léman) présentant des conditions similaires à ce cours d'eau et ont établi un tableau des largeurs nécessaires aux formations alluviales. Le Tableau 5 montre le résultat des mesures des largeurs moyennes et maximales des formations colonisant les deux rives.

Végétation	Largeur moyenne [m]	Largeur maximale [m]
Sédiments nus	7	12
Communautés pionnières herbacées	21	64
Formations à bois tendres	20	119
Formations à bois durs	31	133
Bas-marais	28	176

Tableau 5. Largeurs moyennes et maximales des formations de végétation alluviale, pour les deux rives.

Les valeurs moyennes semblent les plus représentatives ; les valeurs médianes, non représentées, sont toutes inférieures aux valeurs moyennes. À des fins de comparaison avec la dimension du cours d'eau, la largeur naturelle du fond du lit de l'Aar entre Thoune et Berne est évaluée à 40-80 m. La largeur de la bande riveraine (une rive) apte à abriter la zonation végétale jusqu'aux formations à bois tendre est de 50 m (approximativement le même ordre de grandeur que la largeur naturelle du fond du lit).

On constate l'apparition d'une formation nouvelle, les bas-marais, qui occupe les bras morts et les dépressions humides et inondées mises en place par le cours d'eau dans les grands systèmes alluviaux collinéens du Plateau. D'autre part, le peu de charriage et la présence d'ouvrages de correction dans les 5 zones alluviales examinées influencent probablement les valeurs mesurées.

4.3.5.4 Exigences surfaciques minimales : la correction du Rhône

Dans le cadre de la 3^e correction du Rhône, les exigences surfaciques de trois groupements végétaux cibles ont été identifiées dans 13 zones alluviales d'importance nationale afin de connaître le facteur d'élargissement minimal requis par la végétation typique (Roulier et al. 2007). À l'image des chapitres précédents, les cartes de la végétation des zones alluviales ont été exploitées.

Les groupements cibles sont les suivants :

- formations herbacées pionnières des alluvions (*Epilobion fleischeri*), unité 3.1
- saulaie buissonnante à myricaire (*Salici-Myricarietum*), unité 6.2
- forêt d'aulne blanc montagnarde (*Calamagrostio-Alnetum incanae*), unité 8.2

Une statistique a alors été effectuée sur les largeurs et sur les surfaces des polygones des unités de la zonation végétale. Les résultats des

mesures ne sont pas présentés ici. Le Tableau 6 montre les résultats sous la forme des exigences minimales en largeur et en surface des formations examinées. Les exigences des formations intermédiaires (bois tendre – bois durs) et à bois durs y sont aussi représentées.

Formation alluviale		Code selon outil	Largeur min [m]	Surface min [m ²]
Formations herbacées pionnières des alluvions		AI 1	15	1500
Fourré de saules, argousier, myricaire	Unité cible 6.2	AI 2.1	15	1500
Fourré d'aulne blanc	Unité cible 8	AI 2.2	30	8000
Forêt d'aulne blanc dynamique		AI 2.3		
Forêt d'aulne blanc à peupliers		AI 3.1	30	3000
Forêt d'aulne blanc stable		AI 3.2		
Forêt de frêne		AI 4	30	3000

Tableau 6. Largeurs et surfaces minimales des milieux végétaux cibles de la 3^e correction du Rhône (valeurs pour les deux rives).

Les milieux cibles identifiés pour la 3^e correction du Rhône sont présentés en couleur. Ces valeurs minimales ont servi à fixer la largeur minimale de l'espace dynamique situé entre les deux digues futures du Rhône. Sur ces bases, le gabarit moyen du nouveau Rhône a été fixé à 1.6x la largeur actuelle entre les deux digues. Des élargissements ponctuels plus importants sont distribués tous les 10 km pour permettre à toute la zonation végétale de se développer (jusqu'aux formations à bois durs) et pour fournir des refuges aux organismes lors des crues exceptionnelles.

Les valeurs proposées sur la base des cartes de la végétation se justifient aussi par l'observation directe des systèmes naturels :

- la largeur minimale d'une formation végétale doit égaliser au moins le double de la hauteur des buissons ou des arbres dominants constituant cette formation. Ainsi, ces valeurs permettent à la végétation de se développer. L'aspect typique de la zonation et de la mosaïque riveraine est recréé et non pas des bandes étroites et parallèles (sortes de haies riveraines) ;
- les largeurs minimales doivent permettre un développement des unités de végétation typiques, sans trop d'effets de bord (intrusion d'espèces des milieux voisins) ;
- ces largeurs doivent aussi permettre une certaine stabilité (résilience) vis-à-vis des pressions externes (piétinement, dérangement provenant de la rive ou du chemin de digue).

Parue tout récemment, la fiche « Amélioration de la dynamique » de Scheidegger et al. (in OFEV 2012) a publié des valeurs de surfaces

minimales proches, mais légèrement supérieures à celles qui sont mentionnées ci-dessus.

4.3.5.5 Généralisation

Les valeurs présentées sous ce chapitre sont issues de grands systèmes alluviaux des étages collinéen et montagnard des Alpes suisses et également des systèmes collinéens du Plateau. A l'heure actuelle, on peut considérer que cet échantillonnage est représentatif.

Afin de fixer des valeurs de références pour le développement des communautés végétales typiques, il est décidé de **favoriser prioritairement les formations à bois tendre dans l'espace cours d'eau, car ce sont elles qui sont devenues les plus rares suite aux grandes corrections**. Globalement, si l'on considère les valeurs de l'espace abritant les formations à bois tendre en fonction de la largeur du cours d'eau, on constate qu'elles se développent dans un espace équivalent à :

- 2 - 3x la largeur du lit corrigé (Rhône et Thur)
- 1.4 – 3.1x la largeur du lit corrigé (Rhin)
- 1.2 – 2.4x la largeur naturelle du fond du lit (2 x 48.68 m : 40 – 80 m) (Aar, Reuss, Rhône GE) : valeurs moyennes
- 1.0 - 1.5x la largeur de régime (= largeur naturelle du fond du lit) (2 x 45 m : 60 – 90 m) : valeurs minimums (Rhône).

Au vu des valeurs ci-dessus, la largeur minimale de l'espace de mobilité proposée pour le développement des formations à bois tendres est de 1.5x la largeur à pleins bords. La largeur maximale de l'espace de mobilité (incluant le cours d'eau) est donc de 2.5x la largeur à pleins bords. La définition des termes techniques figure dans le glossaire.

Au-delà de la valeur maximale, la zonation végétale continue de se développer et de diversifier : les formations à bois durs, puis les formations xériques peuvent s'installer. La Figure 4 présente l'installation des formations végétales typiques en fonction de la largeur à pleins bords du cours d'eau.

Le graphique ci-dessous montre bien que, dans le cas où la régénération des forêts d'essences à bois durs est visée par une revitalisation, la largeur requise de l'espace de mobilité (incluant le cours d'eau) est donc de 3.5x la largeur à pleins bords. Cette exigence sera requise dans le cas des zones alluviales (cf. chap. 6.4.1).

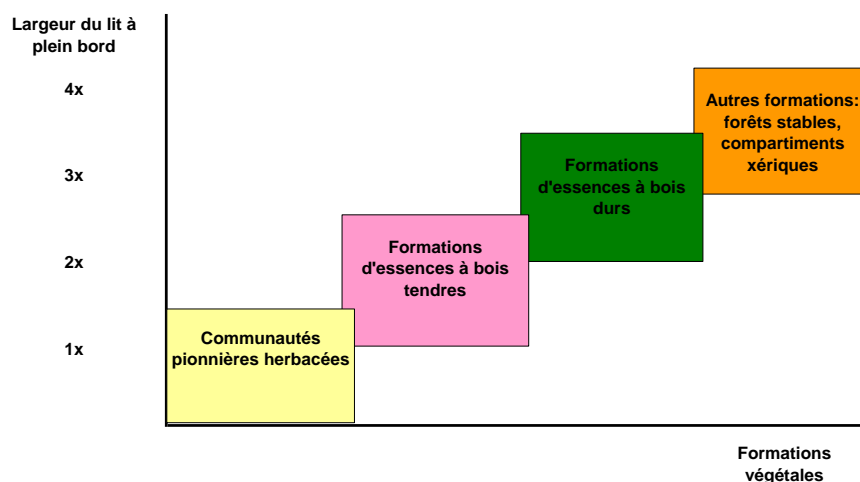


Figure 4. Installation des communautés végétales typiques en fonction de l'espace du cours d'eau (représenté en multiples de la largeur du lit à pleins bords par débit morphogène).

4.3.6 Conservation des espèces terrestres typiques

Le développement des espèces amphibiennes et terrestres typiques des zones alluviales, notamment des animaux, requiert des surfaces de milieux alluviaux se répartissant entre le lit du cours d'eau et les forêts alluviales, voire jusque dans les milieux annexes tels que les bras morts, les marais ou les affluents.

Selon les cas, les besoins et les buts écologiques des interventions, il sera possible de compléter la procédure par une ou plusieurs exigences d'espèces particulières. Pour la 3^e correction du Rhône (Roulier et al. 2007), 18 espèces animales représentant différents milieux ou combinaisons de milieux ont été identifiées ; elles ont servi, par le biais de leurs exigences qualitatives et quantitatives, à comparer des variantes sous l'angle faunistique ainsi qu'à évaluer la continuité longitudinale. À titre d'exemple, le Tétrix grisâtre (*Tetrix tuerki*), le Castor (*Castor fiber*), le Chevalier guignette (*Actitis hypoleucos*) et le Petit mars (*Apatura ilia*) sont des espèces typiques, colonisant divers compartiments de l'espace du cours d'eau, qui ont été prises en considération.

Au vu de la diversité des espèces, de leurs exigences et de leur répartition géographique, les exigences des espèces ne sont pas développées dans la présente procédure. Leurs exigences seront représentées par la courbe de satisfaction des communautés typiques. Dans le cadre de la mise en œuvre de la Stratégie Biodiversité Suisse, on pourra développer les exigences surfaciques et qualitatives d'espèces cibles choisies et les intégrer dans la procédure.

4.3.7 Capacité de résilience des peuplements

Il s'agit de la capacité de rétablissement des populations colonisatrices de la partie terrestre après une perturbation des peuplements végétaux. Dans la partie abiotique de l'hydrosystème, Amoros et Petts (1993) expliquent que « la durée nécessaire pour que les changements géomorphologiques établissent un nouvel équilibre ou ramènent le système aux caractères de l'ancien est connue sous le nom de *temps de relaxation* ». Mais le rééquilibrage des peuplements végétaux (par exemple de la mosaïque) après une perturbation n'est pas inclus dans l'exposé de ces deux auteurs. Frontier et Pichod-Viale (1995) exposent cette propriété dans la dynamique des populations d'espèces : « il y a résilience quand une espèce voyant ses effectifs s'effondrer, ne disparaît pas complètement, c'est-à-dire si elle reste en réserve, capable de redevenir à l'occasion dominante ». Dans ce cas (résilience des peuplements), on propose d'appliquer la notion de résilience aux groupements végétaux typiques des bords de cours d'eau, notamment des formations à bois tendre.

La mesure de la résilience et sa conversion en valeurs mesurables afin d'établir une courbe de satisfaction est un exercice complexe. Globalement, on sait qu'un système alluvial de grande dimension bordant un cours d'eau est plus résilient vis-à-vis des perturbations (crues) et sous l'angle de la conservation des éléments de la mosaïque végétale, qu'un système réduit à d'étroites bandes parallèles au cours d'eau (Bezzola et Hegg 2008).

Dans le cas de la troisième correction du Rhône, des grands élargissements (bande de divagation d'environ 3x la largeur à pleins bords) ont été définis de manière à abriter et à conserver une végétation terrestre (ensemble des formations à bois tendre et une partie des forêts à bois durs) et à jouer le rôle de refuge pour les animaux lors des grandes crues (HQ₅₀ – HQ₁₀₀).

En l'état actuel des connaissances, la capacité de résilience des peuplements est représentée par la courbe de satisfaction des communautés typiques.

4.4 Fonctions sociales

4.4.1 Espace récréatif

La fonction récréative (zone de loisirs) est évoquée dans tous les documents relatifs à l'espace cours d'eau ; il s'agit d'une fonction importante, mais elle ne rentre pas dans la définition de fonction naturelle, car il s'agit d'une fonction sociale du cours d'eau. De plus, elle n'est pas directement liée à l'espace disponible, mais aux

aménagements construits le long de la rivière. Une question intéressante est de savoir dans quelle mesure, selon l'OEaux, les fonctions de loisirs sont autorisées dans l'espace à réserver aux eaux. La réponse est claire (art. 41c OEaux) : l'Ordonnance autorise des aménagements légers, tels que des chemins pour piétons ou de randonnée pédestre. Par contre, pour des infrastructures plus lourdes, il faut prouver que « l'implantation est imposée par leur destination et qui servent des intérêts publics », ce qui semble difficile.

4.4.2 Paysage

L'aspect paysager a souvent une connotation subjective. Plusieurs personnes considèrent qu'un cours d'eau rectiligne et « bien propre » a une valeur paysagère plus élevée qu'un cours désordonné (lire : naturel). Un cours d'eau bordé de boisements contient une plus-value paysagère par rapport à un cours d'eau canalisé et étroitement limité dans une plaine agricole. Cette plus-value est l'empreinte du tracé dans la plaine, soulignée par les forêts riveraines, par le chatouillement printanier et automnal des couleurs. Elle est reconnue et appréciée par le public (aspect social de la forêt, ombrage sur les promeneurs ; cf. aussi Arnold et al. 2009).

En se fondant sur les caractères ci-dessus, Veuve et Lasserre (in Rey et al. 2008) ont estimé que le bilan paysager de la 3^e correction du Rhône sera globalement très positif.

La fonction sociale du paysage est difficile à associer à un besoin d'espace. Mais comme un boisement riverain bien étoffé contribue plus au paysage que des rives nues ou peu arborisées, on peut considérer que la fonction paysagère s'exprime à travers le développement des communautés végétales typiques.

4.5 Fonctions retenues

Le Tableau 7 récapitule les fonctions retenues pour la procédure d'évaluation de l'espace réservé aux cours d'eau. La plupart de ces fonctions ne peuvent être satisfaites qu'à l'intérieur d'un espace de mobilité sans aucune contrainte physique, ni d'entretien. D'autres, comme la fonction tampon et la connectivité longitudinale terrestre, peuvent être également satisfaites à l'extérieur de l'espace de mobilité.

	Milieu	Fonction	Élément évalué
Fonctions naturelles	Aquatique	Transport de l'eau et des sédiments	contenu dans div. struct. du fond du lit
		Connectivité longitudinale aquatique	en partie contenu dans div. struct. du fond du lit
		Capacité d'auto-épuration	contenu dans div. struct. du fond du lit
		Diversité structurelle du fond du lit	oui
	Amphibien	Maintien des espèces typiques	contenu dans div. struct. du fond du lit
		Connectivité transversale	contenu dans div. struct. du milieu amphibien
		Alimentation des nappes phréatiques	contenu dans div. struct. du milieu amphibien
	Terrestre	Diversité structurelle du milieu amphibien	oui
		Connectivité longitudinale terrestre	oui
Effet tampon		oui	
Diversité structurelle du milieu terrestre		oui	
Dynamique d'inondation		oui	
Développement des communautés typiques		oui	
Maintien des espèces typiques		contenu dans communautés typiques	
Capacité de résilience des peuplements	contenu dans communautés typiques		
Autres fonctions	Global	Paysage	non
		Espace récréatif	non
		Protection contre les crues	non
		Utilisation des eaux	non

Tableau 7. Liste des fonctions naturelles servant à évaluer l'espace réservé au cours d'eau.

On rappellera que le but de la procédure n'est pas de valoriser l'ensemble des fonctions du système « Grands cours d'eau » mais d'évaluer seulement les fonctions dépendant de la dimension et de la qualité de l'espace réservé aux eaux.

Pour terminer, on constate que plusieurs fonctions de l'espace cours d'eau sont dépendantes de la dimension du cours d'eau, alors que d'autres s'expriment dans une largeur indépendante de cette dimension.

Les fonctions dépendantes de la taille du cours d'eau et de l'espace de mobilité sont :

- les fonctions des milieux aquatiques
- la diversité des structures du milieu terrestre
- le développement des communautés typiques

Les fonctions dépendantes de la taille du cours d'eau, mais pouvant être satisfaites à l'extérieur de l'espace de mobilité sont :

- la dynamique d'inondation
- les fonctions des milieux amphibiens

Les dimensions du cours d'eau ayant une influence sur ces fonctions sont (cf. « Glossaire » et chap. 5) :

- la largeur naturelle du fond du lit L_{fi}
- la largeur naturelle à pleins bords L_{pb} (pour le débit morphogène)
- l'amplitude des méandres A_{nat} , pour les cours d'eau en méandres

Les fonctions indépendantes de la taille du cours d'eau et de l'espace de mobilité sont :

- la fonction de zone tampon
- la connectivité longitudinale terrestre

5 Caractéristiques du cours d'eau

Plusieurs caractéristiques naturelles du cours d'eau doivent être évaluées afin d'en déduire l'espace nécessaire à un bon fonctionnement écologique.

Le style fluvial (chap. 5.1) influence notamment l'importance relative des différentes fonctions de l'espace de mobilité. Il influence également la largeur du fond du lit et la largeur des berges à considérer pour l'application de la procédure (chap. 5.2). Quelques méthodes permettant d'obtenir ces informations sont présentées ci-dessus. D'autres méthodes peuvent être trouvées dans la littérature et peuvent être utilisées afin d'obtenir des données auxquelles appliquer la procédure.

5.1 Style fluvial

L'importance des fonctions écologiques et l'espace nécessaire pour les satisfaire est étroitement lié au style fluvial naturel (morphologie) du cours d'eau. En effet, les styles fluviaux fonctionnent différemment les uns des autres. Ils ne remplissent pas leurs fonctions de la même manière, certains ont besoin de plus d'espace que d'autres et les espèces spécifiques qu'ils abritent varient également car elles dépendent du type de substrat, de l'humidité du sol ou de la vitesse du courant et chaque style fluvial engendre des habitats spécifiques. La connaissance du style fluvial naturel permettra d'identifier les poids des fonctions naturelles à considérer pour délimiter le besoin d'espace des cours d'eau. Les styles principaux sont les tresses, les méandres migrants, les méandres développés, les cours rectilignes (torrents) et les cours enfoncés.

5.1.1 Styles fluviaux

La pente, la disponibilité d'espace et des sédiments sont les paramètres fondamentaux des styles fluviaux (cf. Figure 5 pour une illustration des styles).

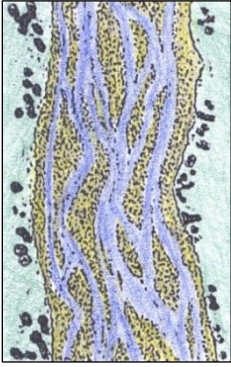
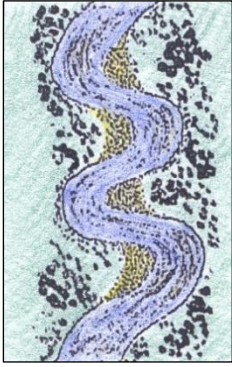
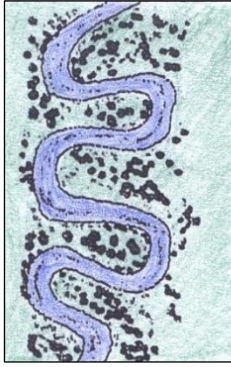
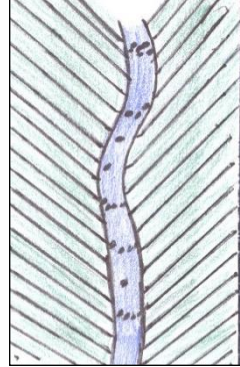
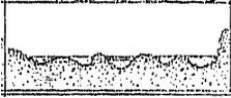



Style	Tresses	Méandres migrants	Méandres développés	Cours rectilignes et encaissés
Planimétrie				
Profil en travers				
Rapport largeur/profondeur	>40	>12 normalement 20-30	<12 normalement 5-8	variable

Figure 5. Style fluvial et indication du rapport largeur profondeur.
Source : modifié d'après Rosgen (1994).

5.1.1.1 Tresses

Les cours en tresses se développent sous des conditions de pente relativement élevées avec un apport solide important. Ils sont caractérisés par des chenaux multiples entrelacés constituant de nombreuses îles. Les cours en tresses sont fréquents au pied des Alpes où les cours d'eau rencontrent une pente plus faible et déposent alors leur charge sédimentaire. Les cours en tresses remplissent de nombreuses fonctions naturelles et abritent, grâce notamment à la présence d'une variété de structures morphologiques, en l'occurrence d'îles et de bancs de sédiments de hauteurs variables, une mosaïque d'habitats riches et diversifiés.

5.1.1.2 Méandres migrants (cours à faible sinuosité)

Les méandres migrants se développent sous des conditions de pente moyenne à faible, avec un charriage relativement important. Les méandres migrants évoluent dans des terrains relativement peu cohésifs et ne peuvent donc pas se développer complètement. Ils érodent la berge du côté aval et déposent leurs sédiments sur la berge amont. Ils migrent ainsi vers l'aval sans se déformer. Ils atteignent une sinuosité modérée et ne se court-circuitent pas. La morphologie en bancs alternés décrite par Yalin et da Silva (2001) constitue un stade initial des méandres migrants (cf. aussi Yalin 1992), souvent contraints par des stabilisations de berges. La zonation végétale des systèmes en méandres migrants est proche de celle des cours en tresses.

L'amplitude naturelle des méandres (A_{nat}) définit l'espace total touché par le lit du cours d'eau et peut généralement être définie sur la base des cartes historiques ou des traces d'anciens lits encore visibles sur le terrain. En l'absence d'informations historiques, l'amplitude vaut 6 à 10x la largeur à pleins bords (Paccaud et Roulier 2010).

5.1.1.3 Méandres développés (cours à forte sinuosité)

Les méandres développés sont caractéristiques des terrains plats à faible charriage. Les berges sont cohésives et les méandres peuvent se développer complètement jusqu'à se court-circuiter, ce qui génère la formation de bras morts. Les méandres tortueux débordent facilement et entretiennent une bande humide dans l'espace riverain. Des inondations régulières ainsi que de fréquentes remontées de la nappe phréatique maintiennent une humidité élevée dans les terrains bordant les cours d'eau présentant ce style, jusqu'à même l'entière vallée alluviale. L'amplitude des méandres joue un rôle sur l'espace nécessaire et peut être définie comme pour les méandres migrants.

5.1.1.4 Torrents et cours rectilignes

Les cours rectilignes sont caractérisés par une forte pente. Comme l'eau possède une importante énergie, le terrain ne lui offre que peu de résistance. C'est pourquoi, en général, ils suivent la ligne de pente. Les cours rectilignes subissent peu de migration latérale et n'ont donc pas besoin de beaucoup d'espace pour remplir leurs fonctions naturelles. Ces dernières se limitent aux fonctions aquatiques et amphibiennes, ainsi qu'à la connectivité longitudinale terrestre et à l'effet tampon. Les torrents représentent un certain type au sein de la catégorie des cours rectilignes. Ils peuvent poser des problèmes de sécurité car ils génèrent de fortes érosions et peuvent également déstabiliser des terrains. Sur les cônes de déjection, le cours d'un torrent peut se diviser en plusieurs bras, et occuper plus d'espace ; dans ce cas, on l'assimilera à un cours en tresses.

5.1.1.5 Cours encaissés

Les cours encaissés se sont, au fil du temps, enfoncés dans la roche par érosion progressive du fond de leur lit. Le fond du lit est généralement constitué de graviers. Il peut s'agir de gorges ou de méandres de fond de vallée (« *Talmäander* »), par exemple à la « Glatt nordwestlich Flawil » (objet 14 SG), ou à « La Sarine : Rossens – Fribourg » (objet 62 FR). Le lit est peu mobile et se déplace très lentement car la roche offre une grande résistance à l'érosion. L'espace riverain est donc limité par la topographie, les fonctions naturelles se concentrent essentiellement dans les milieux aquatiques et amphibiens.

5.1.1.6 Styles intermédiaires

Les styles intermédiaires sont nombreux ; dans ces cas, il faut rattacher le cours d'eau au style le plus proche.

5.1.2 Détermination du style fluvial naturel d'un cours d'eau corrigé

Approche historique

La méthode consiste à lire le style fluvial naturel sur un document historique datant d'avant la correction du cours d'eau. Cette méthode est la plus simple et la plus fiable dans la plupart des cas, mais elle exige que les conditions hydrologiques et sédimentaires qui prévalaient à l'époque du document de référence soient proches des conditions actuelles. Si les conditions ont significativement changé et de manière irréversible, par exemple que le débit morphogène est réduit à cause de prises d'eau ou que le charriage est réduit à cause de la construction d'un lac de barrage en amont, l'approche historique n'est pas appropriée à elle seule.

Lors de la consultation des cartes anciennes, il faudra veiller à l'historique des corrections fluviales. Souvent des petites stabilisations avaient déjà été mises en place avant les grands projets de correction fluviale du XVIII^{ème} siècle.

Pour les cours en méandres, les cartes historiques et les traces d'anciens lits souvent encore visibles sur le terrain permettent généralement de définir l'**amplitude naturelle des méandres** (A_{nat}). En l'absence d'informations historiques, l'amplitude vaut 6 à 10x la largeur à pleins bords.

Référence spatiale

La méthode consiste à déduire le style fluvial d'après un cours d'eau analogue naturel (non corrigé). Le cours d'eau choisi comme référence doit avoir des conditions de débit, de pente, de granulométrie et de charriage similaires au cours d'eau étudié.

Approches empiriques : exemple de l'approche Yalin et da Silva

L'approche de Yalin et da Silva (2001) permet de calculer la largeur de régime du lit B , la profondeur d'eau de régime h et la pente de régime i sur la base du débit morphogène (HQ_2 ou HQ_5) et du diamètre des sédiments ($D = d_{50}$ ou d_m). Les valeurs de B/h et h/D permettent d'identifier le style du cours d'eau

Les systèmes en tresses se développent dans des lits larges et peu profonds ; toute la gamme de texture sédimentaire est présente, surtout les sédiments grossiers.

Les méandres, qui correspondent aux méandres migrants et aux méandres développés, se caractérisent par des cours d'eau profonds, d'un faible rapport B/h et des sédiments fins.

Les bancs alternés ne constituent pas un style à proprement parler, ils correspondent à un stade précoce de développement des méandres migrants ou des tresses, alors que les bancs multiples (plusieurs bancs sur la largeur du cours d'eau) sont l'avant-coureur des tresses.

Les lits droits correspondent aux cours rectilignes. Les lits encaissés se présentent parfois sous la forme de méandres encaissés (« Talmäander »).

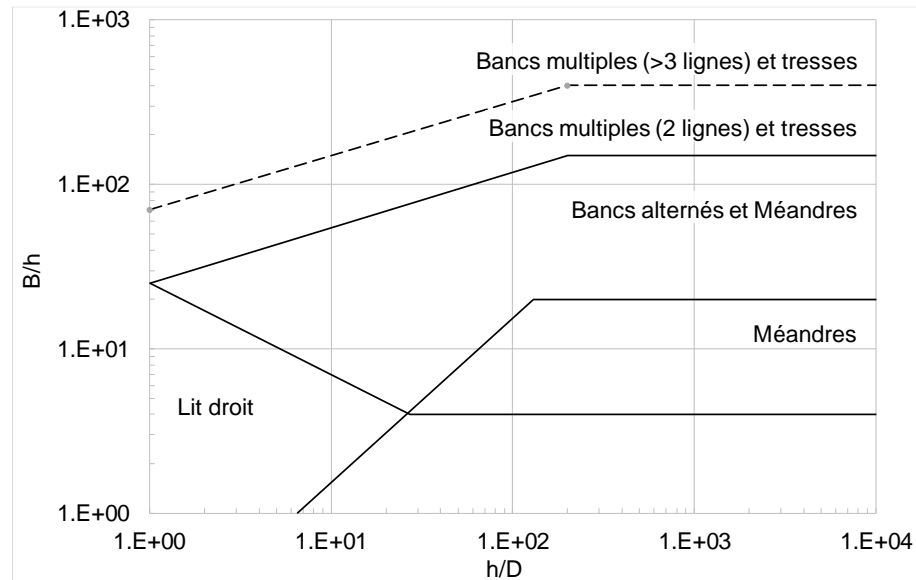


Figure 6. Styles de cours d'eau selon Ahmari et da Silva (2011), basé sur Yalin et da Silva (2001). B est la largeur d'équilibre, h la profondeur d'eau et D le diamètre des sédiments.

5.2 Estimation des largeurs du fond du lit et des berges

5.2.1 Largeur naturelle du fond du lit L_{fi} et largeur à pleins bords L_{pb}

Il existe plusieurs méthodes pour définir la largeur naturelle du fond du lit (L_{fi}), mais elles ne sont pas toutes applicables à chaque tronçon du cours d'eau et doivent être reconsidérées au cas par cas. Il s'avère toutefois être utile d'employer différentes méthodes pour déterminer la largeur naturelle du fond du lit ce qui permettra de comparer les résultats, car chacune a des incertitudes inhérentes et produit des erreurs d'estimation.

Il faut toujours appliquer autant de méthodes que possible pour être capable de vérifier la plausibilité des résultats. De manière générale, il faut favoriser une approche historique pour la détermination de la largeur naturelle du fond du lit (cartes, photos et autres documents historiques). En deuxième recours, une référence spatiale peut être utilisée. Si aucune référence ne peut être trouvée, des formules empiriques peuvent être utilisées. **Quelle que soit l'approche utilisée,**

il convient de faire une analyse de sensibilité tant sur les paramètres que sur la méthode utilisée.

L'application de l'une ou l'autre méthode dépendra notamment des données à disposition.

L'application de différentes méthodes pour déterminer la largeur naturelle du fond du lit est expliquée dans le manuel « Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite an grossen Fliessgewässern der Schweiz » (OFEV, version provisoire novembre 2019).

Une fois la largeur naturelle du fond du lit estimée, il sera également nécessaire de calculer la largeur à pleins bords pour l'application de la présente méthode. Ces deux grandeurs sont reliées par la formule suivante :

$$L_{fl} = L_{pb} * \left(1 - \frac{2}{r * m}\right)$$

Avec m, la pente des berges et r le ratio largeur/profondeur, dépendant du style du cours d'eau.

5.2.2 Largeur naturelle des berges

La largeur naturelle des berges (L_b ; espace entre le pied et le sommet de la berge) dépend de la pente naturelle des berges. La pente naturelle des berges est une donnée souvent manquante. L'analyse de plusieurs cours d'eau naturels a néanmoins montré que la pente des berges est en moyenne de 1:3 sur chaque berge. On peut ainsi estimer la largeur naturelle des berges si on connaît la profondeur d'eau pour le débit morphogène. Cette profondeur peut être déduite de la largeur à pleins bords (L_{pb}) et du rapport largeur / profondeur (r).

h_{2-5} = profondeur d'eau moyenne au fond du lit avec le débit morphogène

L_b = largeur des berges = 6 h_{2-5}

$h = L_{pb} / r$

L_{pb} = largeur à pleins bords

r = rapport largeur / profondeur

On rappelle que la pente des berges n'a pas d'influence sur la satisfaction des fonctions du milieu amphibien (chap. 4.2), mais a un impact sur l'espace nécessaire aux berges du cours d'eau.

6 Évaluation des fonctions

6.1 Méthode multicritère

Le système des courbes de préférence (ou courbes de satisfaction) a été appliquée pour évaluer la valeur naturelle des zones alluviales candidates constituant le 2^e complément à l'inventaire fédéral des zones alluviales (Thielen et al. 2002). Il se fonde lui-même sur une procédure appliquée aux prairies et pâturages secs développée par le WSL (Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage) dans les années '90. Ce système multicritère permet d'assembler des paramètres et des indicateurs se mesurant en unités différentes (m^1 , m^2 , m^3 , flux, vitesses, présence ou absence d'une espèce cible, etc.) et de générer une note globale. Pour la détermination de l'espace nécessaire aux grands cours d'eau, le degré de satisfaction de 7 fonctions écologiques est assemblé.

Pour chaque critère, un **degré de satisfaction** est calculé : le degré de satisfaction atteint 100% lorsque la valeur du critère représente une situation favorable et 0% dans le cas opposé. Les valeurs seuils (minimum 0% et maximum 100%) se fondent sur des mesures ou sur une approche empirique ; elles peuvent également se fonder sur un choix subjectif ou une évaluation d'expert.

Exemple

Une bande terrestre non stabilisée d'une largeur équivalant à $1.5 L_{pb}$ permet le développement des forêts à bois tendres (exemples au chap. 4.3.5) et une largeur supplémentaire équivalant à $1 L_{pb}$ est nécessaire au développement des forêts à bois durs. La valeur seuil de 100% est donc fixée $3.5 L_{pb}$ (y compris $1 L_{pb}$ pour le cours d'eau) pour les exigences de la végétation typique à l'intérieur des zones alluviales ; cette végétation se compose des formations à bois tendres et des formations à bois durs. Si un espace équivalent par exemple à $4.5 L_{pb}$ est disponible, la satisfaction n'augmente pas car elle est plafonnée à $3.5 L_{pb}$.

Une **fonction de préférence** (ou **courbe de satisfaction**) indique pour chaque valeur du critère le degré de satisfaction correspondant à une fonction. Elle permet de réunir tous les critères sous la même échelle de mesure : 0 à 100%. Les valeurs seuils se fondent sur l'observation des systèmes naturels (Woolsey et al. 2005, Bonnard et al. 2008) et peuvent être sujettes à négociation et à discussion, de même que les poids attribués aux différentes fonctions. Les fonctions de préférences de 6 des 7 fonctions écologiques sont linéaires car on ne dispose pas d'éléments pour établir d'autres équations (les fonctions dépendent de

l'espace à disposition et on ne connaît, présentement, pas d'effet de seuil). Seule la fonction de l'effet tampon présente un coude (satisfaction de 50% à 6 m de largeur) pour s'approcher des dispositions légales en la matière (ORRChim ; RS 814.81).

Les critères sont **pondérés** pour refléter leur importance dans l'évaluation des zones alluviales (cf. chap. 6.3). Comme pour les valeurs seuils, les pondérations peuvent être fixées de manière empirique ou même subjectives en fonction des buts.

6.2 Courbes de satisfaction

Les courbes ci-dessous produisent le pourcentage de satisfaction de chaque fonction naturelle du cours d'eau relativement à la qualité et à la dimension de l'espace disponible.

6.2.1 Milieu aquatique

Les fonctions naturelles du milieu aquatique s'évaluent en comparant l'espace du fond du lit et la largeur naturelle du fond du lit (L_{fi}). Cette dernière est déterminée par l'utilisateur en suivant une des méthodes présentées dans le document « Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite » (OFEV, version provisoire novembre 2019). La satisfaction est de 100% si la largeur de l'espace de mobilité est supérieure ou égale à L_{fi} . Elle est de 0% si la largeur de l'espace de mobilité est inférieure à un tiers de L_{fi} , car aucune structure de lit ne peut se développer (Figure 7). Cela sous-entend qu'il n'y a aucune structure intéressante dans le lit si des stabilisations de berges le contraignent à moins d'un tiers de sa largeur naturelle. On peut représenter la courbe de satisfaction comme montré ci-dessous. Cette fonction est satisfaite uniquement par l'espace de mobilité.

La notion de largeur naturelle du fond du lit (L_{fi}) est la même que celle utilisée pour des cours d'eau de moins de 15 m de largeur. L'hypothèse que l'ensemble des fonctions du milieu aquatique sont remplies par cette largeur naturelle se fonde sur les travaux cités sous chapitre 4.1, à savoir Pedroli et al. (1991), Zaugg et al. (2003), OFEV (2012) et Gostner (2012). En réalité, si l'espace de divagation dépasse la largeur du fond du lit, le cours d'eau met en place spontanément des berges naturelles et développe son propre style, mais la structure du milieu aquatique ne change pas.

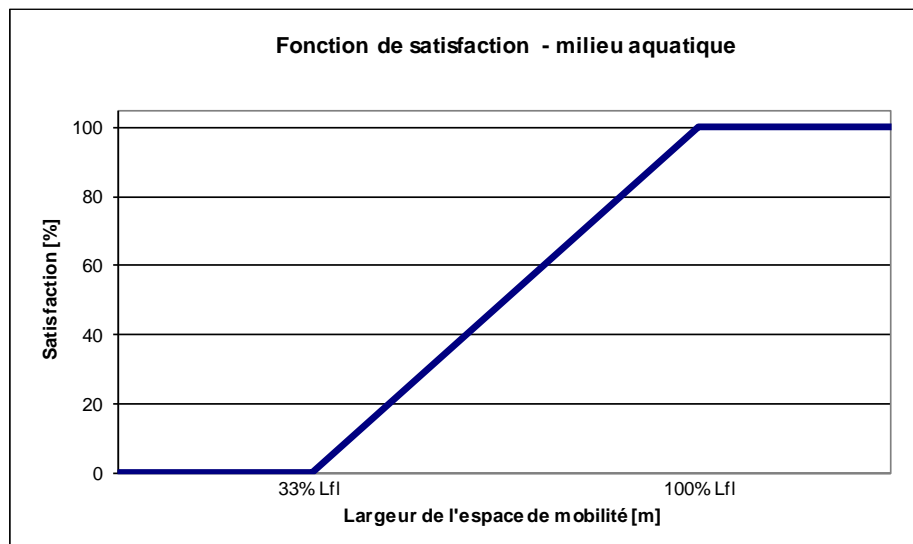


Figure 7. Fonction de satisfaction du milieu aquatique. L_{fi} = largeur naturelle du fond du lit.

6.2.2 Milieu amphibien

Les fonctions naturelles du milieu amphibien sont liées à la qualité des structures des berges. Comme pour le milieu aquatique, on détermine l'espace occupé par le milieu amphibien en conditions naturelles, puis on compare cet espace avec l'espace disponible pour les berges de la situation à évaluer.

Le besoin d'espace des berges en conditions naturelles est calculé de telle sorte que le 100% est atteint avec une pente moyenne de 1:3 sur chaque berge. Comme on calcule l'espace des deux berges ensemble, il est aussi possible d'obtenir le 100% avec une berge en pente plus forte et une berge en pente plus faible. Le 0% de satisfaction de la fonction sanctionne une situation dans laquelle la pente des deux berges serait supérieure ou égale à 1:1. La pente de la berge en tant que telle n'a pas d'influence directe sur la qualité du milieu ; la pente naturelle des berges est simplement utilisée comme mesure pour déterminer l'espace nécessaire aux berges.

Comme expliqué au chapitre 5.2.2, l'espace nécessaire aux berges est proportionnel à la profondeur de l'eau, nommée $h_{2.5}$. Cette profondeur d'eau moyenne peut être calculée à l'aide de la formule de Manning-Strickler pour le débit morphogène dans le lit naturel (débit obtenu pour une crue de temps de retour variant entre 2 et 5 ans). On obtient une situation optimale (100% de satisfaction) quand l'espace total des deux berges est supérieur ou égal à 6 fois la profondeur d'eau ($h_{2.5}$), c'est-à-dire lorsque la largeur naturelle à pleins bords est atteinte sur la base de l'hypothèse d'une pente moyenne des berges naturelles de l'ordre de 1:3 (Figure 8). La fonction est partiellement satisfaite seulement si l'espace de la berge est supérieur à la profondeur d'eau pour un débit morphogène (donc $2 \times h_{2.5}$ pour les deux rives).

Cette fonction devrait si possible être satisfaite par l'espace de mobilité. Dans le cas où des berges sont stabilisées avec des techniques proches de la nature sur une pente moyenne 1:3, celles-ci peuvent aussi être prises en compte. Cette exception est seulement possible si l'espace de mobilité est inférieur à la largeur naturelle à pleins bords.

Le milieu amphibien englobe les berges et les bancs de sédiments du lit mineur. Du point de vue de la végétation, les groupements pionniers d'une durée de vie n'excédant pas 2 à 5 ans le colonisent (Roulier et al. 2007).

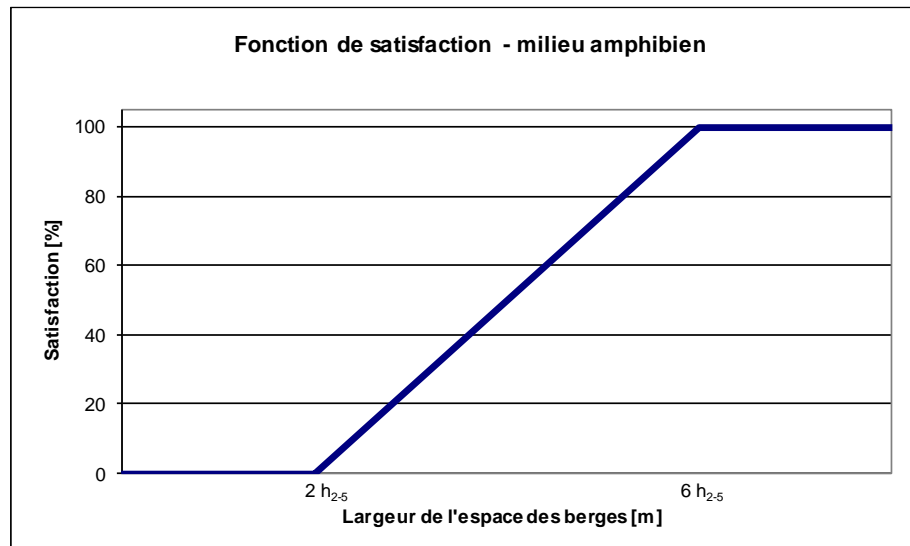


Figure 8. Fonction de satisfaction du milieu amphibien. $h_{2.5}$ = profondeur d'eau moyenne pour le débit morphogène, en conditions naturelles.

6.2.3 Milieu terrestre

6.2.3.1 Connectivité longitudinale terrestre

Les bandes boisées, les zones inondables et l'espace de mobilité contribuent à assurer la fonction de connectivité longitudinale terrestre. La largeur de l'espace servant à la connectivité se mesure entre le haut de la berge et le bord de l'espace réservé aux eaux (cf. Figure 15). Chaque rive s'évalue séparément.

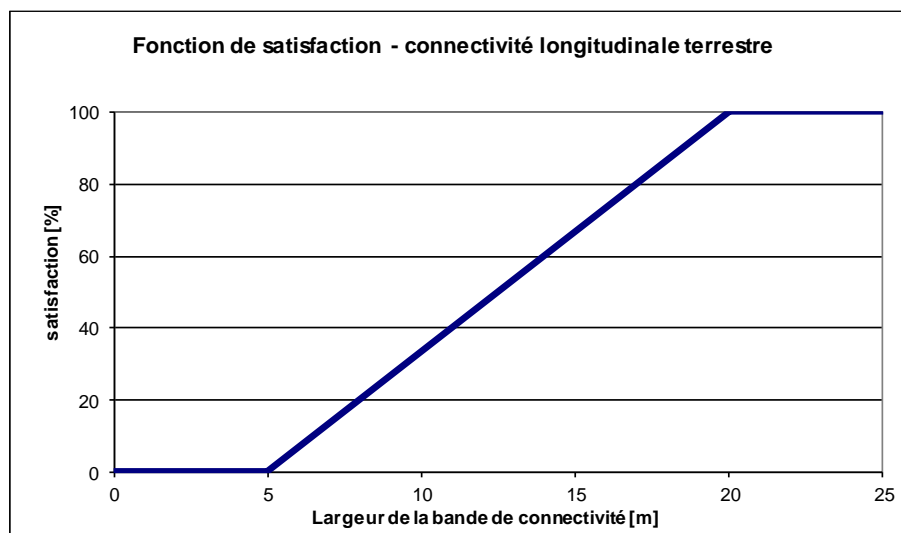


Figure 9. Fonction de satisfaction de la connectivité longitudinale terrestre pour une rive. Chaque rive s'évalue séparément.

Les valeurs de la courbe (Figure 9) sont fondées sur différents concepts de réseaux écologiques (Berthoud et al. 2004, Delarze 2005, Plumettaz et al. 2010, BEB SA 2012, cf. chap. 4.3.1) ainsi que sur le rapport de base (compilation bibliographique) concernant les bandes riveraines des cours d'eau (Heeb et al. 2004). Les liaisons terrestres des animaux (au moins la petite faune) sont assurées par des bandes de végétation riveraine comprises entre 10 m et 20 m de largeur. La limite inférieure de la courbe de satisfaction (espace minimal autour des eaux) est fixée selon l'OEaux à 5 m.

Cette fonction est également satisfaite par une bande boisée à l'extérieur de l'espace de mobilité (p.ex. forêt située à l'extérieur des berges stabilisées, boisement des talus d'une digue ou flancs boisés de la vallée enserrant le cours d'eau).

Lorsqu'on évalue l'entier de l'espace réservé au cours d'eau, le 100% de satisfaction de la connectivité longitudinale terrestre est atteint lorsque la bande boisée dépasse les 40 m au total (20 m par berge).

6.2.3.2 Effet tampon

Tous les types de surface sont aptes à réduire les intrants de substances nocives, à l'exception des surfaces construites. Les zones tampons s'évaluent séparément pour chaque rive en mesurant l'espace compris entre le haut des berges et la limite de l'espace réservé aux eaux (cf. Figure 15). La valeur du 100% de satisfaction est fondée sur les valeurs mentionnées dans le rapport CORPEN (cf. chap. 4.3.2). La courbe est une ligne brisée (Figure 10) car la valeur de satisfaction pour 6 m de largeur a été fixée à 50% (choix des experts). Cette valeur de 6 m correspond au minimum légal pour l'agriculture de la largeur des

bandes tampons bordant les cours d'eau (Art. 21 et Ann. 1, ch. 9.6 OPD, RS 910.13 ; AGRIDEA 2009).

L'effet tampon est également réalisé par des bandes boisées et extensives à l'extérieur de l'espace de mobilité, notamment aussi sur les digues.

Lorsqu'on évalue l'entier de l'espace réservé au cours d'eau, le 100% de satisfaction de l'effet tampon est atteint lorsque la bande végétalisée non exploitée (agriculture intensive) dépasse 40 m au total (20 m par berge).

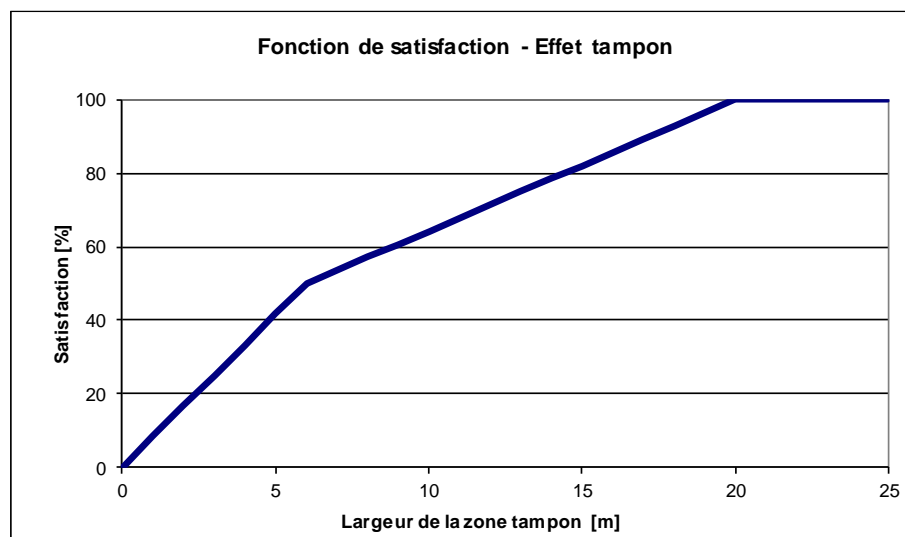


Figure 10. Fonction de satisfaction de l'effet tampon pour une rive. Chaque rive s'évalue séparément.

6.2.3.3 Structures du milieu terrestre

a Cours en tresses

La courbe des structures des milieux terrestres pour les cours en tresses est fondée sur les besoins de la végétation alluviale. La démarche est la même que pour définir les besoins des communautés typiques, on obtient donc la même courbe de satisfaction (Figure 11 ; cf. chap. 4.3.5.5 et 6.4.1).

Dans le cas des **zones alluviales** ou dans les tronçons où **l'installation d'une bande de divagation est visée**, les exigences d'espace des structures présentes dans le compartiment à bois durs doivent aussi être satisfaites, car le rétablissement de l'ensemble du système alluvial est visé ; le 100% de la note est obtenu pour un espace de mobilité de **3.5x la largeur naturelle du lit à pleins bords L_{pb}** . Cette exigence correspond au rétablissement optimal d'une bande de divagation et constitue un standard pour les zones alluviales. Le but ne sera pas forcément d'atteindre le 100% de satisfaction des fonctions, mais de permettre l'installation de la totalité des compartiments de l'espace nécessaire aux eaux. Dans l'[outil internet](#) à la disposition des utilisateurs, cette exigence des zones alluviales constitue une option.

Pour les cours d'eau situés **hors des zones alluviales** (la majorité des cours d'eau), l'espace permettant de satisfaire les **fonctions écologiques** des structures typiques du milieu terrestre se limitera à une largeur de **2.5x la largeur naturelle du lit à pleins bords L_{pb}** . Le rétablissement des formations à bois tendres est visé dans ce cas.

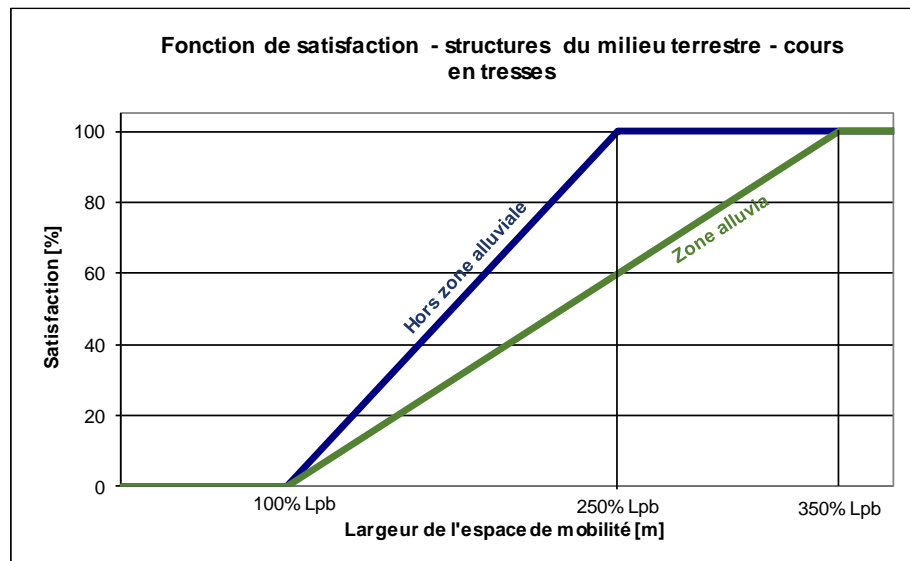


Figure 11. Courbe de satisfaction pour les structures du milieu terrestre des cours en tresses. L_{pb} = largeur naturelle à pleins bords.

b Cours en méandres

Les structures typiques des cours en méandres sont les bras morts qui sont créés par des phénomènes de court-circuit des méandres. Les méandres peuvent se court-circuiter lorsqu'ils sont bien développés (cours à forte sinuosité), soit par déversement, soit par tangence. Les méandres migrants ne forment généralement pas de bras mort, mais ils influencent le milieu terrestre sur une bande de largeur égale à leur amplitude. Plus l'amplitude est grande, plus la quantité de milieu terrestre influencé par le cours d'eau est importante. La fonction est satisfaite uniquement par l'espace de mobilité (Figure 12).

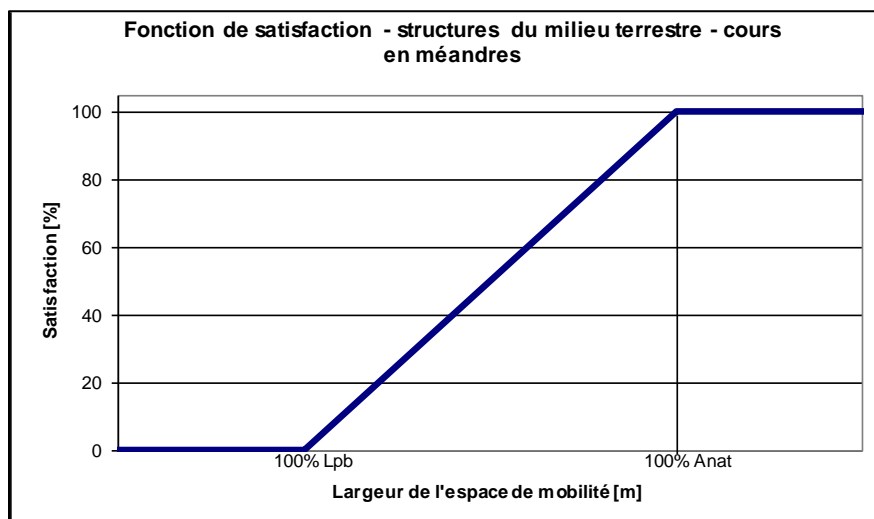


Figure 12. Courbe de satisfaction des structures du milieu terrestre pour les cours en méandres. A_{nat} = amplitude naturelle des méandres. L_{pb} = largeur naturelle du lit mineur à pleins bords.

6.2.3.4 Dynamique d'inondation

L'espace de mobilité ainsi que les zones inondables peuvent participer à la dynamique d'inondation. Cette fonction n'est pas pertinente pour tous les styles de cours d'eau ; elle est nécessaire seulement pour les méandres développés. Bien que les méandres développés ne soient pas le seul style fluvial dans lequel des inondations se produisent, ils sont le seul pour lequel l'apport hydrique des inondations influence significativement la végétation, car le terrain est plat et peu perméable et les inondations sont plus fréquentes que pour les autres styles. Le milieu riverain est donc inondé plus souvent et plus longtemps. Dans cette fonction, on inclut les effets directs des inondations en tant qu'apport hydrique sur le milieu terrestre riverain, mais pas les effets indirects comme les dépôts de sédiments.

En Suisse, on peut citer l'Orbe à la Vallée de Joux (zone alluviale 50 VD), la Versoix (zone alluviale 118 VD) ou l'Aar dans le Seeland comme systèmes typiques de ce style à l'état naturel. Diverses observations de cours d'eau non corrigés montrent que la largeur de la zone régulièrement inondée est environ égale à l'amplitude des méandres. Mais cette exigence paraît trop sévère pour être appliquée telle quelle, ainsi on considérera que l'on est satisfait à 100% si la zone inondable atteint la moitié de l'amplitude qu'auraient les méandres en conditions naturelles et 0% s'il n'y a pas de zone inondable en dehors de l'espace du fond du lit et des berges. L'amplitude des méandres en conditions naturelles peut être estimée à 6 à 10 fois la largeur naturelle du lit mineur à pleins bords (L_{pb}) (Paccaud et Roulier 2010). C'est pourquoi, une largeur de $5 L_{pb}$ est proposée comme valeur seuil supérieure pour remplir la fonction de la dynamique d'inondation (Figure 13).

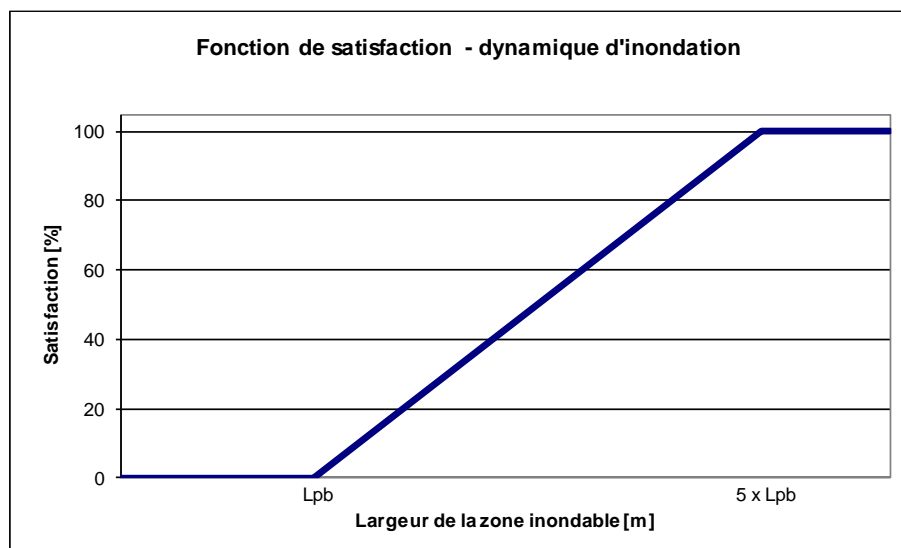


Figure 13. Fonction de satisfaction de la dynamique d'inondation.
 L_{pb} = largeur naturelle du lit mineur à pleins bords.

6.2.3.5 Communautés végétales typiques du milieu terrestre

Pour cette fonction, il est nécessaire de faire une distinction entre le besoin d'espace dans les zones alluviales d'importance nationale ou cantonale et à l'extérieur de ces biotopes (Figure 14).

Dans le **cas des zones alluviales ou dans les tronçons où l'installation d'une bande de divagation est visée**, les exigences d'espace des communautés typiques présentes dans le compartiment à bois durs doivent aussi être satisfaites car le rétablissement de l'ensemble du système alluvial est visé ; le 100% de la note est obtenu pour un espace de mobilité de **3.5x la largeur naturelle du lit à pleins bords L_{pb}** . Cette exigence correspond au rétablissement optimal d'une bande de divagation et constitue un standard pour les zones alluviales (cf. chap. 6.4.1). Le but ne sera pas forcément d'atteindre le 100% de satisfaction des fonctions, mais de permettre l'installation de la totalité des communautés de l'espace nécessaire aux eaux. Dans l'[outil internet](#) à la disposition des utilisateurs, cette exigence des zones alluviales constitue une option.

À l'extérieur des biotopes les exigences imposées sont moins grandes ; pour les cours d'eau **à l'extérieur** des zones alluviales (la majorité des cours d'eau), l'espace permettant de satisfaire les **fonctions écologiques** des communautés végétales typiques du milieu terrestre se limitera à une largeur de **2.5x la largeur naturelle du lit à pleins bords L_{pb}** . Le rétablissement des formations à bois tendres est visé dans ce cas.

Ces valeurs proviennent des observations du développement de la végétation alluviale dans des systèmes naturels (cf. chap. 4.3.5).

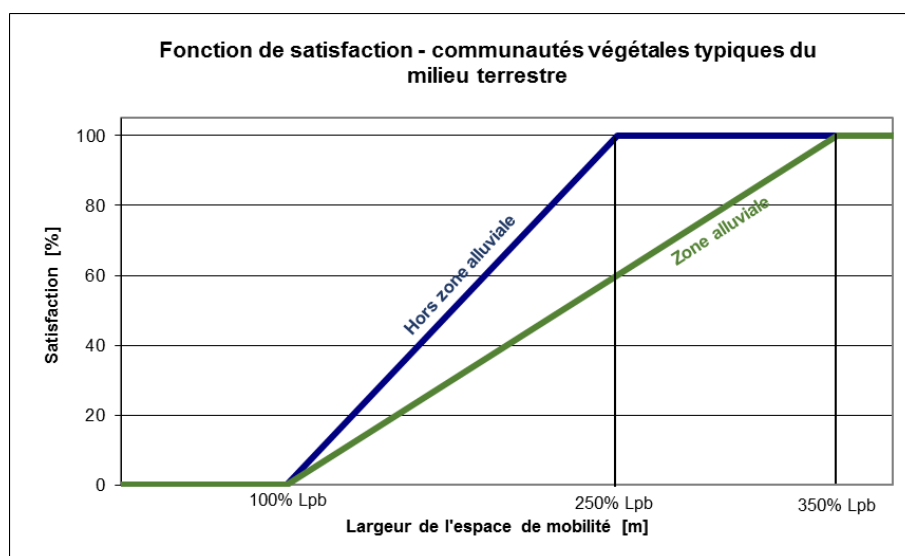


Figure 14. Courbe de satisfaction des communautés végétales typiques du milieu terrestre. L_{pb} = largeur naturelle du lit mineur à pleins bords.

6.3 Pondération des fonctions

6.3.1 Table de pondération

La table de pondération (Tableau 8) présente les combinaisons de pondérations retenues dans les différents styles pour évaluer les fonctions de l'espace nécessaire. Afin de conserver une constance dans l'évaluation des projets, **l'OFEV demande d'appliquer ces pondérations.**

	Tresses	Méandres migrants	Méandres développés	Torrents	Cours enfoncés
Milieu aquatique	20	20	20	40	40
Milieu amphibien	10	10	10	20	20
Milieu terrestre	70	70	70	40	40
- Connectivité longitudinale terrestre	10	10	10	20	20
- Effet tampon	10	10	10	20	20
- Structures du milieu terrestre	25	25	20	0	0
- Dynamique d'inondation	0	0	10	0	0
- Communautés typiques du milieu terrestre	25	25	20	0	0

Tableau 8. Pondération des fonctions selon les styles de cours d'eau.

Afin d'obtenir une note globale de satisfaction des fonctions naturelles, il est nécessaire de définir une pondération des différentes fonctions. Cette pondération est fonction tant du style fluvial du cours d'eau évalué que de l'importance relative des fonctions et de leur besoin d'espace. La pondération des fonctions des habitats a été définie comme 20-10-70 % par les experts : pour les milieux aquatiques 20 %, amphibiens

10 % et terrestres 70 %. Le style des cours rectilignes fait exception avec une pondération de 40–20–40 % à appliquer.

Le total des poids vaut toujours 100 %. La **somme pondérée** des 7 degrés de satisfaction donne la **note** de l'objet (0 à 100) :

$$Note = S_1 \times P_1 + S_2 \times P_2 + \dots + S_n \times P_n$$

S_n = degré de satisfaction de la fonction n (0 – 100 %)

P_n = poids de la fonction n (0 – 1)

6.3.2 Styles fluvial

Toutes les fonctions naturelles ne sont pas pertinentes pour tous les styles de cours d'eau (cf. chap. 5.1). Par exemple, concernant les cours rectilignes et les cours enfoncés, l'influence du cours d'eau sur le milieu terrestre riverain est limitée car ils ont une faible mobilité latérale. On retiendra uniquement les fonctions de zone tampon et de connectivité, dans le milieu terrestre, et ainsi davantage de poids sera donné aux milieux aquatiques et riverains.

La dynamique d'inondation intervient seulement pour le style en méandres développés, car les méandres développés évoluent en terrain très plat et sont souvent bordés de zones humides (à l'état naturel) inondées par les hautes eaux annuelles.

6.3.3 Importance relative des fonctions

La pondération (importance relative) des sept fonctions naturelles utilisées dans la procédure a une importance capitale sur la note de l'évaluation. La pondération se fonde sur des éléments objectifs mais constitue un choix stratégique. Par exemple : la valeur naturelle, les fonctions et la signification (diagnostic écologique) des formations végétales typiques du milieu terrestre est importante et reconnue (Kuhn et Amiet, 1988, Gallandat et al. 1993) ; c'est un élément objectif qui génère les fondements pour définir une forte pondération (25%). Néanmoins, le choix de 25% est un choix subjectif et stratégique issu de l'avis des experts. Des aspects pragmatiques ou utilitaires peuvent aussi intervenir pour orienter l'évaluation (par exemple : la présence d'un habitat cible ou d'une espèce cible peut être fortement pondérée pour orienter l'évaluation vers les buts visés). La pondération présentée sous Tableau 8a été retenue et validée par les experts des zones alluviales et de l'aménagement des cours d'eau. Cette pondération accorde un grand poids au milieu terrestre dont l'ensemble des fonctions a un poids relatif de 70% dans les 3 types de grands cours d'eau les plus répandus : tresses, méandres migrants et méandres développés.

6.4 Exigences des zones alluviales

6.4.1 Forêts à bois durs

Dans la zonation végétale caractérisant les systèmes alluviaux intacts ou proches de l'état naturel (zones alluviales notamment), les forêts alluviales à bois durs constituent un compartiment typique des systèmes alluviaux collinéens et montagnards ; ce compartiment ne dépasse guère l'altitude de 1200 m. Les forêts à bois durs sont constituées d'essences telles que le Frêne commun, l'Érable sycomore, le Chêne pédonculé et l'Orme de montagne. Ces associations végétales s'installent après les bois tendres ; elles requièrent un espace supplémentaire situé derrière les formations à bois tendre.

L'inclusion des exigences surfaciques des forêts à bois durs a fait l'objet d'une analyse approfondie et de discussions des spécialistes des zones alluviales et de l'aménagement des cours d'eau. Finalement, il a été établi que **les exigences des forêts à bois durs devaient être prises en considération lors de l'aménagement des cours d'eau (revitalisations) situés dans le périmètre des biotopes d'importance nationale ou cantonale ainsi que dans les tronçons où l'installation d'une bande de divagation est visée**. Dans les cours d'eau situés hors des zones alluviales (la grande majorité des cours d'eau), seules les exigences des forêts à bois tendres seraient généralement requises pour déterminer l'espace nécessaire.

Les mesures et évaluations présentées sous 4.3.5.1 à 4.3.5.5 montrent qu'une largeur supplémentaire de $1x L_{pb}$ permet le développement de ce compartiment, ce qui aboutit à une largeur totale de l'espace de mobilité de $3.5x L_{pb}$. Cette largeur correspond à la définition d'une bande de divagation (voir chapitre 6.4.2) pour les systèmes en tresses. Cette exigence influence la fonction de satisfaction des communautés végétales typiques (cf. chap. 6.2.3.5 et Figure 14) pour les cours en méandres et en tresses, ainsi que la fonction de satisfaction des structures du milieu terrestre pour les cours en tresses (chap. 6.2.3.3 et Figure 11).

Dans les revitalisations des zones alluviales, cette exigence supplémentaire sera prise en compte, afin de donner l'espace suffisant pour la revitalisation de la totalité du système alluvial.

6.4.2 Bande de divagation

Selon le dépliant OFEG et al. (2000), la largeur de la bande de divagation devrait être d'au moins 5 – 6 fois la largeur du fond du lit. Cette norme correspond approximativement à 3x la largeur à pleins

bords (selon la largeur du lit et la pente des berges) si l'on considère qu'en moyenne $L_{pb} = \text{environ } 2x L_{fl}$. Avec ces valeurs, la note globale obtenue en appliquant la présente procédure ne serait que de 80%. Cette définition de l'espace de divagation (préconisée par le dépliant) peut s'appliquer à des cours d'eau situés hors des zones alluviales et aboutir à une situation très favorable, mais les exigences des zones alluviales des grands cours d'eau sont plus élevées.

Pour les systèmes en **méandres**, la largeur de la bande de divagation correspond à l'amplitude naturelle des méandres, soit 6 – 10 fois la largeur pleins bords (Malavoi 1998, Paccaud et Roulier 2010). Avec une telle exigence, une note globale de 100% est obtenue selon la méthode grands cours d'eau pour des rivières en méandres migrants ou en méandres développés. Le score de 100% correspond aux exigences des zones alluviales.

Dans quelques rares cas, la largeur naturelle des méandres pourrait être inférieure à 3.5x la largeur pleins bords. Dans ce cas, la note globale obtenue n'atteindrait pas 100%, car les besoins des communautés typiques ne sont atteints que pour 3.5x L_{pb} .

Pour les systèmes en **tresses**, aucune formule ne permet de déterminer la largeur de la bande de divagation, d'autant plus que la largeur à pleins bords est plus difficile à évaluer. L'abaque (OFEG et al. 2000) ne dit rien de particulier sur les cours en tresses car il s'applique à tous les styles de cours d'eaux. Le concept de divagation correspond mieux aux cours en méandres. L'équivalent de la formation de méandres pour les cours en tresses est la formation d'îles dans le lit et de terrasses alluviales abritant des formations à bois tendres et à bois durs, qui sont des structures caractéristiques des cours en tresses. Cela nécessite un espace de 3.5 fois la largeur à plein bord du cours d'eau pour atteindre le score de 100%.

En conclusion, pour la bande de divagation, il est finalement proposé que la largeur calculée avec la procédure « Espace nécessaire aux grands cours d'eau » soit établie à l'aide des valeurs maximums de l'indicateur le plus exigeant, à savoir :

- **3.5x L_{pb} (largeur à pleins bords) pour les cours en tresses,**
- **A_{nat} (amplitude naturelle des méandres) ou 3.5x L_{pb} (si cette valeur est plus élevée que A_{nat}) pour les cours en méandres.**

Ce score de 100% devrait, dans la mesure du possible, être visé dans les revitalisations de zones alluviales.

7 Compartiments de l'espace réservé aux eaux

7.1 Espace de mobilité

L'espace de mobilité (Figure 15) est l'espace à l'intérieur duquel le cours d'eau et les milieux annexes peuvent évoluer de manière naturelle. Il désigne l'ensemble de la surface qui est atteinte ou qui peut être atteinte par le déplacement latéral du cours d'eau. Les berges et le lit ne sont pas stabilisés à l'intérieur de l'espace de mobilité.

Si les ouvrages de stabilisations de berges sont en pente, l'espace de mobilité ne doit pas être mesuré au niveau du débit à pleins bords mais au niveau du fond du lit. Si l'espace de mobilité est inférieur ou égal à la largeur naturelle du fond du lit, alors la mobilité latérale du cours d'eau sera nulle.

La ligne d'intervention reportée dans la Figure 15 indique que lorsque le cours d'eau atteint cette position, une intervention pour limiter la dynamique à lieu. L'espace à l'extérieur de la ligne d'intervention ne contribue donc pas aux fonctions liées à l'espace de mobilité.

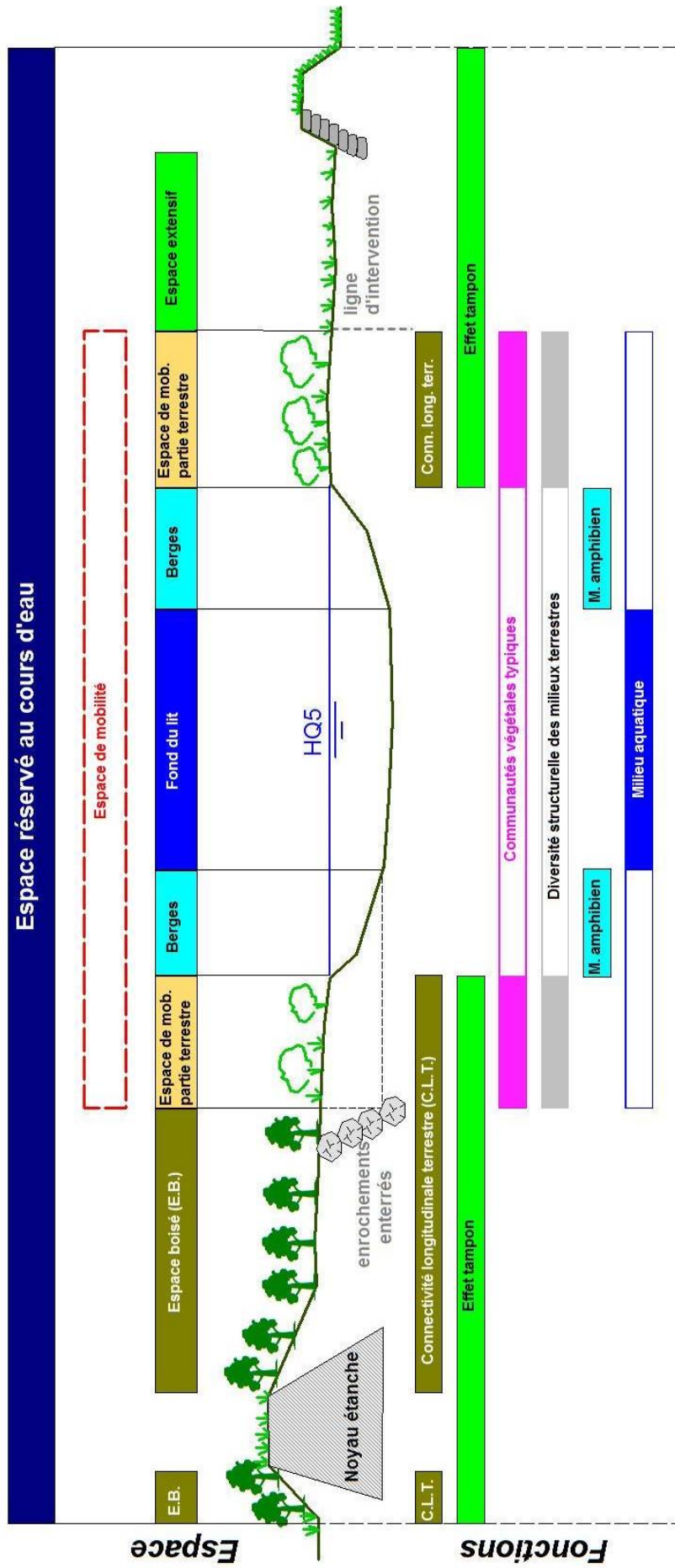


Figure 15. Coupe schématique illustrant l'espace réservé aux eaux et les différents compartiments à identifier pour appliquer la procédure.

7.2 Espace des berges

Si des stabilisations de berges sont présentes, l'espace des berges sera défini par l'espace occupé par les stabilisations de berge entre le fond du lit et le terrain naturel. Si aucune stabilisation de berge n'est présente, on considérera que l'espace des berges est égal à l'espace des berges en conditions naturelles. Dans ce cas, on représentera l'espace des berges à l'intérieur de l'espace de mobilité.

Les fonctions du milieu amphibien peuvent être totalement ou partiellement remplies par des stabilisations présentant une diversité structurelle et une couverture végétale.

Dans le cas où des berges sont stabilisées avec une méthode proche de la nature et une pente moyenne 1:3, celles-ci peuvent être prises en compte. Cette exception est seulement possible si l'espace de mobilité est inférieur à la largeur naturelle à pleins bords.

7.3 Zone inondable

Pour qu'une zone soit considérée comme inondable, elle doit être inondée suffisamment souvent pour induire un impact significatif sur la végétation riveraine, donc par un débit de l'ordre de HQ_1 ou HQ_2 . Les zones inondables sont pertinentes dans des terrains plats et imperméables. Elle peut être obtenue par un abaissement localisé d'une des digues qui fonctionne comme déversoir latéral. Dans un système de méandres développés naturel, le cours d'eau, lors de fortes crues, forme un couloir d'inondation dont la largeur correspond à l'amplitude des méandres. Pour cette raison, on mesure la zone inondable en y incluant le lit mineur et sans distinguer la contribution de la rive gauche d'avec la rive droite.

La zone inondable par HQ_1 à HQ_2 n'est pas représentée dans la Figure 15 car elle ne concerne que les systèmes en méandres développés.

7.4 Espace boisé

Les espaces boisés se trouvant à l'**intérieur de l'espace de mobilité** sont aptes à remplir les fonctions définies pour le milieu terrestre.

Les espaces boisés se trouvant **dans la partie stabilisée de l'espace réservé au cours d'eau** (c.-à-d. entre les stabilisations du cours d'eau et le pied extérieur de digue) sont aptes à remplir uniquement les fonctions de connectivité longitudinale terrestre et d'effet tampon.

Les espaces boisés se trouvant à l'**extérieur de l'espace réservé au cours d'eau** ne sont pas pris en compte dans cette méthode. En cas de continuité du milieu avec l'espace réservé au cours d'eau, ces bandes peuvent contribuer aux besoins de connectivité longitudinale

terrestre. C'est le cas, par exemple, des forêts de pente bordant le fond d'une vallée étroite (cf. chap. 8.1.2).

7.5 Espace extensif

L'OEaux ne tolère qu'une exploitation agricole extensive dans l'espace réservé aux eaux (article 41c, alinéa 4) : L'espace réservé aux eaux peut faire l'objet d'une exploitation agricole pour autant qu'il soit aménagé en surface à litière, en haie, en bosquet champêtre, en berge boisée, en prairie riveraine d'un cours d'eau, en prairie extensive, en pâturage extensif ou en pâturage boisé conformément à l'ordonnance sur les paiements directs (OPD) pour les surfaces de promotion de la biodiversité. Ces exigences s'appliquent également à l'exploitation de surfaces situées en dehors de la surface agricole utile.

Dans la procédure proposée, l'espace extensif est apte à remplir la fonction d'effet tampon, mais ne contribue pas à la connectivité longitudinale terrestre (à l'exception des berges boisées) car il n'est pas suffisamment boisé.

Les digues sont à classer dans l'espace extensif ; elles remplissent alors la fonction de zone-tampon sur la largeur de leur implantation.

7.6 Zone construite

L'espace réservé au cours d'eau peut inclure des zones construites, qui peuvent être des chemins, des places de parc ou éventuellement des digues. Pour la présente méthodologie, toute surface non végétalisée et imperméable peut être assimilée à une zone construite. Sous certaines conditions, la présence de chemins est autorisée dans l'espace réservé aux eaux, mais ces surfaces ne remplissent pas de fonction naturelle.

7.7 Profil moyen

Pour procéder à l'évaluation des fonctions naturelles d'un tronçon donné, il est nécessaire d'établir son profil moyen (représentatif), sur lequel doit figurer l'espace de mobilité ainsi que les différents compartiments définis ci-dessus, compris dans l'espace réservé au cours d'eau.

Il convient de séparer le projet en divers tronçons homogènes en cas de situations très diversifiées (cf. chap. 8.3). L'espace de mobilité n'est pas nécessairement au centre de l'espace réservé au cours d'eau. Si l'on dispose d'une cartographie en format SIG, il est facile de calculer la largeur moyenne de chaque type de milieu et d'utilisation du sol, en divisant leur surface par la longueur du tronçon. Sur le profil moyen, si

l'espace de mobilité est supérieur à la largeur naturelle du lit à pleins bords, on représente le cours d'eau au centre de l'espace de mobilité (Figure 16).

Carte de l'espace réservé aux eaux

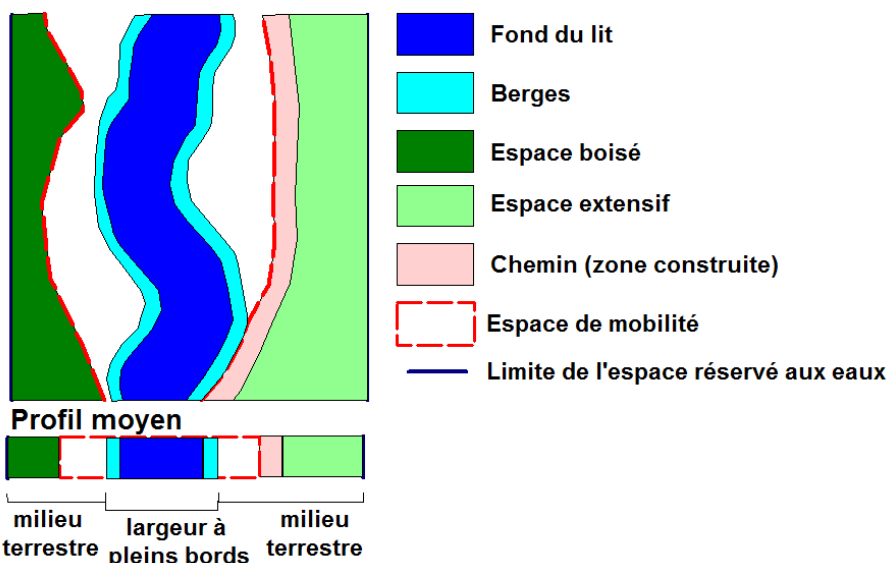


Figure 16. Illustration d'un exemple fictif de profil moyen construit d'après la carte d'un état actuel de l'espace réservé aux eaux, en regardant dans la direction de l'écoulement.

Par convention, on représente le profil moyen avec la rive gauche à gauche et la rive droite à droite. Dans cet exemple, l'espace de mobilité a une largeur variable mais supérieure à la largeur naturelle du fond du lit. En rive droite, on supposera que le chemin de rive qui longe la bande extensive est protégé de l'érosion par des stabilisations pouvant être partiellement enterrées. En rive gauche, on imagine que la bande boisée est protégée de l'érosion par une stabilisation qui limite la migration latérale du lit. Le contenu de l'espace de mobilité pour la partie terrestre (en bleu et blanc) est apte à remplir toutes les fonctions naturelles du milieu terrestre. En dehors de l'espace de mobilité se trouve, en rive droite, une prairie extensive qui assume une fonction de tampon ; en rive droite figure aussi un chemin qui ne remplit aucune fonction naturelle, mais qui est toléré dans l'espace réservé aux eaux. Une bande boisée en rive gauche remplit à la fois la fonction de tampon et de connectivité longitudinale terrestre.

8 Procédure

La procédure standard se compose de 3 étapes :

- **Fonctiogramme** : ce graphique est généré individuellement pour chaque tronçon homogène du cours d'eau ; il présente les fonctions remplies pour chaque largeur de l'espace et indique une note synthétique (% de satisfaction des fonctions naturelles),
- **Profil moyen** : un profil technique représentatif du tronçon, transformé en profil moyen pour être traité par la méthode, reçoit une note reflétant la valeur de la situation,
- **Grand projet** : pour les aménagements de plusieurs kilomètres de cours d'eau, une note synthétique reflétant la valeur moyenne du projet est générée.

8.1 Fonctiogramme

La définition du style du cours d'eau (y.c. l'amplitude naturelle des méandres (A_{nat}) s'il s'agit d'un cours en méandres), de la largeur du fond du lit (L_{fl}) et de la largeur à pleins bords (L_{pb}) permet d'illustrer les degrés de satisfaction des fonctions écologiques en fonction de l'espace de mobilité. On appelle ce graphique un fonctiogramme.

8.1.1 Cas général : fond de vallée large

Un fonctiogramme définit le degré de satisfaction de la totalité des fonctions naturelles de l'espace réservé aux eaux en fonction de l'espace de mobilité qui est attribué au cours d'eau. Tant que l'espace de mobilité est inférieur à la largeur naturelle du fond du lit, seules les fonctions du milieu aquatiques sont partiellement satisfaites. Pour une largeur d'espace de mobilité qui se situe entre la largeur du fond du lit et la largeur pleins bords, les fonctions du milieu amphibien sont graduellement satisfaites. Dès que la largeur de l'espace de mobilité dépasse la largeur à pleins bords, les autres fonctions (milieu terrestre) peuvent être satisfaites progressivement en donnant de l'espace terrestre supplémentaire, sur la base des courbes de satisfaction décrites au chapitre 6.2).

La Figure 17 donne un fonctiogramme pour le cours d'eau suivant :

- Style fluvial : méandres développés
- Débit morphogène Q : 400 m³/s
- Rugosité K : 25 m^{1/3}/s
- Pente de la ligne d'énergie i : 0.01 m/m
- Rapport largeur/profondeur r : 5 m/m

Utilisées sont les valeurs suivantes :

- Largeur pleins bords L_{pb} : 20.4 m
- Largeur du fond du lit L_{fl} : 17.7 m
- On suppose l'amplitude naturelle des méandres égale à $8 \times L_{pb}$, soit approximativement 160 m

De plus, l'objet n'est pas dans une zone alluviale.

On constate que pour satisfaire le 80% des fonctions écologiques du cours d'eau, il faut lui attribuer un espace de mobilité (non stabilisé et sans entretien ou autre type d'intervention humaine) de 60 m (Figure 17).

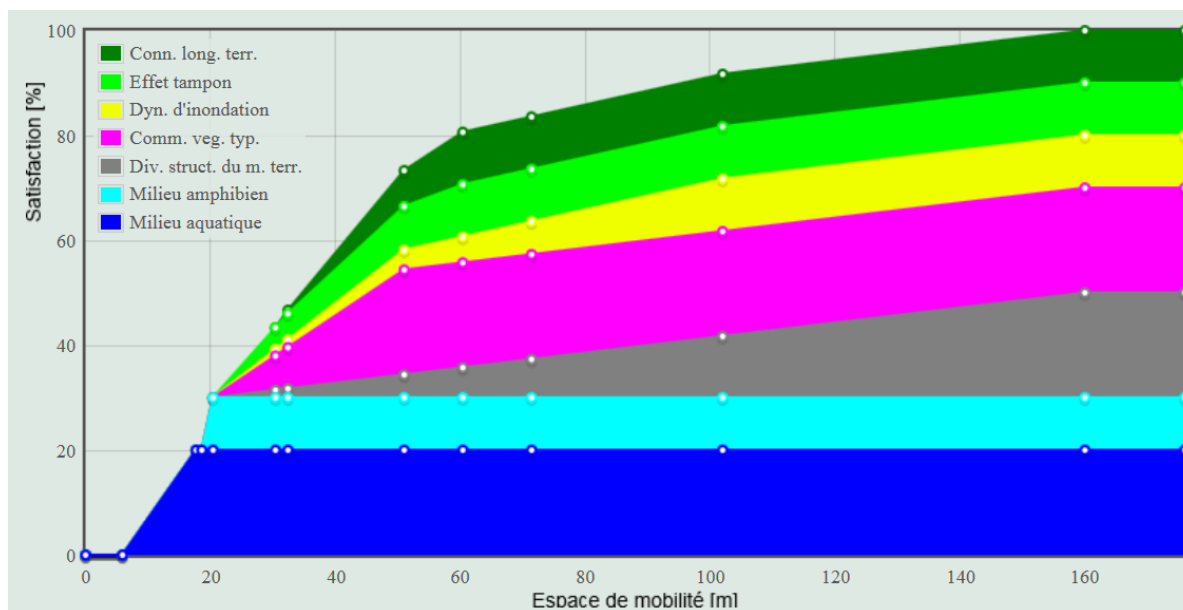


Figure 17. Exemple de fonctiogramme pour un cours d'eau en méandres développés (toutes les valeurs s'appliquent à 2 berges).

Le fonctiogramme permet de définir un pourcentage de satisfaction des fonctions écologiques en fonction de la largeur de l'espace de mobilité. Cet instrument présente une première approche sur laquelle se base le développement d'un projet de revitalisation.

Souvent, des contraintes (p.ex. stabilisations de berge) s'imposent afin de protéger des enjeux majeurs. Ainsi, l'espace de mobilité en serait réduit. Pour cette raison, les approches présentées au chapitre 8.2 ont été développées.

8.1.2 Fond de vallée étroit

De nombreux cours d'eau en Suisse se développent dans des fonds de vallée relativement étroits, dont la largeur est inférieure à l'amplitude naturelle des méandres dans des terrains plats, mais n'appartiennent pas à la catégorie des cours d'eau encaissés à proprement parler. Pour des cours d'eau comme le Rhin zurichois et le Doubs au Clos du Doubs JU, des terrasses alluviales de largeurs limitées se présentent. Lorsque

le fond plat de la vallée, composé souvent d'anciennes terrasses alluviales, atteint une largeur supérieure ou égale à 2x la largeur à pleins bords, il est pertinent de prendre en compte cette situation lors de l'estimation de l'espace nécessaire au cours d'eau.

Les fonctions du milieu aquatique et du milieu amphibien sont remplies dans la largeur à pleins bords et dans l'espace des berges respectivement et ne sont pas influencées par la largeur limitée du fond de la vallée. Parmi les fonctions du milieu terrestre, seules les fonctions d'effet tampon et de connectivité longitudinale terrestre peuvent être satisfaites par les flancs de la vallée.

Pour les autres fonctions terrestres (diversité structurelle du milieu terrestre, dynamique d'inondation et développement des communautés végétales typiques), il convient de déterminer la largeur du fond de la vallée et de calculer la note de satisfaction en fonction de cette largeur. On définit la satisfaction maximale pour ces fonctions compte tenu de la largeur disponible de la vallée. Ainsi, en raison des contraintes topographiques, il est proposé que **le pourcentage de satisfaction obtenu pour une largeur correspondant à la largeur du fond de la vallée soit le maximum (100%) qu'on peut obtenir pour les trois fonctions influencées par cette limitation. Non impliquées sont les fonctions « connectivité longitudinale terrestre » et « effet tampon » qui peuvent être remplies en terrain escarpé au-delà du fond de la vallée.**

Par **exemple**, un fond de la vallée de 50 m de largeur est limité topographiquement par 2 forêts de pente. Un cours en méandres migrants se développe dans la zone plate et présente les caractères suivants : $L_{pb} = 20$ m, $L_{fl} = 15$ m. L'amplitude des méandres A_{nat} a été estimée égale à 80 m dans des espaces non contraints à proximité (hors fond de vallée). Une telle amplitude de méandres ne peut pas être atteinte à cause de l'étroitesse du fond de la vallée. La forêt de pente borde le fond de la vallée et assure ainsi une bande boisée dépassant 20 m de largeur sur chaque flanc de la vallée. Les fonctions du milieu aquatiques et du milieu amphibien sont donc satisfaites par L_{fl} et L_{pb} respectivement. Les fonctions d'effet tampon et de connectivité longitudinale terrestre peuvent aussi être entièrement satisfaites, grâce à la présence de forêts de pente. La satisfaction maximale des fonctions des communautés végétales terrestres, diversité structurelle des milieux et dynamique d'inondation ne peut physiquement pas être obtenue pour une largeur dépassant la largeur du fond de la vallée (50 m pour l'exemple). Elles sont donc considérées entièrement satisfaites lorsque la largeur de 50 m (largeur du fond de la vallée) est mise à disposition du cours d'eau, et non pour une largeur de 80 m comme en milieu ouvert (hors vallée).

Dans la même situation, si seule une bande terrestre de 20 m satisfait aux critères de l'espace de mobilité et qu'un des 2 flancs de la vallée est urbanisé, la note globale sera de 65 sur 100 car la moitié de la contribution des fonctions tampon (½ de 10%), connectivité (½ de 10%) et des 2 fonctions terrestres (½ de 50%) ne sont pas remplies.

8.2 Profil moyen

Les étapes à suivre seront légèrement différentes selon le type de procédure choisie. Les deux possibilités sont :

- Évaluer l'espace réservé aux eaux d'une situation connue, qui peut être un état existant ou également un projet
- Définir l'espace à réserver aux eaux en fonction des objectifs écologiques qui peuvent s'exprimer par le pourcentage des fonctions naturelles satisfaites

8.2.1 Évaluation de l'état actuel ou de l'état projeté

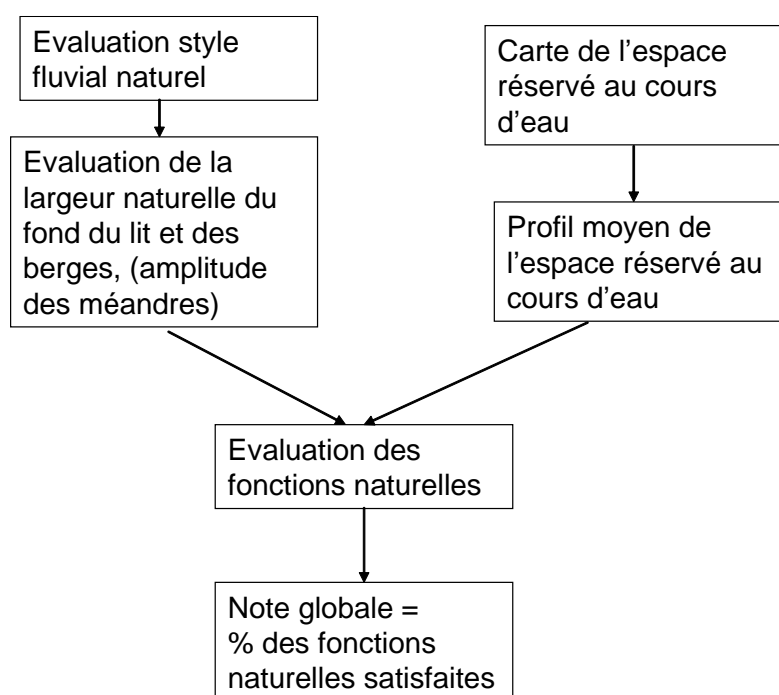


Figure 18. Procédure dans le cas de l'évaluation d'une situation connue.

L'évaluation d'une situation connue, qui peut être l'état actuel du cours d'eau ou l'état futur selon une planification, se fait en plusieurs étapes (Figure 18). D'abord il faut définir les besoins du cours d'eau en partant de la situation actuelle. On doit, en particulier, connaître son style fluvial, la largeur naturelle du fond du lit, la largeur naturelle des berges

et l'amplitude naturelle des méandres (pour les cours d'eau en méandres). En parallèle, il faut identifier l'espace effectif à disposition du cours d'eau. On devra, dans un premier temps, fixer les limites de l'espace réservé aux eaux, puis à l'intérieur de cet espace, identifier les différents types de milieu et d'utilisation du sol tels qu'ils sont présentés dans le chapitre 6.2 et la Figure 15. Ensuite, à partir de la carte de l'espace réservé au cours d'eau, on pourra construire le profil moyen (cf. Figure 16), représentant les largeurs respectives des différents types d'utilisation du sol. Enfin, on procédera à l'évaluation globale du profil moyen en appliquant les courbes de satisfaction définies au chapitre 6.2. Ces courbes donnent une note entre 0 et 100 et indiquent dans quelle mesure l'espace à disposition du cours d'eau lui permet de remplir ses fonctions naturelles.

Cette procédure est implémentée dans l'*outil internet* disponible sous : <http://www.zones-alluviales.ch/OutilGCE/evaluation-fr.html>

La Figure 19 donne un exemple d'application de la procédure à un profil technique d'un état futur d'un tronçon situé hors d'une zone alluviale.

Les digues ne peuvent remplir que des fonctions de connectivité et de tampon. On constate dans cet exemple qu'elles ne contribuent pas à la connectivité car elles ne sont pas boisées, mais que leur contribution à la fonction tampon est importante.

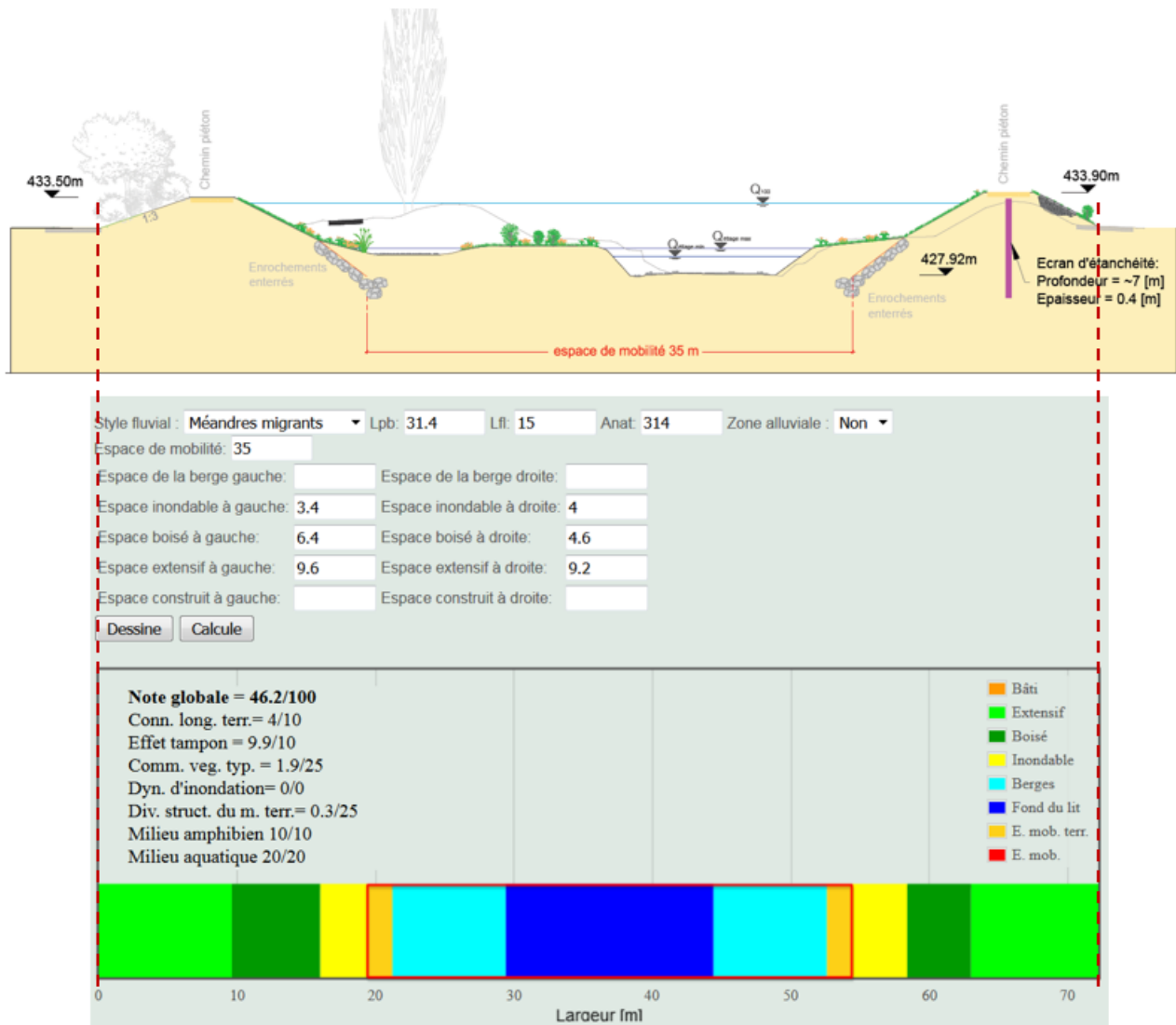


Figure 19. Application de la méthode à un cours d'eau en méandres développés (en haut, profil technique évalué ; en bas : profil moyen ; à gauche en bas : évaluation des fonctions écologiques du tronçon et indication de la note globale).

8.2.2 Définition de l'espace réservé à partir des objectifs écologiques

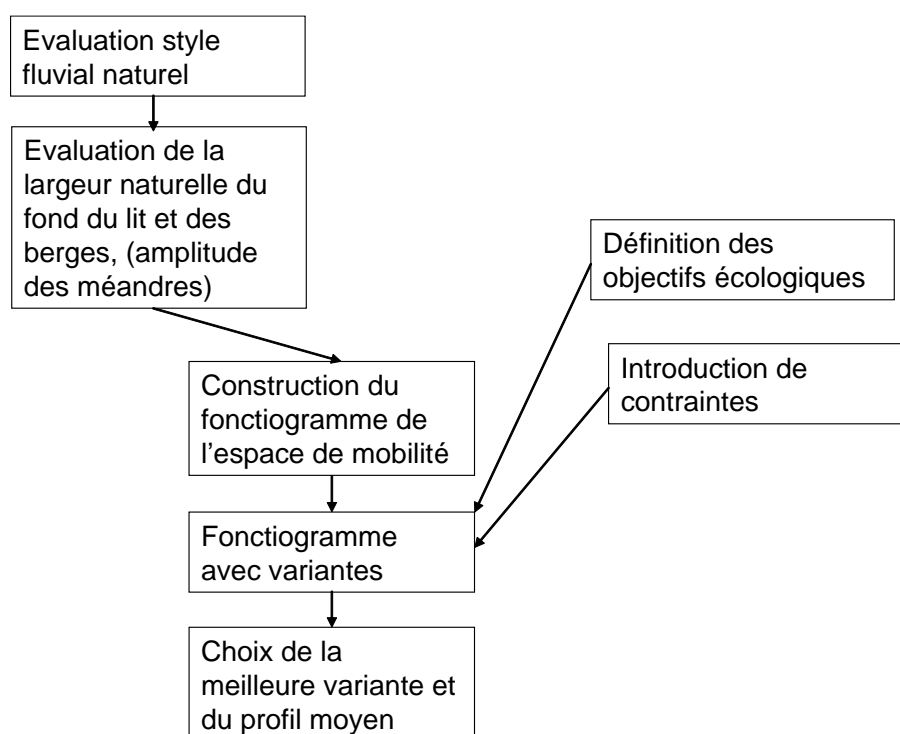


Figure 20. Procédure dans le cas d'objectifs écologiques à atteindre.

Quand des objectifs écologiques sont fixés préalablement, le but consiste à trouver la largeur de l'espace réservé aux eaux y compris l'espace de mobilité qui réponde à ces objectifs (Figure 20). Dans le cas des zones alluviales, les objectifs écologiques doivent prévoir la formation de forêts à bois durs et entièrement satisfaire les fonctions de communautés végétales typiques et des structures du milieu terrestre pour un espace de mobilité atteignant 3.5x la largeur à pleins bords (systèmes en tresses) ou l'amplitude naturelle des méandres (systèmes en méandres).

Afin de fixer les objectifs écologiques, il est recommandé de construire un **fonctiogramme**, c'est à-dire un graphique qui montre le pourcentage de fonctions naturelles satisfaites en fonction de l'espace de mobilité à disposition (cf. Figure 17). Pour commencer, il faut représenter le fonctiogramme de l'espace de mobilité. C'est-à-dire que l'on suppose que tout l'espace réservé aux eaux est un espace non stabilisé, donc toutes les fonctions naturelles sont remplies dans cet espace. C'est le cas idéal pour les intérêts écologiques, mais peut-être aussi le cas le plus difficile à mettre en pratique car il est souvent nécessaire d'adapter l'espace de mobilité aux conditions d'utilisation actuelles de l'espace. Ainsi, à partir du fonctiogramme de l'espace de mobilité, il est possible d'introduire des contraintes et de générer des variantes, par exemple en limitant l'espace de mobilité à une certaine

valeur et en ajoutant des bandes boisées ou des prairies extensives. Le résultat de cette analyse aboutit à un profil moyen avec les largeurs des différents types d'utilisation du sol.

Un exemple concret de cette procédure figure sous chapitre 10.1 et concerne la Birse (JU et BL).

8.3 Grand projet

Un grand projet se compose d'une suite de profils types caractérisant des tronçons de diverses longueurs. Une note par profil est calculée et ensuite pondérée par la longueur du tronçon, afin d'obtenir la note moyenne du projet. Dans la Figure 21, le grand projet se compose de 5 profils types de différentes longueurs et la note moyenne pondérée (note synthétique reflétant la valeur moyenne du projet) est de 66.9%.

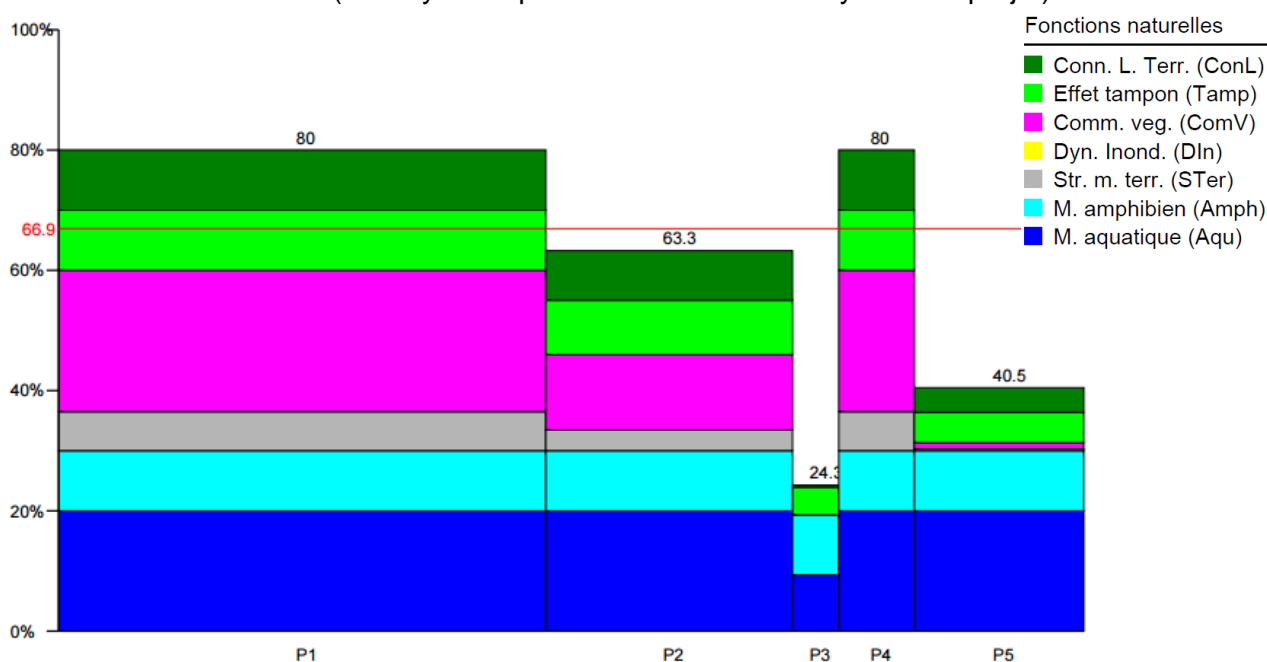


Figure 21. Application de l'outil à un grand projet.

L'étape « Grand projet » est implémentée dans l'outil internet disponible sous :

<http://www.zones-alluviales.ch/OutilGCE/evaluation-fr.html>

9 Analyse de sensibilité de trois paramètres

La sensibilité de 3 paramètres a été testée afin de voir l'effet d'une variation des valeurs de ces paramètres sur la note globale :

- Débit morphogène (différence entre HQ₂ et HQ₅)
- Pente du lit (x, 2x, x/2)
- Style fluvial (méandres migrants ou tresses)

9.1 Débit morphogène

Il est couramment admis que le débit morphogène d'un cours d'eau correspond à un débit dont le temps de retour est compris entre 2 et 5 ans. En Suisse, grâce aux stations fédérales de mesure, on a souvent la connaissance de ces deux valeurs de débit (HQ₂ et HQ₅). Dans un premier temps on compare ces valeurs de débits entre elles (Tableau 9), pour les 6 cas d'étude présentés au chapitre 10. Ensuite, pour le cas qui sera le plus proche de la moyenne, on calculera l'effet sur la note globale.

Cours d'eau	Tronçon	Station de référence	HQ ₂ [m ³ /s]	HQ ₅ [m ³ /s]	Différence [%]
La Birse	Soyhières - Riederwald	Birse - Soyhieres, Bois Du Treuil (2478)	103	151	31.8%
L'Aar	Büren - Soleure	Aare - Brügg, Aegerten (2029)	505	587	14.0%
L'Aar	Thun - Bern	Aare - Thun (2030)	304	348	12.6%
La Kleine Emme	Malters - Reuss	Kleine Emme - Littau, Reussbühl (2425)	317	423	25.1%
La Sarine	Les Ponts - Broc	Sarine - Broc, Château D'en Bas (2160) - 10%	194	248	21.8%
La Maggia	Giumaglio - Someo	Maggia - Bignasco, Ponte Nuovo (2475) + 20%	342	510	32.9%
Moyenne					23.0%

Tableau 9. Débits HQ₂ et HQ₅ des cours d'eau étudiés dans les études de cas.

La moyenne des écarts entre HQ₂ et HQ₅ est de 23%. Avec 21.8%, c'est le cas de la Sarine qui s'approche le plus de la moyenne et qui sera testé par une analyse de sensibilité.

L'évaluation de la Sarine dans son état actuel conduit à une note globale de 38.9% (cf. chap. 10.6), en utilisant un débit morphogène de 248 m³/s (HQ₅). En gardant, tous les paramètres identiques sauf le débit morphogène, pour lequel on prend une valeur de 194 m³/s (HQ₂), on obtient une note globale de 42.7%.

Une augmentation de la note est logique. En effet, une diminution du débit morphogène entraîne une diminution de la largeur naturelle du fond du lit et de la largeur à pleins bords. Comme les exigences d'espace diminuent et que le profil effectif ne change pas, il est normal

que la note soit meilleure avec un débit morphogène de HQ_2 plutôt que de HQ_5 .

Le changement de note, de l'ordre de 9.7%, est significatif. **Le débit morphogène est donc un paramètre sensible**, surtout lorsqu'on se situe dans des plages de valeurs qui influencent la fonction de diversité structurelle du fond du lit et que cette fonction représente 20% de la note globale.

9.2 Pente du lit

La pente des cours d'eau est en général facile à mesurer de façon précise. Mais, dans certains cas et spécialement pour des méandres développés, la pente du lit peut varier fortement sur de petites distances à cause des sinuosités du lit et parce que la direction du cours d'eau n'est pas partout orientée dans le sens du talweg (ligne de collecte des eaux); ainsi on peut parfois observer un angle de plus de 90° entre les deux.

Pour tester la sensibilité de la pente du lit, le cas de l'Aar entre Büren et Soleure est utilisé, car c'est le seul parmi les six exemples du chapitre 10 dont le style fluvial est en méandres développés. Dans l'étude de cas (chap. 10.2), la pente du fond du lit dans l'état naturel est estimée à 0.1‰. La note globale est réévaluée en prenant une pente deux fois plus forte et deux fois plus faible (Tableau 10).

		pente normale	pente double	pente demi
Note globale (%)	L_{pb} (m)	108	95	123
	L_{fl} (m)	70	61	79
	Profil hydraulique minimum	24.8	28.1	20.6
	Profil normal actuel	31.8	34.2	31.4

Tableau 10. Influence de la pente du lit.

Si on diminue la pente naturelle de référence, cela a pour conséquence d'augmenter la largeur naturelle du fond du lit et à pleins bords. Le besoin d'espace est donc plus élevé pour une pente plus faible. Ce **paramètre est assez sensible**, surtout lorsque l'espace de mobilité est inférieur à la largeur naturelle du fond du lit.

9.3 Style fluvial

Certains cours d'eau ont un style fluvial naturel qui ne correspond pas exactement aux cinq styles décrits dans le chapitre 5.1, mais un style intermédiaire entre deux styles fluviaux de référence. Dans ce cas, la procédure recommande d'affecter le cours d'eau au style le plus proche. Le cours d'eau peut également alterner entre un style et l'autre,

en fonctions des conditions locales. Le choix du style fluvial naturel peut avoir des conséquences sur le résultat. L'exemple de la Sarine paraît approprié, car son cours naturel en amont de Broc est un mélange de cours en tresses et de méandres migrants. Il a été rattaché à un cours en tresses (voir chapitre 10.6). Dans le cas d'un cours en méandres migrants, les résultats diffèrent quelque peu.

La pondération des différentes fonctions de l'espace nécessaire est la même pour les deux styles (cours en tresses et méandres migrants). Ce qui change, par rapport à un cours en tresses, c'est que la diversité des structures du milieu terrestre s'évalue d'après l'amplitude des méandres en conditions naturelles et non d'après la largeur naturelle à pleins bords. Dans le cas de la Sarine, l'amplitude des méandres en conditions naturelles est estimée, d'après la carte Dufour, à 200 m. Alors qu'en choisissant un cours en tresses, le 100% des structures du milieu terrestre est atteint pour un espace de 117.5 m ($2.5 \times L_{pb} = 2.5 \times 47$ m). Dans ce cas, la note de la diversité structurelle du milieu terrestre est plus basse pour un cours en méandres migrants. Mais, comme cette note est déjà de 0 avec l'étude de cas, elle restera à 0 en choisissant des méandres migrants comme style fluvial naturel de référence. La différence maximale entre ces deux styles est obtenue pour une largeur de l'espace de mobilité de $2.5L_{pb}$. Pour cette largeur un cours en tresses obtient une note de 100% dans la totalité des fonctions, alors qu'un cours en méandres migrants n'atteint généralement pas le 100% de la diversité des structures du milieu terrestre. En effet, l'amplitude des méandres correspond souvent à approximativement $8L_{pb}$ et obtiendrait donc une note de 21.5% pour la diversité des structures du milieu terrestre. En considérant le système de pondération (25% de la note est liée à la diversité des structures du milieu terrestre), la différence maximale entre les deux styles est de 5% de la note globale. La note globale est donc **peu sensible à ce paramètre** pour certains styles.

Par contre, le choix d'un cours enfoncé au lieu d'un cours en méandres ou en tresses peut avoir un grand impact sur l'espace nécessaire au cours d'eau. Dans le premier cas, le 100% de la note est en effet obtenu à une largeur de mobilité correspondant à $L_{pb}+40$ m, ce qui est souvent inférieur à $2.5L_{pb}$ et pratiquement toujours inférieur à A_{nat} .

9.4 Conclusion

L'étude de sensibilité réalisée sur 3 paramètres choisis montre une sensibilité relativement élevée du système d'évaluation. Cela s'explique par le nombre réduit d'indicateurs pris en considération et par les pondérations des indicateurs. Malgré sa sensibilité, le système d'évaluation conserve sa valeur pour la comparaison de variantes, de tronçons ou de projets dans différents cours d'eau.

10 Application à six cas d'étude

10.1 La Birse entre Soyhières et Liesberg

Le tronçon d'étude de la Birse concerne un segment de 2.3 km situé sur les communes de Soyhières (JU) et Liesberg (BL). La largeur corrigée actuelle de la Birse est de 15 m. On utilise la procédure pour établir le profil moyen de l'espace cours d'eau afin d'atteindre l'objectif de remplir p. ex. 60% des fonctions naturelles.

10.1.1 Style fluvial

Les conditions hydrologiques du bassin versant n'ont pas changé significativement depuis l'état historique de référence correspondant à la carte Dufour (Figure 18 et Figure 19). On peut donc voir que le style naturel de la Birse à Soyhières correspond aux méandres migrants (faiblement sinueux).

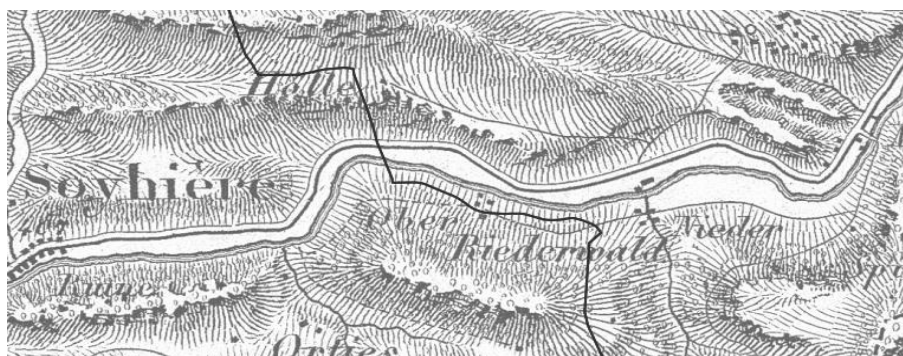


Figure 22. Carte Dufour de la Birse 1850.

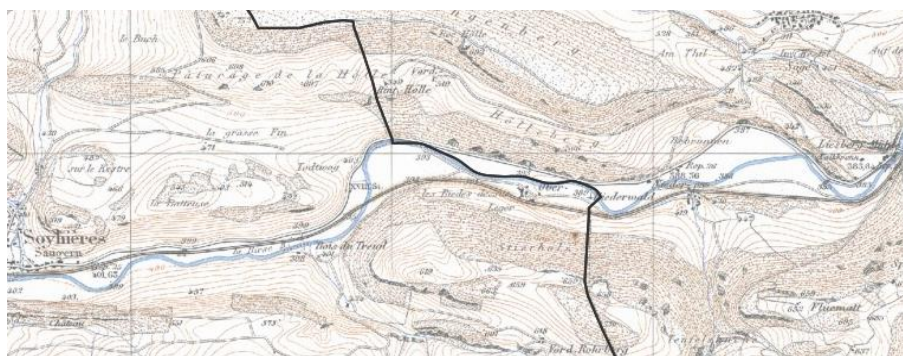


Figure 23. Carte Siegfried de la Birse 1875.

Après une analyse qualitative des cartes historiques, on remarque suffisamment de différence entre le tracé cartographié vers 1850 et celui de 1875 pour déclarer que le lit est mobile.

On retiendra 13 m comme largeur du fond du lit (L_{fl}), 32 m comme largeur à pleins bords (L_{pb}), 3.2 m de profondeur (h_{2-5}) et 150 m pour l'amplitude naturelle des méandres (A_{nat}).

10.1.2 Objectif écologique

Ce tronçon ne se trouve pas dans une zone alluviale, ainsi, les exigences des forêts à bois durs ne doivent pas être satisfaites. Pour l'exemple, l'objectif serait de remplir 60% des fonctions naturelles.

10.1.3 Fonctiogramme de l'espace de mobilité

On évalue les fonctions naturelles pour différentes valeurs d'espace. Dans un premier temps, on suppose que tout l'espace à disposition est un espace de mobilité du cours d'eau. Dans des phases ultérieures d'optimisation, on pourra étudier dans quelle mesure il est possible de restreindre l'espace de mobilité au profit d'autres types d'espace.

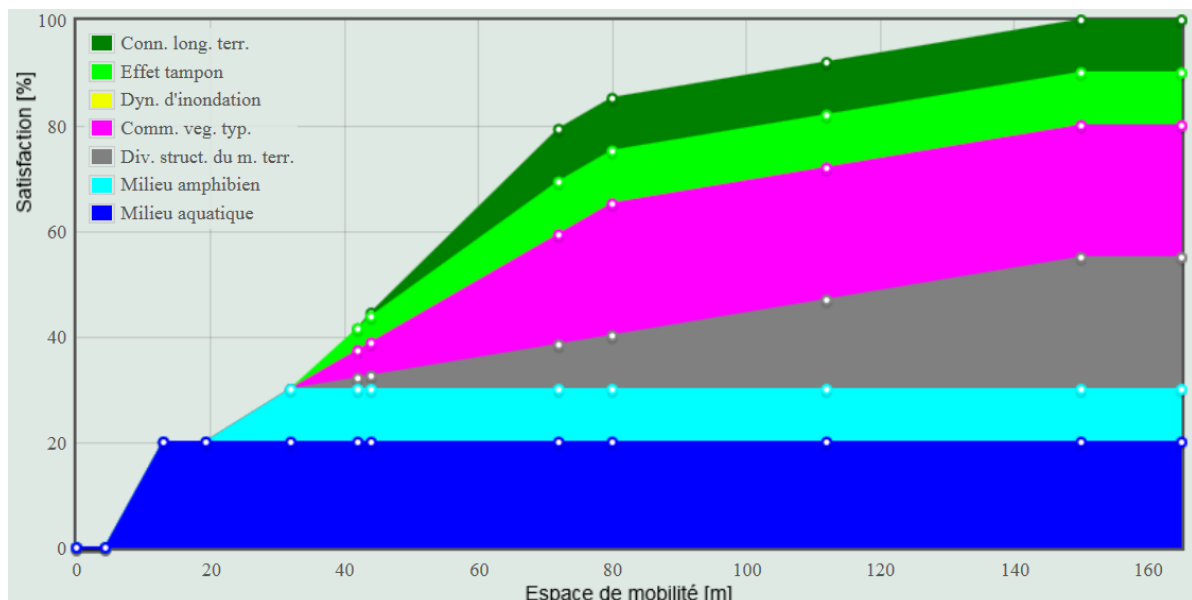


Figure 24. Le fonctiogramme de la Birse à Soyhières montre la relation entre l'espace à disposition du cours d'eau (ici égal à un espace de mobilité) et le pourcentage de fonctions naturelles remplies.

On observe qu'il faut un espace de mobilité de 56 m de largeur pour satisfaire 60% des fonctions naturelles (Figure 24).

Ensuite, il est possible d'évaluer des variantes en faisant varier le contenu de l'espace à réserver aux eaux. En supposant qu'une contrainte limite l'espace de mobilité à 45 m, il est encore possible de remplir certaines fonctions naturelles grâce à des bandes boisées

comprises dans l'espace réservé aux eaux, mais en dehors de l'espace de mobilité (Figure 25).

En choisissant de limiter l'espace de mobilité à 45 m de largeur, le fonctiogramme montre qu'on remplit 45.7% des fonctions naturelles. Mais si on rajoute des bandes boisées, on peut voir qu'avec 45 m d'espace de mobilité + 28 m de bandes boisées = 73 m au total, on arrive à remplir également 60% des fonctions naturelles.

On peut encore imaginer ajouter une contrainte supplémentaire : avoir un maximum de prairies extensives, à la place des bandes boisées, tout en continuant à atteindre au moins 55% des fonctions naturelles (Figure 26). Dans ce cas, les calculs montrent qu'avec un espace de mobilité de 45 m + 14 m de bandes boisées + 14 m de bande extensive, on arrive à satisfaire 55% des fonctions naturelles.

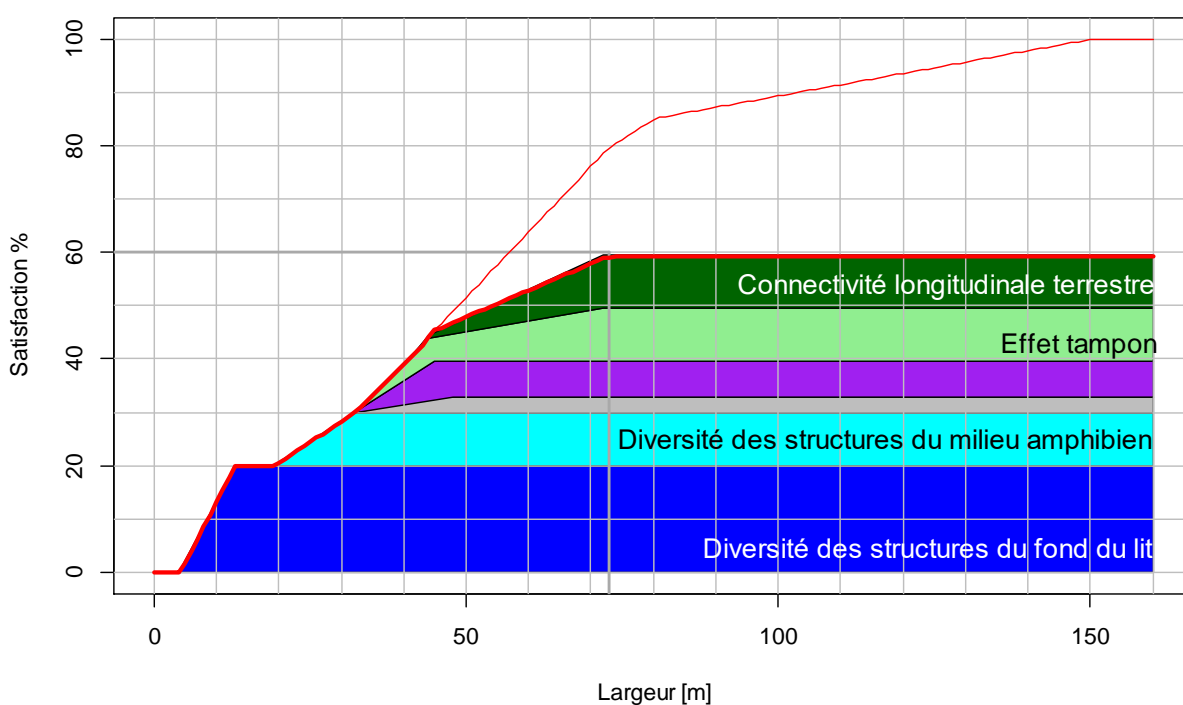


Figure 25. Fonctiogramme avec largeur partiellement stabilisée de la variante : « espace de mobilité et bandes boisées dès 45 m ».

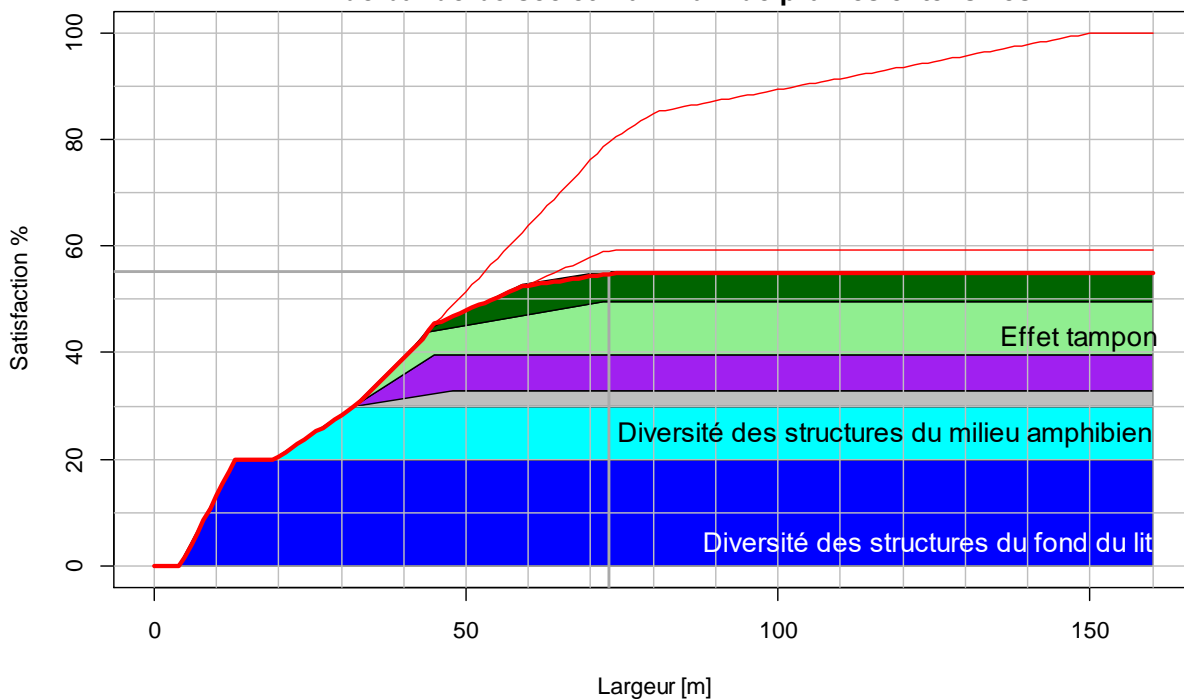


Figure 26. Fonctiogramme avec largeur partiellement stabilisée de la variante : « espace de mobilité, bande boisée dès 59 m et bande extensive dès 73 m ». Espace de mobilité limité à 45 m, 14 m de bande boisée et maximum de prairies extensives.

10.1.4 Évaluation

En résumé, l'étude des fonctiogrammes montre que les trois profils moyens suivants permettent d'atteindre l'objectif approchant 60% des fonctions naturelles remplies (Figure 27, Tableau 11). Le choix de la meilleure variante dépendra, selon les tronçons, d'autres enjeux liés à l'aménagement du territoire et à l'utilisation du sol.

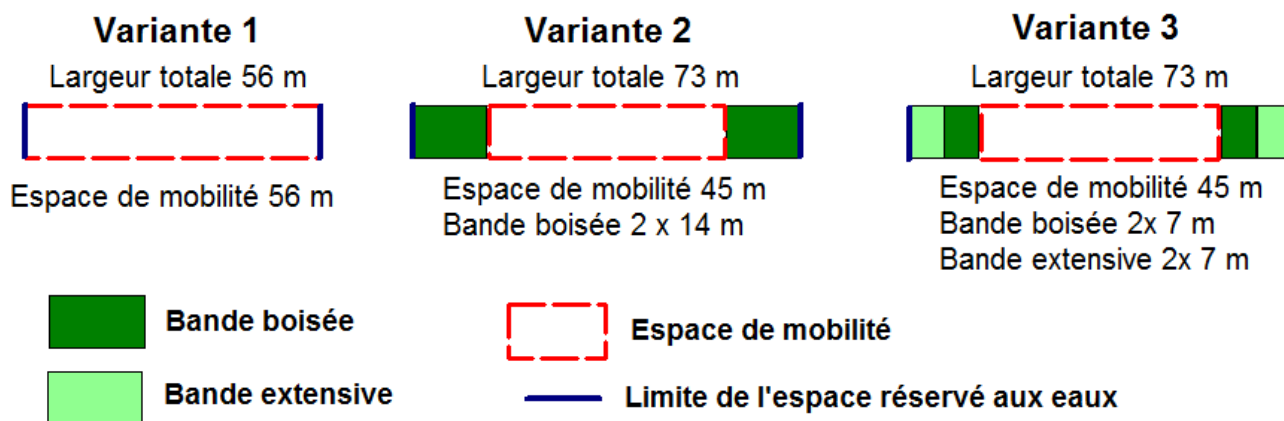


Figure 27. Profils moyens de la Birse à Soyières pour atteindre approximativement 60% de satisfaction des fonctions naturelles.

Fonctions	Note Var. 1	Note Var. 2	Note Var. 3	poids
Milieu aquatique	100	100	100	0.2
Milieu amphibien	100	100	100	0.1
Connectivité long. terrestre	47	100	57	0.1
Effet tampon	71	100	100	0.1
Structures du milieu terrestre	20.4	11.2	11.2	0.25
Communautés typiques du m. terr.	50	27.2	27.2	0.25
Note globale	59.4	59.5	55.3	

Tableau 11. Notes des fonctions naturelles des trois variantes de la Birse pour obtenir une note globale proche de 60%.

10.2 L'Aar entre Büren et Soleure

Le tronçon d'étude a une longueur d'environ 17 km entre Büren et Soleure. L'Aar est stabilisé par des enrochements sur les berges, sa largeur corrigée varie entre 80 et 180 m, et sa profondeur est également variable et atteint jusqu'à 18 m près de Altreu.

10.2.1 Style fluvial naturel

Dans ce secteur, l'Aar présente un cours avec des méandres développés. Le terrain contient des traces d'anciens méandres court-circuités par tangence, et des documents historiques attestent de fréquentes inondations et d'un cours bordé de zones humides et de marécages (Nast 2006).

Cependant, il faut rappeler que, suite à des modifications importantes de son bassin versant, l'état naturel de l'Aar, auquel on se réfère pour définir ses fonctions naturelles et son besoin d'espace, n'est pas celui qui prévalait au début du XIX^e siècle. Lors de la première correction des eaux du Jura, l'Aar est détourné dans le Lac de Bienne, ce qui modifie sensiblement le régime de charriage et la fréquence des inondations. En effet, la plupart des sédiments transportés par l'Aar se déposent dans le Lac de Bienne, ce qui réduit le volume du transport solide. Les crues sont également laminées par l'effet de rétention des trois lacs subjurassiens, ce qui diminue la fréquence des inondations (un but de la correction). Ces changements sont irréversibles, c'est pourquoi le style fluvial, la largeur naturelle du fond du lit et les fonctions naturelles (Figure 28) doivent être évaluées sur la base des conditions actuelles de débit et de charriage. L'état historique avant les premières corrections des eaux du Jura ne peut donc pas être utilisé comme état de référence sans adaptation.

Le style fluvial reste un cours en méandres développés, car une diminution du charriage favorise ce style de cours d'eau.

Nous comptons 70 m de largeur du fond du lit (L_{fi}), 108 m de largeur à pleins bords (L_{pb}), 6.4 m de profondeur (h_{2-5}) et 756 m pour l'amplitude naturelle des méandres (A_{nat}).

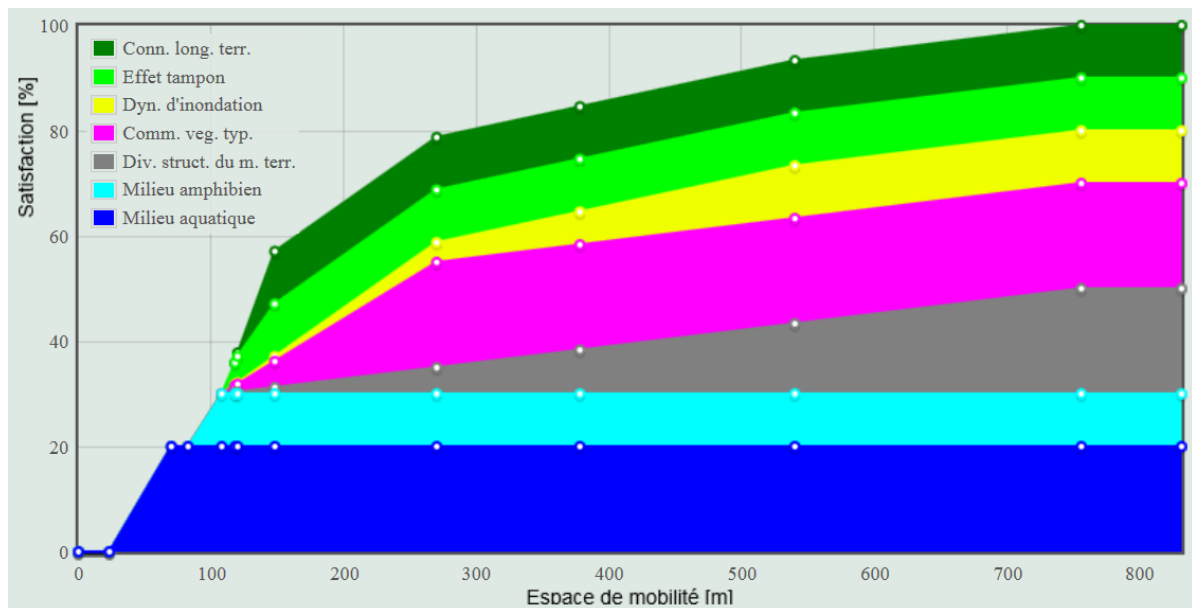
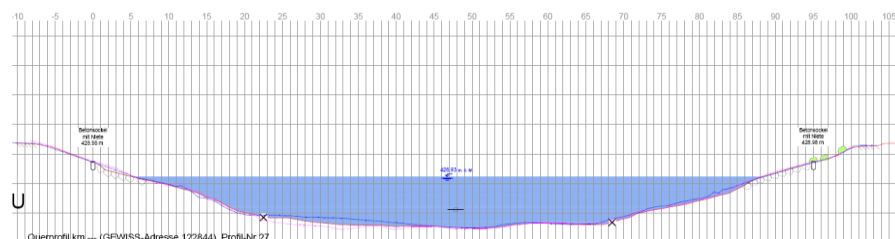


Figure 28. Fonctiogramme de l'Aar entre Büren et Soleure (hors zone alluviale).

10.2.2 Profils moyens

On évaluera la situation de l'Aar sur deux profils différents. Le premier correspond au profil hydraulique minimum (n°122844), c'est-à-dire juste suffisant à garantir la protection contre les crues (Figure 29). Ce profil se trouve sur le canal Nidau-Büren près de Brügg, là, où l'influence hydraulique de la retenue de Flumenthal est encore faible. Le deuxième est un profil jugé représentatif du tronçon d'étude. Il s'agit du profil n°109882 (Figure 30 et Figure 31).

Profil hydraulique minimum (n° 122844) : non représentatif



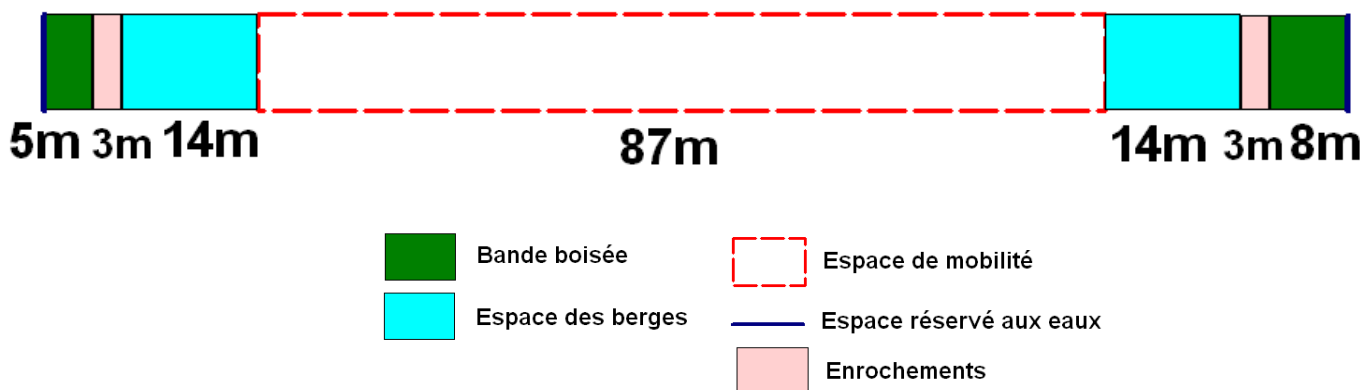


Figure 31. Schéma du profil moyen représentatif de l'état actuel de l'Aar entre Büren et Soleure.

10.2.4 Évaluation

Structure des milieux aquatiques

Avec un espace de mobilité de 46 m, pour une largeur naturelle du fond du lit estimée à 70 m, le profil hydraulique minimum obtient la note de 49%. Le profil normal actuel obtient une note de 100%, car son espace de mobilité est supérieur à la largeur naturelle du fond du lit.

Structure des berges

La largeur naturelle des berges est estimée à 38.4 m. Le profil hydraulique minimum, avec son espace des berges de 37 m obtient la note de 95%. Le profil normal actuel, avec un espace des berges de 28 m, obtient une note 59%.

Zone tampon

Les deux profils ont une zone tampon de 13 m au total. Mais la courbe de satisfaction « préfère » une bande de 7 m et une bande de 6 m (profil hydraulique minimum), plutôt qu'une bande de 8 m et une bande de 5 m (profil normal actuel). Ainsi, le profil hydraulique minimum obtient une note de 52% contre 49% pour le profil moyen actuel.

Connectivité terrestre

Le profil hydraulique minimum avec seulement une bande boisée de 6m en rive droite, obtient une note de 3%. Le profil normal actuel obtient la note de 10%.

Zone inondable

Il n'y a pas de zone inondable en dehors du lit mineur. La note est donc de 0% pour les deux profils.

Structure des milieux terrestres

La bande à disposition des structures du milieu terrestre est la partie de l'espace de mobilité non remplie par la largeur naturelle du lit à pleins bords, c'est-à-dire inexistante dans ce cas. La note est donc de 0% pour les deux profils.

Communautés typiques

Comme pour les structures du milieu terrestre, la bande à disposition des communautés typiques est la partie de l'espace de mobilité non remplie par la largeur naturelle du lit à pleins bords, c'est-à-dire inexistante dans ce cas. La note est donc de 0% pour les deux profils.

Notes globales

Fonctions	Note Prof. hydr. min.	Note Profil actuel norm.	Poids
Milieu aquatique	49.0	100.0	0.2
Milieu amphibien	95.0	59.0	0.1
Connectivité long. terr. rive droite	6.7	20.0	0.05
Connectivité long. terr. rive gauche	0.0	0.0	0.05
Effet tampon rive droite	50.0	56.7	0.05
Effet tampon rive gauche	53.3	41.7	0.05
Dynamique d'inondation	0.0	0.0	0.1
Structures du milieu terrestre	0.0	0.0	0.2
Communautés typiques du m. terr.	0.0	0.0	0.2
Note globale	24.8	31.8	

Tableau 12. Notes des fonctions naturelles des deux profils de l'Aar entre Büren et Soleure.

Le tableau comparatif des notes (Tableau 12) montre que le profil normal actuel reçoit une note de 7% plus élevée que le profil hydraulique minimum. La différence est principalement due aux structures du fond du lit. Quoi qu'il en soit, les deux profils évalués sont péjorés par l'absence de rajeunissement et d'inondation sur le milieu terrestre.

Pour améliorer la situation, le plus judicieux serait d'écarter les stabilisations de berge ou de créer des zones inondables en abaissant les berges et le terrain à certains endroits.

10.3 La Kleine Emme à Malters

Le secteur d'étude s'étend de Malters à Littau et mesure 5'030 m. Sa pente est de 1.27%. Les conditions hydrologiques du bassin versant n'ont pas été modifiées significativement par l'homme, on peut donc chercher une carte historique montrant un état non corrigé comme état de référence. Malheureusement, lors de la production de la carte Dufour, la Kleine Emme avait déjà été canalisée.

10.3.1 Style fluvial

La carte de Hess de 1785, montre un cours en tresses peu ramifié avec de grands bancs de sédiments, là où la vallée est plus large (Figure 32).

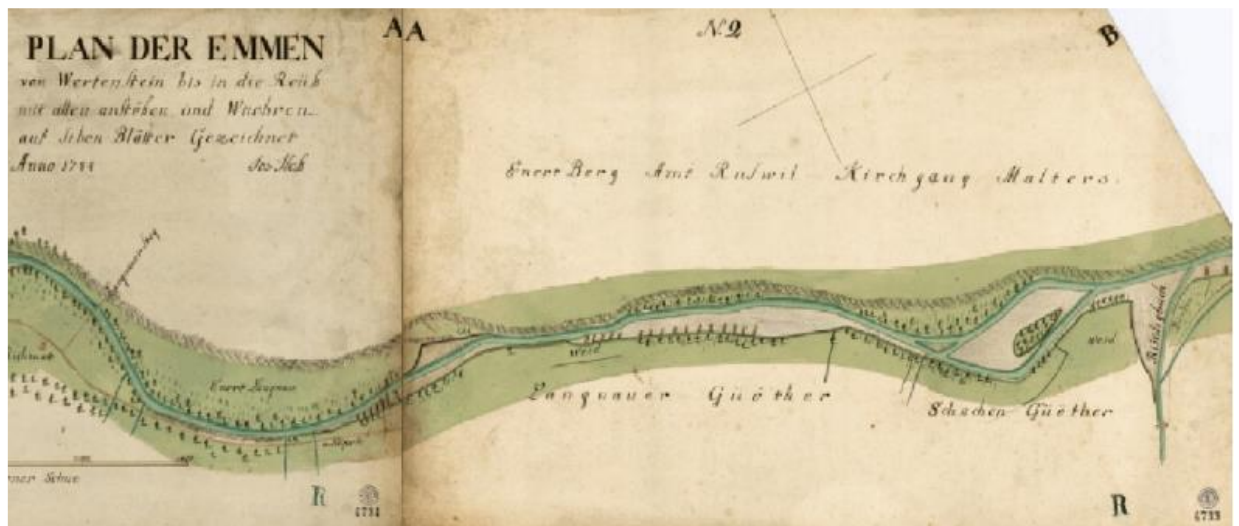


Figure 32. Carte historique de la Kleine Emme en aval de Wertheim, Hess 1785.

Dans ce secteur d'étude, la Kleine Emme à l'état naturel comporte entre un et trois chenaux. Pour la présente procédure on travaillera avec une valeur moyenne de deux chenaux.

Nous comptons 44 m de largeur du fond du lit (L_{fl}), 55 m de largeur à pleins bords (L_{pb}), 1.8 m de profondeur (h_{2-5}) et 0.66 m pour la pente des berges.

10.3.2 Fonctiogramme de l'espace de mobilité

La Figure 33 donne le fonctiogramme de la Kleine Emme en aval de Malters (hors zone alluviale). Un espace de mobilité de 104 m est nécessaire pour satisfaire 80% des fonctions du cours d'eau.

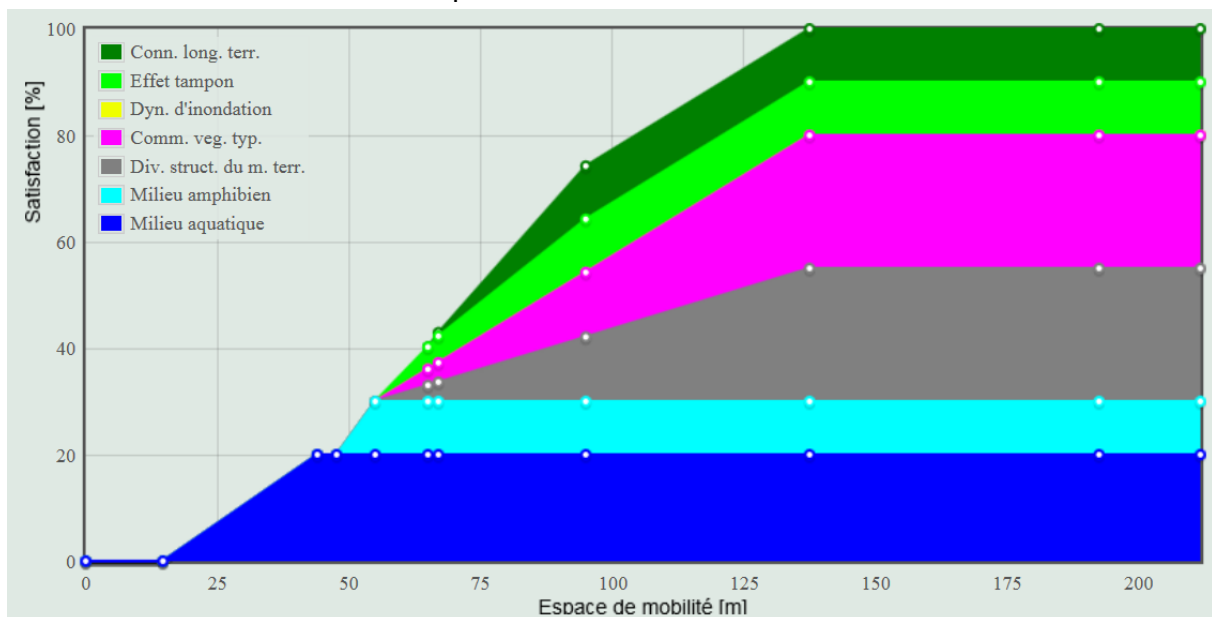


Figure 33. Fonctiogramme de la Kleine Emme en aval de Malters.

10.3.3 Evaluation

On peut utiliser la procédure pour évaluer un projet, sur la base d'un plan ou d'un profil en travers (Figure 34). On rappelle qu'il s'agit ici avant tout d'un projet de 2005 de protection contre les crues et non d'un projet de revitalisation.

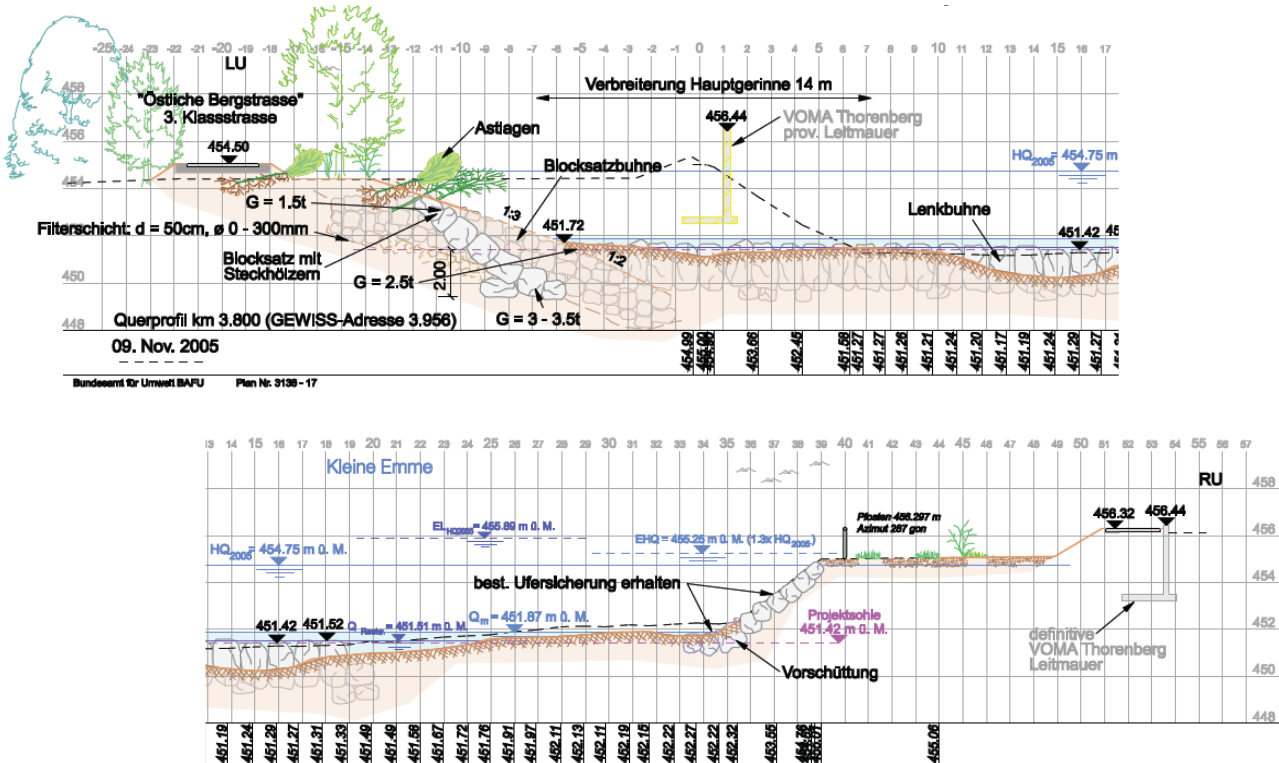


Figure 34. Plan de réaménagement de la Petite Emme, selon un projet de 2005 (en haut : rive gauche ; en bas : rive droite).

On peut facilement déduire le profil moyen à partir de ce schéma. On mesure l'espace de mobilité entre les stabilisations de berge, à la hauteur du fond du lit. Ensuite, d'après la végétation qui figure sur le plan, on en déduit qu'on aura une bande extensive en rive droite et une bande boisée ainsi en rive gauche. En rive gauche, l'espace réservé au cours d'eau s'arrête au chemin, visible sur le profil en travers. Le profil moyen est présenté sur la Figure 35.

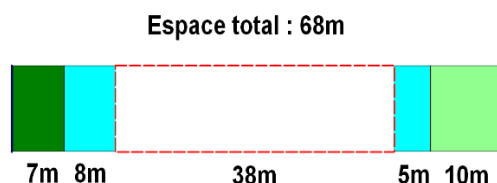


Figure 35. Profil moyen correspondant au profil de la Figure 34 du plan d'aménagement.

L'évaluation de ce profil en utilisant les courbes de satisfaction produit les notes suivantes (Tableau 13) :

Fonctions	Note Profil 1	poids
Milieu aquatique	80	0.2
Milieu amphibien	100	0.1
Connectivité long. terr. rive droite	0	0.05
Connectivité long. terr. rive gauche	13.3	0.05
Effet tampon rive droite	63.3	0.05
Effet tampon rive gauche	53.3	0.05
Structures du milieu terrestre	0	0.25
Communautés typiques du m. terr.	0	0.25
Note globale	32.5	

Tableau 13. Évaluation du profil moyen correspondant au projet de la Figure 34.

Le projet de protection contre les crues influence aussi la situation d'un point de vue écologique, la note obtenue (32.5%) peut être qualifiée de moyenne à mauvaise. Ceci est principalement dû au fait que l'espace de mobilité est proche de la largeur naturelle du fond du lit et les berges sont en pente douce ce qui permet d'obtenir une bonne évaluation même si elles sont stabilisées. Par contre, les fonctions qui concernent le milieu terrestre ne sont presque pas restaurées. Ce cas illustre qu'un projet de protection contre les crues améliore significativement la situation dans le lit mineur qui doit être élargi pour faciliter l'écoulement de l'eau, mais l'effet sur le milieu terrestre (notamment sur la végétation typique) reste très limité.

Ce résultat est comparé à un profil hydraulique minimum pour la crue centennale. Le profil du km 14.000 (Figure 36) est situé entre Werthenstein et Malters, à proximité du secteur d'étude. Le trait rouge montre la situation qui prévalait avant les travaux, mais après les crues de 2005.

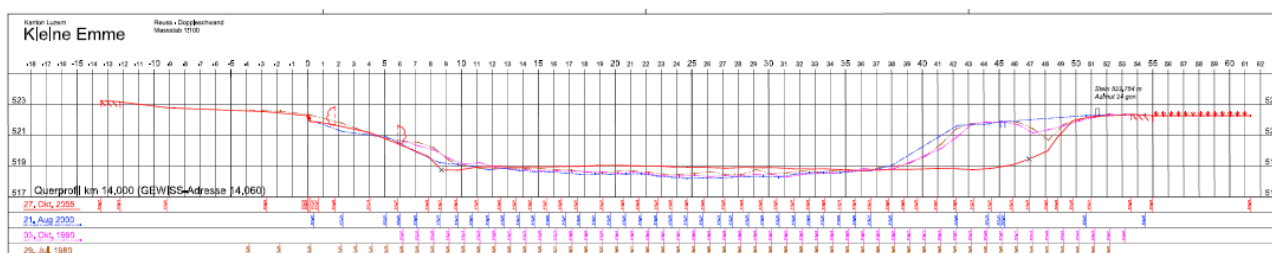


Figure 36. Profil hydraulique minimum de la Kleine Emme près de Malters.

Le profil moyen correspondant est présenté sur la Figure 37.

10.4.1 Style fluvial naturel

Le style fluvial est un cours en tresses, ramifié avec un fort apport en sédiments, même si cet apport a diminué par rapport à un état naturel en raison de lacs de retenues en amont.

Nous comptons 70 m de largeur du fond du lit (L_{fi}) et 101 m de largeur à pleins bords (L_{pb}).

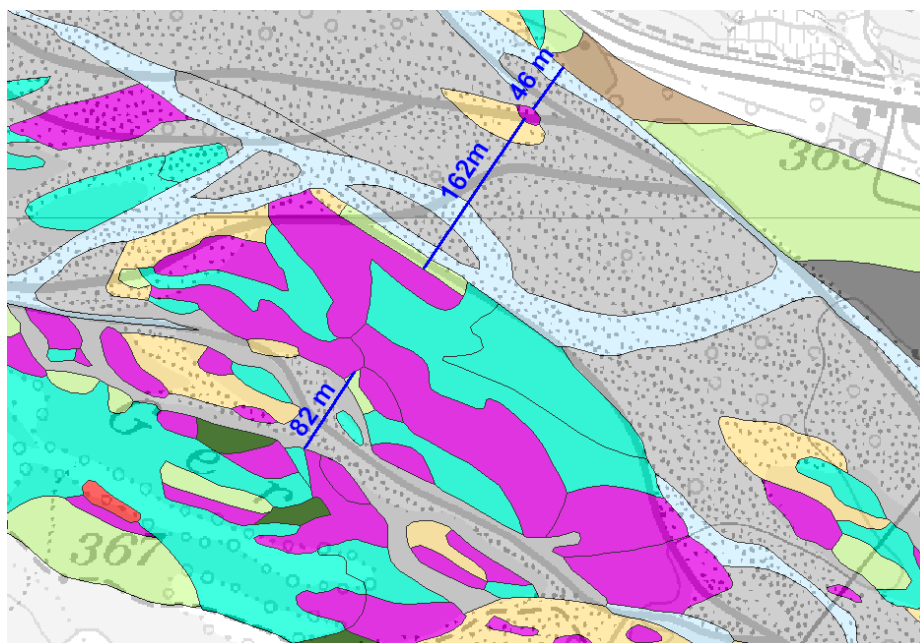
10.4.2 Test de la validité de la procédure

Comme le tronçon est déjà à l'état naturel, et qu'il a à sa disposition suffisamment d'espace, on peut comparer si la valeur théorique fournie par la procédure correspond à la réalité. Premièrement, on regarde si la valeur naturelle du fond du lit et du lit à pleins bords correspond à la réalité et ensuite, on se focalise sur l'espace qui correspond à 100% des fonctions naturelles. Si on applique la procédure, l'espace nécessaire pour remplir 100% des fonctions naturelles vaut 3.5x la largeur du lit à pleins bords (en zone alluviale).

La carte de végétation des zones alluviales d'importance nationale montre la mosaïque de la végétation alluviale et l'étendue de sa zonation (Figure 38). L'état optimum est atteint quand toutes les formations alluviales typiques sont présentes : bancs de sédiments nus, formations herbacées, formations à bois tendre, et formation à bois durs. Le tronçon d'étude comporte des largeurs variables, il est ainsi possible de visualiser l'impact de l'espace à disposition sur la diversité de la végétation.

Largeur naturelle du fond du lit et largeur à pleins bords

L'objectif ici est de comparer les valeurs théoriques obtenues en suivant la procédure avec les valeurs réelles. La valeur réelle n'est pas si facile à connaître. Dans les cours en tresses, la distinction entre le lit mineur et le lit majeur n'est pas aussi franche que pour d'autres styles fluviaux comme les méandres. La notion de lit rempli à pleins bords est donc assez floue et difficile à mesurer pour ce type de cours d'eau. Alors, certains auteurs proposent de définir le lit mineur comme la partie du lit qui n'est pas colonisée par de la végétation ligneuse, il s'agit donc de l'eau, des sédiments nus et des formations herbacées (unités 1, 2 et 3, Figure 38), selon la cartographie des zones alluviales. La largeur occupée par ces trois unités est mesurée pour estimer la largeur du lit mineur à pleins bords.



1.	Eau	8.	Forêts d'aulne blanc et manteaux
2.	Sédiments nus	10.	Forêts de frêne et manteaux des substrats grossiers
3.	Végétation herbacée pionnière d'altitude	12.	Ripisylves de transition de rivière
6.	Fourrés et manteaux de saules d'altitude	16.1	Forêts et manteaux de la zone alluviale à statut indéterminé

Figure 38. Extrait de la carte de végétation de la zone alluviale n°171 et estimation de la largeur naturelle du lit, avec extrait de la légende de la carte de végétation des zones alluviales d'importance nationale. Les bois tendres sont les unités 6 et 8, et les bois durs 10 et 12. Le 16.1 étant non déterminé, il peut faire partie des formations à bois tendres ou à bois durs.

Si on mesure la largeur du lit mineur à pleins bords, qu'on assimile aux surfaces d'eau, de sédiments nus et de formations herbacées, on trouve une largeur de 290 m (82 m + 162 m + 46 m). Cette mesure est réalisée à l'endroit le plus large, où toutes les formations alluviales sont représentées.

Si on effectue la mesure à un autre endroit de la zone alluviale (Figure 39), on trouve une valeur de 180 m (125 m + 45 m + 10 m). Alors que dans un passage étroit de 127 m, il n'y a aucune végétation alluviale qui se développe. On peut en conclure, que la largeur naturelle à pleins bords est supérieure à 127 m et comprise entre 180 m et 290 m. 210 m sont admis comme valeur moyenne du tronçon d'étude. Elle est donc nettement supérieure à la valeur théorique fournie par la procédure, qui était de 101 m.

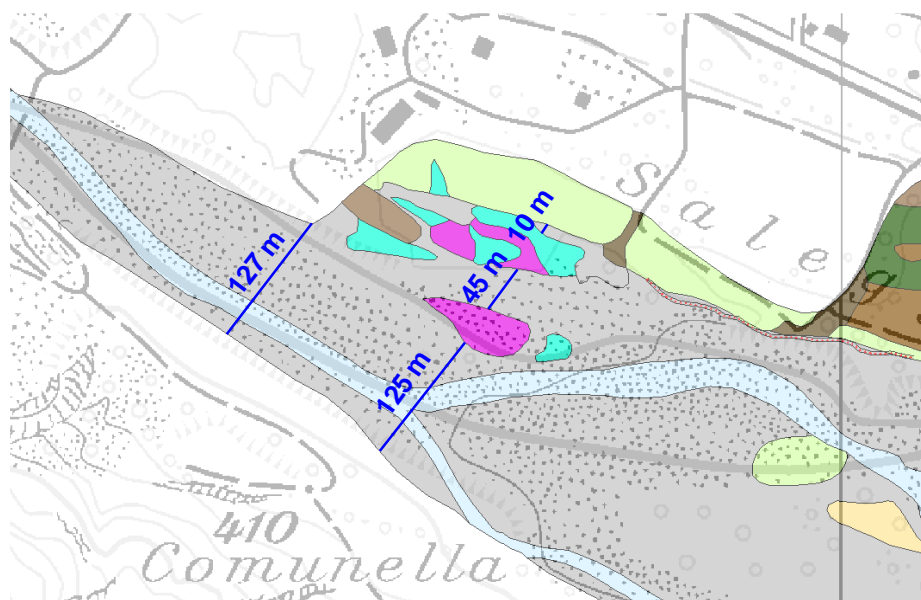


Figure 39. Extrait de la carte de végétation de la zone alluviale n°171 et estimation de la largeur naturelle du lit (cf. Figure 38 pour la légende des unités de végétation).

On peut trouver plusieurs explications à cette différence :

Le rapport largeur/profondeur est sous-estimé, en effet la procédure ne donne pas de résultats très précis, surtout si ce rapport dépasse $r = 60$.

Le débit morphogène est sous-estimé, soit parce que la station de mesure est trop éloignée, et que l'estimation du débit dans le secteur n'est pas assez précise, soit parce que la crue HQ_5 ne correspond pas au débit morphogène. O. Overney (OFEV, comm. orale) considère, quant à lui, que la crue morphogène est plus proche de HQ_{50} .

La végétation est variable. En effet, si le relevé de végétation survient après une grosse crue, les bancs de sédiments peuvent être surreprésentés par rapport à une situation moyenne, ce qui est le cas ici car le relevé date de 1988, soit un an après les crues importantes de 1987.

Largeur de l'espace de mobilité pour 100% des fonctions

Comme montré dans la partie précédente, la largeur à pleins bords fournie par le calcul est sous-estimée. Il est préférable de considérer que la largeur naturelle à pleins bords vaut 210 m. Ainsi, d'après la procédure, il faudrait un espace de mobilité de 525 m pour atteindre 100% des fonctions naturelles hors d'une zone alluviale (pas de formations à bois durs) et de 735 m en zone alluviale (formations à bois durs recherchées ; cf. Figure 41).

Si l'on étudie le lien entre espace de mobilité et formation alluviale sur un profil représentatif (cf. Figure 40), on arrive au constat suivant :

- 0 – 250 m : eau + sédiments nus + formations herbacées

- 250 – 520 m : + bois tendres
- > 520 m : + bois durs

On peut voir que sur le profil de 525 m (Figure 40), correspondant à un état optimum théorique hors zone alluviale, on trouve toutes les formations alluviales jusqu'aux bois tendres et le début des formations à bois durs (en vert foncé).

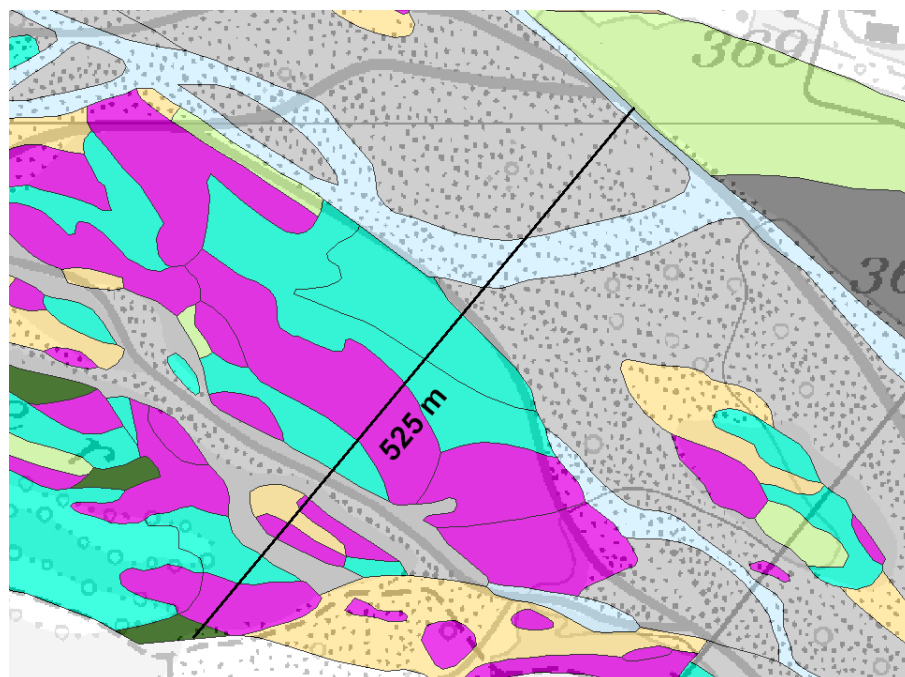


Figure 40. Extrait de la carte de végétation de la zone alluviale n°171. Profil correspondant à 100% des fonctions naturelles (cf. Figure 38 pour la légende des unités de végétation).

L'étude de la carte de végétation montre qu'on obtient des bois durs seulement à partir d'un espace de mobilité de 520 m de large. Globalement, ceci confirme la courbe de satisfaction des communautés végétales typiques, qui se fonde sur l'hypothèse qu'avec une largeur de 2.5 fois la largeur naturelle à pleins bords, les bois tendres peuvent atteindre leur développement maximum. Il est admis que les formations à bois durs atteignent un développement satisfaisant avec une largeur de mobilité de 3.5 fois la largeur naturelle à pleins bords. Ce dernier critère doit être utilisé dans les zones alluviales, comme c'est le cas pour la Maggia à Someo. Comme cette fonction est la plus exigeante en espace pour les cours en tresses, le fait de la satisfaire à 100% implique que toutes les autres fonctions sont également satisfaites à 100% (Figure 41).

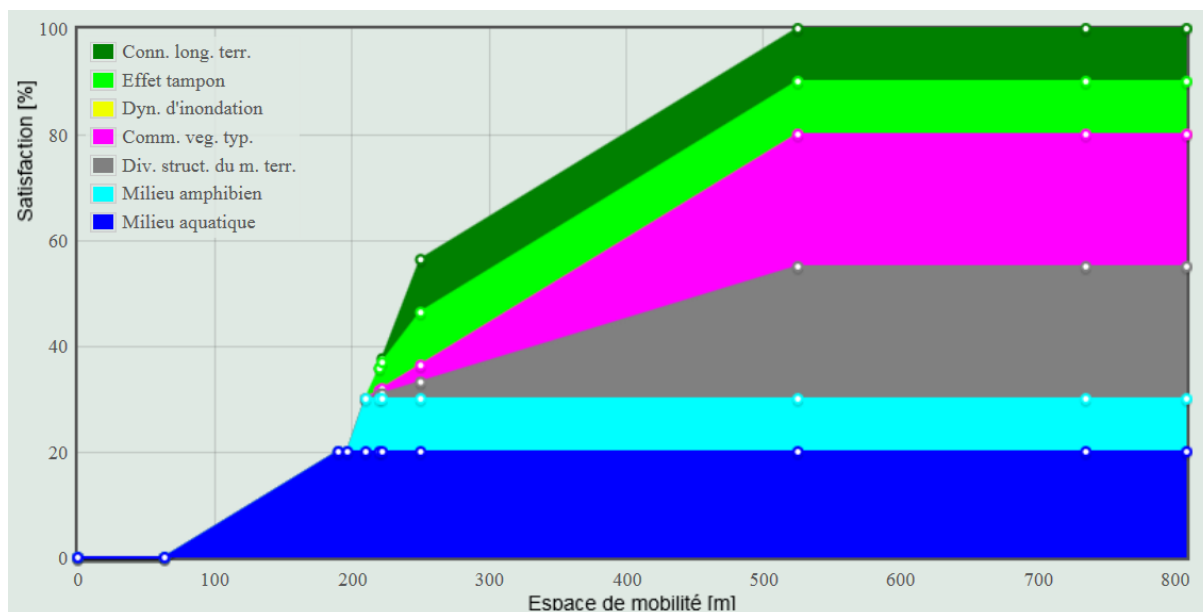


Figure 41. Fonctiogramme de la Maggia à Someo, considérant une largeur naturelle à pleins bords de 210 m (en zone alluviale).

10.4.3 Commentaire des résultats

Cette étude de cas permet de tester la procédure sur un cours d'eau naturel. Elle montre que l'estimation de la largeur naturelle du fond du lit et du lit à pleins bords avec la formule de Manning-Strickler adaptée donne un résultat trop faible. On attribue cette imprécision à une éventuelle mauvaise estimation du rapport largeur/profondeur et surtout à la variabilité du système et de la difficulté à définir précisément le fond du lit et le lit à pleins bords d'un cours en tresses aussi développé qu'à la Maggia.

En ce qui concerne l'évaluation des fonctions naturelles, la réalité (décrite par la carte de la végétation de la zone alluviale) correspond bien à la théorie (besoin estimé hors zone alluviale de 525 m pour 100% des fonctions naturelles), car on mesure que les formations à bois durs apparaissent quand la largeur de l'espace de mobilité dépasse 520 m, et la théorie dit que les bois tendres s'expriment pleinement avec une largeur de 525 m. Pour la formation des forêts à bois durs, requise en zone alluviale, une largeur de 735 m est nécessaire pour remplir entièrement ce critère (3.5 fois la largeur à pleins bords). Ces deux conditions sont compatibles car, d'après les règles de la zonation végétale, il est normal que les bois durs commencent là, où les bois tendres s'arrêtent.

10.5 L'Aar entre Thoune et Berne

Le rapport « Aarewasser. Raumbedarf der Aare zwischen Thun und Bern » (Bonnard et Witschi 2012) a servi de base pour cette étude de

cas. Pour la planification de la revitalisation de ce secteur, une procédure précise a été développée par les auteurs et a abouti à des valeurs que l'on va comparer avec la présente procédure.

Le but prioritaire du réaménagement de l'Aar entre Thoune et Berne est la stabilisation du fond du lit de l'Aar (neutraliser l'incision) ; les buts suivants sont aussi fixés :

- Protection contre les crues efficace et durable
- Développement du cours d'eau
- Régime de charriage en équilibre
- Conservation à long terme des réserves d'eau souterraine
- Conservation et développement du potentiel écologique
- Conservation et développement de zones de détente attractives

Comme dans de nombreux autres grands cours d'eau de Suisse, le retour à une situation historique a été d'emblée écarté en raison des changements intervenus dans le secteur. Les auteurs rappellent également le cas particulier de ce secteur de cours d'eau situé en aval du Lac de Thoune et présentant un charriage très réduit, notamment suite au détournement (percée) de la Kander dans le Lac de Thoune.

10.5.1 Trois compartiments

Trois compartiments sont définis dans le rapport :

- L'« espace cours d'eau actuel » qui correspond au cours d'eau corrigé actuel (largeur de l'eau libre)
- L'« espace cours d'eau minimum » qui correspond à la largeur naturelle du lit et du domaine riverain apte à assurer les trois fonctions énumérées dans l'art. 37 LEaux : faune et flore diversifiées, interaction des eaux superficielles et souterraines, végétation riveraine
- L'« espace cours d'eau augmenté » qui correspond à un espace naturel ou extensivement exploité abritant des milieux en relation avec le cours d'eau

Le rapport vise à identifier le besoin d'espace de l'Aar entre Thoune et Berne ; il prend en considération l'ensemble des bases disponibles pour atteindre ce but.

La largeur de régime, selon un rapport de Hunziker, Zarn und Partner (in Bonnard et Witschi 2012), mesure entre 40 m et 80 m selon les secteurs. Deux autres approches (cartographie écomorphologique, cartes historiques) évaluent la largeur du lit à 40 – 120 m et 40 – 80 m respectivement.

La largeur proposée des bandes riveraines se fonde également sur plusieurs approches : les cartes historiques aboutissent à une largeur de 30 – 70 m par bande. Une approche cartographique systématique

de cinq zones alluviales de référence (110 profils transversaux mesurés) préconise des bandes riveraines de 40 – 45 m de largeur, pouvant s'étendre jusqu'à 90m par côté. Les largeurs les plus grandes permettent aux groupements alluviaux herbacés, aux formations à bois tendre et à bois durs ainsi qu'aux bas-marais, partie intégrante du système alluvial examiné, de se développer.

10.5.2 Secteur choisi

Le secteur choisi pour appliquer la procédure mesure environ 3 km de longueur ; il est situé à la hauteur du village de Belp entre le km 17.95 et le km 20.90. Selon le rapport, ce secteur abrite trois mesures d'aménagement d'amont en aval :

- M16 : Elargissement de Hunzigenau
- M17 : Alimentation en eau du marais de Chlihöchstettenau
- M18 : Elargissement à Flühli

Le tronçon se trouve dans une zone alluviale d'importance nationale (objet 69 BE), les courbes de satisfaction des zones alluviales (installation des forêts à bois durs, Figure 11 et Figure 14) doivent donc être appliquées pour évaluer l'espace nécessaire au cours d'eau.

10.5.3 Style fluvial

Le style fluvial de ce secteur n'est pas détectable sur les cartes Siegfried de 1870 à 1876, car l'Aar était déjà corrigée (Figure 42). L'extrait de carte à la hauteur de Kleinhöchstetten, ainsi que la carte de la végétation de l'objet 69 BE (Belper Giessen) semblent indiquer qu'un cours en méandres migrants était développé avant la correction de l'Aar. Vischer (2003) produit une carte de ce secteur indiquant un cours multiple en anastomoses (intermédiaire entre les tresses et les méandres) avant la correction de 1830. Mais une évolution lente en direction d'un style en méandres semble vraisemblable suite à la dérivation de la Kander dans le lac de Thoue.

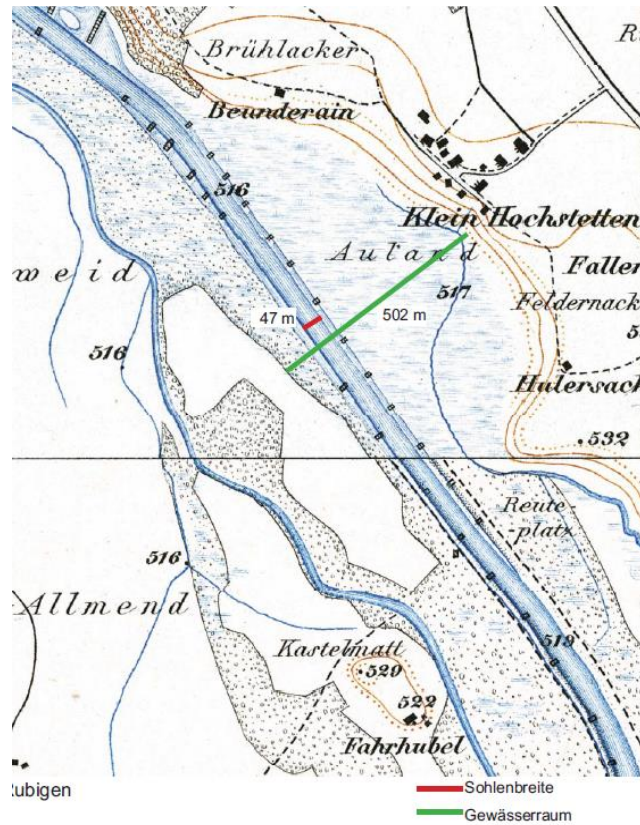


Figure 42. Carte Siegfried de l'Aar à Belp en 1870 – 1876.

Ce tronçon se trouve dans une zone alluviale d'importance nationale (obj. 69 BE), il est donc nécessaire de viser le développement des forêts à bois durs, lors de la définition de l'espace nécessaire au cours d'eau. Le fonctiogramme de la Figure 43 prend en compte les exigences d'espace des zones alluviales.

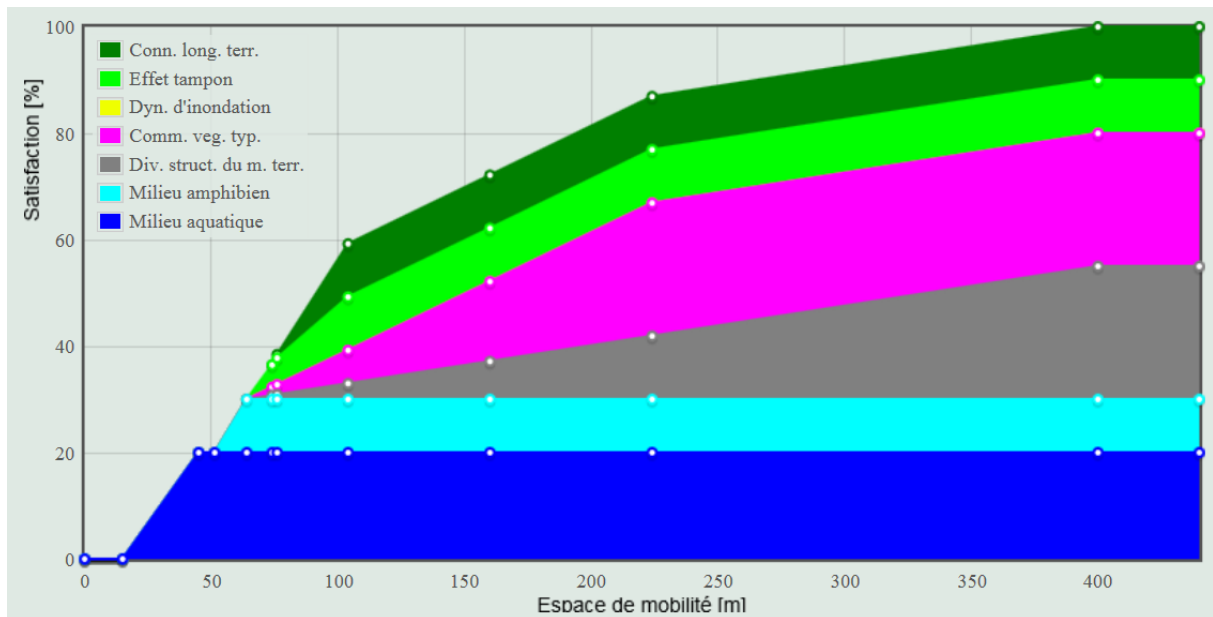


Figure 43. Fonctiogramme de l'Aar entre Thoune et Berne (en zone alluviale).

Nous comptons 45 m de largeur du fond du lit (L_{fl}), 64 m de largeur à pleins bords (L_{pb}) et 400 m pour l'amplitude naturelle des méandres (A_{nat}).

Ci-dessous, l'espace réservé aux eaux de deux situations projetées est évalué :

- L'espace cours d'eau minimum
- L'espace cours d'eau augmenté

10.5.4 Évaluation

Dans le secteur d'étude, à la hauteur de Kleinhöchstetten, l'espace cours d'eau minimum est une bande de 150 m de largeur superposée au cours actuel (Figure 44) et contenu dans le périmètre de la zone alluviale actuelle (Objet 69. Belper Giessen). On admet que le cours d'eau élargi à 64 m (L_{pb}) se trouve au milieu de l'espace de mobilité. Un bas-marais (zone inondable) peuplé de fourrés de saules occupe l'espace terrestre situé à droite (Chlihöchstettenau) ; aucune digue ne le sépare du cours d'eau. Il fait donc partie de l'espace de mobilité. En rive gauche, l'espace terrestre est en nature de forêt alluviale à bois dur ; une digue de 10 m de largeur (dont l'assainissement est prévu sur le plan) sépare le cours d'eau de la forêt alluviale. Cet espace terrestre est hors de l'espace de mobilité ; il constitue donc une bande boisée.

L'espace cours d'eau augmenté présente une largeur de 400 m (valeur moyenne pour le secteur considéré). Son organisation générale est la même que celle du profil minimum ; seule la largeur des deux bandes de marais et de forêt alluviale est beaucoup plus grande (marais : 167 m, bande boisée : 157 m).

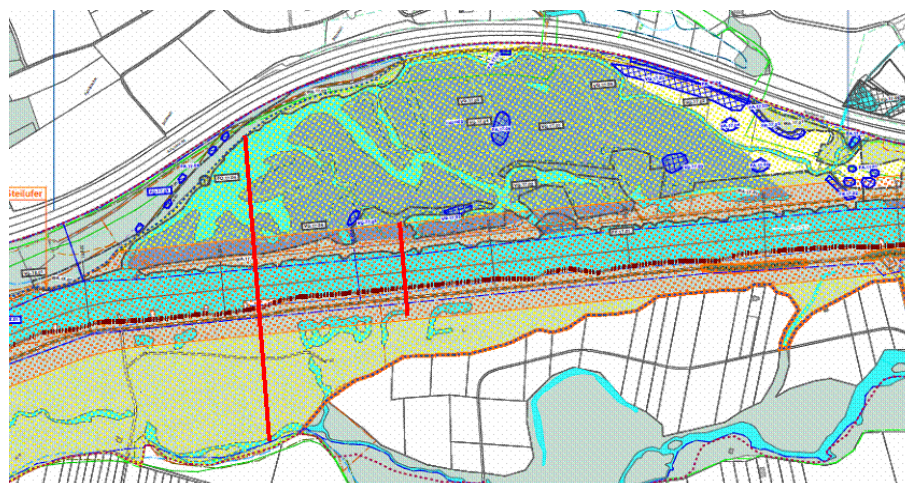
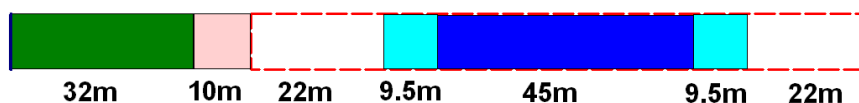


Figure 44. Emplacement des deux profils comparés dans l'évaluation (espace augmenté, à gauche, espace minimum, à droite). En rive gauche (rive inférieure), la digue est conservée.

L'espace de mobilité est constitué du cours d'eau et de l'espace terrestre en rive droite ; il a une largeur de respectivement 108 m et de 233 m pour les variantes « espace minimum » et « espace augmenté » (Figure 45). Pour l'évaluation, on place le cours d'eau au milieu de l'espace de mobilité.

Espace cours d'eau minimum (largeur totale : 150 m)



Espace cours d'eau augmenté (largeur totale : 400 m)

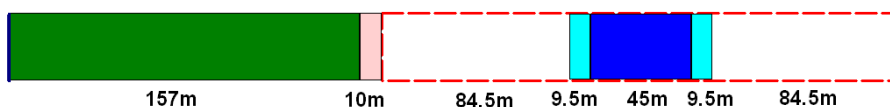


Figure 45. Espace cours d'eau minimum et augmenté de l'Aar entre Thoune et Berne (en zone alluviale).

On constate que les deux profils moyens sont asymétriques car l'espace de mobilité de la rive gauche est interrompu par la digue alors qu'il se développe jusqu'au pied de la pente de la vallée en rive droite.

10.5.5 Évaluation des deux scénarios

La procédure présente l'évaluation des deux variantes avec un espace cours d'eau minimum à largeur totale de 150 m et augmenté à largeur totale de 400 m.

Fonction	Note espace minimum	Poids
Milieu aquatique	100	0.20
Milieu amphibien	100	0.10
Connectivité long. terr. rive droite	100	0.05
Connectivité long. terr. rive gauche	100	0.05
Effet tampon rive droite	100	0.05
Effet tampon rive gauche	100	0.05
Structures du milieu terrestre	13.2	0.25
Communautés typiques du m. terr.	27.6	0.25
Note globale	60.2	

Tableau 15. Évaluation des fonctions de l'espace cours d'eau minimum de l'Aar entre Thoune et Berne (en zone alluviale). Variante à largeur totale = 150 m.

L'espace minimum de l'Aar obtient la note de 60.2 sur 100 (Tableau 15). Les fonctions du milieu aquatique et amphibien sont remplies à 100% à condition que le cours d'eau accède à la largeur naturelle à pleins bords (64 m) et que ses berges soient mobiles, au moins sur la rive droite. Les fonctions insuffisamment satisfaites sont celles des communautés alluviales typiques (formations à bois tendre : $108 - 64 = 44$ m de largeur) et la structure des milieux terrestres (amplitude des méandres insuffisante). Ces deux dernières fonctions remplissent à elles seules le 50% de la note globale.

Fonction	Note espace augmenté	Poids
Milieu aquatique	100	0.20
Milieu amphibien	100	0.10
Connectivité long. terr. rive droite	100	0.05
Connectivité long. terr. rive gauche	100	0.05
Effet tampon rive droite	100	0.05
Effet tampon rive gauche	100	0.05
Structures du milieu terrestre	50.3	0.25
Communautés typiques du m. terr.	100	0.25
Note globale	87.6	

Tableau 16. Évaluation des fonctions de l'espace cours d'eau augmenté de l'Aar entre Thoune et Berne (en zone alluviale). Variante à largeur totale = 400 m.

L'espace augmenté de l'Aar obtient la note de 87.6 sur 100 (Tableau 16). Les fonctions des milieux aquatiques et amphibien sont remplies à 100% pour les mêmes raisons que ci-dessus. Les communautés végétales alluviales typiques sont développées à l'optimum car l'espace de mobilité (233 m) est supérieur à 3.5 fois la largeur à pleins bords ($3.5 \times 64 \text{ m} =$

224 m), condition considérée dans les zones alluviales (développement des forêts à bois durs). Globalement, la note de 87.6 est très bonne et caractérise bien la situation que l'on peut rencontrer dans une zone alluviale.

La différence de note entre le projet minimum et le projet augmenté est assez importante (27.4%), mais il faut être conscient que le premier est déjà un projet ambitieux, alors que le second est un projet très ambitieux. Grâce à la pondération utilisée pour les différentes fonctions naturelles liées au cours d'eau, le résultat reflète parfaitement bien le gain important en biodiversité attendu par la mise à disposition d'un vaste système alluvial.

10.6 La Sarine en amont du Lac de la Gruyère

Le tronçon d'étude mesure 2.1 km. Il est situé entre le « Pont qui branle » et l'embouchure de la Trême. Le cours actuel est corrigé à une largeur moyenne de 30 m. De plus, le cours est fortement incisé à cause des lacs de retenues situés en amont (barrage de Lessoc et Lac du Verney) qui le privent de sédiments. La procédure sera utilisée pour évaluer l'état actuel de la Sarine à cet endroit.

10.6.1 Évaluation du style fluvial naturel

La carte Dufour (1860) est représentative d'un état non corrigé (Figure 46). On observe un style intermédiaire entre des méandres migrants et des tresses. En effet, on peut identifier un cours principal, avec quelques bras secondaires de plus petite dimension. Comme la forme du cours principal ne ressemble pas à des méandres, ce style est qualifié de cours en tresses.

Nous comptons 36 m de largeur du fond du lit (L_{fl}) et 47 m de largeur à pleins bords (L_{pb}).



Figure 46. Secteur d'étude de la Sarine, carte Dufour 1860 et carte nationale récente.

Le débit actuel doit être considéré comme le débit naturel, car il est le résultat d'une négociation entre les producteurs d'électricité et le canton et la gestion actuelle est bénéfique pour la production d'électricité et pour la protection contre les crues. Par contre, le débit solide déficitaire est dû à l'accumulation de sédiments dans les lacs de retenues. Cette situation n'arrange ni les producteurs qui perdent du volume de stockage, ni les organes de protection de la nature ; de plus l'assainissement du charriage est exigé par l'OEaux. Donc, comme la situation actuelle est peu favorable et doit s'améliorer, on ne doit pas considérer que les conditions actuelles du charriage sont les conditions naturelles. Il sera donc préférable d'estimer la largeur naturelle avec le débit morphogène actuelle (Figure 47) ; cette largeur devrait être inférieure à la largeur historique.

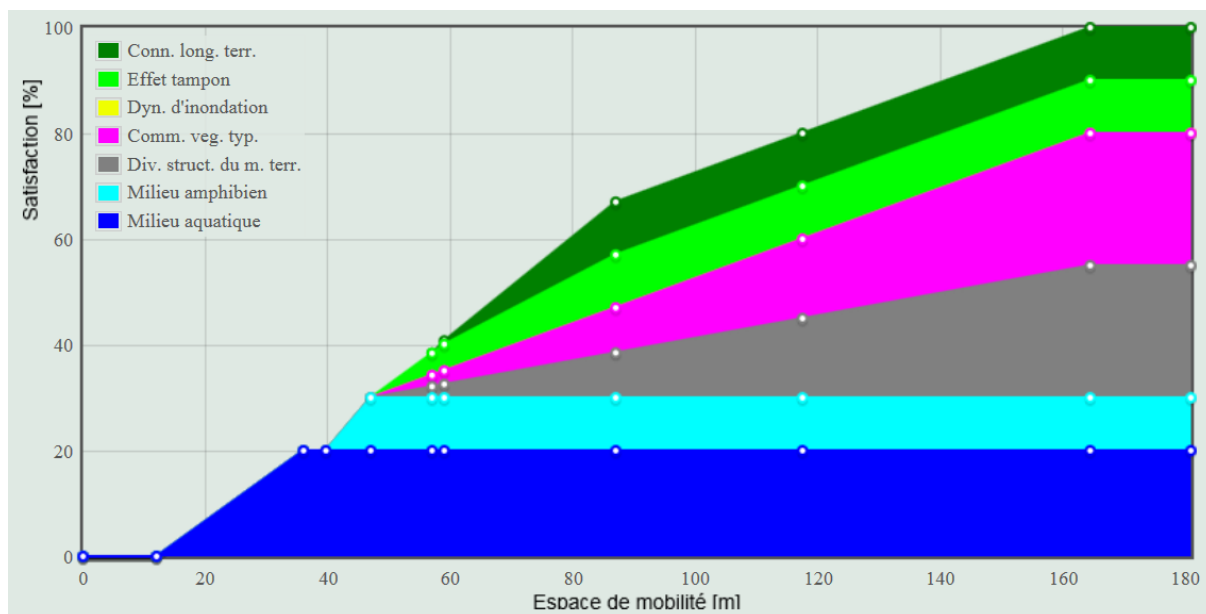


Figure 47. Fonctiogramme de la Sarine à Broc (hors zone alluviale).

10.6.2 Profil moyen de l'état actuel

Le cours est stabilisé sur presque l'entier de son tracé. Seul le premier tiers de la rive droite n'est pas stabilisé, mais la topographie limite la mobilité du cours d'eau à cet endroit (Figure 48).

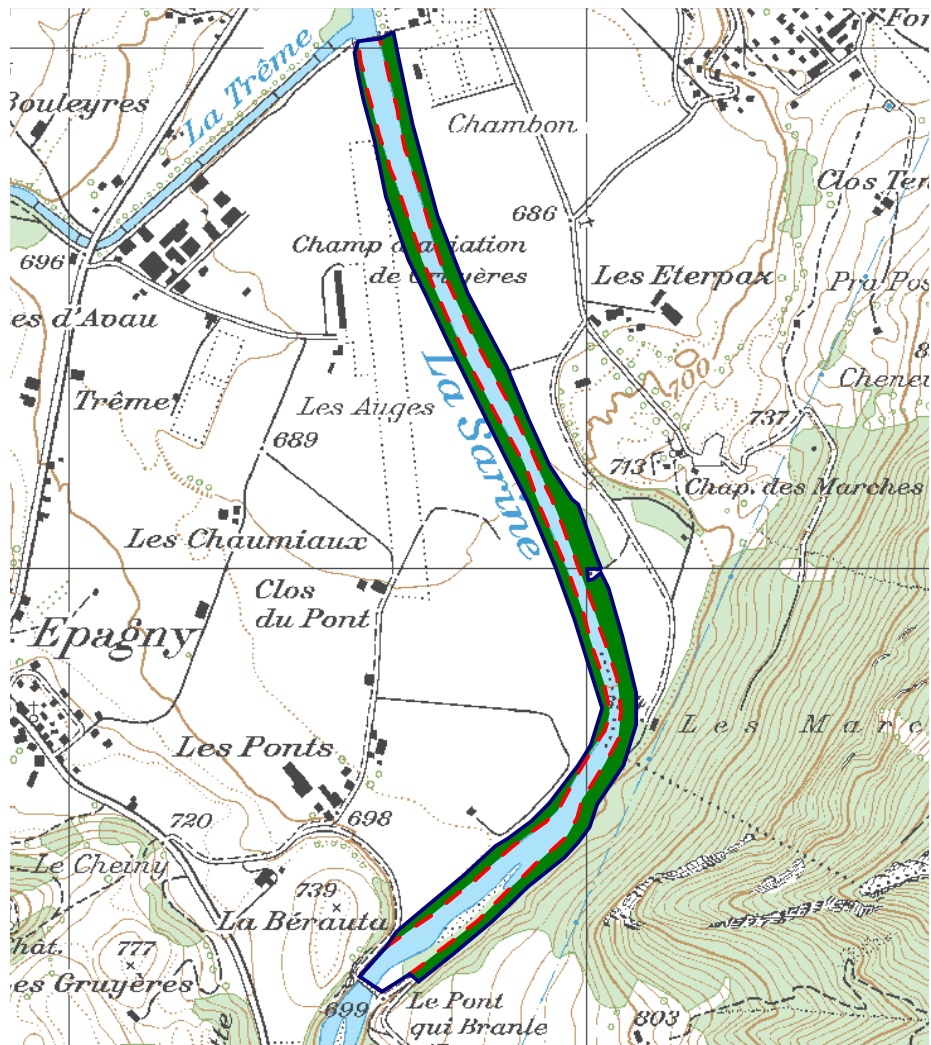


Figure 48. Cas d'étude de la Sarine, carte de l'utilisation du sol permettant de construire le profil moyen.

Le profil moyen est obtenu avec un espace réservé aux eaux de 82 m de large en moyenne et en considérant l'utilisation actuelle du sol (Figure 49). La limite de l'espace cours d'eau correspond à la limite de la bande boisée, sauf pour la forêt de pente, pour laquelle on a pris une largeur de 20 m à partir de l'espace de mobilité. Une visite de terrain a permis d'évaluer que l'espace des berges était d'environ 4 m par berge.

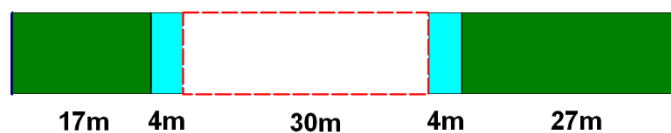


Figure 49. Profil moyen de l'étude de cas de la Sarine.

10.6.3 Évaluation

En appliquant au profil moyen les courbes de satisfaction des cours en tresses, on obtient les résultats suivants (Tableau 17) :

Fonction	Note	Poids
Milieu aquatique	75.0	0.2
Milieu amphibien	55.3	0.1
Connectivité long. terr. rive droite	100.0	0.05
Connectivité long. terr. rive gauche	80.0	0.05
Effet tampon rive droite	100.0	0.05
Effet tampon rive gauche	86.7	0.05
Structures du milieu terrestre	0.0	0.25
Communautés typiques du m. terr.	0.0	0.25
Note globale	38.9	

Tableau 17. Résultats de l'évaluation du tronçon d'étude de la Sarine dans son état actuel (hors zone alluviale).

10.6.4 Commentaire

Ce tronçon obtient une note assez moyenne (38.9/100). Les points positifs sont les structures du milieu aquatique, car l'espace de mobilité est proche de la largeur naturelle du fond du lit et les fonctions de connectivité et de zone tampon sont remplies, car une bande boisée borde la Sarine sur les deux rives et tout le long du tronçon. L'évaluation est péjorée par une mobilité latérale du cours quasi nulle, à cause de la présence de stabilisations de berges. Cela induit de mauvais résultats sur les communautés végétales typiques et sur les structures terrestres (Figure 50).



Figure 50. Lit de la Sarine dans le tronçon d'étude. Malgré un déficit de charriage, l'espace à disposition permet d'avoir quelques structures intéressantes dans le lit mineur. Photo du 29.07.2012.

L'espace nécessaire au cours d'eau sert à protéger le cours d'eau et à permettre une revitalisation future. La procédure proposée permet de mesurer ces deux objectifs :

- La protection du cours d'eau en tant que milieu naturel s'exprime à travers la note globale obtenue à l'issue de la procédure.
- Le besoin d'espace pour une revitalisation future peut être évalué par la même méthode ; une note de 100 (sur 100) signifie que l'espace est suffisant pour exprimer toutes les fonctions importantes à une valeur optimale.

Application

L'application de la procédure est plus complexe que celle de l'art. 41a OEaux, qui prévaut pour les petits cours d'eau. Mais une certaine complexité est nécessaire pour gagner de la précision, en tenant compte des spécificités liées au style fluvial, aux conditions hydrologiques et à la topographie du bassin versant. Vu la cherté du m² de terrain en Suisse, il n'est pas superflu d'investir un peu de temps pour obtenir une délimitation judicieuse de l'espace réservé aux cours d'eau, basée sur des considérations objectives et scientifiquement fondées.

Pondération

L'évaluation globale des fonctions naturelles passe par leur pondération. Il n'est pas facile de choisir des poids de manière objective, car il faudrait pouvoir mesurer l'importance écologique relative des différentes fonctions naturelles. Face à cette difficulté, le choix a été de répartir les poids par milieux, puis par fonctions. Les pondérations présentées accordent **20% au milieu aquatique, 10% au milieu amphibien et 70% au milieu terrestre (resp. 40% - 20% - 40% pour les cours encaissés et les torrents)**.

Pour le milieu **aquatique**, on peut considérer que la largeur naturelle du fond du lit (et des berges en pente douce) constituent actuellement presque un standard lors de l'aménagement des cours d'eau, du moins dans les zones non bâties.

Le milieu **amphibien** occupe moins d'espace que ses 2 milieux voisins, mais il concentre une forte activité biologique et permet à de nombreuses fonctions naturelles de se réaliser. Son poids est certes plus faible que celui des milieux précédents, mais son poids par unité de largeur est le plus important des trois milieux ; on peut constater sur les fonctiogrammes que la pente de la courbe est la plus forte pour le milieu amphibien. Ceci traduit bien l'importance écologique de cet écotone.

La qualité et la dimension du milieu **terrestre** sont indispensables au fonctionnement naturel et dynamique des cours d'eau. Ce milieu est le plus touché par les corrections de cours d'eau et il subit beaucoup de pressions liées à l'exploitation du sol. Il est devenu rare en Suisse car il exige un espace important.

En résumé, la répartition 20–10–70% reflète l'importance écologique relative des milieux aquatique, amphibien et terrestre et leurs exigences en espace. Cette pondération met en valeur le gain de biodiversité et de structures typiques lié à un milieu naturel terrestre proche de la largeur idéale.

Études des cas

L'application aux études de cas montre que la procédure donne des résultats cohérents. Il a été montré qu'il est nécessaire de tenir compte du contenu de l'espace réservé aux eaux pour faire son évaluation. La formule proposée pour estimer la largeur naturelle donne des résultats proches de certaines autres études réalisées par des spécialistes. Toutefois, il est apparu que le rapport largeur/profondeur est difficile à estimer selon la méthode proposée lorsqu'il dépasse 60, comme l'a montré l'étude de cas de la Maggia. On a pu voir aussi que les cartes historiques étaient souvent adaptées pour estimer le style fluvial naturel du cours d'eau, mais pas forcément pour sa largeur naturelle, car elle est plus sensible aux changements intervenus dans le bassin versant. Pour calculer la note globale, il est nécessaire de se référer au profil moyen d'un tronçon qui est obtenu suite à une cartographie sommaire du contenu de l'espace cours d'eau. On a pu voir qu'il est important de travailler avec des tronçons homogènes, sans quoi la moyenne n'est pas assez représentative de l'ensemble, et l'évaluation peut être biaisée.

Finalement on peut conclure que la procédure répond aux objectifs de l'étude, même si certains aspects pourraient être consolidés. Sa structure est souple et lui permettra d'intégrer facilement de nouveaux éléments, dans les cas où cela sera jugé nécessaire.

AGRIDEA 2009: "*Comment entretenir les bords de cours d'eau*". Cours n°1520, Vicques, le 1er octobre 2009. AGRIDEA - Développement de l'agriculture et de l'espace rural. Lausanne. 64 pp.

Ahmari H., Da Silva A.M.F. 2011: "*Regions of bars, meandering and braiding in da Silva and Yalin's plan*". Journal of Hydraulic Research, 49:6, 718-727.

Amoros C. et Bornette G. 2002: "*Connectivity and biocomplexity in waterbodies of riverine floodplains*". Freshwater Biology, **47** (4). 761-776.

Amoros C. et Petts G.E. 1993: "*Hydrosystèmes fluviaux*". Masson, Collection d'écologie. Paris. 300 pp.

Arnold M., Schwarzwälder B., Beer-Tóth K., Zbinden M., Baumgart K. 2009: "*Mehrwert naturnaher Wasserläufe. Untersuchung zur Zahlungsbereitschaft mit besonderer Berücksichtigung der Erschliessung für den Langsamverkehr*". Umwelt-Wissen Nr. 0912. Bundesamt für Umwelt, Bern: 124 S. (existe seulement en allemand).

BEB SA - Bureau d'études biologiques 2012: "*Réseau écologique - Analyse au niveau cantonal (REC-VD)*". Canton de Vaud, Service des forêts, de la faune et de la nature. Aigle. 66 pp.

Berthoud G., Lebeau R. P. et Righetti A. 2004: "*Réseau écologique national REN - Rapport final*". Cahier de l'environnement, Nature et Paysage. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP). Berne. 132 pp.

Bezzola G. R. et Hegg C. 2008: "*Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen*". Umwelt-Wissen. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). Bern und Birmensdorf. 426 pp.

Bonnard L., Roulier C., Thielen R., Gsteiger P., Cosandey A.-C., Hausammann A. et Rast S. 2008: "*Handbuch Erfolgskontrolle Auen*". Biotopinventar BAFU > Auen. Service conseil Zones alluviales / Auenberatungsstelle. Yverdon-les-Bains et Berne. CD.

Bonnard L. et Witschi F. 2012: "*Aarewasser. Raumbedarf der Aare zwischen Thun und Bern*". Interner Bericht. Im Auftrag vom Tiefbauamt Kanton Bern. 15 pp + annexes.

Büttiker B. 2008: "*Les poissons revendiquent le droit au libre déplacement*". Génie Biologique, **4**. 22-28.

Chow V.T. 1959: "*Open-channel hydraulics*". McGraw-Hill, New York, USA.

CORPEN Commission d'orientation pour des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement 2007: "*Les fonctions environnementales des zones tampon. Les bases scientifiques et techniques des fonctions de protection des eaux*". Paris. Rapport. 75 pp.

Degoutte G. 2007: "*Aide mémoire d'hydraulique à surface libre, chapitre 1*". Agroparistech. Paris. 32 pp.

Delarze R. 2005: "*Réseau Ecologique Cantonal pour la plaine du Rhône (REC) - Concept directeur*". Aigle. 51 pp.

Frontier S. und Pichod-Viale D. 1995: "*Ecosystèmes: structure, fonctionnement, évolution*". Collection d'écologie 21. Masson. Paris. 392 pp.

Frossard P.A., Prunier P., Evette A., Valé N. 2014: "*Géni'Alp – Génie végétal en rivière de montagne. Génie Biologique*". 14. 25-31. (Ouvrage téléchargeable sur <http://ouvrage.geni-alp.org>)

Gallandat J.-D., Gobat J.-M., Roulier Ch. 1993: "*Cartographie des zones alluviales d'importance nationale*". Cahier de l'environnement, 199. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP). Berne. 112 pp.

Gautier J.-N. 2009: "*L'espace de liberté des cours d'eau*". Colloque " Les grands cours d'eau dynamiques d'Europe et le concept d'espace de mobilité ". Moulins sur Allier. Conférence.

Gostner W. 2012: "*The Hydro-Morphological Index of Diversity: a Planning Tool for River Restoration Projects*". Thèse de Doctorat. EPFL. 238 pp.

Graf W.H. et Altinakar M.S. 2008: "*Hydraulique fluviale – écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple*". Traité de Génie Civil 16, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes PPUR, Lausanne. 627 pp.

Habersack H., Schober B., Krapesch G., Jäger E., Muhar S., Poppe M., Preis S., Weiss M. et Hauer C. 2010: "*Neue Ansätze im integrierten Hochwassermanagement : Floodplain Evaluation Matrix FEM, flussmorphologischer Raumbedarf FMRB und räumlich differenziertes Vegetationsmanagement VeMaflood*". Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft (öwaw) (1-2). 15-21.

Hausammann A., Gsteiger P., Roulier C., Righetti A. et Thielen R. 2005: "*Inventaire des zones alluviales*". Fiche zones alluviales n°11. Office fédéral de l'environnement des forêts et du paysage (OFEFP).

Heeb J., Schönborn A., Huber F. et Mosimann T. 2004: "*Festlegung und Sicherung des Raumbedarfs von Fliessgewässern - Grundlagenbericht - Entwurf 04*". Bern. 50 pp.

Hefti D. 2012: "*Wiederherstellung der Fischauf- und abwanderung bei Wasserkraftwerken-Checkliste Best practice*". Umwelt-Wissen / Fischerei Nr. 1210. Bundesamt für Umwelt (BAFU). Bern. 39 pp.

Honecker U., Kinsinger C., Löffler E. et Charrier P. 2004: "*Auenschutz- und Auenentwicklungskonzept für das Saarland - Floodplain protection and floodplain development concept for the Saarland*". Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, **48** (1). 12-21.

Jäggi M. 1979: «*Die Bildung von alternierenden Kiesbänken in geraden Flussläufen.*» Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) Nr. 36: 49 S.

Kirchhofer A., Breitenstein M. et Zaugg B. 2007: "*Liste rouge-Poissons et cyclostomes-Liste rouge des espèces menacées en Suisse*". L'environnement pratique. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Centre suisse de cartographie de la faune (CSCF). Berne. 44 pp.

Kuhn N. und Amiet R. 1988: "*Inventaire des Zones alluviales d'importance nationale. Projet mis en consultation.*" Sur mandat du Dépt. Féd. Intérieur. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Berne.

Löffler E., Honecker U., Kinsinger C., Bauer B., Charrier P., Kiefer S., Wolf P., Brenk Ch., Hirsch R. et Schwarzer A. 2003: "*Auenschutz- und Auenentwicklungskonzept für das Saarland*". Universität des Saarlandes. Saarbrücken-Dudweiler.

Malvoi J.-R. 1998: "*Bassin Rhône Méditerranée Corse. Guide technique no 2. Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau*". Agence de l'eau Rhône, Méditerranée, Corse. Lyon. 40 pp.

Nast M. 2006: "*Terre du lac - L'histoire de la correction des eaux du Jura*". Verein Schlossmuseum Nidau. Nidau. 192 pp.

Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Office fédéral de l'agriculture (OFAG) et Office fédéral de l'aménagement du territoire (OFAT) 2000: "*Un nouveau défi : réserver de l'espace pour les cours d'eau*". Berne. No. DIV-7513. 4 pp.

Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Office fédéral de l'agriculture (OFAG) et Office fédéral du développement territorial (OFDT) 2003: "*Idées directrices. Cours d'eau suisses. Pour une politique de gestion durable de nos eaux.*" Berne. 12 pp.

Office fédéral de l'environnement (OFEV) 2011: "*Rapport explicatif. Initiative parlementaire Protection et utilisation des eaux*". Berne. 42 pp.

Office fédéral de l'environnement (OFEV) 2012: "*Recueil des fiches sur l'aménagement et l'écologie des cours d'eau - Résultat du projet de "gestion intégrale des zones fluviales"*". Connaissance de l'environnement, Eaux de surfaces. Office fédéral de l'environnement (OFEV). Berne. 8 fiches pp.

Office fédéral de l'environnement (OFEV) 2018: "*Manuel sur les conventions-programmes 2019–2024 dans le domaine de l'environnement. Partie 8 : Explications spécifiques sur la convention-programme dans le domaine de la revitalisation des eaux"*". Communication de l'OFEV en tant qu'autorité d'exécution. Berne. UV 1817. 259 – 303.

Office fédéral de l'environnement (OFEV), version provisoire, novembre 2019: "*Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite*". 58 pages.

Paccaud G. et Roulier C. 2010: "*Espace nécessaire aux cours d'eau en méandres - Rapport final*". Service conseil Zones alluviales. Mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Yverdon-les-Bains. 101 pp.

Paccaud G. Roulier C. et Jäggi M. 2012: "*Bilan forestier. Pronostic de végétation dans les C3 de l'état futur*". Mandat du Service des routes et des cours d'eau du canton du Valais. 24 pp. + annexes.

Paccaud G. et Roulier C. 2013: "*Espace nécessaire aux grands cours d'eau de Suisse*". Service conseil Zones alluviales (SCZA). Yverdon-les-Bains. 108 pp.

Paccaud G. et Roulier C. 2013: "*Anwendung der Methodik "Gewässerraum für grosse Fliessgewässer" auf den Alpenrhein - Abschätzung des aktuellen Zustands und von zwei Kombinationsvarianten*". Auenberatungsstelle, im Auftrag vom Bundesamt für Umwelt, Abteilung Gefahrenprävention. Yverdon-les-Bains. 1-29.

Pedroli J.-C., Zaugg B. et Kirchhofer A. 1991: "*Atlas de distribution des poissons et cyclostomes de Suisse - Verbreitungsatlas der Fische und Rundmäuler der Schweiz*". Documenta Faunistica Helvetiae. Centre suisse de cartographie de la faune. Neuchâtel. 207 pp.

Piégay H., Pautou G. et Ruffinoni C. 2003: "*Les forêts riveraines des cours d'eau: écologie, fonctions et gestion*". Institut pour le développement forestier. Paris. 465 pp.

Plumettaz A.-C., Delarze R. et Hunziker C. 2010: "*Réseau écologique de la Basse Plaine du Rhône - Propositions de revitalisation*". Etat de Vaud - Service des forêts, faune et nature. Echallens, Aigle et Yverdon-les-Bains. 36 pp.

Rey Y., Nicoud S., G. Romailier Bureau d'études Impact SA 2008: "*Troisième correction du Rhône - Sécurité pour le futur - Rapport*".

d'impact sur l'environnement (1ère étape) - Plan d'aménagement pour information publique". Département des transports, de l'équipement et de l'environnement, Service des routes et des cours d'eau. Sion. 127 pp.

Rosgen D. 1994: "A classification of natural rivers". Pagosa Springs, USA. 31 pp.

Roulier C. et Vadi G. 2004: "Erfolgskontrolle der Vegetationsdynamik Rhone: Stand der Forschung 2004". Wasser, Energie, Luft, 96 (11/12). 309-314.

Roulier C., Rast S. et Hausammann A. 2007: "Plan d'aménagement du Rhône PA-R3 - Outil prédictif du développement des milieux riverains". Service conseil Zones alluviales. Yverdon-les-Bains. 71 pp.

Sophocleus M. 2002: "Interactions between groundwater and surface water: the state of the science". Hydrogeology journal. 16 pp.

Spreafico M., Hodel H.P., Kaspar H. 2001: "Rauheiten in ausgesuchten schweizerischen Fliessgewässern". Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG) - Série Eaux Nr 1. Berne. 104 pp.

Staas S. et Paulusch J. 2010: "Fischwanderung und die Bedeutung der Auenhabitate - Tagungsband". BfN-Skripten 280. Bundesamt für Naturschutz. Bonn-Bad Godesberg. 52 pp.

Thielen R., Tognola M., Roulier C. et Teuscher F. 2002: "2ème complément à l'inventaire fédéral des zones alluviales d'importance nationale. Rapport technique". Cahier de l'environnement. Nature et Paysage. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP). Berne. 143 pp.

Vadi G., Roulier C. et Gobat J.-M. 2006: "Erfolgskontrolle der Vegetationsdynamik - Thur : Stand der Forschung 2005". Wasser, Energie, Luft, 98 (3). 223-232.

Vischer D. 2003: "Histoire de la protection contre les crues en Suisse - Des origines jusqu'au 19e siècle". Eaux No.5. Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG). Bienne. 208 pp.

Ward J.V et Stanford J.A. 1995: "Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation". Regulated Rivers: Research and Management, 11. 105-119.

Ward J. V., Tockner K. et Schiemer F. 1999: "Biodiversity of floodplain river ecosystems: ecotones and connectivity". 1 pp.

Woolsey S., Weber C., Gonser T., Hoehn E., Hostmann M., Junker B., Roulier C., Schweizer S., Tiegs S., Tockner K. et Peter A. 2005: "Guide du suivi des projets de revitalisation fluviale - Une publication du Projet Rhône-Thur". EAWAG, WSL, EPFL, VAW-ETHZ. Kastanienbaum. 112 pp.

Yalin M. S. 1992: "*River Mechanics*". Pergamon Press, Oxford, 219 pp.
dans Requena Méndez P. 2008: "*Seitenerosion in Kiesführenden Flüssen. Prozessverständnis und quantitative Beschreibung*". Thèse de doctorat n°18074. ETH Zürich. 244 pp.

Yalin M. S., da Silva A. M. F. 2001: "*Fluvial Processes*". IAHR. Delft. 216 pp.

Zaugg B., Stucki P., Pedroli J.-C. et Kirchhofer A. 2003: "*Fauna Helvetica PISCES Atlas*". Fauna Helvetica 7. Centre suisse de cartographie de la faune (CSCF/SZKF). Neuchâtel. 233 pp.

Zeh H. 2010: "*Génie biologique et aménagement de cours d'eau: méthodes de construction – Guide pratique*". Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne. No. UW-1004. 59 pp.

Sites internet

Forschungsprojekt Rhone Thur (2001-2005):

<http://www.rhone-thur.eawag.ch/>

Laboratoire d'écologie des hydrosystèmes naturels et anthropisés de l'Université de Lyon :

<http://umr5023.univ-lyon1.fr/index.php?lang=fr&pid=28>)

Outil Grands Cours d'Eau :

<http://www.zones-alluviales.ch/OutilGCE/accueil-espace-ce-fr.html>

État des connaissances et définition de l'espace nécessaire dans les pays limitrophes

Ce chapitre présente la définition actuelle de l'espace cours d'eau dans les pays limitrophes à la Suisse. Il permet notamment d'identifier des éléments clés contribuant à déterminer le besoin d'espace des cours d'eau. Une attention particulière a été attachée à cerner l'utilité et les fonctions de cet espace.

ANNEXE 1

L'espace cours d'eau en France

Le Guide technique n°2 « *Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau* », (Malavoi et al. 1998) constitue une référence dans le domaine. Le guide propose de définir trois espaces emboîtés :

- un **espace de mobilité maximal**, qui correspond en général au fond de la vallée ; il s'agit de tout l'espace que pourrait occuper le cours d'eau à un moment donné s'il n'y avait pas de contraintes d'origine anthropique ;
- un **espace de mobilité fonctionnel**, qui est défini comme l'espace dont le cours d'eau a besoin pour fonctionner normalement, à savoir ajuster sa morphologie pour assurer un transit optimal des débits liquides et solides. Cet espace tient compte des contraintes anthropiques majeures ;
- un **espace de mobilité minimal**, qui tient compte des contraintes anthropiques secondaires (captages, axes de communications secondaires). L'espace minimum garantit que l'hydrosystème n'est pas péjoré par des problèmes d'incision ou autre.

La notion d'espace de mobilité rejoint, d'une certaine manière, l'idée de l'Ordonnance puisqu'on préconise que le cours d'eau doit assumer certaines fonctions, même si, pour Malavoi et al. (1998), les fonctions du cours d'eau se rapportent à la dynamique de l'eau et des sédiments. Retenons simplement que, d'un point de vue morphologique, il existe un espace avec une taille critique pour lequel le cours d'eau accomplit toutes ses fonctions, et cet espace est, dans la majorité des cas, inférieur à la largeur du fond de la vallée.

Le style fluvial naturel du cours d'eau doit être pris en compte pour déterminer son besoin d'espace. Une distinction est faite entre les cours d'eau à lits mobiles et ceux à lits fixes, ou du moins peu mobiles sur une échelle de temps humaine. Il n'est pas utile d'attribuer un espace de mobilité à un cours d'eau qui est, à l'état naturel, immobile. Parmi les cours d'eau à lit mobile, une distinction est faite entre les cours d'eau en méandres et les cours en tresses, pour lesquels le

besoin d'espace ne s'évalue pas de la même façon. Pour les cours en tresses, qui sont plus rares en France, Malavoi et al. (1998) recommandent une approche historique, alors que pour les cours en méandres, le couloir de l'espace de mobilité peut être défini d'après l'amplitude maximum des méandres.

ANNEXE 2

L'espace cours d'eau en Autriche

Habersack et al. (2010) proposent trois démarches développées dans le cadre d'un projet de recherche « FloodRisk II » :

- une matrice d'évaluation « Flood Plain Evaluation Matrix » qui prend en compte la présence ou l'absence de surfaces inondables atténuant les débits de crues à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau ;
- un besoin d'espace géomorphologique « Flussmorphologischer Raumbedarf » fondé sur la largeur du lit mise en place par les crues exceptionnelles ;
- un concept d'entretien de la végétation riveraine des cours d'eau.

La 2^e démarche est informative dans le cadre de la présente problématique. L'espace géomorphologique est la zone d'extension des crues exceptionnelles (HQ₁₀₀ – HQ₃₀₀) et occupe une large bande dans la plaine alluviale, voire toute la plaine ; il correspond à l'espace de mobilité de Malavoi et al. (1998). L'espace géomorphologique minimum recommandé par les auteurs constitue une bande de largeur minimum de 3 à 7 fois la largeur actuelle du cours d'eau. Contrairement à l'abaque applicable en Suisse, ce n'est pas la largeur naturelle du cours d'eau qui est prise en compte ; ainsi, une largeur de 3 fois la largeur du lit corrigé est donc très étroite, mais cette situation prévaut souvent en zone d'agglomération. Cet espace peut être comparé à l'espace minimum de Malavoi et al. (1998).

Habersack et al. (2010) émettent des recommandations afin de restaurer les habitats alluviaux typiques dans les secteurs présentant peu de contraintes et pour extensifier les utilisations agricoles dans les secteurs inondés par les crues HQ₃₀. Le transport solide est pris en considération : continuum du transfert, mise en place des formes géomorphologiques.

ANNEXE 3

L'espace cours d'eau en Allemagne

Honecker et al. (2004) ont développé un concept de protection et de développement des zones alluviales dans le Saarland (cf. aussi Löffler et al. 2003). Pour la définition de compartiments dans la plaine alluviale, les auteurs se fondent sur l'approche de Malavoi et al. (1998) et identifient un espace appelé « Maximalaue » qui englobe la plaine

alluviale dans son ensemble. Le « Entwicklungskorridor » (littéralement : couloir de développement) est une bande contenant le cours d'eau qui correspond à l'« espace de mobilité fonctionnel » de Malavoi et al. (1998). Selon Honecker et al. (2004), cette enveloppe, d'une largeur minimum de 30 m (y c. le cours d'eau), assure aussi la continuité longitudinale le long du cours d'eau. Des tronçons homogènes de cours d'eau sont délimités sur la base de la largeur des zones alluviales, de la sinuosité du cours d'eau, des confluences, des secteurs corrigés et bâtis.

Quelques exemples de cours d'eau d'importance moyenne (à l'échelle de l'Allemagne), à l'exemple de la Lippe (Nord-Westfalien), montrent que l'espace de mobilité fonctionnelle pris en considération englobe l'enveloppe de mobilité, à savoir la partie de la plaine parcourue par les méandres de cette rivière. Dans le cas de la Ruhr (Arnsberg im Sauerland), un cours d'eau corrigé de 30 m de largeur environ, un espace de mobilité fonctionnel de l'ordre de 2 à 3 fois la largeur du cours d'eau a été réinstallé dans un tronçon fortement urbanisé. Il en est de même de l'Isar dans la traversée de la ville de Munich. Sur un tronçon de la Nidda, une zone alluviale est recrée sur une longueur de 3,5 km ; l'espace dévolu au cours d'eau constitue une enveloppe d'une largeur de 6 à 7 fois la largeur du cours d'eau, en nature de boisements riverains et de champs agricoles principalement.

L'impression générale émergeant des projets de revitalisation de zones alluviales situés sur des cours d'eau allemands de taille moyenne (affluents du Rhin, de l'Elbe ou du Danube) est que l'élargissement du lit mineur intervient systématiquement (revitalisation) avec, dans certains cas, l'inondation périodique de surfaces adjacentes ; cependant, on ne distingue pas, dans la plupart des cas présentés, des bandes riveraines parallèles au cours d'eau pouvant être considérées comme un espace cours d'eau géré extensivement.

ANNEXE 4

Directive cadre sur l'eau

Le « bon état écologique des cours d'eau et des milieux aquatiques » est visé par la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) ; cette directive intègre la notion de continuité écologique. Des objectifs de qualité hydrologique et morphologique doivent correspondre totalement ou presque aux conditions qui seraient celles du milieu sans perturbations anthropogéniques.

La continuité écologique se définit par la libre circulation des espèces sauvages et le bon déroulement du transport naturel des sédiments. Restaurer la continuité écologique, c'est permettre aux rivières de suivre naturellement leur cours de l'amont vers l'aval (continuité longitudinale), mais aussi d'occuper leur lit majeur en période de crues (continuité transversale). Ainsi pour restaurer la continuité écologique

des cours d'eau, il faut s'intéresser à tous les types d'obstacles qui cloisonnent les cours d'eau, quel que soit leur taille ; sont ainsi concernés les ouvrages transversaux au lit mineur (barrages, buses, radiers de pont, etc.), mais aussi les aménagements barrant l'accès au lit majeur.

La Directive ne fixe par contre pas de normes précises concernant l'espace de liberté des cours d'eau.