Travail réalisé sur mandat de l'Office fédéral de l'Environnement, Division Eaux et Division Prévention des dangers

Espace nécessaire aux grands cours d'eau de Suisse

La Sarine et le village de Neirivue

1er juillet 2013

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

Rue des Pêcheurs 8A, 1400 Yverdon-les-Bains ***Service conseil Zones alluviales***

Espace nécessaire aux grands cours d'eau de Suisse

1	**Introduction**	**5**
2	**But du travail**	**6**
3	**Etat des connaissances**	**7**
3.1	L'espace cours d'eau en Suisse	7
3.2	L'espace cours d'eau en France	12
3.3	L'espace cours d'eau en Autriche	13
3.4	L'espace cours d'eau en Allemagne	14
3.5	Directive cadre sur l'eau	15
4	**Les fonctions de l'espace réservé aux eaux**	**15**
4.1	Milieu aquatique	17
4.1.1	*Transport de l'eau et des sédiments*	*17*
4.1.2	*Connectivité longitudinale aquatique*	*18*
4.1.3	*Capacité d'autoépuration*	*19*
4.1.4	*Diversité structurelle du fond du lit*	*19*
4.1.5	*Maintien des espèces typiques du milieu aquatique*	*20*
4.2	Milieu amphibien	21
4.2.1	*Connectivité transversale (ou latérale)*	*21*
4.2.2	*Alimentation des nappes phréatiques*	*22*
4.2.3	*Diversité structurelle du milieu amphibien*	*22*
4.3	Milieu terrestre	23
4.3.1	*Connectivité longitudinale terrestre*	*23*
4.3.2	*Effet tampon*	*25*
4.3.3	*Diversité structurelle du milieu terrestre*	*29*
4.3.4	*Dynamique d'inondation*	*30*
4.3.5	*Communautés typiques du milieu terrestre*	*30*
4.3.6	*Espèces typiques du milieu terrestre*	*36*
4.3.7	*Capacité de résilience des peuplements*	*37*
4.4	Fonctions sociales	38
4.4.1	*Espace récréatif*	*38*
4.4.2	*Paysage*	*38*
4.5	Conclusion	39

5 Style fluvial 40

5.1 Liste des styles fluviaux 40
5.2 Détermination du style fluvial d'un cours corrigé 41

6 Estimation des largeurs du fond du lit et des berges 42

6.1 La largeur naturelle du fond du lit 42
6.1.1 Approche historique 42
6.1.2 Approche par le débit morphogène et calcul hydraulique 42
6.2 Largeur naturelle des berges 46

7 Compartiments de l'espace réservé aux eaux 46

7.1 Espace de mobilité 46
7.2 Espace des berges 47
7.3 Zone inondable 47
7.4 Bande boisée 48
7.5 Bande extensive 48
7.6 Zone construite 48
7.7 Profil moyen 48

8 Procédure 50

8.1 Courbes de satisfaction 50
8.1.1 Milieu aquatique 50
8.1.2 Milieu amphibien 51
8.1.3 Milieu terrestre 52
8.2 Pondération des fonctions 57
8.2.1 Styles fluviaux 57
8.2.2 Importance relative des fonctions 57
8.3 Etapes de la procédure 58
8.3.1 Evaluation d'une situation connue 59
8.3.2 Définition de l'espace réservé à partir des objectifs écologiques 60
8.4 Analyse de sensibilité de quatre paramètres 61
8.4.1 Débit morphogène 61
8.4.2 Pente du cours d'eau 62
8.4.3 Pondération des fonctions naturelles 62
8.4.4 Style fluvial 63
8.4.5 Conclusion 64

9 Application à six cas d'étude 65

9.1 La Birse 65

9.1.1 *Style fluvial* *65*
9.1.2 *Estimation des paramètres de l'état naturel* *66*
9.1.3 *Objectif écologique* *66*
9.1.4 *Fonctiogramme de l'espace de mobilité* *66*
9.1.5 *Evaluation* *69*
9.2 L'Aar entre Büren et Soleure 71
9.2.1 *Style fluvial naturel* *71*
9.2.2 *Estimation des paramètres de l'état naturel* *72*
9.2.3 *Profils moyens* *74*
9.2.4 *Profil normal actuel* *75*
9.2.5 *Evaluation* *75*
9.3 La Kleine Emme à Malters 77
9.3.1 *Style fluvial* *77*
9.3.2 *Estimation des paramètres de l'état naturel* *78*
9.3.3 *Fonctiogramme de l'espace de mobilité* *79*
9.3.4 *Evaluation* *80*
9.4 La Maggia à Someo 83
9.4.1 *Style fluvial naturel* *83*
9.4.2 *Estimation des paramètres de l'état naturel* *83*
9.4.3 *Test de la validité de la procédure* *83*
9.4.4 *Commentaire des résultats* *89*
9.5 L'Aar entre Thoune et Berne 89
9.5.1 *Trois compartiments* *90*
9.5.2 *Secteur choisi* *90*
9.5.3 *Style fluvial* *90*
9.5.4 *Estimation des paramètres de l'état naturel* *91*
9.5.5 *Evaluation* *93*
9.5.6 *Evaluation des deux scénarios* *95*
9.6 La Sarine en amont du Lac de la Gruyère 96
9.6.1 *Evaluation du style fluvial naturel* *96*
9.6.2 *Estimation des paramètres de l'état naturel* *97*
9.6.3 *Profil moyen de l'état actuel* *99*
9.6.4 *Evaluation* *101*
9.6.5 *Commentaire* *101*
10 Conclusions 102
11 Bibliographie 105

Résumé

L'étude présente des bases théoriques sur le besoin d'espace des cours d'eau dont la largeur du fond du lit est de plus de 15m et précise l'utilité et les fonctions de cet espace. La liste des fonctions naturelles attendues des cours d'eau est dressée et discutée afin d'identifier les fonctions qui dépendent de l'espace à disposition.

Après ce tri, une méthode d'évaluation donne le pourcentage des fonctions naturelles remplies selon l'espace à disposition. Ce n'est donc pas une approche binaire de type « espace suffisant » ou « espace insuffisant », mais une approche continue montrant que, jusqu'à un certain seuil, plus l'espace à disposition est important, plus le nombre de fonctions naturelles satisfaites est élevé.

Enfin, la procédure est appliquée à six cas d'étude pour illustrer son fonctionnement et mettre en évidence 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.

1 Introduction

La nouvelle Ordonnance fédérale sur la protection des eaux (OEaux, état au 1er août 2011) demande aux cantons de définir un espace réservé aux eaux. La délimitation de cet espace est précisée pour les cours d'eau dont la largeur naturelle du lit est inférieure à 15m (art. 41a) ainsi que pour les cours d'eau situés dans un biotope d'importance nationale ou cantonale. En revanche, pour des cours d'eau dont la largeur du fond du lit est de plus de 15m, cette délimitation doit se faire au cas par cas, par les cantons.

Toujours à l'art. 41a, l'Ordonnance mentionne aussi que l'espace réservé aux cours d'eau doit être augmenté, si une revitalisation le requiert. En effet, l'espace doit être réservé pour des revitalisations actuelles mais également futures ; même si un projet n'a lieu que dans 20 ans, l'espace doit être réservé dès maintenant.

Une des difficultés majeures de l'application de cette disposition est le manque de bases scientifiques pour définir le besoin d'espace des revitalisations. L'ordonnance précise que l'espace pour les revitalisations doit au moins atteindre la largeur minimum pour la biodiversité, afin que le projet bénéficie de la subvention fédérale maximale, mais cette notion de « largeur minimum pour la biodiversité » reste floue pour les grands cours d'eau.

L'article 54b al.4 de l'OEaux précise que le taux de subventionnement de la Confédération pour un projet de revitalisation peut être compris entre 35% et 80%. Ce taux dépend de l'importance et de la qualité des projets qui sont évalués sur la base de 6 critères listés dans l'art. 54b al.1. Une fois encore, les bases scientifiques actuelles sont insuffisantes pour évaluer, a priori, la qualité d'un projet de revitalisation, et en particulier si l'espace réservé au cours d'eau est suffisant. Ce manque de bases rend l'application de la loi difficile et délicate, notamment à cause d'importants enjeux financiers et de nombreuses pressions liées à l'utilisation du sol.

La procédure proposée est une approche systématique, mais pragmatique, pour évaluer 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.

Le terme de « grand cours d'eau » s'applique à un cours d'eau dont la largeur naturelle du fond du lit est de 15m ou plus ; ainsi, un cours d'eau corrigé de 8m de largeur est susceptible d'appartenir à cette catégorie. Dans les faits, les moyens et les grands cours d'eau sont donc concernés par la présente étude.

2 But du travail

La présente étude collecte les bases théoriques sur le besoin d'espace des cours d'eau dont la largeur du fond du lit est de plus de 15m et fournit des recommandations et une aide à la décision pour la délimitation de cet espace en tenant compte des besoins de la revitalisation.

Une procédure est proposée ; elle se fonde sur les principales fonctions de l'espace cours d'eau, traduites en courbes de satisfaction et aboutissant à une note. Elle permet de définir un espace minimum, optimum et maximum pour un moyen ou un grand cours d'eau. Par la suite, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) pourrait utiliser le résultat de l'évaluation pour définir le % de subvention fédérale.

Le destinataire de l'étude est l'Office fédéral de l'environnement. Par la suite, cet office identifiera la forme à apporter au document pour constituer une aide aux administrations cantonales et fédérales chargées de l'aménagement des cours d'eau et de la protection des eaux. Les administrations en charge de la protection de la nature le long des cours d'eau et dans les zones alluviales seront aussi intéressées.

3 Etat des connaissances

Ce chapitre présente un résumé de la documentation consultée sur le thème de l'espace cours d'eau et des revitalisations fluviales. Le but de cette revue est d'identifier des éléments clés contribuant à déterminer le besoin d'espace des cours d'eau. Nous nous sommes en particulier attachés à cerner l'utilité et les fonctions de cet espace.

3.1 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) avaient alors collaboré pour produire une brochure dépliante intitulée « *Réserver l'espace pour les cours d'eau* ». Cette brochure contient notamment un abaque, bien connu actuellement, permettant de déterminer 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 15m.

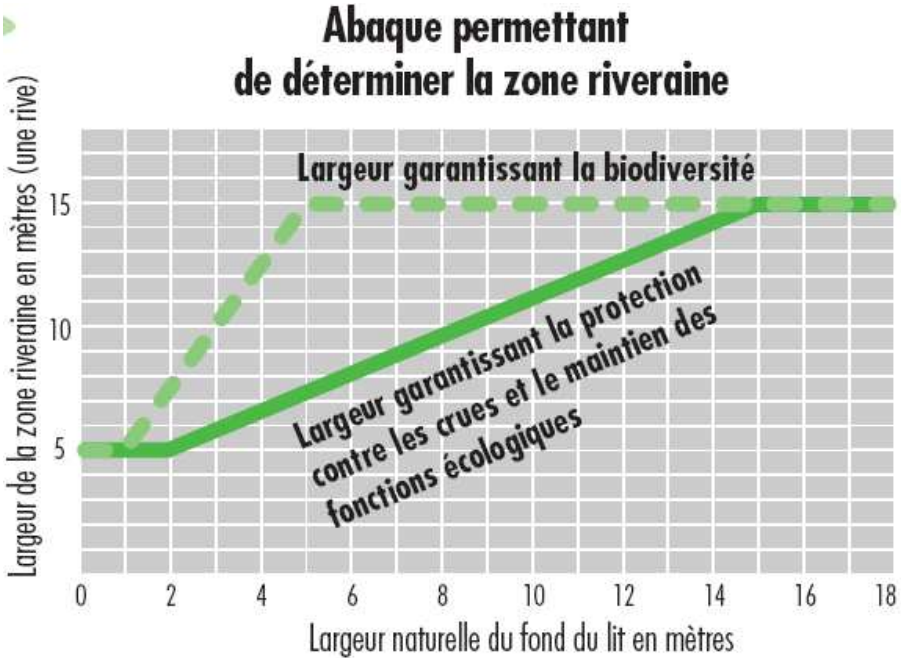


Figure 1. Abaque servant à réserver l'espace des cours d'eau de moins de 15m de largeur.

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.

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. On peut se demander quelle est la différence entre ces deux notions, car, sémantiquement, la distinction entre *fonctions écologiques* et *biodiversité* n'est pas évidente. Qu'est-ce qui est compris dans la biodiversité, mais pas dans les fonctions écologiques qui justifie un espace supplémentaire ? La brochure de 2000 n'y répond pas précisément, elle avance simplement les éléments suivants : « 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 tirets) ». Même si la distinction entre ces deux notions reste floue, elle n'est pas primordiale pour notre étude, car dès 15m, les deux lignes sont confondues.

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. Elle ne parle pas des cours en tresses. Un espace récréatif peut se trouver dans la bande de divagation juste en dehors de la bande riveraine. Au final, le document dresse une liste de fonctions de l'espace cours d'eau :

- Transport de l'eau et des sédiments ;
- Création et mise en réseau de biotopes ;
- Réduction de l'apport en nutriments ;
- Capacité d'autoépuration ;
- Espace récréatif.

Ce document contient différentes notions relatives à l'espace des cours d'eau. Le fond du lit et la zone riveraine constituent l'espace du cours d'eau qui est entouré d'un **espace récréatif**, ces deux espaces pouvant être inclus dans la bande de divagation.

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 nous rapprochent 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.

On note des précisions sur les fonctions de la bande de divagation : « Celle-ci vise à la formation de méandres et de bras latéraux ainsi qu'à tolérer une érosion modérée des rives de manière à ce que le tracé s'intègre le plus naturellement possible dans le paysage ». 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 régions classées d'importance nationale ou faisant partie d'un inventaire fédéral, on préconise la courbe de la biodiversité comme espace minimum, voire une bande de divagation (dans la mesure où des objectifs ont été fixés à ce sujet).

La récente révision de la Loi fédérale sur la protection des eaux et de son Ordonnance (état au 1er août 2011) marque une étape importante de la gestion des cours d'eau, car plusieurs principes sont maintenant inscrits dans la loi et sont contraignants pour les cantons, les propriétaires et les exploitants de terrain situés dans l'espace cours d'eau.

Les principales nouveautés qui sont en lien avec notre étude concernent l'obligation pour les cantons de délimiter un espace réservé aux eaux (OEaux art. 41a) et le subventionnement des mesures de revitalisation (OEaux art. 54b). L'objectif de ce chapitre est d'identifier les éléments et les définitions qui apportent des précisions sur l'espace cours d'eau et ses fonctions, d'après la Loi, l'Ordonnance et le rapport explicatif de l'OFEV sur l'initiative parlementaire constituant le contre projet indirect à l'initiative « Eaux vivantes ».

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.

Il est intéressant de constater qu'on parle ici d'un rétablissement des *fonctions naturelles*, et non plus de fonctions écologiques ou de maintien de la biodiversité. Ces fonctions, importantes pour notre étude, sont développées dans le rapport explicatif de l'initiative parlementaire. La protection contre les crues et l'utilisation des eaux sont des notions bien définies et ne nécessitent pas de développements supplémentaires, nous y reviendrons brièvement au chapitre 4.

Voici un extrait du rapport explicatif de l'initiative parlementaire qui donne des précisions sur l'utilité et les fonctions de l'espace à réserver aux eaux :

« L'art. 41*a* 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'assolement, 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.

Cette fonction n'avait jamais été mentionnée de façon explicite dans les documents précédents, et elle nécessitera quelques approfondissements dans les chapitres suivants.

Nous nous intéresserons aussi aux informations sur les revitalisations. En effet, l'art 41a 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 ». Cela prouve bien que les revitalisations et l'espace réservé au cours d'eau sont fortement liés et interdépendants.

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

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

Le rapport explicatif sur l'initiative parlementaire précise les buts des revitalisations :

« A long terme, c'est-à-dire dans un intervalle de trois générations environ, les revitalisations doivent rétablir les fonctions naturelles des eaux à revitaliser en priorité. Ces revitalisations visent ainsi à restaurer des cours d'eau proches de l'état naturel, avec la **dynamique** qui les caractérise (**morphologie**, régime des débits et du charriage) et des étendues d'eau proches de l'état naturel (berges). Les eaux doivent être colonisées par des **biocénoses** d'aspect naturel et **typiques** de la station, formant des **peuplements pouvant se reproduire et se réguler** d'eux-mêmes, possédant une **capacité de résilience** (capacité de récupérer après des perturbations d'origine extérieure) et étant interconnectés. Les eaux sont ainsi à même de remplir durablement leurs fonctions d'écosystèmes (**eau propre**, **alimentation des nappes** d'eaux souterraines, **habitat pour la flore et la faune**, **lieux de détente**, etc.). Il convient de plus de garantir que les eaux forment des éléments marquants **du paysage**. »

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 :

- L'alimentation des nappes phréatiques,
- L'autorégulation et la capacité de résilience des peuplements.

Ces textes de loi apportent beaucoup de précisions sur l'utilité et les fonctions de l'espace réservé aux cours d'eau. Elles nous serviront de base pour définir quantitativement le besoin d'espace des grands cours d'eau.

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 nous intéresse car il donne une liste de fonctions naturelles obtenues suite à une revitalisation et une méthode d'évaluation basée sur différents indicateurs.

Le niveau de précision du suivi EAWAG est supérieur à celui des documents de la Confédération, car le suivi propose un système d'évaluations quantitatives fondées sur des mesures et conduisant à des notes. Prenons, par exemple, la fonction « développement d'espèces typiques de la station ». Les documents précédents donnent peu de précision à ce sujet. Ils ne disent pas de quelles espèces il s'agit, ni même si ce sont des espèces animales ou végétales. Ce sont probablement les deux, mais pour définir un besoin d'espace, il est nécessaire de préciser de quelles espèces on

parle. 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.

Nous reviendrons sur certains indicateurs de ce manuel car ils peuvent nous aider à définir et à évaluer le besoin d'espace de certaines fonctions naturelles.

Dans le domaine de la planification, plusieurs importants cours d'eau de Suisse en cours de réaménagement ont fait l'objet de réflexions concernant l'espace qui leur est nécessaire. Parmi ceux-ci, le Rhône sur le territoire valaisan et vaudois ainsi que l'Aar entre Thoune et Berne ont fait l'objet d'une procédure relative au besoin d'espace. Les résultats de ces deux travaux sont valorisés dans ce rapport.

3.2 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. L'auteur 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.

Plusieurs éléments de ce Guide technique sont intéressants et peuvent être utiles à notre problématique. 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, 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 vallée.

Malavoi recommande de tenir compte du style fluvial naturel du cours d'eau pour déterminer son besoin d'espace. Il distingue les cours d'eau à lits mobiles et ceux à lits fixes ou du moins peu mobiles sur une échelle de temps humaine. Bien évidemment, il considère qu'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, il distingue 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, il recommande 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.

3.3 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 notre 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 (1998). L'espace géomorphologique minimum recommandé par les auteurs constitue une bande de largeur minimum de 3-7 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 (op. cit).

Des recommandations sont émises pour 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.

3.4 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. Pour la définition de compartiments dans la plaine alluviale, ils se fondent sur l'approche de Malavoi (1998) et identifient un espace appelé « Maximalaue » qui englobe la plaine alluviale dans son ensemble. Le « Entwicklungskorridor » est une bande contenant le cours d'eau qui correspond à l'« espace de mobilité fonctionnel » de Malavoi (op.cit.). Cette enveloppe, d'une largeur minimum de 30m (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.

Quatre workshops organisés en Allemagne en 2011 (Wege zu Ökologischer Hochwasserschutz und Auenschutz – Konzepte und Beispiele aus der Praxis, divers auteurs) ont présenté des projets de renaturation de cours d'eau et de revitalisation de zones alluviales. Les thèmes étaient plus orientés « zones alluviales » que « cours d'eau » mais les différentes conférences reflètent bien l'approche prévalant en Allemagne. Les très grands fleuves sont prioritairement concernés en raison des inondations récentes du Rhin et de l'Elbe ; le long de ceux-ci, la problématique des bassins de rétention est fortement insérée dans la revitalisation des zones alluviales.

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 (Birgit Beckers & Joachim Drüke: Maßnahmen zur Renaturierung des Wasserhaushaltes und der Abflussdynamik am Beispiel der Lippeaue). Dans le cas de la Ruhr (Arnsberg im Sauerland), un cours d'eau corrigé de 30m 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 (Dr. Gotthard Scheja, Umweltbüro Stadt Arnsberg). Il en est de même de l'Isar dans la traversée de la ville de Münich (Daniela Schaufuß, Baureferat (Ingenieurbau). Sur un tronçon de la Nidda (Land Hessen), une zone alluviale est recréée sur une longueur de 3,5 km ; l'espace dévolu au cours d'eau constitue une enveloppe d'une largeur de 6-7 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) et présentés lors de ces 4 colloques 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.

3.5 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 biologiques 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, quelque soit leur taille ; sont ainsi concernés les ouvrages transversaux au lit mineur (barrages, buses, radiers de pont,…), 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.

4 Les 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 cours d'eau dont la largeur naturelle du lit est de plus de 15m, de manière à remplir les fonctions écologiques du cours d'eau. Cet espace doit être fixé selon des considérations basées 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, rappelons-le, énonce les buts de l'espace réservé aux eaux (LEaux art. 36a), qui sont de garantir :

a. leurs fonctions naturelles;

b. la protection contre les crues;

c. leur utilisation.

Les développements de cette étude concernent essentiellement le premier point, à savoir les fonctions naturelles. En effet, c'est le thème

le moins documenté et le plus vaste, car les fonctions naturelles des cours d'eau sont très variées et méritent d'être analysées en détail.

La **protection contre les crues** est bien entendu 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 avant tout 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, 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 notre procédure systématique. Ces aménagements, et l'espace qu'ils requièrent, devront faire l'objet d'une planification spécifique.

Le tableau récapitulatif ci-dessous contient les différentes **fonctions naturelles** de l'espace réservé aux eaux citées dans les documents de référence (voir chapitre 3.1).

	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.

Dans les chapitres qui suivent, nous allons aborder plus en détail les différentes fonctions naturelles et identifier celles qui nous aideront à définir le besoin d'espace des grands cours d'eau.

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 de l'eau est nécessaire pour assurer la protection contre les crues. Dans l'abaque, valable pour les cours d'eau dont la largeur 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, car nous savons que d'autres paramètres doivent être considérés, comme la rugosité du lit ou la pente du terrain.

De plus, 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. 4) 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, 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, et qu'il n'y a pas d'obstacle dans le lit du cours d'eau, le transport des sédiments est assuré. Cette fonction de transport (contrairement au dépôt de sédiments) n'est pas corrélée positivement avec l'espace à disposition du cours d'eau. On peut même dire que le transport de sédiments est 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 (voir chapitre 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 largeur assure aussi une meilleure protection contre les crues. Dans le cas de rivières corrigées, cette fonction sera assurée si les conditions requises par la sécurité sont remplies.

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 et, à long terme, la pérennité de l'espèce (de poisson) dépendent intimement des possibilités de déplacement le long du cours d'eau principal et de ses affluents. Cet auteur rappelle aussi (comm. orale) qu'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 génèrent des zones de turbulence et font baisser la vitesse du courant. Les poissons sont capables d'exploiter des champs de vitesses variables, voire des contre-courants, pour remonter les rivières avec un minimum d'efforts.

La connectivité longitudinale est aussi très importante pour d'autres organismes aquatiques ou de l'interface terre-eau du lit mineur comme le Criquet des Iscles (*Chorthippus pullus*) ou la Myricaire d'Allemagne (*Myricaria germanica*) (Werth et al. in OFEV, 2012).

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, 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 et le nombre d'habitats conditionnent la diversité structurelle des milieux aquatiques. Certains travaux (Gostner 2012) ont montré que les rivières naturelles avec des structures diversifiées étaient aptes à offrir des habitats en permanence, 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 une dizaine de 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. 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. Les cours d'eau corrigés avec un espace insuffisant 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. D'après l'OEaux, l'espace réservé au cours d'eau doit être supérieur à la largeur naturelle du fond du lit (mis à part quelques exceptions en zones densément bâties).

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.

4.1.5 Maintien des espèces typiques du milieu aquatique

Les espèces typiques les plus significatives des milieux aquatiques 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 5m de large, les vairons de 7m et les chevaines de 9m. Par contre, on sait que les exigences des poissons diffèrent selon les espèces, 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.

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).

Le Laboratoire d'écologie des hydrosystèmes naturels et anthropisés de l'Université de Lyon (site internet dans la bibliographie) étudie les différentes formes de connectivités dans les écosystèmes. Il constate notamment que les végétaux, grâce à leurs exigences écologiques, permettent d'établir des cartes de connectivité hydrologique des milieux aquatiques et des paysages 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.

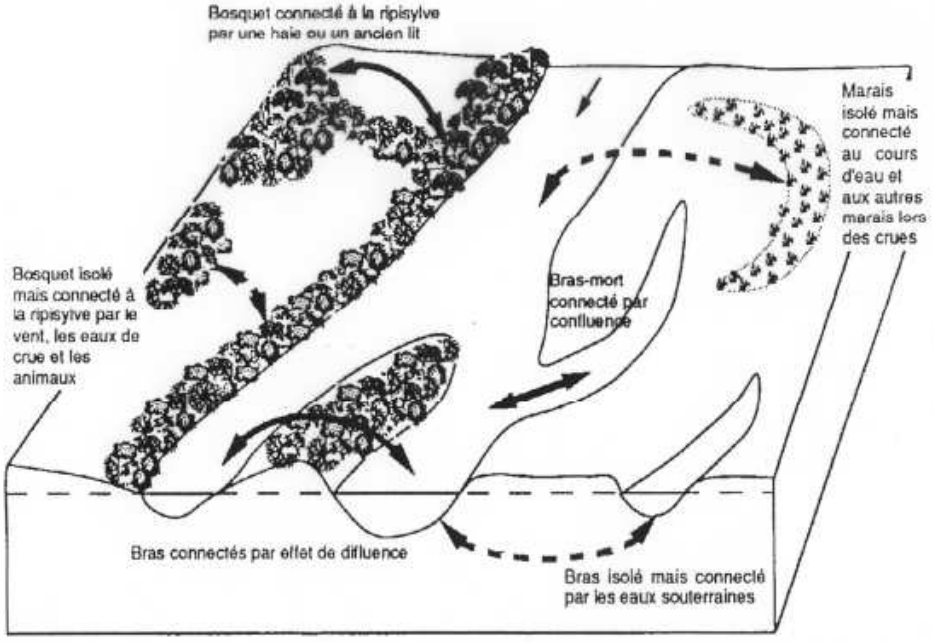


Figure 2. Connexions participant à la connectivité latérale. (Gautier 2009).

La figure 2 illustre la complexité des connections latérales liées à un cours d'eau. A défaut de renseignements plus précis pour mesurer la connectivité, nous supposons que la connectivité transversale est en partie incluse dans la qualité des structures des berges (diversité structurelle du milieu amphibien, voir chapitre 4.2.3) et en partie dans la connectivité longitudinale terrestre (voir chapitre 4.3.1).

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. Mais elle dépend aussi d'autres paramètres, notamment du régime des débits : il faut des crues 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.

Nous avons affecté cette fonction prioritairement au milieu amphibien, car nous nous référons à une situation courante, dans laquelle le fond du lit est plus bas que le niveau moyen de la nappe phréatique, donc le substrat situé sous le fond du lit est saturé en eau. Dans cette situation, l'alimentation des nappes se produit lorsque que le niveau d'eau dans le cours d'eau est plus élevé que celui de la nappe, et le transfert hydrique se fait 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 les 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.

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 est de grande importance 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. 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). Ces dernières ont un besoin d'un espace supérieur à des stabilisations dures de type enrochement longitudinal ou digue en béton.

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. (in OFEV 2012) présentent des distances de dispersion de quelques organismes riverains mais sans préciser en détail les besoins des organismes

pour se déplacer. Roulier et al. (2007) ont aussi 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 utilisent en général d'autres tracés que ceux du cours d'eau. 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 CSCF, sont citées pour évaluer la fonctionnalité du réseau.

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

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

Le réseau écologique vaudois 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 réservé 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 dépendante de la structure du peuplement végétal davantage que de sa qualité. 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. Nous aborderons en particulier quatre types d'intrants, pour lesquels nous avons des données. Il s'agit des matières en suspension (MES), du phosphore, de l'azote et des produits phytosanitaires. Les résultats présentés ci-après sont issus d'un rapport du Comité d'orientation pour des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement (CORPEN 2007). CORPEN est une instance française d'analyse et d'expertise dans le domaine des pratiques agricoles, dépendante du Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie.

Les matières en suspension (MES)

Il ne s'agit pas de la substance la plus problématique, mais c'est celle pour laquelle le fonctionnement de la zone tampon est le plus simple à décrire. 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.

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 maximum 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 subsuperficielle. 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.

Le phosphore

Le phosphore n'est pas un élément très toxique, par contre il peut poser des problèmes d'eutrophisation, même à des concentrations relativement faibles (quelques dizaines de µg/l). Les sources de phosphores sont diverses (activités industrielles et domestiques, bâtiments d'élevage). Les zones tampons constituent une protection efficace contre le phosphore contenu dans les eaux de ruissellement qui lessivent les 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 c'est la seule forme sous laquelle il est directement biodisponible. Le phosphore particulaire est, quant à lui, fixé sur des particules de sols. L'eau qui s'infiltre 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 µg/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.

Les produits phytosanitaires

Les produits tels que des insecticides, 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 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, on ne peut pas dire qu'il y ait un groupe d'espèces qui soit meilleur que les autres. Chaque groupe 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 de sa destruction par les gouttes de pluies. La dénitrification est assurée par la plupart des végétaux sauf les résineux. D'après le rapport CORPEN, 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 il n'y a pas encore beaucoup d'études sur le sujet. A défaut de renseignements plus précis et par simplification, nous considérerons 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. Mais l'efficacité de la zone tampon dépend 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 très vite 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. 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. Une zone tampon n'est pas non plus utile si les précipitations ne ruissellent pas en direction du cours d'eau.

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 du polluant 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

Actuellement en Suisse selon l'art. 7 de l'Ordonnance sur les paiements directs (version 2012), des zones tampons de 6m 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 (6m) et leur longueur pendant toute l'année. Tout produit phytosanitaire est interdit sur une largeur minimale de 6m et tout épandage d'engrais est interdit sur une largeur de 3m. Si le cours d'eau est bordé d'une haie ou berge boisée continue, la mesure des 6m 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 3m, sans fumure ni produits phytosanitaires (Agridea 2009).

Dans le but de généraliser la procédure, nous présenterons des valeurs basées sur des expériences en conditions moyennes. 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	Produits phytosanitaires

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

Par la suite, nous considérerons que l'effet filtre est satisfait à 100% avec une bande tampon de 20m de largeur.

4.3.3 Diversité structurelle du milieu terrestre

La dynamique de rajeunissement (par les processus d'érosion et de dépôt de sédiments) 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.

Les structures du milieu terrestre dépendent du style fluvial du cours d'eau ainsi que des sédiments transportés. On associera prioritairement les terrasses alluviales aux cours en tresses et les bras morts aux cours d'eau en méandres, même s'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 Q5) 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.

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. 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 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.

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 Q1 ou Q2.

4.3.5 Communautés typiques du milieu terrestre

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

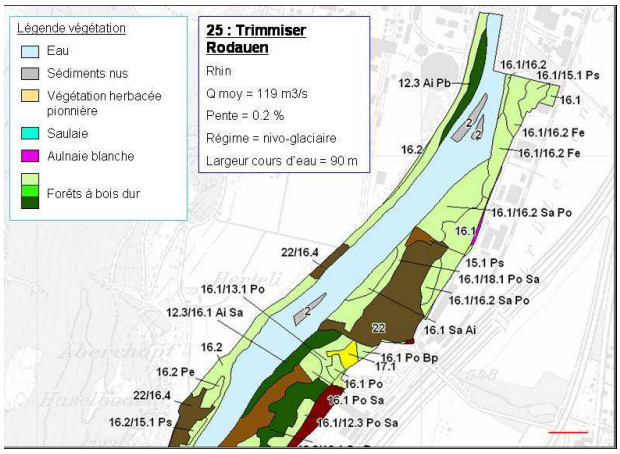
Nous avions présenté en 2004 un résultat pratique de l'étude de 9 transects de la végétation au bord du Rhône et de la Thur dans le cadre du « *Forschungsprojekt Rhone-Thur* » (2001-2005). Les résultats établissent de manière empirique et générale la relation entre le facteur d'élargissement des deux cours d'eau corrigés (Rhône, Thur) et la diversité de la végétation colonisant les zones élargies (Roulier et Vadi 2004, Vadi et al. 2006).

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

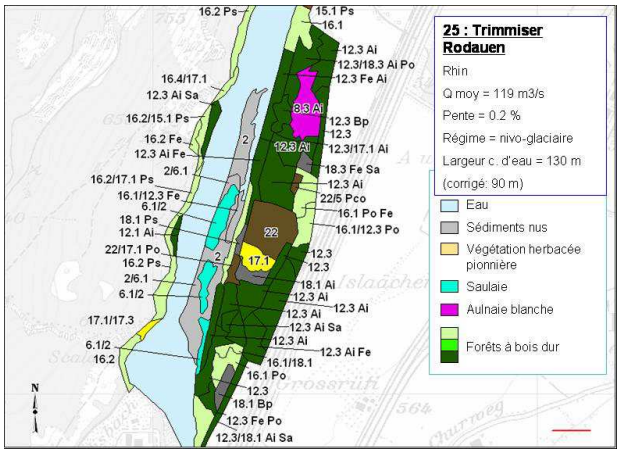
4.3.5.2 Approche par les cartes de la végétation : le Rhin aux Grisons

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 de 1987 jusqu'à actuellement. Cela permet de comparer les zones alluviales entre elles et de documenter leur évolution temporelle.

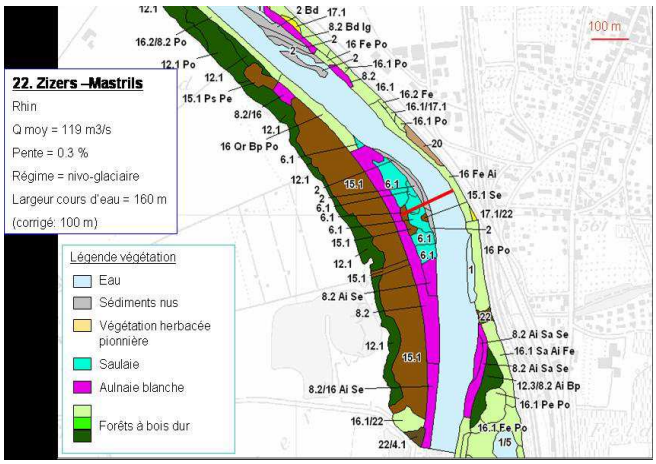
Pour les besoins de la 3^{e} correction du Rhône, on a examiné des secteurs représentatifs du Rhin entre Rhäzüns et Mastrils. A titre d'exemple, six situations sont présentées et sommairement interprétées ci-dessous.



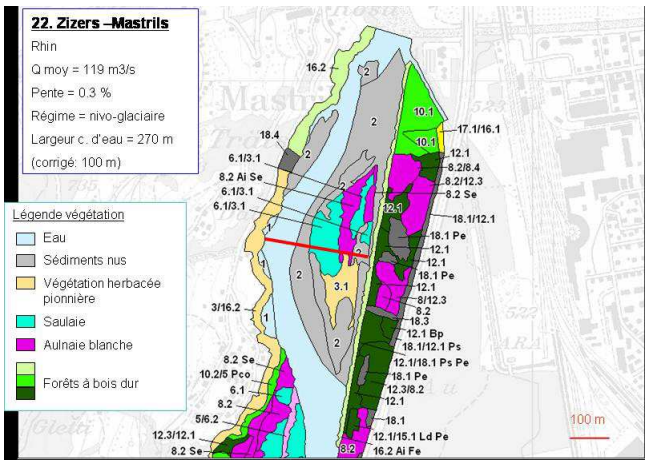
Facteur d'élargissement : 1. Bancs de sédiments nus



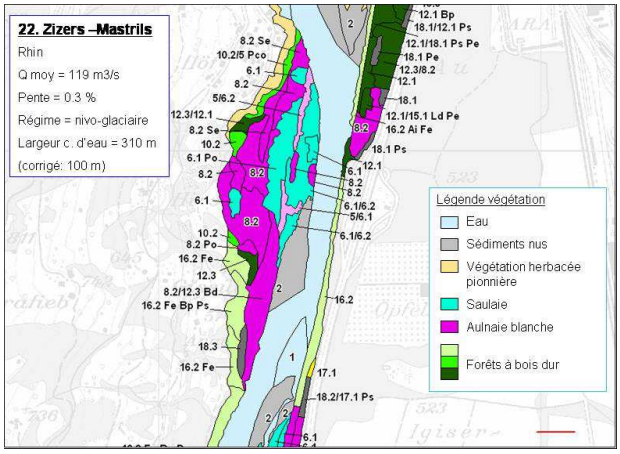
Facteur d'élargissement : env. 1.4. Apparition de la saulaie



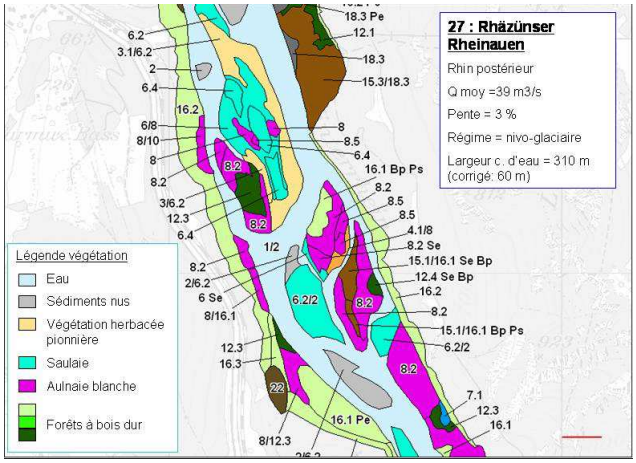
Facteur d'élargissement : env. 1.6 et courbe interne. Apparition de la saulaie et de l'aulnaie blanche



Facteur d'élargissement : env. 2.7. Apparition de la saulaie et de l'aulnaie blanche



Facteur d'élargissement : env. 3.1. Apparition de la saulaie et de l'aulnaie blanche et de surfaces de forêt à bois durs



Facteur d'élargissement : env. 5.1. Système en tresses. Apparition de la saulaie, de l'aulnaie blanche et de surfaces de forêt à bois durs et de pinède (unité 15.1)

En résumé :

Lit mineur corrigé non élargi	Apparition de bancs de sédiments nus lors des basses eaux
Lit mineur corrigé élargi 1.4 à 1.6X	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 3.1X	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 élargissement de 5X le lit mineur corrigé	**Formations alluviales herbacées, à bois tendre et à bois durs,** compartiments xériques (prairies sèches, pinèdes)

Cette approche empirique présente quelques limites ; elle ne distingue pas les styles en méandres et en tresses ; de plus, l'on ne connaît pas précisément la largeur naturelle du fond du lit dans les cas présentés. Par ailleurs, elle décrit une situation évolutive de la végétation du lit. Malgré cela, elle met en évidence globalement le besoin d'espace des formations alluviales typiques.

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

Bonnard et Witschy (2012) ont évalué le besoin d'espace de la végétation alluviale le long de l'Aar entre Thoune et Berne. Pour ce faire, ces deux 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 résultat des mesures des largeurs moyennes et maximales des formations colonisant les deux rives figure ci-dessous :

Végétation	**Largeur moyenne [m]**	**Largeur maximale [m]**
Sédiments nus	6.88	12
Communautés pionnières herbacées	21.53	64
Formations à bois tendres	20.27	119
Formations à bois durs	31.26	133
Bas-marais	28.05	176

Tableau 3. Largeurs moyennes et maximales des formations alluviales.

Les valeurs moyennes semblent les plus représentatives ; les valeurs médianes, non représentées sont toutes inférieures aux valeurs moyennes. A fin 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 40-80m par les hydrauliciens. La largeur de la bande

riveraine (une rive) apte à abriter la zonation végétale jusqu'aux formations à bois tendre est de 50m (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 occupent les bras morts et les dépressions humides et inondées mises en place par le cours d'eau dans les grands systèmes alluviaux collinéens du Moyen-Pays. 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 3ème correction du Rhône, les exigences surfaciques de deux 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). A 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,
- Groupement 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 ci-dessous présente 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 sont aussi présentées.

<table>
<tr><th colspan="2">Formation alluviale</th><th>Code selon outil</th><th>Largeur min (m)</th><th>Surface min (m^2)</th></tr>
<tr><td colspan="2">Formations herbacées pionnières des alluvions</td><td>Al 1</td><td>15</td><td>1500</td></tr>
<tr><td>Fourré de saules, argousier, myricaire</td><td>Unité cible 6.2</td><td>Al 2.1</td><td>15</td><td>1500</td></tr>
<tr><td>Fourré d'aulne blanc</td><td rowspan="2">Unité cible 8</td><td>Al 2.2</td><td rowspan="2">30</td><td rowspan="2">8000</td></tr>
<tr><td>Forêt d'aulne blanc dynamique</td><td>Al 2.3</td></tr>
<tr><td colspan="2">Forêt d'aulne blanc à peupliers</td><td>Al 3.1</td><td rowspan="2">30</td><td rowspan="2">3000</td></tr>
<tr><td colspan="2">Forêt d'aulne blanc stable</td><td>Al 3.2</td></tr>
<tr><td colspan="2">Forêt de frêne</td><td>Al 4</td><td>30</td><td>3000</td></tr>
</table>

Tableau 4. Largeurs et surfaces minimales des formations végétales.

Les milieux cibles sont présentés en couleur. Ces valeurs minimales ont servi à fixer la largeur minimale de l'espace dynamique situé entre les 2 digues futures du Rhône. Sur ces bases, le gabarit moyen du nouveau Rhône a été fixé à 1.6x la largeur actuelle entre les 2 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 doit égaler au moins le double de la hauteur des buissons ou des arbres dominants constituant cette formation. Ainsi, ces valeurs permettent à des **surfaces** 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 phytocénoses 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 collectées dans les grands systèmes alluviaux des étages collinéen et montagnard des Alpes suisses et également dans les systèmes collinéens du Moyen-Pays. En l'état actuel, on peut considérer que cet échantillonnage est représentatif.

Afin de fixer des valeurs de références pour le développement des communautés végétales typiques, nous proposons 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 48.68m : 40-80m) (Aar, Reuss, Rhône GE) : valeurs moyennes
- 1-1.5x la largeur de régime (= largeur naturelle du fond du lit) (2x45m : 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 1x la ***largeur à pleins bords*. La largeur maximale de l'espace de mobilité est de 2.5x la ***largeur à pleins bords*.

** L'**espace de mobilité** est l'espace compris entre deux stabilisations de berge. Il désigne l'ensemble de la surface qui est remaniée par le déplacement du lit du cours d'eau (voir chapitre 7.1).*

*** La **largeur à pleins bords** est prise comme référence ; elle est calculée dans la procédure et contient les milieux aquatiques et amphibiens ; elle est supérieure à la largeur naturelle du fond du lit et équivalente ou supérieure à la largeur de régime, selon la définition de cette dernière.*

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.

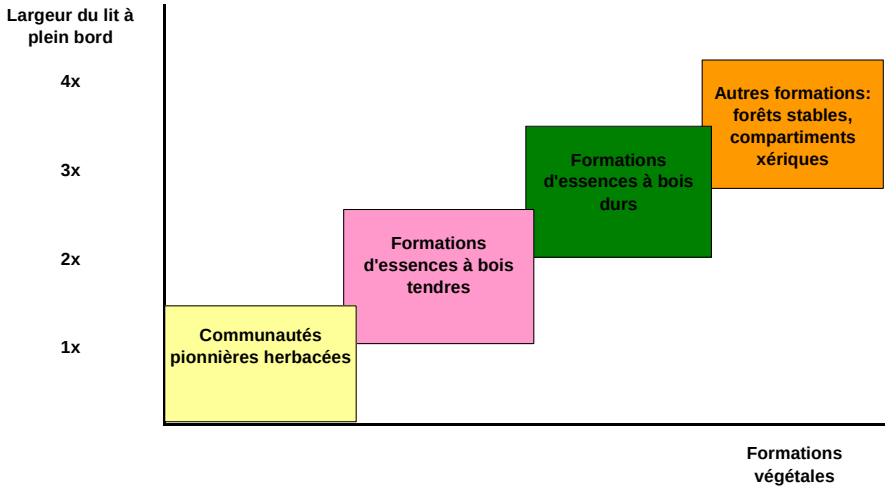


Figure 3. Installation des communautés végétales typiques en fonction de l'espace du cours d'eau (représenté en multiples de la largeur du lit à pleins bords).

4.3.6 Espèces typiques du milieu terrestre

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 3ème 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. A 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, nous proposons, faute de temps, de ne pas développer les exigences des espèces dans la présente procédure. Leurs exigences seront représentées par la courbe de satisfaction des communautés typiques. Ultérieurement, par exemple 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 après une perturbation des peuplements végétaux colonisateurs de la partie terrestre.

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 notre cas (résilience des peuplements), nous proposons 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 plus 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 organismes lors des grandes crues (HQ50-HQ100).

En l'état actuel, nous proposons de représenter la capacité de résilience des peuplements 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 ; c'est une fonction importante, mais qui 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 si, selon l'OEaux, les fonctions de loisirs sont autorisées dans l'espace à réserver aux eaux. La réponse est claire : 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 « le lieu est imposé par la destination », ce qui semble difficile.

4.4.2 Paysage

Pour autant que son tracé ne soit pas rectiligne, un cours d'eau possède une valeur paysagère, et cela même si l'espace du cours d'eau est très restreint. Un cours d'eau bordé de boisements contient une plus-value paysagère par rapport à un cours d'eau nu dans une plaine agricole. Cette plus-value est l'empreinte du tracé dans la plaine, soulignée par les forêts riveraines, par le chatoiement printanier et automnal des couleurs. Elle est reconnue et appréciée par le public (aspect social de la forêt, ombrage sur les promeneurs).

En se fondant sur les caractères ci-dessus, Veuve et Lasserre (in Rey et al. 2008) ont estimé que le bilan paysager de la 3ème 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 Conclusion

Le tableau ci-après récapitule les fonctions retenues pour la procédure d'évaluation.

	Milieu	Fonction	Elément 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
		Maintien des espèces typiques	contenu dans div. struct. du fond du lit
	Amphibien	Connectivité transversale	contenu dans div. struct. du milieu amphibien
		Alimentation des nappes phréatiques	contenu dans div. struct. du milieu amphibien
		Diversité structurelle du milieu amphibien	oui
	Terrestre	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 5. 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 sont :

- Les fonctions des milieux aquatiques
- Les fonctions des milieux amphibiens
- La dynamique d'inondation
- Les structures du milieu terrestre
- Le développement des communautés typiques.

Les fonctions indépendantes de la taille du cours d'eau sont :

- La fonction de zone tampon,
- La connectivité longitudinale terrestre.

5 Style fluvial

Il est important de connaître le style fluvial naturel du cours d'eau auquel on s'intéresse. 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 Liste des styles fluviaux

Tresses

Les cours en tresses se développent sous des conditions de pente relativement élevées avec un charriage important. Ils sont caractérisés par des chenaux multiples entrelacés. Les cours en tresses remplissent de nombreuses fonctions naturelles et abritent, grâce notamment à la présence d'îles et de bancs de sédiments de hauteurs variables, une mosaïque d'habitats riches et diversifiés.

Méandres migrants

Les méandres migrants se développent sous des conditions de pente moyenne à faible, avec un charriage relativement important. Les méandres migrants n'évoluent pas dans des terrains assez cohésifs pour pouvoir se développer complètement. Les méandres migrants 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 zonation végétale est assez proche de celle des cours en tresses.

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. Les méandres tortueux débordent facilement et entretiennent une bande humide dans l'espace riverain. Des inondations régulières ainsi que des remontées de la nappe phréatique maintiennent une humidité élevée dans les terrains bordant les cours d'eau présentant ce style.

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 sont d'ailleurs limitées, autant dans le milieu aquatique que terrestre. Les torrents 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.

Cours encaissés (Talmeander)

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 (Glatt nordwestlich Flawil (objet 14), La Sarine : Rossens – Fribourg (objet 62). 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.

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

5.2 Détermination du style fluvial d'un cours 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.

Référence spatiale

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

Remarque : la méthode de Yalin et da Silva (2001) n'est pas appropriée pour identifier le style car elle requiert de connaître la largeur à pleins bords (Lpb). Dans notre procédure, la définition du style est préalable à la définition de la Lpb.

6 Estimation des largeurs du fond du lit et des berges

6.1 La largeur naturelle du fond du lit

La largeur naturelle du fond du lit est une notion fondamentale dans la délimitation de l'espace réservé aux eaux. En effet, elle sert de valeur limite entre les moyens et grands (> 15 m) et les petits cours d'eau (<=15 m). Rappelons que la démarche proposée ici, s'applique aux cours d'eau dont la largeur naturelle du fond du lit est supérieure à 15m.

Pour des cours d'eau naturels, il est facile d'évaluer la largeur naturelle du fond du lit. Il suffit de la mesurer, in situ ou à l'aide d'une ortho photographie ou d'une carte. Si la carte ou l'ortho photographie ne permettent pas de distinguer le fond du lit d'avec les berges, on peut aussi recourir à des mesures de profils en travers équidistants de 100 ou 200m.

Pour des cours d'eau corrigés, l'évaluation est plus délicate.

6.1.1 Approche historique

La méthode consiste à mesurer la largeur naturelle sur un document historique datant d'avant la première correction du cours d'eau. Cette méthode exige que les conditions hydrologiques qui prévalaient à l'époque du document de référence soient proches des conditions actuelles.

On prêtera attention au fait que les ouvrages d'endiguement ne sont pas toujours représentés sur les cartes historiques et que, même si on connaît les dates des grands travaux de corrections fluviales, certains ouvrages moins imposants et plus anciens pouvaient déjà être présents et réduire la largeur naturelle du fond du lit. De plus, pour des cours d'eau de largeur moyenne (15 à 20 m), il est possible qu'ils soient représentés par un simple trait sur les cartes historiques, ce qui ne permet pas de définir leur largeur. Et même si on peut mesurer une largeur sur une carte historique, on ne sait pas si elle correspond à un débit d'étiage, un débit moyen ou un débit à pleins bords.

6.1.2 Approche par le débit morphogène et calcul hydraulique

Cette approche peut être utilisée, si des données historiques fiables ne sont pas disponibles ou si les conditions hydrologiques ont significativement changé par rapport aux conditions passées. Cela peut être le cas dans des bassins versants fortement influencés par des ouvrages hydro-électriques. On recherchera alors à définir la largeur de régime d'après le débit morphogène (débit qui a le plus d'influence sur la morphologie). En principe, il s'agit du débit qui,

compte tenu de sa fréquence d'occurrence, transporte le plus de sédiments. Ce débit peut varier d'un style fluvial à l'autre. Il est considéré comme équivalent au débit d'une petite crue, avec un temps de retour compris entre 1 et 5 ans. Le débit à pleins bords vaut Q5 pour les cours en tresses et les méandres migrants, Q2 pour les méandres développés.

Ensuite, moyennant des hypothèses sur la géométrie de la section et la rugosité moyenne du lit, il est possible d'estimer la largeur naturelle du fond du lit par un calcul hydraulique.

→ 1. Estimer le rapport largeur/profondeur

Le rapport largeur/profondeur est lié au style fluvial du cours d'eau. Il est supérieur à 40 pour les cours en tresses, compris entre 12 et 40 pour les cours d'eau faiblement ou non ramifié, mais avec transport solide important, et inférieur à 12 pour les cours en méandres sinueux ou les cours d'eau encaissés (Rosgen 1994). Pour estimer cette valeur, on peut se rattacher au modèle suivant :

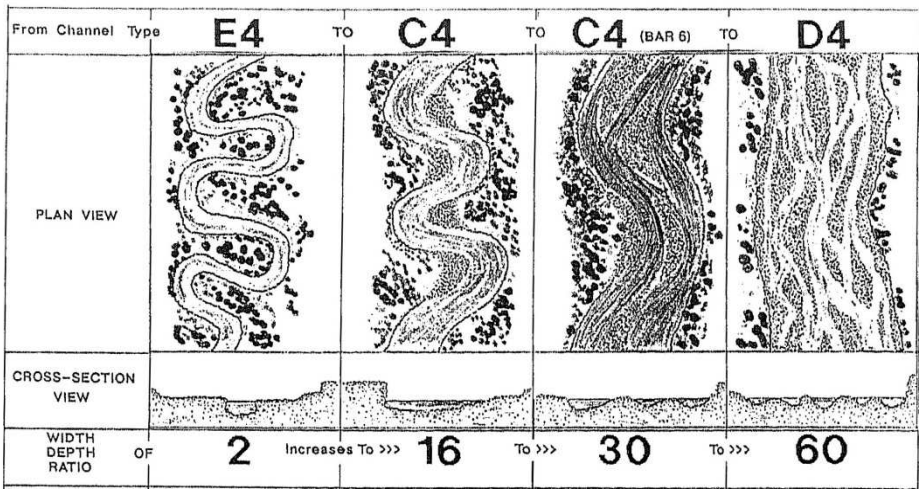


Figure 4. Rapport largeur profondeur selon le style fluvial. Source : ROSGEN (1994).

→ 2. Evaluer la pente des berges

Dans la nature, la pente des berges des cours d'eau est variable. Les cours en méandres possèdent généralement une berge en pente raide et une berge en pente douce. Les cours en tresses n'ont pas de berges en pente douce, mais ils ont plusieurs chenaux, ce qui accroît la largeur du milieu amphibien. On peut faire l'approximation que la pente moyenne d'une berge d'un cours d'eau naturel est de 1:3. Remarque : dans ce quotient, la pente est exprimée en divisant la distance verticale par la distance horizontale. Cette valeur moyenne provient d'une situation caractéristique d'un profil de méandres avec une berge en pente douce valant 1:5 et une berge abrupte valant 1:1.

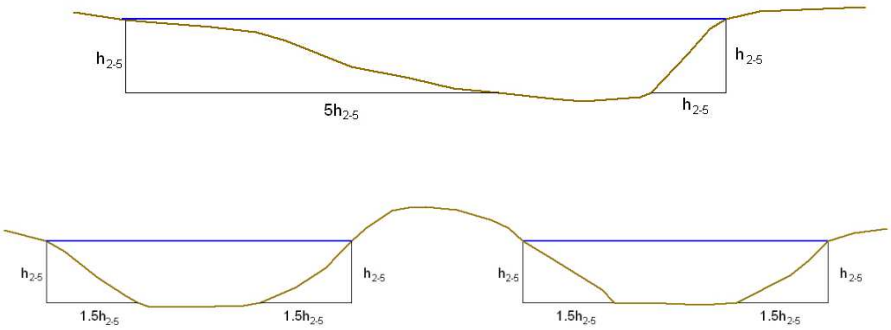


Figure 5. Schéma supérieur : profil en travers d'un cours en méandres avec une berge de faible pente et une berge raide. Schéma inférieur : profil d'un cours en tresses.

L'espace occupé par les berges vaut 6 fois la profondeur $h_{2\text{-}5}$ du cours d'eau (profondeur atteinte lors d'un débit morphogène Q2-Q5).

Pour les systèmes en tresses présentant plusieurs bras et des berges plus raides, les valeurs appliquées sont les mêmes que pour les méandres.

→ 3. Estimer la rugosité du lit

La pente du lit peut être mesurée in situ ou d'après des courbes de niveaux ou un modèle numérique de terrain. Le coefficient de rugosité de Manning-Strickler dépend du type de couverture du sol dans le lit mineur.

Nature des parois	Valeur de K en $m^{1/3}/s$
Béton lisse	75-90
Canal en terre, non enherbé	60
Canal en terre, enherbé	50
Rivière de plaine, sans végétation arbustive	35-40
Rivière de plaine, large, végétation peu dense	30
Rivière à berges étroites très végétalisées	10-15
Lit majeur en prairie	20-30
Lit majeur en vigne ou taillis	10-15
Lit majeur urbanisé	10-15
Lit majeur en forêt	<10

Tableau 6. Valeurs du coefficient de rugosité de Strickler. Source Degoutte (2007).

Une autre source pour les valeurs de rugosité est le rapport de Spreafico et al. (OFEG, 2001) qui étudient, à l'aide de calculs

hydrauliques, la rugosités de différents cours d'eau de Suisse. Leurs résultats montrent que la majorité des valeurs du coefficient de rugosité (K) sont comprises entre 15 et 35 $m^{1/3}/s$.

→ 4. Appliquer la formule de Manning-Strickler à un profil trapézoïdal

Si l'on considère une section trapézoïdale, avec un rapport largeur/profondeur = r et une pente de berges valant m, on obtient une équation explicite permettant de trouver la largeur à pleins bords (L_{pb}) ainsi que la largeur du fond du lit (L_{fl}).

Formule adaptée de Manning- Strickler

$$L_{pb} = (K * i^{0.5} * Q^{-1} * (1 -2/(r*m)+(2/r)*(1 +1/m^2)^{0.5})^{-2/3} *(1/r-1/(r^2*m))^{5/3})^{-3/8}$$

$L_{fl} = L_{pb} *(1 - 2 /(r *m))$

L_{pb} = largeur à pleins bords [m]

L_{fl} = largeur du fond du lit [m]

Q = débit morphogène $[m^3/s]$

K = coefficient de rugosité $[m^{1/3}/s]$

i = pente hydraulique (pente de la ligne d'eau) [m/m]

m = pente des berges [m/m]

r = rapport largeur profondeur [m/m]

<u>Adaptation pour les cours en tresses</u>

La formule ci-dessus convient pour des cours d'eau non ramifiés, c'est-à-dire avec un chenal unique, mais doit être adaptée si le nombre de chenaux actifs est supérieur à 1, lors du débit morphogène.

Pour s'adapter à un cours en tresses comportant *n* chenaux, on supposera que le débit est distribué équitablement entre les n chenaux. On appliquera la formule en remplaçant Q par Q/n, et en remplaçant r par r/n, ce qui nous donnera le gabarit d'un seul chenal. Ensuite, on multipliera ces dimensions par *n* pour obtenir les largeurs totales du fond du lit et des berges.

En outre, précisons que la largeur naturelle du fond du lit d'un cours en tresses, de même que la largeur à pleins bords, n'inclut pas les îles qui comportent des stations émergées lors de débits égaux ou supérieurs au débit morphogène.

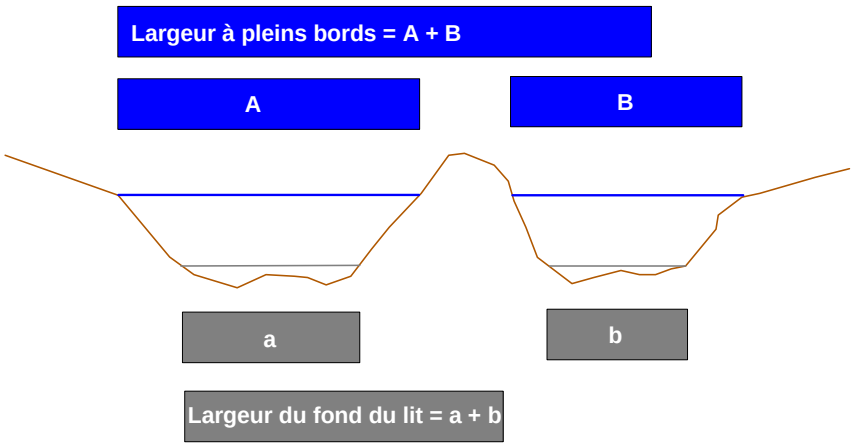


Figure 6. Schéma de la largeur naturelle du fond du lit et de la largeur à pleins bords d'un cours en tresses à deux chenaux.

6.2 Largeur naturelle des berges

On suppose toujours que la pente moyenne des berges est de 1:3 sur chaque berge. On peut 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 (Lpb) et du rapport largeur/profondeur (r).

$L_b = 6\ h_{2\text{-}5}$

$h = L_{pb} / r$

L_b = largeur des berges

L_{pb} = largeur à pleins bords

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

r = rapport largeur/profondeur

7 Compartiments de l'espace réservé aux eaux

7.1 Espace de mobilité

L'espace de mobilité est l'espace compris entre deux stabilisations de berge. Il désigne l'ensemble de la surface qui est atteinte ou qui peut être atteinte par le déplacement latéral du cours d'eau. On considère que l'espace de mobilité est apte à remplir toutes les fonctions naturelles évaluées. 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.

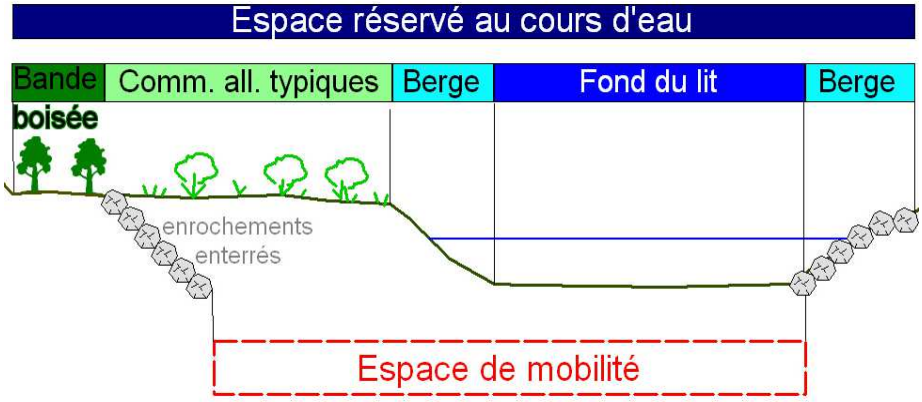


Figure 7. Coupe schématique illustrant la notion d'espace de mobilité.

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.

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 Q1 ou Q2. 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. Les zones inondables sont pertinentes dans des terrains plats et imperméables. Les zones inondables à l'extérieur des digues remplissent également des fonctions de connectivité et de zone tampon, mais pas de structures du milieu terrestre.

7.4 Bande boisée

Les bandes boisées à l'extérieur des stabilisations de berge sont aptes à remplir les fonctions de connectivité et de zone tampon.

7.5 Bande extensive

Les bandes extensives désignent les surfaces agricoles extensives situées à l'extérieur des stabilisations de berge. Les bandes extensives prévues par l'OEaux sont des surfaces à litière, des haies, des bosquets champêtres, des berges boisées, des prairies extensives, des pâturages extensifs ou des pâturages boisés.

Dans la procédure proposée, les bandes extensives sont aptes à remplir la fonction de zone tampon mais ne contribuent pas à la connectivité longitudinale terrestre (à l'exception des berges boisées) car elles ne sont pas suffisamment boisées.

7.6 Zone construite

Les zones construites peuvent être des chemins, des places de parc ou éventuellement des digues. Toute surface non végétalisée et imperméable peut être assimilée à une zone construite. 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, 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. 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 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.

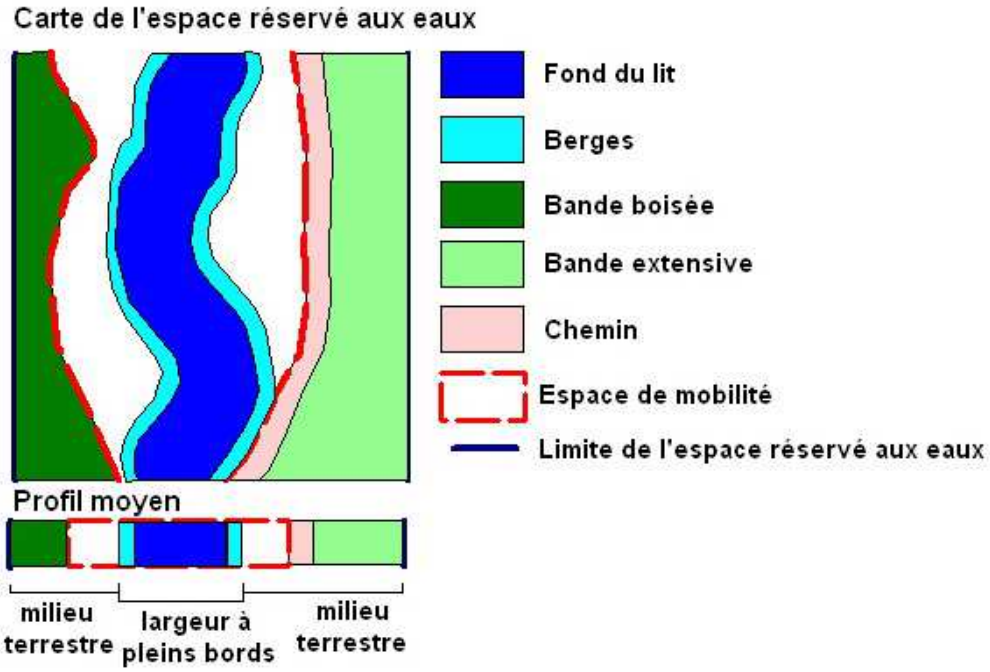


Figure 8. Illustration d'un exemple fictif de profil moyen construit d'après la carte d'un état actuel de l'espace réservé aux eaux. Par convention, on représente le profil moyen avec la rive gauche à gauche et la rive droite à droite.

Dans cet exemple, nous avons un espace de mobilité de largeur variable mais supérieur à la largeur naturelle du fond du lit. En rive droite, on supposera que le chemin qui longe la forêt est protégé de l'érosion par des stabilisations pouvant être partiellement enterrées. En rive gauche, on imagine que des prairies extensives sont protégées 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 blanc) nous importe peu car il est apte à remplir toutes les fonctions naturelles du milieu terrestre. En dehors de l'espace de mobilité, nous trouvons, en rive gauche, une prairie extensive qui assume une fonction de tampon ; en rive droite figure un chemin qui ne remplit aucune fonction naturelle, mais qui est toléré dans l'espace réservé aux eaux, ainsi qu'une bande boisée qui remplit à la fois la fonction de tampon et de connectivité longitudinale terrestre.

8 Procédure

Les fonctions discutées au chapitre 4 et retenues comme pertinentes pour définir un espace nécessaire (voir chapitre 4.5) sont évaluées grâce à des courbes de satisfaction qui donnent une note entre 0 et 100. Une note globale est obtenue grâce à la moyenne pondérée de ces fonctions.

Les courbes de satisfaction ont été développées dans le cadre du suivi des zones alluviales d'importance nationale. Elles permettent de mesurer différentes composantes en transformant une grandeur mesurée en note comprise entre 0 et 100%. Une note de 100% se réfère à une situation jugée idéale (image directrice). Les valeurs seuils (0% et 100%) se fondent sur l'observation des systèmes naturels et peuvent être sujettes à négociation et discussion, de même que les poids attribués aux différentes fonctions.

8.1 Courbes de satisfaction

8.1.1 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_{fl}). Cette dernière est déterminée par l'utilisateur en suivant une des méthodes présentées dans le chapitre 6. La satisfaction est de 100% si la largeur de l'espace de mobilité est supérieure ou égale à L_{fl}. Elle est de 0% si la largeur de l'espace de mobilité est inférieure à un tiers de Lfl. 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 de la manière suivante :

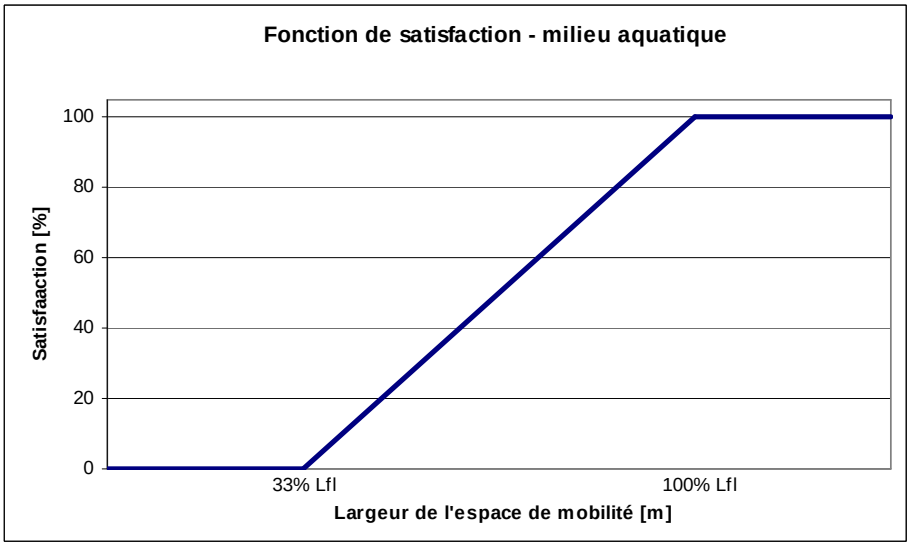


Figure 9. Fonction de satisfaction du milieu aquatique. Lfl = largeur naturelle du fond du lit.

8.1.2 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 (voir chapitre 6.1.2). Comme on calcule l'espace des deux berges ensemble, il est possible d'obtenir le 100% avec une berge en pente plus forte et une berge en pente plus faible. Le 0% sanctionne une situation dans laquelle la pente des deux berges serait supérieure ou égale à 1:1.

Comme expliqué au chapitre 6.2, l'espace nécessaire aux berges est proportionnel à la profondeur de l'eau, nommée $h_{2\text{-}5}$. 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. 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 ($h_{2\text{-}5}$).

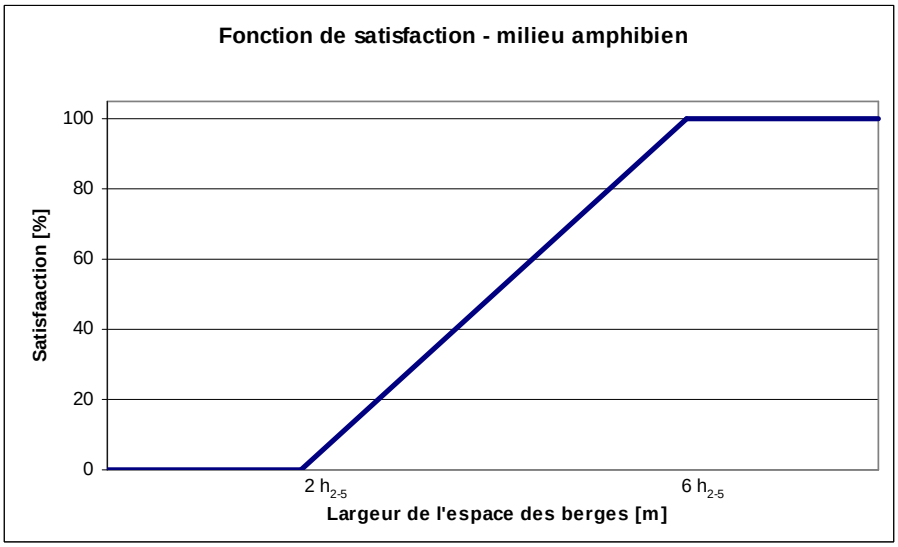


Figure 10. Fonction de satisfaction du milieu amphibien. $h_{2\text{-}5}$ = profondeur d'eau moyenne pour le débit morphogène, en conditions naturelles.

8.1.3 Milieu terrestre

8.1.3.1 Connectivité longitudinale terrestre

Les bandes boisées, les zones inondables et l'espace de mobilité contribuent à assurer la fonction de connectivité longitudinale terrestre. Comme pour la zone tampon, 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. Chaque rive s'évalue séparément.

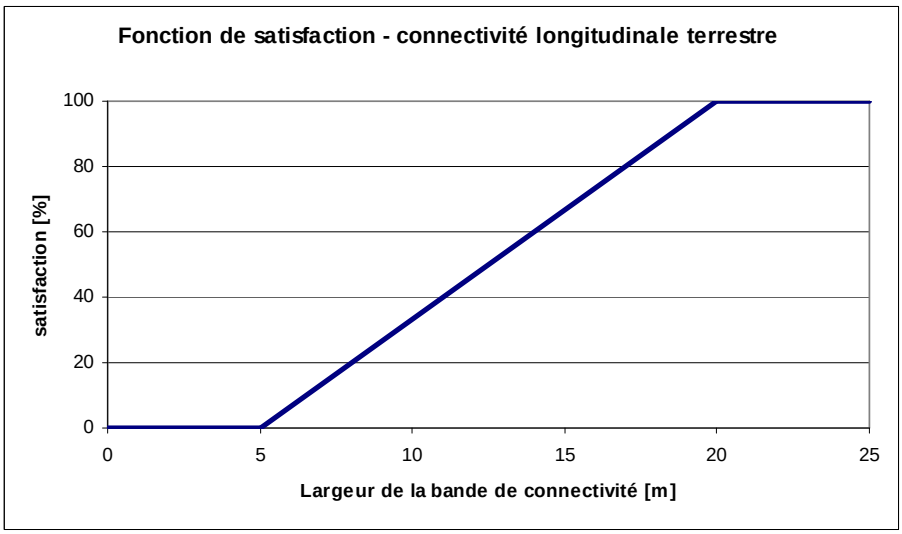


Figure 11. Fonction de satisfaction de la connectivité longitudinale terrestre pour une rive. Chaque rive s'évalue séparément.

Les valeurs de la courbe sont fondées sur différents concepts de réseaux écologiques (voir chapitre 4.3.1). Les liaisons terrestres des animaux (au moins la petite faune) sont assurées par des bandes de végétation riveraine comprises entre 10m et 20m de largeur. La limite inférieure de la courbe de satisfaction est fixée arbitrairement à 5 m.

8.1.3.2 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. La valeur du 100% de satisfaction est fondée sur les valeurs mentionnées dans le rapport CORPEN (voir chapitre 4.3.2). La courbe est une ligne brisée car la valeur de satisfaction pour 6m de largeur a été fixée à 50%. Cette valeur de 6m correspond au minimum légal pour l'agriculture (AGRIDEA 2009).

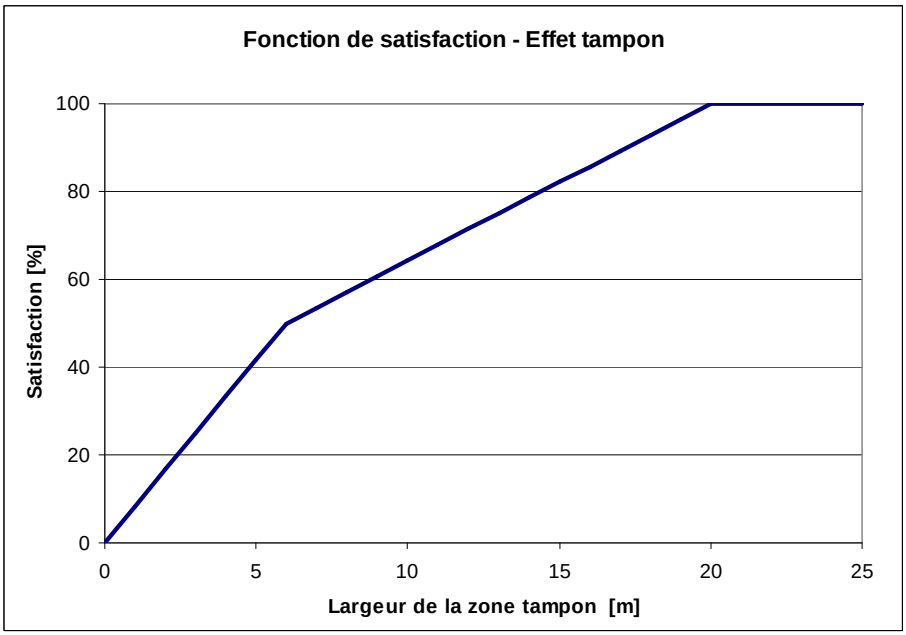


Figure 12. Fonction de satisfaction de l'effet tampon pour une rive. Chaque rive s'évalue séparément.

8.1.3.3 Structures du milieu terrestre pour les cours en tresses

La courbe des structures des milieux terrestres pour les cours en tresses est fondée sur les besoins de la végétation alluviale. On suppose que le type de végétation est un indicateur de la présence de terrasses. La démarche est la même que pour définir les besoins des communautés typiques, on obtient donc la même courbe de satisfaction (voir chapitre 8.1.3.6). Comme les courbes sont les

mêmes, il sera plus simple d'en utiliser une seule et de doubler son poids, lors de l'évaluation de la note globale.

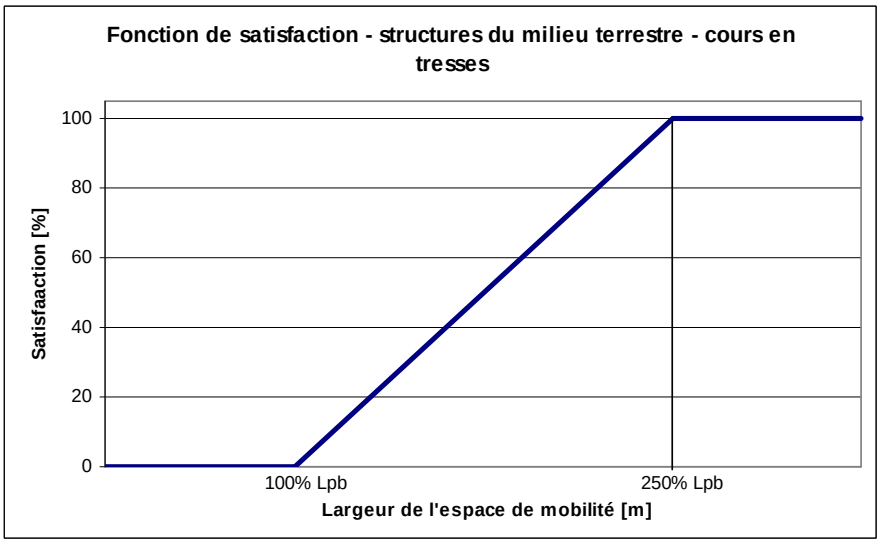


Figure 13. Courbe de satisfaction pour les structures du milieu terrestre des cours en tresses. Lpb = largeur naturelle du lit mineur à pleins bords.

8.1.3.4 Structures du milieu terrestre pour les 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, soit par déversement, soit par tangence. Les méandres migrants ne forment pas de bras mort, mais ils influencent le milieu terrestre sur une bande de largeur égale à leur amplitude. Plus cette amplitude est grande, plus la quantité de milieu terrestre influencé par le cours d'eau est importante.

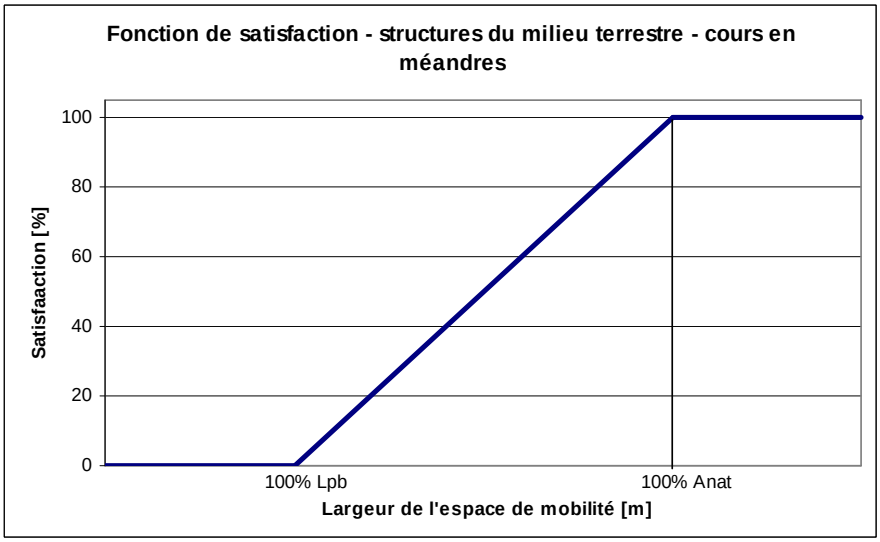


Figure 14. Courbe de satisfaction des structures du milieu terrestre pour les cours en méandres. Anat = amplitude des méandres en conditions naturelles. Lpb = largeur naturelle du lit mineur à pleins bords.

8.1.3.5 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 ; nous proposons de l'activer pour les méandres développés. Les méandres développés ne sont pas le seul style fluvial dans lequel des inondations se produisent, mais c'est le seul pour lequel l'apport hydrique des inondations influence significativement la végétation, car le terrain est en faible pente 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 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 10 fois la largeur naturelle du lit mineur à pleins bords (Lpb).

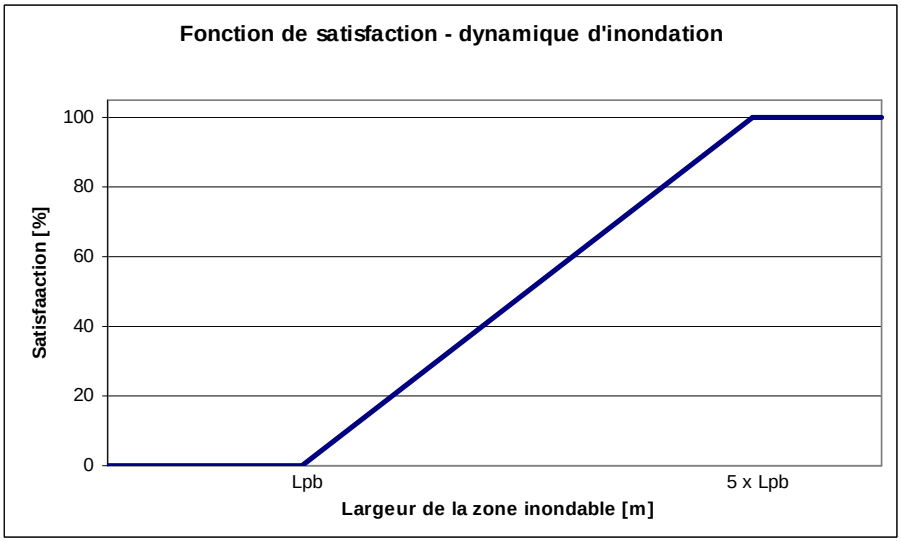


Figure 15. Fonction de satisfaction de la dynamique d'inondation. Lpb = largeur naturelle du lit mineur à pleins bords.

8.1.3.6 Communautés typiques du milieu terrestre

La note maximale est obtenue si la largeur de l'espace de mobilité vaut 2.5 fois la largeur naturelle du lit à pleins bords. Cette valeur provient des observations du développement de la végétation alluviale dans des systèmes naturels (voir chapitre 4.3.5).

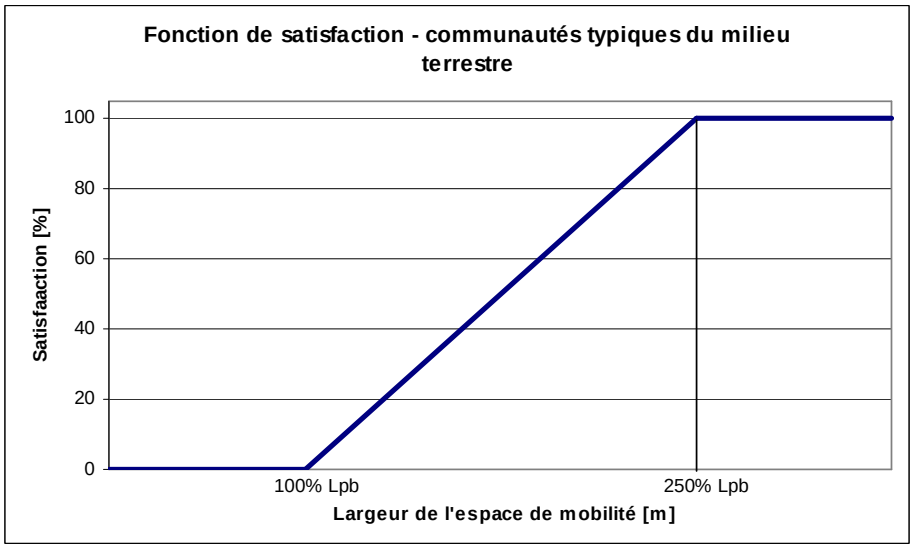


Figure 16. Courbe de satisfaction des communautés typiques du milieu terrestre. Lpb = largeur naturelle du lit mineur à pleins bords.

Remarque importante sur la signification du 100% :

Une note de 100% ne signifie pas systématiquement que la fonction est remplie à 100%, mais que l'espace à disposition permet de remplir la fonction à 100% si toutes les autres conditions nécessaires à cette fonction sont remplies.

8.2 Pondération des fonctions

8.2.1 Styles fluviaux

Toutes les fonctions naturelles ne sont pas pertinentes pour tous les styles de cours d'eau. 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 ils évoluent en terrain très plat et sont souvent bordés de zones humides à l'état naturel. Cela ne signifie pas qu'il n'y a pas d'inondation dans les systèmes présentant un autre style, mais seulement que les inondations ont une influence plus faible ou moins fréquente sur le milieu terrestre riverain.

8.2.2 Importance relative des fonctions

La pondération (importance relative) des sept fonctions naturelles activées dans la procédure a une importance capitale sur les résultats de l'évaluation. La pondération se fonde sur des faits scientifiques, mais des aspects pragmatiques peuvent aussi intervenir. Les résultats des études de cas (chapitre 9) sont présentés avec deux variantes de pondération :

- La variante 1, qui accorde un poids important aux milieux aquatique et amphibien,
- La variante 2, qui accorde un poids important au milieu terrestre.

Une combinaison définitive de pondération sera définie ultérieurement sur la base des expériences concrètes réalisées et de la comparaison des résultats.

	Tresses	Méandres migrants	Méandres développés	Torrents	Cours enfoncés
Milieu aquatique	40	40	40	50	50
Milieu amphibien	20	20	20	30	30
Milieu terrestre	40	40	40	20	20
- Connectivité longitudinale terrestre	10	10	10	10	10
- Effet tampon	10	10	10	10	10
- Structures du milieu terrestre	10	10	10	0	0
- Dynamique d'inondation	0	0	5	0	0
- Communautés typiques du milieu terrestre	10	10	5	0	0

Tableau 7. Pondération des fonctions selon les styles de cours d'eau ; variante 1

	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 ; variante 2

8.3 Etapes de la procédure

La procédure peut être appliquée à deux situations distinctes, 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 donnée, 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.

8.3.1 Evaluation d'une situation connue

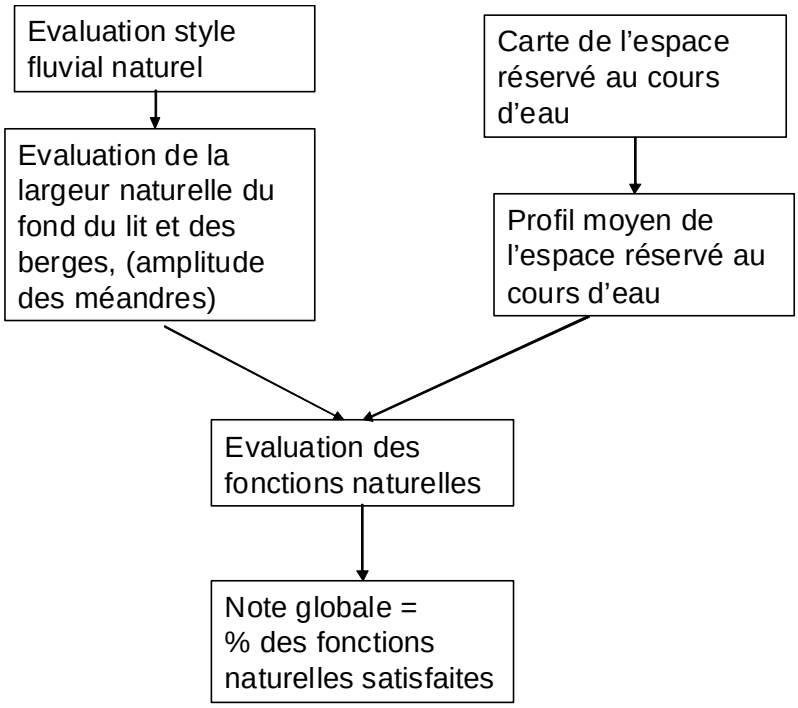


Figure 17. Schéma de la procédure dans le cas de l'évaluation d'une situation connue.

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. D'abord il faut définir les besoins du cours d'eau en se référant à ce qu'il serait en conditions naturelles. 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 estimer 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 d'utilisation du sol tels qu'ils sont présentés dans le chapitre 7. Ensuite, à partir de la carte de l'espace réservé au cours d'eau, on pourra construire le profil moyen, 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 8.1. 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.

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

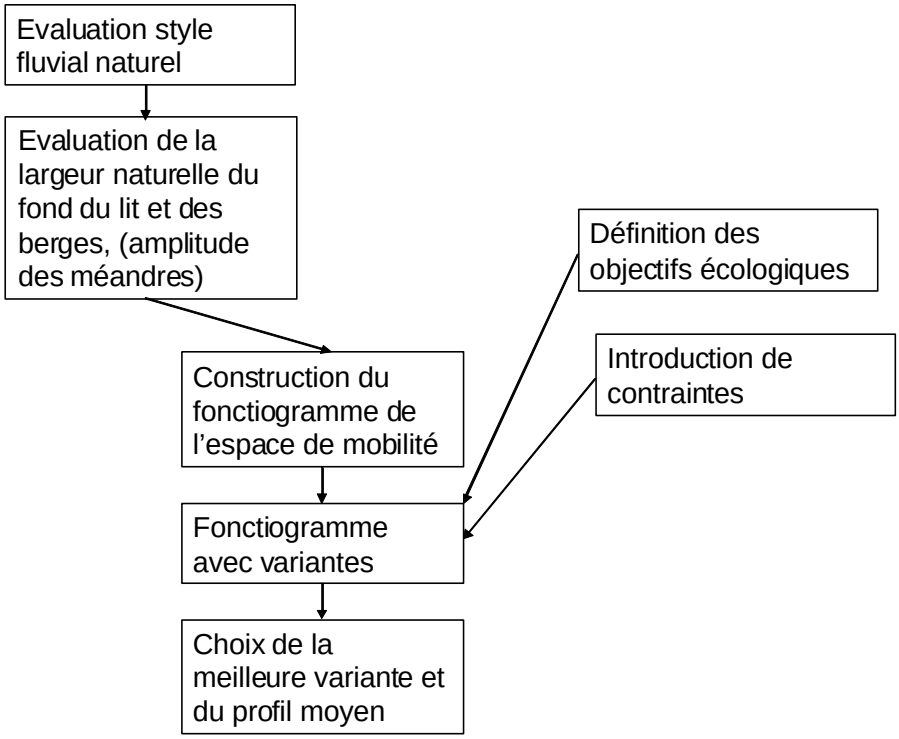


Figure 18. Schéma de la procédure dans le cas d'objectifs écologiques à atteindre.

Quand des objectifs écologiques sont fixés préalablement, le but consiste à trouver la largeur de l'espace réservé aux eaux qui réponde à ces objectifs. Pour y parvenir, 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 à disposition (voir Figure 21). Pour commencer, nous recommandons de 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. 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.

8.4 Analyse de sensibilité de quatre paramètres

Nous avons testé la sensibilité des paramètres suivants, afin de voir l'effet d'une variation de ces paramètres sur la note globale :

- Le débit morphogène (différence entre Q2 et Q5),
- La pente du cours d'eau,
- La pondération des milieux aquatique, amphibien et terrestre,
- Le choix du style fluvial (méandres migrants ou tresses).

8.4.1 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, nous avons souvent la connaissance de ces deux valeurs de débit (Q2 et Q5). Dans un premier temps nous allons comparer ces valeurs de débits entre elles, pour les 6 cas d'étude. Ensuite, pour le cas qui sera le plus proche de la moyenne, nous calculerons l'effet sur la note globale.

Cours d'eau	Tronçon	Station de référence	Q2 [m3/s]	Q5 [m3/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 Q2 et Q5 des cours d'eau étudiés dans les études de cas.

La moyenne des écarts entre Q2 et Q5 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 59.4/100 (voir chapitre 9.6.4), en utilisant un débit morphogène de 248 m^3/s (Q5). En gardant, tous les paramètres identiques sauf le débit morphogène, pour lequel on prend une valeur de 194 m^3/s (Q2), on obtient une note globale de 67.3/100.

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 Q2 plutôt que de Q5.

Le changement de note, de l'ordre de 11%, 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, car cette fonction représente à elle seule 40% de la note globale.

8.4.2 Pente du cours d'eau

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 cours d'eau 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 thalweg ; ainsi on peut parfois observer un angle de plus de 90° entre les deux.

Pour tester la sensibilité de la pente du cours d'eau, nous prendrons le cas de l'Aar entre Büren et Soleure, car c'est le seul parmi nos six exemples dont le style fluvial est en méandres développés. Dans notre étude de cas, la pente du fond du lit dans l'état naturel est estimée à 0.1 ‰. Nous allons refaire l'évaluation de la note globale en prenant une pente deux fois plus forte et deux fois plus faible.

	Note globale		
	pente normale	**pente double**	**pente demi**
Profil hydraulique minimum	44	51	36
Profil normal actuel	62	66	60

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.

8.4.3 Pondération des fonctions naturelles

La pondération des différentes fonctions naturelles est un sujet délicat, car il est difficile de l'aborder avec objectivité. Une des questions ouvertes est de savoir s'il faut accorder plus de poids au milieu terrestre, ce qui implique d'en accorder moins aux milieux aquatique et amphibien. Nous allons modifier la pondération des fonctions pour l'étude de cas de l'Aar entre Thoune et Berne et voir les effets sur la note globale. Nous ne présentons ici que les résultats, les explications de cette étude de cas figurent au chapitre 9. La pondération standard accorde 40% au milieu aquatique, 20% au milieu amphibien et 40% au milieu terrestre. La pondération modifiée

donne 20% au milieu aquatique, 10% au milieu amphibien et 70% au milieu terrestre.

Fonction	Poids	Poids modifiés	Note	Note pondérée	Note avec poids modifiés
Milieu aquatique	0.4	0.2	100.0	40.0	20.0
Milieu amphibien	0.2	0.1	100.0	20.0	10.0
Connectivité long. terr. rive droite	0.05	0.05	100.0	5.0	5.0
Connectivité long. terr. rive gauche	0.05	0.05	100.0	5.0	5.0
Effet tampon rive droite	0.05	0.05	100.0	5.0	5.0
Effet tampon rive gauche	0.05	0.05	100.0	5.0	5.0
Structures du milieu terrestre	0.1	0.25	12.6	4.2	3.2
Communautés typiques du m. terr.	0.1	0.25	42.3	1.3	10.6
Total	1			85.5	63.7

Tableau 10. Effet d'un changement de pondération sur la note globale pour le cas de l'Aar entre Thoune et Berne basé sur un scénario d'espace cours d'eau minimum.

Fonction	Poids	Poids modifiés	Note	Note pondérée	Note avec poids modifiés
Milieu aquatique	0.4	0.2	100.0	40.0	20.0
Milieu amphibien	0.2	0.1	100.0	20.0	10.0
Connectivité long. terr. rive droite	0.05	0.05	100.0	5.0	5.0
Connectivité long. terr. rive gauche	0.05	0.05	100.0	5.0	5.0
Effet tampon rive droite	0.05	0.05	100.0	5.0	5.0
Effet tampon rive gauche	0.05	0.05	100.0	5.0	5.0
Structures du milieu terrestre	0.1	0.25	50.3	5.0	12.6
Communautés typiques du m. terr.	0.1	0.25	100.0	10.0	25.0
Total	1	1		95.0	87.6

Tableau 11. Effet d'un changement de pondération sur la note globale pour le cas de l'Aar entre Thoune et Berne basé sur un scénario d'espace cours d'eau augmenté.

On remarque que le scénario minimum perd 21.8% de sa note si on utilise une pondération qui accorde plus d'importance au milieu terrestre. Le scénario d'espace augmenté ne perd que 7.4%. Un changement de pondération a donc une influence significative sur la note globale, surtout si les changements de poids concernent des notes qui sont éloignées de la note moyenne.

8.4.4 Style fluvial

Certains cours d'eau ont un style fluvial naturel qui ne correspond pas exactement aux cinq styles décrits dans le chapitre 5, 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. Nous allons voir maintenant la conséquence d'un changement de choix du style fluvial naturel. 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 9.6). Voyons si le résultat aurait été différent si on avait choisi un cours en 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 200m. Alors qu'en choisissant un cours en tresses, le 100% des structures du milieu terrestre est atteint pour un espace de 117.5m (2.5 x 47m). 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 notre étude de cas, elle restera à 0 en choisissant des méandres migrants comme style fluvial naturel de référence. De manière générale, il ne peut pas y avoir plus de 10% d'écart sur la note globale en prenant comme référence un cours en tresses au lieu d'un cours en méandres migrants. En effet, considérant notre système de pondération, le changement porte sur seulement 10% des fonctions naturelles. La note globale est donc peu sensible à ce paramètre.

8.4.5 Conclusion

L'étude de sensibilité réalisée sur 4 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. Il conviendra ultérieurement d'opérer le choix définitif des pondérations. 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.

9 Application à six cas d'étude

A fin de comparaison, les résultats des études de cas sont présentés en appliquant deux systèmes différents de pondération.

9.1 La Birse

Le tronçon d'étude de la Birse concerne un segment de 2.3km situé sur les communes de Soyhières (JU) et Liesberg (BL). La largeur corrigée actuelle de la Birse est de 15m. On utilise la procédure pour établir le profil moyen de l'espace cours d'eau afin d'atteindre l'objectif (choisi arbitrairement) de remplir 75% des fonctions naturelles.

9.1.1 Style fluvial

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

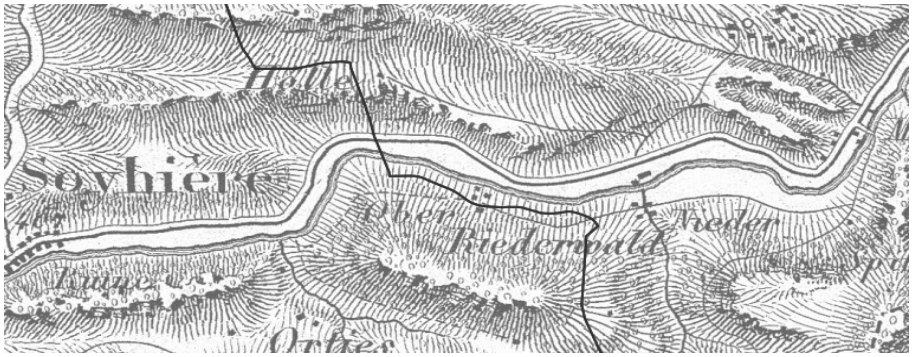


Figure 19. Carte Dufour de la Birse 1850.

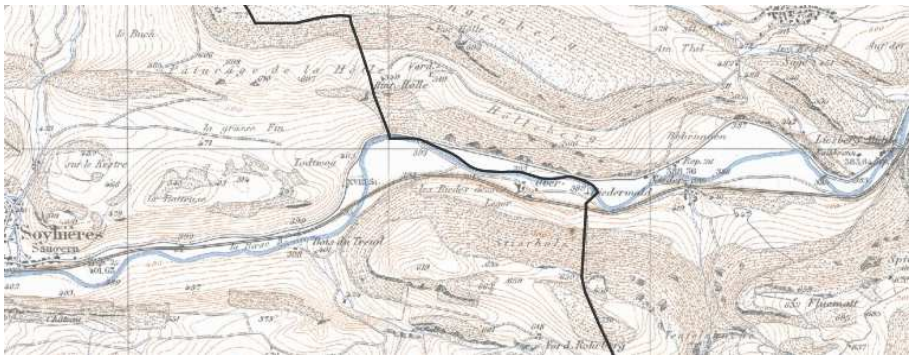


Figure 20. Carte Siegfried de la Birse 1875.

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.

9.1.2 Estimation des paramètres de l'état naturel

Il existe plusieurs méthodes différentes pour évaluer la largeur naturelle du fond du lit et des berges.

Selon une expertise géomorphologique (Hunzinger 2007), la largeur naturelle du fond du lit = 25 m.

Approche historique : mesure sur la carte Siegfried : largeur naturelle du fond du lit = 23 m.

Selon calcul du bureau Bonnard et Gardel avec la formule de Yalin, Q2 et dm = 5cm, la largeur pleins bords se situe entre 30 et 35 m.

Il a y plusieurs paramètres à évaluer afin de pouvoir appliquer la formule adaptée de Manning-Strickler (voir chapitre 6.1.2) :

D'après le style du cours d'eau, on peut estimer le rapport largeur/profondeur (r) à 10.

La pente des berges (m) vaut 0.33.

Le débit morphogène (Q5) vaut 151 m^3/s.

La rugosité (K) du lit à l'état naturel est estimée à 25 $m^{1/3}/s$.

La pente moyenne du cours d'eau (i) dans le secteur d'étude vaut 2.5‰.

L'application numérique de la formule adaptée de Manning-Strickler, arrondie à l'unité nous donne :

Lpb = 32 m

Lfl = 13 m

$h_{2\text{-}5}$ = 3.2 m.

L'amplitude des méandres en conditions naturelles peut être mesurée sur les cartes historiques. Elle est égale à 150m.

On retiendra 13m comme largeur du fond du lit, 32m comme largeur à pleins bords, 3.2m de profondeur et 150m pour l'amplitude naturelle des méandres.

9.1.3 Objectif écologique

Pour l'exemple, supposons que l'objectif soit de remplir 75% des fonctions naturelles.

9.1.4 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.

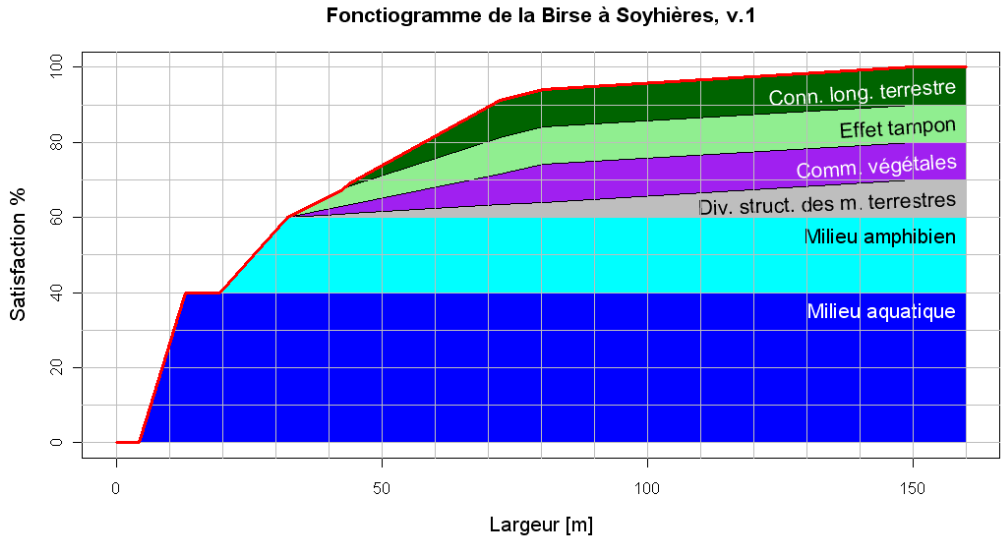


Figure 21. Le fonctiogramme de la Birse à Soyhières montre la relation entre l'espace à disposition du cours d'eau (égal ici à un espace de mobilité) et le pourcentage de fonctions naturelles remplies.

On observe qu'il faut un espace de mobilité de 52m de largeur pour satisfaire 75% des fonctions naturelles.

Ensuite, il est possible d'évaluer des variantes en faisant varier le contenu de l'espace à réserver aux eaux. Supposons qu'une contrainte limite l'espace de mobilité à 40 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.

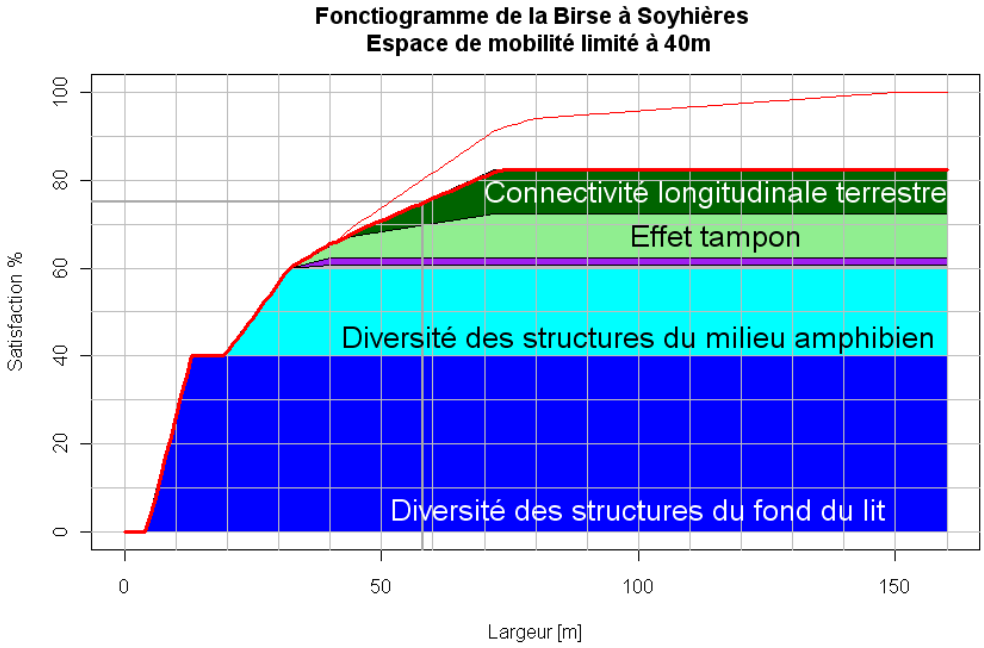


Figure 22. Fonctiogramme avec variante : espace de mobilité et bandes boisées dès 40 m.

Si nous choisissons de limiter l'espace de mobilité à 40 m de largeur, le fonctiogramme montre qu'on remplit 66% des fonctions naturelles. Mais si on rajoute des bandes boisées, on peut voir qu'avec 40m d'espace de mobilité + 18m de bandes boisées, on arrive à remplir également 75% 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 75% des fonctions naturelles. Dans ce cas, les calculs montrent qu'avec un espace de mobilité de 40m + 10m de bandes boisées + 22m de bande extensive, on arrive à satisfaire 75% des fonctions naturelles.

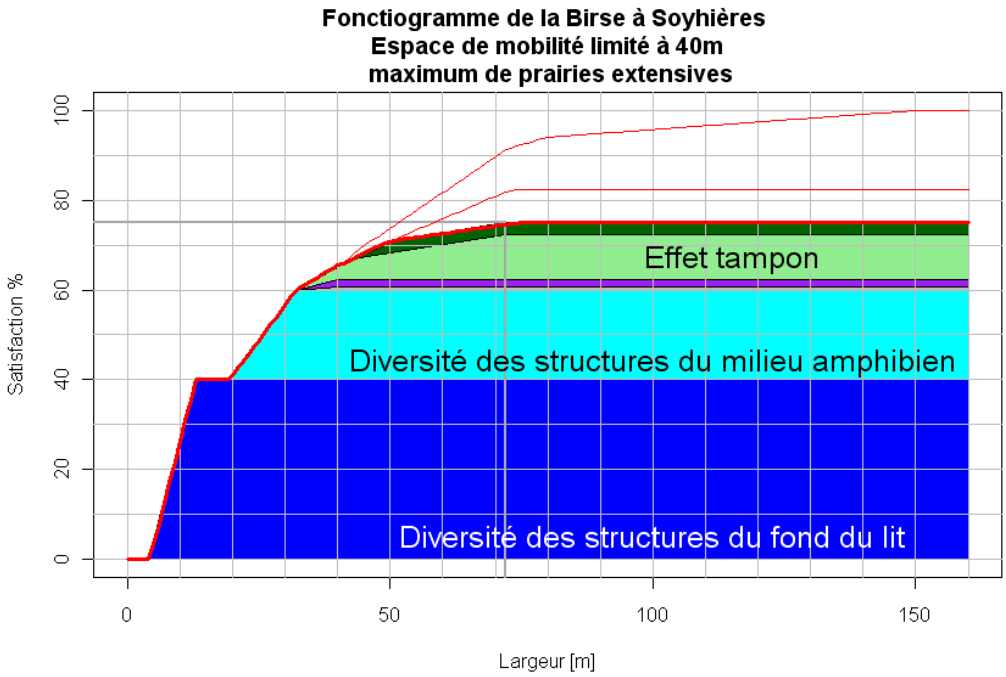


Figure 23. Fonctiogramme avec espace de mobilité, bande boisée dès 40m et bande extensive dès 50 m.

9.1.5 Evaluation

En résumé, l'étude des fonctiogrammes montre que les trois profils moyens suivants permettent d'atteindre l'objectif de 75% des fonctions naturelles remplies. 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.

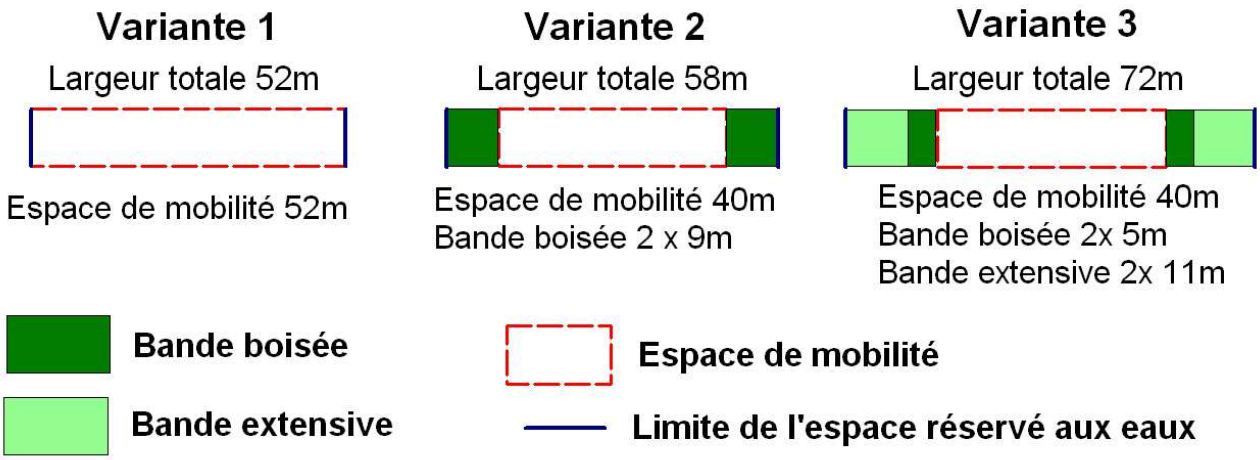


Figure 24. Profils moyens de la Birse à Soyhières pour atteindre 75% de satisfaction des fonctions naturelles.

Fonctions	Note Var.1	Note Var.2	Note Var.3	Poids
Milieu aquatique	100.0	100.0	100.0	0.4
Milieu amphibien	100.0	100.0	100.0	0.2
Connectivité longitudinale terrestre	32.7	52.7	26.7	0.1
Effet tampon	63.0	73.0	96.3	0.1
Structures du milieu terrestre	16.8	6.6	6.6	0.1
Communautés typiques du m. terr.	41.0	16.2	16.2	0.1
Note globale	75.3	74.8	74.6	

Tableau 12. Notes des fonctions naturelles des trois variantes de la Birse pour obtenir une note globale (arrondie) de 75.

Comparaison avec pondération n°2

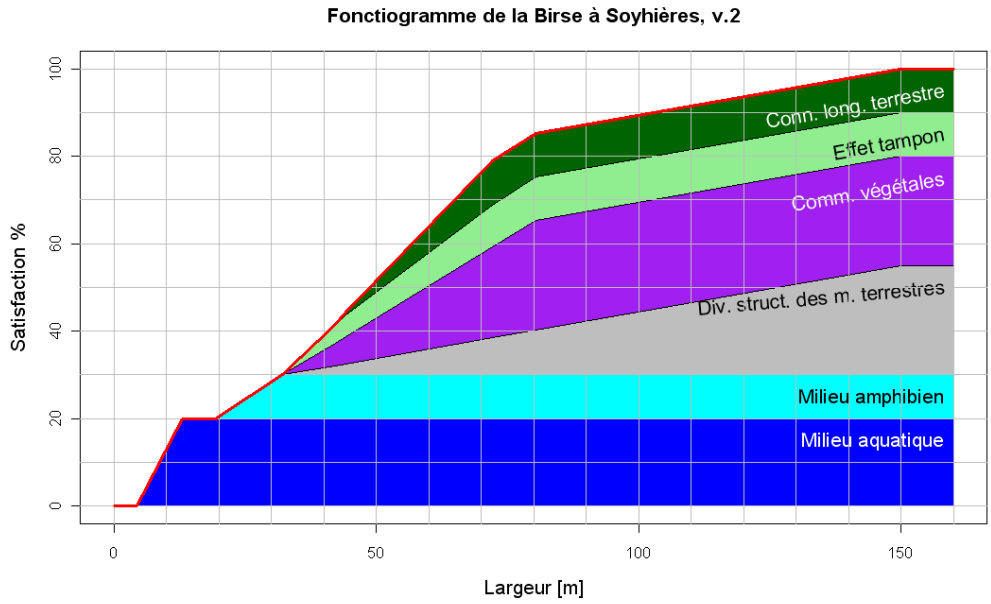


Figure 25. Fonctiogramme de la Birse à Soyhières avec le système de pondération n°2.

Avec ce système de pondération qui accorde plus d'importance aux fonctions du milieu terrestre, il faut un espace de mobilité de 69m pour remplir 75% des fonctions naturelles.

Mais, en appliquant ce système de pondération, **il n'est pas possible d'obtenir 75% des fonctions naturelles avec un espace de mobilité limité à 40m** (variante d'aménagement 2 et 3 ci-dessus). En effet, comme le montre le fonctiogramme du deuxième système de pondération (voir Figure 25), un espace de mobilité de 40m remplit 40% des fonctions naturelles. Or, même avec des bandes boisées de 20m de chaque côté, on gagnerait au maximum 20% des fonctions naturelles, puisque les fonctions naturelles remplies par des bandes boisées situées en-dehors de l'espace de mobilité (effet tampon et connectivité longitudinale terrestre) ont un poids cumulé de 20% au maximum.

Fonctions	Note Var.1	Poids	Note x Poids
Milieu aquatique	100.0	0.2	20.0
Milieu amphibien	100.0	0.1	10.0
Connectivité longitudinale terrestre	89.3	0.1	8.9
Effet tampon	91.3	0.1	9.1
Structures du milieu terrestre	31.2	0.25	7.8
Communautés typiques du m. terr.	76.2	0.25	19.1
Note globale			74.9

Tableau 13. Notes des fonctions naturelles considérant un espace de mobilité de 69m, et en appliquant le deuxième système de pondération. Les variantes dont l'espace de mobilité est limité à 40m ne sont pas présentées, car elles n'atteignent pas 75% avec ce système de pondération.

9.2 L'Aar entre Büren et Soleure

Le tronçon d'étude a une longueur d'environ 17km 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 18m près de Altreu.

9.2.1 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 XIXe 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 (c'était d'ailleurs 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 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.

9.2.2 Estimation des paramètres de l'état naturel

Comme nous l'avons dit, la largeur naturelle du fond du lit doit être évaluée d'après les conditions actuelles de débit et non d'après les conditions historiques. La station fédérale de Brügg-Aegerten est située à 8km en amont du secteur d'étude. Le débit de temps de retour de deux ans (Q_2) est de 505 m3/s.

En plus, pour utiliser la formule de Manning-Strickler, il faut connaître :

- la pente moyenne du lit (i) = 0.1‰ ;
- la pente des berges = 0.33;
- le rapport largeur profondeur = 17 d'après une source historique (Wyss, 1819) ;
- la rugosité du lit (K) = 30 $m^{1/3}$/s.

L'application de la formule adaptée de Manning-Strickler avec ces paramètres nous donne :

Largeur à pleins bords (Lpb) = 108m

Largeur naturelle du fond du lit (Lfl) = 70m

Profondeur ($h_{2\text{-}5}$) = 6.4m.

On constate que la largeur corrigée est par endroit bien supérieure à la largeur naturelle, ce qui n'est pas logique. Ceci peut s'expliquer par le fait que le profil de l'Aar a été stabilisé pour contenir des débits bien plus élevés que Q2. Même si ce tronçon n'a jamais été élargi, le débit morphogène de l'Aar était nettement plus important à cet endroit avant la première correction des eaux du Jura. Les corrections des eaux du Jura ont eu pour effet de maintenir le même profil, tout en diminuant le débit morphogène. L'apport en charriage étant insuffisant, l'Aar ne s'adapte pas à son débit morphogène actuel et n'a pas retrouvé une morphologie d'équilibre.

Une autre explication au fait que la largeur actuelle du lit soit, par endroits, supérieure à la largeur naturelle théorique, est que la pente du lit est estimée d'après une moyenne sur 17km. Or, localement, cette pente peut varier, d'autant plus que le terrain est très plat et qu'à cause de la forme sinueuse des méandres, l'écoulement n'est pas partout dirigé parallèlement au thalweg.

L'amplitude des méandres en conditions naturelles doit également être déterminée, mais comme nous l'avons expliqué, les méandres visibles actuellement ont été formés avec des conditions hydrologiques différentes. Dans notre cas, il vaut mieux utiliser comme référence la largeur du lit. Pour des méandres développés dont l'angle tangentiel vaut environ 90°, on peut estimer que

l'amplitude d'un méandre vaut 7 fois la largeur du lit à pleins bords (Paccaud et Roulier, 2010), soit 756m dans notre cas.

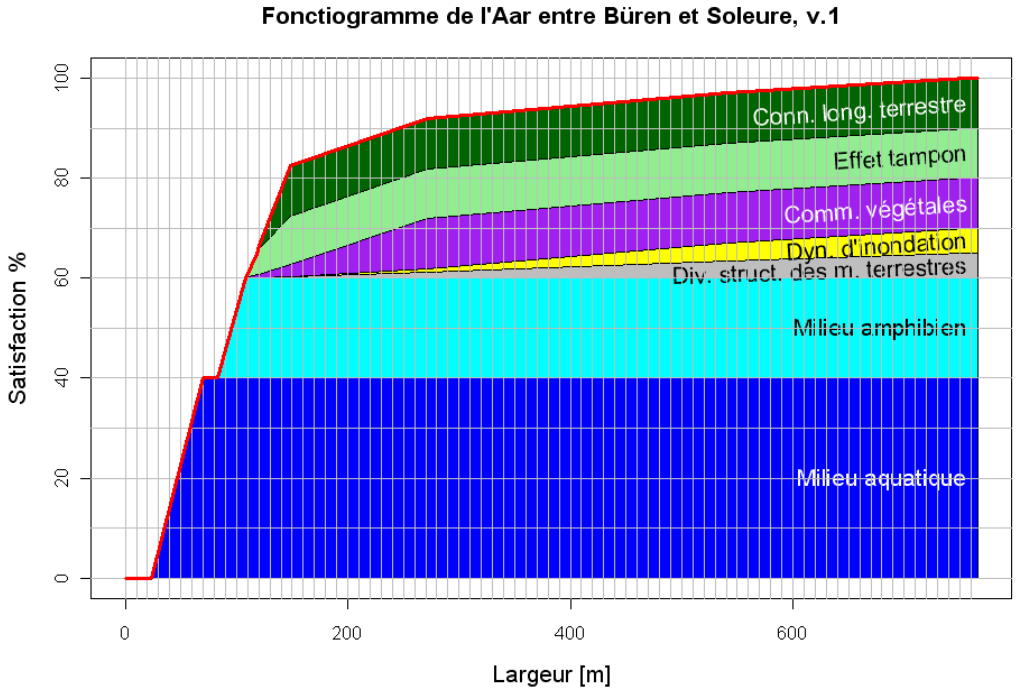


Figure 26. Fonctiogramme de l'Aar entre Büren et Soleure avec le système de pondération n° 1.

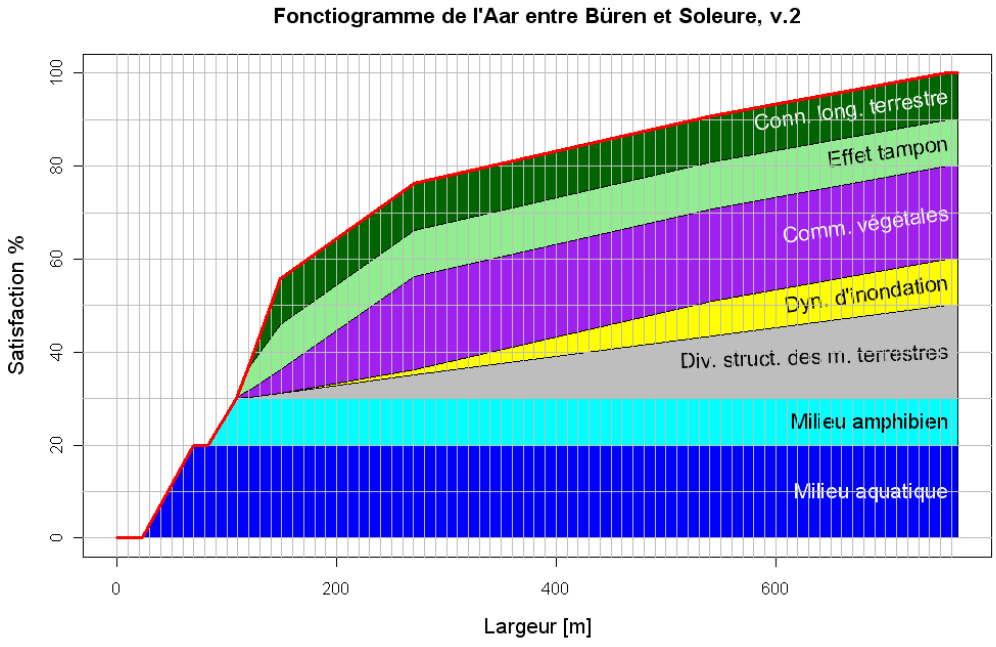


Figure 27. Fonctiogramme de l'Aar entre Büren et Soleure avec le système de pondération n°2.

9.2.3 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. Ce profil se trouve sur le canal Nidau-Büren près de Brügg, là ou 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.

Profil hydraulique minimum (n° 122844) :

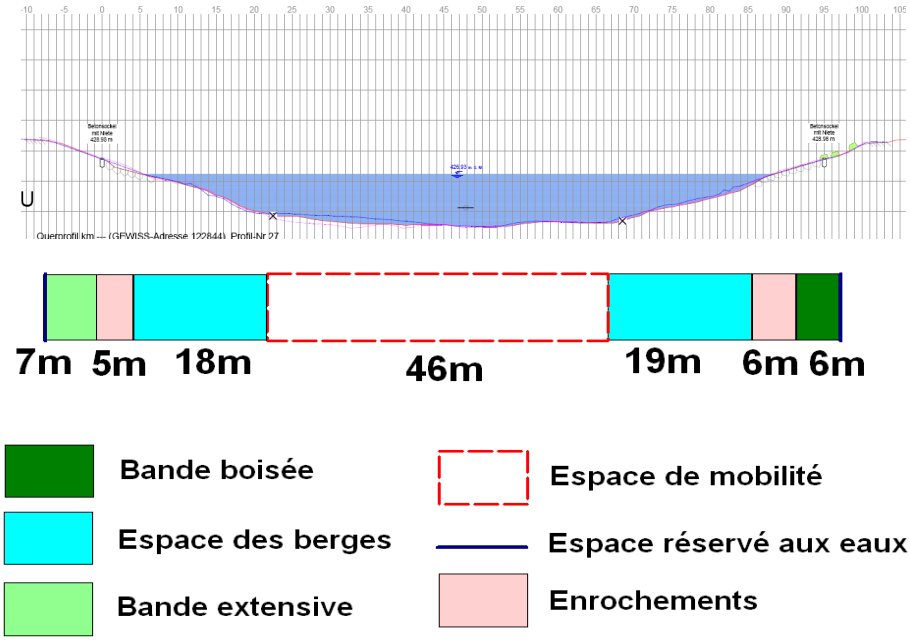


Figure 28. Schéma du profil moyen correspondant au profil hydraulique minimum de l'Aar entre Büren et Soleure.

On notera que, dans ce cas, les surfaces d'enrochements en haut des berges sont considérées comme les chemins, c'est-à-dire ne remplissant pas de fonctions naturelles.

9.2.4 Profil normal actuel

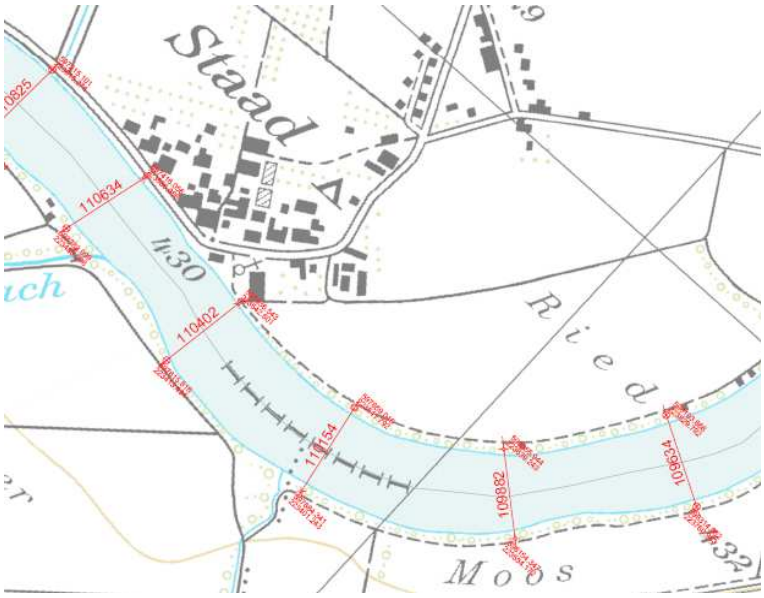


Figure 29. Situation des profils en travers de l'Aar juste en aval de Staad. Le profil n°109882 est évalué.

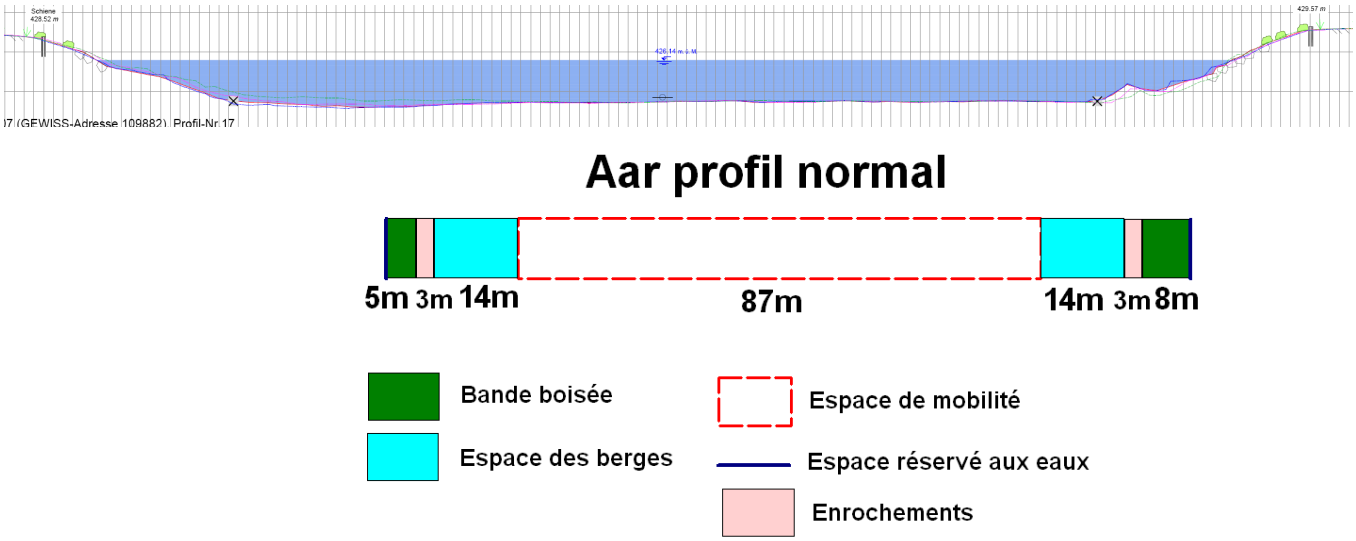


Figure 30 Schéma du profil moyen représentatif de l'état actuel de l'Aar entre Büren et Soleure.

9.2.5 Evaluation

Structure des milieux aquatiques

Avec un espace de mobilité de 46m, pour une largeur naturelle du fond du lit estimée à 70m, 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 38.4m. Le profil hydraulique minimum, avec son espace des berges de 37m obtient la note de 95%. Le profil normal actuel, avec un espace des berges de 28m, obtient une note 59%.

Zone tampon

Les deux profils ont une zone tampon de 13m au total. Mais la courbe de satisfaction « préfère » une bande de 7m et une bande de 6m (profil hydraulique minimum), plutôt qu'une bande de 8m et une bande de 5m (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 notre 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 notre 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	0.4
Milieu amphibien	95.0	59.0	0.2
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'indondation	0.0	0.0	0.05
Structures du milieu terrestre	0.0	0.0	0.05
Communautés typiques du m. terr.	0.0	0.0	0.1
Note globale	44.1	57.7	

Tableau 14. Notes des fonctions naturelles des deux profils de l'Aar entre Büren et Soleure.

On constate que le profil normal actuel reçoit une note de 13.6% 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.

Comparaison avec pondération n°2

Les mêmes calculs en appliquant le système de pondération n°2 donnent les résultats suivants :

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'indondation	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 15. Notes des fonctions naturelles des deux profils de l'Aar entre Büren et Soleure en appliquant le système de pondération n°2.

On constate que les deux notes diminuent sensiblement en raison du poids relatif inférieur des milieux aquatiques et amphibiens et de la très faible performance du milieu terrestre.

9.3 La Kleine Emme à Malters

Le secteur d'étude s'étend de Malters à Littau et mesure 5'030m. 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.

9.3.1 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.

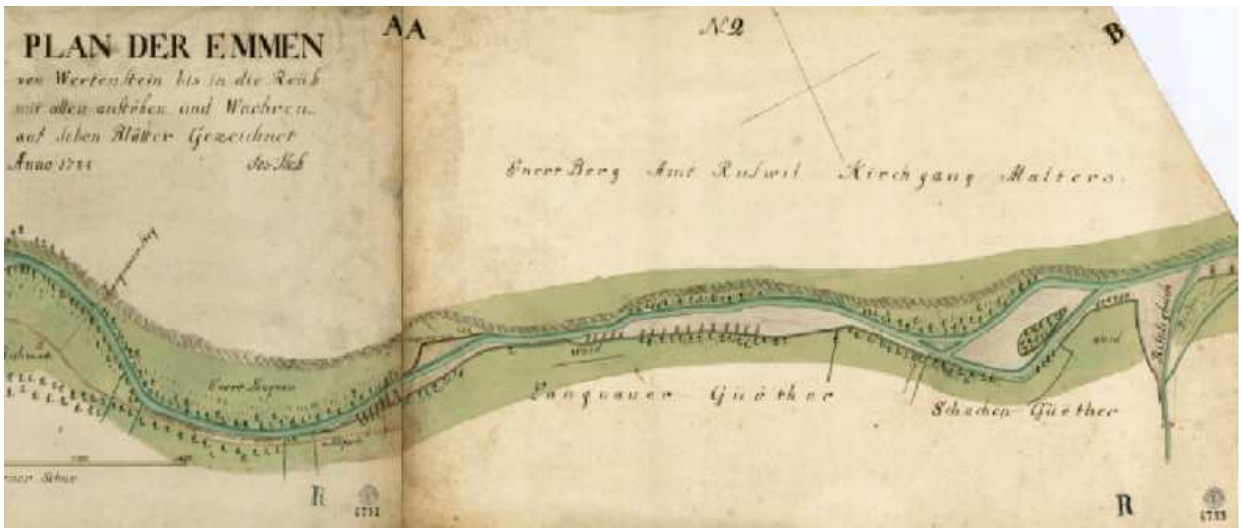


Figure 31 : carte historique de la Kleine Emme en aval de Werthenstein, Hess 1785.

Dans notre secteur d'étude, la Kleine Emme à l'état naturel comporte entre un et trois chenaux. Pour notre procédure nous allons travailler avec une valeur moyenne de deux chenaux.

9.3.2 Estimation des paramètres de l'état naturel

On utilise la formule de Manning-Strickler adaptée avec les paramètres suivants :

Débit = 423 m^3/s (Q5 à la station de Littau). Le débit actuel est jugé représentatif du débit naturel, car il n'y a pas de perturbation du débit morphogène dans le bassin versant.

Pente = 1.27%. Elle a été mesurée sur une carte nationale au 1 :25'000 à l'aide des courbes de niveau.

Rugosité = 30 $m^{1/3}/s$.

Pente des berges = 0.66.

Rapport largeur profondeur = 30 (correspond au style C4 selon la classification de Rosgen).

Nombre de chenaux = 2.

L'application de la formule de Manning-Strickler adaptée donne une largeur naturelle théorique du fond du lit de 44m, une largeur à pleins bords de 55m et une profondeur de 1.8m.

9.3.3 Fonctiogramme de l'espace de mobilité

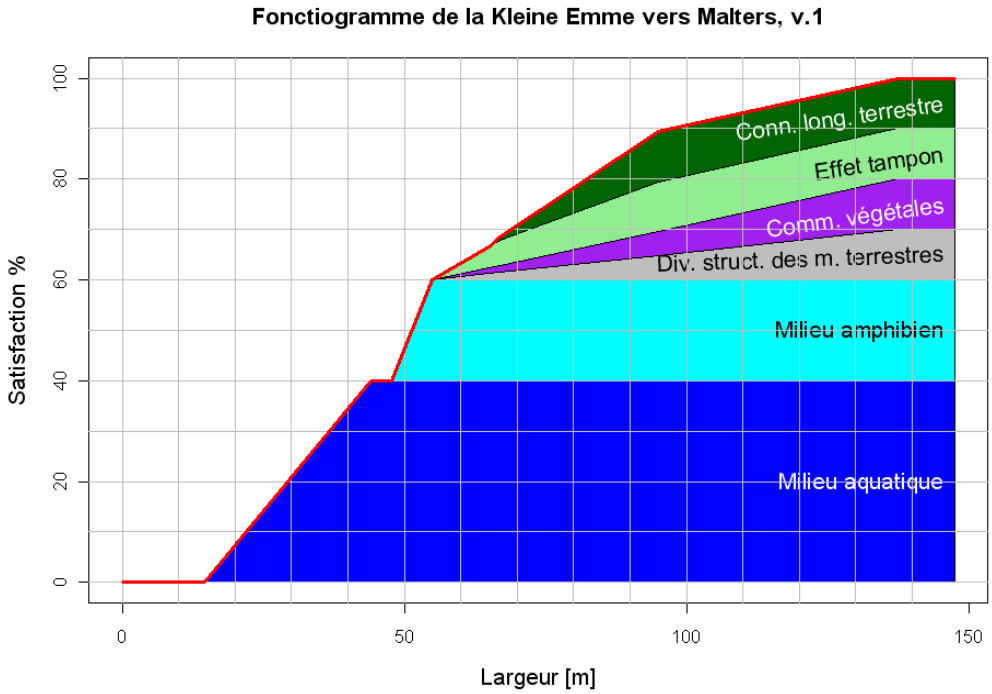


Figure 32. Fonctiogramme de la Kleine Emme en aval de Malters avec le système de pondération n°1.

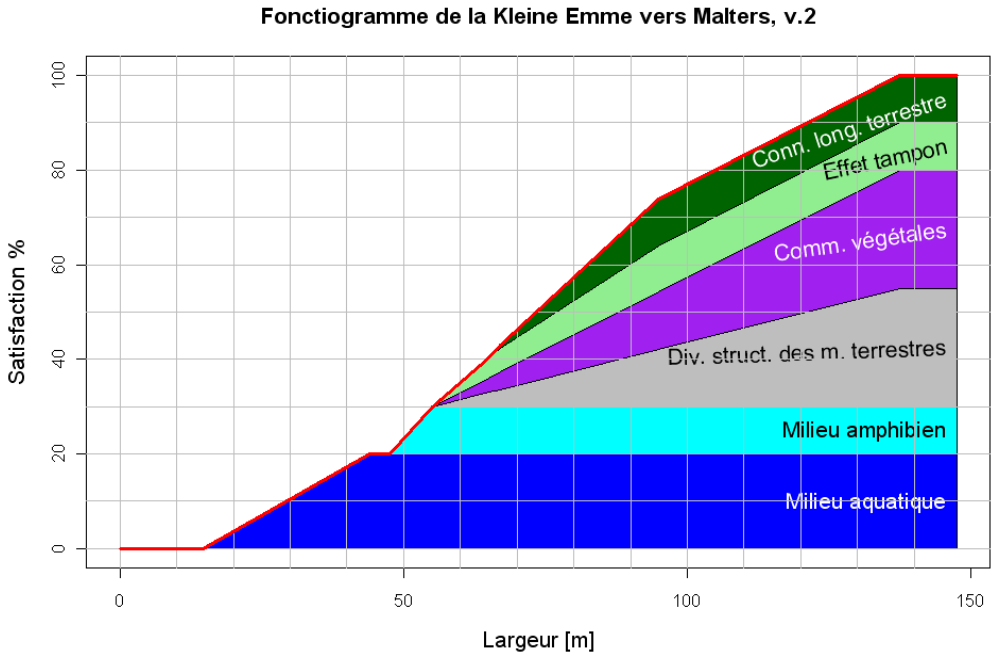


Figure 33. Fonctiogramme de la Kleine Emme en aval de Malters avec le système de pondération n°2.

9.3.4 Evaluation

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

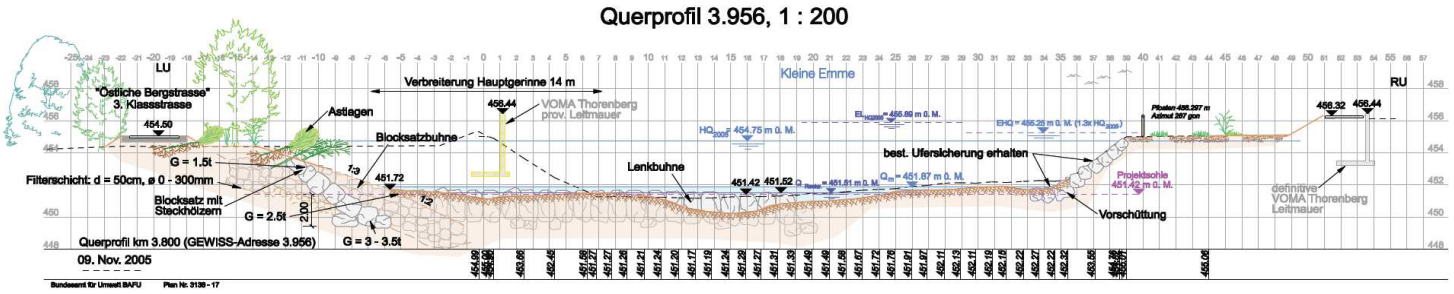


Figure 34. Plan de réaménagement de la Petite Emme, selon un projet de 2005.

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 se présente ainsi :

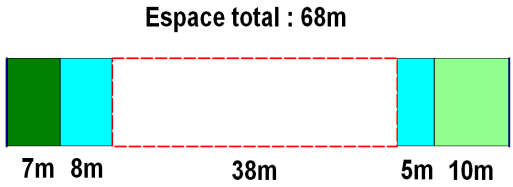


Figure 35. Profil moyen correspondant au profil de la Figure 341.

L'évaluation de ce profil en utilisant les courbes de satisfaction nous donne :

Fonctions	Note Profil 1	poids
Milieu aquatique	80	0.4
Milieu amphibien	100	0.2
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	0.1
Communautés typiques du m. terr.	0	0.1
Note globale	58.5	

Tableau 16. 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 (58.5) peut être qualifiée de moyenne. 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 reste très limité.

Nous allons maintenant comparer ce résultat à un profil hydraulique minimum pour la crue centennale. Le profil du km 14.000 (ci-après) 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.

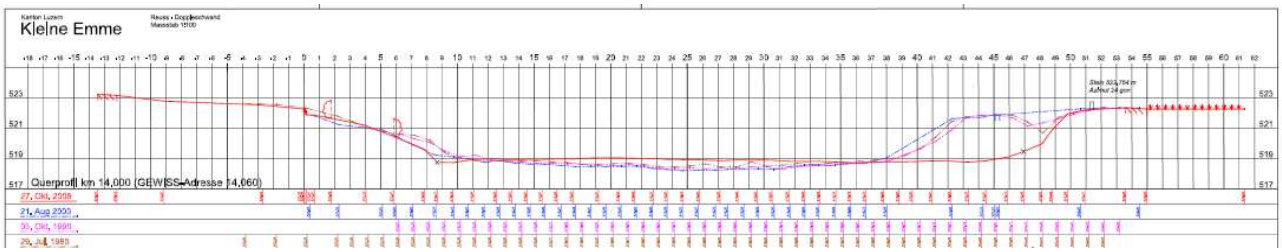


Figure 36. Profil hydraulique minimum de la Kleine Emme près de Malters.

Le profil moyen correspondant se présente comme suit :

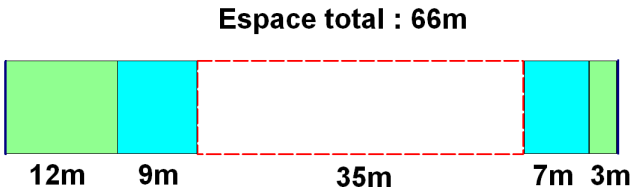


Figure 37. Profil moyen du profil hydraulique minimum de la Kleine Emme, vers Malters.

On constate que ce profil est assez semblable au précédent. Il conduit à l'évaluation suivante :

Fonctions	Note Profil hydr. min.	poids
Milieu aquatique	69	0.4
Milieu amphibien	100	0.2
Connectivité long. terr. rive droite	0	0.05
Connectivité long. terr. rive gauche	0	0.05
Effet tampon rive droite	25	0.05
Effet tampon rive gauche	70	0.05
Structures du milieu terrestre	0	0.1
Communautés typiques du m. terr.	0	0.1
Note globale	52.4	

Tableau 17. Evaluation du profil hydraulique minimum de la Kleine Emme vers Malters.

Les résultats des deux profils sont proches, le premier étant légèrement meilleur, en raison d'une bande boisée qui favorise la connectivité longitudinale terrestre.

Comparaison avec pondération n°2

Si on répète l'opération avec le système de pondération n°2, on obtient des notes plus basses, mais cela ne change pas significativement la différence entre les deux profils.

Fonctions	Note Profil 1	Note Profil hydr. min.	poids
Milieu aquatique	80	69	0.2
Milieu amphibien	100	100	0.1
Connectivité long. terr. rive droite	0	0	0.05
Connectivité long. terr. rive gauche	13.3	0	0.05
Effet tampon rive droite	63.3	25	0.05
Effet tampon rive gauche	53.3	70	0.05
Structures du milieu terrestre	0	0	0.25
Communautés typiques du m. terr.	0	0	0.25
Note globale	32.5	28.6	

Tableau 18. Evaluation du profil hydraulique minimum de la Kleine Emme vers Malters en appliquant le système de pondération n°2.

Comme dans l'exemple précédent, on constate que les deux notes diminuent sensiblement avec la variante 2 de pondération en raison du poids relatif inférieur des milieux aquatiques et amphibiens et de la faible performance des milieux terrestres.

9.4 La Maggia à Someo

Le tronçon d'étude va de Someo à Giumaglio et mesure 2'250 m. La pente est de 0.89 %. Le débit de la Maggia à cet endroit est influencé par les prélèvements d'eau pour l'exploitation hydroélectrique. Cela dit, les débits de crue sont moins touchés que les débits moyens. Le débit Q5 de la Maggia à Bignasco est de 425 m^3/s. Comme la station de mesure est située à 8km en amont et que la Maggia reçoit plusieurs affluents entre deux, on peut compter avec un débit Q5 de 510 m^3/s. Cette étude de cas d'un secteur quasi naturel permet de tester la procédure et de voir si elle fournit des résultats cohérents.

9.4.1 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.

9.4.2 Estimation des paramètres de l'état naturel

Dans les faits, cette largeur est plus difficile à mesurer que pour des cours d'eau avec un cours unique. En appliquant la formule de Manning-Strickler adaptée avec les paramètres suivants :

Débit = 510 m^3/s (Q5 à la station de Bignasco + 20%) ;

Pente = 0.89 % ;

Rugosité = 20 $m^{1/3}/s$;

Pente des berges = 0.33 ;

Rapport largeur profondeur = 60 (style D4 selon la classification de Rosgen) ;

Nombre de chenaux, par Q5 = 3.

On obtient une largeur à pleins bords de 101m et une largeur du fond du lit de 70m.

9.4.3 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, nous pouvons comparer si la valeur théorique fournie par la procédure correspond à la réalité. Premièrement, nous regarderons si la valeur naturelle du fond du lit et du lit à pleins bords correspond à la réalité et ensuite, nous allons nous focaliser 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 2.5 fois la largeur du lit à pleins bords.

La carte de végétation des zones alluviales d'importance nationale montre la mosaïque de la végétation alluviale et l'étendue de sa zonation. L'état optimum est atteint quand toutes les formations alluviales typiques sont présentes : bancs de sédiments, 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), selon la cartographie des zones alluviales. Nous allons donc mesurer la largeur occupée par ces trois unités pour estimer la largeur du lit mineur à pleins bords.

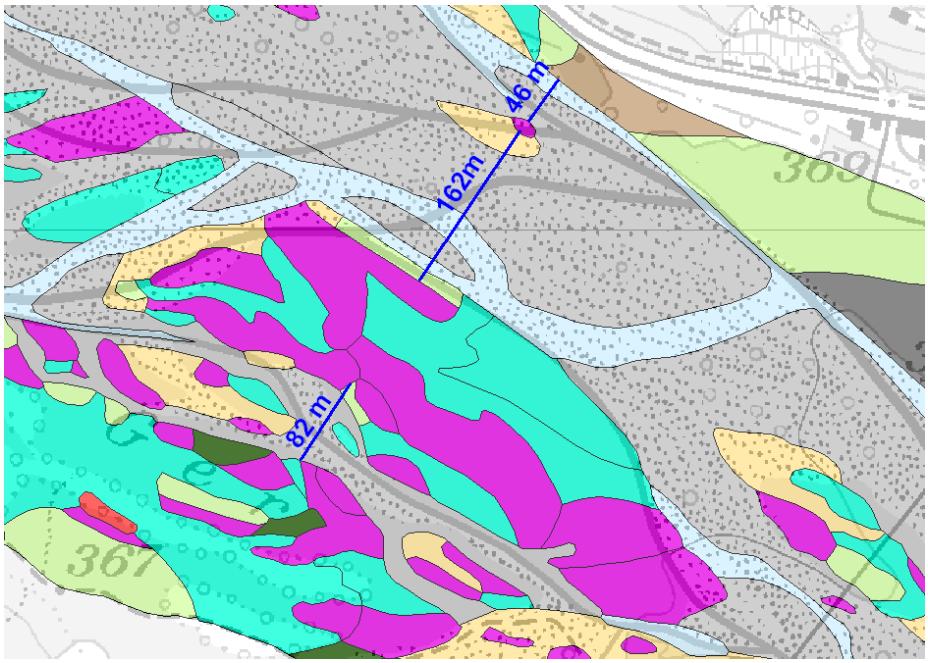


Figure 38. Extrait de la carte de végétation de la zone alluviale n°171 et estimation de la largeur naturelle du lit.

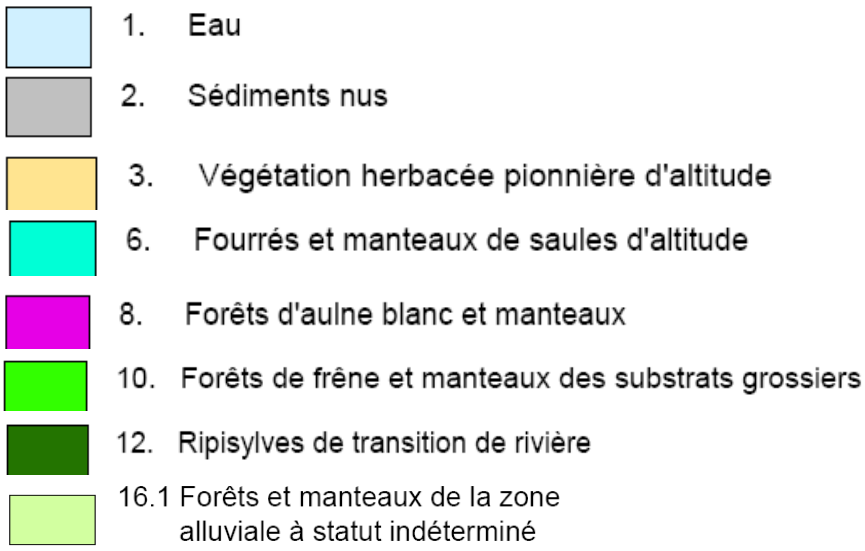


Figure 39. Extrait de la légende de la carte de végétation des zones alluviales d'importance nationale. Les bois tendres sont les unités 6 et 8, et les bois durs 10 et 12. Le 16.1 étant non déterminé, il peut faire partie des formations à bois tendres ou à bois durs.

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 290m (82m + 162m + 46m). 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, on trouve une valeur de 180m (125m + 45m + 10m). 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 127m et comprise entre 180m et 290m, nous prendrons 210m pour la moyenne du tronçon d'étude. Elle est donc nettement supérieure à la valeur théorique fournie par la procédure, qui était de 101m.

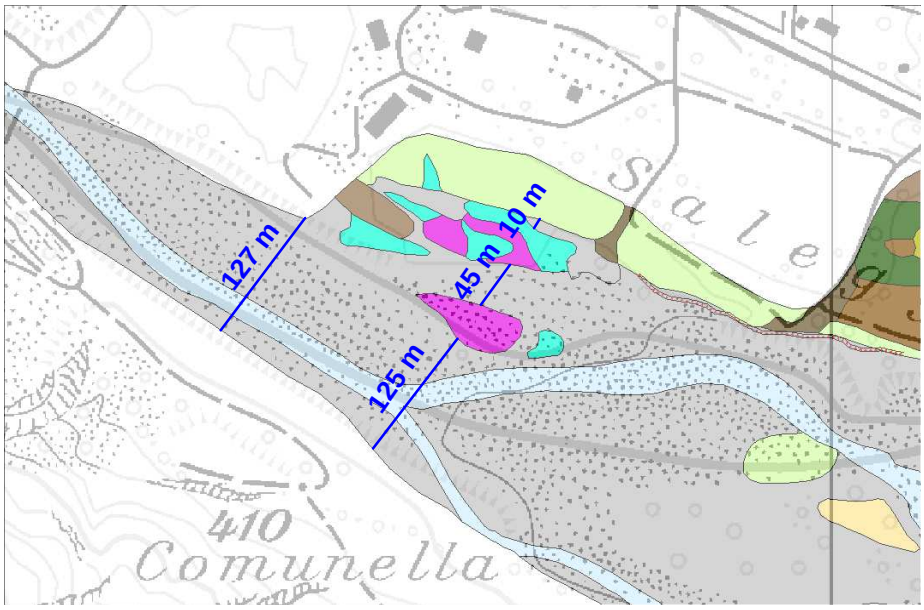


Figure 40. Extrait de la carte de végétation de la zone alluviale n°171 et estimation de la largeur naturelle du lit.

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 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 Q5 ne correspond pas au débit morphogène. O. Overney (OFEV, comm. orale) considère, quant à lui, que la crue morphogène est plus proche de Q50.

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 nous l'avons vu au chapitre précédent, 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 525m pour atteindre 100% des fonctions naturelles.

Si on étudie le lien entre espace de mobilité et formation alluviale sur un profil représentatif (voir Figure 41), on arrive au constat suivant :

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

250 – 520m : + bois tendres ;

> 520m : + bois durs.

L'étude de la carte de végétation montre qu'on obtient des bois durs seulement à partir d'un espace de mobilité de 520m 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. 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%.

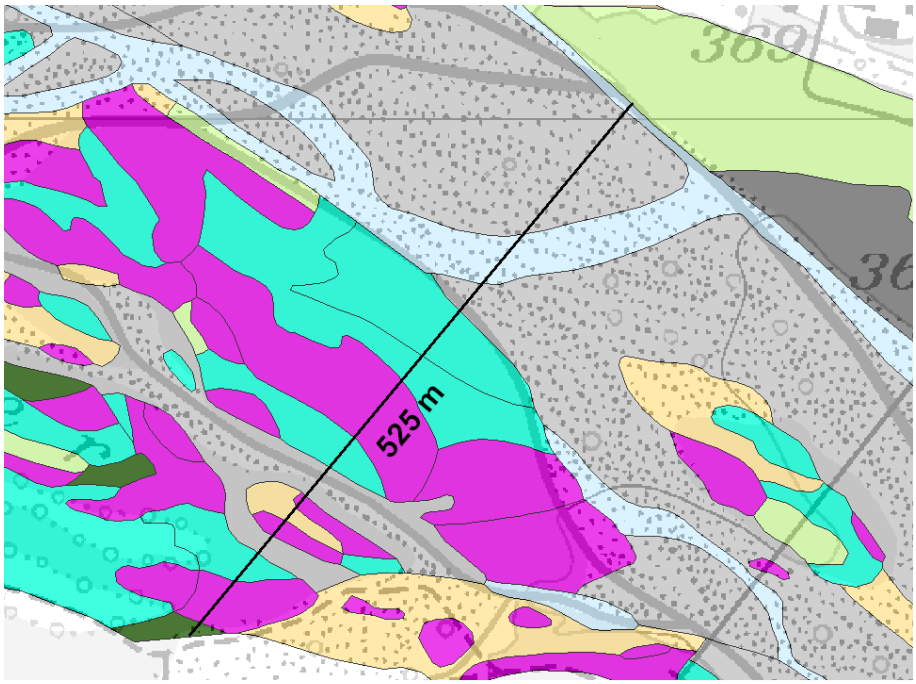


Figure 41. Extrait de la carte de végétation de la zone alluviale n°171. Profil correspondant à 100% des fonctions naturelles.

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

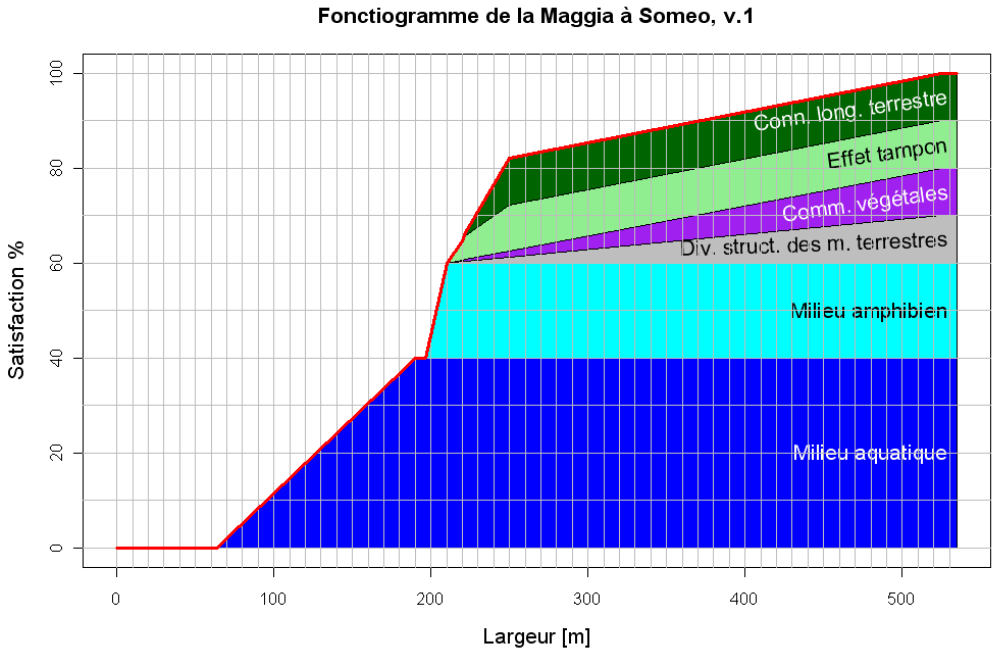


Figure 42. Fonctiogramme de la Maggia à Someo, considérant une largeur naturelle à pleins bords de 210m.

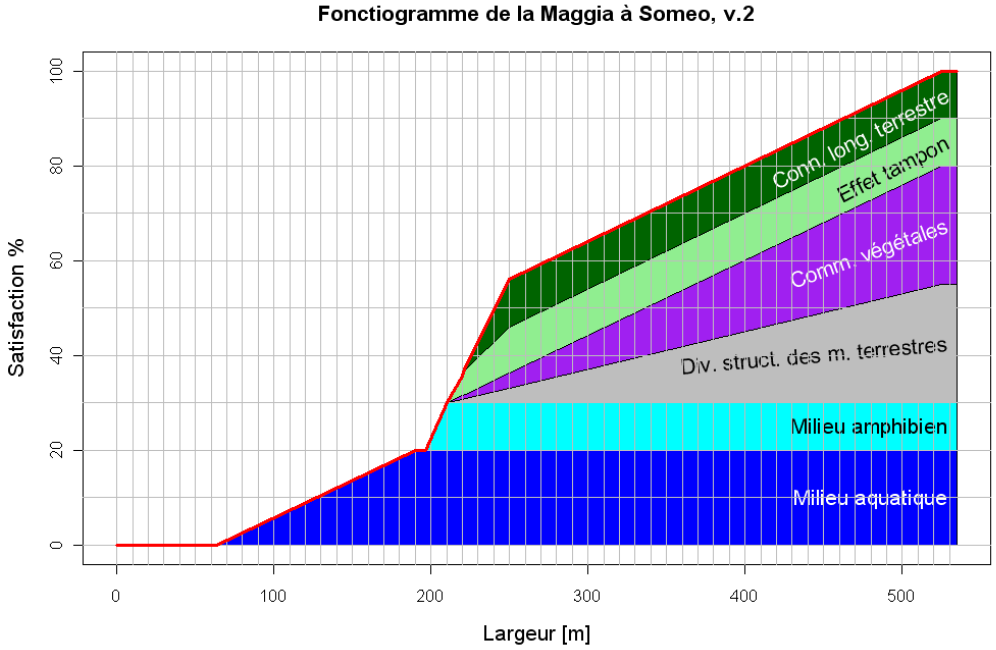


Figure 43. Fonctiogramme de la Maggia à Someo, considérant une largeur naturelle à pleins bords de 210m et en appliquant le système de pondération n°2.

9.4.4 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. Nous attribuons 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 de 525m 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 525m. 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.

Ces résultats ne sont pas modifiés par la variante n°2 de pondération.

9.5 L'Aar entre Thoune et Berne

Le rapport « Aarewasser. Raumbedarf der Aare zwischen Thun und Bern » (Bonnard et Witschy 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 notre 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 détentes 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 de la Kander dans le Lac de Thoune.

9.5.1 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 Witschy 2012), mesure entre 40 et 80m selon les secteurs. Deux autres approches (cartographie écomorphologique, cartes historiques) évaluent la largeur du lit à 40-120m et 40-80m respectivement.

La largeur proposée des bandes riveraines se fonde également sur plusieurs approches : les cartes historiques aboutissent à une largeur de 30-70m par bande. Une approche cartographique systématique de cinq zones alluviales de référence (110 profils transversaux mesurés) préconise des bandes riveraines de 40-45m 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.

9.5.2 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.

9.5.3 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. L'extrait de carte à la hauteur de Kleinhöchstetten, ainsi que la carte de la

végétation de l'objet 69 (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 Thoune.

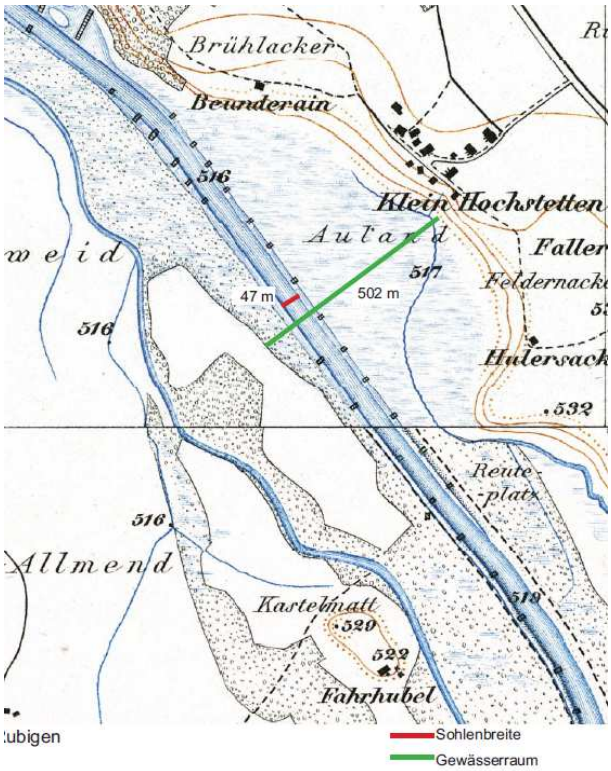


Figure 44. Carte Siegfried de l'Aar à Belp en 1870-1876.

9.5.4 Estimation des paramètres de l'état naturel

La carte Siegfried indique une largeur du lit de 47m à la hauteur de Rubigen ; il s'agit d'une largeur corrigée, or on cherche la largeur naturelle qui paraît plus représentative que celle de 36m indiquée pour Muri où la vallée est plus resserrée. Un rapport de Hunziker, Zarn und Partner de 2011 (cité dans Bonnard et Witschi 2012) évalue la largeur de régime à environ 60m. Nous pouvons aussi estimer cette largeur en utilisant la formule de Manning-Strickler adaptée. Il faut, au préalable, estimer différents paramètres.

D'après le style du cours d'eau, on peut estimer un rapport largeur profondeur du cours d'eau à l'état naturel de 20 (voire même 30-45m, L. Hunzinger, comm. orale).

La pente des berges vaut 0.33.

Le débit morphogène (Q5) vaut 348 m^3/s à la station de mesures Aare-Thun.

La rugosité (K) du lit à l'état naturel est estimée à 20$m^{1/3}$/s.

La pente moyenne du cours d'eau (i) dans le secteur d'étude vaut 1.7‰.

L'application numérique de la formule de Manning-Strickler adaptée, arrondie au dixième, nous donne :

Lpb = 64m

Lfl = 45m

h = 3.2m.

L'amplitude des méandres en conditions naturelles peut être mesurée sur les cartes historiques. Elle est égale à 400m.

On retiendra 45m comme largeur du fond du lit, 64m comme largeur à pleins bords, 3.2m de profondeur et 400m pour l'amplitude naturelle des méandres.

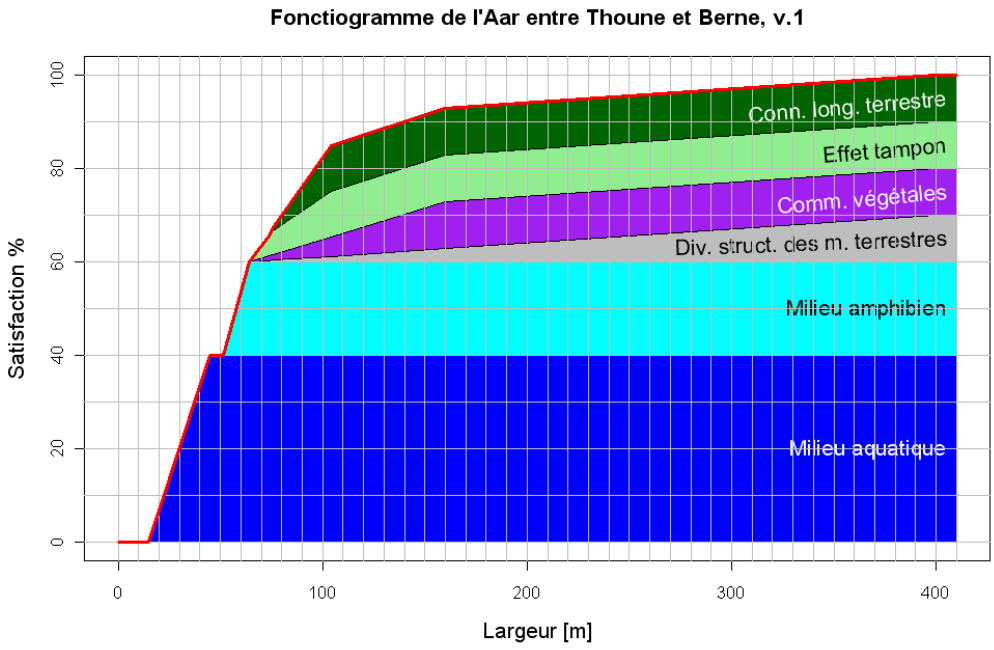


Figure 45. Fonctiogramme de l'Aar entre Thoune et Berne.

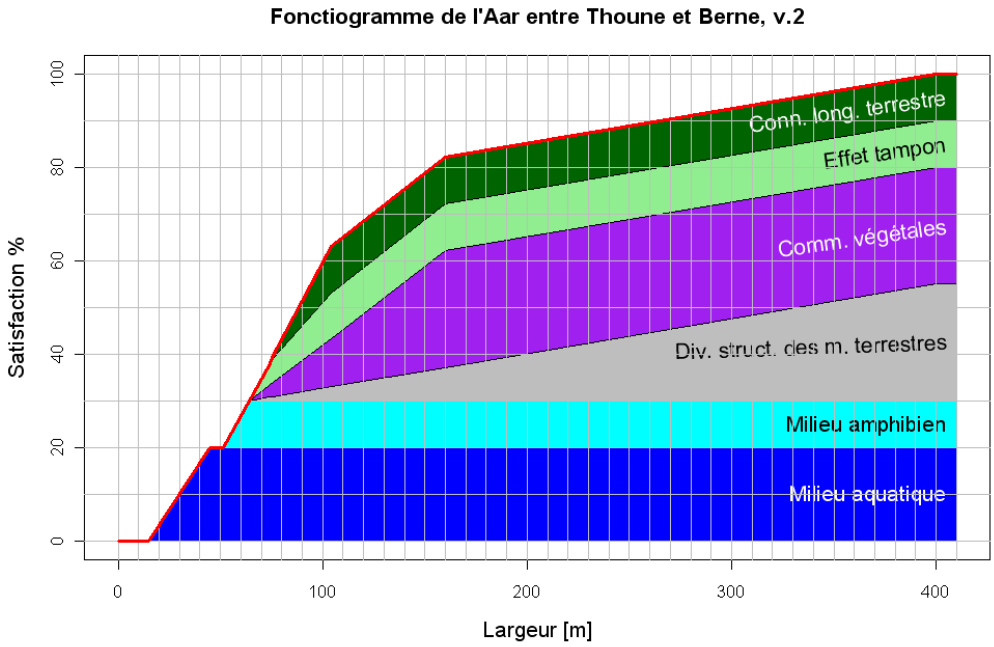


Figure 46. Fonctiogramme de l'Aar entre Thoune et Berne en appliquant le système de pondération n°2.

Dans notre cas, nous décidons d'évaluer l'espace réservé aux eaux de deux situations projetées :

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

9.5.5 Evaluation

Dans le secteur d'étude, à la hauteur de Kleinhöchstetten, l'espace cours d'eau minimum est une bande de 150m de largeur superposée au cours actuel et contenu dans le périmètre de la zone alluviale actuelle (Objet 69. Belper Giessen). On admet que le cours d'eau élargi à 64m (Lpb) 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 ; 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 10m 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 400m (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 : 167m, bande boisée : 157m).

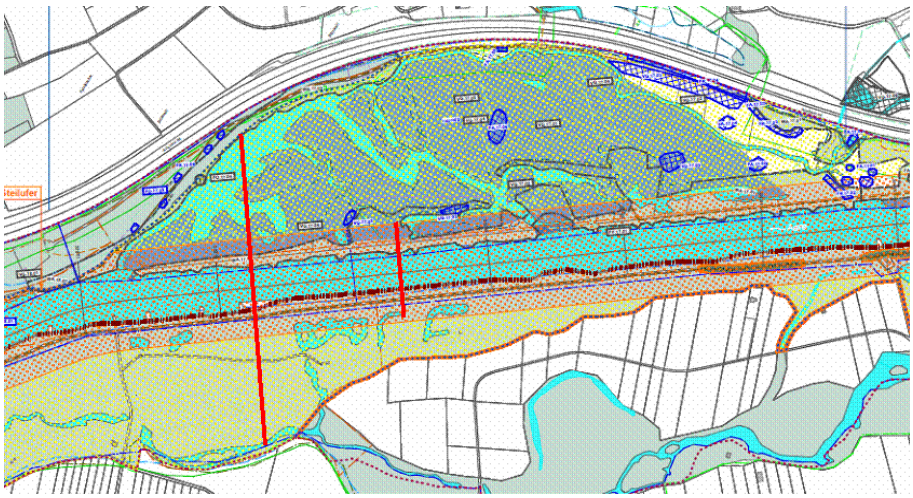
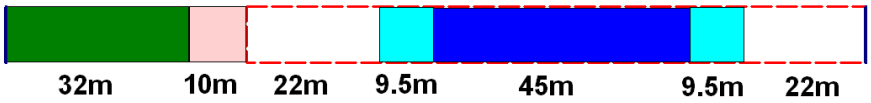


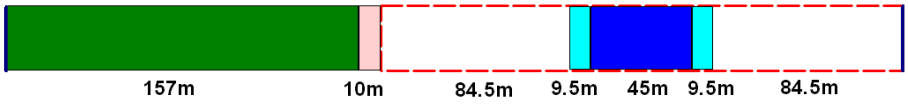
Figure 47. Emplacement des deux profils comparés dans l'évaluation (espace augmenté, à gauche, espace minimum, à droite). En rive gauche (rive inférieure), la digue est conservée.

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

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



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



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.

9.5.6 Evaluation des deux scénarios

La procédure présente l'évaluation suivante des deux variantes.

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

Fonction	Note	Poids
Milieu aquatique	100	0.4
Milieu amphibien	100	0.2
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	12.6	0.1
Communautés typiques du m. terr.	42.3	0.1
Note globale	85.5	

L'espace minimum de l'Aar obtient la note de 85.5 sur 100. 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 (64m) 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 = 44m de largeur) et la structure des milieux terrestres (amplitude des méandres insuffisante).

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

Fonction	Note	Poids
Milieu aquatique	100	0.4
Milieu amphibien	100	0.2
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	0.1
Communautés typiques du m. terr.	100	0.1
Note globale	95.0	

L'espace augmenté de l'Aar obtient la note de 95 sur 100. Les fonctions des milieux aquatique et amphibien sont remplies à 100% pour les mêmes raisons que ci-dessus. Les communautés alluviales typiques sont développées à l'optimum car l'espace de mobilité (233m) est supérieur à 2.5 fois la largeur à pleins bords (2.5 x 64m = 160m). Globalement, la note de 95 est excellente 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 peut sembler faible, mais il faut être conscient que le premier est déjà un projet ambitieux alors que le second est un projet très ambitieux.

Comparaison avec pondération n°2

En appliquant le système de pondération n°2, les valeurs absolues des notes évoluent vers le bas et l'écart entre les deux variantes est accentué.

Fonction	Note esp. min	Note esp. augm.	Poids
Milieu aquatique	100	100	0.2
Milieu amphibien	100	100	0.1
Connectivité long. terr. rive droite	100	100	0.05
Connectivité long. terr. rive gauche	100	100	0.05
Effet tampon rive droite	100	100	0.05
Effet tampon rive gauche	100	100	0.05
Structures du milieu terrestre	12.6	50.3	0.25
Communautés typiques du m. terr.	42.3	100	0.25
Note globale	63.7	87.6	

Tableau 19. Evaluation des deux variantes d'aménagement de l'Aar entre Thoune et Berne en appliquant le système de pondération n°2.

Le système de pondération n°2 reflète bien le gain important en biodiversité attendu par la mise à disposition d'un vaste système alluvial. Cette différence plus nette entre les deux notes pourrait constituer un élément décisif lors du choix de la variante.

9.6 La Sarine en amont du Lac de la Gruyère

Le tronçon d'étude mesure 2.1km. Il est situé entre le « Pont qui branle » et l'embouchure de la Trême. Le cours actuel est corrigé à une largeur moyenne de 30m. 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.

9.6.1 Evaluation du style fluvial naturel

La carte Dufour (1860) est représentative d'un état non corrigé. 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, nous qualifierons ce style de cours en tresses.

Figure 48. Secteur d'étude de la Sarine, carte Dufour 1860 et carte nationale récente.

9.6.2 Estimation des paramètres de l'état naturel

L'état historique est non corrigé, on peut mesurer la largeur à pleins bords. D'après la carte Dufour, on peut voir que la largeur naturelle à pleins bords est d'environ 60m. Mais, pour être sûr de pouvoir utiliser la largeur historique comme valeur de référence, on doit se demander si cette valeur est représentative des conditions hydrologiques actuelles. La question se pose car les barrages situés en amont sont gérés de manière à éviter les surverses et ils sont utilisés comme ouvrages de rétention pour réduire les pointes de crue. Cette gestion a pour effet de diminuer les débits de crue, donc de réduire le débit morphogène. Le nœud de la question est de savoir si on prend les débits mesurés à Broc comme référence pour les débits naturels ou si l'on doit estimer le débit naturel comme s'il n'y avait pas d'ouvrages sur le bassin versant. Notre réponse est que 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 ; cette largeur devrait être inférieure à la largeur historique.

On utilise la formule de Manning-Strickler adaptée avec les paramètres suivants :

Débit morphogène (Q5) = 248m^3/s

Rugosité du lit = 25$m^{1/3}$/s

Rapport largeur profondeur = 25

Pente des berges (gravier) = 0.33

Pente du lit = 0.0085

Nombre de chenaux : 1.

L'application de la formule donne une largeur à pleins bords de 47m, une largeur naturelle du fond du lit de 36m et une profondeur de 1.9m.

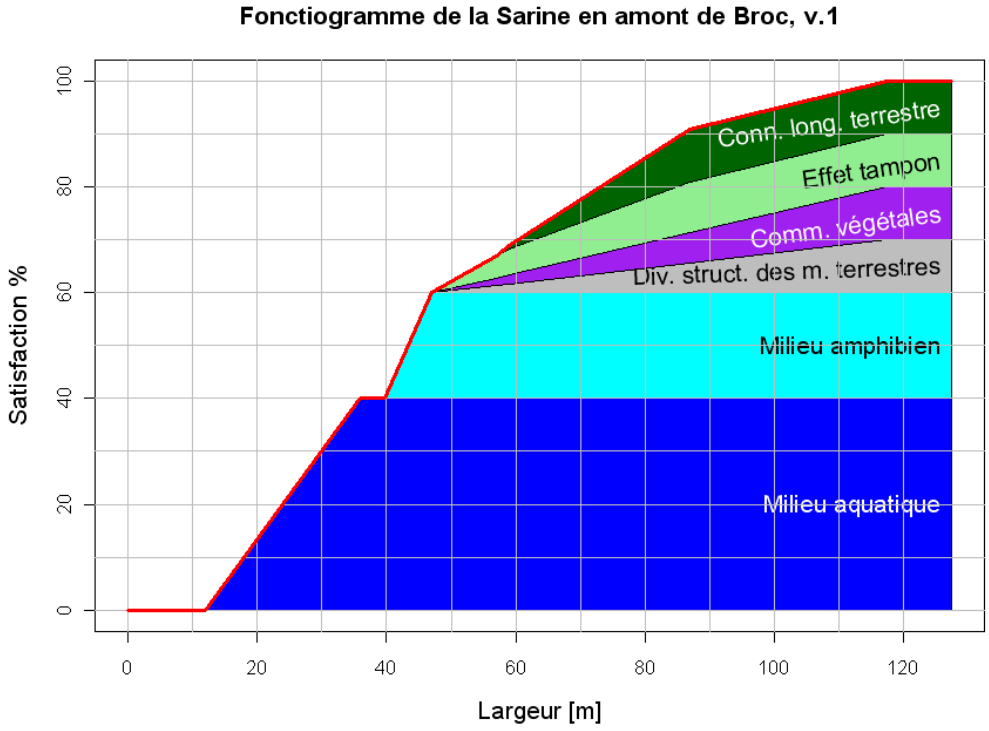


Figure 49. Fonctiogramme de la Sarine à Broc.

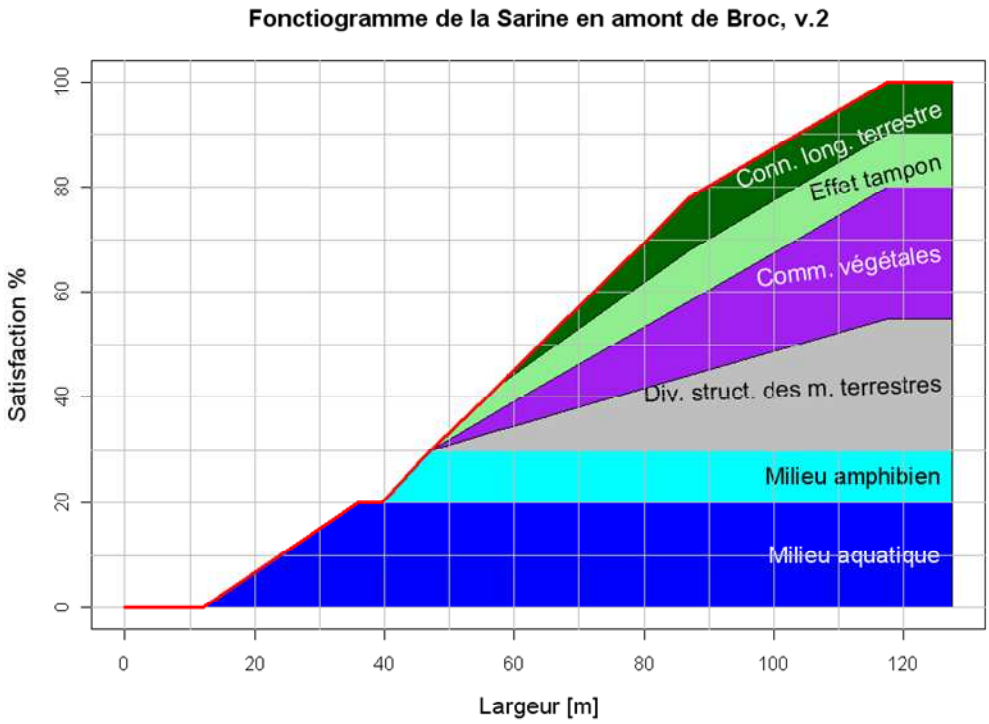


Figure 50. Fonctiogramme de la Sarine à Broc en appliquant le système de pondération n°2.

9.6.3 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.

Le profil moyen est obtenu avec un espace cours réservé aux eaux de 82m de large en moyenne et en considérant l'utilisation actuelle du sol. 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 20m à partir de l'espace de mobilité. Une visite de terrain a permis d'évaluer que l'espace des berges était d'environ 4m par berge.

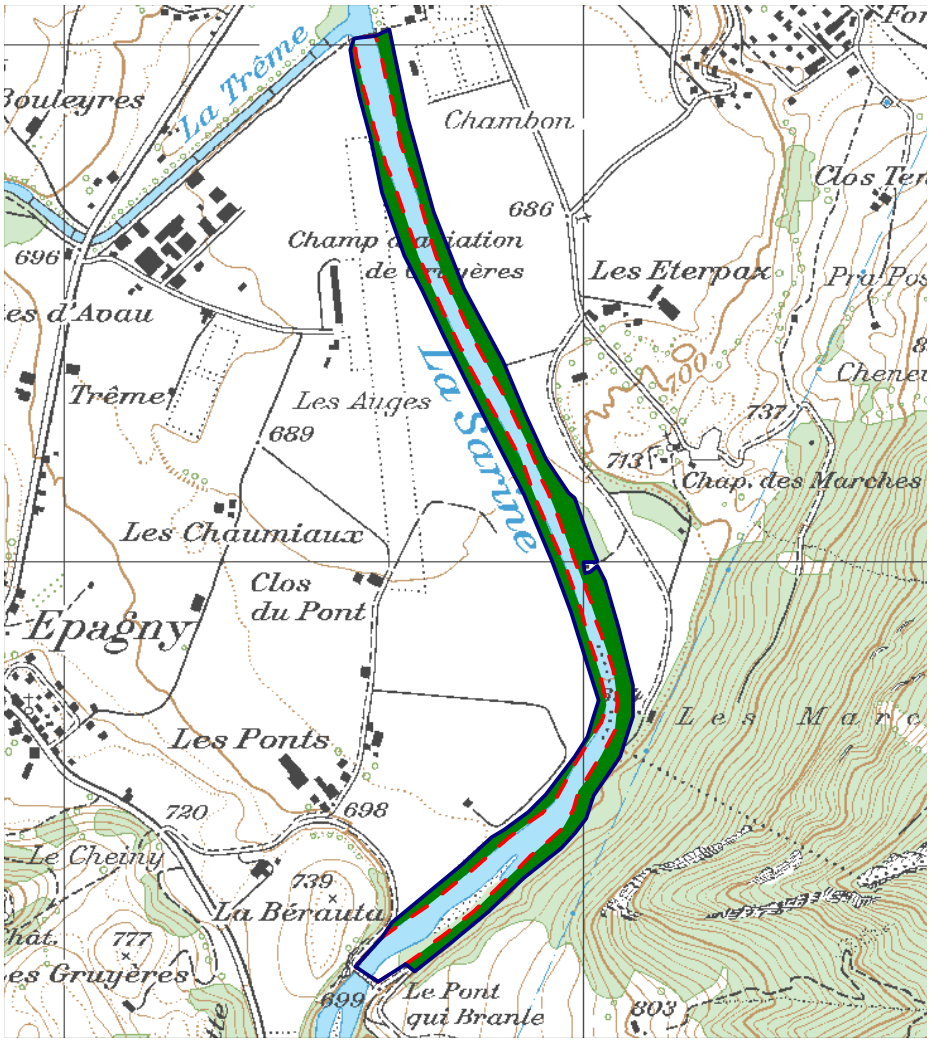


Figure 51. Cas d'étude de la Sarine, carte de l'utilisation du sol permettant de construire le profil moyen.

Figure 52. Profil moyen de l'étude de cas de la Sarine.

9.6.4 Evaluation

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

Fonction	Note	Poids
Milieu aquatique	75.0	0.4
Milieu amphibien	55.3	0.2
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	0.1
Communautés typiques du m. terr.	0.0	0.1
Note globale	59.4	

Tableau 20. Résultats de l'évaluation du tronçon d'étude de la Sarine dans son état actuel.

Comparaison avec pondération n°2

En appliquant au profil moyen les courbes de satisfaction des cours en tresses et le système de pondération n°2, on obtient les résultats suivants :

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 21. Résultats de l'évaluation du tronçon d'étude de la Sarine dans son état actuel en appliquant le système de pondération n°2.

9.6.5 Commentaire

Ce tronçon obtient une note moyenne (59.4/100). 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, 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 53. 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.

10 Conclusions

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 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.

La procédure proposée ici est perfectible ; elle peut être complétée par de nouveaux indicateurs.

Application

La procédure constitue une aide à la décision pour définir l'espace nécessaire aux revitalisations, mais il n'est pas utile de l'appliquer systématiquement à tous les tronçons de cours d'eau de plus de 15m de large. Elle est surtout utile à ceux qui sont ou seront concernés par un projet de revitalisation. En effet, pour des tronçons qui ne seront jamais revitalisés, on peut considérer que l'espace à réserver aux eaux est compris entre deux bornes qui sont définies précisément dans l'OEaux. La borne inférieure est donnée par les cours d'eau dont la largeur naturelle du fond du lit vaut exactement 15m. Pour ces cours d'eau, d'après la formule de l'OEaux art. 41a al. 2 lit b, l'espace

réservé doit être de 29.5m + la largeur naturelle du fond du lit. La borne supérieure est donnée par les cours d'eau qui traversent des biotopes d'importance nationale. Pour ces derniers, l'OEaux (art. 41a al.1 lit. c) mentionne que l'espace réservé doit être égal à la largeur naturelle du fond du lit + 30m. Ainsi, il est normal que l'espace réservé d'un cours d'eau quelconque de plus de 15m, soit supérieur à celui d'un cours d'eau d'exactement 15m, mais inférieur à celui d'un cours d'eau traversant un biotope d'importance nationale. L'espace réservé d'un cours d'eau de plus de 15m vaut donc la largeur naturelle du fond de son lit + un espace compris entre 29.5 à 30 m. Heureusement, l'OEaux précise que cet espace doit être augmenté si cela est requis pour une revitalisation, et c'est dans ce cas que notre procédure est utile, sauf la partie de l'étude qui concerne l'évaluation de la largeur naturelle du fond du lit qui peut s'appliquer à tous les cours d'eau de plus de 15m. Précisons encore que l'OEaux tolère des réductions de cet espace dans les zones densément bâties.

L'application de la procédure est plus complexe que celle de l'abaque 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 m^2 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 une pondération de ces dernières. 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, notre choix a été de répartir les poids par milieux, puis par fonctions. Les pondérations présentées accordent 40% au milieu aquatique, 20 % au milieu amphibien et 40% au milieu terrestre. Cette répartition est basée sur la considération que le milieu aquatique est important, sa qualité est indispensable à la survie des poissons qui restent le groupe d'espèces le plus emblématique des cours d'eau.

Le milieu terrestre est important aussi. 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.

Le milieu amphibien occupe moins d'espace que les précédents, 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 voir sur les

fonctiogrammes que la pente de la courbe est la plus forte à l'endroit critique pour le milieu amphibien. Ceci traduit bien l'importance écologique de cette interface.

En résumé, la répartition 40-20-40% semble bien refléter l'importance écologique relative des milieux aquatique, amphibien et terrestre. Mais cette répartition est en discussion car la note exprime assez faiblement le gain obtenu par le rétablissement d'un milieu naturel terrestre étendu au bord d'un grand cours d'eau.

La variante 2 de pondération (20-10-70%) se justifie si l'on considère 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. Cette variante présente des avantages car elle met bien en valeur le gain de biodiversité et de structures typiques lié à un milieu naturel terrestre proche de la largeur idéale.

Les expériences récoltées par les utilisateurs seront valorisées ultérieurement pour identifier une combinaison « idéale » de pondération.

Etudes des cas

L'application aux études de cas montre que la procédure donne des résultats cohérents. Nous avons pu voir 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 semble bonne car elle 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.

11 Bibliographie

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.

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

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 Gefahren-grundlagen".* Umwelt-Wissen. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). Bern und Birmensdorf. 426 pp.

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.

CORPEN 2007: "*Les fonctions environnementales des zones tampon* ". Paris. 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.

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.

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.

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.

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.

Laboratoire d'écologie des hydrosystèmes naturels et anthropisés. (http://umr5023.univ-lyon1.fr/index.php?lang=fr&pid=28)

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.

Malavoi J.-R. 1998: "*Bassin Rhône Mediterranée 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. 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) 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.

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 (à paraître) : "*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.

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.

Pichod-Viale D. et Frontier S. 1991: "*Ecosystèmes: structure, fonctionnement, évolution".* Collection d'écologie 21. Masson. Paris. 392 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. Romailler 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.

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.

Wyss J. 1819: "Essai statistique sur le Canton de Berne". Zürich.

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.

Service conseil Zones alluviales
Grégory Paccaud, ing. SIE EFPFL
Dr Christian Roulier, biologiste
Expertise: Flussbau AG SAH, Dr Lukas Hunzinger,

Yverdon-les-Bains, le 1er juillet 2013