



Détermination de la largeur naturelle du fond du lit des cours d'eau



Impressum

Editeur : Office fédéral de l'environnement (OFEV), CH-3003 Berne

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC)

Auteurs :

Texte principal

Emma Mirjan	Hunziker, Zarn & Partner AG
Roni Hunziker	Hunziker, Zarn & Partner AG (HZP)
Katharina Edmaier	OFEV, Div. Prévention des dangers (co-directrice de projet)
Ulrich von Blücher	OFEV, Div. Eau, (co-directeur de projet)

Exemple de cas

Ueli Schälchli Flussbau AG	(Exemples : L'Aar à Wildegg, Argovie, la Thur à Wattwil, Saint-Gall)
Tamara Ghilardi CSD ING. SA	(Exemple : La Jogne, Fribourg et Berne)
Emma Mirjam HZP	(Exemple : La Sitter, Thurgovie)

Groupe d'accompagnement

Susanne Haertel-Borer	OFEV, Div. Eau
Antoine Magnollay	OFEV, Div. Prévention des dangers
Christian Marti	AWEL, ct. de Zurich
Manuel Nitsche	OFEV, Div. Eau
Michael Pauli	OFEV, Div. Eau

Photo de couverture : *La Thur à Pfyn– Johannes Sulzberger, 1792*

La publication n'existe que sous forme électronique et est disponible en français et en allemand.

Remarque :

Le présent rapport est le produit d'une collaboration intensive entre de nombreux spécialistes venant du secteur privé, du secteur public et de la recherche. Outre le groupe d'accompagnement au sens strict, le comité de pilotage de la plate-forme Revitalisation de l'Agenda 21 pour l'eau a accompagné les travaux d'élaboration de ce rapport. Par ailleurs, un atelier d'experts réunissant 21 participants issus des cantons, des bureaux spécialisés et de la recherche a été organisé durant la phase de lancement des travaux. Le rapport présente des méthodes possibles pour déterminer la largeur naturelle du lit des cours d'eau. Des divergences d'évaluation entre experts au sujet de certaines questions de détail particulières se sont présentées, notamment concernant le rôle des caractéristiques morphologiques (états d'atterrissement, d'équilibre ou d'érosion) et au sujet de la réduction du débit. Dans ces cas spécifiques, l'OFEV a décidé de la version du texte à retenir en se basant sur les discussions menées.

Résumé

La largeur naturelle du fond du lit est un paramètre de base fondamental, aussi bien pour déterminer l'espace nécessaire dans le cadre de projets d'aménagement des cours d'eau, que pour déterminer l'espace réservé aux eaux de manière générale (art. 41a, ordonnance sur la protection des eaux (RS 814.201 ; OEaux)). Étant donné qu'en Suisse, beaucoup de cours d'eau sont aujourd'hui dans un état très éloigné de l'état naturel, cette largeur ne peut généralement pas être mesurée directement mais doit être évaluée par une expertise.

Le présent rapport présente une vue d'ensemble des méthodes les plus courantes pour déterminer la largeur naturelle du fond du lit :

- Analyse de documents historiques
- Analyse de tronçons comparables proches de l'état naturel
- Analyse de la topographie
- Approches empiriques

Il présente les avantages et les inconvénients de chaque méthode ainsi que leurs limites d'application en fonction du type de cours d'eau et des données de base disponibles.

Il propose ensuite une démarche structurée permettant, à partir des valeurs obtenues par différentes méthodes, de déterminer la largeur naturelle du lit qui pourra finalement servir de valeur de dimensionnement. Cette démarche est la suivante :

- Dans un premier temps, le secteur étudié est découpé en tronçons aussi homogènes que possible au regard des paramètres déterminants pour la largeur naturelle du fond du lit.
- Dans un deuxième temps, pour chaque tronçon (cas spécifique), les données de base sont rassemblées, les différentes méthodes de détermination appliquées, et les résultats ainsi obtenus évalués et pondérés.
- Finalement, une largeur naturelle du fond du lit est déterminée pour chaque tronçon.

La démarche présentée a été développée pour les grands cours d'eau, c'est-à-dire ceux dont la largeur naturelle du fond du lit dépasse 15 mètres. Elle peut cependant aussi être appliquée aux cours d'eau plus étroits si les éléments nécessaires à la détermination peuvent être rassemblés.

Dans la troisième partie du rapport, la démarche et les différentes méthodes sont présentées au moyen de quatre exemples concrets.

Détermination de la largeur naturelle du fond du lit des cours d'eau

Table des matières

1	Contexte	6
2	Glossaire	7
3	Largeur naturelle du fond du lit et classification morphologique	8
4	Démarche pour déterminer la largeur naturelle du fond du lit	13
5	Découpage en tronçons homogènes	15
6	Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit	16
6.1	Informations générales pour l'évaluation	16
6.2	Analyse de documents historiques	18
6.2.1	<i>Introduction</i>	18
6.2.2	<i>Cartes historiques et plans du cadastre</i>	18
6.2.3	<i>Anciennes photos aériennes</i>	22
6.2.4	<i>Tableaux et photos d'époque</i>	24
6.2.5	<i>Rapports et plans d'anciens travaux d'aménagement de cours d'eau</i>	27
6.3	Analyse de tronçons comparables étant proches de l'état naturel	29
6.4	Analyse du terrain	32
6.5	Formules empiriques.....	34
6.5.1	<i>Introduction</i>	34
6.5.2	<i>Application des formules empiriques</i>	37
6.5.3	<i>Données de base</i>	40
7	Détermination de la largeur naturelle du fond du lit	42
7.1	Démarche.....	42
7.2	Largeur du fond du lit en cas de modification à long terme du débit ou des apports solides. 45	
7.2.1	<i>Contexte</i>	45
7.2.2	<i>Adaptation de la largeur du fond du lit en cas de débit modifié</i>	46
7.2.3	<i>Adaptation de la largeur du fond du lit en cas d'apports solides modifiés</i>	46
7.3	Largeur du fond du lit des cours d'eau autrefois très larges et étant fortement sollicités.....	47
8	Exemples d'application	49
8.1	Jogne (cantons de Fribourg et Berne)	49
8.1.1	<i>État actuel</i>	49
8.1.2	<i>Données de base et approches pour déterminer la largeur naturelle du fond du lit</i>	50
8.1.3	<i>Pondération</i>	51
8.2	L'Aar entre Wildegg et Brugg (canton d'Argovie).....	61

Détermination de la largeur naturelle du fond du lit des cours d'eau

8.2.1	<i>État actuel</i>	61
8.2.2	<i>Données de base et approches pour déterminer la largeur</i>	62
8.2.3	<i>Pondération et largeur naturelle du fond du lit</i>	64
8.2.4	<i>Conditions-cadres modifiées</i>	68
8.3	Exemple de la Thur à Wattwil (canton de Saint-Gall)	70
8.3.1	<i>État actuel</i>	70
8.3.2	<i>Données de base et approches pour déterminer la largeur</i>	71
8.3.3	<i>Pondération et largeur naturelle du fond du lit</i>	73
8.4	Sitter (canton de Thurgovie)	79
8.4.1	<i>État actuel</i>	79
8.4.2	<i>Données de base et approches pour déterminer la largeur</i>	80
8.4.3	<i>Pondération</i>	81
9	Bibliographie	88

Contexte

1 Contexte

La largeur naturelle du fond du lit est un paramètre fondamental, aussi bien pour déterminer l'espace nécessaire dans le cadre de projets d'aménagement des cours d'eau que pour déterminer l'espace réservé aux eaux de manière générale (art. 41a, ordonnance sur la protection des eaux (RS 814.201 ; OEaux)).

Étant donné qu'en Suisse, beaucoup de cours d'eau sont aujourd'hui dans un état très éloigné de l'état naturel, il est généralement impossible de mesurer directement la largeur naturelle du fond de leur lit. Elle doit donc être évaluée par expertise à partir de différentes sources.

Le présent rapport fait la synthèse des bases scientifiques nécessaires à ce travail, propose une démarche par étapes et illustre son application par des exemples concrets.

Glossaire

2 Glossaire*État de référence*

L'état de référence est défini comme l'état proche de l'état naturel en termes de morphologie, de largeur et de régimes d'écoulement et de charriage. Il ne diffère de l'état naturel qu'en cas de déboisements d'assèchements de zones humides ou de détournements de cours d'eau dans un lac ayant eu lieu à grande échelle. Les débits et les apports solides se réfèrent aux conditions climatiques actuelles. L'urbanisation ne fait pas partie de l'état de référence.

Débit morphogène

Le concept de débit morphogène se base sur l'idée simplifiée selon laquelle il existe un débit qui, considéré en moyenne sur plusieurs années, a l'effet morphologique le plus important sur le style fluvial naturel d'un cours d'eau. Dans le présent rapport, le débit morphogène est défini selon les principes suivants :

- Le débit morphogène est suffisamment élevé pour provoquer des remaniements morphologiques conséquents. Il est atteint dans le cas de crues de petite à moyenne envergure s'écoulant dans le lit du cours d'eau.
- Le débit morphogène se manifeste à une fréquence telle que les surfaces morphologiquement actives n'ont pas le temps de se recouvrir de végétation (boisements) et donc de se stabiliser.

D'expérience, le débit morphogène est souvent fixé entre celui de la crue biennale (HQ2) et de la crue quinquennale (HQ5). Dans les cours d'eau très pentus, il peut cependant atteindre le débit d'une crue décennale.

Largeur naturelle du fond du lit

Largeur du fond du lit à l'état de référence

3 Largeur naturelle du fond du lit et classification morphologique

Définition de la largeur naturelle du fond du lit

La largeur naturelle du fond du lit correspond à la largeur naturelle moyenne du lit dans un tronçon de cours d'eau donné. Ne font pas partie du fond du lit les berges et les surfaces porteuses d'une végétation terrestre pérenne (arbres et arbustes dès 3 à 5 ans).

Rôle et importance de la largeur naturelle du lit

La largeur naturelle du lit joue un rôle crucial pour la morphologie du cours d'eau. Les bancs de gravier, bras de rivière et autres fosses ne peuvent se former que si le lit est suffisamment large. Dans un chenal trop étroit, le fond du lit ne peut se structurer même si les apports de matériaux solides le permettraient par ailleurs. Requena [20] a développé un modèle théorique pour représenter le processus d'élargissement spontané d'un cours d'eau transportant des graviers jusqu'à sa largeur naturelle (Fig. 1).

Érosion latérale primaire

Lors de l'érosion latérale dite primaire, le chenal initialement étroit s'élargit assez rapidement tout en conservant un tracé plus ou moins rectiligne. L'élargissement se poursuit ainsi tant que la force tractrice exercée sur le fond (contrainte de cisaillement) pour le débit morphogène (crue biennale à quinquennale) reste inférieure à la résistance du pied de berge à l'érosion (en tenant compte de la formation d'une couche de pavage). La largeur atteinte lors de l'érosion latérale primaire est appelée largeur d'équilibre. La rapidité de l'érosion latérale dépend de la différence entre la largeur du moment et la largeur à laquelle le lit se stabilise après l'érosion primaire, de la résistance de la berge à l'érosion et du débit. Si, au terme de l'érosion latérale primaire, des formes du lit (rides, dunes, etc.) sont apparues, l'érosion latérale secondaire peut s'amorcer.

Érosion latérale secondaire

Les formes du lit sont à l'origine de courants latéraux. Elles constituent l'un des prérequis pour le déclenchement de l'érosion latérale dite secondaire. On considère que la force exercée sur les berges, et donc l'érosion latérale, est d'autant plus forte que les irrégularités sont marquées. Selon les lieux, les processus d'érosion latérale peuvent très fortement varier dans leur ampleur, leur évolution et leur intensité. La largeur atteinte au terme de l'érosion latérale secondaire est la largeur limite.

Les largeurs de plein bord après l'érosion primaire et l'érosion secondaire peuvent être évaluées à l'aide de formules empiriques.

Largeur naturelle du fond du lit et classification morphologique

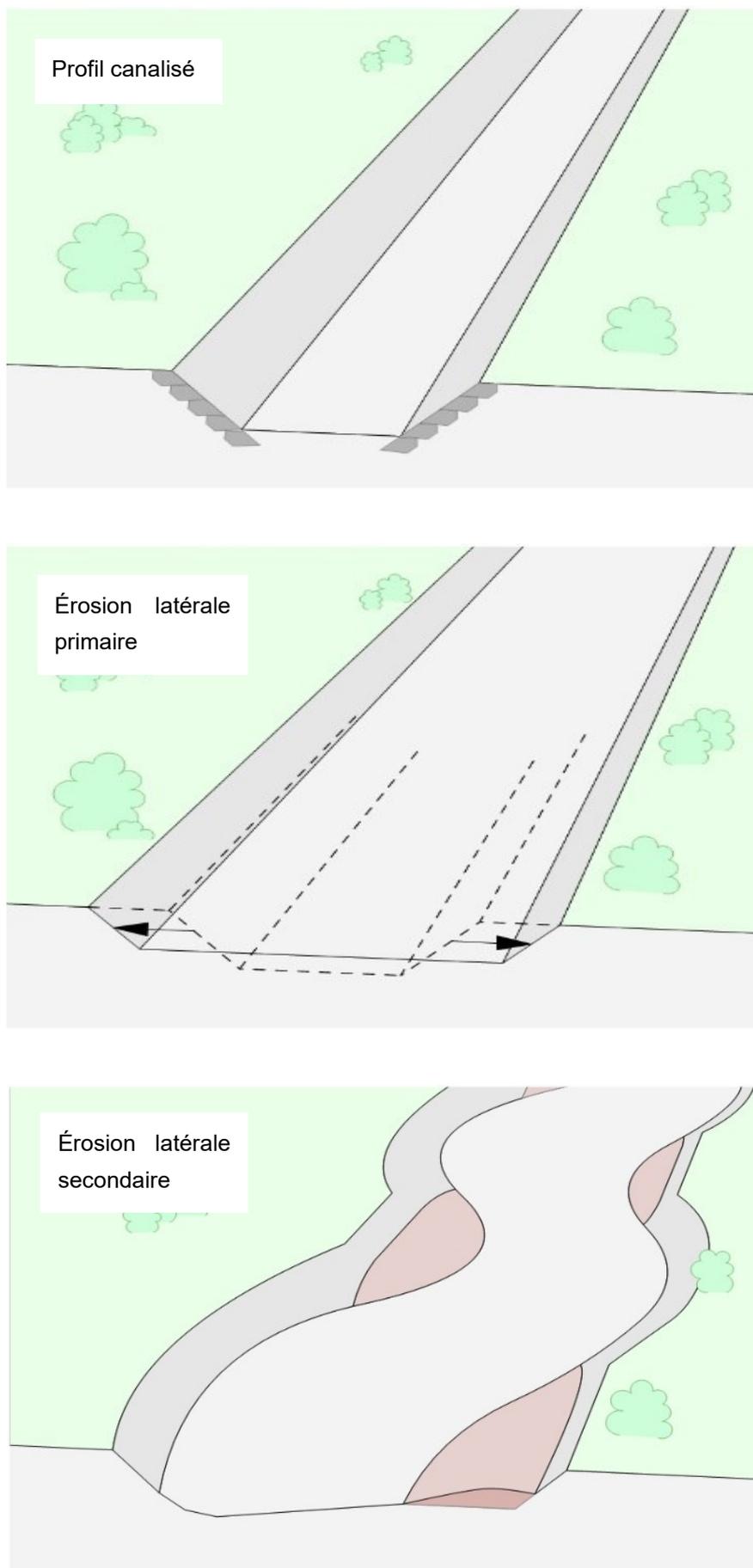


Fig. 1 Concept d'érosion latérale primaire et secondaire

Largeur naturelle du fond du lit et classification morphologique

Morphologie

Le processus d'élargissement aboutit théoriquement à une largeur stable. Cette largeur présente toutefois une grande variabilité aussi bien dans le temps que dans l'espace. Si l'on considère une grande portion de cours d'eau sur une période de temps assez longue – et si le transport solide est à l'équilibre – la largeur et la pente sont cependant constantes.

La plupart des cours d'eau suisses charrient des matériaux qui sont transportés sur le fond du lit en cas d'augmentation du débit. La largeur naturelle du lit d'un cours d'eau permet aux matériaux charriés de se déposer et de se déplacer et de former ainsi des structures dynamiques naturelles au sein du chenal. Il existe des tronçons de cours d'eau naturels dans lesquels les apports de matériaux charriés sont plus importants que ce qui peut en être transporté. Il en résulte un état d'atterrissement qui est aujourd'hui seulement souhaitable dans les cas où la protection contre les crues n'est pas entravée. Les atteintes à la protection contre les crues sont à éviter, si nécessaire, par des mesures d'accompagnement. La pente longitudinale du chenal ne doit pas dépasser la pente de la vallée, même dans un état d'atterrissement.

Le régime de charriage a une forte influence sur le style fluvial et la largeur du fond du lit. Cette influence est cependant rarement décrite de manière quantitative dans la littérature scientifique étant donné qu'il est, en pratique, extrêmement difficile de mesurer le transport solide par charriage. Schälchli et Hunzinger [6] ont élaboré une méthode pour prendre en compte le débit de charriage dans l'évaluation du style fluvial et de la largeur du fond.

Les cours d'eau peuvent développer différents styles fluviaux en fonction, principalement, du régime d'écoulement et de charriage et du substrat. Le style fluvial peut être évalué concrètement à partir des paramètres de largeur, de débit, de pente et de granulométrie à l'aide des diagrammes d'Ahmari & da Silva [25] et de Zarn [27].

Il n'existe pas de limite nette entre les styles fluviaux, les formes intermédiaires étant fréquentes. Aussi trouve-t-on plusieurs systèmes différents pour les décrire. L'Office fédéral de l'environnement se réfère à la classification de Hunzinger et Schälchli exposée dans l'aide à l'exécution relative au régime de charriage [6]. Les styles fluviaux qui y sont classés de la manière suivante :

1. Lit ramifié avec plus de deux chenaux
2. Lit ramifié avec deux chenaux
3. Lit sinueux avec îlots et bancs
4. Lit sinueux avec bancs
5. Lit en méandres sans charriage
6. Lit sinueux ou linéaire

Largeur naturelle du fond du lit et classification morphologique

Le système est décrit plus en détail dans l'aide à l'exécution relative au régime de charriage [6].

Influence des paramètres hydrologiques

Le style fluvial peut se modifier suite à certains évènements hydrologiques. Suite à une sécheresse prolongée, un lit à plusieurs chenaux peut ainsi adopter la forme d'un léger méandre et, inversement, un chenal unique peut se diviser temporairement sous l'effet d'une crue.

Largeur naturelle du fond du lit et classification morphologique

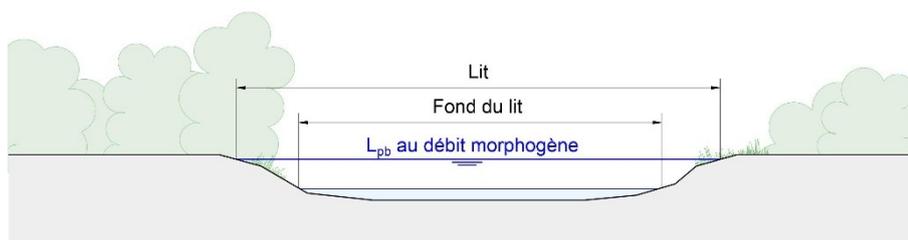
Différence entre largeur du lit et largeur du fond

Suivant la morphologie du cours d'eau, la place occupée par le fond du lit et les rives peut être très variable. Les limites entre le fond, les berges et les forêts alluviales à bois tendre et à bois dur sont généralement progressives.

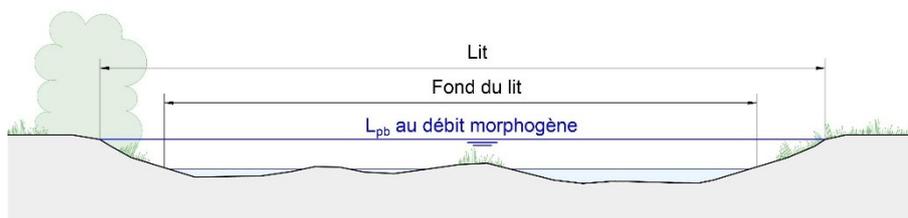
La largeur du fond du lit est définie selon les principes suivants :

- Le fond est compris entre les pieds de berge
- Sont exclues du fond du lit les surfaces occupées par une végétation terrestre pérenne (arbres et arbustes de 3 à 5 ans).
- La largeur pleins bords au débit morphogène correspond à la largeur du lit et excède donc la largeur du fond du lit (voir Fig. 2).

Lit à chenal unique :



Lit à chenal unique ramifié :



Lit à plusieurs chenaux :

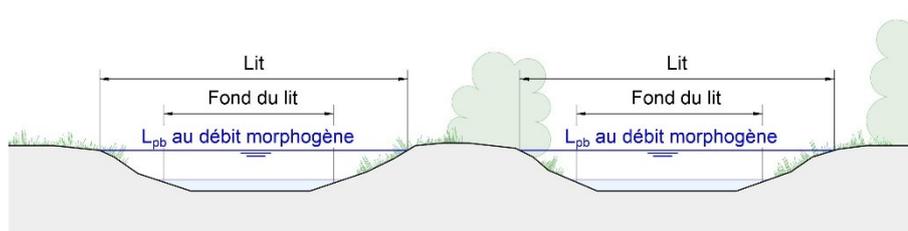


Fig. 2 Représentation schématique, pour différents styles fluviaux, de la largeur du lit et du fond du lit ainsi que de la largeur de plein bord au débit morphogène. La limite entre le style à chenal unique et le style ramifié n'est pas toujours nette et doit être confirmée par expertise. L_{pb} = largeur pleins bords

Marche à suivre pour déterminer la largeur naturelle du fond du lit**4 Marche à suivre pour déterminer la largeur naturelle du fond du lit**

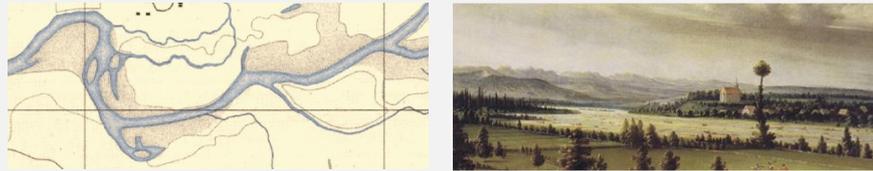
Cette partie présente différentes approches en indiquant leur domaine d'application et leurs incertitudes. Toutes les méthodes présentées présupposent l'acquisition préalable de bases solides et une expertise. Suivant les sites, une méthode peut être plus adaptée qu'une autre. Ce rapport montre comment une largeur naturelle du fond du lit réaliste peut être déterminée avec les méthodes proposées.

Approches ?

Les différentes approches peuvent être regroupées en quatre méthodes :

1. Analyse de documents historiques

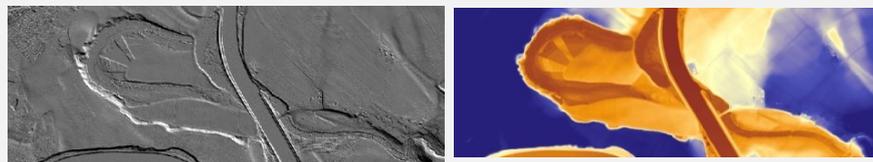
Analyse de cartes anciennes, de photos aériennes, de tableaux, de photos et de documents écrits.

**2. Analyse de tronçons comparables proche de l'état naturel**

Analyse de cartes et photos aériennes actuelles, étude de terrain

**3. Analyse de la topographie**

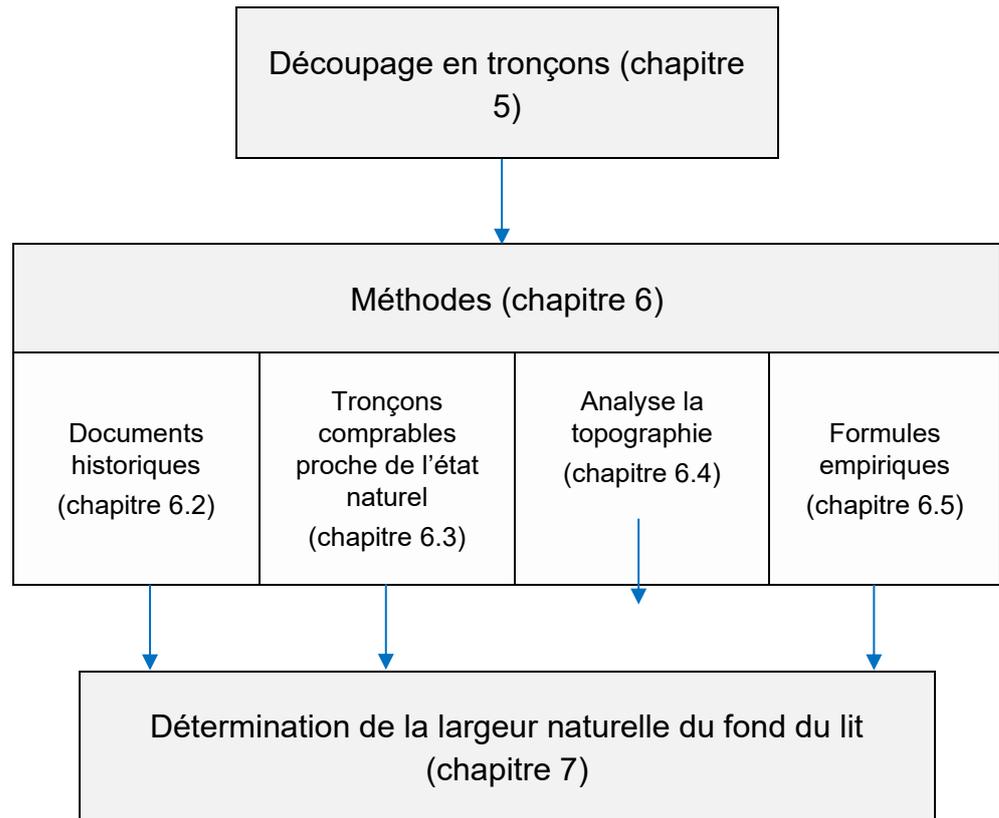
Analyse de tracés historiques avec des modèles numériques de terrain

**4. Formules empiriques**

Application de la théorie basée sur les largeurs de régime d'écoulement et de la théorie basée sur la force tractrice

Procédure

La procédure de détermination de la largeur naturelle du fond du lit présentée dans le présent document s'articule de la façon suivante :

Marche à suivre pour déterminer la largeur naturelle du fond du lit*Bases de travail disponibles*

Le chapitre 6 présente les différentes méthodes et les éléments et documents nécessaires à leur utilisation. Il arrive fréquemment que ces documents ne soient pas tous de bonne qualité pour toutes les approches. Dans la mesure du possible, seuls les documents de bonne qualité doivent être employés pour déterminer la largeur naturelle du fond du lit.

Exigences posées aux utilisateurs et utilisatrices

Les méthodes présentées ici exigent un certain niveau de connaissances en hydraulique et aménagement des cours d'eau car certaines évaluations demandent une expertise. Il est recommandé de disposer de connaissances de base sur la morphologie des cours d'eau et les styles fluviaux ainsi que de connaissances permettant de juger de la qualité des documents disponibles.

5 Découpage en tronçons homogènes

Étant donné que la largeur du fond du lit dépend de l'écoulement, du débit de charriage, de la granulométrie des sédiments et de paramètres géologiques, il est pertinent de déterminer des tronçons dans lesquels ces paramètres sont à peu près constants pour obtenir une largeur moyenne caractéristique.

Critères

Critères de détermination des tronçons homogènes :

- Débit (p. ex. à l'arrivée d'affluents)
- Débit de charriage (à l'arrivée d'affluents, au décrochement de talus, etc.)
- Granulométrie (à l'arrivée d'affluents, au décrochement de talus, aux changements de pente, etc.)
- Géologie (roche affleurante, p. ex.)

La pente du fond de vallée est également un indicateur de modification de la morphologie et peut être prise en compte en tant que critère secondaire.

Les documents historiques peuvent également être très utiles pour subdiviser en tronçons à condition qu'ils donnent une bonne représentation de l'état quasi naturel. S'ils font état de modifications notables de la largeur du fond du lit qui ne soient pas dues aux activités humaines, il convient d'en tenir compte pour la détermination des secteurs homogènes.

Si le découpage se fait sur la base de documents historiques, il faut garder à l'esprit que ces derniers livrent une représentation momentanée de l'état du cours d'eau. Les bancs de gravier et autres structures peuvent se déplacer au cours des ans et la largeur se modifier. Il est donc conseillé de ne pas s'appuyer uniquement sur les sources historiques mais de tenir également compte des critères indiqués plus haut.

6 Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

Le chapitre **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** fournit tout d'abord des informations générales importantes sur la détermination de la largeur naturelle du fond du lit. Les chapitres 6.2 à 6.5 décrivent ensuite les différentes méthodes en traitant les aspects du traitement des documents, de l'application de la méthode et de l'interprétation des résultats. Ils soulignent les limites et les incertitudes de chaque méthode en indiquant la manière de les gérer.

6.1 Informations générales pour l'interprétation

Traces d'influence anthropique dans les documents

On peut considérer que tous les documents présentent des traces d'interventions anthropiques qui ne sont pas immédiatement identifiables (stabilisations des berges non visibles ou non représentées, par exemple). Des modifications d'ordre hydrologique ou ayant un effet sur le charriage sont également probables (tronçons court-circuités, éclusées, défrichements, exploitation agricole, etc.).

Influence du charriage

Le débit naturel de charriage a une influence sur la largeur du cours d'eau. Ce facteur doit donc être pris en compte dans la détermination de la largeur naturelle du fond du lit, dans la mesure où il est connu.

Influence des crues ou étiages d'importance

Si une crue importante ou un étiage prolongé se sont produits dans les 5 à 10 ans précédant l'évaluation, il faut en tenir compte dans l'interprétation de la morphologie du chenal et de la végétation. En effet, les fortes crues (nettement supérieures au débit morphogène) peuvent produire un élargissement du lit. À l'inverse, un étiage prolongé sur plusieurs années peut conduire à une colonisation du lit par la végétation qui se traduit par une largeur inférieure à la moyenne considérée sur le long terme. Pour identifier ces événements, une recherche est nécessaire. Les annuaires hydrologiques, les chroniques ou les notices du service cantonal de l'agriculture ou de la pêche peuvent livrer des informations.

Influence des saisons

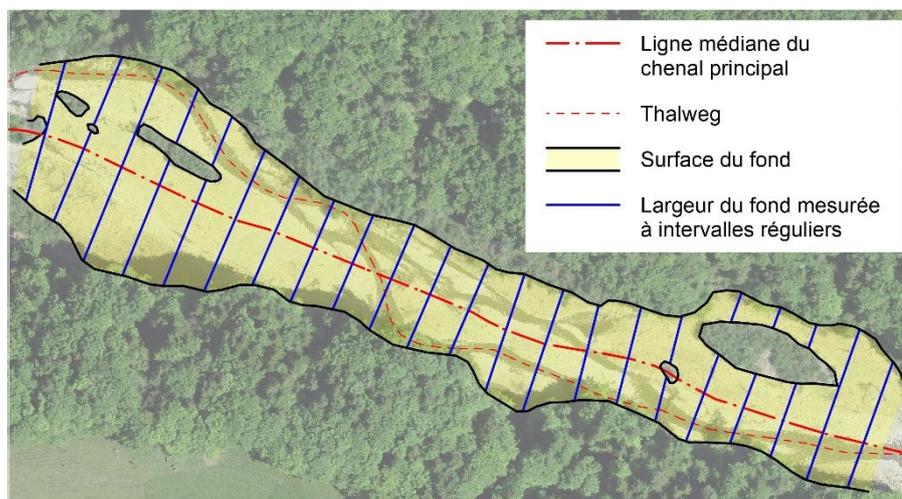
La saison ou la phase de végétation à laquelle un document a vu le jour peut avoir une influence sur la représentation des surfaces sur les cartes, les photos ou les tableaux. La végétation des bancs de gravier, par exemple, apparaît beaucoup moins dense en hiver qu'en été. Toute information sur la date de création du document peut donc être très utile à l'interprétation.

Mesure de la largeur moyenne du fond du lit

Pour déterminer la largeur du fond dans un tronçon, on peut soit mesurer la largeur à intervalles réguliers et calculer la moyenne soit diviser la surface du

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

fond par la longueur du tronçon. Cette longueur correspond à la longueur de la ligne médiane du chenal principal (voir Fig. 3).

**Calcul de la largeur moyenne du fond - option 1 :**

Largeur moyenne du fond = Surface du fond / longueur de la ligne médiane du chenal ppal

Calcul de la largeur moyenne du fond - option 2 :

Largeur moyenne du fond = Moyenne des largeurs mesurées à intervalles réguliers

Fig. 3 Détermination de la largeur moyenne du fond – exemple de l'Ägera à Giffers (FR)

6.2 Analyse de documents historiques

6.2.1 Introduction

S'ils sont de bonne qualité, les documents historiques sont souvent la meilleure base de travail pour déterminer la largeur naturelle du fond du lit. Ils sont jugés de bonne qualité s'ils donnent une représentation du cours d'eau quasiment sans altérations d'origine anthropique, s'ils permettent de visualiser la végétation et les bancs de gravier et s'ils ont une bonne résolution (pour les cartes, surtout). Toutefois, ces critères sont souvent incompatibles. Car plus une carte est ancienne, plus le cours d'eau y est naturel mais les documents très anciens sont souvent également imprécis.

6.2.2 Cartes historiques et plans du cadastre

La Suisse dispose depuis le XIX^e siècle d'excellentes cartes qui donnent une vision parfois étonnante des paysages fluviaux d'antan. La plupart des grandes corrections fluviales ont également été entreprises au XIX^e siècle ou au début du XX^e siècle. Toutefois, les cours d'eau n'ont alors pas toujours été cartographiés de manière détaillée dans leur état avant travaux. Les cartes du XVII^e ou du XVIII^e siècle peuvent également livrer de précieuses informations. La présente méthode décrit comment déterminer la largeur naturelle du fond du lit à partir de cartes historiques en indiquant les précautions à prendre.

Matériel cartographique

Le premier endroit où se procurer des cartes historiques est en général le service cantonal d'information sur le territoire. Il propose le plus souvent des cartes géoréférencées intégrées au SIG cantonal disponible en ligne. Une autre solution consiste à consulter swisstopo (via map.geo.admin.ch, par exemple). Par ailleurs, il est également pertinent de s'adresser aux services cantonaux chargés de l'aménagement des cours d'eau et aux communes pour avoir accès à d'anciens dossiers, à des archives, etc. Les bibliothèques peuvent également disposer de cartes. Enfin, une recherche sur Internet peut donner accès à d'autres sources.

Interprétation des objets cartographiques

Pour toutes les cartes historiques, la largeur du fond du lit doit être déterminée par une expertise. L'eau et les bancs de gravier sans végétation sont en général inclus dans le fond. Il est plus difficile d'interpréter la végétation. Il convient alors de faire la différence entre les surfaces récemment colonisées (faisant partie du fond) et celles qui portent déjà une végétation arbustive voire arborée (arbres et arbustes dès 3 à 5 ans = surfaces exclues du fond). Le degré de précision de la légende n'est pas toujours suffisant pour identifier correctement la végétation.

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

Largeur des berges

En général, on peut supposer que le mode d'interprétation des cartes décrit plus haut livre la largeur du lit plutôt que celle du fond du lit. Autrement dit : les berges sont incluses dans la largeur mesurée. Pour obtenir la largeur du fond du lit, il convient donc de retrancher celle des berges. La valeur retranchée dépend de la taille et de la morphologie du cours d'eau. Elle doit être définie par une expertise. Une solution peut consister à déterminer la largeur des berges à partir de la profondeur d'écoulement pour le débit morphogène en considérant une pente de 1:2 à 1:3. Dans un lit à plusieurs chenaux, le nombre de berges doit être adapté en conséquence. Dans le doute, il vaut mieux opter pour une berge trop étroite plutôt que trop large pour éviter que la largeur naturelle du fond du lit ne soit sous-estimée.

Évaluation de la qualité du matériel cartographique

On considère qu'une carte historique constitue une base de travail de qualité si :

- Elle donne une représentation du cours d'eau dans un état naturel quasiment non perturbé
- Elle est à grande échelle
- Elle est détaillée (végétation, aménagements du cours d'eau, etc. identifiables)
- Elle a été tracée sur la base de mensuration sur le terrain (n'est pas le calque d'une autre carte, ne déforme pas la réalité, peut être géoréférencée)
- Elle peut être datée
- On dispose d'informations sur les crues ou étiages ayant eu lieu précédemment

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

Exemple de carte historique avec des bancs de gravier visibles

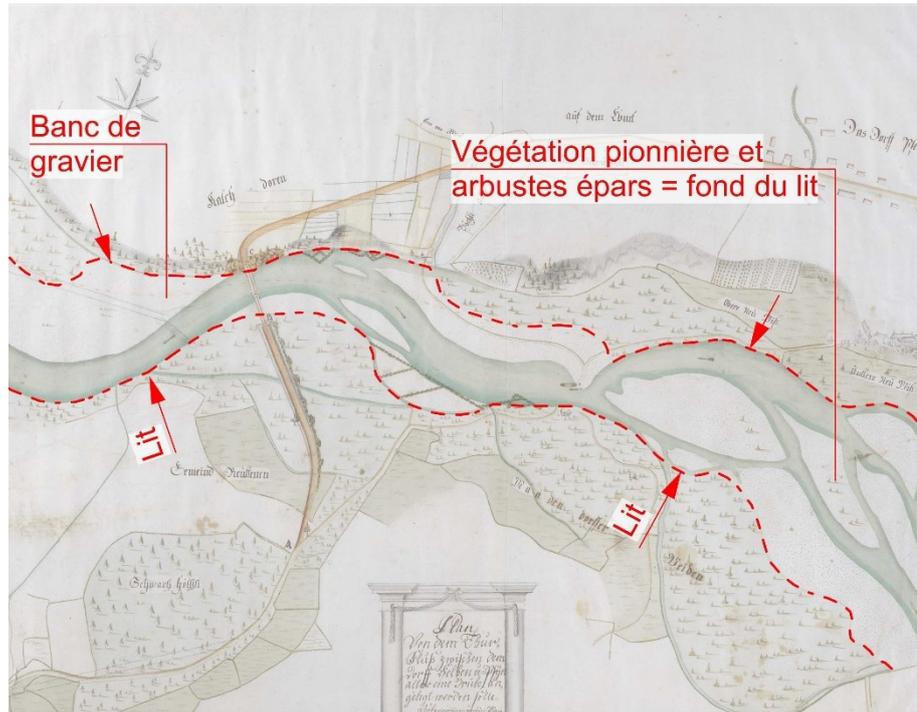


Fig. 4 Mesure de la largeur de la Thur à Pfyndorf (Johannes Sulzberger, 1792). Les bancs de gravier, les habitats à végétation pionnière et les arbres épars sont inclus dans le fond.

Exemple de carte historique sans bancs de gravier visibles

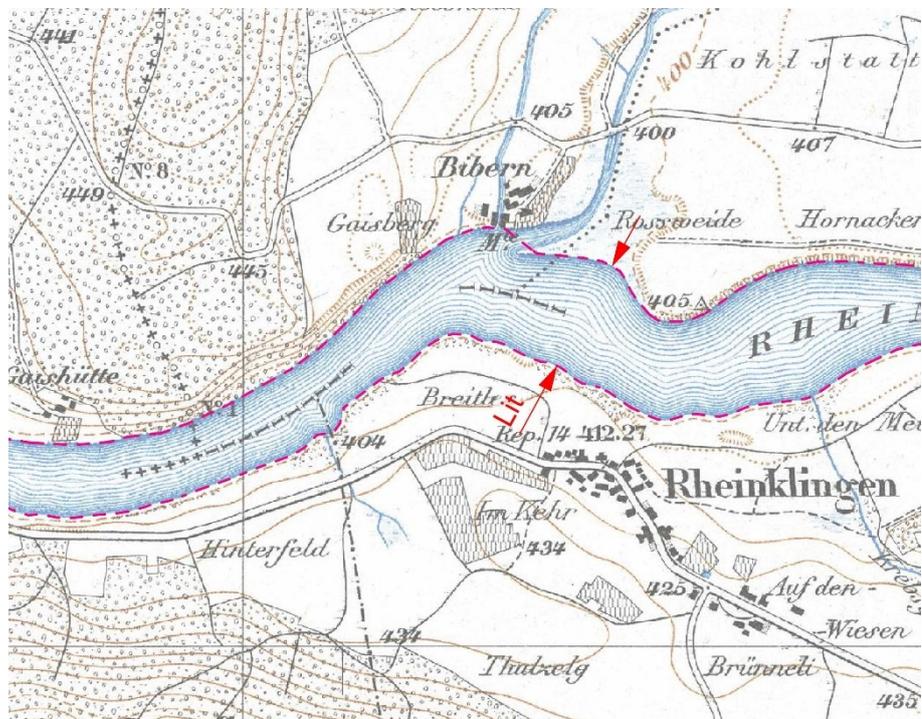


Fig. 5 Mesure de la largeur du Rhin à Rheinklingen à partir de la carte Siegfried de 1880. Aucun banc de gravier n'étant visible, on peut considérer que le relevé a été effectué à hautes eaux et que la largeur pleins bords correspond ici à la largeur du lit.

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

Exemple de carte
historique d'un lit à
plusieurs chenaux

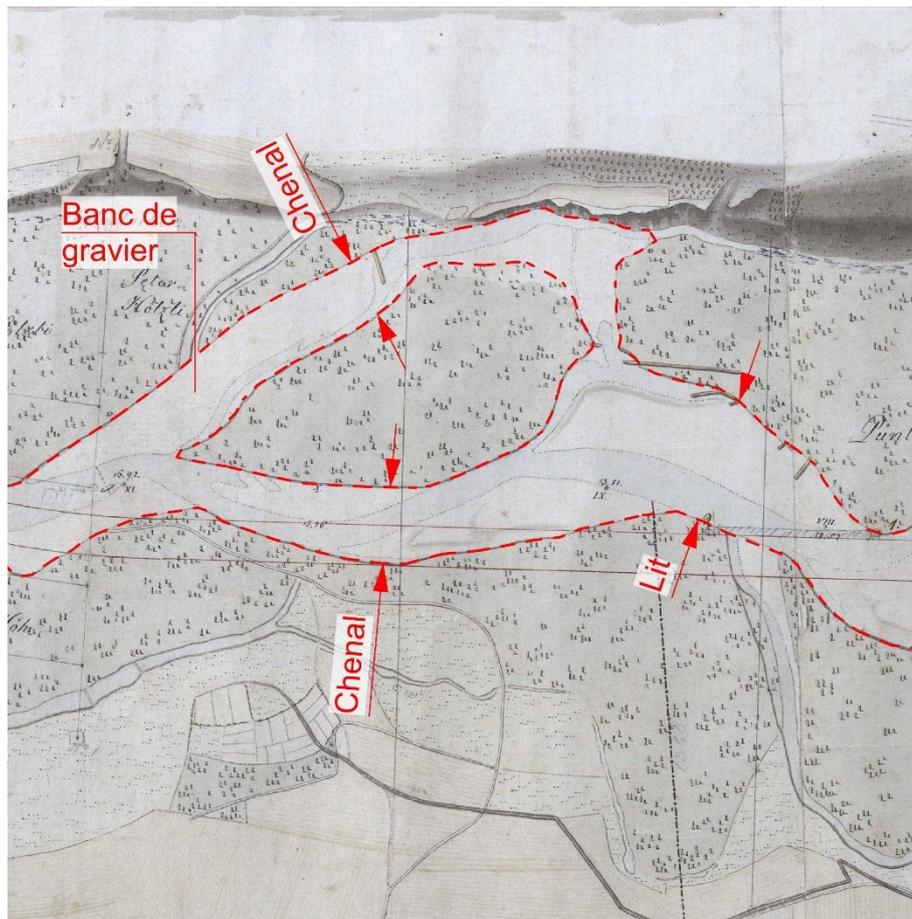


Fig. 6 Mesure de la largeur de la Thur à Dietingen (carte Breitinger de 1811).
Dans le cas de chenaux multiples, la somme des largeurs est considérée.

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

6.2.3 Anciennes photos aériennes

Si elles montrent un état naturel ou très peu perturbé, les anciennes photographies aériennes sont souvent une meilleure source que les cartes. La méthode qui suit indique comment déterminer la largeur à partir d'anciennes photos aériennes en précisant les précautions à prendre.

Matériel

Swisstopo¹ dispose d'une grande collection de photographies aériennes de différentes époques. Les archives cantonales en sont également une bonne source.

Marche à suivre

Bien que les photographies livrent en général une représentation plus détaillée que les cartes, la détermination de la largeur du fond du lit exige, là aussi, le plus souvent une expertise. La difficulté réside à distinguer les surfaces clairement boisées (arbres et arbustes dès 3 à 5 ans = exclues du fond) des surfaces libres ou à végétation pionnière (incluses dans le fond) (voir exemples dans les Fig. 7 et Fig. 8). Les instructions données au chapitre **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** doivent aussi être considérées pour l'interprétation.

Évaluation de la qualité du matériel

On considère qu'une ancienne photo aérienne constitue une base de travail de qualité si :

- Elle donne une représentation du cours d'eau dans un état naturel quasiment non perturbé
- Elle est détaillée (bonne résolution, prise à faible altitude)
- Elle peut être géoréférencée
- Elle peut être datée
- On dispose d'informations sur les crues ou étiages ayant eu lieu précédemment

Conseils pour l'interprétation

Étant donné que la végétation change d'aspect au cours des saisons, le moment de la prise de vue joue un rôle décisif pour l'interprétation. Pour que la végétation soit bien reconnaissable, il faut privilégier les photos prises en été. Si la résolution est élevée, les photos aériennes prises hors de la saison de végétation peuvent cependant aussi être très intéressantes dans la mesure où les feuilles des arbres ne risquent alors pas de masquer le cours d'eau (voir également chapitre 3: Largeur naturelle du fond du lit et classification morphologique). Il faut tenir compte du fait que l'ombre du relief ou de la végétation et la canopée des grands arbres peuvent altérer la visibilité. Dans le doute, il convient, comme pour les cartes historiques, d'inclure les surfaces

¹ Les photos aériennes de Swisstopo sont disponibles en ligne sur map.geo.admin.ch

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

à végétation pionnière dans le fond du lit pour que sa largeur ne soit pas sous-estimée.

Exemples
d'anciennes photos
aériennes

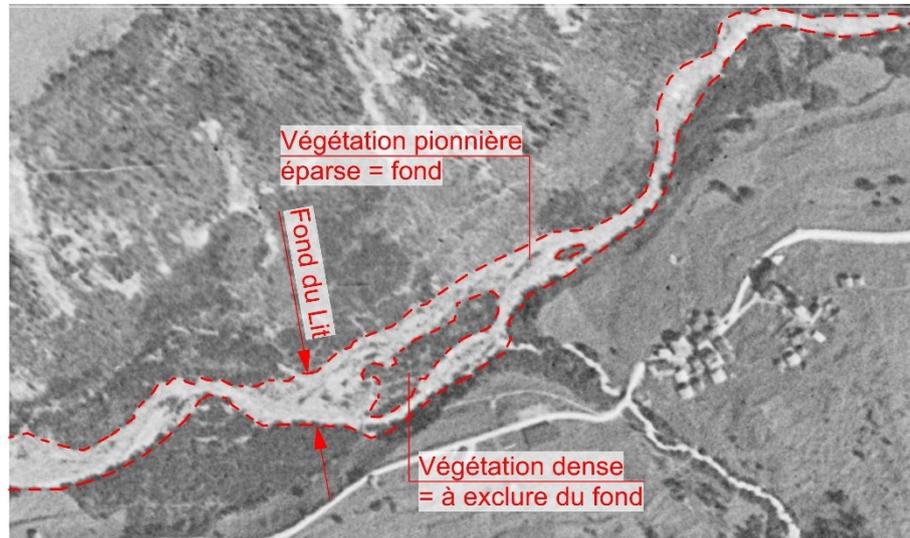


Fig. 7 Le Ticino à Ossasco, photo de 1946 (map.geo.admin.ch)

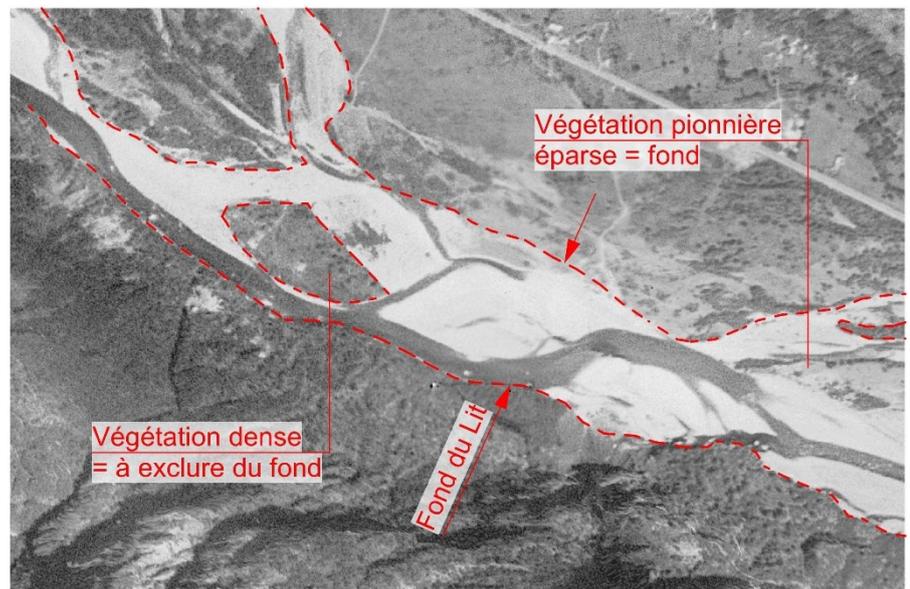


Fig. 8 La Maggia à Riveo, photo de 1946 (map.geo.admin.ch)

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

6.2.4 Tableaux et photos d'époque

Les tableaux et photos d'époque peuvent être très informatifs car ils constituent souvent les documents historiques les plus détaillés. Par ailleurs, les tableaux offrent souvent la trace la plus ancienne encore exploitable de l'aspect du cours d'eau. Pour y mesurer la largeur du fond du lit, il faut cependant en général se repérer à des éléments caractéristiques du paysage. Les photos et tableaux anciens sont toutefois des compléments très précieux d'autres sources car ils aident bien souvent à les interpréter. La méthode qui suit indique comment déterminer la largeur du fond à partir de photos et tableaux d'époque en précisant les précautions à prendre.

Matériel

Les photos et tableaux anciens sont souvent les sources historiques les plus difficiles à trouver. Les rapports ou récits d'anciens travaux comportent parfois des photos. La photographie n'est cependant apparue qu'au milieu du XIX^e siècle et n'était souvent pas encore disponible lorsque les premières grandes corrections fluviales ont été entreprises en Suisse. On dispose en revanche d'un nombre assez conséquent de tableaux qui sont parfois étonnamment détaillés. C'est du côté des peintres paysagistes régionaux que l'on trouve les plus intéressants. Les archives cantonales, les bibliothèques et les musées sont de bonnes adresses.

Marche à suivre

Bien souvent, le fond du lit est bien visible mais la perspective ne permet pas de le mesurer directement. Il faut donc se repérer par rapport à des éléments caractéristiques au paysage (comme des ponts ou des éléments topographiques particuliers, voir Fig. 9 et Fig. 10) qui existent encore aujourd'hui. La largeur historique peut alors être mesurée sur des cartes ou photos aériennes actuelles. Les photos et tableaux anciens peuvent également livrer des informations précieuses sur la nature de la végétation, la largeur des berges et l'existence de digues, ce qui aide à interpréter les cartes historiques. Les instructions données au chapitre **Fehler! Verweisquelle k onnte nicht gefunden werden.** doivent être considérées pour l'interprétation.

Conseils pour l'interprétation

Il faut garder à l'esprit que, dans les tableaux, l'artiste n'a pas toujours respecté les proportions et peut avoir pris certaines libertés avec la réalité.

Évaluation de la qualité du matériel

On considère qu'un tableau ou une photo d'époque constitue une base de travail de qualité si :

- Il donne une représentation du cours d'eau dans un état naturel quasiment non perturbé
- Il est détaillé (bonne résolution ou bonne qualité)
- Il présente des éléments caractéristiques pouvant servir de repères
- Il peut être daté
- On dispose d'informations sur les crues ou étiages précédents

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

Exemples de tableaux ou photos d'époque

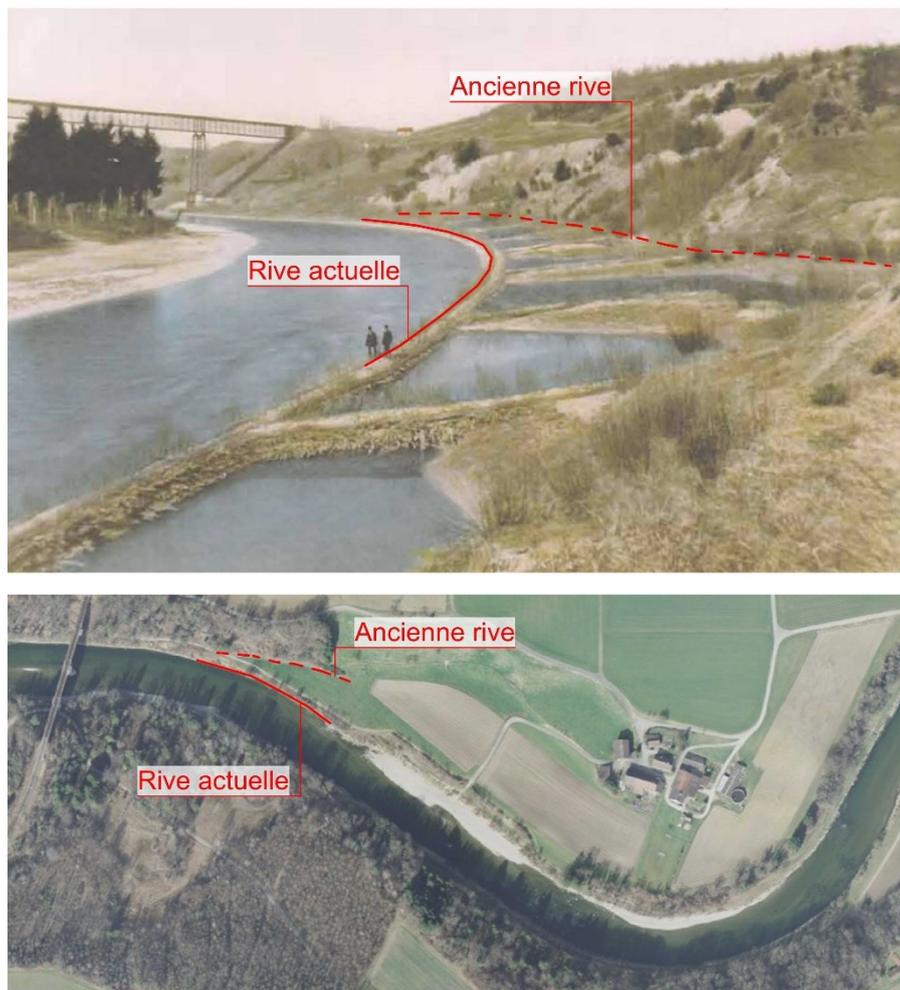


Fig. 9 Mesure de la largeur naturelle du fond du lit de la Thur en amont de Kleinandelfingen ; en haut = photo de 1882, en bas = état actuel

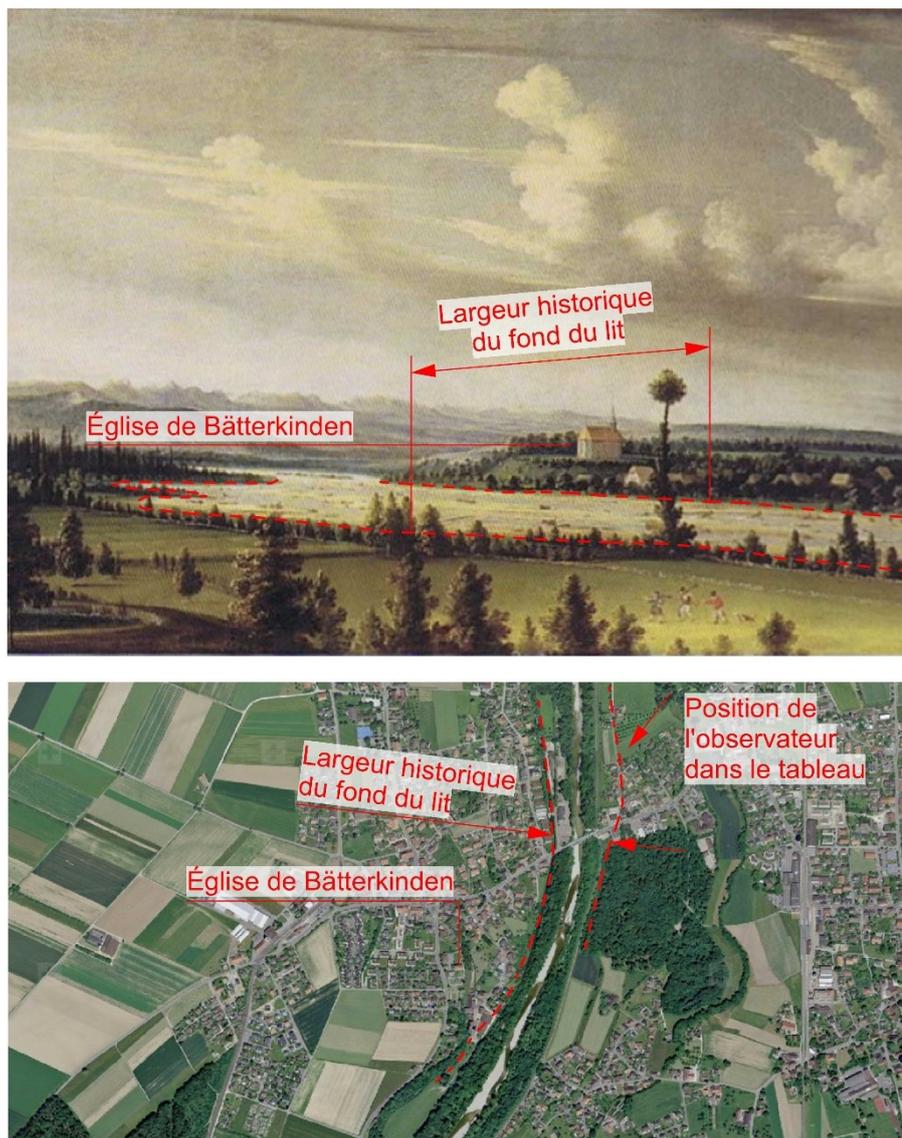
Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

Fig. 10 Mesure de la largeur naturelle du fond du lit de l'Emme à Utzenstorf.
En haut = l'Emme avant la correction fluviale, vue vers l'amont à partir du
château de Landshut (référence [22])

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

6.2.5 Rapports et plans d'anciens travaux d'aménagement de cours d'eau

Les rapports et plans d'anciens projets d'aménagement des cours d'eau constituent une excellente base de travail s'ils se rapportent à la première correction subie par l'objet étudié. Étant donné que ces documents portent spécifiquement sur le cours d'eau, ils sont souvent plus détaillés et à plus grande échelle que les cartes historiques, par exemple. De plus, les rapports comportent souvent des informations sur les événements hydrologiques passés (crues, sécheresses, coulées de boues, etc.), ce qui est très utile à l'interprétation.

Matériel

Les rapports et plans d'anciens projets d'aménagement des cours d'eau sont généralement conservés dans les archives cantonales.

Marche à suivre

Comme dans les cartes historiques, une expertise est requise pour déterminer la largeur du fond à partir d'un plan historique. La difficulté consiste principalement à distinguer les surfaces boisées ou arborées des surfaces libres de végétation pérenne à inclure dans le fond du lit (voir également la distinction entre lit et fond dans la Fig. 2).

Il est souvent difficile, sur les plans historiques, de bien délimiter les surfaces faisant partie du fond et celles devant en être exclues. Comme cela est décrit au chapitre 3, la végétation des surfaces comptabilisables dans le fond du lit ne doit pas dépasser le stade pionnier (pas plus de 2 à 5 ans). Cela est en général difficile à voir sur les plans. Dans le doute, les surfaces non clairement déterminées doivent être incluses dans le fond du lit afin de ne pas sous-estimer sa largeur naturelle. Les relevés historiques de profils en travers peuvent apporter une aide substantielle. Les instructions données au chapitre **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** doivent être considérées pour l'interprétation.

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

Évaluation de la qualité des documents

Les documents relatifs aux anciens projets d'aménagement fluvial constituent une bonne base de travail si :

- L'état du cours d'eau avant travaux est décrit avec précision sur la base de mesures directes (le plan n'est pas calqué sur une autre carte, ne déforme pas la réalité, peut être géoréférencé)
- Les plans sont à une échelle suffisante
- L'état avant travaux correspond à un état naturel quasiment non perturbé par les activités humaines
- L'époque de l'état avant travaux peut être déterminée
- Des informations sur les crues ou étiages précédents sont disponibles

Exemples d'anciens projets d'aménagement fluvial

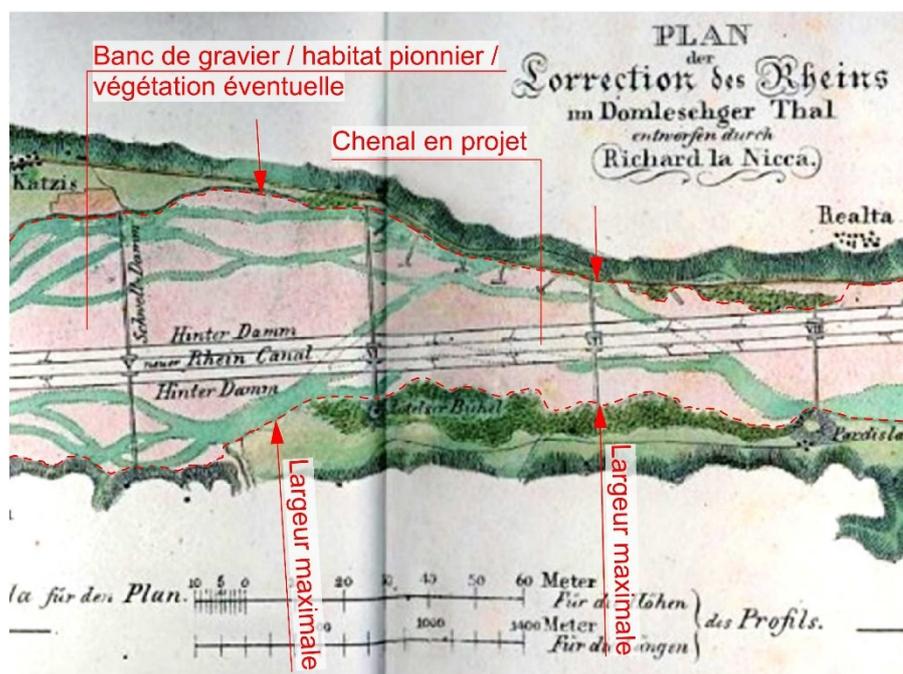


Fig. 11 Le Rhin Postérieur à Domleschg, plan de R. la Nicca, vers 1850

Das jetzige Emmenbett ist sehr unregelmäßig, nicht nur weil es in seiner Richtung viele Krümmungen zeigt, sondern namentlich weil seine Breite im Allgemeinen zu groß ist und weil diese überdies so sehr variiert, daß durch die unregelmäßige und **Largeurs en l'état observé** schmäler Stellen von oft nur geringer Länge große Störungen im Laufe des Wassers entstehen.

Von Kirchberg bis Aefligenbrücke, auf einer Länge von circa 7900 Fuß variiert die Breite zwischen den Uferschwellen von 200 bis 300 Fuß. Von letzterer Brücke bis zur Amtsgrenze von Fraubrunnen, bei der Alp, auf ungefähr 7600 Fuß Länge, beträgt die Breite meistens 150 bis 200 Fuß. Von der Alp abwärts bis zur Bätterkindenbrücke, auf einer Strecke von 9200 Fuß, ist die Breite des Flussbettes nirgends größer als 160 Fuß, ausgenommen bei der Brücke selbst, wo sie zwischen den Schwellen 220 Fuß beträgt (die Brücke hat zwischen den Widerlagern eine Öffnung von 245 Fuß). Auf dieser Flussabtheilung kommen aber einige Verengungen bis auf 100, ja selbst bis auf 80 Fuß vor. Unterhalb dieser Brücke ist, zwar nur auf einer Länge von 1000 Fuß, wieder ein breites Bett von 180 bis 230 Fuß. Dann folgt bis zur Einmündung des Rimpbaches, auf einer Länge von ungefähr 800 Fuß, eine Abtheilung, auf welcher die Sohle sich von 170' bis auf 50 Fuß verengt. Unterhalb der Rimpbach Einmündung kommen nur einige Bruchstücke von Streichschwellen vor und zwar nur auf der rechten Seite des Flusses. Auch gleicht die Emme auf dieser letzten Strecke von 5700 Fuß Länge ganz einem sich selbst überlassenen und verwilderten Bergstrom.

Fig. 12 Extrait du rapport technique de la correction de l'Emme de Kirchberg à la frontière avec le canton de Soleure (1873)

6.3 Analyse de tronçons comparables proche de l'état naturel

Les tronçons proches de l'état naturel utilisés à la place du cours d'eau pour déterminer la largeur naturelle du fond du lit doivent présenter les mêmes conditions et caractéristiques que l'objet d'étude (voir les paramètres de découpage du tronçon au chap. 5) à l'exception des restrictions d'ordre hydraulique. Dans l'idéal, le tronçon de comparaison se trouve sur le même cours d'eau à peu de distance du tronçon étudié pour que les conditions restent comparables. Si le secteur de référence se trouve en amont ou en aval de l'arrivée d'un gros affluent, les calculs doivent être faits en considérant d'autres valeurs de débit et de charriage, ce qui rend les comparaisons hasardeuses.

Bases de travail

La détermination peut se faire sur la base des éléments suivants :

- Jeu de données Écomorphologie niveau R
- Cartes actuelles à grande échelle
- Photos aériennes actuelles
- Visites de terrain

Marche à suivre

L'identification de tronçons de comparables proche de l'état naturel peut se faire à partir du jeu de données « Écomorphologie niveau R » ainsi que de cartes et photographies aériennes actuelles. Dans l'idéal, ces tronçons comparables proche de l'état naturel ne sont pas endigués. Mais même un secteur légèrement corseté peut fournir des informations précieuses. Ainsi, si un lit légèrement aménagé abrite des zones boisées, cela indique que le fond du lit actuel présente une largeur à peu près naturelle. Si, en revanche aucune végétation développée n'est visible entre les ouvrages de stabilisation latérale, la largeur naturelle est probablement supérieure à celle du tronçon de comparaison.

Les mesures des tronçons de comparaison se font en général sur des photos aériennes. Si elles sont difficiles à interpréter (absence de végétation au-dessus de la limite de la forêt, ombres parasites, arbres surplombant le cours d'eau, etc.), un modèle de terrain peut aider à caractériser le lit et la structure du fond (voir aussi la distinction entre largeur du lit et largeur du fond à la Fig. 2 et la méthode ch. 6.4 analyse u terrain).

Pour repérer d'éventuels ouvrages de stabilisation des berges restés inaperçus et pour vérifier les résultats, il est conseillé d'effectuer une visite de contrôle sur le terrain. Les instructions données au chapitre 6.1 doivent être considérées pour l'interprétation.

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

Évaluation de la qualité des bases de travail

Un tronçon proche de l'état naturel peut être utilisé à la place de l'objet d'étude pour déterminer la largeur naturelle du fond du lit si :

- Il présente des conditions de débit, de charriage, de granulométrie, de pente et de géologie comparables à celles du secteur d'étude
- Il se trouve dans un état naturel quasiment non perturbé par les activités humaines
- Des informations sur les crues ou étiages précédents sont disponibles

Conseils pour l'interprétation

Pour travailler avec des tronçons de comparaison, il convient de tenir compte des aspects suivants :

- Suite à des crues ou des étiages importants survenus précédemment, le lit peut être, au moment de la prise de vue, plus large ou plus étroit que la moyenne pluriannuelle. Pour identifier de telles situations, il est conseillé d'étudier toutes les photos aériennes disponibles sur une période assez longue. Ensuite, il convient de rechercher les informations sur les crues importantes et sécheresses prolongées dans les annuaires hydrologiques (voir chapitre 6.2.3 Anciennes photos aériennes).
- Étant donné que la végétation change d'aspect au cours des saisons, le moment de la prise de vue joue un rôle décisif pour l'interprétation des photos aériennes. Pour que les zones d'embroussaillage et les couches herbeuses soient bien reconnaissables, il faut privilégier les photos prises en été. Si la résolution est élevée, les photos aériennes prises hors de la saison de végétation peuvent cependant aussi être très intéressantes dans la mesure où les feuilles des arbres ne risquent alors pas de masquer le cours d'eau (voir aussi chapitre 3: Largeur naturelle du fond du lit et classification morphologique). Il faut bien garder à l'esprit que l'ombre portée par le relief ou la végétation ainsi que la canopée des grands arbres peuvent altérer la visibilité.
- Comme avec les autres bases de travail, il convient, dans le doute, de compter les surfaces portant une végétation potentiellement pionnière dans le fond du lit afin de ne pas en sous-estimer la largeur naturelle.

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

Exemple de tronçon comparable proche de l'état naturel



Fig. 13 L'Entle en amont d'Entlebuch

6.4 Analyse du terrain

Dans cette approche, les anciens lits ou les tronçons comparables proche de l'état naturel (voir chapitre 6.3, Analyse de tronçons comparables proche de l'état naturel) sont évalué à l'aide de modèles de terrain. C'est principalement dans les fonds de vallée étendus que l'on rencontre des anciens tracés encore visibles aujourd'hui. Dans ces plaines, l'analyse de la topographie constitue une option intéressante pour obtenir des informations sur la largeur naturelle du fond du lit et sur le style fluvial.

Matériel

L'analyse se fait à l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT). Le maillage idéal est de 0,5 m et ne doit pas dépasser 2 m. En complément, l'utilisation de photos aériennes d'actualité et de cartes actuelles et historiques permet de s'orienter et de vérifier les structures identifiées.

Marche à suivre

Pour faire apparaître la structure de l'ancien lit, il convient de créer un modèle en relief et un modèle numérique d'élévation en couleur à partir du MNT (voir Fig. 14). La pertinence des structures mises en évidence pour la détermination de la largeur du fond doit être évaluée par une expertise. Lors de la mesure de bras morts multiples, il convient de s'assurer de ne mesurer ensemble que les bras qui étaient actifs en même temps. La consultation de documents historiques aide à identifier les structures à assembler. Les instructions données au chapitre 6.1 doivent être considérées pour l'interprétation.

Conseils pour l'interprétation

Les aspects suivants doivent être pris en compte :

- Les bras déconnectés ont tendance à apparaître plus étroits qu'ils n'étaient à l'origine (adaptation, comblement, etc.).
- Il est important de savoir si un bras mort appartenait à un lit à plusieurs chenaux ou s'il constituait l'unique chenal. Dans le cas d'un lit qui comportait autrefois plusieurs chenaux, la largeur d'un bras mort ne correspond pas à la totalité de la largeur du fond du lit.

Évaluation de la qualité de l'analyse de la topographie pour la détermination de la largeur naturelle du fond du lit

L'analyse de la topographie constitue une bonne base si :

- Les structures mises en évidence ont été peu perturbées par les activités humaines
- La morphologie d'origine du lit (à un ou plusieurs chenaux) est connue
- La résolution du modèle en relief est suffisante (maillage de 0,5-2 m) ou, au mieux, certains points de repère d'origine existent encore

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

Exemple d'analyse
du terrain



Fig. 14 La Reuss à Fischbach-Göslikon (AG)

6.5 Formules empiriques

6.5.1 Introduction

Différentes approches empiriques peuvent être choisies pour déterminer la largeur naturelle du fond du lit. Elles peuvent être réparties en deux grands groupes : celles relevant de la théorie basée sur les largeurs de régime et celles relevant de la théorie basée sur la force tractrice.

Théorie basée sur les largeurs de régime

La théorie basée sur les largeurs de régime part du principe que l'emprise spatiale d'un cours d'eau peut être décrite par un petit nombre de paramètres. Les observations ont montré que les grandeurs caractéristiques que sont la largeur (L), la pente (J) et la hauteur d'eau (h) peuvent être exprimées en fonction de puissances du débit (Q). De nombreux auteurs (cf. Zeller [27], Yalin [23]) ont ainsi publié des formules du type $L = a Q^r$, $J = b Q^s$, $h = c Q^t$, dans lesquelles les constantes a, b, c et les exposants r, s, t ont été déterminés à partir d'observations. En général, les régressions ont été calculées à partir de données présentant une forte variance. Si l'on souhaite utiliser les formules fonctions du régime, il faut garder à l'esprit que ces formules décrivent réellement le régime hydrologique du cours d'eau et, donc, que tous les paramètres L, J et h doivent être ajustés les uns aux autres. Si l'un d'entre eux est modifié, les autres se modifient également.

Théorie basée sur la force tractrice

La théorie basée sur la force tractrice est une alternative à celle basée sur les largeurs de régime. Elle repose également sur des relations entre débit, hauteur d'eau, pente et largeur mais les constantes et exposants sont généralement déterminés à partir d'essais de laboratoire. La théorie de la force tractrice se base sur la contrainte de cisaillement, qui décrit la contrainte de frottement exercée par l'écoulement, et le paramètre de Shields, qui fait le rapport entre la contrainte exercée par l'écoulement et la résistance d'une particule du fond du lit. Les méthodes d'estimation de la capacité de transport solide par charriage comme la formule de Meyer Peter et Müller [14] sont des exemples typiques de la théorie basée sur la force tractrice. Pour déterminer la largeur naturelle du fond du lit, l'approche d'Ikeda [13] peut être utilisée.

Les formules présentées dans ce chapitre relèvent principalement de la théorie basée sur les largeurs de régime car la largeur naturelle du fond du lit y est traitée explicitement.

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

Influence de la charge de fond ou charriage

Aucune des approches empiriques courantes ne tient compte de la charge de fond bien que ce paramètre ait une grande influence sur l'emprise latérale des cours d'eau. Cette non-prise en compte du charriage est source d'incertitudes dans les approches empiriques. La littérature scientifique (Parker [19], par exemple) montre pourtant qu'il serait pertinent d'intégrer le charriage dans les méthodes empiriques. Cela n'a pas été fait jusqu'à présent en raison d'un manque de données adéquates.

Concepts d'évaluation des approches empiriques

Différentes études (Yalin [23], Parker [19], Ashmore [7], Millar [16], autres auteurs à l'annexe A) montrent que la largeur naturelle d'un cours d'eau dépend du débit, de la pente et du diamètre des sédiments. L'utilisation d'un grand nombre de données collectées dans la nature implique cependant toujours une très forte variabilité. Millard a montré que cette forte variabilité résultait des différences au niveau des caractéristiques des bassins versants et en particulier de la nature des berges. Le concept d'efficacité du transport solide décrit par Millar peut également être intégré au concept de Requena [20] basé sur les largeurs pleins bords après érosion primaire ou secondaire.

Largeur pleins bords après érosion primaire

La largeur pleins bords après érosion primaire est la largeur qui s'établit sous l'effet de la dynamique propre au cours d'eau en conditions d'écoulement linéaire. Autrement dit, à cette largeur, aucun élargissement supplémentaire n'est produit par des courants transversaux. Elle correspond à un certain état de stabilisation car, partant d'un cours d'eau canalisé artificiellement, l'élimination des ouvrages latéraux induit un élargissement autonome qui se poursuit au moins jusqu'à ce qu'un équilibre s'établisse entre la stabilité des berges et celle du fond.

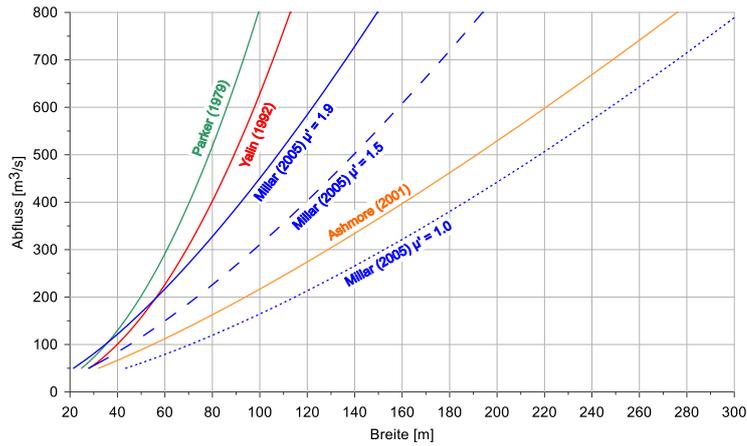
Largeur pleins bords après érosion secondaire

La largeur pleins bords après érosion secondaire est la largeur maximale pouvant être atteinte par le cours d'eau naturel. Contrairement à la largeur après érosion primaire, elle tient compte des courants transversaux qui contribuent à l'élargissement.

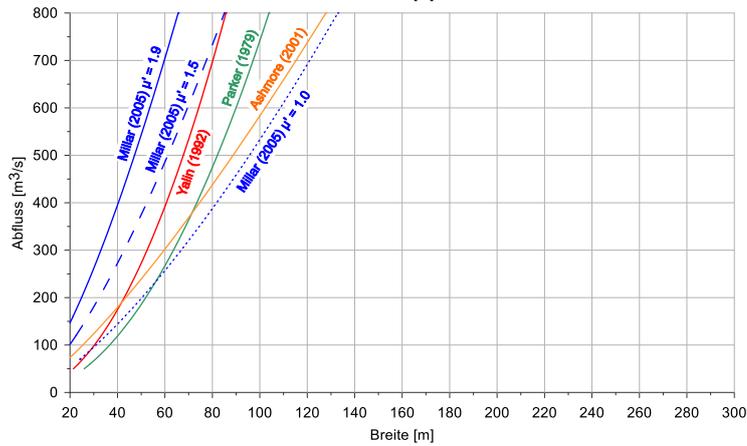
Dans le concept de Requena [20], la largeur pleins bords après érosion primaire correspond à la limite inférieure de l'intervalle des largeurs naturelles pouvant être atteintes par le fond du lit et la largeur pleins bords après érosion secondaire à sa limite supérieure. Il existe plusieurs approches pour calculer ces deux limites (Fig. 15) : les formules de Yalin [23] et Parker [19] livrent plutôt une valeur correspondant à la limite inférieure, celle d'Ashmore [7] indique plutôt la limite supérieure. Millar [16] tient également compte de l'effet de la stabilité des berges. Sa théorie aboutit à des valeurs intermédiaires entre ces deux limites.

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

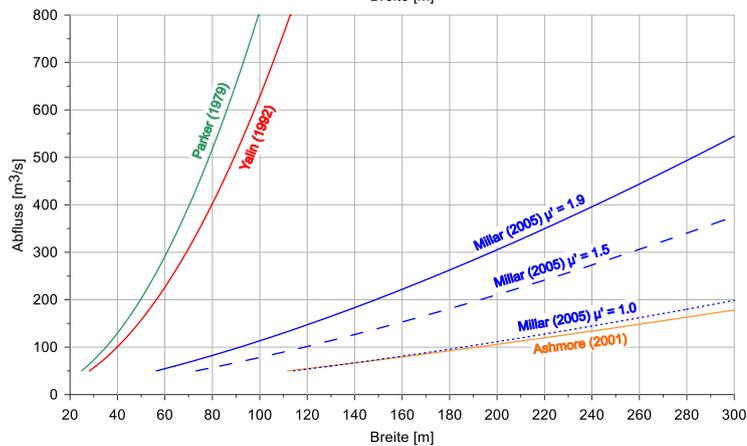
Pente = 0.2 %
dm = 2 cm



Pente = 0.2 %
dm = 6 cm



Pente = 1.0 %
dm = 2 cm



Pente = 1.0 %
dm = 6 cm

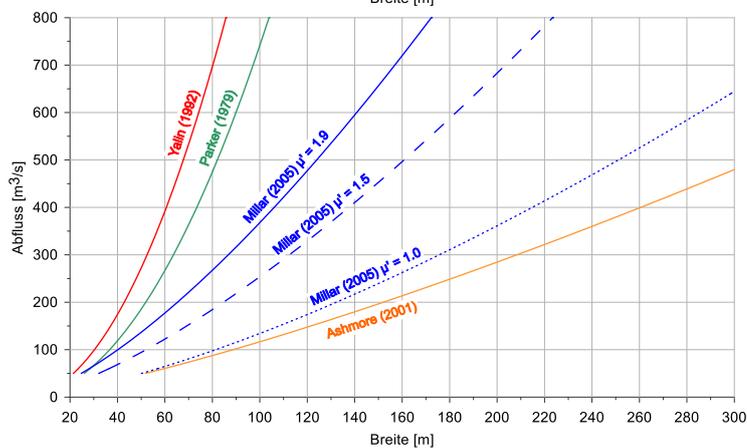


Fig. 15 Largeur du fond du lit calculée en fonction du débit pour différentes valeurs de la pente et du diamètre des grains de sédiment

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

6.5.2 Application des formules empiriques

Toutes les approches empiriques considèrent que le cours d'eau se trouve dans un état stable. Dans le présent travail, différentes formules ont été sélectionnées². En considérant les principes sur lesquels elles reposent, le type de largeur auquel elles aboutissent (après érosion primaire ou secondaire) a ensuite été évalué³ (voir chapitre 3). On a alors considéré qu'il convenait d'accorder plus de poids à l'un ou l'autre des deux types de largeur selon la morphologie du cours d'eau (Fig. 16).

*Domaine
d'application des
formules empiriques*

Le mode d'utilisation des formules empiriques proposé dans ce document est une suggestion basée sur la classification des approches empiriques opérée par Requena [20]. Cette classification est très simplifiée et ne peut pas répondre à tous les cas particuliers. Pour des informations détaillées sur le domaine d'application, il convient de se reporter aux articles originaux publiés sur les formules concernées.

Le rapport «Die erforderliche Geschiebefracht» de Schälchli et Hunzinger (2021) [5] livre également des conseils d'utilisation supplémentaires.

Yalin

La formule de Yalin [23] se base sur l'hypothèse selon laquelle le cours d'eau est dans un état stable à la largeur calculée (pas d'érosion des pieds de berge). Cette situation correspond à la largeur atteinte au terme de l'érosion latérale primaire dans le concept de Requena [20].

Largeur après érosion primaire selon Yalin⁴:

$$L_{\text{nat}} = 1.5 \cdot Q^{0.5} / dm^{0.25}$$

² Il n'existe pas de formule applicable dans tous les cas et rendant parfaitement compte des conditions réelles. Les formules proposées ici ont été choisies en fonction de l'expérience de l'auteur et des recommandations de P. Requena [20].

³ La classification résultante est comparable à celle de Requena [20]

⁴ Nomenclature : les valeurs correspondent à l'état de référence (voir glossaire) ; la possibilité d'utilisation de valeurs de l'état actuel doit être évaluée au cas par cas.

L_{nat}	=	largeur naturelle du fond du lit
ρ_s	=	masse volumique des sédiments = 2650 kg/m ³
ρ_w	=	masse volumique de l'eau = 1000 kg/m ³
g	=	accélération de la pesanteur = 9.81 m/s ²
Q	=	débit morphogène [m ³ /s]
J	=	pente brute [-]
dm	=	diamètre moyen des grains du fond [m]
s	=	ρ_s / ρ_w

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit*Parker*

En se basant sur des réflexions d'ordre analytique, Parker [19] a cherché à savoir quelles conditions devaient remplir les paramètres L, h et J pour que le lit reste stable. Pour la largeur naturelle du fond du lit, il s'est basé sur ses observations de la nature et a développé une formule classique basée sur les largeurs de régime. Les applications ont montré que cette formule livrait plutôt une valeur de la largeur atteinte au terme de l'érosion primaire.

Largeur après érosion primaire selon Parker :

$$L_{nat} = 4.4 * Q^{0.5} / ((s-1) * g * dm)^{0.25}$$

Ashmore

La formule d'Ashmore [7] a été développée pour les lits ramifiés sur la base d'observations et d'essais de laboratoire. L'expérience a montré qu'elle livre des largeurs très importantes dans le contexte helvétique. D'après Requena [20], la formule d'Ashmore permet donc plutôt de calculer la largeur atteinte au terme de l'érosion latérale secondaire.

Largeur après érosion secondaire selon Ashmore :

$$L_{nat} = 0.0098 (\rho_w g Q J)^{0.777} / dm^{0.7}$$

Millar

À partir d'une grande quantité de données, Millar [16] a déterminé les constantes des relations L/Q et h/Q et en a déduit la formule suivante qui, d'après Requena [20], permet de calculer la largeur atteinte au terme de l'érosion latérale secondaire :

Largeur après érosion secondaire selon Millar :

$$L_{nat} = 16.5 Q^{*0.7} J^{0.6} \mu^{-1.1} dm$$

$$\text{avec } Q^* = Q / ((s-1) g dm)^{0.5} dm^2$$

La variable μ est dépendante de la densité de végétation. Absence de végétation : $\mu = 1$, végétation très dense : $\mu = 1,9$. Pour le Plateau suisse, la valeur de μ ne doit pas être choisie inférieure à 1,5. En altitude, en particulier au-dessus de la limite de la forêt, les valeurs sont en général inférieures à 1,5.

Ikeda

La formule d'Ikeda [13] basée sur la force tractrice livre des largeurs très importantes qui ne se retrouvent avec aucune des autres formules Il est donc déconseillé de l'utiliser.

Appréciation

L'évaluation des formules conseillées a montré qu'elles étaient toutes basées sur des observations *in situ* ou sur des essais de laboratoire. Aucune n'était purement analytique. Les formules rendent bien compte des relations entre les paramètres mais la corrélation entre la largeur calculée et la largeur

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

mesurée est assez faible. Elles constituent cependant un instrument de valeur pour placer les conditions locales dans un contexte plus général. Elles offrent par ailleurs une possibilité d'estimer la largeur naturelle du fond du lit lorsque les autres bases de travail font défaut.

Choix de la formule adéquate

La largeur naturelle du fond du lit se situe entre les largeurs après érosion primaire et secondaire. La forme naturelle du lit ou la morphologie du cours d'eau dicte le choix de la largeur à considérer (après érosion primaire ou secondaire) pour estimer la largeur réelle (cf. Fig. 16). Le style fluvial peut être déterminé à partir de documents historiques (chapitre 6.2), de tronçons comparables proche de l'état naturel (chapitre 6.3), d'analyses de la topographie (chapitre 6.3) ou par la méthode de Rosgen [21]. En cas d'incertitude quant à ce choix, il est recommandé d'employer la formule de Millar [16] (avec $\mu = 1,5$).

Types de morphologie naturelle du lit (styles fluviaux)		Lit sinueux ou linéaire	Lit en méandres	Lit sinueux avec bancs	Lit sinueux avec îlots et bancs	Lit ramifié
Caractéristiques du style fluvial		Forte pente, peu de déplacements latéraux, matériau du fond en général grossier	Faible pente, méandres en boucles pouvant se refermer, apparition de bras morts	Tracé sinusoïdal, méandres migrant vers l'aval, pas de formation de bras morts	Tracé sinusoïdal, méandres migrant vers l'aval, courts passages à plusieurs chenaux	Lit étendu avec bancs et structures anastomosées, les chenaux ne restent pas séparés sur de longues distances
Paramètres pour les formules empiriques	Débit morphogène	HQ ₂ - HQ ₅	ca. HQ ₂	HQ ₂ - HQ ₅	HQ ₂ - HQ ₅	ca. HQ ₅
	Matériaux déterminants	Sédiments du fond	Sédiments du fond	Sédiments du fond	Sédiments en mouvement	Sédiments en mouvement
Largeur vers laquelle le cours d'eau a tendance à évoluer		Largeur après érosion primaire	Largeur après érosion primaire	Largeur après érosion primaire avec légère tendance vers la largeur après érosion secondaire	Largeur après érosion primaire avec légère tendance vers la largeur après érosion secondaire	En général beaucoup plus large que la largeur après érosion primaire, tendance vers la largeur après érosion secondaire, largeur maxi si atterrissement prononcé

Fig. 16 Types de morphologie du lit pouvant se mettre en place dans les différentes conditions de débit, de pente et de granulométrie des particules du fond.

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

6.5.3 Bases nécessaires aux calculs

Pour pouvoir appliquer les formules, les paramètres suivants doivent être connus :

Débit morphogène

Le débit morphogène est un paramètre essentiel de la théorie basée sur les largeurs de régime, (voir Glossaire). Il correspond au débit de plein bord dans le lit naturel (largeur pleins bords \approx largeur du lit). Le débit morphogène varie selon le style fluvial. Paccaud et al. [18] recommandent de considérer HQ₂ pour les lits à méandres et HQ₅ pour les lits ramifiés.

Pente

Pour déterminer la largeur naturelle du fond du lit, il est nécessaire de connaître la pente naturelle. Il s'agit de la pente non influencée par les barrages, seuils artificiels et autres rampes. Dans les cours d'eau naturellement rectilignes, la pente naturelle correspond à peu près à la pente du thalweg. Dans les cours d'eau sinueux, elle est plus faible que celle de la vallée.

Diamètre moyen des particules de sédiment

Les formules empiriques relevant de la théorie basée sur les largeurs de régime présentées ici font intervenir le diamètre moyen des grains (dm) à l'état naturel. Il faut garder à l'esprit que la granulométrie est plus grossière dans un lit rétréci qu'à l'état naturel. Or un diamètre plus élevé livre une largeur plus faible. À l'état naturel, le substrat est en général plus fin et c'est sa granulométrie qui doit être prise en compte pour les calculs. Si l'on ne dispose plus de tronçons proches de l'état naturel ou si le régime de charriage est perturbé (bien souvent, les deux problèmes vont de pair), le diamètre à considérer doit être déterminé par une expertise.

Pour le choix du diamètre déterminant, il convient de faire la distinction entre les sédiments du fond (sous la couche de pavage éventuelle) et les sédiments en mouvement (charriage). Les sédiments en mouvement sont majoritairement plus fins que ceux de la couche inférieure.

Il est recommandé de distinguer les catégories suivantes :

Lit rectiligne, sinueux ou à méandres :

Diamètre déterminant = diamètre moyen dans la couche inférieure du fond

Lit ramifié ou à plusieurs chenaux :

Dans les faciès ramifiés, les matériaux en mouvement jouent un rôle déterminant dans les processus de morphogenèse. Il est conseillé de choisir pour le diamètre moyen déterminant une valeur un peu plus faible que celle

Méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit

des matériaux de la couche inférieure. Le diamètre moyen choisi ne doit cependant pas être inférieur à celui des matériaux en mouvement.

Tronçons sans charriage

Pour les tronçons présentant très peu de charriage (comme à la sortie immédiate d'un lac), il est déconseillé d'appliquer la théorie basée sur les largeurs de régime car elle n'est pas conçue pour ces situations.

Analyse de sensibilité

Les paramètres « débit morphogène » et « diamètre moyen des grains » ne peuvent généralement pas être déterminés avec certitude et doivent être estimés par j un expert. Il est donc recommandé de soumettre ces paramètres à une analyse de sensibilité pour mettre en évidence un intervalle de confiance pour les résultats.

Influence de la topographie

La largeur naturelle du fond du lit ne peut excéder celle du fond de vallée. Si le lit est rétréci en raison de la topographie, cet aspect doit être pris en compte pour la définition de la largeur naturelle du fond du lit.

7 Détermination de la largeur naturelle du fond du lit

7.1 Démarche

Étant donné que le travail part de l'état actuel, il convient tout d'abord de caractériser le lit actuel en termes de largeur et de morphologie.

La largeur naturelle du fond du lit est ensuite déterminée à l'aide des méthodes décrites au chapitre 6. Si l'on emploie différentes méthodes, on obtient le plus souvent plusieurs résultats différents. La qualité des bases à disposition n'est cependant pas toujours optimale pour toutes les approches et il peut arriver que les résultats obtenus soient contradictoires. Pour décider de la valeur à retenir, il convient donc d'évaluer la qualité des bases employées et de décider en conséquence du poids à accorder au résultat correspondant.

Critères

Une bonne base de travail répond aux critères suivants :

- Elle donne une représentation du cours d'eau dans un état naturel non ou très peu perturbé (pas ou très peu de stabilisations des berges connues ou visibles, hydrologie et charriage correspondant à l'état de référence).
- Elle présente une bonne résolution ou une bonne précision.
- Elle renferme beaucoup de détails (végétation, ouvrages, etc.).
- Elle peut être positionnée dans l'espace (géoréférencable).
- Elle peut être positionnée dans le temps (année et saison).
- On dispose d'informations sur les crues et étiages sévères survenus avant la réalisation du document.

Il est conseillé d'évaluer toutes les bases de travail selon ces critères et de conserver une trace écrite de l'évaluation pour pouvoir justifier des choix opérés.

Regroupement par méthode

La pertinence des données de bases est évaluée en fonction de ces critères. Plus cette pertinence est élevée, plus la donnée aura de poids dans l'estimation de la largeur naturelle du fond du lit. Les bases sont regroupées par méthode selon la subdivision du chapitre 6 :

1. Documents historiques
2. Tronçons de comparable proche de l'état naturel
3. Analyse de la topographie
4. Formules empiriques

Détermination de la largeur naturelle du fond du lit

Pondération des bases de travail

Au sein des groupes de méthodes, les données bases (différentes cartes historiques, par exemple) sont dotées d'un coefficient de pondération déterminé par une expertise en fonction de leur pertinence, de sorte que l'on obtient une largeur naturelle pondérée du fond du lit pour chaque groupe de méthodes.

Pondération des méthodes

Les méthodes sont ensuite elles-mêmes assorties de coefficients de pondération. La pondération des méthodes dépend de la pertinence des bases disponibles et doit également être effectuée par une expertise en fonction des critères définis précédemment. Si la pertinence des bases ne s'y oppose pas clairement, il est conseillé d'accorder le poids suivant aux différents types de méthodes :

- | | |
|--|----------------------------------|
| 1. Documents historiques | Poids élevé |
| 2. Tronçons comparable
proche de l'état naturel | Poids élevé |
| 3. Analyse de la topographie | Poids moyen |
| 4. Formules empiriques | vérification de la vraisemblance |

Si, dans un groupe de méthodes, les documents s'avèrent de mauvaise qualité ou si le résultat obtenu est trop différent des autres, il peut être décidé de ne lui accorder aucun poids.

La largeur naturelle du fond du lit correspond à la moyenne pondérée des résultats de toutes les méthodes.

Détermination de la largeur naturelle du fond du lit

Matrice de pondération

La pondération des documents et méthodes se fait à l'aide d'une matrice. En voici un exemple :

		Largeur pondérée	Pondération de la méthode
1. Documents historiques		A m	xx %
		Largeur	Pondération
Document historique n°1	a1 m		xx %
Document historique n°2	a2 m		xx %
Document historique n°3	a3 m		xx %
...			
			100%
2. Tronçons de référence naturels		B m	xx %
		Largeur	Pondération
km XX.X - XX.X	b1 m		xx %
km XX.X - XX.X	b2 m		xx %
...			
			100%
3. Analyses de la topographie		C m	xx %
		Largeur	Pondération
Struktur 1	c1 m		xx %
Struktur 2	c1 m		xx %
...			
			100%
4. Formules empiriques		Néant ou D m	xx %
		Largeur	Pondération
Lpb érosion primaire selon Yalin	d1 m		Valeurs utilisées
Lpb érosion secondaire selon Millar	d2 m		pour vérifier la
Lpb érosion secondaire selon Ashmore	d3 m		plausibilité ou xx %
Largeur du fond du lit résultante (arrondie)	 m	100 %

Le choix des coefficients de pondération doit être justifié par une brève notice.

7.2 La largeur du fond du lit dans un contexte de débits liquides et solides modifiés

7.2.1 Contexte

La largeur du fond du lit d'un cours d'eau dépend des conditions géologiques et de la végétation mais aussi, et surtout, du débit liquide et du charriage. Dans un cours d'eau naturel non endigué, la largeur et la morphologie du lit s'adaptent au régime hydrologique et au régime de charriage. L'influence du charriage sur la largeur du lit et sa morphologie a été décrite dans de nombreuses études de laboratoire et de terrain (Parker 1979, Church 2006, Marti 2006, Schälchli & Hunzinger 2021, etc.). Selon le régime hydrologique et le régime de charriage, différents styles fluviaux se développent, allant du lit en méandres au lit ramifiés. Les lits ramifiés se caractérisent par une largeur beaucoup plus élevée par rapport à la profondeur d'écoulement que les lits sinueux ou en méandres.

Dans certains tronçons, le débit et la charge de fond restent très réduits par rapport à l'état naturel malgré la mise en œuvre de toutes les mesures de renaturation prévues par les planifications cantonales et l'assainissement des débits résiduels en vertu des art. 31-33 et 80 LEaux. Cela peut par exemple être le cas de tronçons court-circuités dans lesquels les mesures de renaturation sont jugées disproportionnées et où l'on renonce donc à restaurer un régime d'écoulement et de charriage proche des conditions naturelles. Dans ce cas de figure, le cours d'eau se stabilise à une largeur du fond inférieure à ce qu'elle serait à l'état naturel. Il est alors inapproprié de se référer à la largeur naturelle du fond du lit pour planifier les travaux et il convient de considérer une largeur adaptée à la nouvelle situation.

La démarche décrite ici est conçue pour aider à déterminer une valeur réaliste de la largeur du fond du lit dans le cas où les débits liquides et solides restent modifiés malgré la mise en œuvre de toutes les mesures de renaturation prévues (planifications cantonales et assainissement des débits résiduels en vertu des art. 31-33 et 80 LEaux). Étant donné, cependant, que chaque tronçon a ses caractéristiques propres et que d'autres facteurs interviennent, la plausibilité de l'évaluation doit être contrôlée au cas par cas.

Les approches proposées pour adapter la largeur à ce contexte se basent sur des observations et réflexions faites dans le cadre d'assainissements du régime de charriage (référence : ébauche «aide à l'exécution relative au régime de charriage, 2_2023 » SanG). De ce point de vue, la planification de l'espace réservé aux eaux et l'assainissement du charriage s'accordent sur le plan méthodologique. Les fondements de cette adaptation sont exposés dans Schälchli et Hunzinger [5] (2021).

Détermination de la largeur naturelle du fond du lit

7.2.2 Adaptation de la largeur du fond du lit à un débit modifié

Situation

- Le régime d'écoulement du tronçon est fortement modifié par rapport à l'état de référence (malgré la mise en œuvre de toutes les mesures de renaturation prévues par les planifications cantonales et l'assainissement des débits résiduels en vertu des art. 31-33 et 80 LEaux).

- On entend par régime hydrologique modifié un régime dans lequel le débit morphogène (environ HQ_2-HQ_5) est inférieur de plus de 10 % à celui de l'état de référence.

Adaptation de la largeur du fond du lit

Le régime des crues est déterminant pour la largeur du fond du lit. S'il est modifié, la géométrie hydraulique et la capacité de transport par charriage le sont aussi. La largeur du lit pouvant être atteinte avec ce régime modifié peut être estimée par la formule suivante :

$$L_{red} = L_{ref} \sqrt{\frac{HQ_{red}}{HQ_2}}$$

avec L_{red} = largeur du lit au débit réduit ; L_{ref} = largeur du lit dans le régime hydrologique non modifié ; HQ_2 = débit morphogène à l'état de référence (déterminé, par exemple, à l'aide de cartes historiques) ; HQ_{red} = débit de crue déterminant dans le régime hydrologique modifié.

7.2.3 Adaptation de la largeur du fond du lit à un charriage modifié

Situation

- La charge de fond du tronçon est fortement modifiée par rapport à l'état de référence (malgré la mise en œuvre de toutes les mesures de renaturation prévues par les planifications cantonales et l'assainissement des débits résiduels en vertu des art. 31-33 et 80 LEaux).

- On parle de charge de fond significativement modifiée lorsque l'apport de matériaux charriés est inférieur au charriage nécessaire, tel que défini dans l'aide à l'exécution de l'OFEV relative au régime de charriage (en consultation). Selon le style fluvial, cela peut être le cas si le cours d'eau transporte moins de 65-80 % de la charge de fond de l'état de référence.

La largeur du fond du lit d'un cours d'eau dépend aussi du charriage. En se basant sur les estimations de la charge de fond et les mesures de largeur effectuées dans des cours d'eau suisses ayant un charriage réduit suite à un rétrécissement de leur lit, Schälchli et Hunziker (2021) ont établi une relation quantitative entre le charriage moyen annuel et la largeur du lit. La formule permettant de calculer la largeur est alors la suivante :

Détermination de la largeur naturelle du fond du lit

$$L_{red} = b L_P + \frac{CF_{red}}{CF_{ref}}(L_{ref} - b L_P)$$

avec L_{red} = largeur du lit au charriage (charge de fond) CF_{red} ; L_P = largeur du lit d'après Parker (1979, éq. 4) ; L_{ref} = largeur du lit dans un état de référence connu ; CF_{ref} = charriage dans un état de référence connu ; CF_{red} = charriage en l'état modifié.

La variable b a été déterminée de manière empirique et prend les valeurs suivantes : $b = 0,40$ (au débit HQ_5), $b = 0,45$ (au débit HQ_2).

7.3 La largeur du fond du lit des cours d'eau autrefois très larges et soumis à une forte pression

La largeur naturelle du fond du lit est un paramètre fondamental pour déterminer l'espace réservé aux eaux et dimensionner les projets d'aménagement de cours d'eau. Les cours d'eau autrefois très larges étaient souvent très ramifiés à l'état naturel. Dans certains cas, il s'agissait aussi de cours d'eau sinueux ou en méandres.

Cette largeur naturelle très importante pose une difficulté pour la réalisation des projets d'aménagement des cours d'eau lorsque l'espace nécessaire sans restrictions n'est plus disponible.

En décembre 2019, l'OFEV a organisé un workshop pour présenter le problème de la détermination de la largeur naturelle du fond du lit dans les grands cours d'eau et pour la discuter avec des experts des administrations cantonales, des bureaux d'hydraulique, de l'EPFL et de l'ETHZ. À l'issue de ces discussions, mission a été donnée de trouver une solution pour les cas décrits ci-dessus.

Dans le cadre du projet qui en a résulté, il n'a pas été possible d'identifier de méthode universelle. Les situations doivent être évaluées au cas par cas. L'OFEV est prêt à offrir son aide dans la recherche de solutions individuelles. Dans ces cas-là, nous prions les cantons de contacter l'OFEV de façon précoce. Si, au cours des ans, une solution viable et pratique apparaît, le présent document sera actualisé en conséquence.

En l'état actuel des connaissances, nous identifions les principes suivants pour la détermination de la largeur du fond du lit des cours d'eau autrefois très larges qui sont soumis à une forte pression (il s'agit d'exceptions qui doivent être traités comme des **cas particuliers**) :

Détermination de la largeur naturelle du fond du lit

- La détermination de la largeur naturelle théorique du fond lit du cours d'eau sur la base du style fluvial doit également être effectuée dans ces cas et servir d'objectif fondamental au projet.
- Le style fluvial doit être conservé.
- Du point de vue écologique, l'objectif principal est de restaurer la dynamique du cours d'eau.
- L'apparition de structures diversifiées comme des îlots de gravier, la végétation pionnière, des rives concaves et convexes, des micro-habitats et des habitats riverains est la base du fonctionnement naturel de tout cours d'eau et doit être rendue possible par la largeur déterminée.
- Une protection durable contre les crues doit être assurée. Ceci implique qu'à côté de tronçons pourvus de digues qui n'entravent pas significativement les fonctions naturelles du cours d'eau, des tronçons bordés de murs dans les zones habitées, surtout si elles le sont densément peuvent être nécessaires.
- Le périmètre du projet doit au minimum inclure des tronçons dans lesquels les fonctions naturelles du cours d'eau sont restaurées à un degré assurant à long terme une fonctionnalité pérenne de l'écosystème fluvial.

Cette liste n'est pas exhaustive et peut être complétée en fonction de besoins concrets.

8 Exemples d'application

Cette partie du rapport présente les méthodes de détermination de la largeur naturelle du fond du lit à partir d'exemples d'application.

8.1 Jogne (cantons de Fribourg et Berne)

Cet exemple présente la détermination de la largeur naturelle du fond du lit (L_{nat}) de la Jogne (Jaunbach) entre Kappelboden et Charmey dans les cantons de Fribourg et Berne, sur un secteur de 10.7 km entre les km 5.9 et 17.1 (Fig. 17). Le secteur a été divisé en 12 tronçons homogènes selon la pente du lit, le débit, la topographie du fond de vallée et l'état avant correction selon les plans d'archive (Fig. 21 - Fig. 25). Dans le cadre de cet exemple, il a été décidé de traiter uniquement de l'étude des tronçons 1 (0.5 km), 4 (1.6 km), 5 (0.6 km), 9 (0.7 km) et 12 (0.4 km) afin d'éviter les redondances. La méthodologie utilisée pour les autres tronçons est identique.



Fig. 17 Localisation du périmètre d'étude sur la Jogne (km 5.9 – 17.1)

8.1.1 État actuel

Bassin versant

Dans le périmètre d'étude, présente le bassin versant de la Jogne à une surface d'environ 102 km².

Type de cours d'eau

Dans le périmètre d'étude, la Jogne longe majoritairement des surfaces d'exploitation agricole. Elle traverse toutefois les hameaux de la Tzintre, Im Fang et Jaun. Les zones forestières ne sont touchées que par endroits. Le style de la Jogne est majoritairement celui d'un cours à méandres migrants. La largeur moyenne actuelle du lit de la rivière est d'environ 10-15 m.

Exemples d'application

État du cours d'eau

Concernant la morphologie, la rivière présente une faible variabilité de largeur en raison des stabilisations des berges existantes (digues longitudinales). La structure du lit est relativement homogène. La Jogne est toutefois un cours d'eau très actif avec une pente longitudinale moyenne d'environ 2%, charriant ainsi des grandes quantités de sédiments. Localement, la Jogne s'apparente à un torrent avec une pente très importante de l'ordre d'environ 9%.

8.1.2 Bases et méthodologie de la détermination de la largeur naturelle du lit

Le tableau ci-dessous montre un extrait de l'analyse pour quelques tronçons choisis.

Exemples d'application

1 Documents historiques						
Base	Evaluation	Estimation de la largeur pleins bords (valeurs mesurées)	Estimation de la largeur des berges	Largeur du lit	Forme du lit	Influence anthropique
T1	Aucun plan existant	-	-	-	T1: cours encaissé	T9: stabilisations de berge présentes, donc Lnat pas pertinente.
T4	Plan d'endiguement XIXe	Figures 7-8	60 m (47 à 72 m)	42 m	Autres tronçons: cours à méandres migrants	Autres tronçons: quelques stabilisations ponctuelles présentes, ayant un impact localisé et limité sur la Lnat.
T5	Plan d'endiguement 1890	Figure 9	36 m (30 à 43 m)	25 m		
T9	Plan d'endiguement 1890	Figure 10	13 m (11 à 14 m)	9 m		
T12	Plan d'endiguement 1893	Figure 11	29 m (23 à 40)	20 m		
2 Tronçons de référence naturels						
Section	Evaluation	Estimation de la largeur pleins bords (valeurs mesurées)	Estimation de la largeur des berges	Largeur du lit	Forme du lit	Influence anthropique
Aucun tronçon naturel comparable n'a pu être identifié.						
3 Analyse de la topographie						
Base	Evaluation	Estimation de la largeur pleins bords (valeurs mesurées)	Estimation de la largeur des berges	Largeur du lit	Forme du lit	
T1	Swissalti 3D de 2019, 50cm sur profils en travers	Mesures	12 m (7 à 15 m)	11 m	Cours encaissé avec une très forte pente. Fond de vallée = largeur du lit à pleins bords.	
T4	Non évalué	-	-	-		
T5	Non évalué	-	-	-		
T9	Swissalti 3D de 2019, 50cm sur profils en travers	Mesures	40 m	35 m	Cours à méandres migrants avec généralement un seul bras actif; méandres pouvant se déplacer latéralement. Vallée comparable à celle des tronçons 8 et 11 (non présentés) qui présentent une Lnat compatible avec la formule de Milliar.	
T12	Non évalué	-	-	-		
4 Formules empiriques						
Approche	Estimation de la largeur pleins bords (moyenne)			Largeur du lit (moyenne)	Paramètres	
T1	Y: Largeur pleins bords (après érosion primaire) selon Yalin	Y: 21 m; P: 31 m; A: 307 m; M: 131 m		Y: 19 m; P: 27 m; A: 270 m; M: 115	Q=33-56m ³ /s, dm=0.04-0.06m, J=0.093	
T4	P: Largeur pleins bords (après érosion primaire) selon Parker	Y: 16 m; P: 24 m; A: 35 m; M: 22 m		Y: 11 m; P: 17 m; A: 24 m; M: 15 m	Q=24-40m ³ /s, dm=0.06-0.08m, J=0.011	
T5	A: Largeur pleins bords (après érosion secondaire) selon Ashmore	Y: 14 m; P: 21 m; A: 33 m; M: 20 m		Y: 10 m; P: 14 m; A: 23 m; M: 14 m	Q=17-30m ³ /s, dm=0.06-0.08m, J=0.014	
T9	M: Largeur pleins bords (après érosion secondaire) Milliar ($\mu=1.5$; $s=2.65$)	Y: 13 m; P: 19 m; A: 38 m; M: 22 m		Y: 9 m; P: 13 m; A: 27 m; M: 15 m	Q=16-27m ³ /s, dm=0.08-0.10m, J=0.023	
T12		Y: 11 m; P: 17 m; A: 28 m; M: 16 m		Y: 8 m; P: 12 m; A: 20 m; M: 11 m	Q=14-24m ³ /s, dm=0.09-0.11m, J=0.019	

Exemples d'application

8.1.3 Pondération

Tableau de
pondération

Le tableau suivant montre les largeurs déterminées à partir des données de base et de la pondération choisie. Il en résulte les largeurs naturelles du lit suivantes : T1 : 11 m ; T4 : 42 m ; T5 : 25 m ; T9 : 15 m ; T12 : 20 m.

1 Documents historiques			
		Largeur du lit	Pondération
T1	Aucun plan existant	-	0%
T4	Plan d'endiguement fin XIXe siècle	42 m	100%
T5	Plan d'endiguement de 1890	25 m	100%
T9	Plan d'endiguement de 1890	9 m	0%
T12	Plan d'endiguement de 1893	20 m	100%
			42 m
			25 m
			20 m
2 Tronçons de référence naturels			
		Largeur du lit	Pondération
			aucune
3 Analyse de la topographie			
		Largeur du lit	Pondération
T1	Profils en travers sur MNT	11 m	100%
T4	Non évalué	-	0%
T5	Non évalué	-	0%
T9	Profils en travers sur MNT	35 m	0%
T12	Non évalué	-	0%
			11 m
4 Formules empiriques			
Approche		Largeur du lit	Pondération
T1	Y: Largeur pleins bords (après érosion primaire) selon Yalin	Y: 19 m; P: 27 m; A: 270 m; M: 115 m	0%
T4	P: Largeur pleins bords (après érosion primaire) selon Parker	Y: 11 m; P: 17 m; A: 24 m; M: 15 m	0%
T5	A: Largeur pleins bords (après érosion secondaire) selon Ashmore	Y: 10 m; P: 14 m; A: 23 m; M: 14 m	0%
T9	M: Largeur pleins bords (après érosion secondaire) selon Millar ($\mu=1.5$; $s=2.65$)	Y: 9 m; P: 13 m; A: 27 m; M: 15 m	100%
T12		Y: 8 m; P: 12 m; A: 20 m; M: 11 m	0%
			15 m

À titre d'information, le tableau ci-dessous donne les largeurs naturelles en mètres déterminées pour les tronçons qui ne sont pas présentés dans cet exemple d'application.

Tronçon	T2	T3	T6	T7	T8	T10	T11
Largeur naturelle (m)	38	27	19	19	19	9	12
Longueur du tronçon (km)	3.1	1.3	1.0	0.5	0.7	0.4	0.7
Méthode de détermination*	1	4 (A)	1	2 (T6 et T8)	1	1	1

* 1 : documents historiques. 2 : référence spatiale. 3 : analyse de la topographie. 4 : formules empiriques (auteur).

Exemples d'application

Justification des choix des valeurs retenues

Dans le cadre de cette étude, les valeurs mesurées sur les plans ont été utilisées en priorité pour définir la largeur naturelle du lit, car elles constituent la méthode jugée la plus fiable, les plans étant assez précis et les stabilisations de berge presque complètement absentes. Au total, la largeur du lit de 8 des 12 tronçons a été définie selon les plans d'endiguement. Dans cet exemple, les plans ont permis de définir la largeur naturelle du lit des tronçons T4, T5 et T12.

En second lieu, ce sont les formules empiriques qui ont été utilisées pour définir la largeur naturelle du lit. La méthode empirique est jugée plus fiable que l'étude de la topographie. En effet, les modifications de la morphologie du cours d'eau dues aux travaux d'endiguement et le degré de précision du MNT peuvent influencer considérablement les valeurs mesurées sur les profils en travers. Les plans d'archives n'étant pas pertinents pour le tronçon T9, ce sont les formules empiriques qui ont permis de déterminer la largeur naturelle du lit. Le choix de la formule empirique à retenir a été basé sur la comparaison de la performance des diverses formules sur des tronçons jugés similaires au T9 (T8 et T11, non présentés dans cet exemple). Sur ces tronçons, c'est la formule de Millar qui fournit des résultats correspondant aux mesures sur les documents historiques. Cette formule a donc été retenue pour définir la largeur naturelle du lit pour le T9.

Finalement, l'étude de la topographie a été utilisée en dernier recours. Les plans d'archives et les formules empiriques n'étant pas pertinents pour le tronçon T1, la largeur naturelle a été définie selon des mesures sur les profils en travers. Ce tronçon encaissé n'ayant jamais subi de correction, les mesures sur les profils en travers s'avèrent pertinentes.

Ci-dessous sont décrites les évaluations effectuées pour chaque méthodologie pour les tronçons présentés dans cet exemple.

Documents historiques

Les cartes historiques de la Jogne ne permettent pas de mesurer la largeur naturelle du lit. En revanche, les plans d'endiguement de la fin du XIX^e siècle, trouvés aux archives cantonales, donnent des informations très utiles concernant la largeur de la Jogne avant les corrections. Toutefois, les dimensions mesurées doivent être considérées avec précaution aux endroits où existaient déjà des ouvrages de retenue et des stabilisations ponctuelles, avant les grands travaux d'endiguement.

Exemples d'application

T1 : La L_{nat} moyenne n'a pas pu être mesurée sur les plans car ce tronçon n'y est pas représenté. Au vu de son encaissement naturel, ce tronçon n'a vraisemblablement jamais fait l'objet d'endiguement.

T4 : La L_{nat} moyenne mesurée correspond à 42 m. Les secteurs amont et aval de ce tronçon sont très larges. Plusieurs mesures au niveau du secteur central ont été exclues car des stabilisations préexistantes influencent les valeurs mesurées.

T5 : La L_{nat} moyenne mesurée correspond à 25 m. Les stabilisations préexistantes sont peu nombreuses et ne semblent pas influencer les valeurs mesurées.

T9 : La L_{nat} moyenne mesurée correspond à 9 m mais ne semble pas pertinente car de nombreuses stabilisations préexistantes, visibles sur les méandres en extrados, influencent les valeurs mesurées.

T12 : La L_{nat} moyenne mesurée correspond à 20 m. Les stabilisations préexistantes sont visiblement peu nombreuses et ne semblent pas influencer significativement les valeurs mesurées.

Tronçons de comparable proche de l'état naturels

Une recherche de tronçons de comparable proche de l'état naturels a eu lieu. Toutefois, aucun tronçon comparable n'a pu être identifié.

Analyses de la topographie

T1 : La L_{nat} moyenne mesurée sur les profils en travers correspond à 11 m (fond de vallée). Les stabilisations sont inexistantes. La pente est très importante.

T9 : Des terrasses alternées d'une largeur d'environ 40-50 m sont visibles sur les profils en travers. Cela laisse supposer que ce tronçon est comparable aux tronçons T8 et T11 qui présentent des terrasses similaires sur les profils en travers.

Les profils en travers des tronçons T4, T5 et T12 n'ont pas été évalués.

Approche empirique

T1 : Aucune formule ne donne des valeurs raisonnables par rapport aux mesures sur plans de la L_{nat} , ce qui est tout à fait normal puisque les formules ne tiennent pas compte de la particularité des cours encaissés.

T4 : Aucune formule ne donne des valeurs de L_{nat} aussi importantes que celles mesurées sur plans. Toutefois, plusieurs plans montrent des largeurs proches de 60 m. Selon les plans, il s'agit d'une moyenne cohérente. Cette valeur supérieure s'explique vraisemblablement par la présence d'un goulet d'étranglement (passage étroit à cause d'un éperon rocheux) en aval de ce

Exemples d'application

tronçon, induisant une accumulation des sédiments sur le tronçon en question.

T5 : Yalin et Parker donnent des valeurs trop faibles par rapport aux mesures sur plans de la L_{nat} . Ashmore et Millar sont plus pertinents car d'importants bancs de gravier sont visibles sur les plans. Ashmore correspond le mieux à ce qui a été observé sur plans. La moyenne des valeurs de L_{nat} obtenue correspond à 23 m avec Ashmore.

T9 : Ashmore et Millar sont plus pertinents car ce tronçon présentait probablement d'importants bancs de gravier avant son endiguement. Seul Millar donne des valeurs raisonnables en comparaison des L_{nat} mesurées sur les plans pour T8 et T11. La moyenne des valeurs de L_{nat} obtenue avec Millar correspond à 15 m pour T9.

T12 : Yalin et Parker donnent des valeurs trop faibles par rapport aux mesures sur plans de la L_{nat} . Ashmore et Millar sont plus pertinents car d'importants bancs de gravier sont visibles sur les plans. Ashmore correspond le mieux à ce qui a été observé sur plans. La moyenne des valeurs obtenues avec Ashmore correspond à 20 m.

Exemples d'application

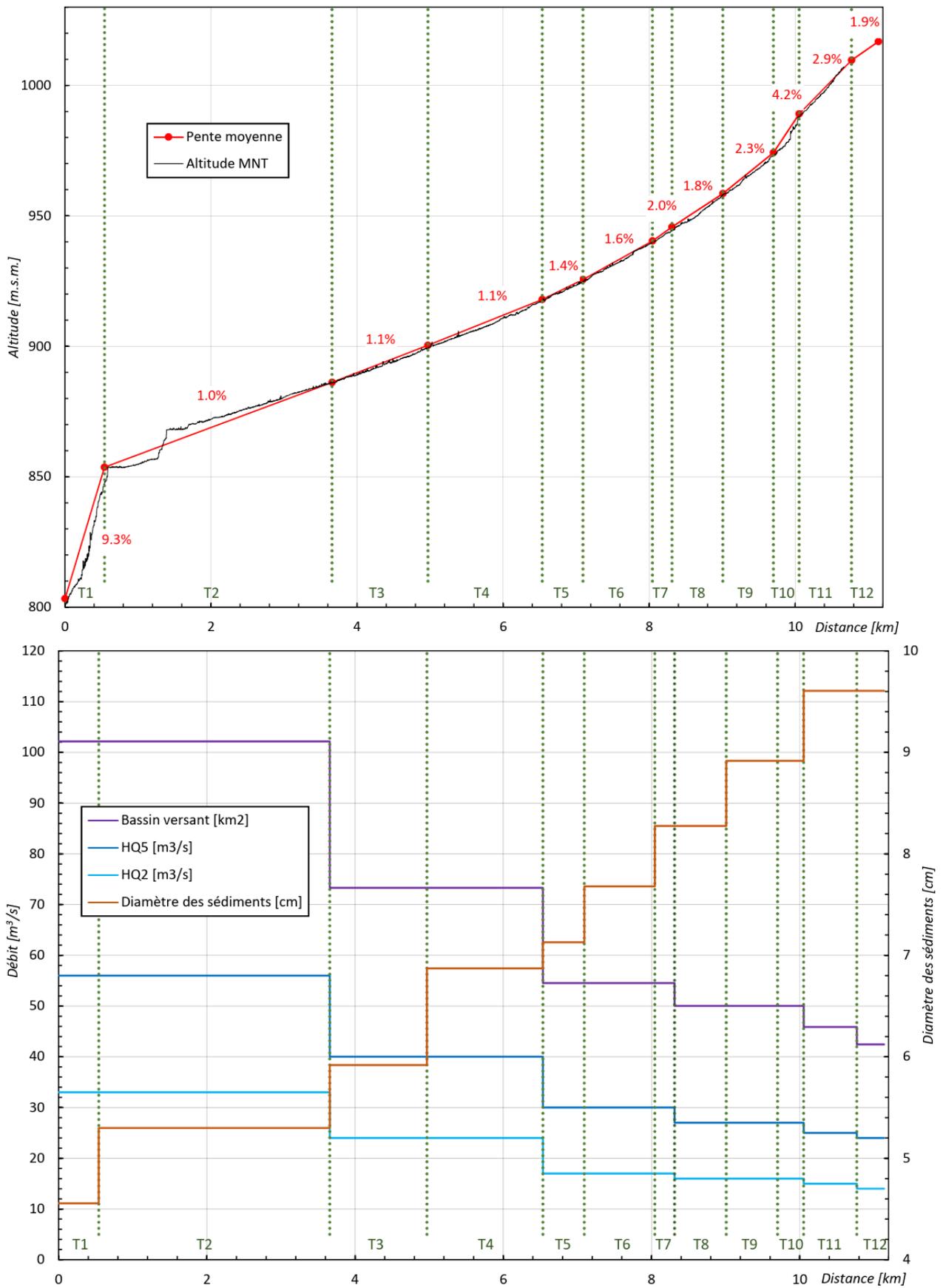


Fig. 18 Représentation des différents paramètres de base sur le profil en long de la Jogne

Exemples d'application



Fig. 19 La Jogne à la hauteur du Pont du Roc sur le tronçon T2, km 8.84, le 2.12.2021



Fig. 20 La Jogne à la hauteur de Bonnefontaine, sur le tronçon T2, km 8.10, le 2.12.2021

Exemples d'application

Tronçon 4 (T4)

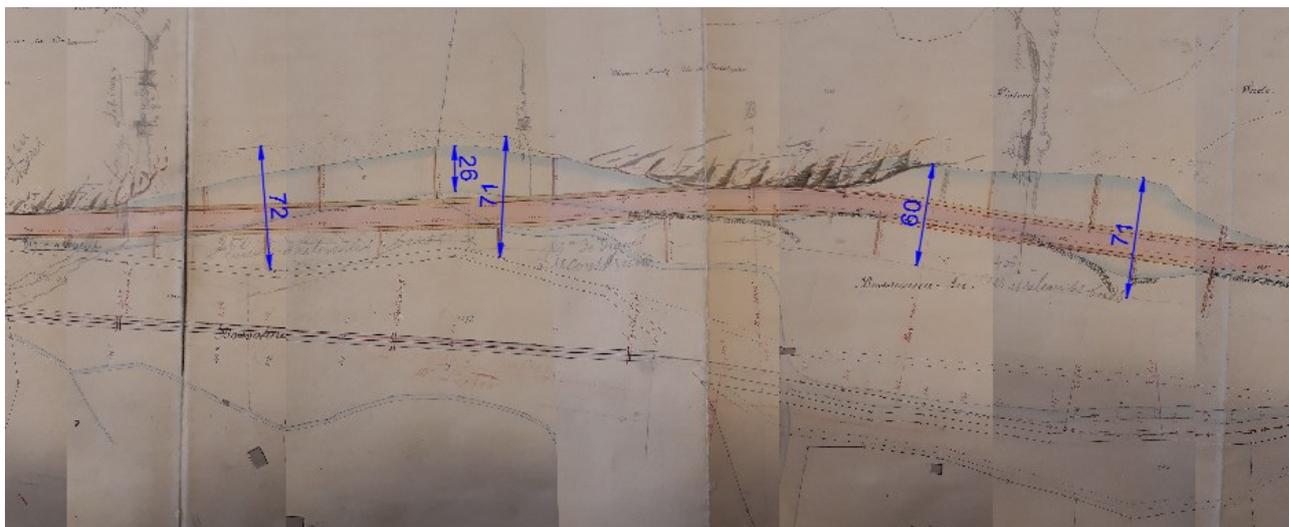


Fig. 21 Extrait du plan d'endiguement de la fin du XIXe siècle entre Krämersweidli et Hinterweld avec des largeurs pleins bords (L_{pb}) mesurées jusqu'à 70 m. Les sédiments n'étant pas clairement représentés sur le plan, la L_{pb} peut être mesurée selon l'emprise latérale des épis (stabilisations perpendiculaires aux digues).

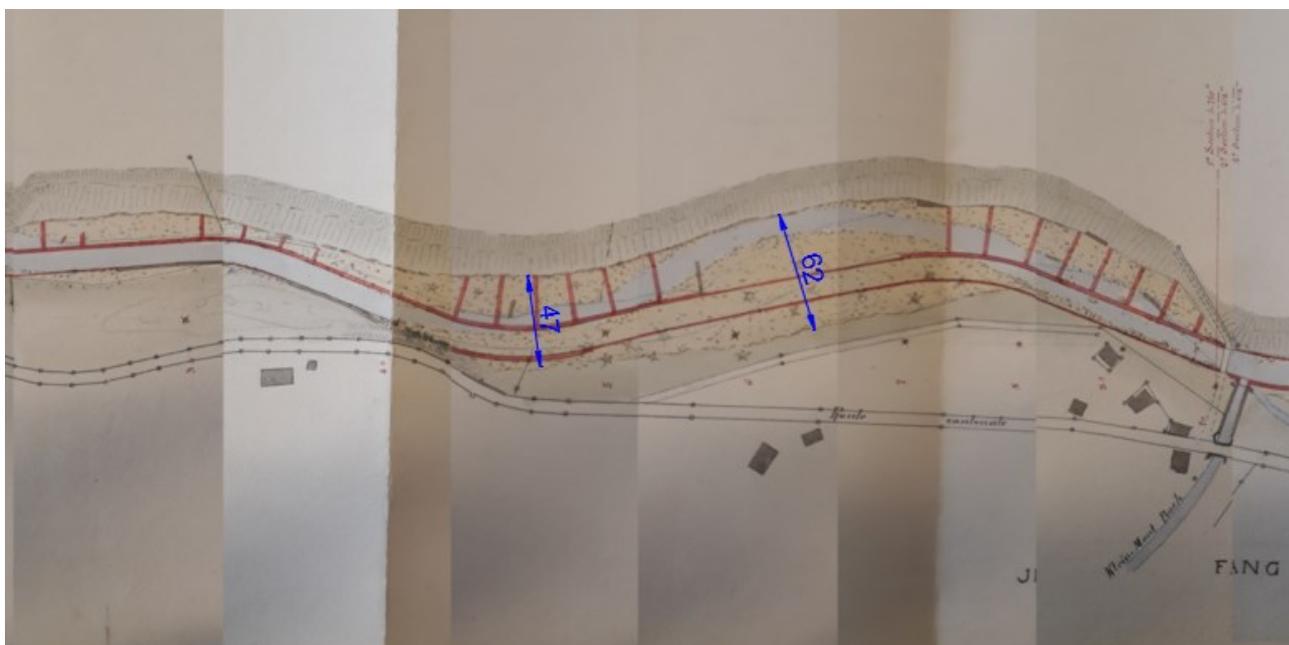


Fig. 22 Extrait du plan d'endiguement de 1890 entre Bifang et Im Fang avec des largeurs pleins bords (L_{pb}) mesurées jusqu'à 60 m.

Exemples d'application

Tronçon 5 (T5)

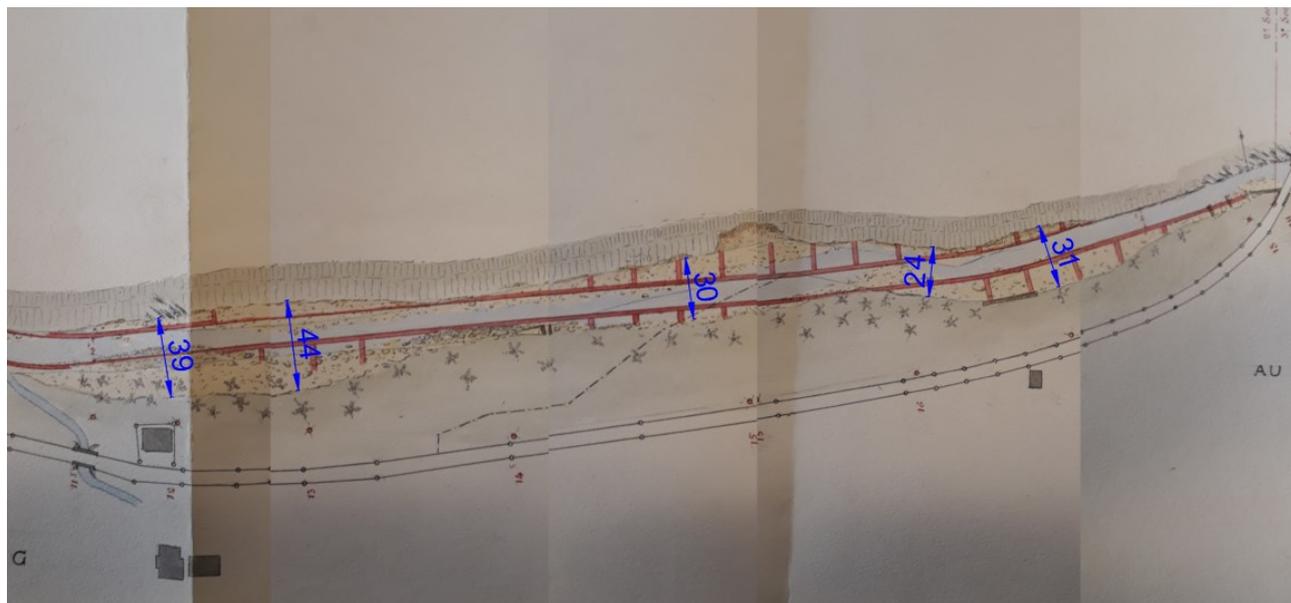


Fig. 23 Extrait du plan d'endiguement de 1890 entre Im Fang et Fangeren Auen avec des largeurs pleins bords (L_{pb}) mesurées jusqu'à 45 m

Tronçon 9 (T9)



Fig. 24 Extrait du plan d'endiguement de 1890 entre Chuerzi et Grüemersweidli avec des largeurs pleins bords (L_{pb}) mesurées jusqu'à environ seulement 15 m.

Exemples d'application

Tronçon 12 (T12)



Fig. 25 Extrait du plan d'endiguement de 1893 à la hauteur de Kappelboden jusqu'à la confluence de l'Oberbach et de la Jogne, avec des largeurs pleins bords (L_{pb}) mesurées jusqu'à environ 40 m.

Exemples d'application

8.2 L'Aar entre Wildegg et Brugg (canton d'Argovie)

Cet exemple présente la détermination de la largeur naturelle du fond du lit de l'Aar entre Wildegg et Brugg, dans le canton d'Argovie, entre les km 29.1 et 19.3 du système GEWISS (voir Fig. 26).

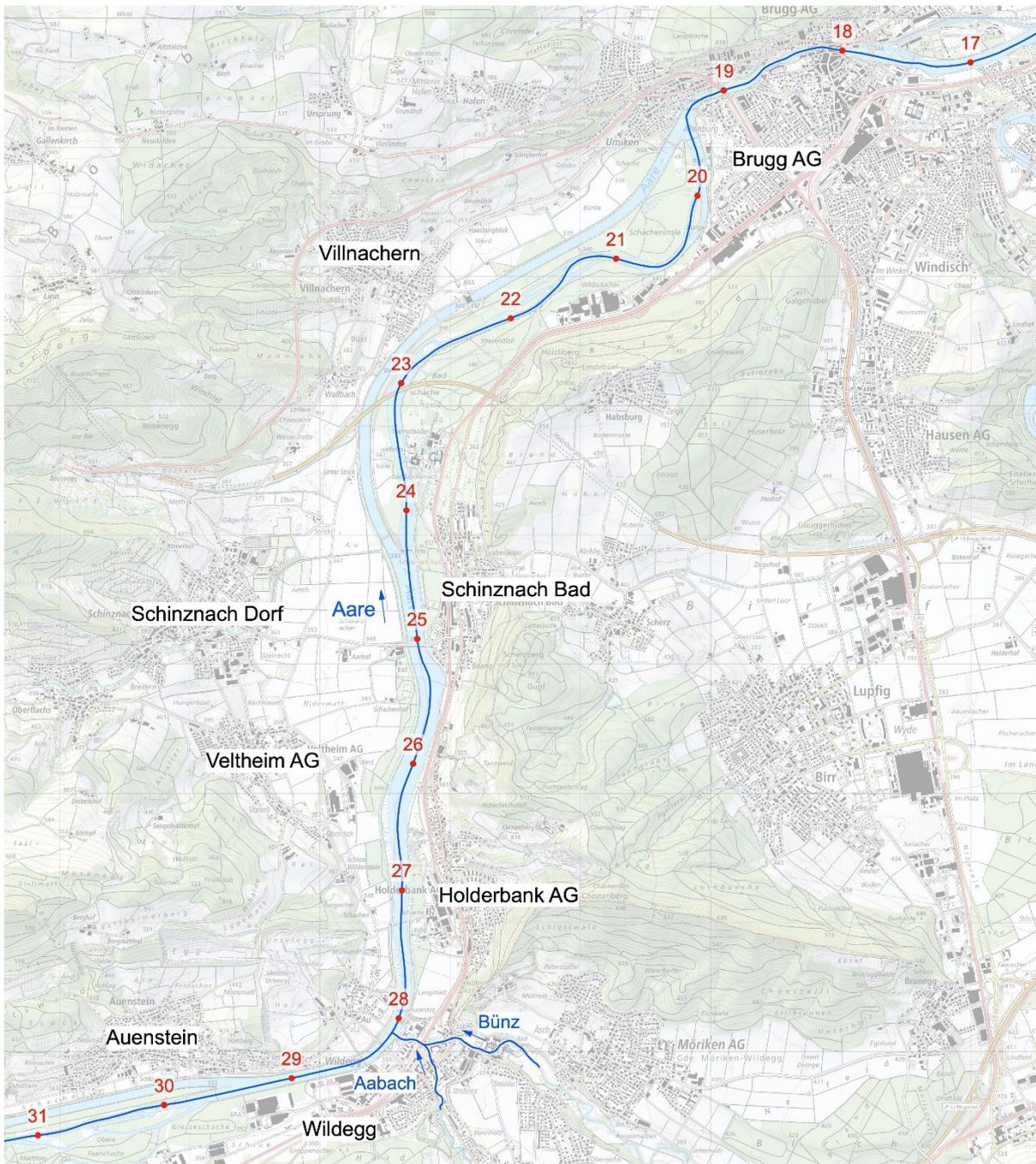


Fig. 26 Localisation du périmètre d'étude sur l'Aar entre Wildegg et Brugg (GEWISS km 29.1 – 19.3), échelle 1:50'000.

8.2.1 État actuel

Bassin versant

Dans le périmètre d'étude, le bassin versant de l'Aar voit sa surface passer de 11'330 km² à 11'680 km².

Exemples d'application

<i>Type de cours d'eau</i>	Dans le périmètre d'étude, l'Aar traverse des alluvions récentes limitées latéralement par des terrasses de matériaux meubles. Dans son état de référence, l'Aar présentait un cours sinueux avec des îlots et bancs de gravier qui se déplaçaient au gré des crues (<i>Fig. 32</i>). Les berges et les îles étaient occupées par une ripisylve (forêt alluviale). À Brugg, le périmètre d'étude se clôt par un goulet d'étranglement où l'Aar a creusé son lit dans la roche affleurante. À l'heure actuelle, le secteur d'étude est marqué par la centrale hydroélectrique par dérivation de Wildegg-Brugg qui le sépare en un tronçon à écoulement retenu jusqu'à Schinznach puis un tronçon à débit résiduel jusqu'à Umiken.
<i>Régime de charriage</i>	À l'état de référence, l'Aar se caractérisait par une charge de fond moyenne de l'ordre de 11'000 m ³ /an (tronçon Wildegg-Brugg). Selon la planification stratégique de l'assainissement du régime de charriage, la charge de fond moyenne n'était plus que d'environ 2'000 m ³ /an en 2010. L'objectif de l'assainissement est de revenir à environ 5'000 m ³ /an.
<i>État du lit</i>	Dans le tronçon de retenue , l'Aar est confinée entre des digues longitudinales. Suite au ralentissement de l'écoulement, des zones d'atterrissement se sont formées localement (<i>Fig. 28</i>). Le fond du lit, peu structuré, est formé de galets et de sédiments fins. Le tronçon à débit résiduel est compartimenté par le barrage auxiliaire et le barrage vanne-toit. Entre ces deux barrages, le tracé autrefois sinueux qui avait tendance à se ramifier est encore reconnaissable (<i>Fig. 32</i>). En raison de la forte réduction du débit (HQ ₂ est passé de 920 m ³ /s à 520 m ³ /s) et du charriage (voir plus haut), la largeur dynamique a toutefois fortement diminué.

8.2.2 Bases et méthodologie de la détermination de la largeur

Le tableau suivant précise les cartes historiques interprétées et les formules empiriques utilisées avec les paramètres pris en compte.

Sur les cartes historiques, la largeur dynamique a été déterminée par planimétrie⁵ ainsi qu'en calculant la moyenne des largeurs de profils en travers distants de 100 m. La valeur obtenue avec les profils est inférieure de près de 4 % à celle déterminée par planimétrie. Par ailleurs, la largeur moyenne indiquée comprend des îles couvertes de ripisylve.

Dans l'approche empirique, cinq méthodes ont été considérées. En complément, dans la formule de Parker, la largeur a été multipliée par un

⁵ Largeur moyenne = (superficie de la zone représentée sous eau sans les bancs de gravier) / longueur du linéaire.

Exemples d'application

facteur relatif au style fluvial. Pour les cours d'eau sinueux à bancs et îlots, ce facteur est compris entre 0,9 - 1,5 (la valeur de 1,2 a été choisie).

1 Documents historiques									
	Base	Exploitation cf:	Largeur dynamique		Largeur avec les îles boisées	Forme du lit	Influence anthropogène		
			Planimétrie	Profils					
1a.	Carte Michaelis (1843)	Fig. 27, 30	209	201	259	Sinueux avec banquettes et îles	Aménagements locaux (épis) conduisent à un rétrécissement léger du lit		
1b.	Carte Dufour (1849 - 1861)	Fig. 27, 31	250	241	271				
1c.	Carte Siegfried (1878 - 1882)	Fig. 27, 32	178	173	225				
3 Formule empiriques									
	Méthode	Exploitation cf.	Grandeur décisive	Largeur HQ2	Largeur HQ5				
3a.	Parker	fig.27	Largeur du lit	160 m	172 m				
3b.	Parker + morphologie	fig.27	Largeur du lit	192 m	206 m				
3c.	Yalin	fig.27	Largeur du lit	109 m	118 m				
3d.	Ikeda	fig.27	Largeur du lit	277 m	322 m				
3e.	Ashmore	fig.27	Largeur plain bords	195 m	219 m				
3f.	Millar 2005	fig.27	Largeur plain bords	216 m	240 m				
4 Paramètres									
	Grandeur	Valeur							
4a.	Débit HQ2	920 m ³ /s							
4b.	Débit HQ5	1070 m ³ /s							
4c.	Pente	1,6 ‰							
4d.	diamètre des grins d50	3 cm							
4e.	diamètre des grins d90	7 cm							
4f.	μ (pour formule Millar)	1.00							

Exemples d'application

8.2.3 Pondération et largeur naturelle du fond du lit

Le tableau suivant présente les largeurs déterminées à partir des différentes bases et la pondération choisie. Dans le périmètre d'étude, la largeur naturelle du fond de l'Aar ainsi déterminée est de 200 m.

				Largeur pondéré (arrondie)	Pondération de la Méthode
1 Documents historiques				202 m	100%
	Base	Largeur	Pondération		
1a.	Carte Michaelis (1843)	205 m	40%		
1b.	Carte Dufour (1849 - 1861)	246 m	20%		
1c.	Carte Siegfried (1878 - 1882)	176 m	40%		
3 Formule empiriques				keine	0%
		Largeur HQ2 HQ5	Pondération		
3a.	Parker	160 m	Pas de valeurs, méthode uniquement utilisée à des fins de vérification		
3b.	Parker + morphologie	192 m			
3c.	Yalin	109 m			
3d.	Ikeda	277 m			
3e.	Ashmore	195 m			
3f.	Millar 2005	216 m			
Largeure du fond du lit résultante (arrondie)				200 m	

Cartes historiques

En sa qualité de première carte à l'échelle, la carte Michaelis (1:25'000) bénéficie d'une pondération de 40%. En raison de sa petite échelle (1:100'000), la carte Dufour ne bénéficie que de 20 % alors que la carte Siegfried (1:25'000) obtient une pondération de 40 %. Quelques stabilisations des berges (éperons) qui réduisent légèrement la largeur du lit sont visibles sur la carte Siegfried. Les largeurs mesurées sur les cartes atteignent au maximum 480 m.

Dans le présent exemple, le style fluvial était celui d'un cours d'eau sinueux à îlots et bancs. Si l'on souhaite, par une revitalisation, retrouver un état proche de l'état naturel, il convient de tenir compte de la largeur des îles en plus de celle du fond. La largeur moyenne de l'Aar avec ses îles boisées était d'environ 250 m à Wildeg-Brugg.

Formules empiriques

Les largeurs calculées avec les formules empiriques allaient de 109 m à 322 m. Cette forte disparité trahit le fort degré d'incertitude inhérent à ces méthodes. L'application de la formule de Parker corrigée d'un facteur lié à la morphologie livre une largeur de 192 m (HQ₂) à 206 m (HQ₅), ce qui est du même ordre de grandeur que la largeur obtenue avec les cartes historiques.

Largeur naturelle du fond du lit

Avec la pondération recommandée, la valeur obtenue pour **la largeur naturelle du fond du lit est de 200 m.**

Exemples d'application

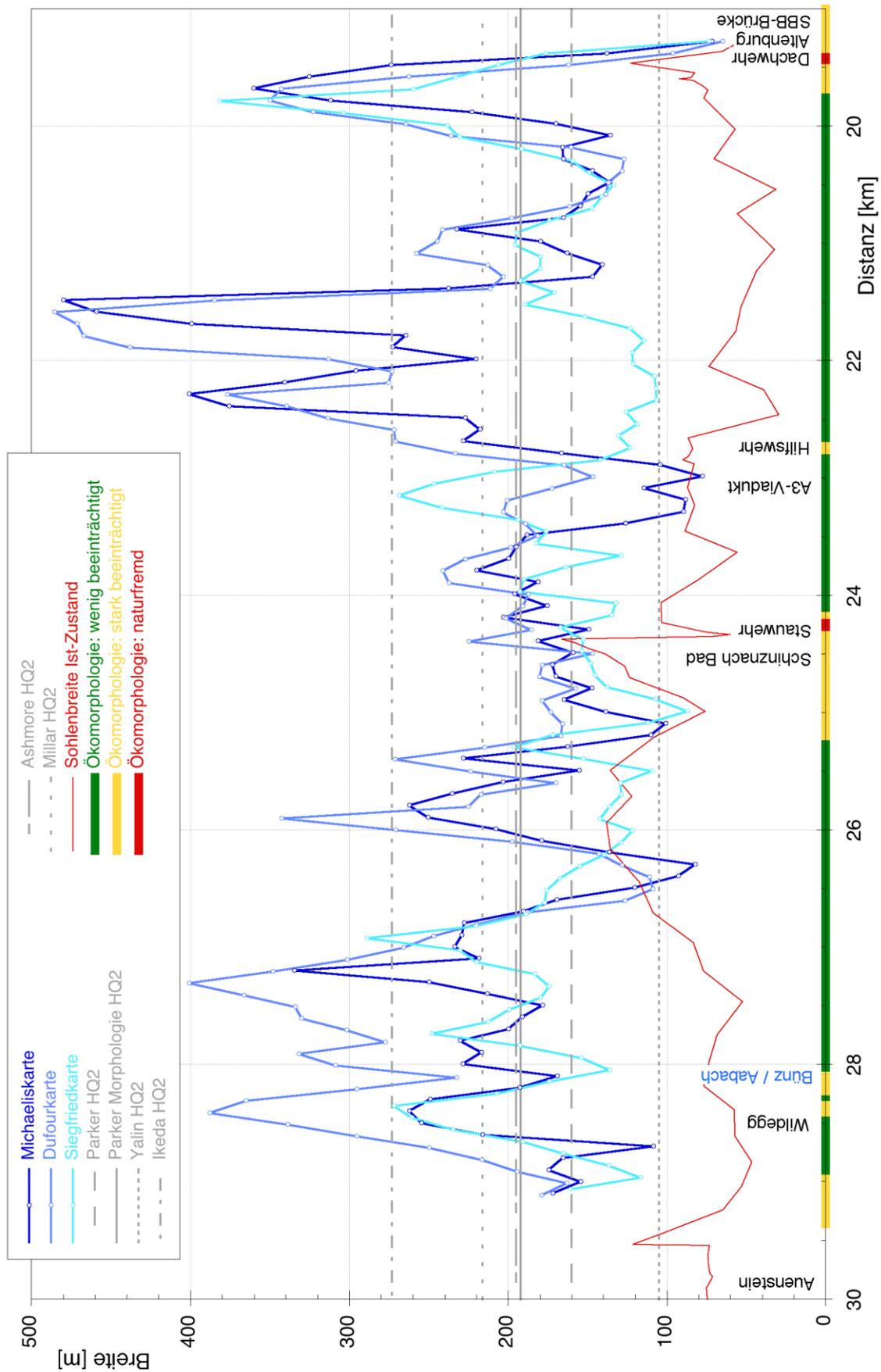


Fig. 27 L'Aar entre les km 30 et 19 du système GEWISS. Profil en long des largeurs selon les cartes historiques, selon différentes formules empiriques et en l'état actuel.

Exemples d'application



Fig. 28 *L'Aar. Vue vers l'aval sur le pont de Schinznach Dorf - Schinznach Bad (km 25,1).
Zone de retenue peu structurée à faible vitesse d'écoulement (2015).*

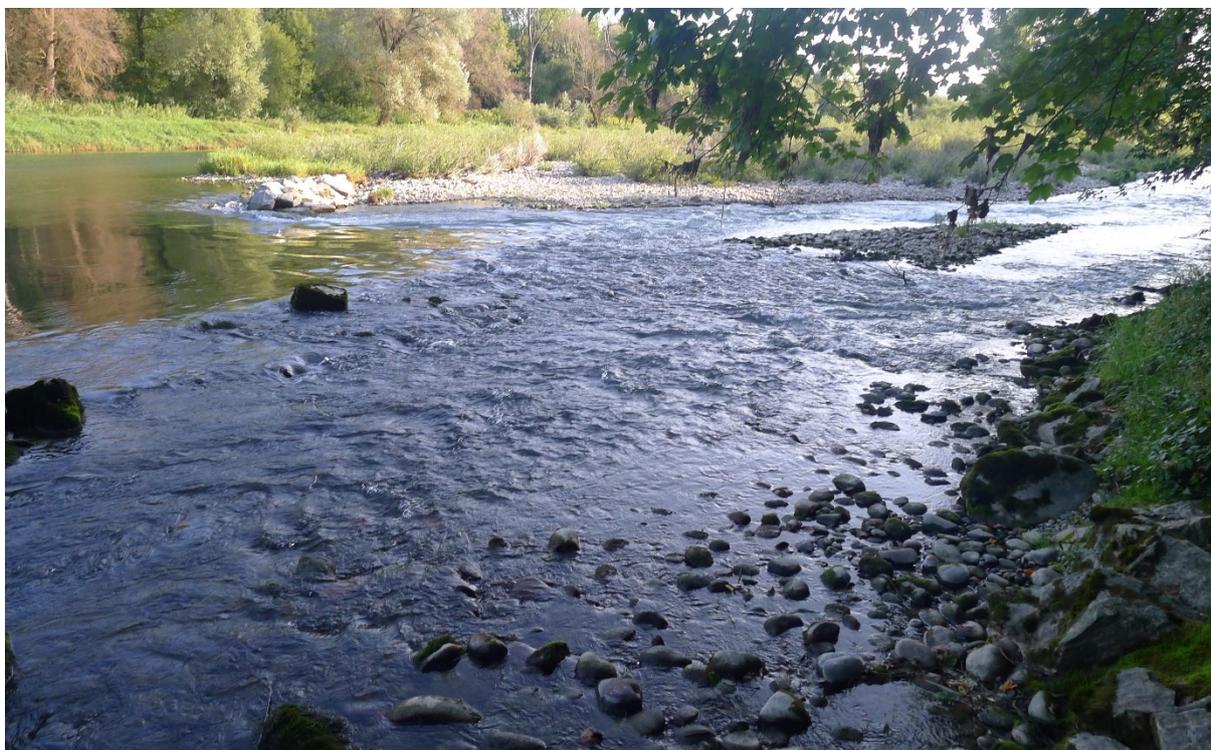


Fig. 29 *Tronçon de l'Aar à débit résiduel en aval du barrage auxiliaire (km 22,0) : structure
diversifiée et berges stabilisées (2015).*

Exemples d'application

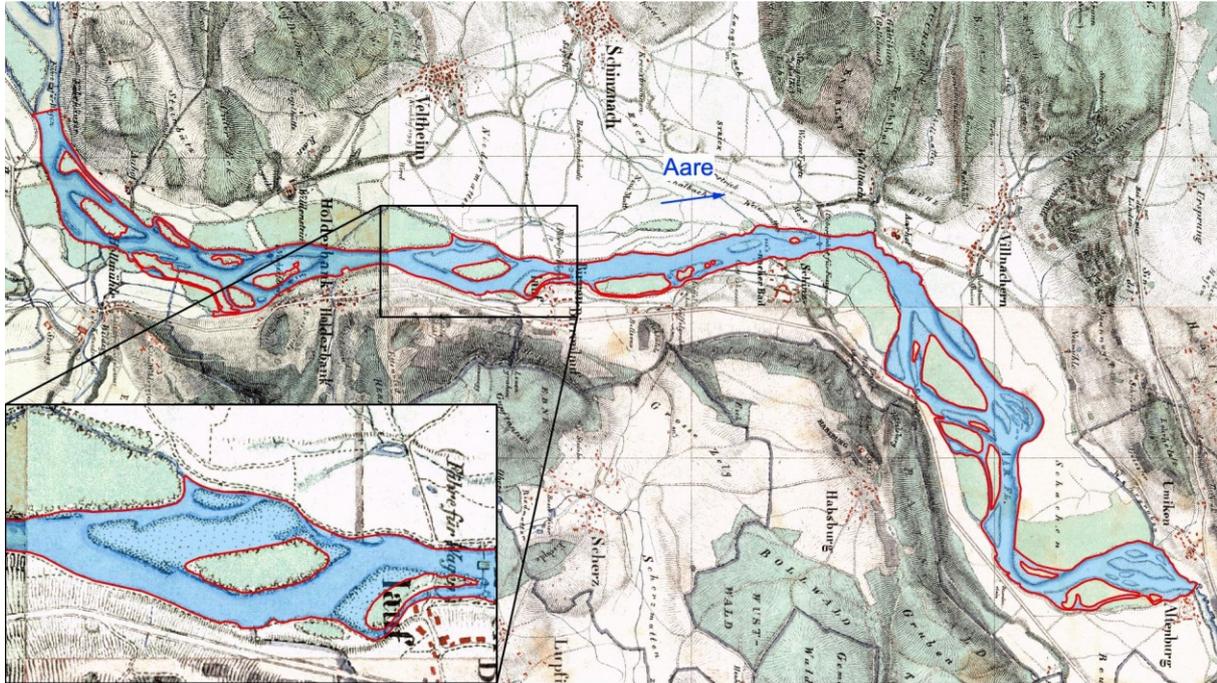


Fig. 30 Carte Michaelis (1843). L'Aar d'Auenstein à Brugg avec la zone mesurée par planimétrie (délimitée en rouge). Représentation au 1:50'000, détail au 1:20'000.

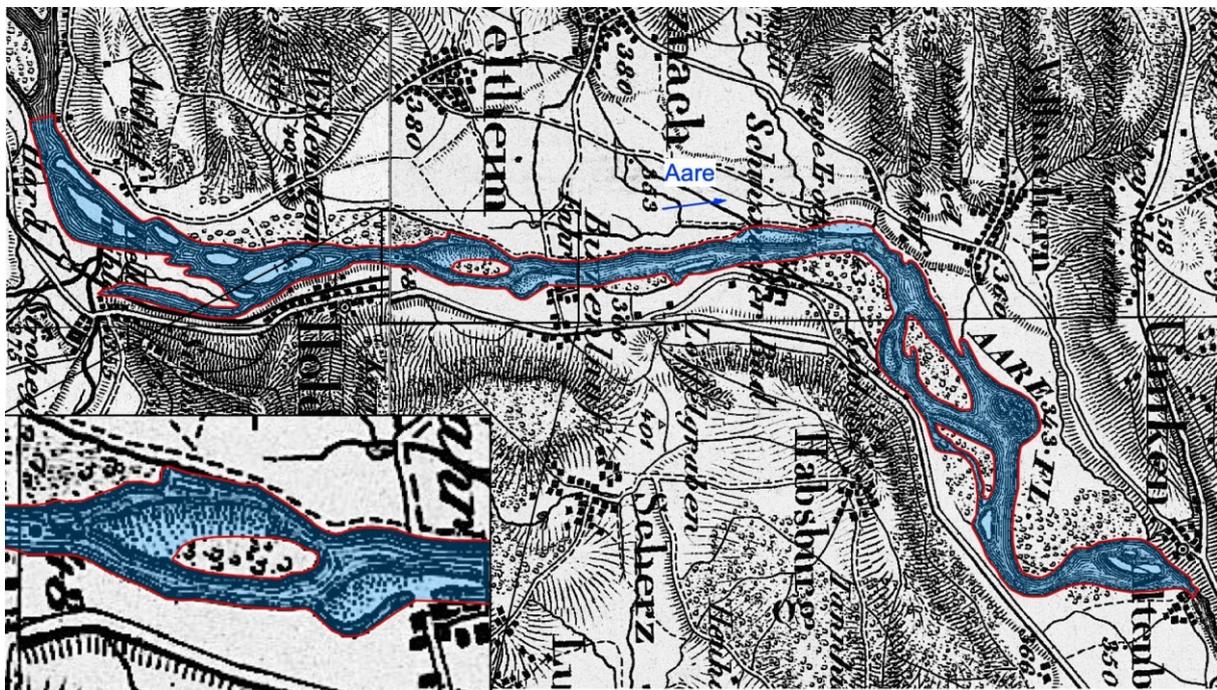


Fig. 31 Carte Dufour, première édition (1849-1861). L'Aar d'Auenstein à Brugg avec la zone mesurée par planimétrie (délimitée en rouge). Représentation au 1:50'000, détail au 1:20'000.

Exemples d'application

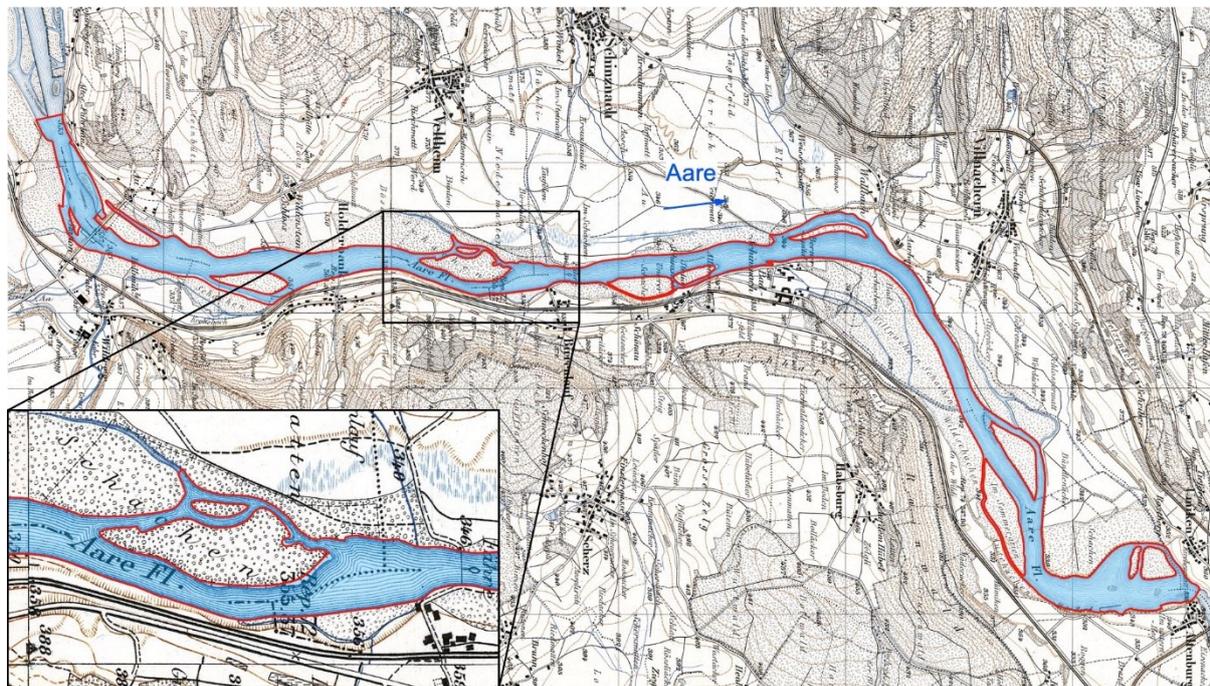


Fig. 32 Carte Siegfried, première édition (1872-1882). L'Aar d'Auenstein à Brugg avec la zone mesurée par planimétrie (délimitée en rouge). Représentation au 1:50'000, détail au 1:20'000.

8.2.4 Régimes hydrologique et sédimentaire modifiés

8.2.4.1 Régime hydrologique

Valeur réduite du débit morphogène HQ₂

Sous l'effet de la centrale à dérivation de Wildegg-Brugg, le débit morphogène HQ₂ est modifié dans le tronçon à débit résiduel. Le débit de dimensionnement de la centrale est de 420 m³/s. En situation de crue, le niveau de l'eau augmente en aval, si bien que la quantité d'eau pouvant être turbinée diminue. Pour les présents calculs, on peut considérer qu'au débit HQ₂, la centrale turbine encore 400 m³/s.

Lorsque le débit morphogène est réduit, le cours d'eau et donc la largeur du fond du lit doivent être redimensionnés. De même, la quantité de matériaux pouvant être charriés par le nouveau débit est plus faible. Les valeurs de la largeur et du charriage revues à la baisse sont calculées selon les principes présentés au chapitre 7.2. Les résultats sont les suivants :

Valeurs réduites de la largeur du fond du lit et du charriage

	État de référence	Nouveau régime hydro
HQ ₂	920 m ³ /s	520 m ³ /s
Largeur du fond	200 m	150 m
Charriage	11'000 m ³ /an	6'200 m ³ /an

Exemples d'application

Dans le tronçon à débit résiduel, la largeur du fond du lit à prendre en compte passe de 200 m (état de référence) à 150 m (régime hydrologique modifié).

Dans les cours d'eau modestes, la capacité de transport de la charge de fond diminue. Pour qu'une morphologie comparable se mette en place, il convient d'apporter 6'200 m³/an de matériaux au tronçon.

8.2.4.2 Charriage

Valeur réduite de la charge de fond

À l'état de référence, l'Aar transportait en moyenne près de 11'000 m³/an de matériaux charriés dans le tronçon Wildegg-Brugg. Suite à l'extraction de gravier et l'exploitation hydroélectrique, le régime de charriage a été profondément modifié. La planification stratégique propose des mesures visant à relever la charge de fond à 5'000 m³/an en moyenne.

Dans le tronçon à débit résiduel, la charge réduite à 5'000 m³/an par rapport à la valeur ciblée de 6'200 m³/an dans le contexte du nouveau hydrologique induit une réduction supplémentaire de la largeur à prendre en compte. Les calculs ont été effectués selon les principes du chapitre 7.2.

Valeur réduite de la largeur du fond du lit suite à la modification des régimes hydrologique et de charriage

	Régime hydrologique modifié	Régime hydrologique et régime de charriage modifiés
Largeur du fond	150 m	130 m
Charriage	6'200 m ³ /an	5'000 m ³ /an

Dans le nouveau contexte hydrologique et sédimentaire, **la largeur moyenne du fond du lit** à prendre en compte dans le tronçon à débit résiduel est **d'environ 130 m**.

Exemples d'application

8.3 Exemple de la Thur à Wattwil (canton de Saint-Gall)

Cet exemple présente la détermination de la largeur naturelle du fond du lit de la Thur à Wattwil, dans le canton de Saint-Gall, entre les km 41,7 et 34,8 du système GEWISS (voir Fig. 33).

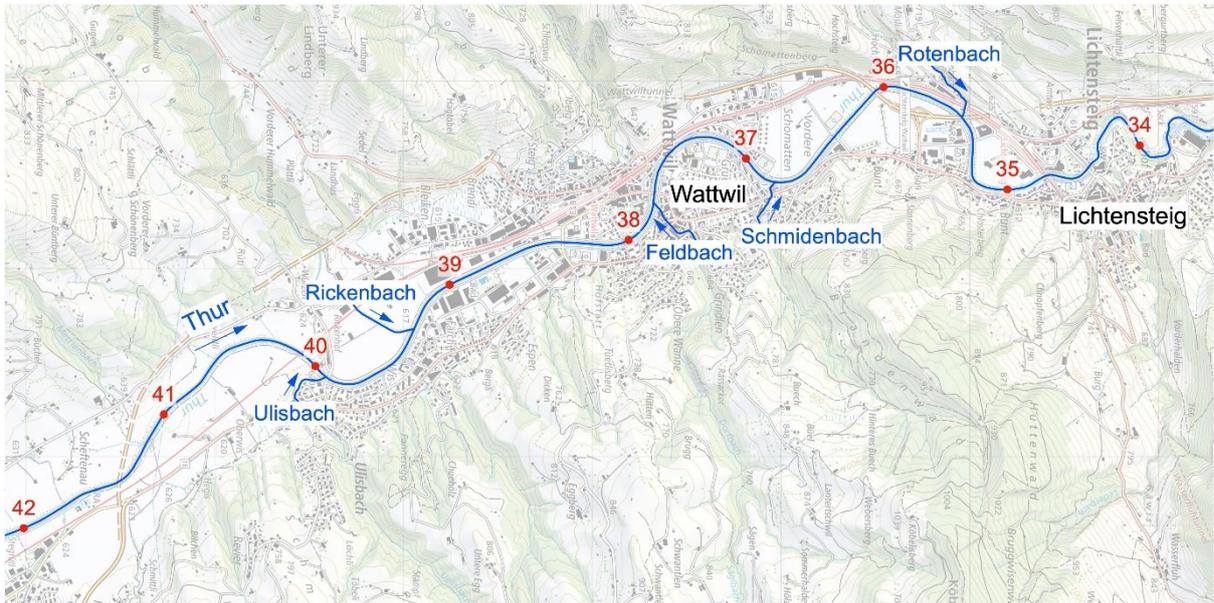


Fig. 33 Localisation du périmètre d'étude sur la Thur à Wattwil (GEWISS km 41,7 – 34,8), échelle 1:40'000.

8.3.1 État actuel

Bassin versant

Dans le périmètre d'étude, le bassin versant de la Thur voit sa surface passer de 215 km² à 260 km².

Style fluvial

Dans le périmètre d'étude, la Thur traverse des alluvions récentes limitées latéralement par des cônes de déjection et les versants de la vallée. À l'état de référence, la Thur présentait un cours sinueux (méandres) à bancs migrant lentement au gré des crues. Aujourd'hui, le tracé est sinueux à linéaire et le lit confiné dans un chenal rétréci.

Charriage

À Wattwil, la Thur présente un charriage moyen. La charge de fond est assez naturelle et le régime de charriage n'est pas significativement perturbé.

État du lit

Depuis le rétrécissement et la canalisation du lit, la Thur s'est enfoncée de jusqu'à 2 m dans les alluvions. Localement, cela a fait affleurer les limons sous-jacents. Le fond, majoritairement plat et très peu structuré, présente une largeur assez uniforme. (Fig. 35). De petits bancs de sédiments se sont formés localement au niveau des rives convexes (Fig. 44). Les berges sont pentues et étroites en raison du creusement du lit.

Exemples d'application

8.3.2 Bases et méthodologie de la détermination de la largeur du fond du lit

Le tableau suivant précise les cartes historiques, le tronçon comparable proche de l'état naturel et les formules empiriques utilisés ainsi que les paramètres pris en compte.

Sur les cartes historiques, la largeur dynamique a été déterminée par planimétrie⁶ ainsi qu'en calculant la moyenne des largeurs de profils en travers distants de 100 m. Les deux approches ont livré des résultats quasiment identiques.

Un tronçon non aménagé situé en aval de Lichtensteig (méandre de vallée) a été choisi comme tronçon naturel de référence. Ce secteur présente des bancs de gravier et une grande variabilité de largeur. La roche affleure localement sur les berges, ce qui limite le déploiement spontané de la rivière.

Dans l'approche empirique, cinq méthodes ont été considérées. En complément, dans la formule de Parker, la largeur a été multipliée par un facteur relatif au style fluvial. Pour les cours d'eau sinueux à bancs, ce facteur est compris entre 0,45 et 0,9 (la valeur de 0,7 a été choisie).

⁶ Largeur moyenne = (superficie de la zone représentée sous eau sans les bancs de gravier) / longueur du linéaire.

Exemples d'application

1 Documents historiques						
	Base	Exploitation cf.	Largeur dynamique Profils	Planimétrie	Forme du lit	Influence anthropogène
1a.	Carte Eschmann (1850)	fig 37, et 34	43 m	44 m	Sinueux avec banques et une île	Aménagement locaux au niveau des ponts et une prise d'eau
1b.	Carte Siegfried (1879)	fig. 38 et 34	46 m	46 m		
2 Tronçons de référence naturels						
	Section	Exploitation cf.:	Largeur dynamique Profils	Planimétrie	Forme du lit	Influence anthropogène
2a.	en aval de Lichtsteig	fig 39	30-60 m, moyenne	40 m	Lit sinueux avec bancs	État quasiment naturel, déploiment localement limité par des roches.
3 Formule empiriques						
	Méthode	Exploitation cf.	Grandeur décisive	Largeur HQ2	Largeur HQ5	
3a.	Parker	fig.34	Largeur du lit	60 - 62 m	70 - 72 m	
3b.	Parker + morphologie	fig.34	Largeur du lit	42 - 43 m	49 - 50 m	
3c.	Yalin	fig.34	Largeur du lit	41 - 43 m	48 - 49 m	
3d.	Ikeda	fig.34	Largeur du lit	42 - 43 m	44 - 69 m	
3e.	Ashmore	fig.34	Largeur du lit	43 - 43 m	45 - 69 m	
3f.	Millar 2005	fig.34	Largeur du lit	44 - 43 m	46 - 69 m	
4 Paramètres						
	Grandeur	Valeur				
4a.	Débit HQ2	151-180 m ³ /s				
4b.	Débit HQ5	202-240 m ³ /s				
4c.	Pente	2-3,5‰				
4d.	diamètre des grins d50	4 - 5 cm				
4e.	diamètre des grins d90	15 - 18 cm				
4f.	μ (pour formule Millar)	1.00				

Exemples d'application

8.3.3 Pondération et largeur naturelle du fond du lit

Le tableau suivant présente les largeurs déterminées à partir des différentes bases et la pondération choisie.

				Largeur pondéré (arrondie)	Pondération de la Méthode
1 Documents historiques				45 m	100%
	Base	Largeur	Pondération		
1a.	Carte Eschmann (1850)	44 m	50%		
1b.	Carte Siegfried (1879)	46 m	50%		
2 Tronçons de référence naturels				40 m	0%
2a.	en aval de Lichtsteig	40 m	100%		
3 Formule empiriques				keine	0%
		Largeur HQ2 HQ5	Pondération		
3a.	Parker	61 m / 71 m	Pas de valeurs, méthode uniquement utilisée à des fins de vérification		
3b.	Parker + morphologie	43 m / 49 m			
3c.	Yalin	42 m / 48 m			
3d.	Ikeda	44 m / 56 m			
3e.	Ashmore	58 m / 63 m			
3f.	Millar 2005	66 m / 80 m			
Largeure du fond du lit résultante (arrondie)				45 m	

Cartes historiques

Les cartes Eschmann et Siegfried ont été établies à l'échelle 1:25'000. Elles montrent à peu près le même tracé de la Thur. Sur la carte Siegfried, une zone d'érosion de la berge accompagnée d'un élargissement substantiel du lit est reconnaissable à hauteur de Stegrüti. La largeur dynamique oscille entre 30 et 70 m (voire 125 m à Stegrüti, carte Siegfried). La largeur moyenne est de 45m. Dans les 25 ans qui séparent la parution des deux cartes, l'habitat humain s'est considérablement développé et une voie ferrée a été construite. Malgré cette évolution, les deux cartes font état de la même largeur moyenne. Il est donc justifié de les pondérer chacune de 50 %.

Tronçon comparable proche de l'état naturel

Le tronçon comparable proche de l'état naturel présente une largeur dynamique allant de 30 à 60 m avec une moyenne de 40 m. sa largeur moyenne est donc légèrement inférieure à celle indiquée par les cartes historiques. En raison de la morphologie différente de celle du tronçon concerné par le projet (méandre de vallée), cette valeur n'est pas prise en compte.

Formules empiriques

Les formules empiriques livrent des largeurs de 42 à 80 m. Les valeurs sont, dans leur majorité, supérieures à celles mesurées sur les cartes. La forte disparité trahit le fort degré d'incertitude inhérent à ces méthodes.

Exemples d'application

L'application de la formule de Parker corrigée d'un facteur lié à la morphologie livre une largeur de 43 m (HQ₂) à 49 m (HQ₅), ce qui est du même ordre de grandeur que la largeur obtenue avec les cartes historiques.

Largeur naturelle du fond du lit

Avec la pondération recommandée, la valeur obtenue pour **la largeur naturelle du fond du lit est de 45m.**

Exemples d'application

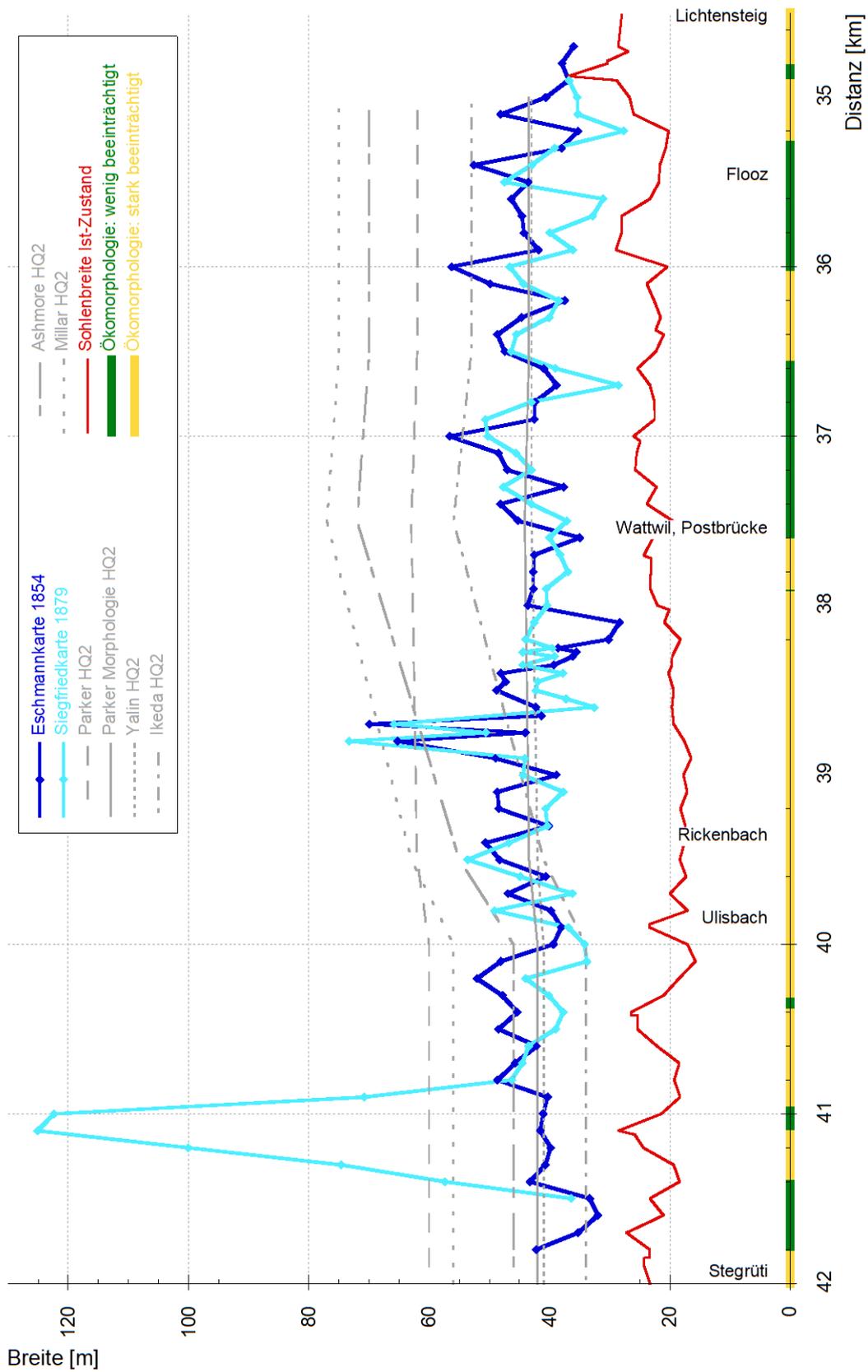


Fig. 34 La Thur entre les km 42 et 34,5 du système GEWISS. Profil en long des largeurs selon les cartes historiques, selon différentes formules empiriques et en l'état actuel. Dans les méthodes empiriques, la modification de la largeur en progressant vers l'aval est due à l'augmentation du débit.

Exemples d'application



Fig. 35 La Thur vue du pont de la Waisenhausstrasse (GEWISS km 39.9) vers l'aval : le fond du lit est étroit et dégagé et les berges sont abruptes et peu structurées (2015).



Fig. 36 La Thur entre le rocher en rive concave et un banc de gravier en rive convexe (GEWISS km 35.9). Vue vers l'aval (2015).

Exemples d'application

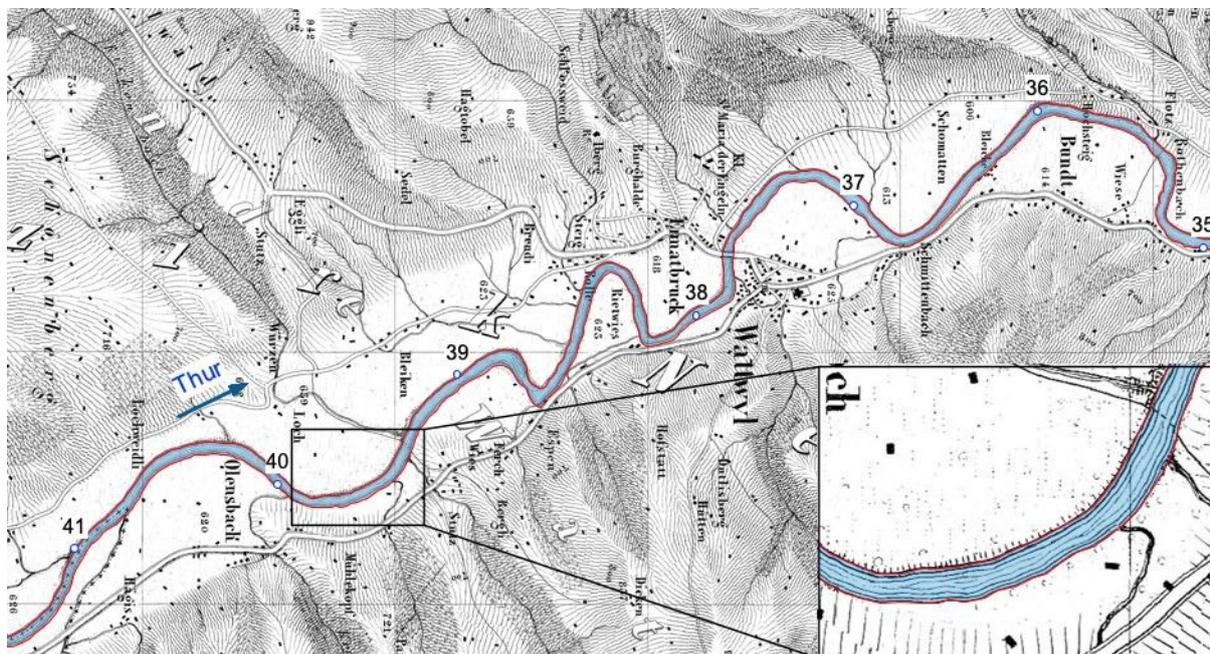


Fig. 37 Carte Eschmann (1854). La Thur entre Stegrüti (Ebnat-Kappel) et Lichtensteig avec le lit mesuré par planimétrie (délimité en rouge). Représentation au 1:30'000, détail au 1:10'000.

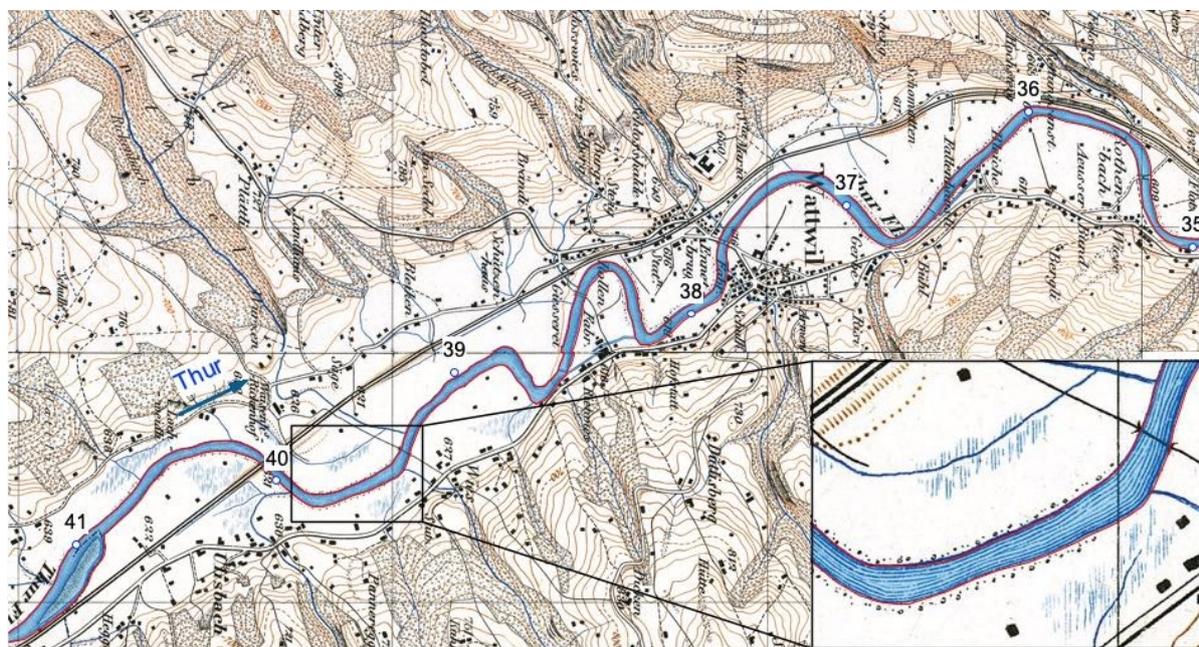


Fig. 38 Carte Siegfried, première édition (1879). La Thur entre Stegrüti (Ebnat-Kappel) et Lichtensteig avec le lit mesuré par planimétrie (délimité en rouge). Représentation au 1:30'000, détail au 1:10'000.

Exemples d'application



Fig. 39 La Thur à Lichtensteig avec deux tronçons comparable. A : superficie du fond du lit (zone dynamique) ; L : longueur du tronçon ; ØB : largeur moyenne du fond. Les deux tronçons sont séparés par un rétrécissement naturel (rocher).

Exemples d'application

8.4 Sitter (canton de Thurgovie)

Cet exemple présente la détermination de la largeur naturelle du fond du lit de la Sitter à la frontière entre les cantons de Thurgovie et de Saint-Gall, entre les km 6,6 et 8,6 du système GEWISS (voir Fig. 40).

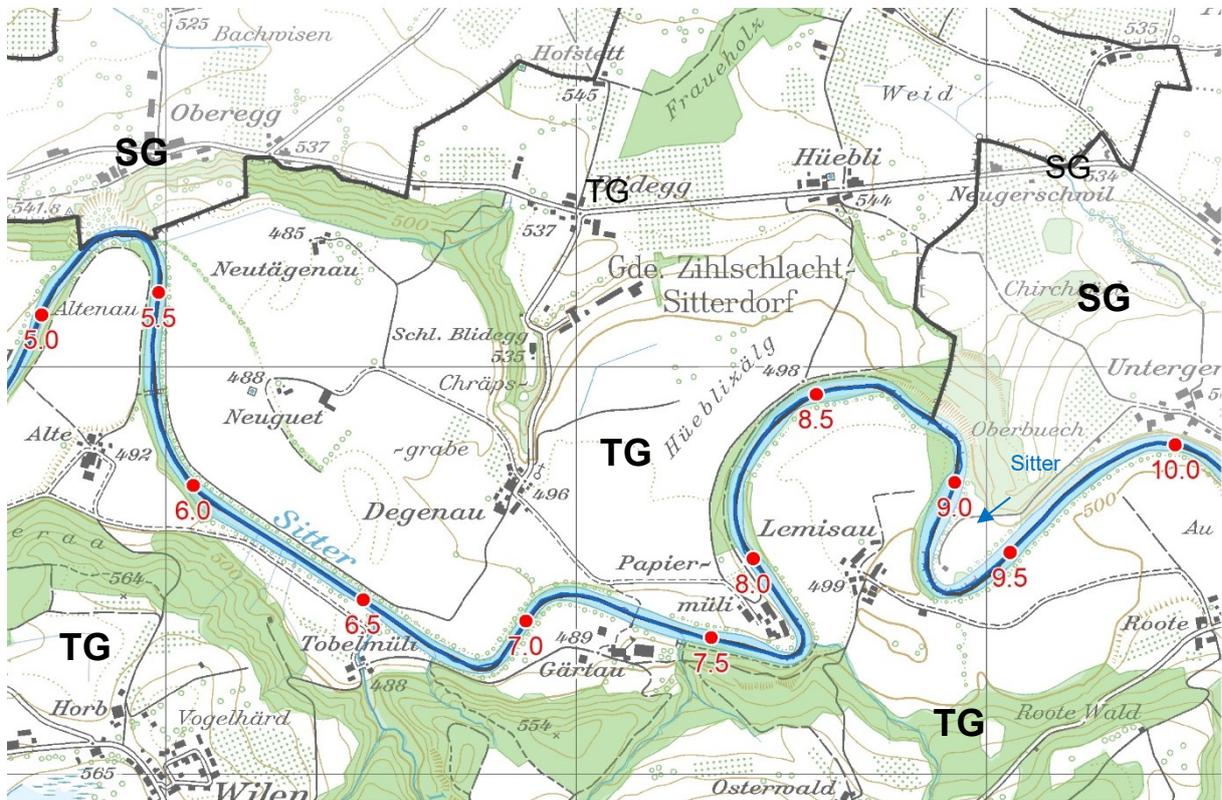


Fig. 40 Localisation du périmètre d'étude sur la Sitter (GEWISS km 6.6 – 8.6)

8.4.1 État actuel

Bassin versant

Dans le périmètre d'étude, le bassin versant de la Sitter a une superficie d'environ 300 km².

Style fluvial

Dans le périmètre d'étude, la Sitter traverse un paysage agricole dégagé ponctué, par endroits, de quelques hameaux, bois et bosquets. Le tracé est sinueux avec une tendance à développer des méandres. Le fond du lit a actuellement une largeur moyenne de 31 m.

État du lit

En raison des digues longitudinales existantes, le cours d'eau présente une faible variabilité de largeur. Le lit présente toutefois de nettes successions de bancs et de fosses. Dans le périmètre d'étude, aucune végétation n'est identifiable sur les bancs de gravier (Fig. 43, Fig. 44).

Exemples d'application

8.4.2 Bases et méthodes de la détermination de la largeur du fond du lit

1 Documents historiques						
Section	Largeur du lit	Largeur des berges	Largeur du fond	Forme du lit	Influence anthropique	
1a. Sulzbergerkarte (1836)	70 m	2 x 4 m	62 m	Sinueux ou à méandres avec quelques ramifications, tronçon trop court pour déterminer le style fluvial avec certitude	Stabilisation de la berge gauche par endroits, écomorphologie qualifiée de naturelle / proche de la nature selon le module SMG niveau R	
1b. Dufourkarte (1844)	95 m	2 x 4 m	87 m			
1c. Eschmannkarte (1850)	70 m	2 x 4 m	62 m			
2 Tronçons de référence naturels						
Section	Largeur du lit	Largeur des berges	Largeur du fond	Forme du lit	Influence anthropique	
2a. km TG 8.8 - 9.2	45 m	2 x 4 m	37 m	Sinueux ou à méandres avec quelques ramifications, tronçon trop court pour déterminer le style fluvial avec certitude	Stabilisation de la berge gauche par endroits, écomorphologie qualifiée de naturelle / proche de la nature selon le module SMG niveau R	
3 Analyse de la topographie						
Base	Dépouillement					
3a. Swisssalti 3D de 2019 Maillage 50 cm	Aucun bras mort suffisamment bien préservé n'est observable dans le périmètre d'étude pour déterminer la largeur naturelle du fond du lit.	La topographie suggère qu'il s'agit à l'état naturel d'un cours d'eau tendant à former des méandres. Le tracé actuel correspond encore à ce style fluvial.				
4 Formules empiriques						
Méthode	Formule	Largeur du fond		Paramètres		
4a. Largeur d'équilibre selon Yalin	$L = 1.5 Q^{0.5} / dm^{0.25}$	46 m		Q = 285 m ³ /s, dm = 0.09 m		
4b. Largeur limite selon Ashmore	$L = 0.0098 (p_w g Q J)^{0.777} / dm^{0.7}$	74 m		Q = 285 m ³ /s, J = 0.004 m/m, dm = 0.09 m		
4c. Largeur limite selon Millar	$L = 16.5 Q^{*0.7} J^{0.6} \mu^{1.1} dm$ mit $Q^* = Q / ((s-1) g dm)^{0.5} dm^2$	46 m		Q = 285 m ³ /s, J = 0.004 m/m, $\mu = 1.5$, dm = 0.09 m, s = 2.65		

Exemples d'application

8.4.3 Pondération

Tableau de pondération

Le tableau suivant présente les largeurs déterminées à partir des différentes bases et la pondération choisie. Dans le périmètre d'étude, la largeur naturelle du fond de la Sitter ainsi déterminée est de 60 m.

	Largeur pondérée	Pondération de la méthode
1. Documents historiques	62 m	100 %
	Largeur	Pondération
1a. Sulzbergerkarte (1836)	62 m	50 %
1b. Dufourkarte (1844)	87 m	0 %
1c. Eschmannkarte (1850)	62 m	50 %
2. Tronçons de référence naturels	37 m	0 %
	Largeur	Pondération
2a. GEWISS km 8.8 - 9.2	37 m	100 %
3. Analyses de la topographie	-	0 %
4. Formules empiriques	Néant	0 %
	Largeur	Pondération
4a. Lpb érosion primaire selon Yalin	46 m	Pas de valeurs, méthode uniquement utilisée à des fins de vérification
4b. Lpb érosion secondaire selon Ashmore	74 m	
4c. Lpb érosion secondaire selon Millar	46 m	
Largeur du fond du lit résultante (arrondie)		60 m

Justification de la pondération choisie :

Documents historiques

La carte Dufour a été établie au 1:100'000 ; elle est donc plus grossière que celles d'Eschmann et de Sulzberger (toutes deux au 1:25'000) et comporte beaucoup moins de détails. Il a donc été décidé de n'accorder aucun poids (pondération 0%) à la carte Dufour. Les cartes de Sulzberger et d'Eschmann sont toute deux beaucoup plus précises que la carte Dufour. Ces deux cartes manquent toutefois d'indications géomorphologiques, notamment sur la présence de bancs de gravier ou la structure des berges. On peut donc supposer que la totalité du lit a été consignée comme surface mouillée. La largeur pleins bords mesurée correspond alors à la largeur du lit. De même, les cartes n'indiquent pas d'ouvrages de consolidation des berges bien que leur présence soit très probable au vu de l'exploitation agricole des terres environnantes. La carte Sulzberger indique les surfaces boisées alors que celle d'Eschmann ne les représente pas. On ne dispose pour aucune des deux cartes d'informations sur les crues ou étiages importants survenus avant

Exemples d'application

leur établissement. Étant donné qu'elles présentent toutes deux une qualité comparable, une pondération de 50 % est accordée à chacune dans la catégorie des documents historiques.

Au vu des qualités des cartes Sulzberger et Eschmann, la méthode « documents historiques » est jugée pertinente pour déterminer la largeur naturelle du fond du lit. Comme le montrent les commentaires relatifs aux autres méthodes, cette approche offre les meilleures bases pour cette détermination. Un certain intérêt est également concédé à la méthode des tronçons comparables proche de l'état naturel. Étant donné, toutefois, qu'elle se réfère à un état plus fortement influencé par les activités anthropiques, elle est jugée moins pertinente que la méthode basée sur les documents historiques. Au terme de l'expertise, la méthode « documents historiques » est donc considérée comme seule pertinente et bénéficie d'une pondération de 100 %.

Tronçons comparables proche de l'état naturel

Le tronçon comparable proche de l'état naturel présente un milieu bien structuré avec des zones en cours de végétalisation au sein de l'espace disponible. Le fond du lit est toutefois limité latéralement par des ouvrages de stabilisation des berges ou, unilatéralement, par des talus naturellement escarpés. La largeur de fond observée est donc probablement plus faible que la largeur naturelle du fond du lit. Étant donné que les documents historiques offrent une base de qualité pour la détermination, la méthode des tronçons comparables proche de l'état naturel n'est pas retenue.

Analyse de la topographie

Aucun bras mort suffisamment bien préservé n'est observable dans le périmètre d'étude pour déterminer la largeur naturelle du fond du lit. La pondération accordée à cette méthode est donc de 0 %.

Formules empiriques

Étant donné que d'autres méthodes de bonne qualité sont disponibles, la méthode reposant sur les formules empiriques n'est pas considérée et reçoit une pondération de 0 %.

Exemples d'application

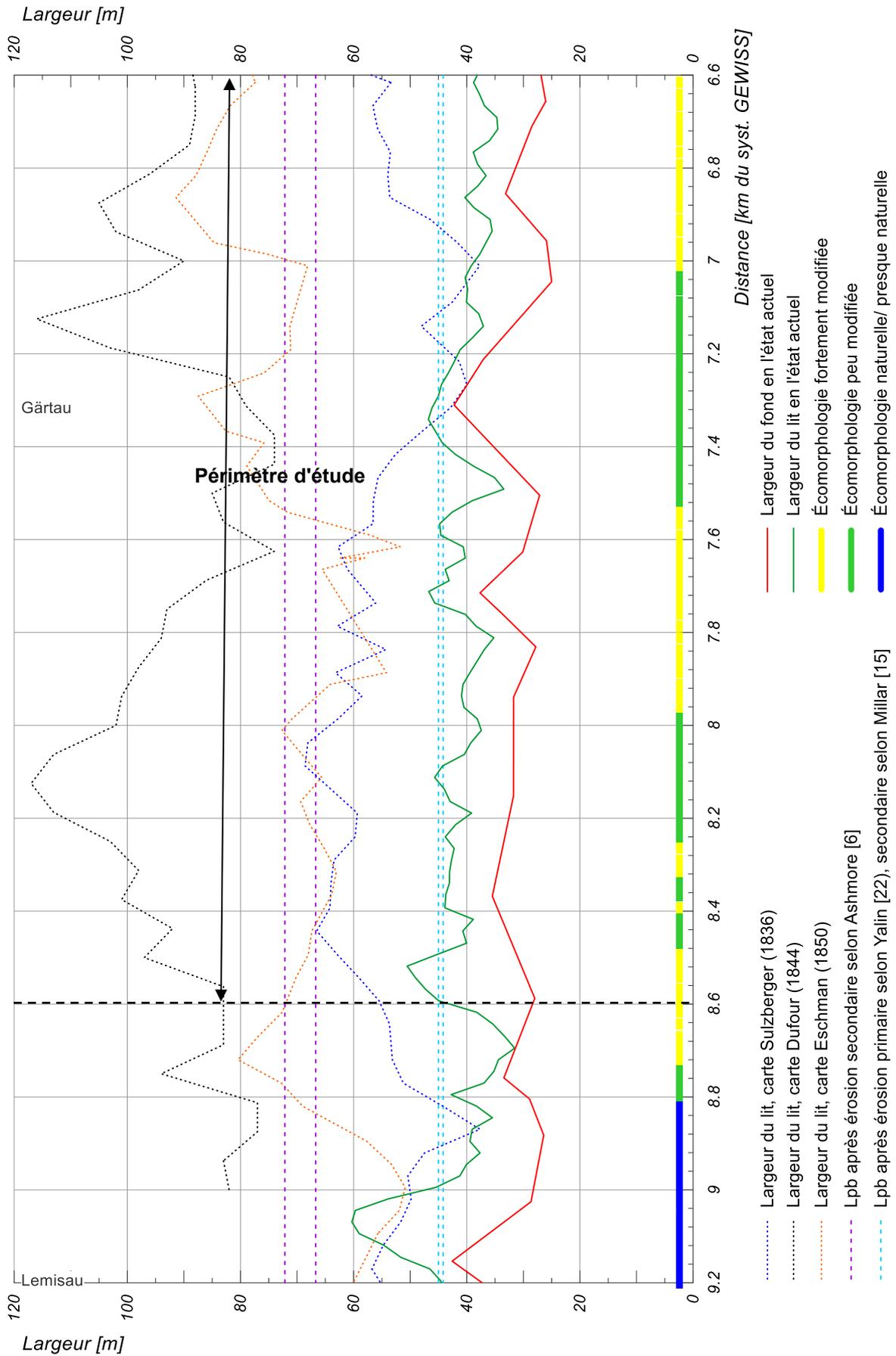


Fig. 41 La Sitter entre les km 6,6 et 9,2 du système GEWISS. Profil en long des largeurs déterminées

Exemples d'application

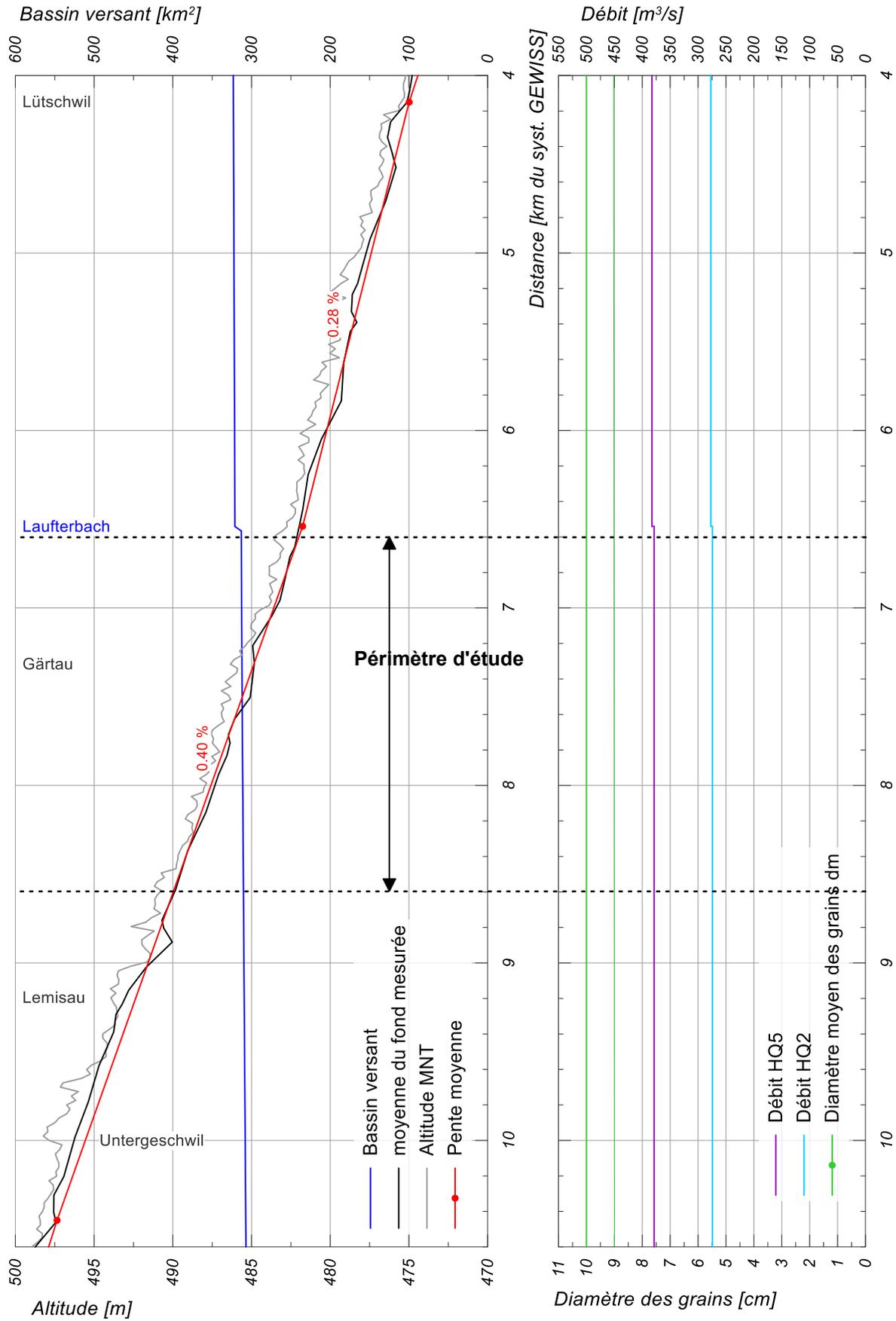


Fig. 42 La Sitter entre les km 4,0 et 10,6 du système GEWISS. Profil en long de divers paramètres

Exemples d'application



Fig. 43 La Sitter à Gertau au km 7.3, sens du courant de gauche à droite (11.05.2016, $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$)



Fig. 44 La Sitter à Gertau au km 7.2, vue vers l'aval (11.05.2016, $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$)

Exemples d'application

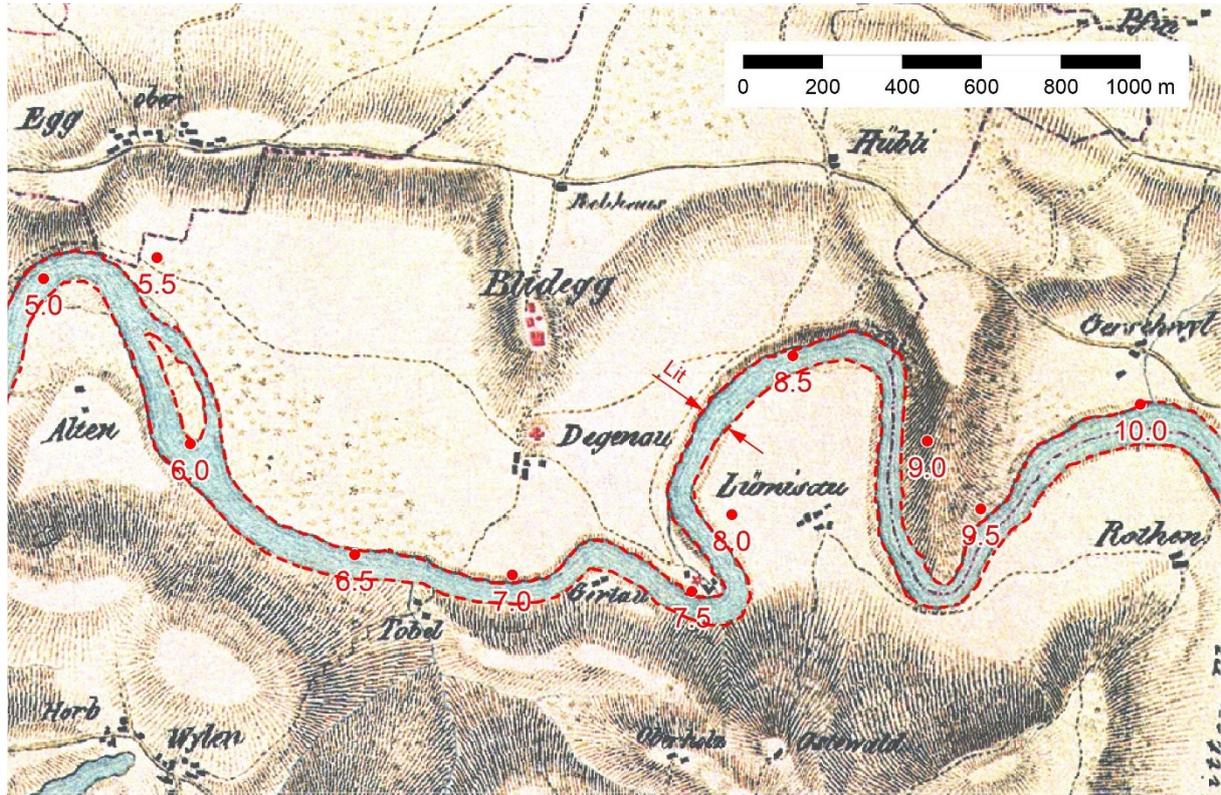


Fig. 45 Carte Sulzberger (1836) : la Sitter entre les km 5.0 et 10.0, délimité en rouge : largeur du lit

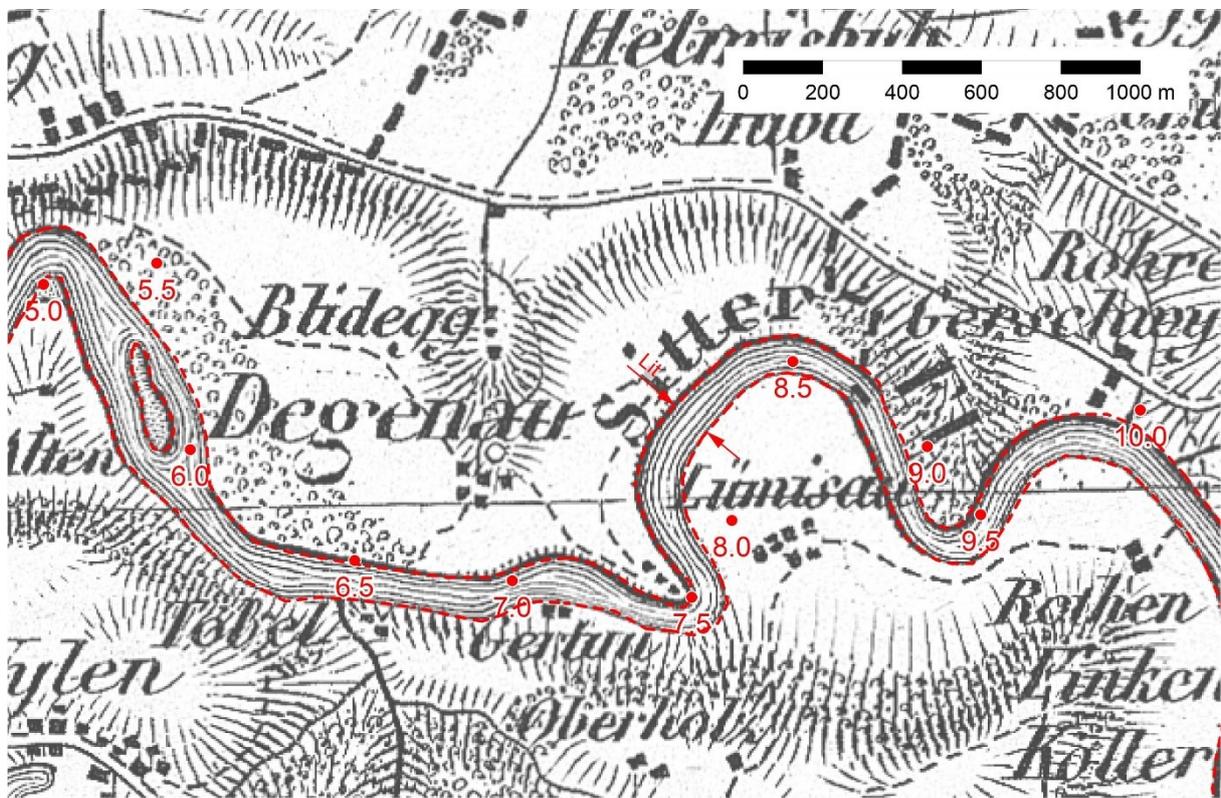


Fig. 46 Carte Dufour, première édition (1844) : la Sitter entre les km 5.0 et 10.0, délimité en rouge : largeur du lit

Exemples d'application

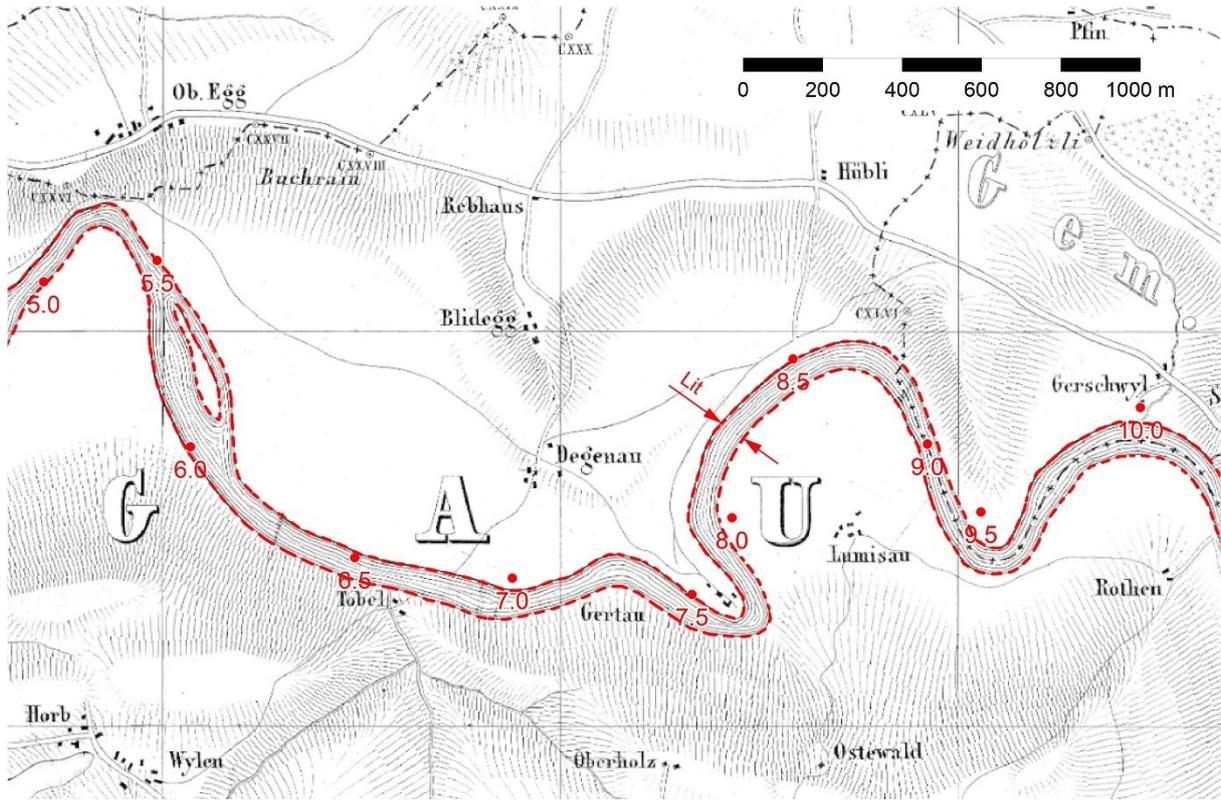


Fig. 47 Carte Eschmann (1850) : la Sitter entre les km 5.0 et 10.0, délimité en rouge : largeur du lit

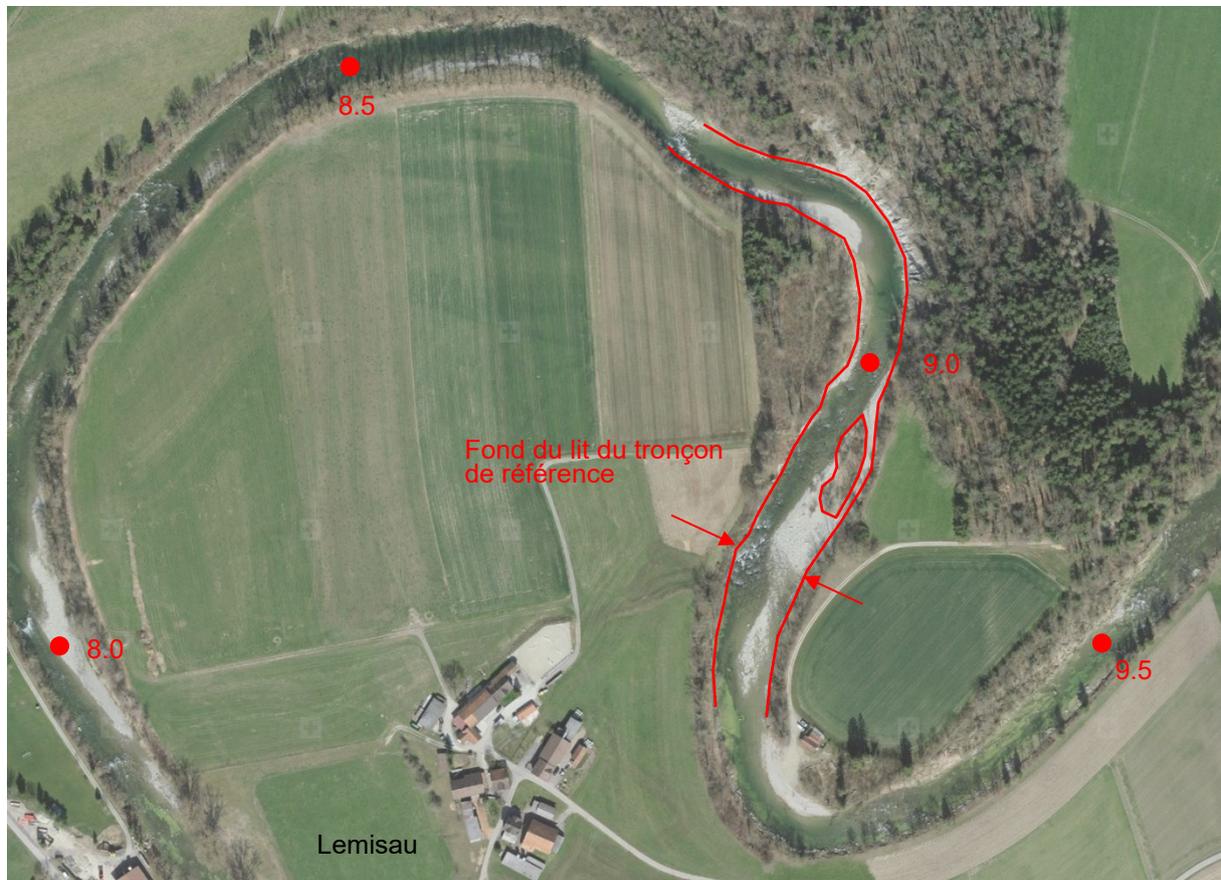


Fig. 48 Tronçon de comparable proche de l'état naturel (km 8.8 – 9.2)

9 Bibliographie

- [1] OFEV (1998) : Écomorphologie Niveau R. Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau selon le système modulaire gradué. Projet, Berne.
- [2] OFEV (2001) : Protection contre les crues des cours d'eau. Directives de l'OFEG (aujourd'hui OFEV), Berne
- [3] OFEV et EAWAG (2006) : Écomorphologie Niveau C (Cours d'eau). Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau selon le système modulaire gradué, Berne.
- [4] OFEV (2015) : Explications spécifiques sur la convention-programme dans le domaine de la revitalisation des eaux, Manuel sur les conventions-programmes 2016 – 2019 dans le domaine de l'environnement
- [5] Schälchli, U. & Hunzinger, L. (2021): Die erforderliche Geschiebefracht. Fachbericht zum Modul «Geschiebehalt – Massnahmen» der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Rapport rédigé sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement.
- [6] Hunzinger L., Schälchli U., Nitsche M., Kirchhofer A., Pfändler M., Roulier C., Rüesch T (Version préliminaire 21.9.2021): Régime de charriage – Mesures. Un module de l'aide à l'exécution Renaturation des eaux. Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique n° X:
- [7] Ashmore, P.E. (2001): Braiding phenomena: statics and kinetics. In: Gravel-Bed River V (Ed M.P. Mosley), pp. 95-120. New Zealand Hydrological Society, Wellington, New Zealand.
- [8] Bray, D.I. (1982): Regime equations for gravel-bed rivers. In: Gravel-Bed Rivers (Eds. R.D. Hey, J.C. Bathurst and C.R. Thorne), pp. 517-552. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, United Kingdom.
- [9] Fahnstock, R.K. (1963): Morphology and hydrology of a glacial stream - White River, Mount Rainer, Washington. U. S. Geological Survey Professional Paper, 422A.
- [10] Griffiths, G.A. (1981): Stable channel design in gravel-bed rivers. Journal of Hydrology, 52, 291-305.

Bibliographie

- [11] Henderson, F.M. (1966): Open channel flow. MacMillan Publishing, New York, 522 pp.
- [12] Hey, R.D, Thorne, C.R (1986): Stable Channels with Mobile Gravel Beds. *J. Hydraul. Eng.*, 112(8), 671-689
- [13] Ikeda, S. et al. (1988): Stable Width and Depth of Straight Gravel Rivers with Heterogeneous Bed Material. *Water Resources Research*, 24, 713-722
- [14] Meyer-Peter, E., Müller, R. (1948): Formulas for Bed-Load Transport, Second Meeting IAHR, Stockholm, 1948
- [15] Marti, C. (2006): Morphologie von verzweigten Gerinnen – Ansätze zur Abfluss-, Geschiebetransport- und Kolkiefenberechnung. Mitteilung Nr. 199, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich, Zürich, pp. 282.
- [16] Millar, R.G. (2005): Theoretical regime equations for mobile gravel-bed rivers with stable banks. *Geomorphology*, 64, 207-220.
- [17] Mosley, M.P. (1983): Response of braided rivers to changing discharge. *Journal of Hydrology*, 22(1), 18-67.
- [18] Paccaud, G. Roulier, Ch. (2016) : Espace nécessaire aux grands cours d'eau de Suisse, Service conseil Zones alluviales, Yverdon, 2016
- [19] Parker, G. (1979): Hydraulic geometry of active gravel rivers. *Journal of the Hydraulics Division*, 105(HY9), 1185-1201.
- [20] Requena, P. (2008): Seitenerosion in kiesführenden Flüssen, Prozessverständnis und quantitative Beschreibung. VAW Mitteilungen Nr. 210, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich, Zürich.
- [21] Rosgen, D.L. (1994): A classification of natural river. *Catena*, 22, 169-199.
- [22] Vischer, D.L. (2003): Die Geschichte des Hochwasserschutzes in der Schweiz
- [23] Yalin, M.S. (1992): *River Mechanics*. Pergamon Press, Oxford, 219 pp.
- [24] da Silva, A.M.A.F. (1991): Alternate bars and related alluvial processes, Queen's University, Kingston

Bibliographie

- [25] Ahmari H. & da Silva A.M.F. (2011): Regions of bars, meandering and braiding in da Silva and Yalin's plan. *Journal of Hydraulic Research*, 49:6, 718-727. <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.614518>.
- [26] Zarn, B. 1997): Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität, Mitteilung Nr. 154 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich
- [27] Zeller, J. (1962): Die «Regime-Theorie», eine Methode zur Bemessung stabiler Flussgerinne, *Schweizerische Bauzeitung*, Jahrgang 83, Heft 5, 1965

Annexes

Annexe A Formules empiriques

	Mode de détermination	Forme du lit	Largeur	Variables	Partie du fond considérée	Pente	Conforme aux dimensions	Système fluvial	Expérience d'utilisation
Parker (1979)	Divers cours d'eau de diverses études	Linéaire	Largeur pleins bords	Q, D_{50}	Sédiments de surface	Non indiqué	Oui	Non indiqué	Non indiqué
Ikeda et al. (1988)	Mathématique	Linéaire	Largeur du lit	$Q, D_{50}, D_{90}, J, h_{max}$	Sédiments de surface	Non indiqué	Non	Non indiqué	Non indiqué
Yalin (1992)	Mathématique	Linéaire	Largeur pleins bords	Q, D_m	Sédiments de surface ²	Non indiqué	Non	Non indiqué	Valeurs plausibles pour la largeur d'équilibre
Fahnestock (1963)	White River, avant-front du glacier du Mount Rainer, USA	Ramifié	Largeur du lit d'un chenal isolé	k.A.	Non indiqué	Non indiqué	Non	Non indiqué	Non indiqué
Henderson (1966)	Mathématique	Ramifié ¹	Largeur pleins bords	Q, D_{50}, J	Sédiments de surface ²	Variable dépendante	Non	A l'équilibre	Valeurs moyennes
Griffiths (1981)	Mathématique et observation de 60 rivières aux USA	Ramifié ¹	Mal défini	Q, D_{50}, J	Sédiments de surface	Variable dépendante	Non	Non indiqué	Valeurs élevées
Bray (1982)	70 tronçons de rivières à gravier en Alberta, Canada	Ramifié ¹	Mal défini	Q, D_{50}	Sédiments de surface	0,022 - 1,5 %	Oui	Non indiqué	Non indiqué
Mosley (1983)	3 cours d'eau en Nouvelle-Zélande (Ashley, Hurunui et Otago)	Ramifié	Largeur pleins bords	Q	Relation indépendante du diamètre des sédiments	0,6 et 0,42 %	Non	Non indiqué	Valeurs élevées
Hey, Thorne (1986)	62 cours d'eau en Grande-Bretagne	Ramifié ¹	Largeur pleins bords	$Q, Q_c, D_{50},$ végétation	Relation indépendante du diamètre des sédiments	Non indiqué	Non	A l'équilibre	Non indiqué
Ashmore (2001)	Modélisation	Ramifié	Largeur pleins bords, somme des largeurs des chenaux	Q, D_{50}, J	Sédiments de surface ²	1 et 1,5 %	Non	A l'équilibre	Valeurs moyennes
Millar (2005)	Mathématique	Ramifié ¹	Largeur pleins bords	Q, D_{50}, J, μ'	Sédiments de surface ²	Variable dépendante	Oui	A l'équilibre	Valeurs faibles
Largeur pleins bords après érosion primaire			Largeur pleins bords après érosion secondaire						

¹Les formules basées sur les largeurs de régime n'ont pas été explicitement développées pour les lits ramifiés. Elles ont toutefois été établies pour estimer la largeur des rivières à gravier après érosion secondaire et, d'après Marti [15], on peut donc supposer que les lits ramifiés ont été pris en compte.

²Aucune indication sur le type de sédiment pris en compte n'était fournie par la littérature. Étant donné que ces méthodes proviennent du monde anglophone, on peut supposer, d'après Marti [15], qu'elles se réfèrent à la granulométrie des sédiments de surface (couche de pavage).