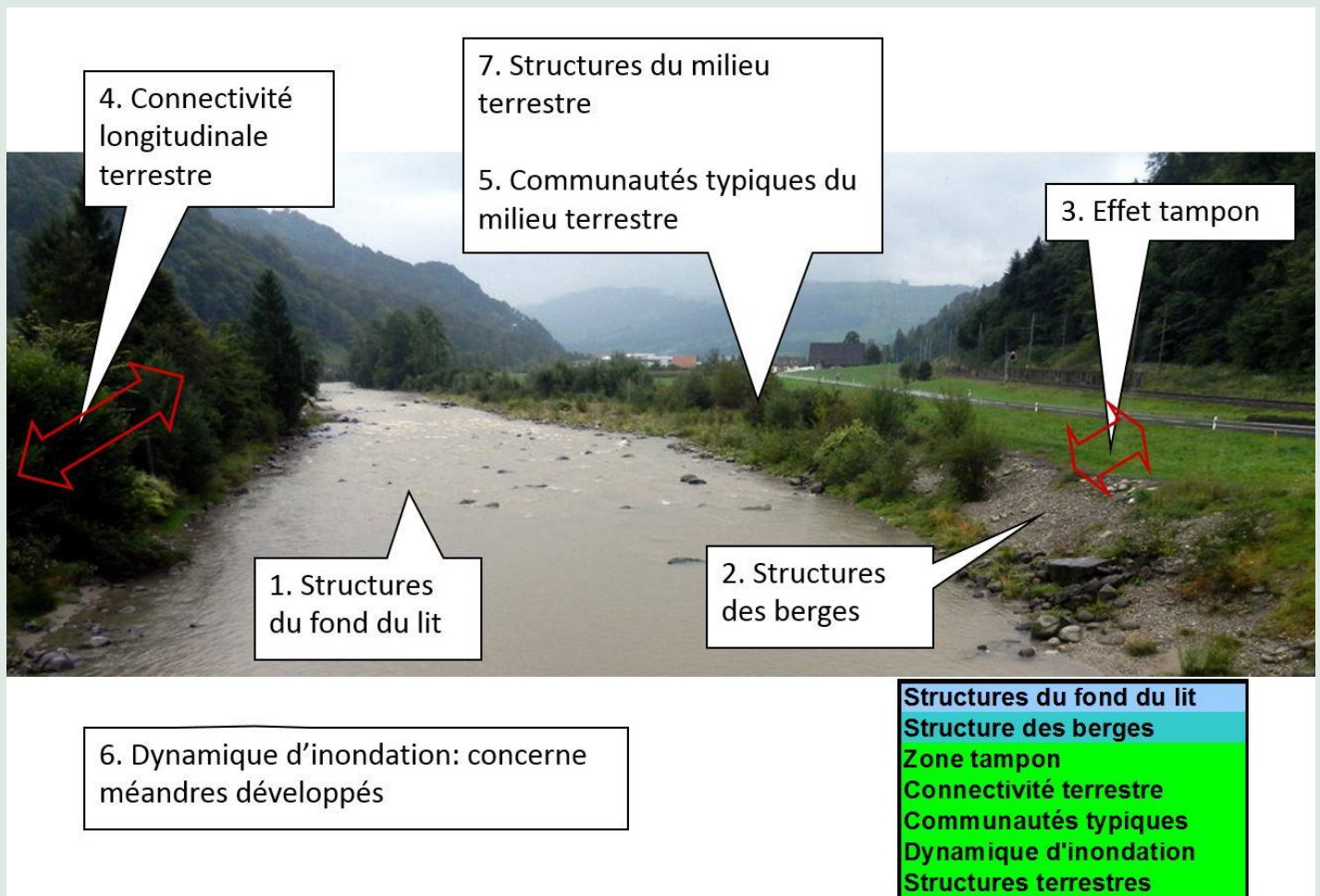


Espace nécessaire aux grands cours d'eau de Suisse

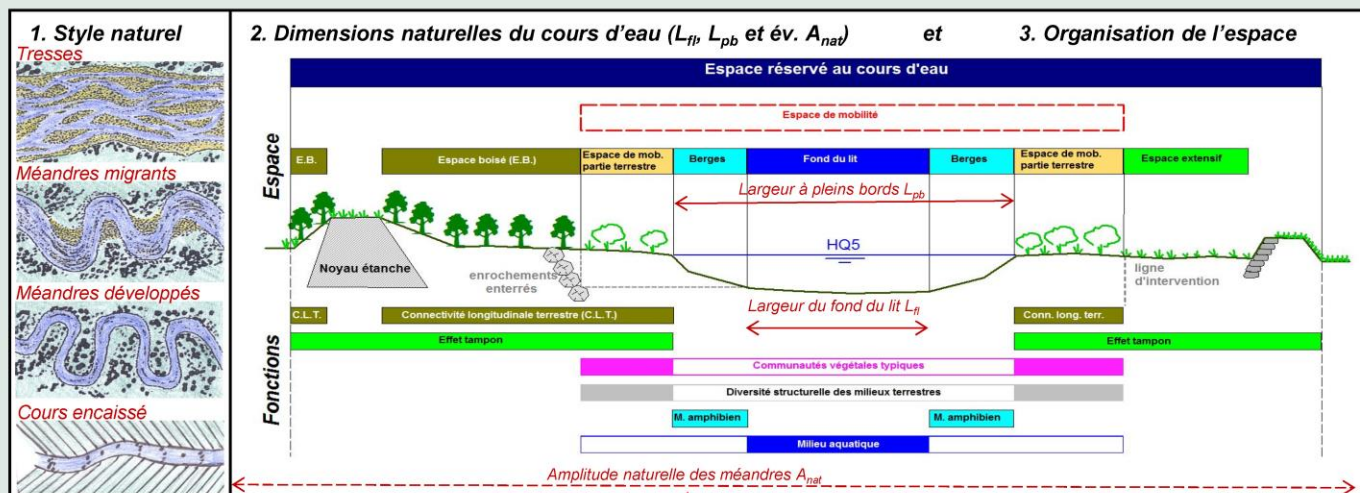
MANUEL UTILISATEUR



12 décembre 2016

Auteurs : Tamara Ghilardi et Christian Roulier

ESPACE NÉCESSAIRE AUX GRANDS COURS D'EAU



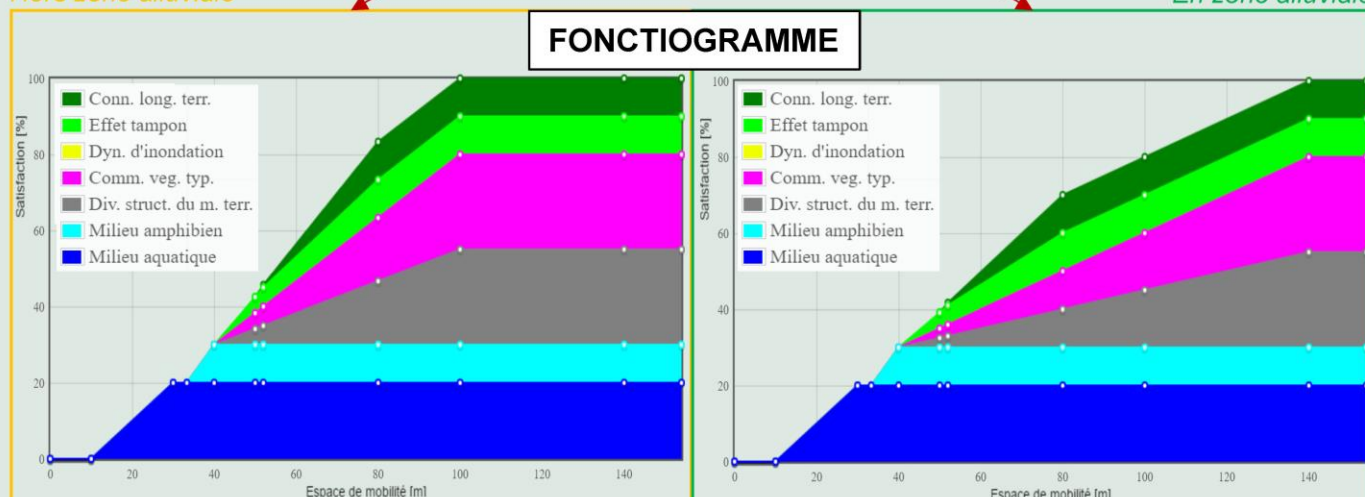
4. Déterminer la largeur nécessaire au cours d'eau naturel (satisfaction des fonctions écologiques)

Hors zone alluviale

Zone alluviale

Tresses, $L_{ri}=30m$, $L_{pb}=40m$

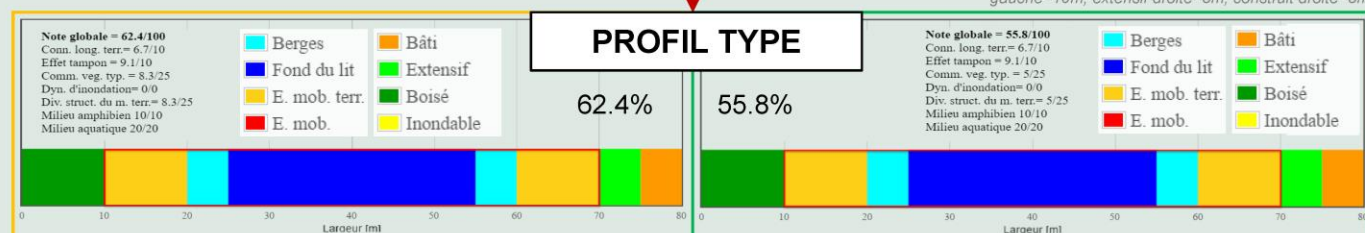
En zone alluviale



5. Tester l'impact de diverses largeurs stabilisées ou non et de diverses occupations du sol

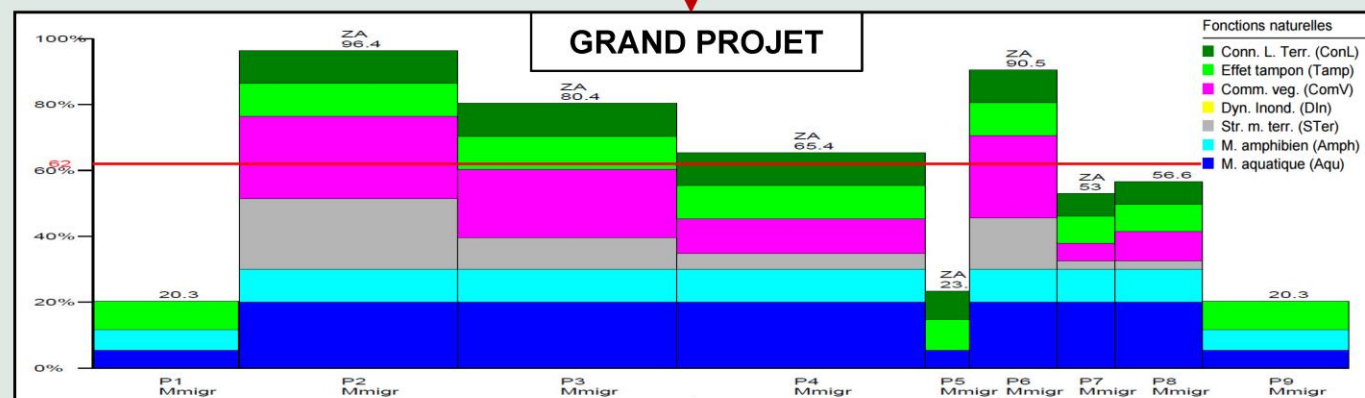
Occupations de l'espace

Tresses, $L_{ri}=30m$, $L_{pb}=40m$, espace mobilité=60m, boisé gauche=10m, extensif droite=5m, construit droite=5m



6. Calculer la performance d'une succession de profils types (grand projet), avec styles, dimensions et espaces pouvant varier

Suite de profils type différents



Ce **manuel utilisateur** de l'outil internet¹ permet de calculer l'espace nécessaire aux grands cours d'eau, dont la largeur du fond du lit est supérieure à 15 m. L'outil est basé sur la méthode décrite dans le rapport « Espace nécessaire aux grands cours d'eau de Suisse » (Paccaud, Ghilardi et Roulier 2016) disponible sous <http://www.zones-alluviales.ch/OutilGCE/accueil-espace-ce-fr.html>.

Introduction

La Loi sur la protection des eaux (LEaux) demande aux cantons de définir l'espace réservé aux eaux superficielles, devant notamment garantir leurs fonctions naturelles (art. 36a LEaux). L'art. 41a OEaux (Ordonnance sur la protection des eaux), spécifie les dimensions de l'espace réservé pour les cours d'eau de largeur inférieure ou égale à 15 m. Le rapport de Paccaud et al. (2016) présente une méthode permettant de définir l'« Espace nécessaire aux grands cours d'eau de Suisse ». Les fonctions naturelles du cours d'eau, ainsi que l'espace nécessaire pour les satisfaire, ont été identifiés, en fonction de la taille et du style du cours d'eau. Au total, 7 fonctions naturelles ont été identifiées.

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

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

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

- la dynamique d'inondation

Les dimensions du cours d'eau ayant une influence sur ces fonctions sont :

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

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

- la fonction de zone tampon
- la connectivité longitudinale terrestre

¹ <http://www.zones-alluviales.ch/OutilGCE/accueil-espace-ce-fr.html>

Un outil internet permettant d'appliquer cette méthode dans trois cas de figure a été développé :

- Détermination du fonctiogramme de l'espace de mobilité
- Evaluation d'un profil type
- Evaluation d'une suite de profils type (grand projet)

Ci-dessous, les étapes d'application de la méthode sont présentées dans l'ordre :

1. Identification du style naturel du cours d'eau
2. Détermination des dimensions naturelles du cours d'eau
3. Délimitation et organisation de l'espace réservé aux eaux
4. Fonctiogramme de l'espace de mobilité
5. Evaluation d'un profil type
6. Evaluation d'un grand projet

Quelques recommandations d'utilisation de l'outil sont également données. Enfin, un exemple d'application de la méthode est présenté.

1 Style naturel du cours d'eau

Les besoins d'espace dépendent du style naturel du cours d'eau.

Les styles fluviaux suivants sont retenus dans le cadre de cet outil :

- Tresses : lits multiples ; charriage intense.
- Méandres migrants : lit sinueux, avec bancs de gravier ; charriage modéré.
- Méandres développés : lit très sinueux, absence de bancs de graviers ; charriage faible.
- Torrents et Cours enfoncés (fonds de vallée) : cours plus ou moins rectilignes, dont la largeur est souvent délimitée par la largeur de la vallée.

La morphologie naturelle (style naturel) des moyens et grands cours d'eau de Suisse peut souvent être identifiée sur des cartes historiques. En alternative, des méthodes comme celle de Yalin et da Silva (2001), permettent d'identifier le style du cours d'eau en fonction du débit morphogène ($HQ_2 - HQ_5$) et de la granulométrie.

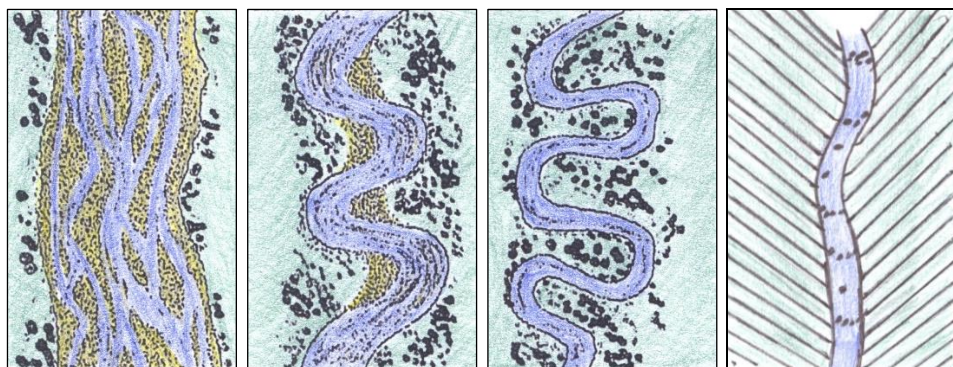


Figure 1. Styles naturels de cours d'eau. De gauche à droite : tresses ; méandres migrants ; méandres développés ; cours encaissés (basé sur Rosgen, 1994).

2 Dimensions naturelles du cours d'eau

Les besoins d'espace dépendent également des dimensions naturelles du cours d'eau.

Les dimensions à déterminer sont :

- La largeur naturelle du fond du lit L_{fl}
- La largeur naturelle à pleins bords L_{pb} (largeur au miroir pour HQ_2 à HQ_5)
- L'amplitude naturelle des méandres A_{nat} (pour les cours en méandres uniquement). Cette valeur peut être obtenue sur la base de cartes historiques ou en prenant une valeur correspondant à 6-10x L_{pb} .

Les dimensions peuvent être déterminées de différentes manières : références spatiales ou historiques, approches théoriques (Paccaud et al. 2016 ; Yalin et Da Silva 2001).

Pour le calcul de L_{pb} et L_{fl} , une approche basée sur l'équation de Manning-Strickler (pour une section trapézoïdale) et sur le style naturel du cours d'eau d'après Rosgen (1994) a été développée et implémentée dans l'outil internet par Paccaud et al. (2016). Les paramètres nécessaires à l'application de l'outil internet sont reportés dans la Figure 2.

Dans Paccaud et al. (2016), un ratio largeur/profondeur r doit être identifié pour le calcul de L_{pb} et L_{fl} . Ce ratio dépend du style du cours d'eau (tresses : >40 ; méandres migrants : >12 , normalement 20-30 ; méandres développés : <12 , normalement 5-8 ; cours encaissés : variable).

En moyenne, la pente des berges naturelles m correspond à 1:3.

Estimer la largeur naturelle du fond du lit et la largeur naturelle à pleins bords d'un cours d'eau corrigé

Une approche a été développée pour estimer la géométrie naturelle du lit, dans le cas d'un cours d'eau corrigé. L'approche se base sur la formule de Manning-Strickler appliquée à une section trapézoïdale. Cela nécessite de connaître les paramètres suivants :

- Q_{morph} débit morphogène en m^3/s
- K coefficient de rugosité de Manning-Strickler en $\text{m}^{1/3}/\text{s}$
- m pente des berges en m/m
- i pente du fond du lit en m/m
- n nombre de chenaux
- r rapport largeur/profondeur en m/m . Pour estimer ce paramètre on utilisera la typologie de Rosgen (1994), et on interpolera cette valeur en fonction du style fluvial naturel du cours d'eau (chap. 5.2 du rapport)

Le programme calcule la largeur naturelle à pleins bords (L_{pb} , en m) avec la formule:

$$L_{\text{pb}} = (K \cdot i^{0.5} \cdot Q_{\text{morph}}^{-1} \cdot (1 - 2/(r \cdot m) + (2/r) \cdot (1 + 1/m^2)^{0.5})^{-2/3} \cdot (1/r - 1/(r^2 \cdot m))^{5/3})^{-3/8}$$

Si le nombre de chenaux est supérieur à 1, on effectue le calcul en remplaçant Q_{morph} par Q_{morph}/n et r par r/n , puis on multiplie la largeur obtenue (L_{pb}) par le nombre de chenaux (n). Ensuite, il est facile de connaître la largeur naturelle du fond du lit (L_{fl} , en m) connaissant la largeur à pleins bords, le rapport largeur profondeur et la pente des berges:

$$L_{\text{fl}} = L_{\text{pb}} \cdot (1 - 2/(r \cdot m))$$

Anat = pour les cours en méandres, l'amplitude naturelle des méandres (en m) doit être définie; cette valeur peut généralement être définie sur la base des cartes historiques ou d'anciens tracés encore visibles de nos jours; à défaut, la valeur de $6-10 \times L_{\text{pb}}$ peut être utilisée.

Remarque: il convient de calculer les valeurs de L_{fl} et L_{pb} à l'aide de plusieurs approches, comme par exemple celle de Yalin et da Silva (2001), afin de retenir les valeurs les plus probables.

Q_{morph} : K : m : i : n : r : Calcule les valeurs L_{pb} et L_{fl}

Figure 2. Paramètres permettant de calculer L_{pb} et L_{fl} , implémenté dans l'outil internet².

3 Organisation de l'espace

Une fois les caractéristiques naturelles du cours d'eau identifiées (chap. 1 et 2), il est nécessaire d'identifier les limitations de l'espace à disposition du cours d'eau. Les fonctions naturelles du cours d'eau liées à la diversité des milieux (milieu aquatique, diversité structurelle des milieux terrestres et communautés végétales typiques) ne peuvent être satisfaites que par un espace non stabilisé (espace de mobilité E_{mob}), alors que les autres fonctions (milieu amphibien, dynamique d'inondation, effet tampon et connectivité longitudinale terrestre) peuvent également être satisfaites par des espaces modifiés par l'homme, sous certaines conditions.

Il est ainsi nécessaire d'identifier (Figure 3) :

- **Espace de mobilité** : E_{mob} ; espace à l'intérieur duquel le cours d'eau et les milieux annexes peuvent évoluer de manière naturelle. Les berges et le lit ne sont pas stabilisés à l'intérieur de l'espace de mobilité. Aucune intervention sur la végétation naturelle ne doit avoir lieu. Cet espace est le seul qui est apte à remplir toutes les fonctions écologiques du cours d'eau.

² <http://www.zones-alluviales.ch/OutilGCE/fonctiogramme-fr.html>

- **Espace des berges** (par rive, si $E_{mob} < L_{pb}$) : espace entre E_{mob} et L_{pb} qui est stabilisé ou fauché (apte à remplir les fonctions du milieu amphibien). Les fonctions des berges peuvent être totalement ou partiellement remplies par des stabilisations présentant une diversité structurelle et une couverture végétale.
- **Zone inondable** (par rive) : pour les cours en méandres développés, les zones modifiées par l'homme qui sont inondées au minimum tous les 2 ans (apte à remplir la fonction de dynamique d'inondation).
- **Espace boisé** (par rive) : bandes boisées se trouvant entre la limite d'intervention humaine et le pied extérieur de digue (aptes à remplir les fonctions de connectivité et d'effet tampon).
- **Espace extensif** (par rive) : bandes extensives prévues par l'OEaux (surfaces agricoles extensives telles que : surfaces à litière, haies, bosquets champêtres, berges boisées, prairies extensives, pâturages extensifs ou pâturages boisés) situées entre la limite d'intervention humaine (stabilisation ou fauche) et le pied extérieur de digue (aptes à remplir l'effet tampon).
- **Zone construite** (par rive) : toute surface non végétalisée ou imperméable peut être assimilée à une zone construite. Sous certaines conditions, leur présence est autorisée dans l'espace réservé aux eaux, mais ces surfaces ne remplissent pas de fonctions naturelles.

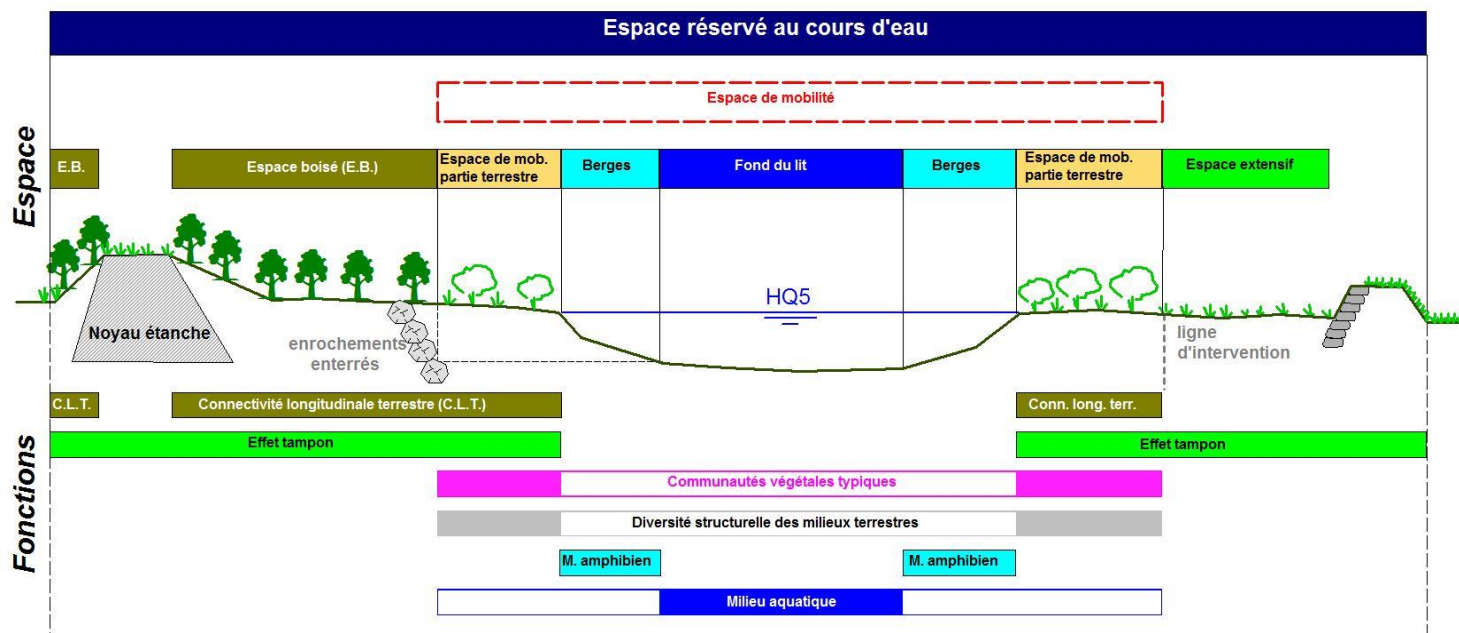


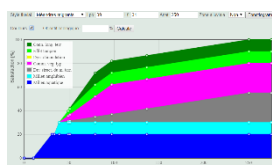
Figure 3. Compartiments et fonctions de l'espace réservé aux eaux.

EXIGENCE DES ZONES ALLUVIALES

Pour les cours d'eau de largeur naturelle du fond du lit inférieure ou égale à 15 m, l'OEaux exige des largeurs d'espace réservé plus grandes lorsque la rivière s'écoule dans un biotope d'importance nationale. Cette différenciation est également faite pour les grands cours d'eau.

Les fonctions de base ne visent que la formation de forêts à bois tendre, moins exigeantes en espace. Dans le cas des zones alluviales, la formation des forêts à bois durs est également visée. Cet objectif a un impact sur la définition des courbes de satisfaction des communautés végétales typiques (100% à $E_{mob}=3.5 \times L_{pb}$, vs. 100% à $E_{mob}=2.5 \times L_{pb}$ hors biotope) et des structures du milieu terrestre (pour les cours en tresse : 100% à $E_{mob}=3.5 \times L_{pb}$, vs. 100% à $E_{mob}=2.5 \times L_{pb}$ hors biotope ; pour les méandres : le maximum reste à A_{nat}).

4 Fonctiogramme



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

Le fonctiogramme montre le pourcentage de satisfaction des diverses fonctions naturelles du cours d'eau, en fonction de la largeur de l'espace non stabilisé (espace de mobilité). Il est ainsi possible d'identifier l'espace de mobilité nécessaire pour atteindre un certain pourcentage de satisfaction des fonctions naturelles.

Pour définir le fonctiogramme du cours d'eau, il est nécessaire d'identifier (Figure 4) :

- Le style naturel
- La largeur à pleins bords
- La largeur du fond du lit
- L'amplitude naturelle des méandres (pour les cours en méandres)
- Présence d'une zone alluviale (exigences d'espace plus élevées)

Le bouton « fonctiogramme » dessine la courbe supérieure du fonctiogramme, toute fonction confondue, puis le bouton « couleur » permet de différencier les fonctions. Il est possible de calculer la largeur d'espace de mobilité nécessaire pour obtenir un objectif écologique spécifique (case blanche, puis cliquer sur « calcule »).

Saisie des paramètres de l'état naturel

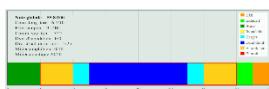
Remarque: il faut que $L_{fi} < L_{pb}$ ($< A_{nat}$). La valeur de A_{nat} n'est pas nécessaire pour les cours d'eau en tresses et rectilignes.

Style fluvial : Tresses ▾ Lpb: Lfi: Anat: Zone alluviale : Non ▾

Couleurs ☐ Objectif écologique : %

Figure 4. Paramètres nécessaires pour la création du fonctiogramme.

5 Profil type



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

La méthode permet également d'évaluer un profil type existant ou une variante d'aménagement. Il s'agit ici de définir les caractéristiques du cours d'eau, l'espace de mobilité attribué au cours d'eau et les largeurs des autres types d'utilisation de l'espace réservé aux eaux (chap. 3).

Style fluvial : Lpb: Lfi: Anat: Zone alluviale :

Espace de mobilité:

Espace de la berge gauche: Espace de la berge droite:

Espace inondable à gauche: Espace inondable à droite:

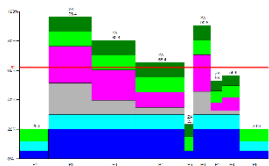
Espace boisé à gauche: Espace boisé à droite:

Espace extensif à gauche: Espace extensif à droite:

Espace construit à gauche: Espace construit à droite:

Figure 5. Paramètres devant être déterminés pour le calcul du pourcentage de satisfaction des fonctions d'un profil type.

6 Grand projet



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

Finalement, l'outil internet permet d'évaluer la note globale obtenue par une suite de profils type. Afin d'évaluer un grand projet, il est nécessaire d'identifier au préalable une suite de **tronçons homogènes**. Pour chaque tronçon, tous les paramètres identifiés dans la Figure 5 doivent être reportés dans un fichier .csv, avec les colonnes dans l'ordre reporté ci-dessous et séparées par des « ; » (Figure 6 et Figure 7). Un exemple de fichier .csv est téléchargeable sur le site internet. Une note moyenne pondérée est ensuite calculée pour la totalité du projet.

Signification des colonnes du fichier csv

Toutes les distances doivent être exprimées en mètres. L'ordre des colonnes doit être respecté.

- NoTroncon : le numéro ou le nom de tronçon.
- Longueur : la longueur sur laquelle le profil est représentatif.
- StyleF : le style fluvial de l'état naturel. Il est important de respecter la syntaxe suivante, y compris la casse : *Tresses* pour des cours en tresses, *Mmigr* pour des méandres migrants, *Mdev* pour des méandres développés, *Crec* pour des cours naturellement rectilignes ou des gorges.
- Lpb : largeur naturelle à pleins bords.
- Lfi : largeur naturelle du fond du lit.
- Anat : amplitude naturelle des méandres, mettre 0 si ce n'est pas un cours en méandres.
- Emob : espace de mobilité.
- EberG, EberD : espace des berges, resp. gauche et droit
- EinondG, EinondD : espace inondable, gauche et droit, seulement pour les méandres développés.
- EboisG, EboisD : espace boisé, gauche et droit.
- EextG, EextD : espace de prairie extensive, gauche et droit.
- EdurG, EdurD : espace construit (places de parc, chemins, etc.), gauche et droit.
- estZA : indiquer si le tronçon se trouve dans une zone alluviale (valeur: 1) ou non (valeur: 0); rive gauche et rive droite confondue

Ouvrir le fichier .csv:

Figure 6. Contenu du fichier .csv à importer pour l'évaluation d'un projet.

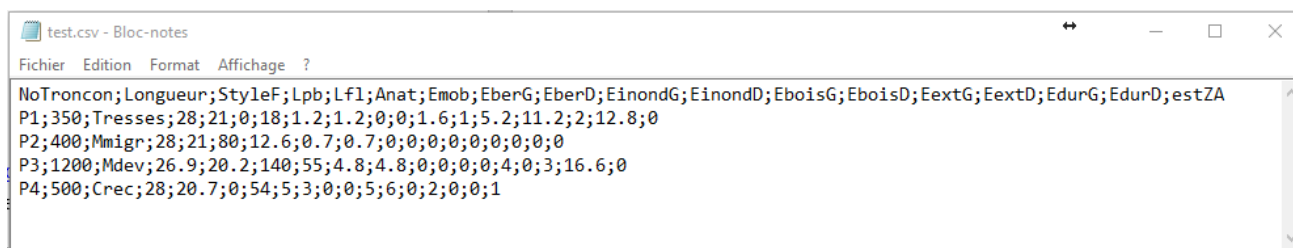


Figure 7. Exemple de fichier .csv à importer pour l'évaluation du projet.

Précaution importante : il arrive souvent que le fichier .csv comporte une ou plusieurs "lignes vides" en fin de fichier, surtout si on le modifie avec Excel. Or pour cette application, il est obligatoire que la dernière ligne soit une ligne de données. Pour vérifier qu'il n'y ait pas de lignes vides à la fin du fichier, il est recommandé de l'ouvrir avec le bloc-notes, de se positionner à la fin du fichier avec le curseur et d'effacer les lignes vides, le cas échéant.

7 Recommandations

Des cas particuliers d'application de l'outil sont présentés dans le rapport complet « *Espace nécessaire aux grands cours d'eau de Suisse* » (Paccaud et al. 2016).

- **Fond de vallée étroit**

L'espace du cours d'eau peut être localement limité par la largeur du fond de la vallée, sans pour autant s'agir d'une rivière encaissée. C'est le cas si la largeur du fond de la vallée est $\geq 2xL_{pb}$ mais $< A_{nat}$, pour les méandres.

- **Zones alluviales**

Les exigences des forêts à bois durs sont prises en considération lors de l'aménagement des cours d'eau (revitalisations) situés dans les zones alluviales d'importance nationale.

Les fonctions des berges peuvent être totalement ou partiellement remplies par des stabilisations présentant une diversité structurelle et une couverture végétale. Il conviendra ainsi d'évaluer au cas par cas l'aptitude des berges stabilisées à remplir les fonctions du milieu amphibien. L'outil internet prend en compte une satisfaction complète des fonctions à l'intérieur de l'espace des berges indiqué par l'utilisateur.

En cas de doute sur le style du cours d'eau (situation intermédiaire), il est conseillé de calculer l'espace dans les deux cas et de choisir la variante la plus crédible.

L'outil constitue une aide à l'évaluation de projets, mais pour un bilan écologique complet, d'autres paramètres doivent aussi être pris en considération.

8 Exemple : la Broye

La Broye entre Lucens et Granges-près-Marnand est un cours d'eau endigué. Dans la partie centrale du tronçon, en rive gauche se trouve une zone alluviale d'importance nationale (obj. 52 « Les îles de Villeneuve », cantons de Fribourg et Vaud) d'une longueur de 3.3 km. La rive droite à cet endroit est dépourvue de végétation ligneuse (Figure 8, à gauche). En amont et en aval de la zone alluviale, les deux rives sont dépourvues de végétation ligneuse (Figure 8, à droite). La largeur actuelle du fond du lit est d'environ 16 m.

Une revitalisation prévoit l'élargissement de la Broye la zone alluviale. La largeur supplémentaire pouvant être mise à disposition du cours d'eau varie en fonction de la largeur de la forêt, allant de 40 m à 200 m.



Figure 8. A gauche : la Broye en zone alluviale, vue depuis l'aval. A droite : la Broye hors de la zone alluviale, vue depuis l'aval.

Ci-dessous sont présentées, dans l'ordre, toutes les étapes nécessaires à la détermination de l'espace nécessaire au cours d'eau et à l'évaluation de la performance de l'aménagement retenu.

8.1 Style naturel du cours d'eau

Les cartes historiques retrouvées dans les archives communales (Figure 9), ainsi que l'Atlas géologique de Suisse et les anciens tracés encore visible sur le terrain (Figure 10), ont permis de déterminer le style naturel de la Broye avant correction. Il s'agit d'un cours en **méandres migrants**, avec une amplitude de méandres de **250 m**. Les raisons pour lesquelles le style en méandres migrants a été choisi sont :

- Absence de signes de court-circuitage des méandres (typique des méandres développés)
- Sinuosité pas très élevée (vs. sinuosité plus grande pour les méandres développés)
- Pente moyenne (vs. pente très faible pour les méandres développés)
- Absence de lits multiples (typique des tresses)



Figure 9. Tracé historique et correction du tracé – carte historique de 1850 (source : archives de la commune de Villeneuve).

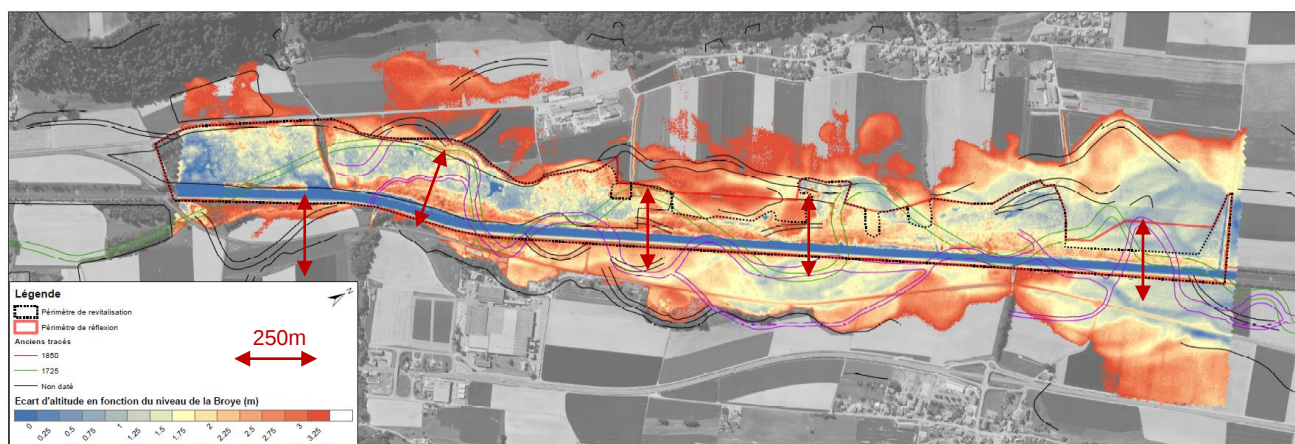


Figure 10. Carte des tracés historiques de la Broye, basée sur : Atlas géologique ; archives de Villeneuve (FR) ; MNT actuel (traces d'anciens lits). Flèches rouges : divers endroits où une amplitude naturelle des méandres de 250 m a été mesurée.

Le style a également été déterminé par l'approche théorique de Yalin et Da Silva (2001), qui permet de déterminer la largeur de régime B (correspondante à la largeur à pleins bords), la profondeur d'eau de régime (h) et la pente de régime. Les valeurs de B et h, ainsi que le diamètre des sédiments D (utiliser le diamètre médian d_{50} ou moyen d_{65}), permettent de déterminer le style du cours d'eau sur la base du graphique de la Figure 11. Pour l'application de cette méthode, il est nécessaire de connaître le débit (HQ_2 à HQ_5) et la granulométrie des sédiments (diamètre médian ou moyen des sédiments, il convient de tester les deux valeurs). Une analyse de sensibilité avec divers couples de valeurs est nécessaire, afin de tester la sensibilité des paramètres et l'ordre de grandeur des résultats.

Avec cette approche, on obtient un cours d'eau de type « bancs alternés ». Ce style correspond à celui des méandres migrants.

L'amplitude naturelle des méandres vaut 6 à 10x L_{pb} , ainsi, avec l'approche de Yalin et da Silva, A_{nat} a une valeur comprise entre 160.8 (26.8 m x 6) et 491 m (49.1 m x 10). Ces deux valeurs constituent les extrêmes. La largeur à pleins bords de 39 m est retenue dans la procédure (chap. 8.2), en impliquant ainsi une amplitude naturelle des méandres de 234 – 390 m. La valeur de $A_{nat}=250$ m, mesurée sur les

cartes historiques, est ainsi confirmée par l'approche théorique ($\sim 6 \times L_{pb}$).

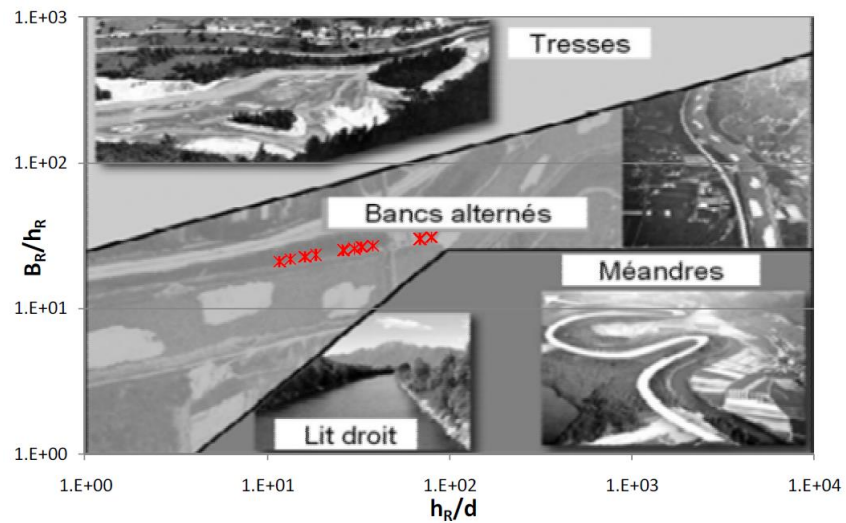


Figure 11. Style pour plusieurs valeurs B_R/h_R et h_R/d (LCH, 2010).

8.2 Dimensions naturelles du cours d'eau

Comme vu au chapitre précédent, quelques dimensions peuvent déjà être obtenues lors de la détermination du style naturel du cours d'eau. Il s'agit en particulier de l'amplitude naturelle des méandres ($A_{nat}=250$ m), ainsi que de la largeur à pleins bords si l'approche de Yalin et da Silva (2001) est utilisée.

Ci-dessous, les résultats des approches de Yalin et da Silva (2001) et de Paccaud et al. (2016) sont présentés. Plusieurs paramètres de base ont été utilisés afin d'effectuer une étude de sensibilité et retenir les résultats les plus probables.

Approche Yalin et da Silva (2001)

Pour l'application de la méthode de Yalin et da Silva (2001), plusieurs valeurs de paramètres de base (HQ_2 à HQ_5 , d_{50} à d_{65}) ont été utilisés pour les calculs. La largeur de régime ainsi obtenue varie entre 29 et 39 m, en prenant les paramètres les plus probables (valeurs moyennes de débit et diamètres, selon les statistiques effectuées).

B_R [m]			d (mm)				
			d_{50} min	d_{65} min	d_{50} moy	d_{65} moy	d_{65} max
			20	40	50	80	110
Q (m ³ /s)	Q2 min	100.5	41.0	34.5	32.6	29.0	26.8
	Q2 moy	103.2	41.5	34.9	33.0	29.4	27.1
	Q5 moy	142.5	48.8	41.0	38.8	34.5	31.9
	Q5 max	144.5	49.1	41.3	39.1	34.7	32.1

Tableau 1. Largeur de régime B_R pour plusieurs débits et diamètres des sédiments de la Broye à Villeneuve (LCH, 2010), en appliquant la méthode de Yalin et Da Silva (2001).

Approche outil grands cours d'eau (Paccaud et al. 2016)

Pour l'outil grands cours d'eau (cf. Figure 2), une analyse de sensibilité sur les paramètres de débit et de ratio largeur/profondeur a été effectuée, afin d'obtenir une gamme de valeurs les plus probables de largeur à pleins bords et de largeur du fond du lit.

L'outil grands cours d'eau est appliqué avec les paramètres suivants :

- $Q=103$ (HQ_2) - 143 (HQ_5) m^3/s
⇒ débit morphogène : $\sim HQ_2$ à HQ_5
- $K=37$ $m^{1/3}/s$
⇒ rugosité définie sur la base de la granulométrie disponible
- $m=0.3333$ (-)
⇒ pente moyenne des berges naturelles vaut 1:3. Cette valeur est à utiliser si on n'a pas de valeur plus précises, provenant de références spatiales (tronçon encore naturel) ou temporelles (documents historiques)
- $i=0.3\%$
⇒ pente naturelle du cours d'eau, déterminée à l'aide de Yalin et da Silva (2001)
- $r=20$ - 30 (-)
⇒ ratio largeur/profondeur, ordre de grandeur typique des cours en méandres

Le Tableau 2 reporte les valeurs de largeurs pleins bords L_{pb} et largeur du fond du lit L_{fl} obtenues avec l'outil grands cours d'eau (Paccaud et al., 2016). La largeur à pleins bords obtenue avec cette approche varie entre 32 et 44 m.

Paramètres		Résultats	
Rapport largeur/profondeur	Débit morphogène	Largeur pleins bords L_{pb} (m)	Largeur du fond du lit L_{fl} (m)
$r=20$ (-)	$HQ_2=103$ (m^3/s)	31.5	22.1
	$HQ_5=143$ (m^3/s)	35.7	25.0
$r=30$ (-)	$HQ_2=103$ (m^3/s)	39.2	31.3
	$HQ_5=143$ (m^3/s)	44.3	35.4

Tableau 2. Valeurs de largeurs pleins bords L_{pb} et Largeur du fond du lit L_{fl} , pour diverses valeurs de débit morphogène (HQ_2 et HQ_5) et de rapport largeur/profondeur (20 et 30).

Finalement, les valeurs suivantes ont été retenues pour l'application de la méthode de détermination de l'espace nécessaire aux grands cours d'eau :

- $L_{fl}=31$ m
- $L_{pb}=39$ m
- $A_{nat}=250$ m

8.3 Organisation de l'espace

L'organisation de l'espace varie considérablement d'un tronçon à l'autre, en fonction de l'espace à disposition, spécialement en rive gauche (i.e. largeur de la zone alluviale d'importance nationale). La Figure 12 présente les divers compartiments de l'espace et le Tableau 3 indique les dimensions des compartiments des 9 tronçons homogènes qui ont été identifiés. Les tronçons homogènes représentent une simplification de la réalité. Il appartiendra au responsable de projet de définir la précision de l'analyse nécessaire pour le projet évalué.

Par exemple, dans le cas présenté, en rive gauche, un espace de mobilité de largeur variable, à l'intérieur duquel la Broye pourra se déplacer, est mis à disposition du cours d'eau. La variabilité de l'espace de mobilité a été simplifiée pour l'identification des tronçons homogènes.

En rive droite, après revitalisation, la berge stabilisée sera boisée pour la plupart du périmètre.

Au profil P5 se trouve une passerelle piétonne, qui limite fortement la mobilité de la Broye.

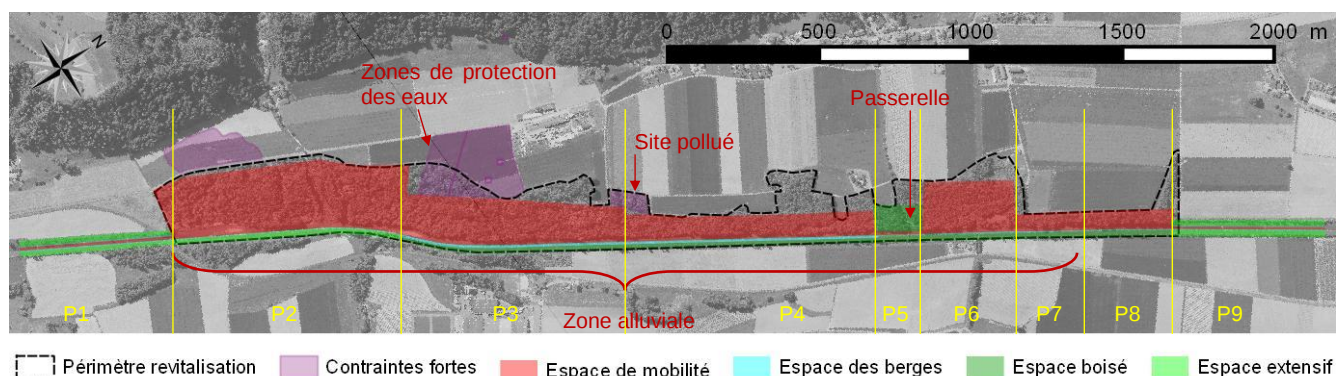


Figure 12. Compartiments de l'espace et contraintes fortes, limitant l'espace de mobilité. Echelle 1:25'000.

NoTroncon	Longueur	StyleF	Lpb	Lfi	Anat	Emob	EberG	EberD	EinondG	EinondD	EboisG	EboisD	EextG	EextD	EdurG	EdurD	estZA
P1	500	Mmigr	39	31	250	16	3	3	0	0	0	0	16	16	0	0	0
P2	750	Mmigr	39	31	250	220		2				0		16			1
P3	750	Mmigr	39	31	250	120		2				16					1
P4	850	Mmigr	39	31	250	80		2				16					1
P5	150	Mmigr	39	31	250	16		2			90	16					1
P6	300	Mmigr	39	31	250	170		2				16					1
P7	200	Mmigr	39	31	250	60		2				16					1
P8	300	Mmigr	39	31	250	60		2				16					0
P9	500	Mmigr	39	31	250	16	3	3	0	0	0	0	16	16	0	0	0

Tableau 3. Paramètres des 9 tronçons homogènes du projet. Pour l'en-tête des colonnes : cf. Figure 6. Valeurs en mètres.

Remarques :

Pour cette démarche illustrative, l'état du projet a été légèrement modifié. En particulier :

- Les tronçons P1 et P9 se trouvent à l'extérieur de la limite du projet de revitalisation, mais sont repris dans cet exemple d'application de la méthode afin montrer la différence d'état du cours d'eau en fonction de la végétation riveraine et de l'espace à disposition.
- Le tronçon P8 est identifié comme étant « hors zone alluviale » dans cet exemple. En réalité, ce tronçon se trouve en zone alluviale, comme le tronçon P7. Cette différence de statut a été introduite afin de montrer l'impact de l'option « zone alluviale » (exigences des milieux terrestres plus élevées, afin d'obtenir également la création de forêts à bois durs).

8.4 Fonctiogramme

Dans le cadre de ce projet, on trouve tant des tronçons en zone alluviale (P2 à P7) que hors zone alluviale (P1, P8 et P9). Ainsi, il convient de définir deux fonctiogrammes de ce cours d'eau.

Dans le cas présenté, A_{nat} (250 m) $> 3.5 \cdot L_{pb}$ (136.5 m). Ainsi, tant hors zone alluviale (Figure 13) qu'en zone alluviale (Figure 14), le 100% des fonctions est satisfait pour un espace de mobilité de 250 m.

Cependant, les deux fonctiogrammes ne sont pas identiques, en effet la fonction des communautés végétales typiques est entièrement satisfaite à 97.5 m hors zone alluviales ($2.5 \cdot L_{pb}$) et à 136.5 m ($3.5 \cdot L_{pb}$) en zone alluviale. Hors zone alluviale, le 80% des fonctions du cours d'eau est satisfait pour une largeur d'espace de mobilité de 94 m, alors qu'en zone alluviale ce même pourcentage est atteint seulement pour un espace de mobilité de 119 m.

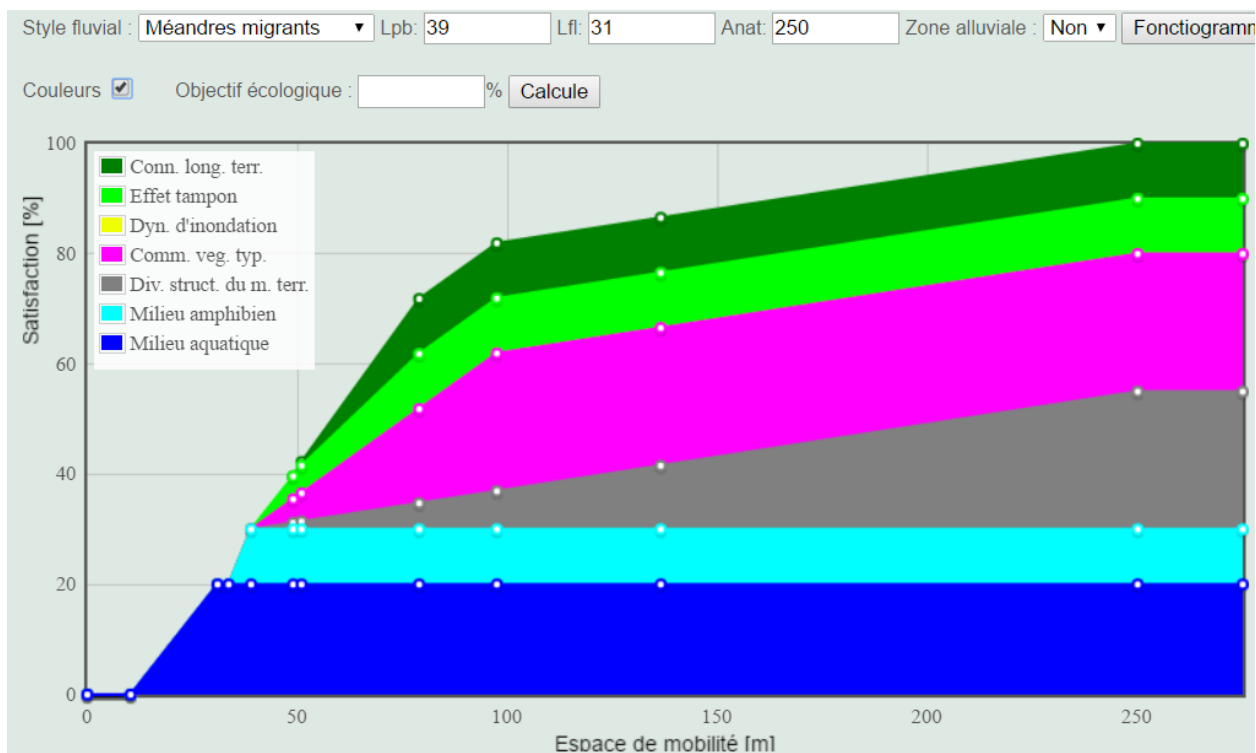


Figure 13. Fonctiogramme de la Broye, exigences hors zone alluviale.

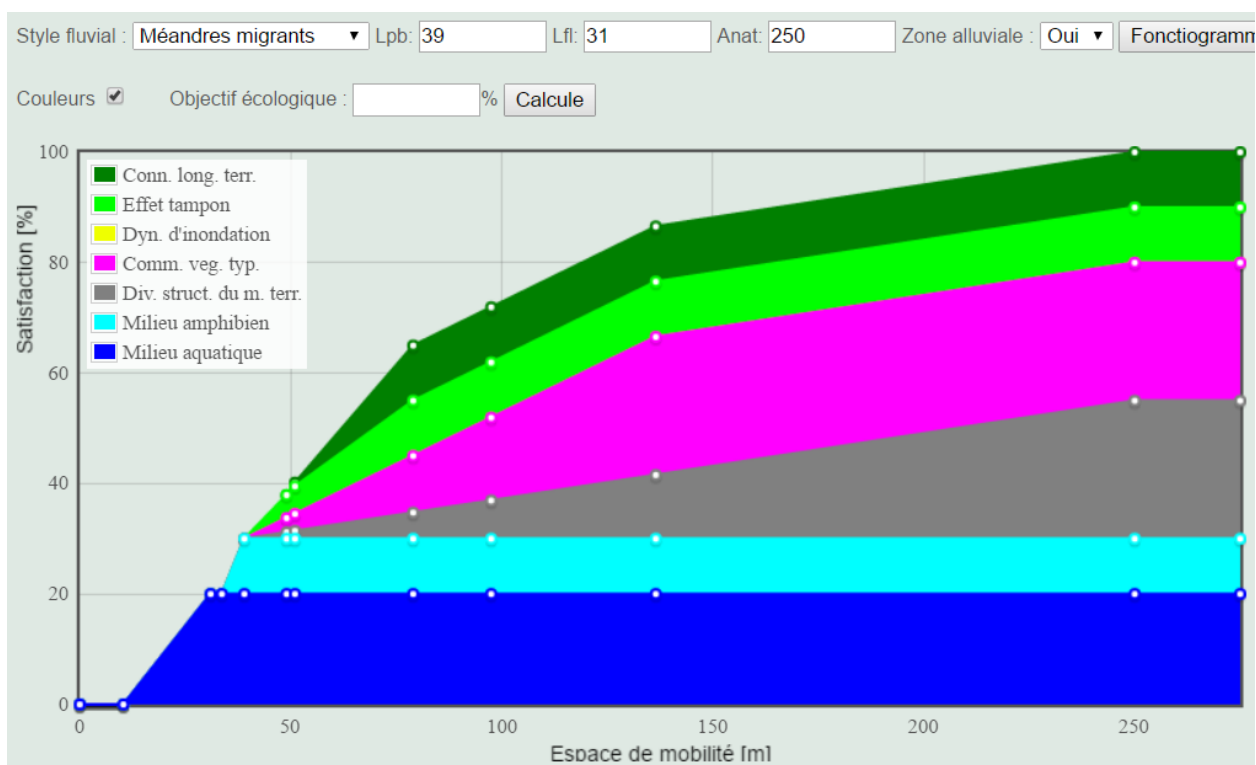


Figure 14. Fonctiogramme de la Broye, exigences en zone alluviale.

8.5 Profil type

Sur la base de l'occupation de l'espace présentée au chapitre 8.2 (Figure 12 et Tableau 3), il est possible de calculer le % des fonctions écologiques satisfaites par chaque profil type.

En amont et en aval du secteur du projet, l'espace réservé au cours d'eau est très limité et les berges sont exploitées extensivement. Cette situation ne satisfait que 20.3% des fonctions écologiques (Figure 15). Les arbres espacés et alignés en sommet de berge (cf. Figure 8, à droite) ne font pas office de bande boisée permettant la connectivité longitudinale terrestre.

A l'état actuel, dans la zone alluviale, la bande boisée est très large, mais cet espace n'est pas disponible en tant qu'espace de mobilité, car la berge est stabilisée. Ainsi, le score du profil reste très faible (22.3%, à peine plus élevé qu'en amont de la zone alluviale ; Figure 16).

Lors des travaux de revitalisation, les stabilisations de berge gauche seront enlevées et la totalité de la forêt alluviale du profil P2 sera à disposition de la Broye en tant qu'espace de mobilité. Ainsi, après revitalisation le 96% des fonctions du cours d'eau pourront être satisfaites (Figure 17).

Dans la partie où la forêt est étroite, dans le secteur aval du projet de revitalisation (profil P7), le pourcentage de satisfaction des fonctions est moins élevé, mais atteint quand même un score de 53%, grâce à un espace de mobilité de 60 m (Figure 18). A cet endroit, la rive droite sera boisée sur une largeur de 16 m. Cela permet d'améliorer la satisfaction de la fonction tampon et de la connectivité longitudinale terrestre, vu que $E_{mob} < L_{pb} + 40$ m (une bande boisée de 20 m par berge est nécessaire pour satisfaire entièrement les fonctions tampon et de connectivité longitudinale terrestre).

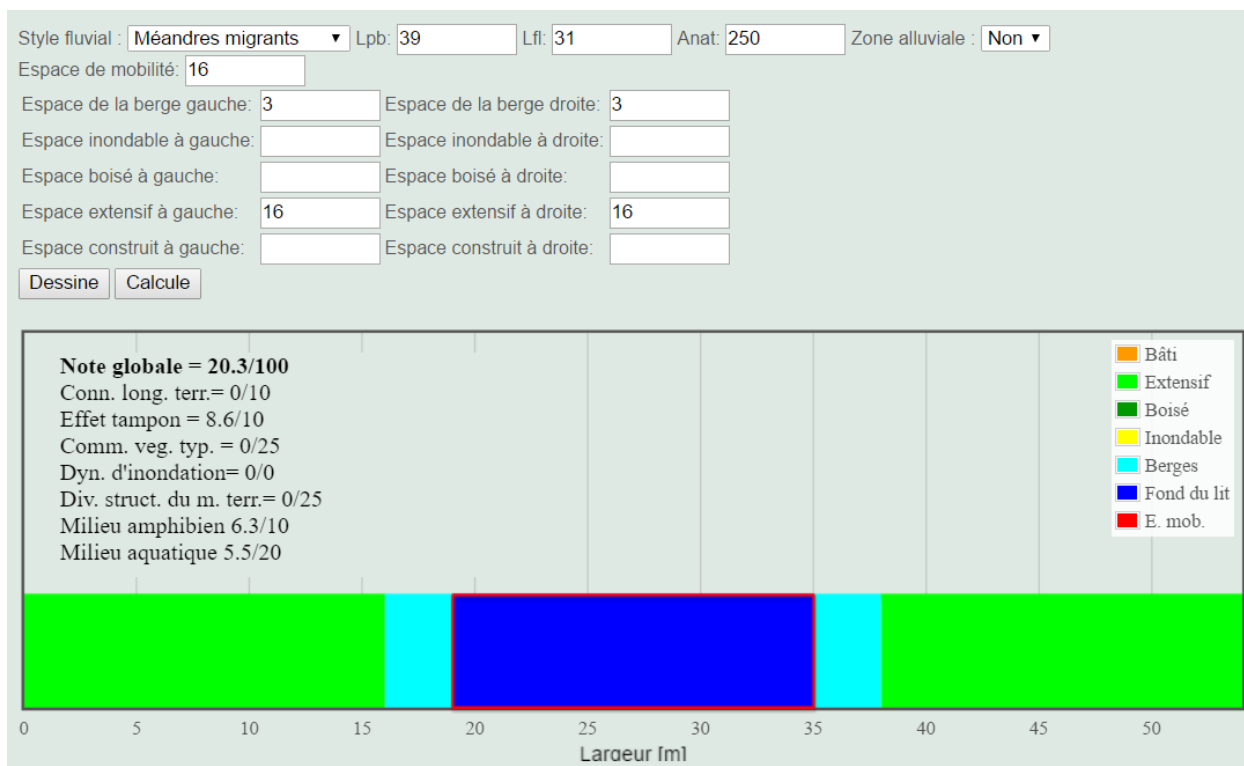


Figure 15. Evaluation du profil type en amont du secteur à revitaliser (profil P1 sur la Figure 12).

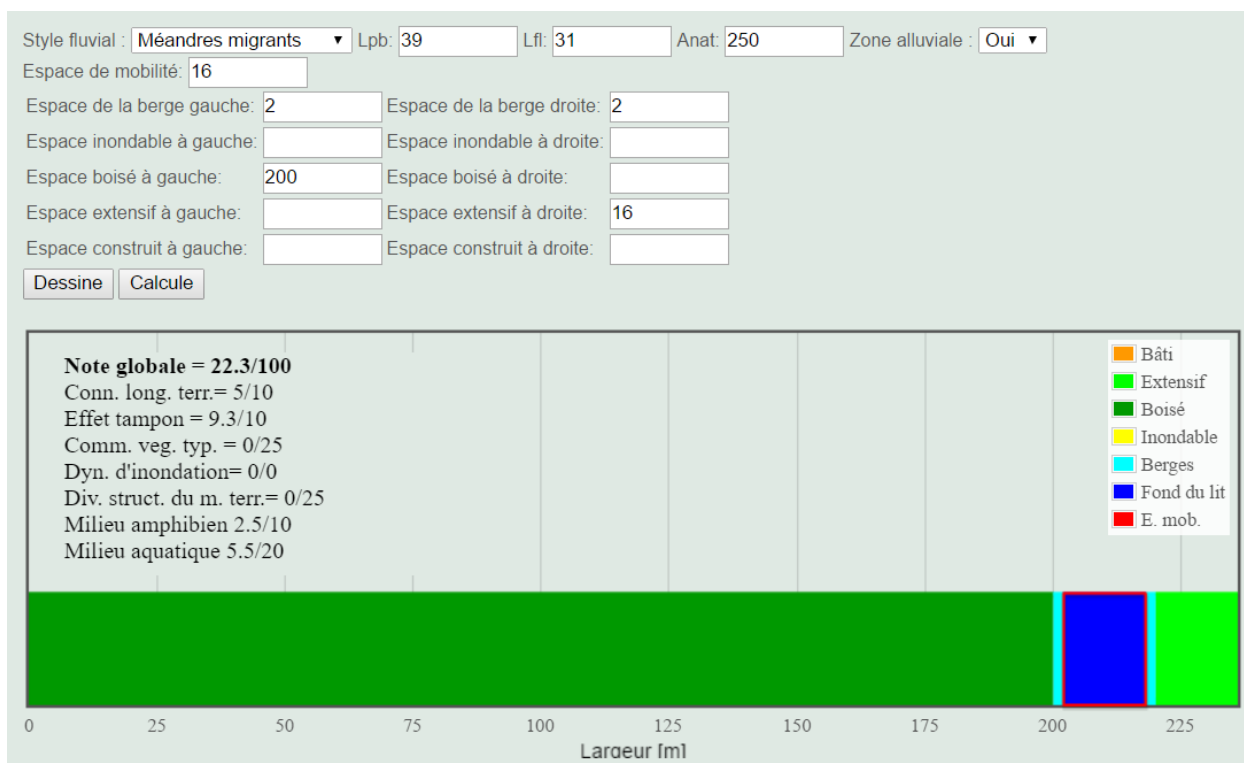


Figure 16. Evaluation du profil type dans la partie amont de la zone alluviale (profil P2 sur la Figure 12) avant revitalisation.

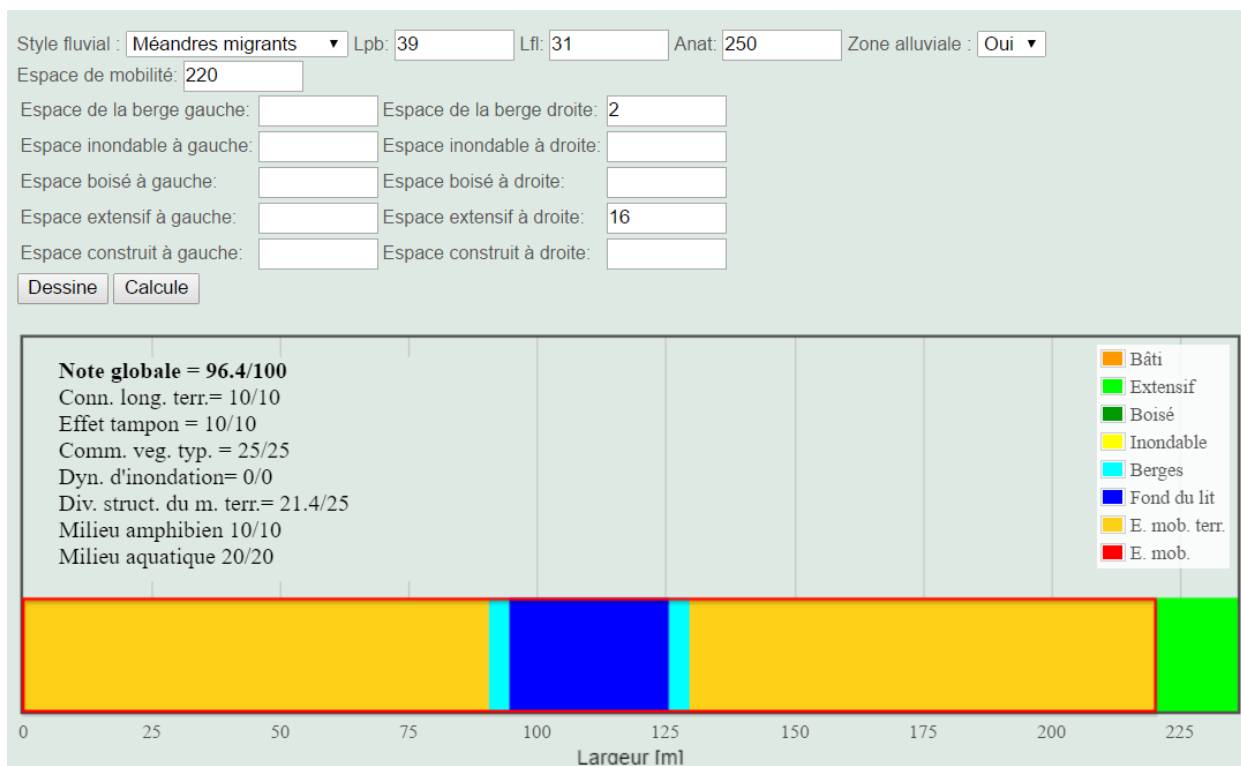


Figure 17. Evaluation du profil type P2 (sur la Figure 12), dans la partie amont de la zone alluviale, après revitalisation.

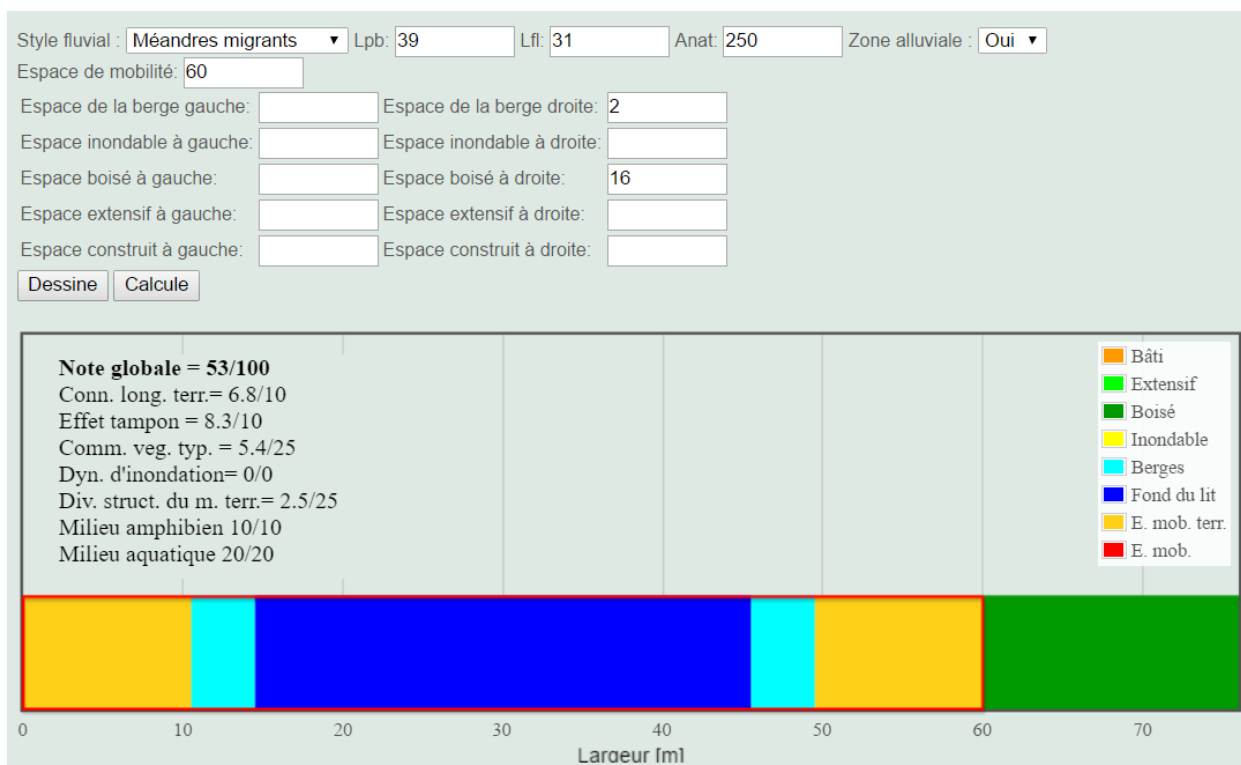


Figure 18. Evaluation du profil type dans la partie aval du secteur revitalisé (profil P7 sur la Figure 12).

8.6 Grand projet

La Figure 19 montre le score global du projet de revitalisation (y.c 500 m en amont et en aval du véritable projet), sur la base des tronçons homogènes identifiés au chap. 3. Le score atteint est de 62% (moyenne des notes des 9 profils, pondérée par la longueur du profil), alors qu'en l'état actuel le score global de ce tronçon de 4'500 m est d'environ 22%. L'interruption causée par la présence d'une passerelle piétonne au profil P5 est évidente. L'outil livre également la satisfaction de chaque fonction pour chaque profil type évalué (Figure 20).

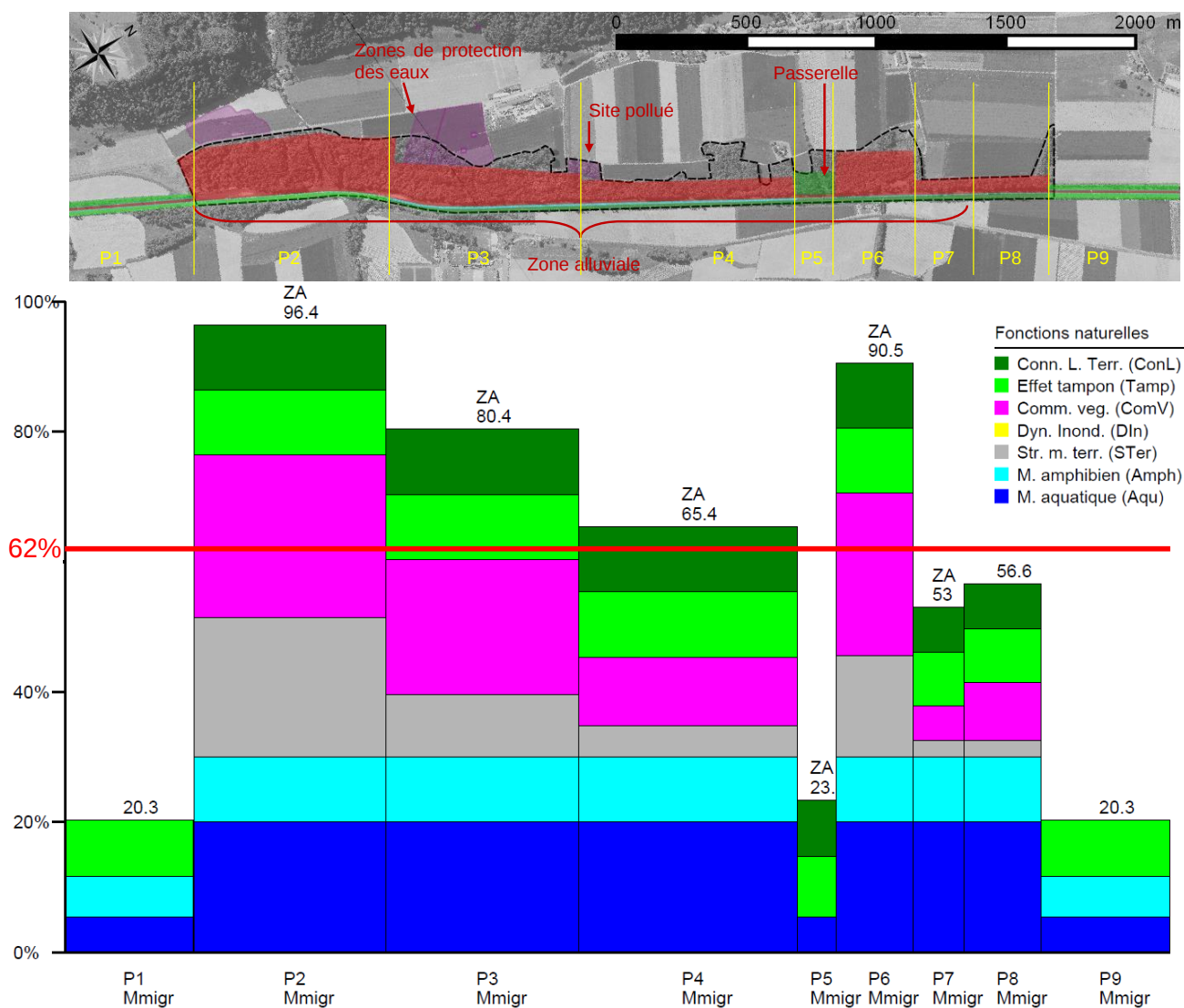


Figure 19. Projet de revitalisation de la Broye à Villeneuve. Ici un tronçon amont et aval ont également été présenté, à titre indicatif, pour montrer la différence d'état du cours d'eau.

No	Note	ConL	Tamp	ComV	DIn	STer	Amph	Aqu
P1	20.3	0	8.6	0	0	0	6.3	5.5
P2	96.4	10	10	25	0	21.4	10	20
P3	80.4	10	10	20.8	0	9.6	10	20
P4	65.4	10	10	10.5	0	4.9	10	20
P5	23.4	8.7	9.3	0	0	0	0	5.5
P6	90.5	10	10	25	0	15.5	10	20
P7	53	6.8	8.3	5.4	0	2.5	10	20
P8	56.6	6.8	8.3	9	0	2.5	10	20
P9	20.3	0	8.6	0	0	0	6.3	5.5

Figure 20. Tableau des notes, par fonction, pour chaque profil type évalué dans le grand projet.

8.7 Conclusion du cas d'étude

La comparaison de la situation actuelle et de l'état futur permet de mesurer l'effet de la revitalisation. Comme le montrent la Figure 16 (état actuel P2) et la Figure 17 (état après revitalisation P2), le fait d'avoir un espace de mobilité au lieu d'une forêt alluviale stabilisée change complètement la valeur naturelle du milieu (22% vs. 96%).

Le projet prévoit également la revitalisation des **affluents** de la Broye et l'augmentation de l'hygromorphie de la forêt grâce à cette mesure, mais cette intervention n'est prise en compte lors de l'application de l'outil.

9 Références

Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) 2010: "*Aménagement de la Broye à Villeneuve. Hydraulique, morphologie et sécurité. Expertise*". Lausanne, 42 pp. dans **Service des eaux, sols et assainissement du Canton de Vaud (SESA) et Service conseil Zones alluviales** 2010: "*Aménagement de la Broye du km 26.5 au km 25.5 - Dossier d'enquête et soumission*". Société d'endiguement de la Broye, sur mandat de la Commune de Villeneuve FR, section lacs et cours d'eau. Lausanne et Yverdon-les-Bains.

Paccaud G., Ghilardi T. et Roulier C. 2016: "*Espace nécessaire aux grands cours d'eau de Suisse*". Service conseil Zones alluviales (SCZA). Yverdon-les-Bains. 130 pp.

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

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