Office fédéral de l'environnement. Division Prévention des dangers

Espace nécessaire aux cours d'eau en méandres

Rapport final

24 décembre 2010

Grégory Paccaud, Christian Roulier
rue des Pêcheurs 8A, 1400 Yverdon-les-Bains ***Service conseil Zones alluviales***

Espace nécessaire aux cours d'eau en méandres

TABLE DES MATIERES

1	**Introduction**	**5**
1.1	Contexte	5
1.2	Etudes de cas	6
1.3	Les méandres en Suisse	6
2	**Géométrie d'un méandre**	**8**
2.1	Expression mathématique de la courbe du méandre	8
2.2	Propriétés de la courbe du méandre	14
2.3	Validation du modèle géométrique	16
2.3.1	*Aar*	*17*
2.3.2	*La Thur*	*18*
2.3.3	*Venoge*	*19*
3	**Géomorphologie des méandres**	**19**
3.1	Paramètres influençant la géomorphologie	20
3.1.1	*Influence du débit*	*21*
3.1.2	*Influence de la pente*	*21*
3.1.3	*Influence de la composition du substrat*	*22*
3.1.4	*Influence du débit solide*	*23*
3.2	Domaine d'occurrence des méandres	25
3.3	Dynamique	30
3.3.1	*Approche géologique*	*30*
3.3.2	*Profils en travers et profil en long*	*34*
3.3.3	*Dynamique en plan des méandres*	*35*
3.3.4	*Régularités et irrégularités*	*39*
3.4	Discussion	39
4	**Valeur naturelle des systèmes de méandres**	**40**
4.1	Valeurs naturelles	40
4.1.1	*Géomorphologie*	*41*
4.1.2	*Inondations*	*42*
4.1.3	*Annexes hydrauliques*	*43*
4.1.4	*Biocénoses*	*44*
4.1.5	*Connectivités*	*45*
4.2	Qualité de l'eau	48

5 Définition d'une procédure 48

5.1 Définition du style fluvial 49
5.2 Définition de l'espace fonctionnel 50
5.3 Caractérisation de la dynamique 51
5.3.1 Caractérisation de l'inondation 52
5.3.2 Caractérisation de l'influence de l'érosion et de la sédimentation 52
5.4 Evaluation des valeurs naturelles 54
5.4.1 Biocénoses et habitats 54
5.4.2 Connectivité longitudinale terrestre 59
5.4.3 Géomorphologie 60

6 Végétation des systèmes en méandres et des sites d'étude 63

6.1 Aar 64
6.1.1 Type 64
6.1.2 Végétation potentielle 64
6.1.3 Végétation présente 65
6.2 Thur 68
6.2.1 Type 68
6.2.2 Végétation potentielle 68
6.2.3 Végétation présente 69
6.3 Venoge 72
6.3.1 Type 72
6.3.2 Végétation potentielle 73
6.3.3 Végétation présente 74

7 Application de la procédure aux systèmes de référence 77

7.1 Aar 77
7.1.1 Définition du style fluvial 77
7.1.2 Définition de l'espace fonctionnel 78
7.1.3 Caractérisation de la dynamique 79
7.1.4 Evaluation des valeurs naturelles 82
7.2 Thur 83
7.2.1 Définition du style fluvial 83
7.2.2 Définition de l'espace fonctionnel 85
7.2.3 Caractérisation de la dynamique 86
7.2.4 Evaluation des valeurs naturelles 88
7.3 Venoge 91
7.3.1 Définition du style fluvial 91

7.3.2 Définition de l'espace fonctionnel 92
7.3.3 Caractérisation de la dynamique 93
7.3.4 Evaluation des valeurs naturelles 96

8 Bibliographie 98

Espace nécessaire aux cours d'eau en méandres

1 Introduction

1.1 Contexte

Le début du XXIe siècle marque un tournant dans la gestion des cours d'eau. On constate que l'artificialisation nuit à la qualité écologique des cours d'eau et à leurs milieux riverains. Les cours d'eau ont besoin d'espace, ce qui est favorable à la fois à la diversité biologique et à la sécurité.

L'espace nécessaire à réserver pour les cours d'eau a été défini dans un abaque publié dans plusieurs documents de la Confédération (brochure « Réserver de l'espace pour les cours d'eau » (OFEG et al. 2000), brochure « Idées directrices pour les cours d'eau » (Sieber et al. 2003). L'utilisation de cet abaque est pertinent pour les cours d'eau de petite et moyenne largeur (jusqu'à 15 m de largeur), mais ne s'applique pas aux cours d'eau de grandes dimensions.

Des développements de la méthode ont été conduits pour le Rhône dans le cadre de la troisième correction de ce fleuve, mais ils ne peuvent pas être transposés tels quels aux fleuves de plaine en raison de leur tendance à former des méandres. L'OFEV et les cantons sont donc confrontés à la problématique « détermination de l'espace pour le cours d'eau » dans le cadre de projets de revitalisation de fleuves ou de grandes rivières à méandres.

Le contrat du 14/20 mai 2009 de l'OFEV (mandant) au Service conseil Zones alluviales (SCZA, mandataire) mentionne sous point 2 les produits escomptés suivants :

- Recherche historique : description de l'état initial de trois cas d'étude,
- Image directrice,
- Définition d'une procédure standard : établissement d'un guide technique pour l'application,
- Validation et application de la procédure.

Le but de l'étude méandre est de définir le besoin d'espace des cours d'eau en méandres et d'identifier les valeurs écologiques clés de ces systèmes.

Ce document contient les bases accompagnant un guide pratique sur l'espace des cours en méandres, pouvant compléter la brochure de 2000 citée ci-dessus. Les bases théoriques sont issues de documents scientifiques sur la géomorphologie, l'hydraulique, la géométrie, l'écologie des cours d'eau en méandres.

Ce document s'adresse aux ingénieurs, aux planificateurs, aux responsables des administrations, aux étudiants et à toute personne intéressée par la gestion des cours d'eau en méandres.

1.2 Etudes de cas

Les notions présentées sont illustrées par trois études de cas (systèmes de référence) parmi des cours d'eau suisses qui sont ou étaient formés de méandres.

Le premier système est une rivière importante, dont les méandres ont été stabilisés mais pas rectifiés. Il s'agit de l'Aar entre Büren an der Aare BE et Altreu (BE, SO). Le débit moyen de l'Aar à cet endroit est de 208 m3/s ; la longueur de la zone d'étude est de 4,2 km.

Le deuxième système est la Thur juste avant son embouchure dans le Rhin. C'est une rivière relativement importante (débit moyen de 42.2 m3/s), elle a été corrigée de manière complètement rectiligne vers le milieu du XIXe siècle et elle est actuellement en voie de revitalisation. La longueur du secteur d'étude est de 2 km.

Le troisième système est la Venoge à Bussigny. A l'échelle suisse, cette rivière peut être qualifiée de moyenne grandeur, son débit moyen est d'environ 6 m3/s dans le secteur étudié. Elle est en grande partie non corrigée, c'est-à-dire que les méandres sont toujours actifs. La longueur du secteur d'étude est de 2 km.

1.3 Les méandres en Suisse

Les cours d'eau en méandres sont peu répandus dans notre pays car la Suisse abrite le cours supérieur des grands cours d'eau européens et les systèmes alluviaux présentant des méandres se situent généralement dans les cours inférieurs (AMOROS et PETTS 1993, Roché et FROCHOT 1993, ROSGEN 1996, BRAVARD et PETTS 2000).

La rareté des systèmes en méandres est aussi due au fait que les plaines alluviales de la Suisse ont été radicalement corrigées dès le début du XIXe siècle pour permettre le développement des activités humaines (GEPP et al. 1986, KUHN et AMIET 1988, NAST 2006). Ces rectifications de cours en méandres peuvent être vues comme une simplification de la gestion et de l'exploitation du territoire. En effet, un système actif de méandres est susceptible d'occuper un vaste espace car les méandres se déplacent, parfois sur de grandes zones. Il est évident que pour améliorer la rationalisation des exploitations agricoles qui bordent les rivières, il est plus simple que les cours d'eau soient droits et immobiles. Il en va de même pour la gestion de la propriété foncière. Comme les cours d'eau servent souvent de limite de parcelle, par mesure de stabilité et d'équité, on préfère que ces limites soient fixes.

Si les méandres occupent souvent les cours d'eau des étages des plaines et des collines (entre 200 et 600 m d'altitude), on en trouve

aussi le long des cours d'eau moyens et petits, ceci à toutes les altitudes et dans les différentes régions géographiques de notre pays.

Figure 1.1 : Etage alpin des Alpes (2184 m) : Aar du Tsan, Vallon de Réchy VS.

Figure 1.2 : Etage montagnard du Jura (1016 m), l'Orbe à la Vallée de Joux, Le Chenit VD.

Figure 1.3 : Etage collinéen du Plateau (460 m), La Versoix, Grand Bataillard VD (zone alluviale 118).

Les méandres enfoncés dans la molasse ne sont pas concernés par la présente étude.

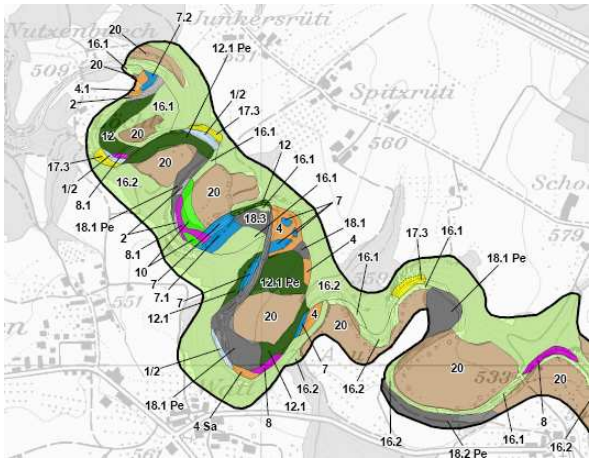


Figure 1.4 : Carte de la végétation de l'objet « Glatt nordwestlich Flawil SG » (zone alluviale 14). Les méandres de la Glatt se développent au fond de gorges dans la molasse.

2 Géométrie d'un méandre

Les méandres ont une forme bien caractéristique qui est indépendante des facteurs climatiques, c'est pourquoi on en trouve dans toutes les régions de la Terre, on en trouve même dans les courants océaniques tels que le gulf stream (source : *Coastal Carolina University*). La forme générale du méandre est également indépendante de la taille du cours d'eau, on peut en observer sur de petits ruisseaux, comme sur de grands fleuves tels que l'Amazone.

Le nom « méandre » tire son origine d'une rivière de Turquie qui avait été divinisée en raison de la régularité de sa forme. Dans la mythologie grecque, **Méandre** (en grec ancien Μαίανδρος / *Maiandros*) est un dieu fleuve attaché à la rivière Méandre (actuelle Büyük Menderes) source : *wikipedia*.

2.1 Expression mathématique de la courbe du méandre

La forme particulière et relativement invariante des méandres a intrigué de nombreux scientifiques depuis le début du XXe siècle. Le premier à avoir trouvé une expression mathématique de cette courbe est un géomorphologue américain nommé Leopold. (LANGBEIN et LEOPOLD, 1966). Il avait remarqué qu'en se déplaçant à vitesse constante sur le centre d'un cours en méandre, l'angle formé par la direction de son bateau (tangent à la trajectoire) et le Nord, variait de façon sinusoïdale au cours du temps. La courbe du méandre n'est donc pas sinusoïdale, mais généré par une fonction sinusoïdale.

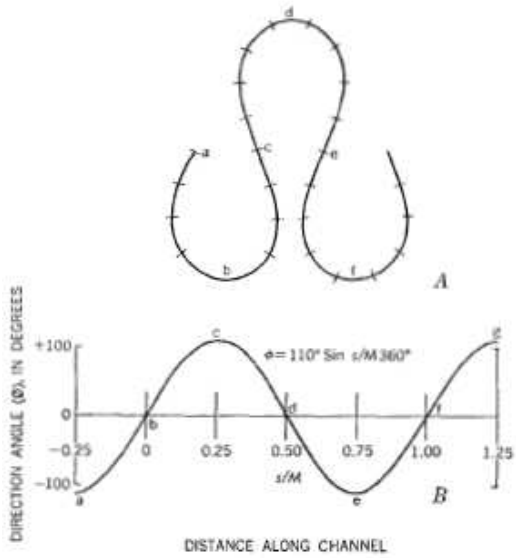


Figure 2.1 : courbe du méandre. Si l'on parcourt le méandre à vitesse constante, l'angle formé par la tangente à la trajectoire et le Nord (ou n'importe quelle direction fixée) varie dans le temps de manière sinusoïdale (LANGBEIN et LEOPOLD 1966).

En paramétrisation cartésienne, la courbe du méandre s'exprime de la manière suivante :

$$\left.\begin{array}{l} x(t) = \dfrac{L}{2\pi}\displaystyle\int_0^t \cos(\Psi_{\max}\sin(u))du \\ y(t) = \dfrac{L}{2\pi}\displaystyle\int_0^t \sin(\Psi_{\max}\sin(u))du \end{array}\right\} \quad 0 \le t < 2\pi$$

ψ_{max} : angle maximum entre la tangente à la courbe et l'horizontale (Ψ est l'angle entre la tangente à la courbe et l'horizontale pour n'importe quel point de la courbe).

L : longueur de la courbe pour une oscillation complète.

On remarque que la courbe est contrôlée par deux paramètres, ψ_{max} et *L*. Si on veut obtenir un méandre complet, t doit varier entre 0 et 2π. La figure suivante montre une courbe de méandre typique et différents paramètres qui caractérisent une fonction périodique (longueur d'onde et amplitude).

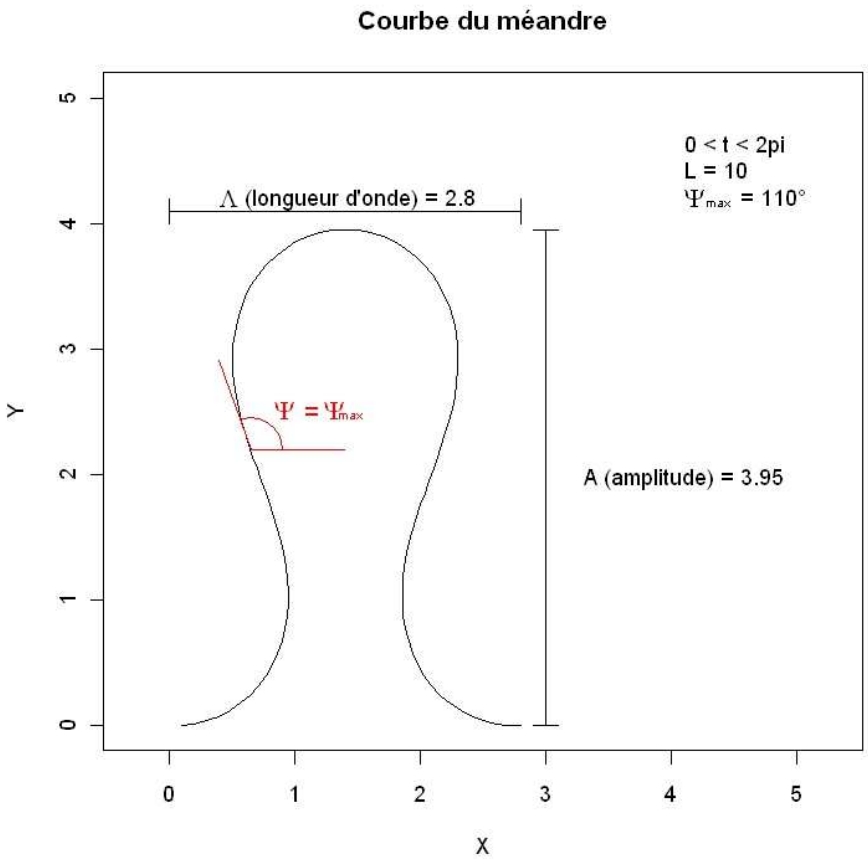


Figure 2.2 : Courbe caractéristique d'un méandre avec ses paramètres.

Le méandre ci-dessus a une longueur totale de 10 et l'angle formé par la tangente en un point et l'horizontale ne dépasse pas 110°. Cette forme de méandre est assez caractéristique des systèmes évoluant en terrains très plats.

Voyons maintenant l'influence de ψ_{max}.sur des courbes de méandre de longueur égale.

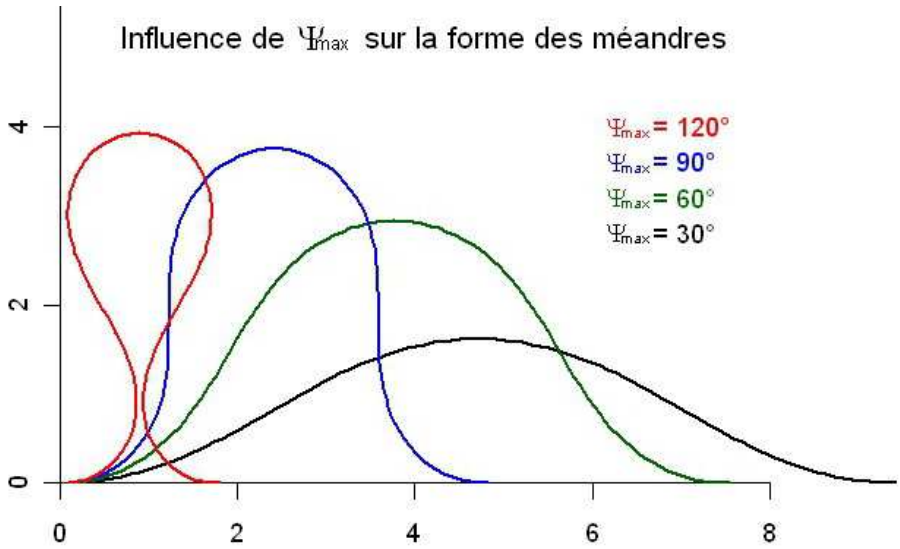


Figure 2.3 : Représentation de la courbe du méandre pour différentes valeurs de Ψ_{max}. Pour ces quatre exemples, la longueur de la courbe est égale à 10 et t varie entre 0 et 2π.

Pour des courbes de longueurs égales, on voit que plus Ψ_{max} augmente, plus l'amplitude augmente et la longueur d'onde diminue. Toutes ces courbes peuvent correspondre à des méandres existants. Voyons l'allure de ces courbes pour des méandres dont la longueur d'onde (Λ) est constante.

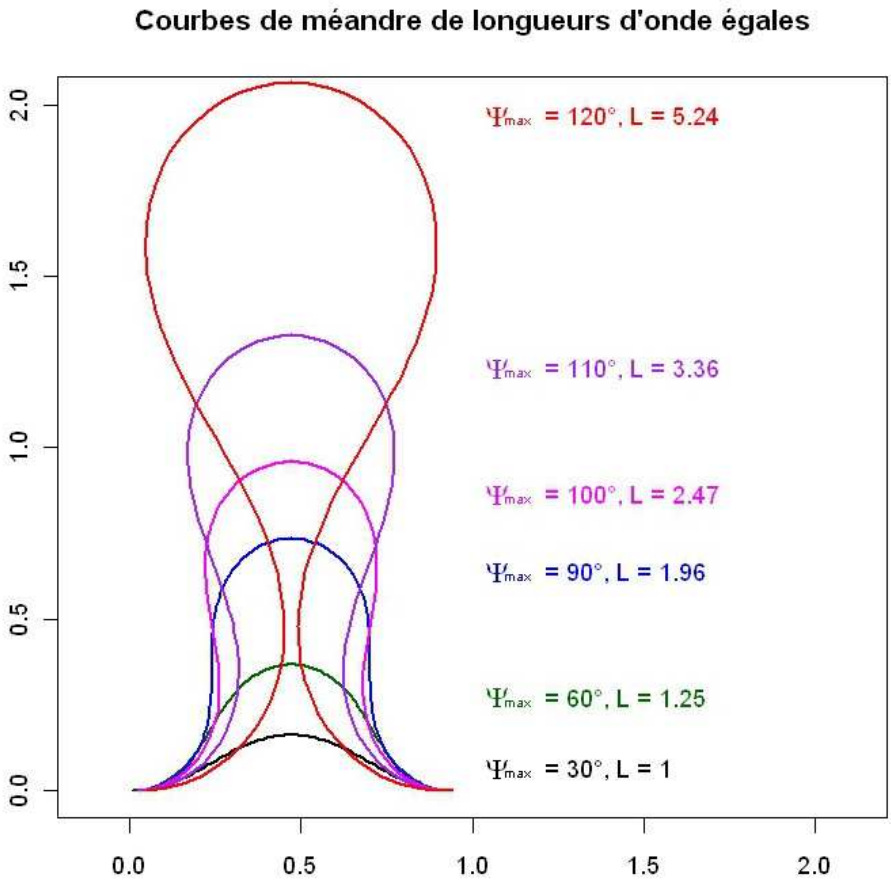


Figure 2.4 : Représentation de la courbe du méandre pour différentes valeurs de Ψ_{max}. Pour ces six courbes, la longueur d'onde est égale à 0.94 et t varie entre 0 et 2π.

On remarque que l'amplitude de la courbe est fortement influencée par Ψ_{max}.

L'étude de l'angle tangentiel maximum montre aussi que pour Ψ_{max} = 120° le méandre est près de se court-circuiter. En fait, le méandre se referme pour un angle de ~120.9° et cet angle corre spond également à l'amplitude maximale qu'un méandre peut avoir. Ainsi, le rapport entre l'amplitude et la longueur d'onde d'un méandre possède une limite théorique qui vaut ~2.3. Ce rapport est intéressant pour définir le besoin d'espace des cours d'eau en méandres. La figure suivante montre le rapport entre amplitude et longueur d'onde en fonction de Ψ_{max}.

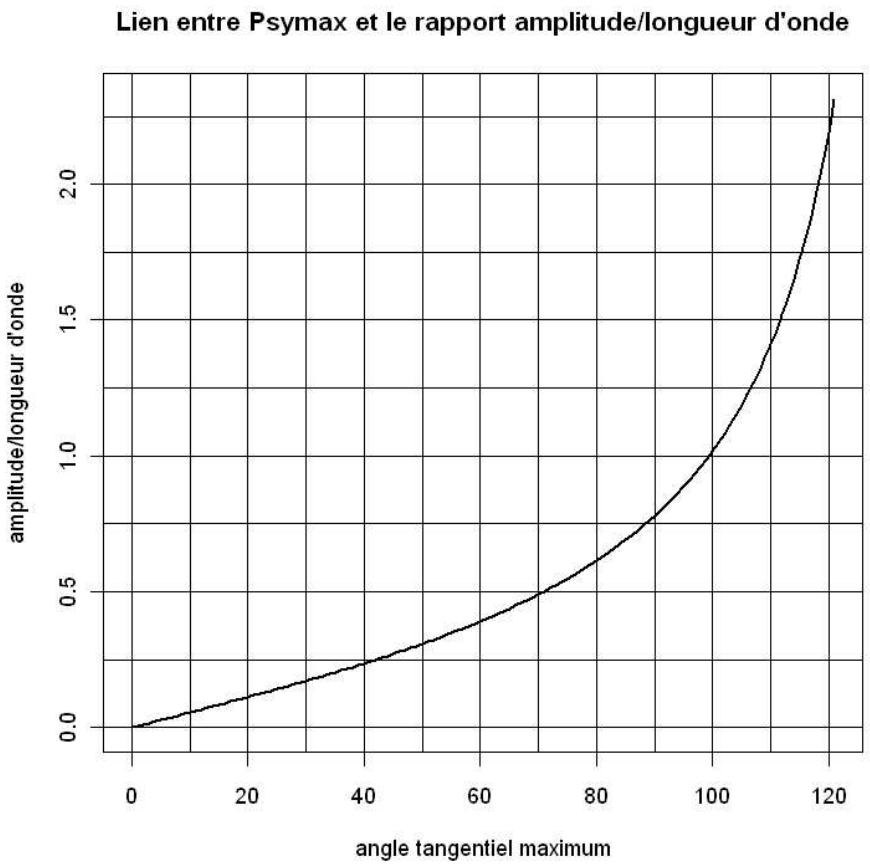


Figure 2.5 Pour la courbe du méandre, le rapport entre l'amplitude et la longueur d'onde dépend uniquement de l'angle tangentiel maximum. La connaissance de l'amplitude du méandre peut servir à définir l'espace nécessaire au cours d'eau.

Pour quantifier le degré de méandrement d'un cours d'eau, il est courant d'utiliser son *coefficient de sinuosité* qui est défini par le rapport entre la longueur du cours d'eau entre deux points et la distance en ligne droite entre ces deux points. Un graphique similaire au précédent peut être construit, qui exprime le coefficient de sinuosité en fonction de Ψ_{max}

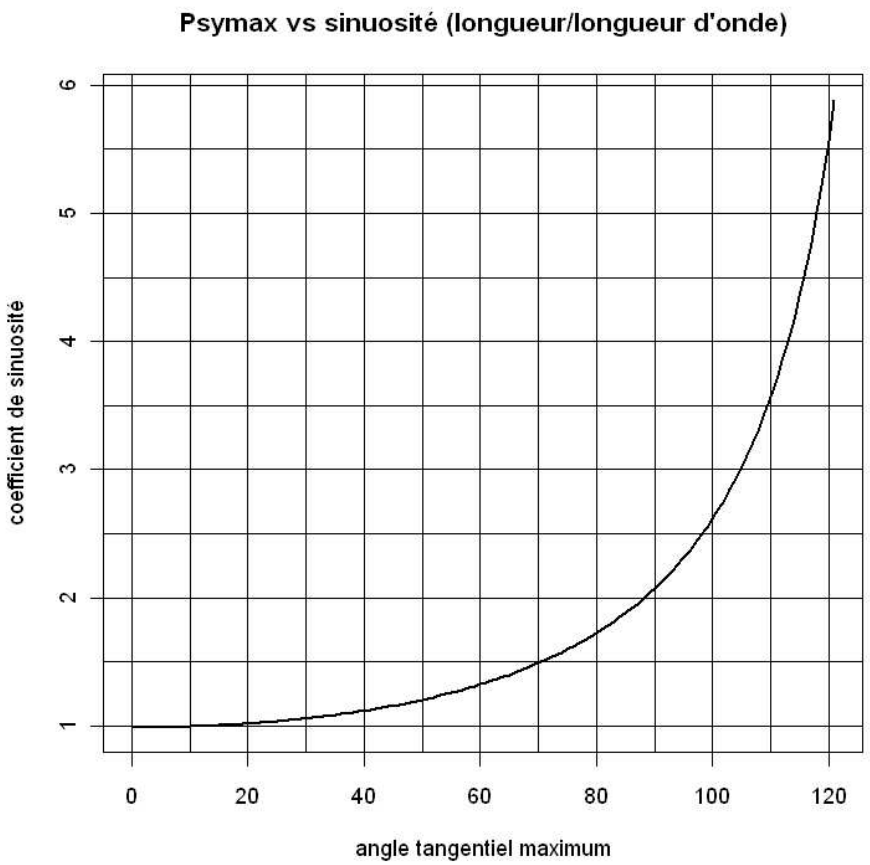


Figure 2.6 : Le rapport entre la longueur d'onde et la longueur totale d'un méandre dépend de sa forme. D'un point de vue géométrique, le coefficient de sinuosité d'un méandre dépend uniquement du paramètre Ψ_{max}.

Si on évalue la sinuosité des cours d'eau en Suisse, on considère qu'une valeur de 2 est déjà élevée. Or ce graphique montre que pour un méandre, le coefficient de sinuosité théorique maximal est de 5.88. Il faut bien être conscient qu'en général on mesure la sinuosité d'un système de méandres, qui comprend des parties plus ou moins rectilignes et des méandres qui sont en général à différents stades de développement.

Dans la pratique, l'angle théorique maximum de 120.9° ne peut pas être atteint. En effet, ces courbes représentent l'axe du méandre, c'est-à-dire le milieu du cours d'eau. Comme les cours d'eau ont une largeur non nulle, le méandre se ferme lorsque ses bords se touchent, autrement dit lorsque la distance entre les deux points les plus proches de l'axe est inférieure à la largeur du cours d'eau. La valeur théorique maximum de Ψ_{max} diminue si on tient compte de l'influence de la largeur du cours d'eau. La figure suivante donne la valeur théorique maximum de Ψ_{max} en fonction du rapport entre la longueur d'onde et la largeur du cours d'eau.

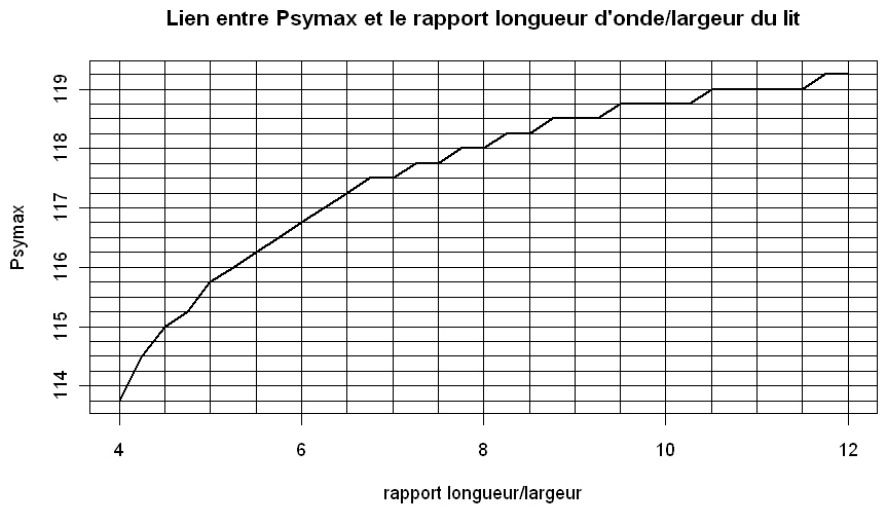


Figure 2.7 : Ce graphique montre l'angle tangentiel maximum d'un méandre en fonction du rapport entre sa longueur d'onde et la largeur de son lit, à savoir la largeur plein bord.

Les « marches d'escaliers » sont dues aux approximations numériques. La précision reste toutefois assez bonne. Ce graphique et le précédent peuvent être utiles pour évaluer l'espace nécessaire aux méandres. Certains auteurs (YALIN et DA SILVA, 2001), affirment que la longueur d'onde d'un méandre est égale à six fois sa largeur de régime. Si l'on admet que cette valeur est juste, on peut lire sur le graphique de la figure 2.7, que l'angle tangentiel maximum serait alors 116.75° et on voit sur la figure 5 que l'amplitude d'un tel méandre est de 1.8 fois sa longueur d'onde, donc selon cette hypothèse, **l'amplitude maximum d'un méandre est de 10.8 (6 x 1.8) fois la largeur de son lit.**

2.2 Propriétés de la courbe du méandre

D'après l'article qui présente l'équation de la courbe du méandre (LANGBEIN et LEOPOLD, 1966), cette dernière aurait trois propriétés intéressantes :

- la courbe minimise la variance du changement de direction. Formellement cela signifie que parmi toutes les courbes de longueur L allant de A à B (avec L > AB), si on mesure à intervalles réguliers l'angle entre la tangente à la courbe et la droite passant par A et B, la somme du carré de cet angle est minimale pour la courbe du méandre,
- la trajectoire du méandre correspond également au chemin le plus probable d'une personne qui marche de façon aléatoire entre un point A et un point B. Par marche aléatoire, on entend que à chaque pas, le changement de direction est une variable aléatoire qui suit une distribution gaussienne,

– minimisation de la courbure. Parmi toutes les courbes de longueur L allant de A à B (avec L > AB), la courbe du méandre est celle dont la courbure moyenne est minimum.

Ces propriétés ne font pas l'objet d'une démonstration rigoureuse, elles doivent donc être interprétées avec beaucoup de réserve.

D'après le site internet *mathcurve* (FERREOL 2005) pour des valeurs de ψ_{max} situées entre 90° et 120°, la courbe du méandre es t très proche de la **courbe élastique**. C'est la forme que prend une tige métallique ou une poutre, soumise à un effort de compression axiale ; cette courbe est également appelée *courbe de flambage*. Voici quelques illustrations de courbe élastique.

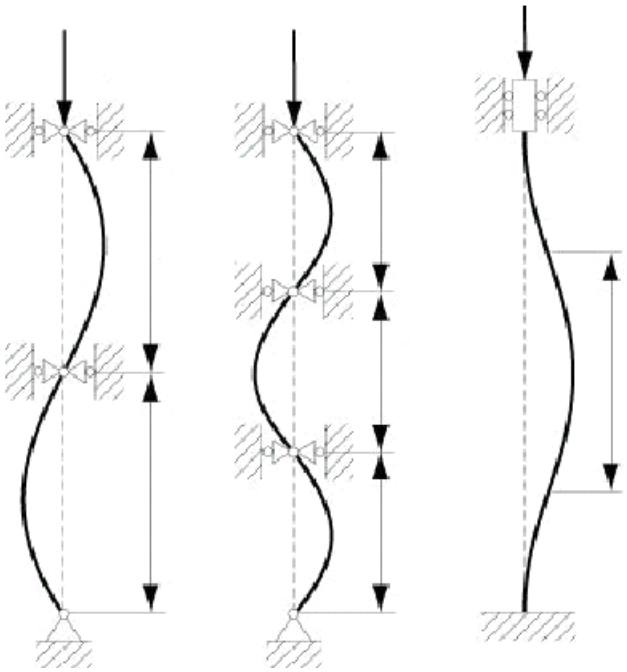


Figure 2.8 : Lorsqu'un solide allongé est soumis à une compression axiale, il prend une forme de courbe élastique (flambage), qui ressemble fortement à la courbe du méandre. On peut voir que dans ce cas, le nombre d'oscillations dépend du nombre de points fixé à l'axe du solide.

Figure 2.9 : Accident ferroviaire près de Greenville, Caroline du Sud, 1965.

Lors de cet accident ferroviaire, des rails transportés ont été comprimés et ont pris une forme de courbe élastique.

Figure 2.10 : Les serpents prennent également la forme de courbes élastiques qui minimisent leur courbure.

Ces images montrent bien qu'il existe une certaine analogie entre la déformation des corps solides allongés et la forme des méandres. A l'heure actuelle, les raisons de cette analogie ne semblent pas connues.

2.3 Validation du modèle géométrique

Voyons maintenant comment la courbe géométrique du méandre s'ajuste sur nos trois systèmes de référence :

2.3.1 Aar

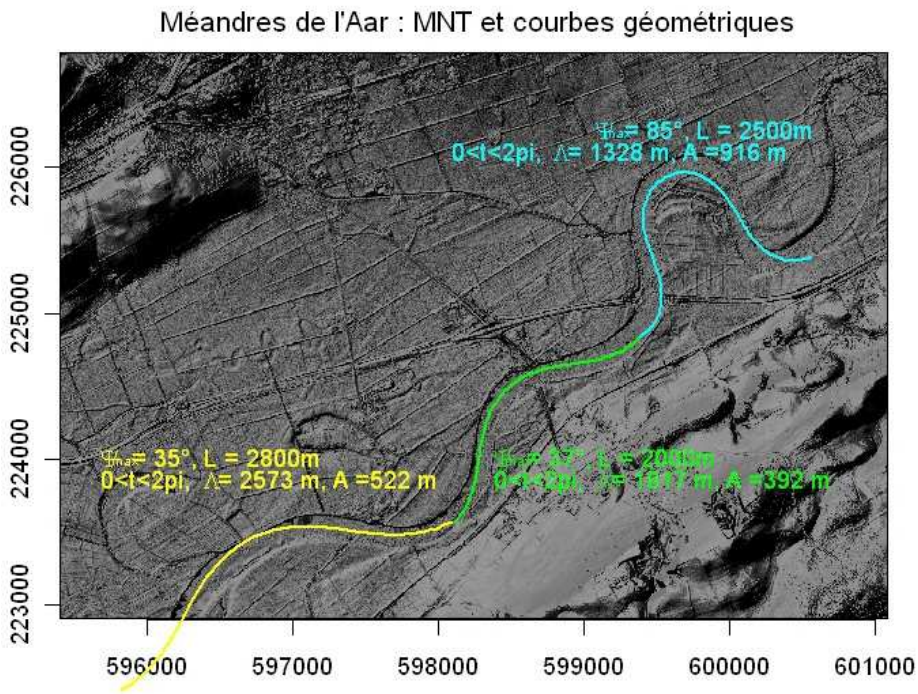


Figure 2.11 : MNT de l'Aar et ajustement de courbes géométriques sur ses méandres stabilisés.

On voit que le modèle géométrique s'ajuste bien au tracé réel. De plus, ce qui est intéressant ici, c'est que l'on aperçoit des méandres de formes très différentes, mais en adaptant correctement la valeur de Ψ_{max}, on peut modéliser chaque méandre à l'aide de la courbe des méandres.

2.3.2 La Thur

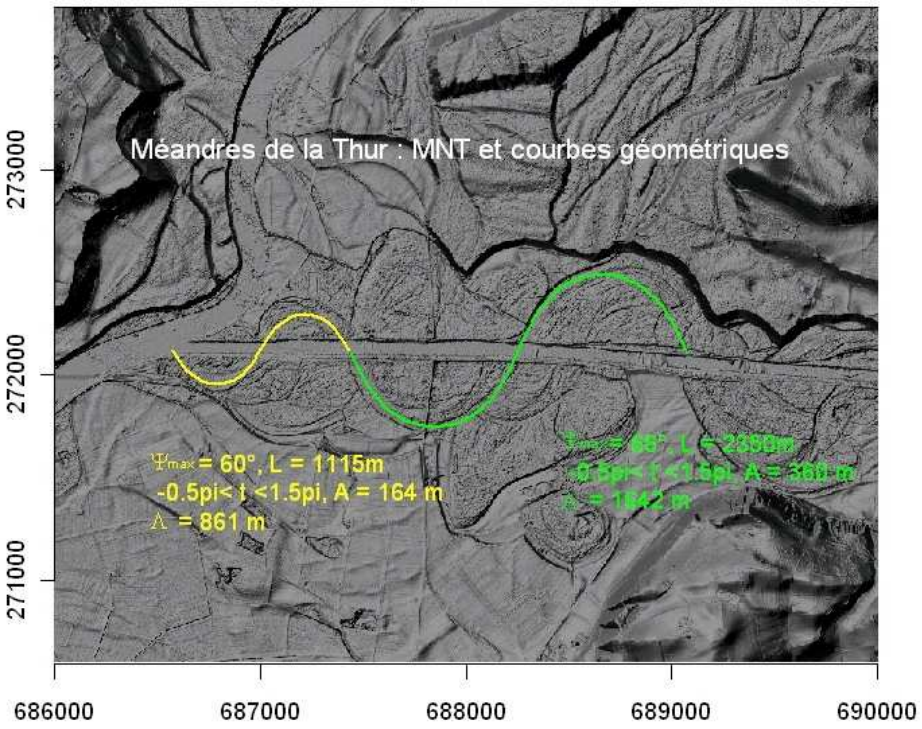


Figure 2.12 : Modèle numérique de terrain de la Thur et ajustement de courbes géométriques sur d'anciens méandres.

La Thur a été corrigée vers le milieu du XIXe siècle, mais le terrain a gardé la mémoire des anciens chenaux de la Thur. Le tracé des méandres les mieux marqués correspond au cours de la Thur juste avant sa correction.

Dans cet exemple, on a une succession de deux méandres. Contrairement aux courbes de méandres présentées jusque là, ici *t* varie entre -π/2 et 3π/2 (déphasage). On voit que les courbes géométriques s'ajustent bien avec le modèle numérique de terrain (abrégé : MNT). Le relief indique également qu'au cours du temps, les méandres ont évolué et se sont déplacés.

2.3.3 Venoge

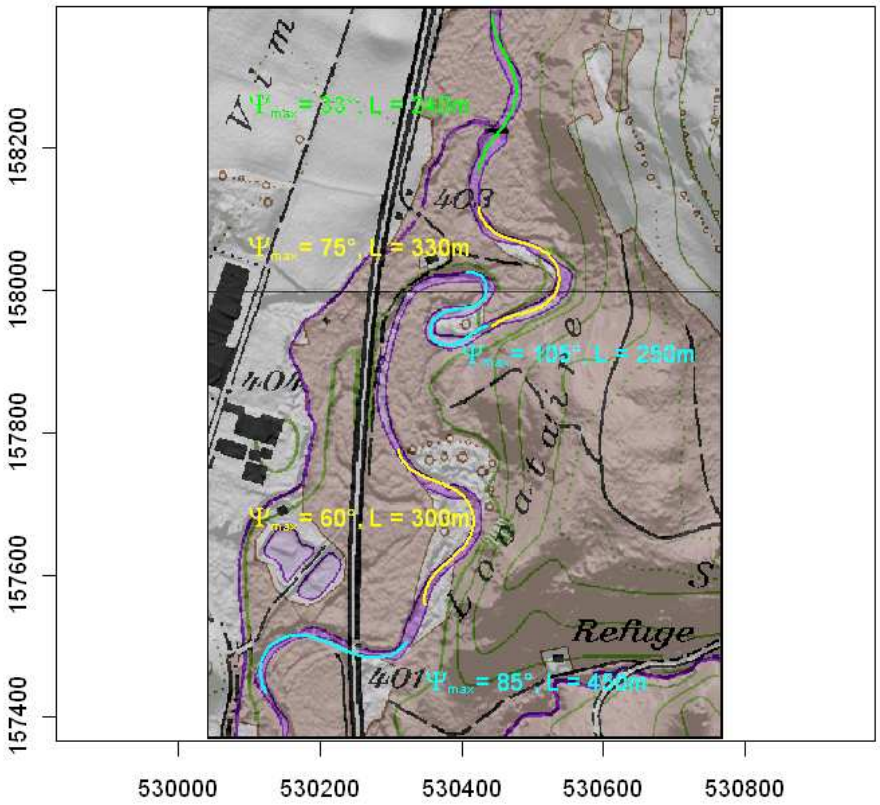


Figure 2.13 : Carte de la Venoge et superposition des courbes géométriques des méandres.

On voit ici une succession de méandres dont la longueur est assez constante alors que Ψ_{max} varie entre 33° et 105°. Une fois de plus, les courbes géométriques s'ajustent bien au tracé réel. La plupart des méandres sont entiers (une longueur d'onde) ou presque entiers. Certaines parties du tracé ne sont pas en méandres, mais constituent une liaison entre deux méandres.

Après avoir passé en revue nos trois systèmes de référence, nous pouvons affirmer que le modèle géométrique du méandre est bien adapté pour décrire les méandres réels. Certes, ses propriétés géométriques ne sont pas toutes comprises, mais les relations entre longueur d'onde, amplitude, forme et sinuosité sont bien établies et reposent sur des fondements mathématiques. Ces résultats vont donc contribuer à définir l'espace dont les cours en méandres ont besoin et vont également nous aider à comprendre le fonctionnement général d'un système de méandres.

3 Géomorphologie des méandres

Une approche purement géométrique est une bonne base pour décrire le tracé d'un cours d'eau en méandres et fixer des valeurs limite, mais ne suffit pas à définir son besoin d'espace et son fonctionnement ; surtout dans le cas d'un système corrigé, où les

paramètres géométriques naturels (amplitude, longueur d'onde) ne sont, a priori, pas connus. La géométrie d'un méandre est subordonnée à divers paramètres physiques impliquant des interactions entre le cours d'eau et son lit. Certains auteurs parlent de variables de contrôle et de variable de réponse (MALAVOI 1998). Dans ce sens, on peut dire que la géométrie d'un méandre est une conséquence de certains paramètres hydrologiques et géologiques.

La géomorphologie des méandres est encore actuellement un sujet de recherche pour de nombreux scientifiques, certains ont même créé des méandres artificiels en laboratoires (BRAUDRICK et al. 2009). On dispose de plusieurs indices qui montrent que la mécanique des méandres est régie par des lois générales. Il s'agit notamment de l'universalité de leur forme, des analogies avec la physique des solides ou encore de l'existence d'une expression mathématique de la courbe des méandres. Malheureusement, à l'heure actuelle, ces principes sont mal connus, et il est difficile d'exprimer la géométrie ou la géomorphologie d'un méandre comme une fonction des paramètres du terrain.

Cela dit, une bonne compréhension de la géomorphologie des méandres est indispensable pour répondre aux besoins de cette étude. C'est pourquoi, ce chapitre aborde le fonctionnement des méandres sous un angle purement géomorphologique en laissant momentanément de côté les notions avancées au chapitre 2.

Pour commencer, nous parlerons des paramètres qui influencent le style fluvial du cours d'eau et son emprise spatiale, puis nous aborderons les aspects de dynamique qui sont importants pour la diversité de la mosaïque végétale et enfin nous discuterons des mécanismes et principes physiques généraux qui régissent le fonctionnement des méandres ainsi que des limites des connaissances actuelles.

3.1 Paramètres influençant la géomorphologie

Nous avons choisi de passer en revue les quatre paramètres qui influencent le plus la géomorphologie d'un cours d'eau. Il s'agit :

- du débit d'eau,
- de la pente de la vallée,
- de la composition de la berge,
- du débit solide.

Par géomorphologie, on entend bien sûr tout ce qui est lié à la forme du lit, mais également ce qui concerne le style fluvial et la dynamique.

3.1.1 Influence du débit

Le débit d'un cours d'eau contribue largement à façonner sa morphologie. Il est évident que l'emprise spatiale du cours d'eau est fortement liée à la quantité d'eau qui transite dans le profil. En règle générale, plus le débit est important, plus le cours d'eau est large et plus son besoin d'espace est grand.

Par contre le débit n'est pas déterminant pour le style fluvial. On observe aussi bien des cours en méandres pour de petits cours d'eau que pour des fleuves. Comme nous l'avons dit précédemment, le régime en méandres est indépendant de l'échelle spatiale.

Pour caractériser un style fluvial ou un besoin d'espace, le débit est fréquemment utilisé. Il est donc important de préciser de quel débit on parle. En effet, pour un même cours d'eau, cette grandeur varie fortement dans le temps. La Venoge, par exemple, a un débit de moyen de 3.91 m3/s à la station d'Ecublens, alors qu'au même endroit ce débit est de 49 m3/s pour une crue biennale (Q_2). Comme il serait fastidieux de travailler avec une série temporelle de débit, il est préférable de choisir un débit caractéristique par secteur de cours d'eau. Pour notre étude, le débit caractéristique doit être celui qui influence le plus la morphologie du lit (débit morphogène). Dans ce but, certains auteurs utilisent la théorie du débit dominant (AMOROS et PETTS, 1993) qui avance que le débit dominant est celui pour lequel, à long terme, la charge sédimentaire transportée est maximum. Cette charge dépend de l'énergie du cours d'eau et de la fréquence à laquelle il se produit. Pour un débit trop faible (par exemple le débit moyen), l'eau n'a pas assez d'énergie pour interagir avec la berge et façonner son lit. A l'inverse, un débit trop élevé (par exemple Q100) ne se produit pas assez souvent pour influencer la forme moyenne du lit. Il a été montré que le débit dominant est proche du débit « plein bord », soit le débit maximal sans débordement. Il est commode d'associer le débit morphogène à un temps de retour. Il est généralement admis que ce temps de retour est compris entre 1 et 2 ans pour les systèmes en méandres (AMOROS et PETTS, 1993); ce qui est inférieur aux cours d'eau en tresses.

Le débit influence la puissance du cours d'eau donc la charge sédimentaire transportée ainsi que la vitesse d'érosion et de sédimentation.

En résumé, le débit morphogène d'un cours en méandre se situe entre Q_1 et Q_2. Il ne détermine pas le style fluvial, mais il influence sa largeur, son besoin d'espace et sa dynamique.

3.1.2 Influence de la pente

La pente de la vallée est sans aucun doute le paramètre qui influence le plus le style fluvial. Les cours d'eau en méandres ne sont observés que pour de faibles pentes. Selon notre connaissance des systèmes

suisses, il n'y a pas de cours en méandre sur des vallées dont la pente dépasse 1%, et il y a de toute façon des méandres (dans de systèmes naturels) si cette pente est inférieure à 1‰. Entre ces deux seuils, le style fluvial va dépendre d'autres paramètres.

La zonation classique des cours d'eau selon leur profil en long montre que pour de fortes pentes (>6%), le style fluviale est un torrent. Quand la pente diminue un peu, on obtient un cours en tresses et enfin quand arrive dans des zones de plaine, le cours d'eau forme des méandres, et dans certains cas des anastomoses, mais pas en Suisse.

La pente influence directement la vitesse du cours d'eau et son énergie cinétique dont dépend la taille des matériaux transportés. Ainsi, pour des vitesses de courant élevées tous les sédiments fins, ainsi qu'une partie des matériaux plus grossiers sont transportés et évacués vers l'aval. En cas de crue, des matériaux plus gros sont également entraînés. Or les sédiments les plus fins sont les plus cohésifs. Ainsi, si la pente de la vallée est forte, on a un cours d'eau qui coule avec une grande énergie dans un lit peu cohésif. On obtient alors un tracé quasi rectiligne dans la direction de la ligne de pente maximale (torrent).

Ensuite, dès que la pente de la vallée diminue, le courant perd de la vitesse et les sédiments les plus grossiers se déposent en premier, les plus fins continuent leur progression vers l'aval. Le style fluvial en tresses est caractérisé par une pluralité de bras légèrement sinueux qui s'entrelacent et cheminent dans des matériaux graveleux. Dans de tels systèmes, la faible cohésion du lit favorise la multiplicité des chenaux et une faible profondeur d'eau. En cas de crue, le lit ne résiste pas au courant ce qui empêche que des méandres plus sinueux ne se développent.

Enfin, lorsque qu'un cours d'eau approche de son embouchure en traversant une plaine, il a une vitesse lente et ne transporte plus que des sédiments fins. La cohésion du substrat est alors significative par rapport à l'énergie du courant. Le cours d'eau interagit avec son lit de façon lente et continue. Il se déplace latéralement par des processus d'érosion et de sédimentation qui sont à l'origine de la formation des méandres.

3.1.3 Influence de la composition du substrat

Comme nous l'avons déjà mentionné au point précédent, les berges et tout le substrat susceptible d'être atteint par le cours d'eau ont une influence sur la morphologie. La propriété de cohésion est particulièrement importante. Rappelons que la cohésion d'un sol est liée à la taille des éléments qui le constituent. Plus ils sont fins, plus la cohésion est importante, ceci en raison des forces électrostatiques qui interviennent lorsque la surface de contact entre particules augmente.

On observe que plus le substrat est cohésif, plus les méandres sont sinueux. En effet, contrairement au style en tresses, le lit d'un méandre peut résister à des crues importantes et poursuivre son développement une fois la crue passée. Certains fleuves sont très incisés et s'enfoncent dans la roche mère, à l'image du grand Canyon ou, en Suisse, de la Sarine en aval de Rossens ou de la Glatt dans la région de Flawil.

La cohésion du substrat influence donc la sinuosité des méandres (Ψ_{max}) et également leur vitesse de déplacement. En effet, des substrats très cohésifs (roche ou argile) seront érodés moins vite que des berges plus friables (limons). Une forte résistance à l'érosion permet aux méandres d'atteindre des stades avancés de développement, c'est-à-dire une forme très sinueuse.

3.1.4 Influence du débit solide

Un principe fréquemment utilisé en morphologie fluviale est que « *les chenaux fluviaux ajustent leur morphologie en réponse aux variations de l'écoulement et du transport de sédiments* » (AMOROS et PETTS, 1993). Le guide technique n°2 sur la détermination de l'espace de liberté des cours d'eau (MALAVOI, 1998) en donne une formulation plus précise : « *On admet donc que tout cours d'eau naturel va adapter sa morphologie (largeur, profondeur, pente du lit, sinuosité, longueur d'arc des méandres, …) pour assurer le transit optimal des débits liquides et solides.* ». Ce principe d'équilibre dynamique mentionne explicitement un lien direct entre morphologie et débit solide. En effet, l'existence de transport solide signifie que le cours d'eau interagit avec son lit ; car la majorité des sédiments ne sont pas transportés d'une traite de la source à l'embouchure ; le transport se fait par étapes au cours desquelles s'alternent des phases d'érosion et de sédimentation. Il est donc légitime de considérer que le débit solide est un élément déterminant de la morphologie.

Or le débit solide est, lui aussi, influencé par la morphologie du lit, ainsi que par le débit liquide. La quantité des sédiments transportés dépend de la vitesse du courant qui elle-même dépend de la pente du lit et de l'intensité du débit liquide. La nature des matériaux érodés dépend de la texture du lit et des berges, alors que les sédiments qui sont déposés vont modifier localement la morphologie du cours. On comprend bien que la morphologie du lit et le débit solide s'influencent mutuellement, et s'ajustent l'un à l'autre. Mais il est délicat de parler des causes (débit solide) et d'effets (géomorphologie).

S'il est difficile de prédire l'influence exacte du débit solide sur la morphologie, nous pouvons plus facilement, à l'aide d'un exemple, montrer comment une variation du débit solide par rapport à une condition d'équilibre modifie la dynamique de la morphologie. En anticipant sur le chapitre 3.3, examinons le profil en travers de la partie dynamique d'un méandre :

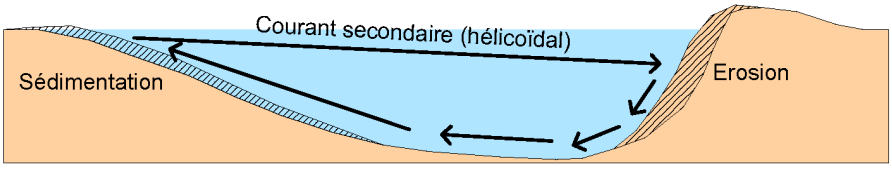


Figure 3.1 : Profil en travers d'un méandre. L'érosion est due au courant secondaire.

Le profil en travers d'un méandre n'est pas symétrique (sauf aux points d'inflexion). La berge située à l'extérieure de la courbe est en pente abrupte et elle est sujette à l'érosion. La berge à l'intérieur de la courbe est en pente douce, les sédiments s'y déposent.

Nous avons dit que des méandres se formaient pour des terrains à faible pente et à forte cohésion. A priori, ces conditions semblent favoriser la stabilité plutôt que la dynamique. Pourtant, certains systèmes de méandres évoluent rapidement. L'explication réside dans l'étude de la section d'écoulement. A l'entrée d'une courbe, le courant est accéléré à cause de la pente transversale, il est ainsi dirigé contre la rive extérieure avec une vitesse considérable ce qui génère de l'érosion. Puis, chargé en sédiments et après avoir dissipé une partie de son énergie, il se redirige en direction de la berge en pente douce, où une partie des sédiments transportés seront déposés. Ce type de courant est appelé secondaire, car il n'est pas dirigé dans la direction du cours d'eau. Et comme la boucle décrite ci-dessus progresse aussi vers l'aval, le courant est hélicoïdal.

Lorsque le transport solide est équilibré, le volume érodé est égal au volume sédimenté, la forme de la section d'écoulement ne change pas, et le chenal se déplace simplement vers l'extérieur de la courbe. Supposons maintenant que, suite à une perturbation en amont, le débit solide entrant soit diminué. La berge extérieure va continuer à s'éroder mais la berge intérieure ne progressera pas. Alors, dans un premier temps, le lit va s'élargir ; puis l'intensité du courant secondaire va diminuer car la pente latérale diminuera, ce qui va freiner l'érosion. Enfin, le fond du lit remontera légèrement suite à l'élargissement du lit. Donc une réduction de l'apport en débit solide provoque un élargissement de la section, un ralentissement de la dynamique et une surélévation du fond. Un excès d'apport sédimentaire peut provoquer les effets inverses.

En résumé, le débit solide est fortement dépendant des trois autres paramètres cités dans ce chapitre, à savoir le débit liquide, la pente du lit et la composition du substrat. Mais nous avons montré que des variations de débit solide sont susceptibles de modifier la dynamique de la morphologie et dans une certaine mesure, la géométrie du lit, c'est pourquoi ce paramètre reste important.

3.2 Domaine d'occurrence des méandres

Nous avons passé en revue les paramètres qui influencent le plus le style fluvial d'un cours d'eau et avons décrit la nature de ces influences. Maintenant, nous allons définir pour quelles plages de valeurs un cours d'eau adoptera un style en méandres. Autrement dit, nous allons fixer le domaine d'application de la procédure en fonction des paramètres qui contrôlent le style fluvial, à savoir le débit, la pente et la composition du substrat. Cette tâche est plus ardue qu'il n'y paraît et il est nécessaire d'aborder certaines considérations théoriques avant d'entrer dans le vif du sujet.

En préambule, nous rappellerons que le phénomène des méandres n'est pas évident à comprendre. Intuitivement, on aurait tendance à penser que l'eau s'écoule de haut en bas, en utilisant le chemin le plus direct et que d'éventuelles sinuosités sont dues à des obstacles qui empêchent le cours d'eau d'aller tout droit. Mais ce n'est pas le cas. On peut observer des méandres sur un terrain homogène et sans obstacle.

Comme preuve, voici une illustration issue d'une thèse qui traite du ruissellement sur un plan incliné (LE GRAND-PITEIRA, 2006).

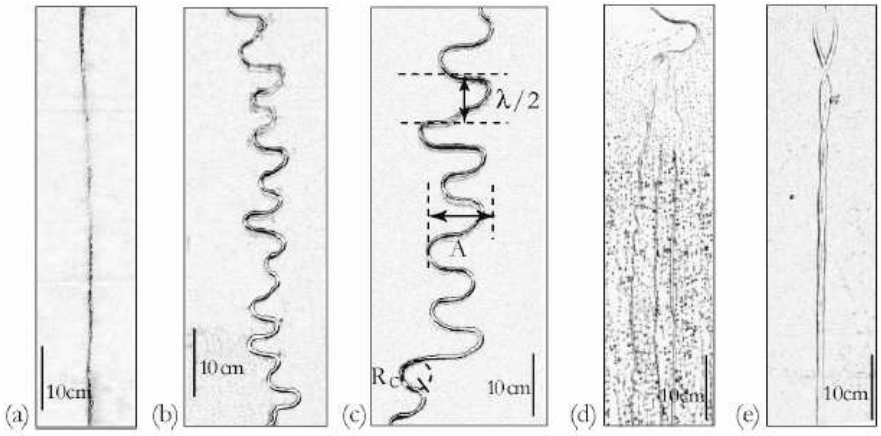


Figure 3.2 : Filet d'eau s'écoulant sur une plaque de Mylar pour des débits croissants. α=32°. (a) Filet droit, débit Q=0,50 mL/s. (b) et (c) Méandres stationnaires, Q=1,08mL/s et Q=1,40 mL/s respectivement. (d) Régime instable, α=80°, Q=1,27 mL/min (e) Restabilisation en feuilles de sauge, α=80°, Q=10,2 mL/s (LE GRAND-PITEIRA, 2006).

Les résultats de cette expérience montrent qu'en faisant varier le débit ou l'inclinaison d'un plan, on assiste à la formation de différents styles d'écoulement. Pour une valeur d'inclinaison relativement basse et un faible débit, le filet d'eau est rectiligne. Si on augmente le débit, on assiste à la formation de méandres dont la forme ressemble tout à fait à des méandres de cours d'eau. Si on augmente encore la pente, le régime devient instable et si on augmente encore le débit, on retrouve un tracé rectiligne. Remarquons que, dans cette expérience de laboratoire, le support est homogène et sans obstacle et qu'il n'y a pas de transport solide. Cette thèse met également en évidence

l'existence de seuils qui marquent la frontière entre les différents styles d'écoulement.

Ces résultats sont intéressants car ils montrent qu'on peut facilement obtenir des méandres en laboratoire, que ce type de régime survient pour des conditions de débit et de pente particuliers, que des obstacles ou des perturbations du milieu ne sont pas nécessaires à leur formation et qu'ils se forment malgré l'absence de débit solide.

Les méandres correspondent ici à un état de stabilité de l'écoulement pour certaines valeurs de débit, de pente et de rugosité. La différence principale avec un système naturel est l'absence d'interaction entre le filet d'eau et son support (pas de débit solide) et la stabilité des méandres (pas de dynamique).

Compte tenu de ce qui précède nous pouvons affirmer que pour une rugosité donnée, le style fluvial dépend des conditions de pente et de débit et qu'il existe des valeurs seuil entre les différents régimes. Il est donc possible de procéder à une classification selon ces trois paramètres. Quant au débit solide, il n'est pas directement impliqué dans la détermination du style fluvial. Par contre, il est fortement lié à la dynamique.

Plusieurs auteurs ont proposé un système de classification des styles fluviaux selon divers paramètres. Nous allons en passer quelques uns en revue.

Le professeur Leopold (LEOPOLD et WOLMAN, 1957) propose une relation empirique entre la pente et le débit qui définit la limite entre le style en tresses et celui en méandres. Cette relation s'exprime par la formule suivante : $s = 0.06 * Qf^{-0.44}$

- s est la pente moyenne du cours d'eau en m/m. (et non la pente de la vallée),
- Qf est le débit plein bord en ft^3/s.

En système métrique cette formule vaut : $s = 0.013*Q^{-0.44}$

- Q est le débit plein bord en m^3/s.

Pour des valeurs de débit comprises entre 0 et 1000 m3/s, le graphique à l'allure suivante :

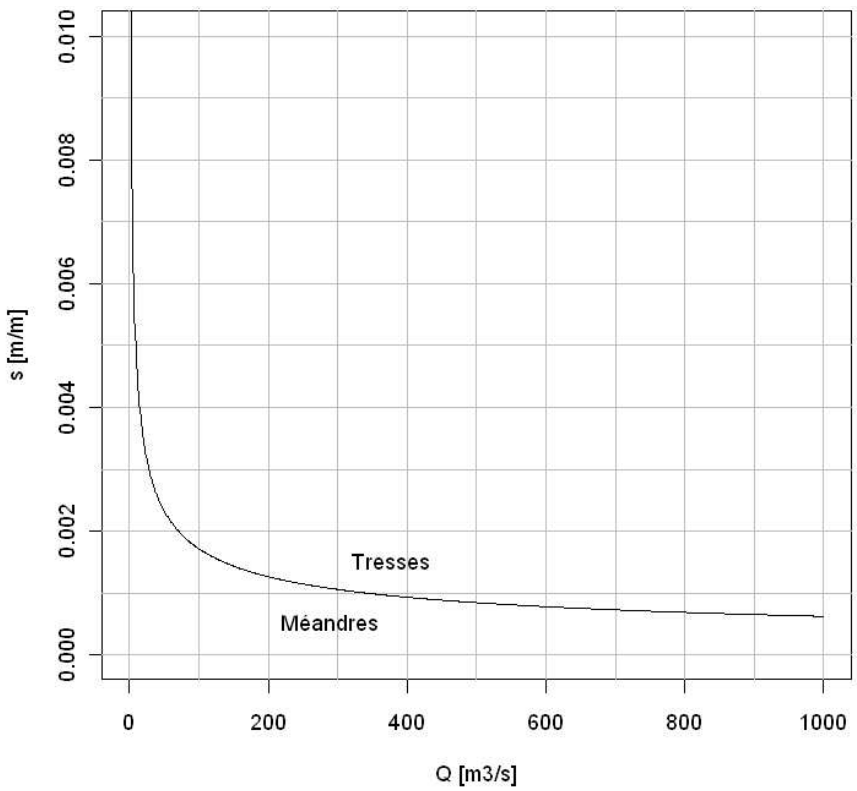


Figure 3.3 : Classification du style fluvial d'un cours d'eau d'après sa pente et son débit selon la formule de Leopold (Leopold et Wolman 1957).

Cette relation empirique a été définie expérimentalement sur la base d'observations de grands cours d'eau d'Amérique du Nord. Elle semble également bien appropriée pour les trois cours d'eau de notre étude de cas, ainsi que pour la Broye et le Rhône qui ne sont pas des cours d'eau en méandres. Le reproche qu'on peut adresser à cette formule est qu'elle demande une connaissance a priori de la pente du cours d'eau. Si on part de l'idée que l'on veut revitaliser un cours d'eau qui a été corrigé en un tronçon rectiligne, cette valeur n'est pas forcément connue. De plus, cette formule ne tient pas compte de la composition du lit et de la résistance à l'érosion. Ces facteurs peuvent aussi influencer le style fluvial.

Certains auteurs ont proposé des formules qui tiennent compte de la granulométrie des sédiments (D_m50) qui composent le lit (HENDERSON 1966) ou qui tiennent compte de la pente de la vallée au lieu de la pente du cours d'eau (VAN DEN BERG, 1995). Mais curieusement, ces deux auteurs supposent que pour des conditions de pente et de débit équivalents, les cours en méandres sont plus fréquents lorsque le diamètre médian des sédiments est grand. Comme cette idée est en complète contradiction avec nos précédentes réflexions, nous n'allons pas présenter leurs travaux ici.

Une approche plus récente repose sur l'étude des turbulences et de la rugosité des lits des cours d'eau (YALIN et DA SILVA, 2001). D'après leurs recherches, le régime des cours d'eau peut être caractérisé par trois paramètres : la largeur de régime (B), la profondeur de régime

(h) et le diamètre moyen des sédiments du lit (D). Le rapport B/h caractérise les turbulences horizontales et le rapport h/D est inversement proportionnel à la rugosité relative du lit. La rugosité est liée aux forces de frottements. Les régimes en méandres sont atteints pour des conditions de faibles turbulences (B/h petit) et une faible rugosité relative (h/D élevé). Leur recherche explique dans quelles conditions des cours en méandres peuvent se former et montrent que les cours d'eau en méandres subissent peu de turbulences et peu de frottement. Le diagramme de Yalin et da Silva est souvent utilisé pour caractériser le régime d'un cours d'eau. Notons qu'il existe plusieurs versions de ces diagrammes dont certaines s'éloignent passablement de la version originale.

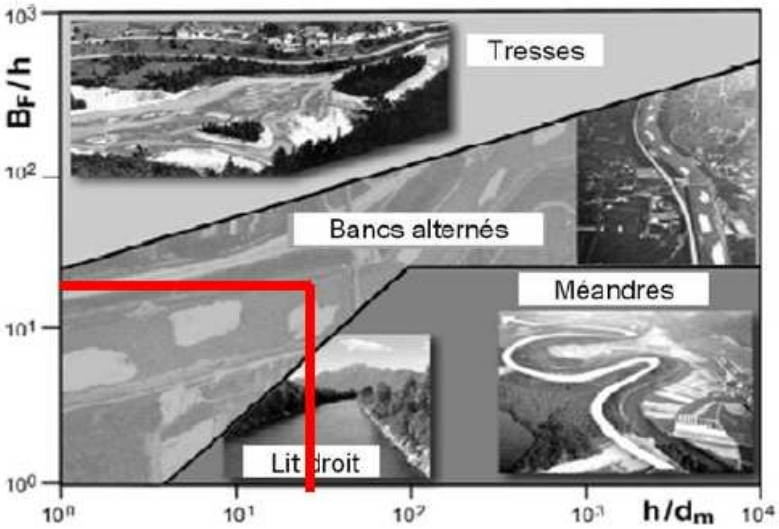


Figure 3.4 : Diagramme de Yalin et da Silva (2001) modifié, permettant de caractériser le régime d'un cours d'eau en fonction des paramètres B, h et d_m.

D'après ce diagramme on comprend que les cours en méandre existent pour des valeurs de h/d_m comprises entre 10^2 et 10^4 et des valeurs de B/h comprise entre 10^0 et $10^{1.3}$. Ce diagramme est assez différent du diagramme original.

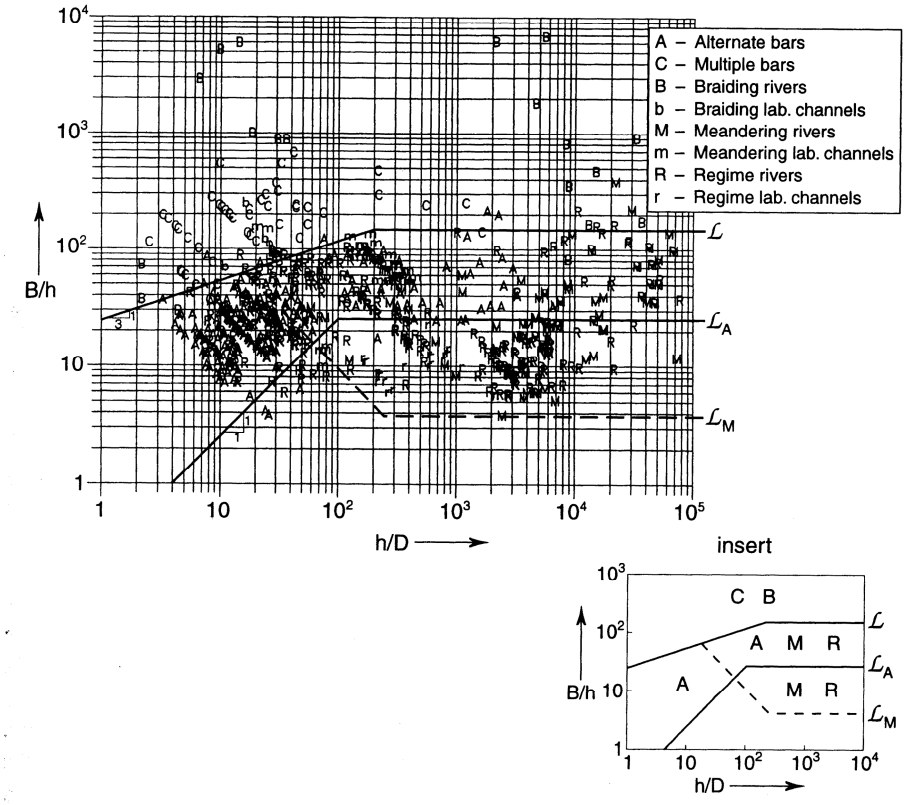


Figure 3.5 : Diagramme original de Yalin et da Silva (2001), permettant de caractériser le régime d'un cours d'eau en fonction des paramètres B, h et d_m.

Non seulement la présentation change, mais les limites des régimes sont bien différentes du diagramme modifié, spécialement concernant les méandres. Dans le diagramme du haut, les lettres représentent des valeurs de cours d'eau existants. La lettre « M » désigne des cours en méandre. On voit bien que les limites entre les différents régimes ne sont pas aussi strictes que le laisse croire le diagramme de la Figure 3.4. On voit qu'il existe toute une plage de valeurs pour lesquelles, avec les mêmes paramètres, on peut avoir soit des cours en méandres soit des cours en bancs alternés.

Le diagramme de Yalin et da Silva tient compte de la rugosité du lit, et utilise les paramètres de largeur de régime et de profondeur de régime au lieu de la pente et du débit. Les limites entre les différents régimes ne sont pas toutes très franches, mais découlent de développements mathématique plus conséquents que le graphique de Leopold.

En résumé, on peut dire que la détermination du style fluvial d'un cours d'eau d'après des paramètres indépendants de la morphologie du lit reste quelque peu imprécise. Il existe certains outils qui peuvent donner des résultats indicatifs, mais des approches différentes

comme l'étude des modèles numériques de terrain ou de cartes anciennes sont certainement plus fiables et seront recommandées.

3.3 Dynamique

Il est important de bien comprendre la dynamique d'un cours d'eau car c'est grâce aux processus d'érosion, de sédimentation et d'inondation que la végétation peut être rajeunie et diversifiée.

L'évolution de la position d'un cours d'eau est également un facteur important de la planification territoriale. Son emprise spatiale potentielle et sa vitesse de déplacement sont des paramètres à considérer pour la gestion de l'espace à réserver aux cours d'eau et pour la protection des biens contre l'érosion et contre les inondations.

3.3.1 Approche géologique

Pour notre problématique, l'échelle de temps pertinente se situe dans un intervalle allant de 1 à 100 ans, avec un intérêt particulier pour la plage temporelle comprise entre 5 et 30 ans. Nous n'avons pas l'intention de prédire à quoi ressemblera la Venoge dans deux mille ans. Mais nous avons jugé intéressant de présenter le processus dynamique d'une rivière dans sa globalité et à long terme, afin de mieux expliquer les mécanismes généraux à l'origine de la dynamique.

Les figures et légendes suivantes sont issues d'un document du Pr. P.-A. BOURQUE de l'université de Laval au Canada. Elles illustrent l'évolution à long terme (milliers d'années) d'une vallée fluviale.

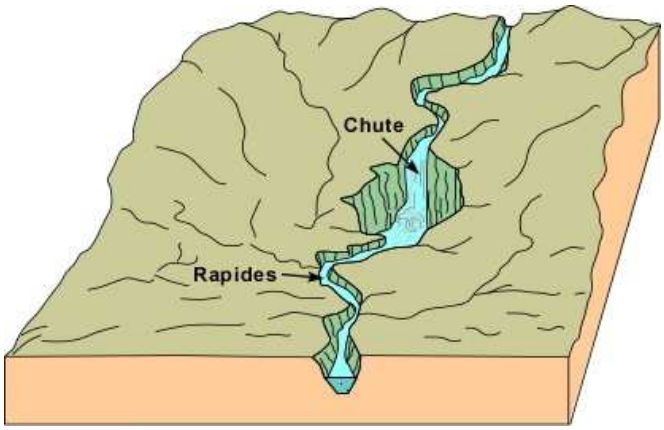


Figure 3.6 : Le stade de jeunesse d'une vallée fluviale se caractérise par du creusement qui conduit à la formation d'une vallée étroite en forme de V; les reliefs sont accentués le long du cours d'eau et on retrouve chutes, cascades et rapides.

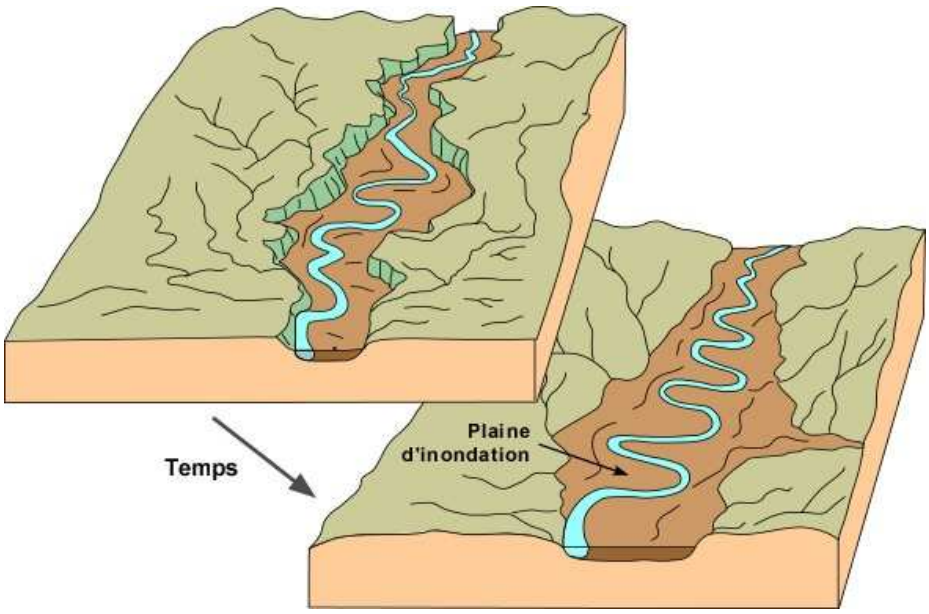


Figure 3.7 : A l'étape de la maturité, le cours d'eau aplanit ses reliefs et diminue son gradient de pente; il commence alors à éroder latéralement, élargissant la vallée et créant, par ses dépôts, une plaine d'inondation. Cette dernière se construit par l'apport constant de sédiments issus de l'érosion en amont et par l'épandage dans la vallée de ces sédiments durant les périodes de débordement dues aux crues.

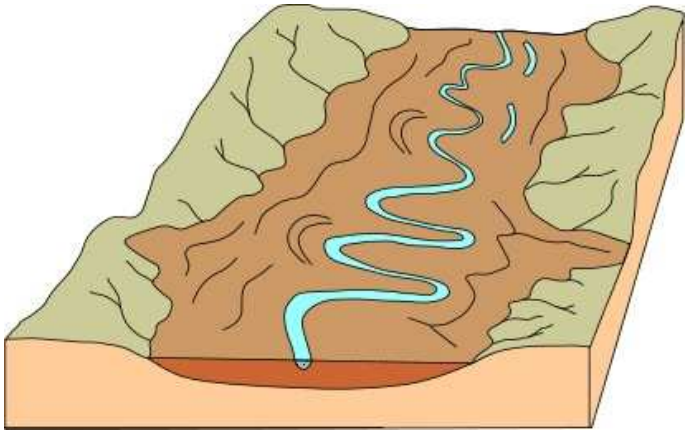


Figure 3.8 : Le stade de vieillesse de la vallée est atteint lorsque celle-ci est beaucoup plus large que les plus larges méandres du cours d'eau. A noter que les tributaires (affluents) du cours d'eau principal contribuent eux aussi à aplanir les reliefs adjacents.

Remarquons que le style fluvial en méandres correspond au stade final du développement d'une vallée fluviale. Ce stade est atteint lorsque que le niveau de la plaine est très proche du niveau du réservoir dans le quel se jette le cours d'eau (profil d'équilibre).

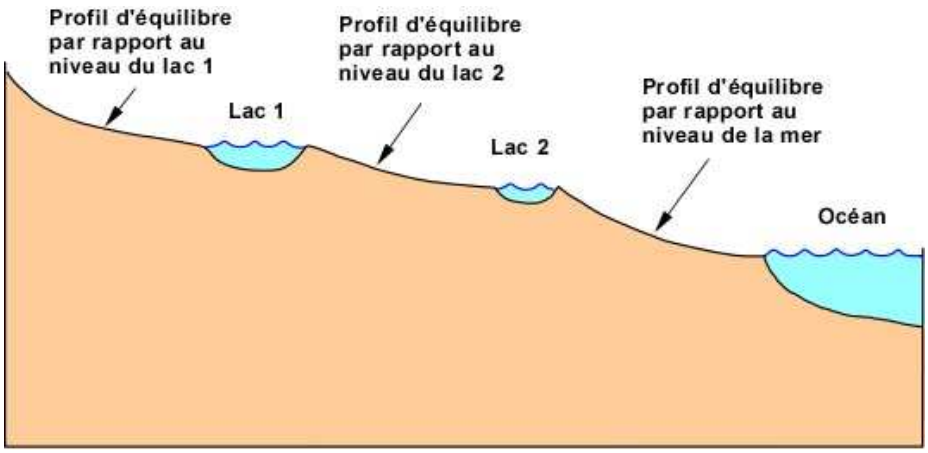


Figure 3.9 Le profil d'équilibre s'établit par l'ajustement à un niveau de base. Ce niveau de base est défini par le niveau d'eau du réservoir dans lequel se jette le cours d'eau (autre cours d'eau plus important, lac, réservoir hydroélectrique, mer, etc.). Ainsi, un cours d'eau qui se jette dans un lac creusera son lit jusqu'à ce qu'il atteigne son profil d'équilibre défini par le niveau d'eau du lac. Tant que le lac est présent, le cours d'eau ne peut éroder plus bas que ce profil.

Ce stade n'est toutefois pas irréversible, le type d'écoulement peut changer si le niveau de base est modifié.

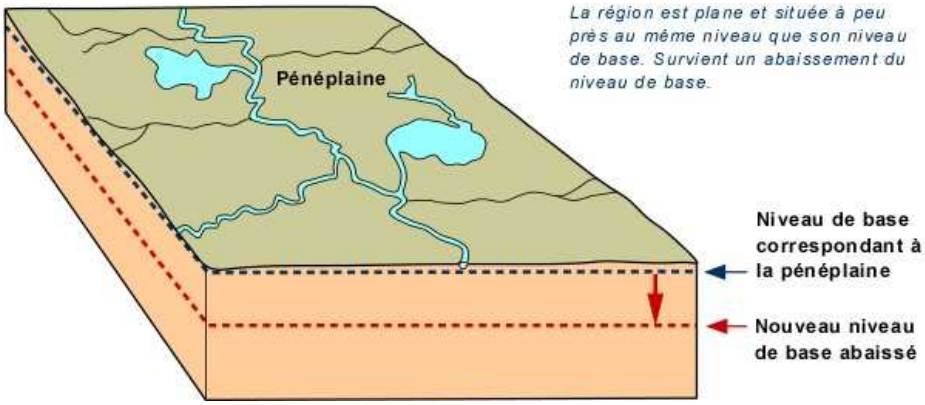
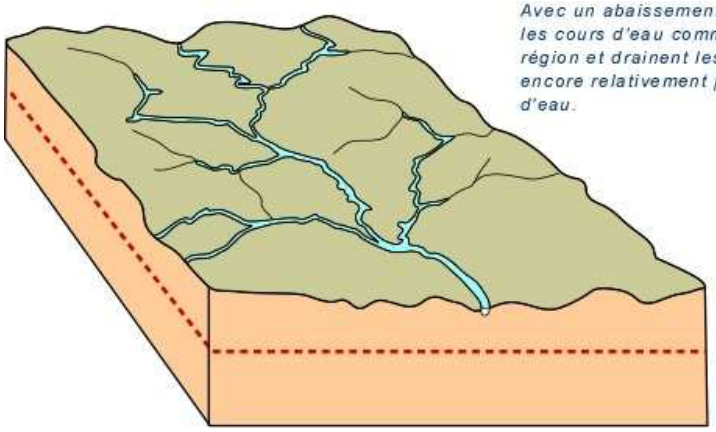
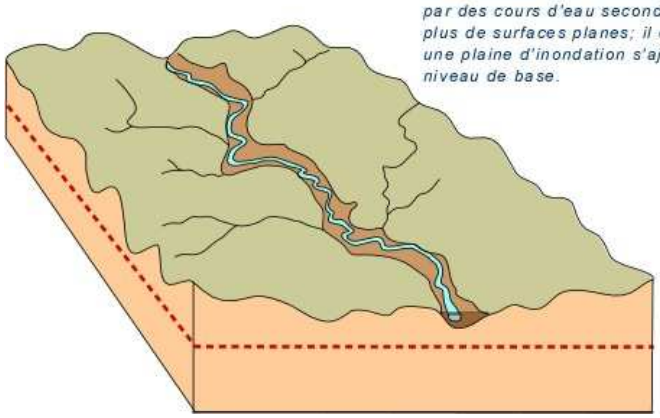


Figure 3.10 Un abaissement du niveau des mers entraîne, pour les continents, un changement du profil d'équilibre des cours d'eau. Voici, par exemple, comment évoluera le relief d'une région dont le niveau de base aura été abaissé. Prenons une région qui a atteint son niveau d'équilibre (le niveau marin par exemple); il s'agit de ce qu'on appelle une pénéplaine. Si le niveau de base est abaissé (flèche), le cycle de l'érosion est remis à zéro et la région, plane au départ, accusera des reliefs de plus en plus accentués à mesure que les cours d'eau creuseront pour atteindre leur profil d'équilibre par rapport au nouveau niveau de base.

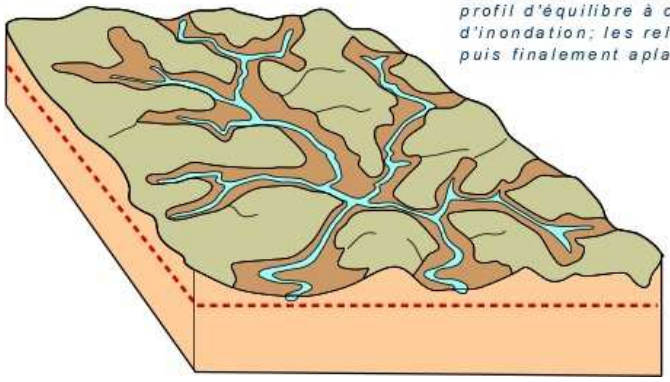


Avec un abaissement du niveau de base, les cours d'eau commencent à entailler la région et drainent les lacs; le paysage est encore relativement plat entre les cours d'eau.

Le relief s'accentue par le creusement des cours d'eau et atteint son maximum; toutes les zones entre les cours d'eau initiaux sont soumises à l'érosion et sont ravinées par des cours d'eau secondaires; il n'y a pratiquement plus de surfaces planes; il commence à se développer une plaine d'inondation s'ajustant progressivement au niveau de base.



Les cours d'eau secondaires ont ajusté leur profil d'équilibre à celui de la plaine d'inondation; les reliefs se sont abaissés, puis finalement aplanis



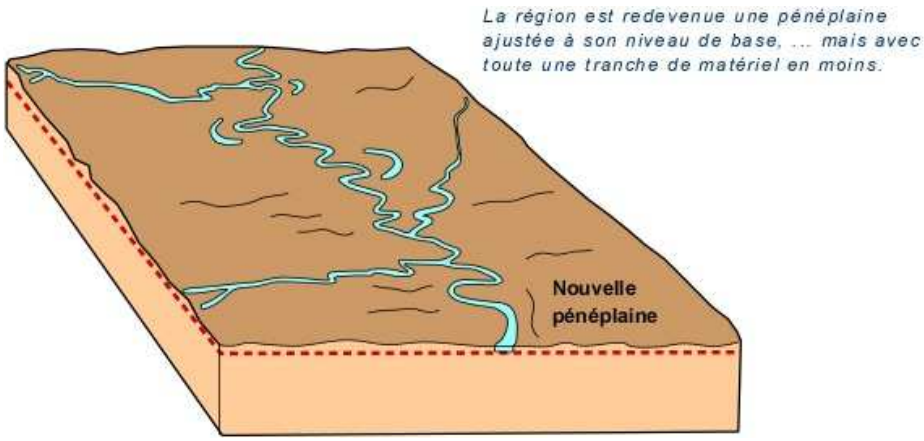


Figure 3.11 Lorsque ces derniers auront atteint leur profil d'équilibre, la région s'aplanira progressivement pour devenir une nouvelle pénéplaine.

Ce volet géologique a montré que sur de grandes durées, le style fluvial d'un cours d'eau change. Les méandres correspondent au stade le plus avancé du développement d'une vallée fluviale qui aura tendance à s'aplanir et dont le niveau de base sera celui du réservoir dans lequel se jette le cours d'eau.

3.3.2 Profils en travers et profil en long

La forme du profil en travers a déjà été discutée de manière détaillée au point 3.1.4. Pour rappel, nous disions que le profil en travers d'un méandre n'est pas symétrique (sauf aux points d'inflexion). La berge située à l'extérieur de la courbe est en pente abrupte et sujette à l'érosion. La berge à l'intérieur de la courbe est en pente douce, les sédiments s'y déposent. Le moteur de l'érosion latérale est un courant secondaire hélicoïdal. Il n'est pas dirigé dans le sens de l'écoulement, mais contre la berge extérieure, à cause de la morphologie asymétrique du fond du lit (voir Figure 3.1).

Comme nous l'avons déjà mentionné, le profil en long d'un cours en méandre est en pente douce. Toutefois, cette pente n'est pas régulière, et la profondeur de l'eau non plus. En effet, dans les parties rectilignes de la courbe (points d'inflexion), la pente du fond du lit est plus forte que dans les parties courbes et la hauteur d'eau est plus faible (radier). Dans les tronçons où la courbure est forte, l'érosion est importante et la profondeur de l'eau aussi.

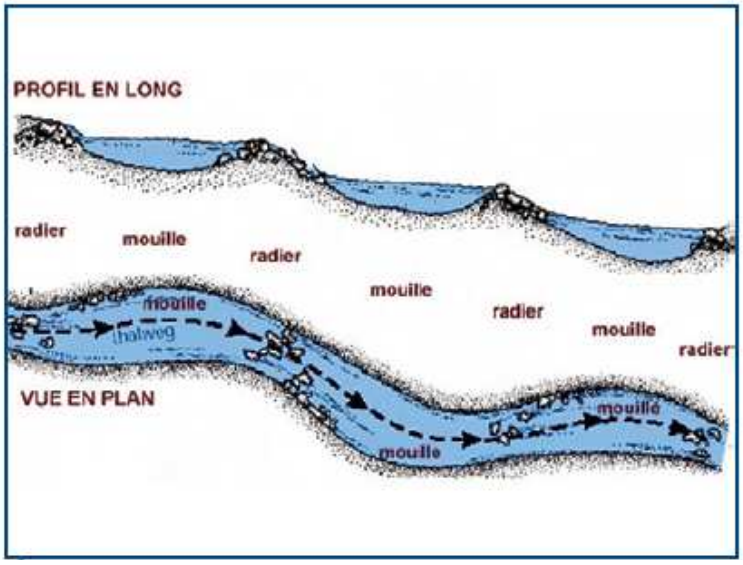


Figure 3.12 : Profil en long d'un cours en méandres (Adam et al. 2007)

Cette morphologie s'explique par le fait que dans les parties rectilignes, il n'y a pas d'érosion des berges donc elles sont stables. Alors que les parties courbes s'allongent progressivement ce qui diminue leur pente. De plus, l'érosion par le courant hélicoïdal se produit sur le pied de la berge, ce qui accroît la profondeur d'eau dans les extérieurs de courbe.

La morphologie du lit d'un cours en méandres est donc bien diversifiée, avec des courants rapides, des courants lents, des zones de faible profondeur d'eau et des mouilles. Sans parler d'éventuels bras morts ou bras secondaires, qui sont liés au développement en plan des méandres et font l'objet du chapitre suivant.

3.3.3 Dynamique en plan des méandres

Nous allons présenter trois types de méandres, qui sont caractérisés par leur morphologie et leur dynamique. Ensuite, nous parlerons des systèmes de méandres, c'est à dire de l'organisation et de l'interdépendance de plusieurs méandres consécutifs.

Nous avons vu précédemment que le moteur de la dynamique d'un méandre est l'érosion de la berge en extérieur de courbe et la sédimentation à l'intérieur de la courbe. Avec ce type de dynamique l'érosion et la sédimentation se produisent de façon symétrique entre le côté aval et le côté amont si le méandre n'est pas stabilisé. Le développement d'un tel méandre implique un accroissement simultané de sa longueur et de son Ψ_{max}. Ses extrémités peuvent être fixes ou se rapprocher avec le développement du méandre. On trouve ce type de méandre dans des terrains homogènes à très faible pente, mais pas exclusivement. L'illustration suivante montre l'évolution théorique d'un méandre non stabilisé dont les extrémités sont fixes.

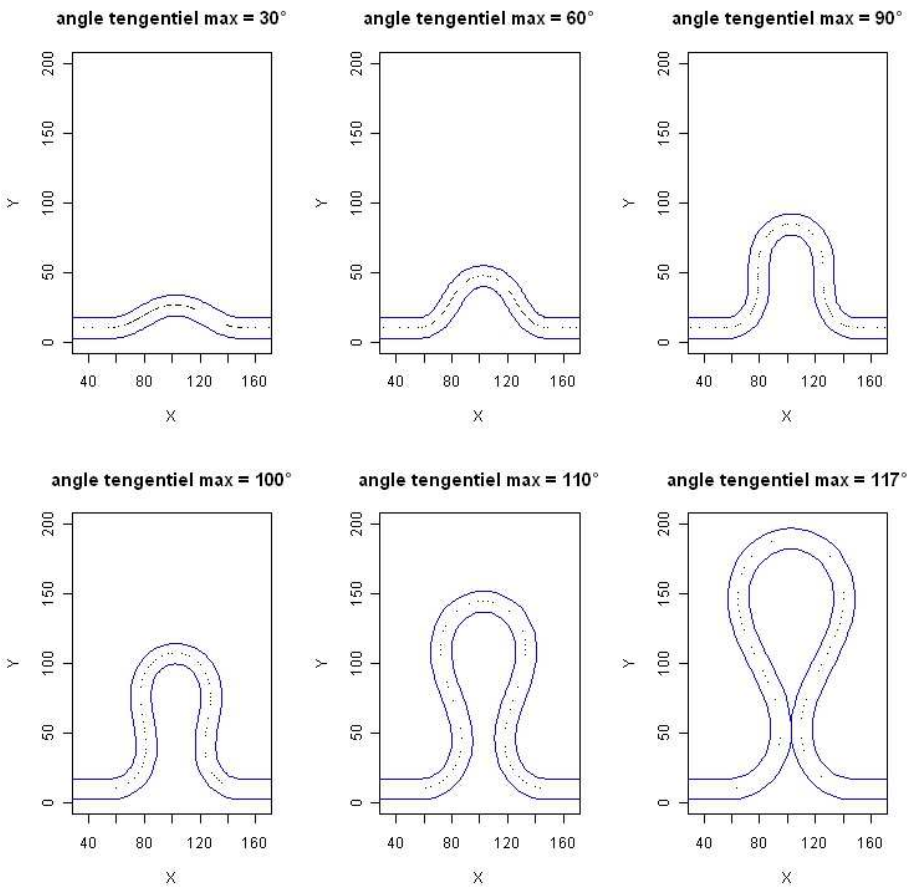


Figure 3.13 : Evolution d'un méandre dont les extrémités sont fixes, court-circuit par tangence.

La longueur du méandre s'accroît progressivement, en même temps que Ψ_{max}. On voit que jusqu'à une valeur de Ψ_{max} de 90°, seul la partie au sommet du méandre est érodée. Ensuite, la base du méandre s'érode aussi. Ici, le méandre se recoupe quand les parties amont et aval deviennent tangentes, ce qui s'appelle un court-circuit par tangence ou « *neck cutoff* » en anglais.

Dans d'autres cas, le méandre se court-circuite à cause de la formation d'un bras direct qui relie l'entrée et la sortie du méandre. Un tel bras peut se former lors d'une crue si le cours d'eau déborde à l'entrée de la première courbe. Ceci s'appelle « court-circuit par déversement » ou « chute cutoff » et apparaît en général quand Ψ_{max} s'approche de 90°.

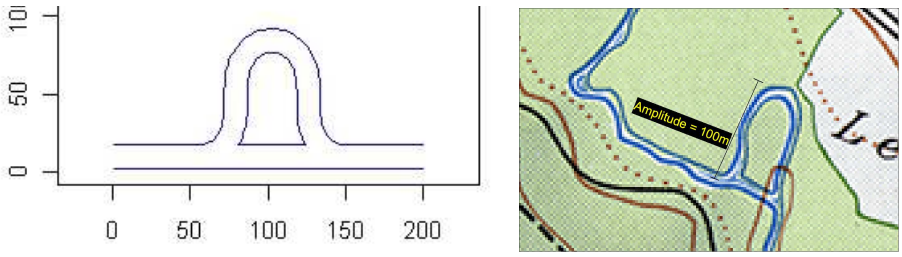


Figure 3.14 Court-circuit par déversement « chute cut off ».

La dynamique décrite ici conduit, dans les deux cas, à la formation de bras mort. Une fois que le court-circuit s'est produit, l'ancien bras est encore alimenté pendant un certain temps, mais ses extrémités vont progressivement être obstruées par des dépôts de sédiments, ce qui va le déconnecter du cours principal. Les courts-circuits par déversement limitent l'extension latérale du méandre, puisqu'ils ont lieu avant que Ψ_{max} n'atteigne sa valeur théorique maximum. Le moteur de ce type de dynamique est la courbure du méandre. L'érosion est la plus importante là où la courbure est la plus élevée.

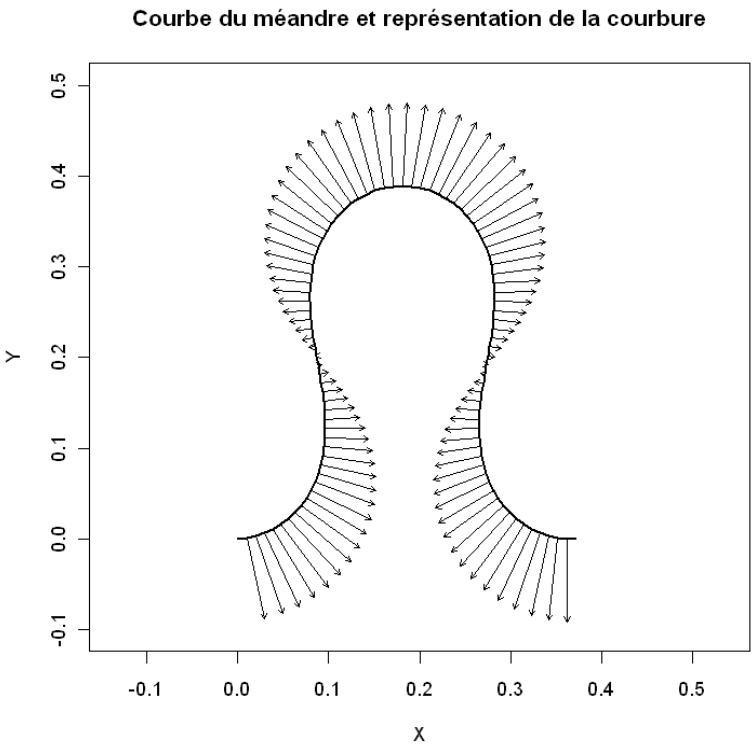


Figure 3.15 : Représentation de la courbure d'une courbe de méandres. Chaque flèche est, en chaque point, proportionnelle à la courbure et perpendiculaire à la trajectoire.

La relation entre courbure et érosion latérale est assez intuitive. On s'imagine facilement que plus la courbure est importante, plus l'angle formé entre la direction du courant et la direction de la berge est grand (LARIONOV et al. 2008). Le choc de l'eau sur la berge, a fortiori l'érosion du méandre, sera significatif si cet angle est élevé.

Tous les méandres ne se développent pas de la façon décrite ci-dessus, sans pour autant être statiques. L'autre processus général de la dynamique en plan d'un méandre est le déplacement. La forme du méandre ne change pas ou peu au cours du temps. La plupart des méandres qui se déplacent, migrent vers l'aval. Dans ce type de méandre, la pente du terrain domine le processus d'érosion, et non la courbure. La berge aval subit l'érosion et la berge amont sédimente, le méandre descend ainsi dans la vallée.

Il arrive également qu'un méandre se déplace par rotation et non par translation. Le centre de rotation est en général l'extrémité amont du méandre, et l'angle de rotation est faible. Ce genre de dynamique peut être observé quand le cours d'eau contient un point fixe alors que la tendance naturelle serait un déplacement vers l'aval.

Les méandres qui se déplacent ne conduisent pas à la formation de bras mort, leur forme et leur longueur ne changent pas au cours du temps et le rapport amplitude / longueur d'onde est plus petit que pour les méandres qui se développent avec un changement de forme. Dans la suite de ce rapport nous utiliserons le terme de « méandre migrant » pour qualifier le type de méandres qui se déplacent vers l'aval, le terme de « méandre de courbure » pour qualifier le type des méandres qui se court-circuitent par tangence et le terme de « méandre intermédiaire » pour qualifier le type de méandre qui se court-circuitent par déversement. En effet, dans ce cas, la gravité et la courbure ont une influence sur la géométrie en plan du méandre.

Après avoir défini les trois principaux types morphologiques, il est utile d'énoncer quelques propriétés des systèmes de méandres. Dans un environnement naturel et homogène, des méandres consécutifs sont de même nature.

Pour des méandres de type migrant, cela signifie qu'ils auront tous, à peu près, la même amplitude, la même longueur d'onde, la même forme (Ψ_{max}) et la même vitesse de déplacement vers l'aval.

Le système de méandres de courbure est plus compliqué à décrire. La dynamique d'un tel système peut se concevoir comme une suite de méandres peu développés et bien développés (Ψ_{max} bas et Ψ_{max} élevé) dont la longueur augmente par un processus continu (érosion) et diminue par un processus discontinu (court-circuit). Ainsi, la longueur totale oscille autour d'une longueur d'équilibre, et le coefficient de sinuosité du cours d'eau reste à peu près constant.

Les méandres de type intermédiaire peuvent être migrants par endroit et connaissent aussi l'alternance de développement et court-circuit mais dans une mesure moindre que les méandres de courbure, puisque les courts-circuits par déversement interviennent avant que les méandres ne soient complètement développés.

La compréhension de la dynamique des méandres est importante pour les besoins de l'étude. Le type de dynamique va influencer le

besoin d'espace du cours d'eau. Les méandres migrants ayant une amplitude plus faible que les méandres de courbure. La vitesse de la dynamique va, quant à elle, influencer le rajeunissement de la végétation et la mosaïque des habitats. Le type de méandres influence également les milieux annexes, des méandres qui se court-circuitent conduisent à la formation des bras morts, c'est-à-dire des eaux lentiques, qui contribuent à la diversification des espèces liées au cours d'eau.

3.3.4 Régularités et irrégularités

Nous avons montré qu'il est possible de trouver de nombreux méandres dont la forme est bien régulière et qui correspond au modèle géométrique présenté au chapitre 2. Mais on observe également des tracés de cours d'eau nettement plus irréguliers, dont le fonctionnement est difficile à saisir. Les causes des ces irrégularités sont en parties explicables et ne remettent pas en question le modèle géométrique théorique. Il peut s'agir notamment d'hétérogénéité du substrat, qui donne des zones d'érosion préférentielles ou des variations locales de la pente qui modifie la dynamique d'érosion. Toute stabilisation, même naturelle (falaise rocheuse) est susceptible de modifier le tracé d'un cours en méandres. Les variations temporelles du débit peuvent également avoir une influence sur la forme du lit, des crues importantes peuvent élargir le lit à certains endroits ou obstruer des bras par dépôt de sédiments. D'autres facteurs naturels externes au cours d'eau influencent parfois la dynamique, comme des arbres qui tombent dans le lit et créent des embâcles ou qui dévient simplement le courant.

La prédiction très précise de la dynamique d'un cours d'eau naturelle est donc difficile, mais elle n'est pas nécessaire pour cette étude qui se fonde avant tout sur des valeurs moyennes qui restent valables si on applique une échelle spatiale et temporelle suffisamment large.

3.4 Discussion

Nous n'avons pas pu faire de lien entre la géométrie et la géomorphologie des méandres, mais seulement dégager quelques bribes d'explication de phénomènes épars qui ne débouchent en aucun cas sur une théorie générale. En résumé, les pièces du puzzle sont là, mais on ne sait pas les assembler. La question la plus fondamentale sur le sujet n'a même pas encore été abordée. On peut la formuler ainsi :

« *Pourquoi un cours d'eau forme-t-il (parfois) des méandres au lieu d'aller directement d'un point A à un point B en suivant la ligne de pente comme le ferait, par exemple, une balle qui roule ?* »

Ni la thèse traitant de l'écoulement de l'eau sur un plan incliné (LE GRAND-PITEIRA, 2006), ni les nombreuses théories des

géomorphologues précédemment cités, ni le bon sens ou l'intuition n'apportent de réponse claire à cette question.

Alors pourquoi des méandres ?

Fondés sur un raisonnement personnel et sans aucune forme de preuve, nous apportons les éléments de réponses suivants :

Pour commencer la question doit être décomposée, car elle contient deux notions distinctes. La première est celle de l'allongement du trajet, par rapport au trajet le plus court. En effet un cours en méandres est plus long qu'un cours en ligne droite. Certains affirment que le trajet du cours d'eau s'allonge pour diminuer sa pente. Oui, mais pourquoi diminuer la pente ? Pour garantir un transit optimal du débit solide et du débit liquide ? Si c'était le cas, la pente du lit ne pourrait-elle pas s'ajuster par érosion ou sédimentation du fond lit uniquement ? La pente n'est certainement pas le seul facteur explicatif. Nous préférons penser que si la pente du cours s'allonge, c'est par principe de minimisation de dépenses d'énergie. En effet un cours rectiligne à forte pente dépense beaucoup d'énergie par turbulence et peu par frottement. Un cours d'eau très long dépense beaucoup d'énergie par frottement et peu en turbulences. C'est pourquoi, fort de ce constat, nous supposons qu'il existe un optimum morphologique qui résulte de la minimisation des pertes d'énergie dépensées à la fois par frottement et par turbulence. Il existe également des minima locaux, qui font qu'un cours d'eau dont les rives sont stabilisées se creuse pour converger vers un nouvel équilibre.

Maintenant, admettons qu'un cours d'eau possède une longueur, une pente, une largeur et une profondeur optimum, et sa longueur dépasse celle d'une ligne droite entre l'amont et l'aval. Alors pourquoi la courbe est-elle celle du méandre et pas une sinusoïde ou une succession de demi-cercles, ou n'importe quelle autre courbe ? Pour y répondre, il faudrait déjà connaître avec certitude les propriétés de cette courbe. Mais comme nous l'avons dit, l'explication réside peut-être dans l'analogie avec les courbes de flambages des éléments solides. Les cours d'eau en méandres subissent une sorte de compression, qui provient à la fois du courant amont et du courant aval, selon la résistance du milieu le cours d'eau fléchit jusqu'à un certain point.

4 Valeur naturelle des systèmes de méandres

4.1 Valeurs naturelles

La valeur naturelle des zones alluviales européennes ou suisses abritant un cours d'eau en méandres a été décrite par plusieurs auteurs (Hager et al. 2008, Trémolières et Schnitzler 2007, Schnitzler

et Carbiener 2007, Koenzen 2005, Ellenberg H. 1996, Gepp 1986, Gerken 1988). Les caractères et propriétés des systèmes de méandres que nous proposons de prendre en considération pour la reconstitution, la revitalisation ou la définition de l'espace pour le cours d'eau, sont les suivants :

1. La **géomorphologie** reflétant la dynamique des méandres ; comme dans les autres zones alluviales, la dynamique remanie le relief et génère des gradients topographiques, d'âge de stations, d'humidité, de texture de sédiments,

2. L'**inondation** du lit majeur et de la plaine alluviale, qui génère des sols tourbeux et alimente des marais,

3. La présence **d'annexes hydrauliques** (dépressions, bras morts), reliées en permanence ou par intermittence au cours d'eau,

4. La diversité des **biocénoses** ; la nature et la complexité de la mosaïque des communautés de plantes et d'animaux colonisant les stations générées par la dynamique des méandres,

5. La **connectivité longitudinale**, à savoir les liaisons avec l'amont et l'aval et la **connectivité transversale** : contact avec les milieux alluviaux et non alluviaux voisins.

4.1.1 Géomorphologie

La migration du chenal par érosion et par sédimentation provoque une diversification des milieux favorable au développement de biocénoses et d'espèces spécialisées. Comme pour les cours d'eau en tresses ou en bancs alternés, l'érosion et la sédimentation créent des milieux neufs et rajeunissent les habitats. Ainsi, dans un espace restreint on a une variété de stations terrestres d'âges différents qui abritent une grande variété d'espèces.

Dans le milieu aquatique, malgré le caractère calme de l'écoulement, le lit des cours d'eau en méandres présente une hétérogénéité. On observe une succession de radiers et de mouilles, des largeurs et des profondeurs différentes, ceci dans les secteurs rectilignes et dans les courbes. Ces hétérogénéités ont un effet sur la flore aquatique (herbiers de plantes aquatiques) et sur la faune (poissons, benthos).

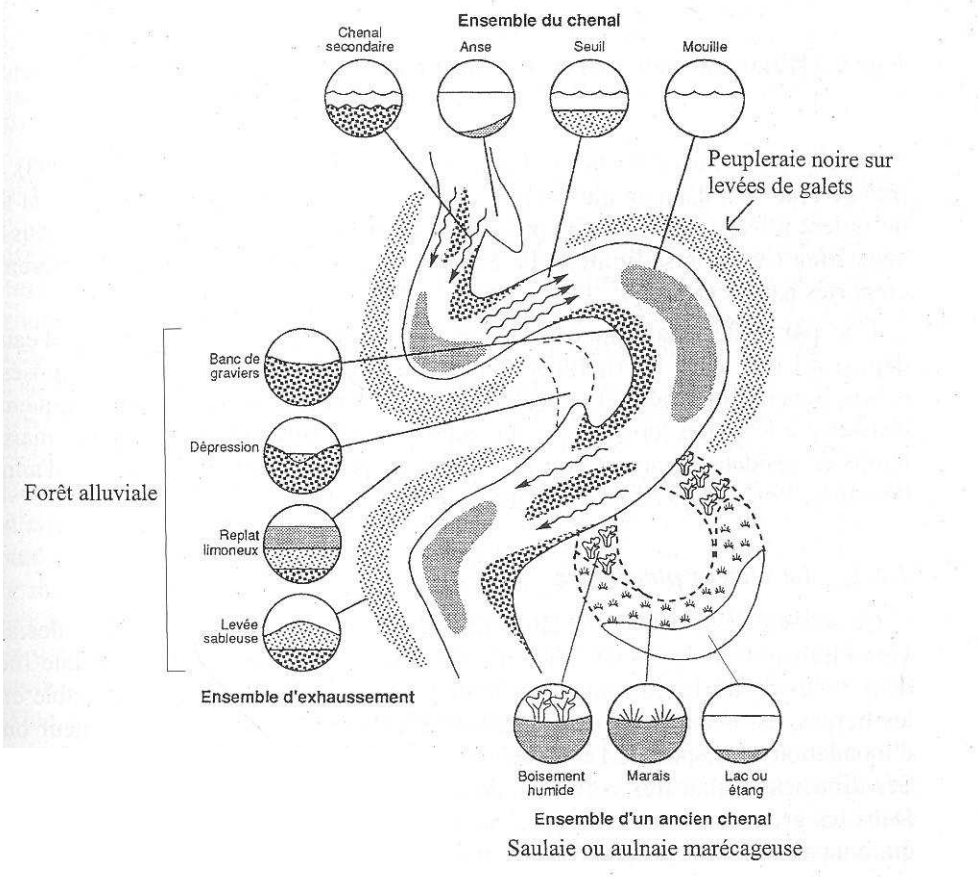


Figure 4.1 : Habitats terrestres et aquatiques liés aux berges convexes et concaves des méandres (Schnitzler et Carbiener 2007).

4.1.2 Inondations

Les cours en méandre débordent plus souvent que les cours d'eau en tresses en bancs alternés. De ce fait, ils alimentent les forêts alluviales et les zones humides voisines. Lors des crues annuelles ou biennales, on a déjà des inondations. Comme les reliefs sont très plats, ces inondations peuvent avoir de grandes extensions transversales, ce qui favorise la connectivité transversale du cours d'eau et de sa plaine alluviale.

A l'instar des zones alluviales de la March, situées entre l'Autriche et la Slovaquie (Drescher 1977) ou du cours supérieur de la Seine à Pothières (observations des auteurs en 2010), les zones alluviales abritant des méandres sont généralement bordées de prairies inondables (prairies à molinie) riches en espèces, dont l'humidité variable génère un gradient d'intensité de l'exploitation agricole.

Figure 4.2 : Prairies inondables du cours supérieur de la Seine en aval de Vix (Bourgogne, France). Auteur : N. Dubau 2010.

Les inondations enrichissent les communautés d'oiseaux des plaines alluviales. Tome (2002, in Roché 2010) a montré, dans des prairies inondables de Slovénie, que plusieurs espèces d'oiseaux nicheurs possédaient des abondances supérieures dans les secteurs soumis régulièrement aux inondations. Kreusiger (1998, in Roché 2010) observe, suite à la restauration d'inondations sur 1400 ha d'une réserve naturelle du Rhin en Allemagne, que plus du tiers des espèces nicheuses voient leur abondance croître, contre 10% seulement qui la voit se réduire.

Les prairies inondables ont disparu du Plateau suisse et sont menacées dans toute l'Europe (Dürrer 1989) ; leur présence est relatée dans le Seeland d'avant la correction des eaux du Jura (Nast 2006).

4.1.3 Annexes hydrauliques

La présence d'annexes hydrauliques caractérise les cours en méandres (Gepp et al. 1986, Gerken 1988). Les bras morts sont des dépressions qui restent généralement en eau grâce à l'alimentation de la nappe phréatique et qui peuvent se connecter directement au cours d'eau en cas de hautes eaux. Selon leur ancienneté, les bras morts sont des milieux plus ou moins humides, des étangs ou des marais, voire de simples dépressions humides. Ils abritent donc une flore et une faune différente de celles des eaux courantes, et cela contribue à la diversification.

Mises en charge lors des crues de différents temps de retour, les annexes hydrauliques jouent un rôle de refuge pour les organismes aquatiques, notamment lorsqu'elles sont connectées avec le cours principal par l'aval.

Plusieurs annexes hydrauliques ont disparu (remblayage, défrichement et mise en culture) lors du réaménagement des plaines alluviales lié grandes corrections de cours d'eau. Certains méandres

ont été coupés du cours principal lors des corrections et sont devenus des annexes hydrauliques d'origine secondaire. On en trouve notamment dans deux des zones d'étude de ce travail : Aar et Thur (voir chap. 8).

Figure 4.3 : Ancien méandre du Rhin à Diepoldsau SG. Méandre en phase d'atterrissement à la Vieille Aar BE (zone alluviale 48).

4.1.4 Biocénoses

La mosaïque de la végétation est ici considérée comme indicateur principal de la diversité des biocénoses et des espèces. Les monographies sur la végétation alluviale et notamment les cartes de la végétation illustrent l'organisation de cette mosaïque.

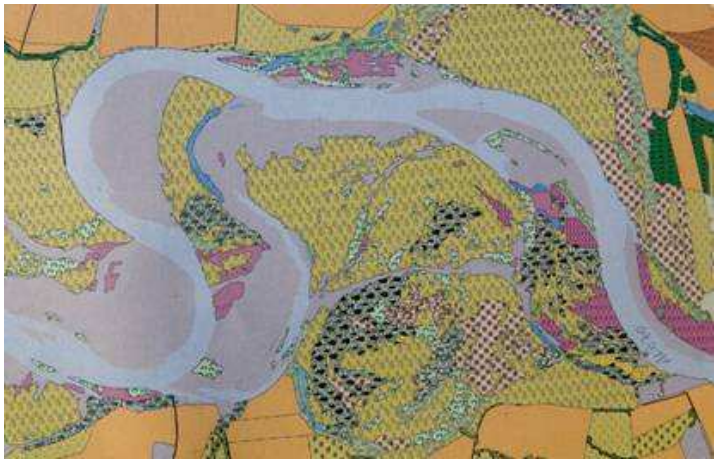


Figure 4.4 : carte de végétation. Diversité, en plan, des stades de successions sur un tronçon du cours moyen de l'Allier depuis les grèves couvertes de formations herbeuses (violet) jusqu'aux vieilles ripisylves de bois durs à l'écart du lit (vert sombre taché de noir) (données SIEL/DIREN Centre 2002, in Roché 2010).

L'organisation de la mosaïque végétale des zones alluviales d'importance nationale a été décrite au moyen d'une cartographie des objets de l'inventaire fédéral (Gallandat et al. 1993). Les cartes de la végétation constituent des outils d'appréciation du contenu des objets

protégés ; par le biais d'indices calculés pour chaque objet, elles reflètent également l'intensité de la dynamique alluviale (Bonnard et al. 2009. Rapport de synthèse du suivi des zones alluviales).

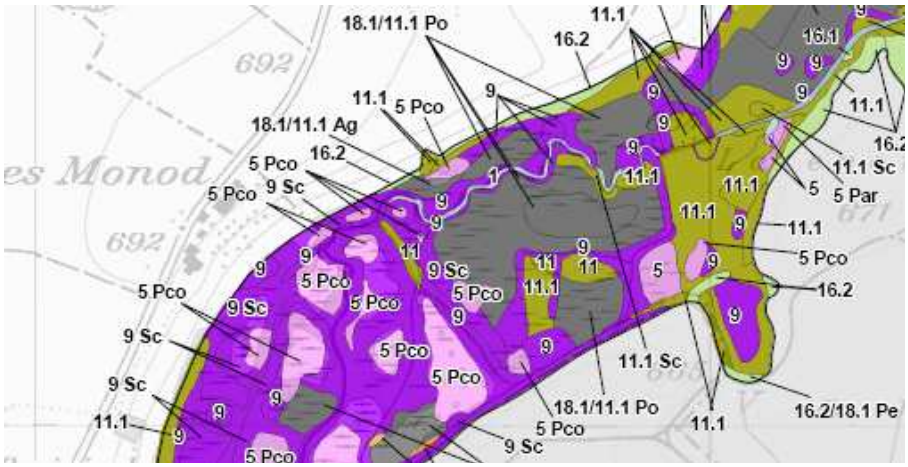


Figure 4.5 : Extrait de la carte de la végétation du Veyron, Les Monod VD (zone alluviale 211).

Sachant que les animaux, notamment les oiseaux, choisissent leur milieu de reproduction sur la base de la physionomie et de la structure des milieux (Roché 2010), la diversité et la complexité de la mosaïque végétale se reflète sur celles des peuplements animaux. Les peuplements d'oiseaux caractérisant le secteur des méandres (secteur à foulque macroule, voir figure ci-après) sont proches de ceux des grands marais lacustres, des surfaces d'eau calmes et des roselières (Roché et Frochot 1993).

Dans la suite de ce travail, on se fonde principalement sur les communautés végétales pour illustrer et discuter la procédure.

4.1.5 Connectivités

Dans la zonation longitudinale des cours d'eau, le style fluvial à méandres se situe dans le cours inférieur, en aval de la zone à anastomoses ou à tresses et en amont de l'estuaire. Une zonation des communautés de poissons (zone à brême, Huet 1949) et des communautés d'oiseaux (zone de la foulque macroule, Roché et Frochot 1993) est superposable à la zonation géomorphologique.

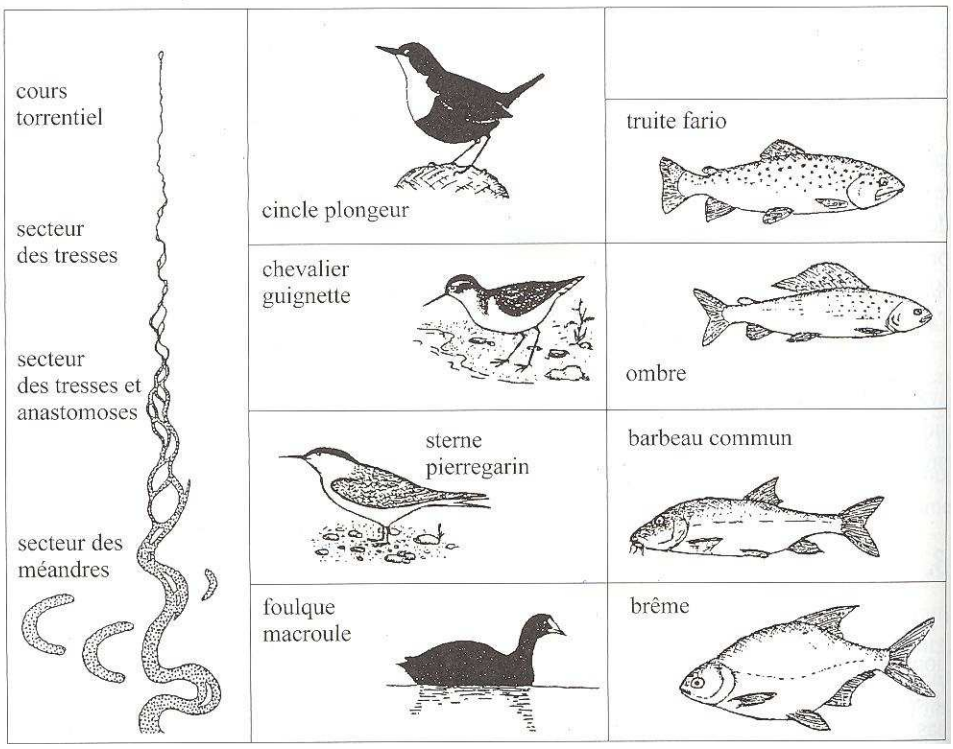
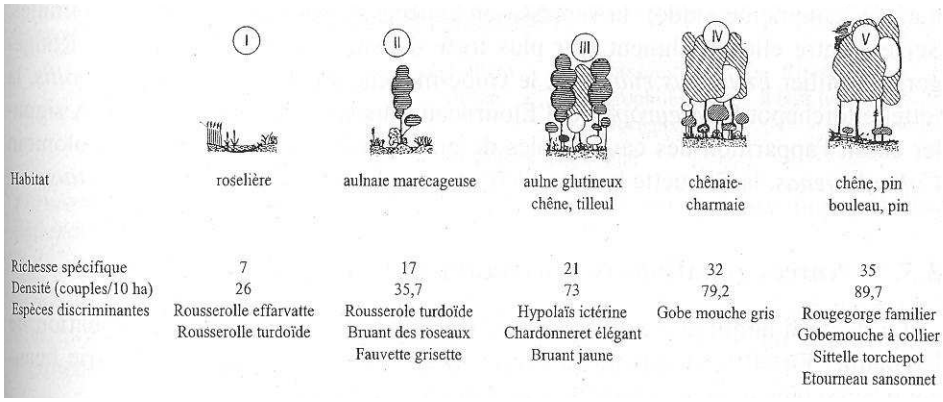


Figure 4.6 Zonation des oiseaux et des poissons le long des fleuves européens (Roché et Frochot (1993) in Schnitzler et Carbiener 2007).

Les zones alluviales en méandres présentent aussi une zonation transversale de la végétation (Moor 1958, Roulier 1998) et des communautés d'animaux (Schnitzler et Carbiener 2007).



	I	II	III	IV	V
Habitat	roselière	aulnaie marécageuse	aulne glutineux chêne, tilleul	chênaie-charmaie	chêne, pin bouleau, pin
Richesse spécifique	7	17	21	32	35
Densité (couples/10 ha)	26	35,7	73	79,2	89,7
Espèces discriminantes	Rousserolle effarvatte Rousserolle turdoïde	Rousserole turdoïde Bruant des roseaux Fauvette grisette	Hypolaïs ictérine Chardonneret élégant Bruant jaune	Gobe mouche gris	Rougegorge familier Gobemouche à collier Sittelle torchepot Etourneau sansonnet

Figure 4.7 : Zonation transversale de la végétation et de l'avifaune (Schnitzler et Carbiener 2007).

La connectivité longitudinale est assurée par le cours d'eau et par les milieux terrestres riverains implantés le long du cours d'eau. La connectivité transversale rassemble les liens et les zones de contacts entre le cours d'eau, la zone alluviale et les milieux environnants de la plaine alluviale. Ces deux types de connectivités sont documentés dans le Guide de suivi de l'EAWAG (Woolsey et al. 2005) sous les angles des obstacles pour le déplacement des poissons, de la structure des rives et à l'aide d'indicateurs indirects. Le secteur

aquatique et riverain du cours d'eau est concerné, pas le secteur terrestre. Comme l'état du lit du cours d'eau est déjà évalué par l'indice de géomorphologie et que la composante transversale de l'espace fonctionnel est documentée par l'indice de biocénoses et habitats, nous avons choisi de nous concentrer sur la connectivité longitudinale terrestre (chap. 5 ci-après).

Pour évaluer la fonction de continuité longitudinale le long des cours d'eau en méandres, il est proposé de prendre en considération la largeur et la continuité de la bande riveraine terrestre bordant le cours d'eau. Von Blücher et al (2004) mentionnent les continuités longitudinale et transversale parmi plusieurs autres fonctions de la bande riveraine (transport, milieu de vie, eutrophisation, détente, non prises en considération dans la présente étude).

Selon la nouvelle OEaux, la bande riveraine peut revêtir plusieurs natures :

- prairie extensive, pâturage extensif, surface à litière,
- pâturage boisé, berge boisée, bosquet champêtre,
- forêt alluviale, forêt de berge.

Pour la cartographie, il convient de localiser la berge du cours d'eau car elle constitue la limite côté rivière de la bande riveraine. La limite côté terre peut être diffuse s'il s'agit d'une formation non boisée. Dans le cas d'une forêt, il s'agit de la lisière.

La notion de bande riveraine est distincte de celle d'espace fonctionnel développé dans cette étude ; l'espace fonctionnel est à assimiler à l'espace de divagation (OFEG 2000).

Largeur de la bande riveraine

Plusieurs largeurs ont déjà été citées dans la littérature consultée ou lors de contacts avec des spécialistes :

3 m, 6 m : largeurs minimums sans fumure, resp. sans produit phytosanitaire au bord des cours d'eau (Agridea 2008),

15 m : largeur maximum de la zone riveraine selon abaque de la brochure « Réserver de l'espace pour les cours d'eau (OFEG 2000),

15-30 m : largeur citée par Karthaus (1989, in von Blücher et al. 2004).

50 m : largeur mentionnée pour les grands cours d'eau (comm. orale von Bluecher 2010), largeur apte à stopper les nitrates agricoles (comm. écrite Prof. Frochot 2010), largeur mentionnée par Pflug (1989, in von Blücher et al. 2004).

60-75 m : largeur préconisée par l'« Outil prédictif du développement des milieux riverains du Rhône » pour permettre un développement des formations d'essences à bois tendre dans le système alluvial collinéen des Alpes centrales (SCZA 2007).

Remarque : faute d'évaluation précise supplémentaire, les valeurs de largeur caractérisant le système alluvial collinéen des Alpes centrales sont reprises tel quel pour le système alluvial collinéen du Plateau suisse (selon typologie de Roulier 1998). Ces valeurs constituent un minimum sachant que la taille du Saule blanc (Salix alba, env. 30 m), qui domine le compartiment à bois tendre, est beaucoup plus élevée que celle de l'aulne blanc (Alnus incana, env. 20 m).

Remarque : la définition de la largeur minimum et optimum de la bande riveraine, n'a pas été développée plus loin dans le cadre de la présente étude car elle relève d'une problématique différente.

4.2 Qualité de l'eau

La qualité de l'eau est un élément essentiel de l'état des cours d'eau en général. Un des arguments avancés pour revitaliser une rivière est que sa capacité d'autoépuration s'en trouve améliorée, étant donné que les microorganismes qui dégradent certains polluants vivent surtout dans l'interface terre-eau qui augmente si on rétablit une morphologie plus naturelle. Un travail de master de l'EPFL s'est penché sur le sujet en étudiant la corrélation entre la faune benthique et la morphologie de la Venoge dans 4 stations (VIGNE 2009). Or la conclusion de cette étude est qu'il n'y a pas d'incidence de la morphologie sur la faune benthique sensible à la qualité de l'eau. Autrement dit, si un déficit en matière de qualité de l'eau est constaté, notamment si des micropolluants sont présents, les effets sont les mêmes sur les organismes sensibles à la pollution, peu importe que la morphologie soit diversifiée ou non. Dans une approche intégrée de revitalisation, la qualité de l'eau est un aspect à prendre en compte car elle a une influence importante sur la faune aquatique.

Néanmoins, les outils de suivi de la qualité de l'eau existent déjà et comme ce paramètre n'influence pas le besoin d'espace des cours d'eau et peut être traité de façon indépendante d'une problématique de revitalisation, il ne sera pas utilisé par la procédure.

5 Définition d'une procédure

Le but de la procédure est de définir le besoin d'espace d'un cours d'eau en méandres, et de décrire et évaluer l'écosystème qui lui est associé. La procédure peut s'appliquer à un état existant ou à un état projeté. Elle est également capable d'évaluer la valeur écologique d'un système corrigé ou partiellement corrigé où le cours d'eau n'a pas à disposition l'espace dont il aurait besoin.

La procédure comporte quatre étapes :

1. Définition du style fluvial,
2. Définition de l'espace fonctionnel,

3. Caractérisation de la dynamique,

4. Evaluation des valeurs naturelles.

5.1 Définition du style fluvial

La définition du style fluvial est utile pour savoir si la procédure est applicable ou pas. En effet elle a été conçue pour des systèmes de méandres, donc elle n'est pas adaptée pour des cours d'eau en tresses, en bancs alternés ou en anastomoses.

En général, il est assez facile de connaître le style fluvial d'un cours d'eau. Différentes sources d'informations sont utilisables, en fonction de l'état du cours d'eau et des données à disposition.

Pour des **cours non corrigé**, il suffit d'observer le style actuel du cours d'eau.

Pour un **cours d'eau corrigé avec état antérieur connu**, on peut se référer à un état antérieur non corrigé. Cet état peut être connu grâce à une carte historique, d'anciennes photos, au modèle numérique de terrain, et éventuellement l'étude de limites communales. Si on se réfère à un état antérieur pour caractériser le style fluvial, il faut s'assurer que les conditions hydrologiques et sédimentaires n'ont pas ou peu été modifiées sur le bassin versant en question. S'il y a eu des barrages en amont, par exemple, il est fort probable que le régime d'écoulement et surtout le transport solide aient subi une modification. Dans ce cas, il faut en tenir compte analyser les documents relatifs à l'état historique de façon critique, et si trop de changements sont intervenus, il est préférable d'ignorer cet état antérieur et de se référer au point suivant de la procédure.

Pour un **cours d'eau corrigé sans état antérieur connu,** il est recommandé d'utiliser le diagramme de Leopold, qui nécessite la connaissance du débit plein bord et de la pente moyenne du cours d'eau. Si le débit plein bord n'est pas connu, on peut l'assimiler à un débit de temps de retour de deux ans. La pente du cours d'eau n'est en général pas connue. Elle est égale à la pente de la vallée divisée par la sinuosité du cours d'eau. La sinuosité n'est en principe pas connue a priori, c'est pourquoi il faut l'estimer. Un cours d'eau en méandres a en principe une sinuosité d'au moins 1.3, c'est pourquoi nous recommandons d'utiliser cette valeur par défaut pour estimer la sinuosité a priori (voir chapitre 3.2).

Si le point tombe sur la limite entre les deux styles, cela signifie que le cours d'eau aura probablement un style intermédiaire entre méandre et tresses, par exemple un cours unique qui sinue faiblement entre des bancs de graviers (bancs alternés).

Dans le cas où le diagramme de Leopold n'est pas suffisamment discriminant, il est possible d'utiliser le diagramme de Yalin et da Silva comme complément, ce qui implique de connaître le diamètre des

matériaux de la berge (dm50), la largeur du lit à plein bords et la hauteur d'eau pour un débit plein bord. Ces deux derniers paramètres n'étant pas connus a priori, ils devront faire l'objet d'une mesure ou d'une estimation.

Si le style fluvial est bien un cours en méandres, on peut passer à la suite de la procédure qui est de déterminer le type de méandres.

Au chapitre 3.3.3, trois types morphologiques de méandres caractérisés par leur géométrie et leur développement ont été mis en évidence :

- les méandres migrants,
- les méandres de courbure,
- les méandres intermédiaires.

Comme nous l'avons mentionné au chapitre 3, les méandres migrants se déplacent vers l'aval. Le moteur de l'érosion est principalement la gravité. Ce type de méandre ne se court-circuite pas et ne génère donc pas d'annexes hydrauliques. Par contre, ils peuvent avoir une dynamique relativement forte. Les méandres de courbure se rencontrent surtout en terrain très plat. Ils connaissent un développement pratiquement symétrique entre la partie aval et la partie amont, et le moteur de l'érosion est la courbure du méandre. Ce genre de système peut déborder fréquemment et la végétation riveraine est influencée par la forte humidité du sol. Les méandres avec court-circuit par déversement représentent le type intermédiaire entre les deux premiers. Ils peuvent comporter des annexes hydrauliques tout en étant aussi partiellement migrants.

Le type morphologique de méandres, tout comme le style fluvial, peut être déterminé d'après des références temporelles ou spatiales.

5.2 Définition de l'espace fonctionnel

L'espace fonctionnel d'un système de méandres est l'espace minimal pour lequel les méandres peuvent atteindre l'amplitude maximale qu'ils auraient dans des conditions naturelles (MALAVOI, 1998). Concrètement, la largeur de cet espace est égale à l'amplitude maximale d'un méandre. La définition de cette espace revient à définir l'amplitude potentielle maximale d'un méandre dans un secteur donné.

Nous avons constaté que l'amplitude maximale est toujours atteinte par le méandre le plus développé, soit Ψ_{max} le plus élevé.

Pour appliquer la procédure à un **cours d'eau naturel**, il s'agit d'identifier le méandre qui a l'amplitude la plus grande et de la mesurer. L'amplitude maximale est atteinte quand le méandre se court-circuite. S'il n'y a pas de méandre court-circuité dans le secteur observé, il faut savoir s'il pourrait y en avoir ou s'il y en a déjà eu. Une étude de documents montrant des états plus anciens ainsi que

l'observation du secteur en aval et en amont doivent apporter une réponse.

Pour un cours d'eau corrigé dont l'état antérieur n'est pas connu, l'amplitude maximale peut être estimée en fonction de la largeur plein bord sur la base de la courbe du méandre et de quelques hypothèses d'ordre géométrique. La Figure 2.5 donne le rapport entre l'amplitude et la longueur d'onde d'un méandre en fonction de sa forme (Ψ_{max}). Or Ψ_{max} dépend du type de dynamique. Pour une dynamique de méandres libres avec des courts-circuits par tangence, Ψ_{max} peut atteindre au maximum 120°, soit un rapport entre lo ngueur d'onde et amplitude de 2.25. Pour une dynamique de méandres libres avec des courts-circuits par déversement, cette valeur est inférieure, et Ψ_{max} atteint environ 90°. Dans ce cas, le rapport entre amplitude et longueur d'onde est de 0.8. Si les méandres sont de type migrant sans court-circuit Ψ_{max} ne dépasse pas les 75° donc le rapport entre amplitude et longueur d'onde est de 0.6.

Le rapport amplitude / longueur d'onde peut donc être connu de manière précise mais cela n'est pas suffisant, il reste encore à estimer la longueur d'onde d'un méandre en fonction de sa largeur pour définir son besoin d'espace. Nous recherchons la longueur d'onde du méandre pour lequel l'amplitude est la plus élevée. En effet, cette longueur n'est pas toujours égale pour une séquence de méandres, on constate que la longueur d'onde peut diminuer lors du développement du méandre. C'est-à-dire que les méandres qui ont l'amplitude la plus élevée ont également la longueur d'onde la plus courte. Certains auteurs avancent qu'il y a un rapport à peu près constant entre la largeur du cours d'eau plein bord et la longueur d'onde. D'après Yalin et da Silva ce rapport est de 6. D'après les méandres que nous avons pu mesurer, il semble que cette valeur soit plutôt de 5 pour des méandres de courbure, de 9 pour des méandres intermédiaires et de 10 pour des méandres migrants. Ainsi on peut relier la largeur du cours d'eau plein bord avec l'amplitude maximale d'un méandre et donc l'espace fonctionnel, selon son type de dynamique.

- Méandres de courbure : Ampl = 11 x la largeur plein bord.
- Méandres intermédiaires : Ampl. = 7 x la largeur plein bord.
- Méandres migrants : Ampl = 6 x la largeur plein bord

5.3 Caractérisation de la dynamique

Nous considérons que deux facteurs de dynamique peuvent avoir une influence sur la mosaïque de végétation. Il s'agit de la dynamique d'inondation et de la dynamique de rajeunissement (érosion et sédimentation). En effet, dans des systèmes naturels, la végétation connexe à un cours en méandre peut varier fortement selon que ses rives subissent plutôt l'action du rajeunissement ou de l'inondation. A

cette étape de la procédure, il est nécessaire d'identifier le processus dynamique qui domine. Ce dernier est corrélé au type de méandre, mais la procédure permet d'évaluer ces éléments indépendamment les uns des autres. En général, les méandres de courbure évoluent dans des terrains très plats à forte humidité. La végétation qui leur est liée est surtout due à l'importante teneur en eau du terrain et aux débordements fréquents du cours d'eau. A l'inverse, les cours en méandre à forte pente et charriage important organisent la mosaïque de végétation par l'effet des processus d'érosion et de sédimentation. Entre deux, les méandres intermédiaires sont influencés par les deux types de dynamique. En résumé, à cette étape, il est important de choisir si le processus dynamique dominant est l'inondation, le rajeunissement ou les deux à la fois. A priori, la dynamique d'inondation est dominante pour les méandres libres à court-circuit par tangence, les deux types de dynamique sont importants pour les méandres à court-circuit par déversement et la dynamique d'érosion et sédimentation domine pour les méandres migrants. Mais ce choix peut être différent si la connaissance du terrain montre qu'il en est autrement.

5.3.1 Caractérisation de l'inondation

L'inondation sera exprimée par le pourcentage de l'espace fonctionnel inondé par une crue d'un débit de temps de retour de cinq ans (Q5). En effet, puisque dans certains cas le débit plein bord correspond à la crue Q2, il est nécessaire d'utiliser un débit supérieur, mais qui survient de façon assez fréquente pour influencer la végétation. Les surfaces inondées sont comptabilisées uniquement en dehors du lit du cours d'eau et sont rapportées à la surface de l'espace fonctionnel sans le cours d'eau. Cet indice donne une indication des zones basses à proximité du cours d'eau, qui sont influencées par les inondations et aussi par la nappe phréatique. Il doit être calculé d'après une carte d'inondation.

5.3.2 Caractérisation de l'influence de l'érosion et de la sédimentation

La dynamique liée aux processus d'érosion et de sédimentation donne une idée de la vitesse de rajeunissement des milieux. On s'intéresse ici à la dynamique qui intervient à l'intérieur de l'espace fonctionnel. La vitesse de ces processus sera mesurée par le **pourcentage de l'espace fonctionnel érodé par année**. Nous supposerons que, sur un secteur d'étude, la surface perdue par érosion est égale à la surface gagnée par sédimentation, ce qui est le cas pour des systèmes en équilibre.

Pour des méandres migrants, cette estimation est en théorie assez simple. On peut dire que 100% de la surface a été rajeunie, lorsque les méandres se sont déplacés sur une distance d'une longueur d'onde vers l'aval. Si ce déplacement prend 50 ans, on dira que, en

moyenne, 2% de la surface de l'espace fonctionnel est rajeuni par année.

Pour les méandres de courbure, on procèdera de façon analogue aux méandres migrants, mais on supposera que 75% de la surface est rajeunie lorsqu'un méandre aura fait un cycle complet de croissance, soit depuis le début de la sinuosité jusqu'à son court-circuit. En effet, comme on peut le voir sur la figure suivante, la dynamique des méandres de courbure implique qu'une certaine fraction de la surface n'est pas atteinte par la dynamique, même dans des conditions tout à fait naturelles. En effet, les méandres de courbure ne balayent pas tout l'espace fonctionnel au contraire des méandres migrants. Concernant la vitesse de croissance d'un méandre, nous supposons que l'accroissement de la longueur totale du méandre est constant dans le temps pour des pas de temps assez grands.

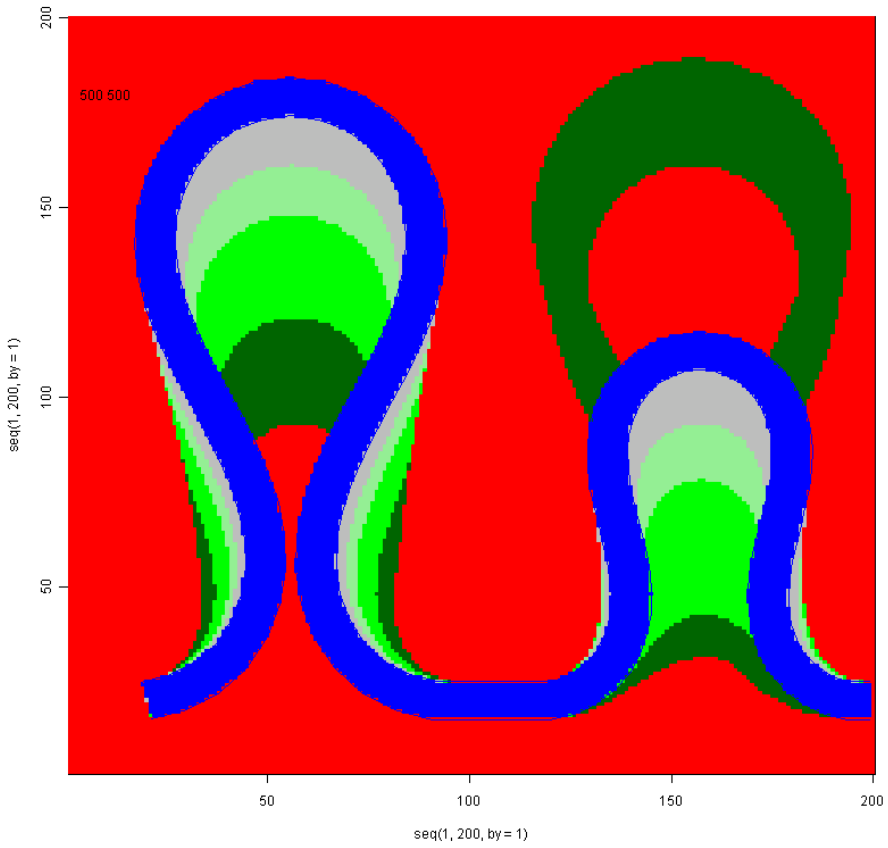


Figure 5.1 : Emprise spatiale d'une dynamique de méandres de courbure.

Un autre moyen d'évaluer la vitesse de cette dynamique, qui peut être appliqué à tous les types de méandres, et de comparer deux états temporels, de mesurer la surface qui a été rajeunie entre ces deux états et d'en déduire la vitesse moyenne en divisant le pourcentage de surface rajeuni par le laps de temps qui sépare les deux états.

Après avoir défini la vitesse de rajeunissement exprimée en % de l'espace fonctionnel érodé par année, il faut définir la mosaïque des

âges de stations, en vue de l'évaluation des valeurs naturelles (voir chap. 5.4). Chaque fraction de l'espace fonctionnel est alors répartie dans les classes d'âge suivantes :

- 1 à 5 ans,
- 5 à 10 ans ,
- 10 à 20 ans,
- 20 à 30 ans,
- plus de 30 ans,
- hors dynamique.

Le total de ces classes représente le 100% de la mosaïque des âges. Le cours d'eau lui-même n'est pas compté dans cette mosaïque.

Pour calculer cette répartition, on utilisera des simulations numériques basées sur la courbe des méandres et sur trois paramètres caractéristiques qui sont la vitesse moyenne de rajeunissement, la sinuosité et le rapport entre l'amplitude maximum d'un méandre et la largeur du cours d'eau (voir annexe 2).

5.4 Evaluation des valeurs naturelles

La qualité générale de l'écosystème d'un secteur de cours d'eau en méandres sera évaluée par trois indices :

1. Biocénoses et habitats: (âge moyen des stations, et inondation). Cet indice a un poids de 50% dans l'évaluation.
2. La connectivité longitudinale terrestre. Cet indice a un poids de 25%.
3. La géomorphologie. Cet indice a un poids de 25%.

Les indices sont évalués à l'aide de sous-indices, que l'on nommera « descripteurs ». Les indices et les descripteurs seront notés par une valeur comprise entre 0 et 100. Une note de 100 (100% de satisfaction) signifie un état optimal, au-delà duquel une augmentation de la valeur du descripteur n'entraîne plus d'augmentation de la valeur naturelle.

5.4.1 Biocénoses et habitats

Cet indice est évalué à l'aide de trois descripteurs qui concernent la surface de l'espace fonctionnel. Il s'agit de :

1. la mosaïque de la végétation (âges des stations),
2. la fraction de l'espace fonctionnel inondé par Q5,
3. les annexes hydrauliques.

Comme mentionné à l'étape 3 de la procédure, le poids accordé à la mosaïque des âges et à la fraction inondée de l'espace fonctionnel

peut varier selon les systèmes de méandres. Les annexes hydrauliques peuvent ajouter un bonus sur la note des biocénoses et habitats.

5.4.1.1 Mosaïque de végétation

La mosaïque de la végétation alluviale est dépendante du modelé topographique mis en place par la dynamique géomorphologique et du régime des inondations affectant les stations (AMOROS et PETTS 1991, KUHN et AMIET 1988). Les deux processus dynamiques identifiés sont l'inondation des stations et les processus d'érosion et de sédimentation (chap. 5.3).

Tout comme pour l'évaluation du contenu et de la qualité des zones alluviales d'importance nationales (THIELEN et al. 2002), la mosaïque de la végétation constitue donc un indicateur général de l'état du système considéré.

A ce stade de la procédure, il est nécessaire de comparer la mosaïque des âges des stations obtenue à la suite de l'étape 3.2 à une mosaïque végétale de référence, définie ci-après.

La référence choisie est « théoriquement reconstruite » (GOEGGEL 2004) ; elle se fonde sur un système théorique de méandres qui érode le 1% de la surface disponible chaque année.

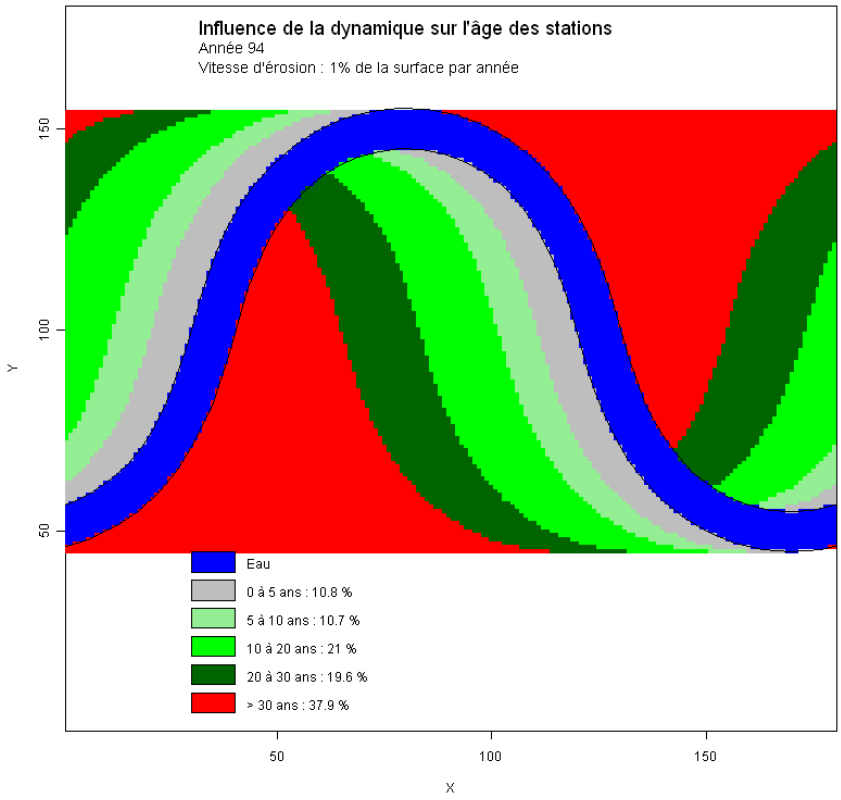


Figure 5.2 : Aspect de la mosaïque des stations (âge des stations) dans l'espace fonctionnel d'un système de méandres pour une vitesse annuelle d'érosion de 1% de la surface par année.

Le choix de cette référence se fonde sur les considérations suivantes :

– la zone alluviale idéale, sous l'angle de la révision de l'inventaire des zones alluviales contient 5 ha de sédiments nus, 20 ha de formations à bois tendres et 20 ha de formations à bois durs ; cette composition est proche de celle de l'image directrice proposée,

– les cartes de la végétation de zones alluviales naturelles présentant des cours d'eau en méandres (objets 118, 211, 217, 301) contiennent des compartiments stables (formations à bois durs ; âge supérieur à 30 ans) à l'intérieur de l'espace fonctionnel (dans une proportion proche de 40%) et aussi et surtout à l'extérieur de l'espace fonctionnel,

– la vitesse d'érosion de 1% par an constitue un ordre de grandeur pertinent pour des systèmes en méandres ; il se situe entre celui de la Thur et de la Venoge (voir chapitre 7).

Une référence unique fondée est proposée ; elle est formée de cinq composantes de la mosaïque végétale, déterminées par l'âge des stations qu'elles occupent dans les systèmes collinéens des Alpes centrales dont on généralise ici les résultats aux autres systèmes alluviaux abritant des méandres (voir « Outil prédictif du développement des milieux riverains », SCZA 2007). Vu la forte ressemblance et analogie de fonctionnement des systèmes alluviaux

de Suisse (voir ROULIER 1998), et en l'absence de données mesurées, cette généralisation est crédible.

- formations herbacées pionnières (y c. roselières),
- fourrés d'essences à bois tendre (saules, aulnes),
- forêts d'essences à bois tendre (saules, aulnes),
- forêts d'essences à bois tendre en transition,
- forêts d'essences à bois durs et autres forêts en station alluviale.

Les cinq composantes de l'image directrice sont désignées par le nom de leur formation végétale (KUHN et AMIET 1988) ou homécie (GILLET et al. 1991 : communautés végétales de physionomie comparable occupant la même fonction écologique indépendamment de leur composition floristique) et non par le nom de la communauté végétale.

Table 5.1 : Image directrice des compartiments d'un système en méandres.

	Formation végétale (Kuhn et Amiet 1988) ou Homécie (Gillet et al. 1991)	Unités zones alluviales (Gallandat et al. 1993)	Compartiment Outil prédictif (SCZA 2007)	Âge de la station	%
1	Formations herbacées pionnières et form. d'hélophytes	3, 4, 5, 17.1	Al1	0-5 ans	10.8
2	Fourrés d'essences à bois tendre (saules, aulnes)	6, 7, 8, 9 pp	Al2.1, Al2.2	5-10 ans	10.7
3	Forêt d'essences à bois tendre (saules, aulnes)	6, 7, 8, 9 pp	Al2.3	10-20 ans	21
4	Forêt d'essences à bois tendre en transition	6, 7, 8, 9 pp	Al3.1, Al3.2	20-30 ans	19.9
5	Forêt d'essences à bois durs et autres forêts en station alluviale	10, 11, 12, 13, 14, 15, 16.1	Al4	30 ans et plus	37.9

L'image directrice proposée contient un compartiment dynamique (formations 1, 2, 3, 4 : formations herbacées et ligneuses pionnières) occupant le 60% de l'espace fonctionnel du système et un secteur plus stable, mais inondable (formations ligneuses à bois durs) de 40 %.

En l'état actuel on propose une référence unique. Il serait possible d'identifier plusieurs références (reflétant la diversité des systèmes), voire de créer une référence ad hoc pour un projet donné.

Pour chaque classe d'âge une note entre 0 et 100 est attribuée par interpolation linéaire entre 0 et la valeur optimale de la classe d'âge. On calcule ensuite la moyenne de ces notes en considérant que chaque classe d'âge a le même poids. Exemple :

Âge de la station	% de Ef valeur opt.	% de Ef valeur selon étape 3	Note
1-5 ans	10.8	20	100
5-10 ans	10.7	20	100
10-20 ans	21	15	71.4
20-30 ans	19.6	15	76.5
30 ans et plus	37.9	30	79.2

Dans cet exemple la note de la mosaïque de la végétation est de 85.4 = (100+100+71.4+76.5+79.2)/5.

5.4.1.2 Inondations

Mesure de l'indicateur

La proportion (en %) de l'espace fonctionnel inondé par Q5 est obtenue à l'issue de l'étape 3.

Exploitation des données

100*(Surface inondée par Q5 (sans cours d'eau) / Surface de l'espace fonctionnel (sans cours d'eau))= % net d'inondation

Note : % net d'inondation x 2

Exemple :

Inondation net : 30%

Satisfaction : 30 x 2 = 60 %

5.4.1.3 Annexes hydrauliques

Mesure de l'indicateur

La présence d'annexes hydrauliques connectées ou non connectées au cours d'eau est évaluée et mesurée à l'aide d'une orthophotographie, du modèle numérique de terrain, de la carte de la végétation ou d'une visite de terrain.

Sont comptées comme annexes hydrauliques, des zones d'eau calme ou bas-fond humides qui ont été créés par la dynamique des méandres. Seules les annexes hydrauliques situées à l'intérieur de l'espace fonctionnel sont comptabilisées. La présence d'annexes ajoute un bonus à la note des biocénoses et habitats. Pour calculer ce bonus, on utilisera la notion de densité d'annexes hydrauliques, qui exprime le rapport entre le nombre d'annexes hydrauliques et le nombre de méandres présents à l'état naturel dans le secteur d'étude. Pour un tronçon dont le cours est irrégulier, le nombre de méandres théorique peut être estimé en divisant la longueur de l'espace fonctionnel par la longueur d'onde moyenne des méandres. Cette dernière peut être déduite connaissant la sinuosité et l'amplitude

maximale d'un méandre. Le bonus maximum des annexes hydrauliques est de 25%.

Exploitation des données

Bonus = 25% x densité des annexes hydrauliques
Densité des annexes hydrauliques = nombre d'annexes/nombre de méandres

5.4.2 Connectivité longitudinale terrestre

Mesure de l'indicateur

La largeur de la bande riveraine est délimitée tout le long du cours d'eau sur les deux rives. Comme mentionné au chapitre 4, les types d'occupation du sol suivant sont à inclure dans la bande riveraine :

- Prairie extensive, pâturage extensif, surface à litière,
- Pâturage boisé, berge boisée, bosquet champêtre,
- Forêt alluviale, forêt de berge.

Ces occupations du sol sont repérables et cartographiables directement sur l'orthophotographie (à une petite échelle : 1:10'000-1:25'000). Pour une cartographie plus détaillée (1:1000 – 1:5'000), une visite sur le terrain est conseillée.

Exploitation des données

Une fois la bande riveraine définie de chaque côté du cours d'eau, on mesure la longueur totale où cette bande dépasse 10m de large. On rapporte cette longueur à la longueur totale du cours d'eau multipliée

par deux (deux rives) et on obtient un pourcentage de la longueur du cours d'eau où la bande riveraine dépasse 10m de large. On nommera cette valeur B10.

On répète l'opération pour une bande de 30m de large, puis pour une bande de 50m de large. On obtient donc ainsi une valeur B30 et une valeur B50.

Finalement, basé sur la considération qu'une bande de 10m permet d'assumer 50% des fonctions de connectivité longitudinale terrestre, qu'une bande de 30m en assume le 80% et qu'une bande de 50m correspond au 100%, l'indice de connectivité longitudinale est calculé de la façon suivante :

Note connectivité longitudinale terrestre = 0.5*B10+0.3*B30+0.2*B50

5.4.3 Géomorphologie

Comme nous l'avons vu au chapitre 3, les systèmes de méandres ont des caractéristiques géomorphologiques bien identifiables, qui sont communes à tous les méandres de cours d'eau. Le profil en long comporte des seuils et des radiers qui font varier la vitesse du courant. Le profil en travers est caractérisé par une rive en pente douce et une rive en pente abrupte, ce qui influence la nature des berges et la variation de la profondeur de l'eau. Il est connu que ces aspects ont une influence sur la qualité et la diversité des habitats de la faune benthique et des poissons, ainsi que sur les espèces riveraines. C'est pourquoi l'évaluation des objets géomorphologiques en tant qu'indice des valeurs naturelles se fonde sur les trois descripteurs suivants :

- la présence de berges abruptes à l'extérieur des courbes et de bancs de sédiments à l'intérieur des courbes,
- la variation de la vitesse du courant,
- la variation de la profondeur de l'eau.

Pour le calcul de l'indice, chaque descripteur aura le même poids, c'est-à-dire 33.33%. Cependant, les deux derniers descripteurs exigent des mesures in situ, ce qui n'est pas toujours possible, notamment si on évalue un état historique ou un état projeté. Dans ce cas, on peut se contenter d'appliquer uniquement le premier descripteur. En effet, dans un système naturel, les caractéristiques géomorphologiques sont toutes liées entre elles. Si les berges correspondent à celles des systèmes de méandres, cela implique très probablement que les autres paramètres géomorphologiques sont également conformes.

5.4.3.1 Rives abruptes et rives en pente douce

La présence de bancs de sédiments à l'intérieur des courbes de méandres et de berges d'érosion à l'extérieur des courbes est un

indicateur de qualité des systèmes de méandres fonctionnels. Ces deux types de rives sont cartographiés et transformés en % de satisfaction. Pour la description des types de rives, l'indicateur 43 « Dynamique de la structure de la berge » du Guide de suivi de l'EAWAG est appliqué et adapté (Woolsey et al. 2005).

Mesure de l'indicateur

La mesure de l'indicateur consiste à cartographier les types de rives du lit mineur. Sept types de rives sont identifiés dans la fiche de l'indicateur 43 ; il est proposé d'en reconnaître seulement deux types :

- rives abruptes à l'extérieur des courbes,
- rives plates à l'intérieur des courbes.

Ces deux types de berge sont choisis car ils sont caractéristiques des systèmes de méandres.

Exploitation des données

Une satisfaction de 100 % équivaut à une représentation de l'un ou l'autre des types de rives (berge d'érosion abrupte, berge en pente douce d'accumulation de sédiments) d'au moins 50 % de la longueur des rives examinées.

Formule

Note = (% de berge abrupte + % de berge en pente douce) x 2

5.4.3.2 Variation de la vitesse du courant

L'indicateur 16 « Hydraulique : variation de la vitesse d'écoulement » du Guide de suivi de l'EAWAG est appliqué et adapté (Woolsey et al. 2005) pour décrire les conditions d'écoulement de l'eau dans le système.

Mesure de l'indicateur

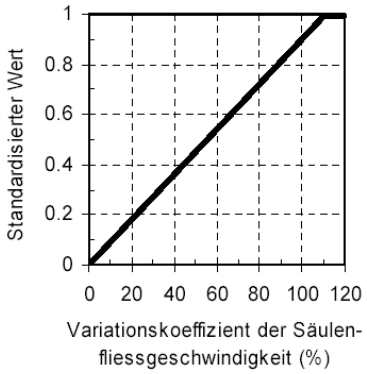
La mesure de la vitesse de l'eau s'effectue sur plusieurs profils transversaux par rapport au cours d'eau.

Exploitation des données

Un coefficient de variation des vitesses de l'eau est calculé : c'est le quotient de l'écart-type des vitesses et de leur valeur moyenne.

$$VC_{Fliessgeschwindigkeit} = \frac{\sigma_{Fliessgeschwindigkeit}}{\mu_{Fliessgeschwindigkeit}} \; 100 \; [\%]$$

La conversion en indice de satisfaction s'effectue selon le graphe ci-dessous.



Pour la procédure « méandres » nous utilisons une valeur comprise entre 0 et 100, donc il faut multiplier la valeur standardisée du suivi EAWAG par 100.

5.4.3.3 Variabilité de la profondeur d'écoulement

Au même titre que la vitesse d'écoulement de l'eau, la profondeur de l'eau est un bon indicateur de la variabilité du cours d'eau.

Mesure de l'indicateur

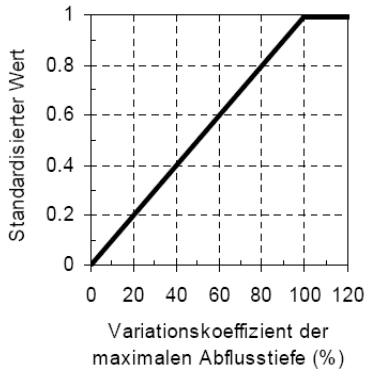
La mesure de la profondeur de l'eau s'effectue sur plusieurs profils transversaux par rapport au cours d'eau. On utilise les profils transversaux mesurés selon le standard de l'OFEV dans les tronçons de cours d'eau d'importance nationale et les hauteurs d'eau mesurées par étiage ou, pour des scénarios éventuels, calculées par modélisation.

Exploitation des données

Un coefficient de variation de la profondeur de l'eau est calculé : c'est le quotient de l'écart-type des profondeurs maximales et de la valeur moyenne de ces profondeurs maximales.

$$VC_{\max.Tiefe} = \frac{\sigma_{\max.Tiefe}}{\mu_{\max.Tiefe}} \; 100 \; [\%]$$

La conversion en indice de satisfaction s'effectue selon le graphe ci-dessous



Pour la procédure « méandres » nous utilisons une valeur comprise entre 0 et 100, donc il faut multiplier la valeur standardisée du suivi EAWAG par 100.

6 Végétation des systèmes en méandres et des sites d'étude

Pour décrire la végétation des systèmes en méandres de manière générale mais exhaustive, une typologie des systèmes alluviaux d'Allemagne éditée par le « Bundesamt für Naturschutz » : « Fluss- und Stromauen in Deutschland – Typologie und Leitbilder » (Koensen 2005). Cet ouvrage contient une clé pour identifier le type de système alluvial ; 11 grands systèmes sont décrits sur la base de critères morphologiques et hydrologiques. La végétation occupant les compartiments de l'écosystème est décrite. Nous avons utilisé cet ouvrage pour identifier l'image directrice de la végétation des trois secteurs d'étude (Aar, Thur, Venoge).

Le chapitre est structuré comme suit :

- type de système. Les trois secteurs d'étude ont été identifiés dans la typologie sur la base de critères abiotiques, notamment la pente du fond de la vallée, les sédiments dominants, le degré de courbure du cours d'eau, le régime hydraulique, etc.,
- végétation potentielle. La végétation colonisant est décrite dans un écogramme (tableau) organisé sur deux axes : gradient d'inondation, gradient de « morphodynamique »,
- végétation dans les trois secteurs d'étude (Aar, Thur, Venoge). La végétation des secteurs d'étude est brièvement décrite et illustrée sur la base des documents existants (notamment les cartes de la végétation) et de visites sur le terrain. Les associations végétales mentionnées sont pour la plupart référencées dans la cartographie des zones alluviales (GALLANDAT et al. 1993, annexe IX).

6.1 Aar

6.1.1 Type

Selon le diagramme des critères abiotiques aboutissant au type, le tronçon de l'Aar situé entre Rüti bei Büren et Altreu appartient au type « Gefällearme sandgeprägte Flussaue des Flach- und Hüggellandes mit Winterhochwassern ».

Zone alluviale des étages planitiaire et collinéen. Cours d'eau à pente faible, sur substrat sableux, présentant des hautes eaux hivernales

6.1.2 Végétation potentielle

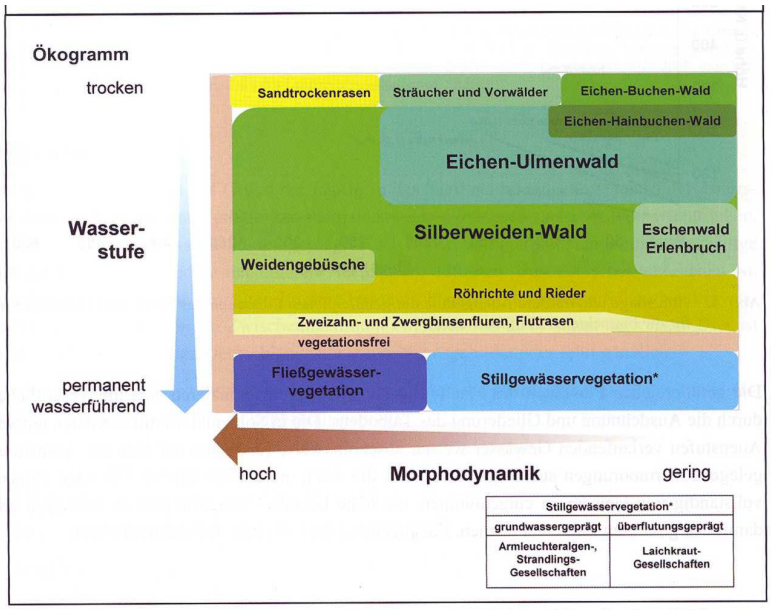


Figure 6.1 : Ecogramme (KOENSEN 2005).

La végétation de ce type est très diversifiée en raison de l'importante largeur du système dans son extension naturelle et des nombreuses annexes hydrauliques séparées du cours principal par la dynamique. La végétation naturelle comprend :

Un **compartiment aquatique** à courant lent abritant des associations à rubanier émergé (Sparganium emersum) et des associations de potamots (Potamogeton sp.). Le compartiment à courant rapide est absent en raison de la faible pente (0,1 à 0,5 0/00). On trouve aussi des annexes hydrauliques à eau stagnante oligotrophe (Association de Characées (Chara sp) et de Litorelle (Littorella sp.) et des annexes hydrauliques à eau eutrophe (Associations de potamots (Potamogeton sp.) et de lentilles d'eau (Lemna sp).

Communautés pionnières des sédiments : le compartiment terrestre débute avec diverses communautés pionnières des sédiments, moins répandues que dans le type suivant (Thur) en raison d'une dynamique plus douce. Les communautés d'hélophytes

(roselières et prairies humides) leur font suite dans la zonation en direction de la terre.

Forêts alluviales : la forêt alluviale typique et bien répandue qui borde invariablement les grands cours d'eau lent est la forêt de saule blanc (Salicetum albae) qui occupe les terrasses alluviales inférieures. La chênaie à orme (Querco-Ulmetum, alliance : Alno-Ulmion) constituie le compartiment de forêt à bois dur et la chênaie à charme (Querco-Carpinetum, alliance : Carpinion betuli) un compartiment proche du climax, mais cependant inondable (Dister 1980), dans les stations les plus élevées.

Le **compartiment marécageux** est réduit ; il occupé par les prairies à laîches, par la forêt d'aulne noir (Alnion glutinosae) et par la frênaie à aulne noir (alliance non citée) ; ces formations sont présentes dans les cuvettes humides et les anciens méandres à nappe superficielle permanente.

Compartiment sec. L'écogramme présente dans sa partie supérieure une série de 3 communautés constituant une série spatiale de station sèche : prairie sèche, fourrés et forêt thermophile.

Globalement, ce type de système alluvial est riche en compartiments en raison des gradients écologiques de dynamique (milieux jeunes - âgés), d'humidité, resp. d'inondation, et des compartiments marécageux que l'on y trouve.

6.1.3 Végétation présente

Figure 6.2 : Ecogramme. La présence d'une communauté est indiquée par un rectangle rouge. L'importance d'une communauté est symbolisée par la dimension du rectangle.

La végétation présente à l'heure actuelle se fonde sur la carte de la végétation des zones alluviales no 47 « Altwässer der Aare und Zihl BE » (état 1988, objet à l'extérieur du secteur d'étude, mais représentatif) et de l'objet no 221 « Aare bei Altreu BE/SO » (état 1996, objet inclus dans le secteur d'étude). De manière générale, la végétation de l'Aar dans le secteur d'étude est réduite à une étroite

bande d'arbres riverains entre l'eau et le chemin de berge et à quelques roselières.

Végétation des eaux courantes : aucune observation n'a été faite lors de la visite du 23 mai 2010. Il est cependant vraisemblable que cette végétation soit présente.

Végétation des eaux calmes : végétation présente en petites surfaces dans les annexes hydrauliques (méandres Rütisack, isolés du cours d'eau, zones d'eau calme de l'objet 221) : communautés de Nénuphar blanc (Nymphaea alba) dans les étangs du méandre de Rütisack.

Communautés pionnières des sédiments : elles sont quasiment absentes dans le secteur d'étude en raison de la stabilisation des berges qui ne ménage pas de plages de sédiments. Les communautés d'hélophytes sont bien représentées par les roselières et prairies à laîches colonisant les secteurs d'eau calme alimentés par le fleuve.

Forêts alluviales : la saulaie blanche est présente mais sous une forme fragmentaire et appauvrie dans le grand méandre de Büren (hors secteur d'étude) et à l'état fragmentaire à Altreu (objet 221) où elle couvre quelques ares. La ripisylve de transition de cours d'eau (unité de cartographie no 12) est une frênaie alluviale relevant de la forêt à bois durs (Alno-Ulmion) et présente dans la zone alluviale 47 mais pas dans le secteur d'étude qui abrite des peuplements de frêne trop étroits pour constituer des frênaies. La chênaie à charme est absente du secteur d'étude.

Le secteur d'étude ne contient pas de compartiment sec.

Compartiment marécageux : les forêts marécageuses (unités 9 et 11) sont absentes du secteur d'étude.

Table 6.1 : 1. Cordon boisé alluvial du bord de l'Aar et roselière (courbe interne). 2. Forêt de saule blanc. 3. Forêt de frêne. 4. Canal artificiel « Bras mort ». 5. Association à grandes laîches. 6. Roselière aquatique dans un bras mort. 7. Prairie humide dans bras mort. 8. Etangs dans bras mort. Figures 1-6 : Aare bei Altreu (zone alluviale 221). 7-8 : Ancien méandre de Rütisack.

6.2 Thur

6.2.1 Type

Selon le diagramme des critères, le tronçon de la Thur appartient au type « Gefällereiche kiesgeprägte Flussaue des Flach- und Hüggellandes mit Winterhochwassern ».

Zone alluviale des plaines et des collines. Cours d'eau à pente prononcée, sur substrat graveleux, présentant des hautes eaux hivernales

6.2.2 Végétation potentielle

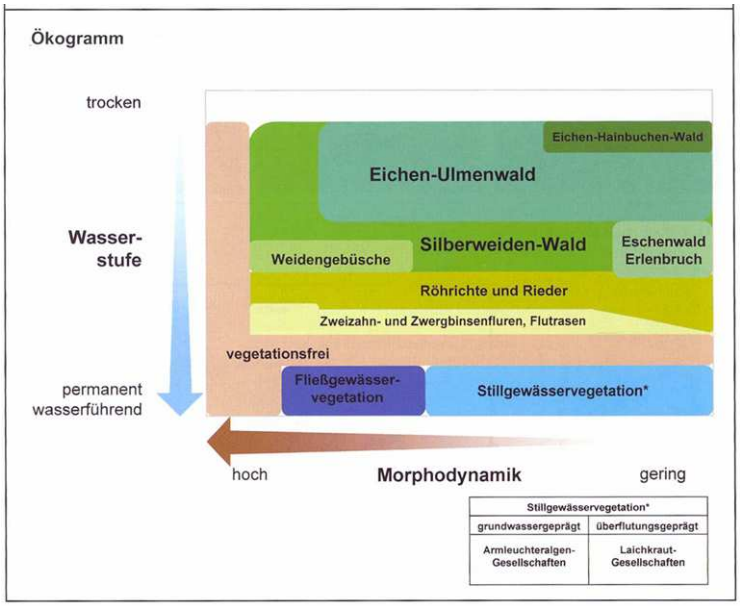


Figure 6.3 : Ecogramme (Koensen 2005).

La végétation naturelle comprend :

Un **compartiment aquatique** à courant lent abritant des associations à rubanier émergé (Sparganium emersum) et des associations de potamots (Potamogeton sp.) ou à courant rapide (Associations à renoncules aquatiques (Ranunculus sp.) abritant des associations à callitriche (Callitriche sp.) et à myriophylle (Myriophyllum sp.). On trouve aussi des annexes hydrauliques à eau stagnante oligotrophe (association de Characées (Chara sp) et à eau eutrophe (associations de potamots (Potamogeton sp.) et de lentilles d'eau (Lemna sp).

Le **compartiment terrestre** débute avec les bancs de sédiments nus ou faiblement colonisés qui occupent un espace important en raison de la dynamique du cours d'eau (pente prononcée du cours d'eau). Diverses communautés pionnières des sédiments colonisent ces alluvions : Bidentetea, Isoeto-Nanojuncetea, Agropyro-Rumicion. Les communautés d'hélophytes et de hautes herbes constituent des roselières fluviatiles et la transition vers les fourrés alluviaux.

La **forêt alluviale** dominant le système est à nouveau la forêt de saule blanc (Salicetum albae) qui occupe les terrasses alluviales inférieures (compartiment à bois tendre). La chênaie à orme (Querco-Ulmetum) colonise les terrasses supérieurs (compartiment à bois dur). En marge de la zone alluviale, en contact avec le climax, se développe la chênaie à charme (Querco-Carpinetum). Ces 2 dernières associations appartiennent à l'alliance du Carpinion betuli (chênaies-charmaies).

Le **compartiment marécageux** est réduit ; il est colonisé par les prairies à laîches, par la forêt d'aulne noir (Alnion glutinosae) et la frênaie (Eschenwald, Alnenion glutinosae), formations présentes dans les cuvettes humides et les anciens méandres atterris à nappe superficielle permanente.

Le **compartiment sec** est absent de l'écogramme de ce type de système ; par contre, il est présent dans le type voisin tout proche, qui se distingue par des substrats de texture sableuse (à la place de texture graveleuse).

La végétation de ce système est diversifiée en raison de l'importante largeur de la vallée (dans son extension naturelle) et des nombreuses annexes hydrauliques liées au méandrage qui abandonne des méandres inactifs (coupés du cours principal) ou temporairement en contact lors des crues. La dynamique active génère des gradients écologiques temporels (milieux jeunes - âgés), d'humidité (terrasses alluviales de diverses hauteurs) et des compartiments annexes marécageux.

6.2.3 Végétation présente

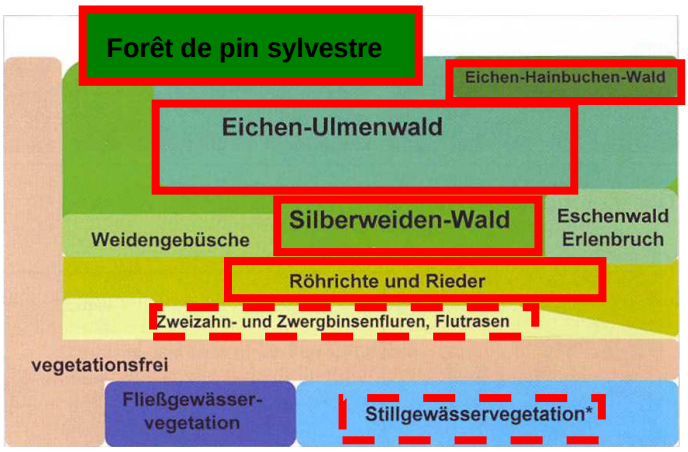


Figure 6.4 : Ecogramme. La présence des communautés est indiquée par un rectangle rouge. L'importance des communautés est symbolisée par la dimension des rectangles.

La végétation actuelle du secteur d'étude de la Thur est décrite sur la base de la carte de la végétation de la zone alluviale 5 « Eggrank-Thurspitz ZH/SH » (état 1988 et 1995, documents produits par OFEV) et de la « Typologie et dynamique des zones alluviales de Suisse » (Roulier 1998).

Végétation des eaux courantes : absente dans le cours d'eau actuel qui présente un courant trop rapide pour la végétation aquatique enracinée.

Végétation des eaux calmes : présente dans les annexes hydrauliques qui restent nombreuses dans le système (méandres coupés du cours d'eau) : les associations présentes sont à identifier.

Communautés pionnières des sédiments : elles sont absentes ou très peu développées dans le secteur d'étude (cours corrigé, rives stabilisées) mais pourront se développer rapidement dès les premières étapes de revitalisation : Bidentetea, Agropyro-Rumicion sont 2 unités syntaxonomiques répandues. Isoeto-Nanojuncetea est très rare et menacé en Suisse ; il est vraisemblablement absent du périmètre.

Forêts alluviales : la saulaie blanche est présente mais sous une forme stable et vieillissante dans les méandres fossiles du système. Le système alluvial actuel ne présente pas de régénération de cette forêt. Les frênaies alluviales (forêts à bois durs : unité 10 et 12 de la carte) couvrent de vastes surfaces à la Thur ; elles occupent le compartiment dévolu à la chênaie à orme dans l'écogramme de la typologie allemande. La chênaie est présente et répandue dans le secteur (Remarque : elle a été cartographiée sous l'unité 16.1 ; l'unité 14 « Chênaie » est absente, l'unité 16.1 « Autres forêts alluviales » est répandue).

Compartiment sec : ce compartiment est répandu à la Thur ; il est représenté par des fourrés thermophiles et des pinèdes de pin

sylvestre (probablement favorisées par les forestiers) sur les terrasses les plus élevées de sédiments filtrants, secs en été.

Compartiment marécageux : il est représenté par les roselières et prairies à laiche colonisant les bras morts ; les forêts marécageuses (unités 9 et 11) sont absentes du secteur d'étude.

Table 6.2 : 1. Vue aérienne du secteur d'étude de la Thur (Auteur : M. Oplatka). 2. Saulaie blanche fragmentaire (Auteur : M. Oplatka). 3. Frênaie et chênaie. 4. Pinède. 5. Méandre atterri. 6. Méandre inondé.

6.3 Venoge

6.3.1 Type

Selon le diagramme des critères, le tronçon de la Venoge entre Penthalaz et Bussigny appartient au type « Gefällereiche schottergeprägte Flussaue des Grundgebirges mit Winterhochwassern ».

Zone alluviale des massifs montagneux. Cours d'eau à pente forte, sur substrat graveleux, présentant des hautes eaux hivernales

6.3.2 Végétation potentielle

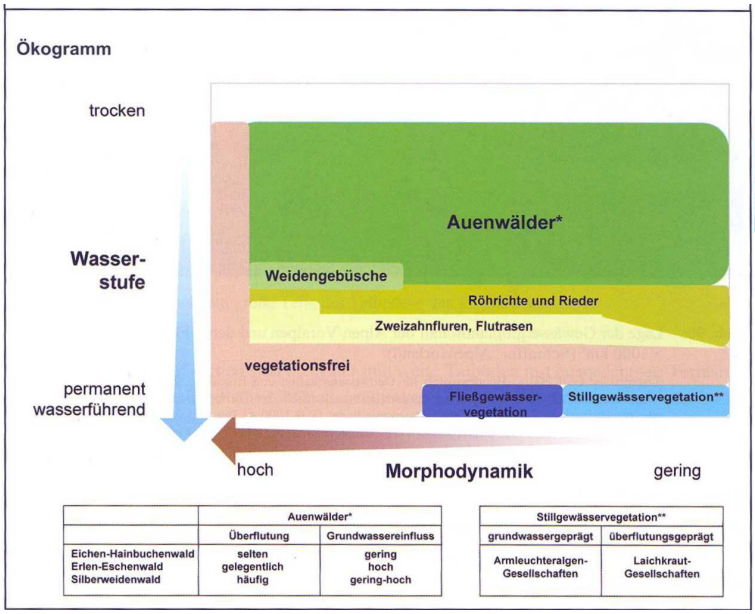


Figure 6.5 : Ecogramme (Koensen 2005).

La végétation naturelle comprend :

Un **compartiment aquatique** à courant rapide (associations à renoncules aquatiques (Ranunculus sp.), associations à callitriche (Callitriche sp.) et à myriophylle (Myriophyllum sp.). Le compartiment d'eau calme abrite des associations de rubanier émergé (Sparganium emersum) et de potamots (Potamogeton sp.). On trouve aussi des annexes hydrauliques à eau stagnante oligotrophe (associations de Characées ou de Littorelles (Chara sp. Littorella sp.) et à eau eutrophe (Associations de potamots (Potamogeton sp.) et de lentilles d'eau (Lemna sp).

Le **compartiment terrestre** débute avec des sédiments nus, bien répandus, puis colonisés par diverses communautés pionnières des alluvions. La **forêt alluviale** à bois tendre est la forêt de saule blanc (Salicetum albae) qui occupe les terrasses alluviales inférieures. La chênaie à orme (Querco-Ulmetum – Alno-Ulmion) et la chênaie à charme (Querco-Carpinetum - Carpinion) colonisent les terrasses alluviales les plus élevées.

Le **compartiment marécageux** est présent sous la forme de prairies à laîche et de roselières, par la forêt d'aulne noir (sous-alliance Alnenion glutinosae) et la forêt de frêne à aulne noir (Alno-Ulmion) ; ces formations sont présentes dans les cuvettes humides et dans les anciens méandres à nappe d'eau superficielle permanente.

L'écogramme ne présente pas de compartiment sec.

Globalement, ce type de système alluvial est un peu moins riche en compartiments en raison de l'étroitesse de la vallée et de la pente plus forte permettant un moins grand développement des milieux secs et des milieux marécageux. Il contient cependant quelques annexes

hydrauliques coupées du cours principal par la dynamique naturelle, annexes qui diversifient le système.

6.3.3 Végétation présente

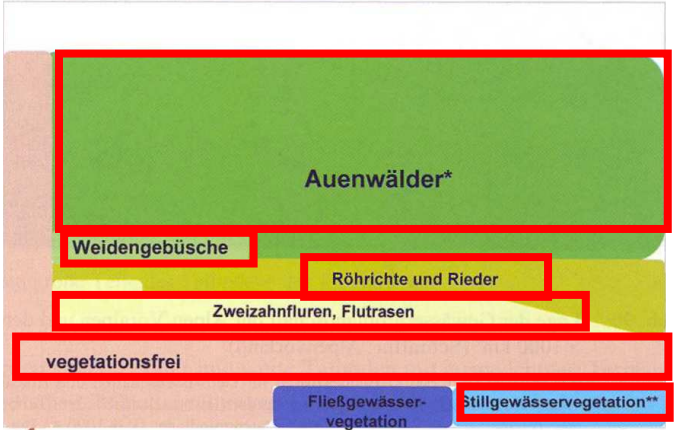


Figure 6.6 : Ecogramme. La présence des communautés est indiquée par un rectangle rouge. L'importance des communautés est symbolisée par la dimension des rectangles.

La description de la végétation présente à l'heure actuelle se fonde sur la carte de la végétation des zones alluviales 120 « Les Iles de Bussigny » (état 1988 et 2007) et 121 « La Roujarde » (état 1988). Des visites des objets 120, 121 et du secteur de Vufflens (objet candidat 302) ont été effectuées, la dernière en date du mercredi 28 avril 2010.

La végétation des eaux courantes (associations de plantes aquatiques enracinées) est absente dans le cours d'eau en raison de la vitesse du courant.

La **végétation des eaux calmes** est présente partiellement dans les annexes hydrauliques (méandres coupés du cours d'eau) ; des communautés à lentille d'eau ont été constatées (classe des Lemnetea), la présence d'autres syntaxons serait à contrôler. Il n'y a pas de compartiment oligotrophe.

Communautés pionnières des sédiments : elles sont répandues et luxuriantes dans le secteur d'étude: Bidentetea (présence probable mais non établie) ; Agropyro-Rumicion est une alliance répandue, de même que d'autres alliances pionnières d'annuelles (Polygonion avicularis) et de vivaces (Calystegion sepii, Aegopodion podagrariae, Dauco-Melilotion). Les roselières fluviatiles à phalaris roseau (Phalaris arundinacea) sont très répandues.

Forêts alluviales. La saulaie blanche est présente dans le secteur d'étude, de manière fragmentaire mais régulière. Les forêts d'essences à bois dur sont bien répandues dans le secteur ; elles sont représentées par la frênaie à orme (unité 10) et la ripisylve de transition de rivière (unité 12), deux unités à classer dans l'alliance Alno-Ulmion. La forêt la plus répandue dans la zone alluviale de la

Venoge est un peuplement mélangé de hêtre, d'épicéa, de frêne et d'autres essences feuillues, que l'on peut placer dans le compartiment des forêts à bois dur en raison du bas niveau topographique des terrasses alluviales qu'il occupe, des inondations qu'il subit au printemps et en dépit de la composition floristique proche du climax qu'il présente, tant dans les strates ligneuses qu'herbacées. La chênaie à charme n'est, à notre connaissance, pas présente.

Le compartiment sec n'est pas représenté.

Compartiment marécageux : il est représenté par les roselières et prairies à laîches colonisant les quelques bras morts ; la forêt marécageuse d'aulne noir (unités 9) est absentes du secteur d'étude. Elle est cependant présente dans un objet proche situé en amont (objet 122 « Bois de Vaux ») ; un grand méandre coupé du cours d'eau par la voie de chemin de fer abrite une vaste forêt d'aulne noir. Quelques bas-fonds humides sont colonisés par la frênaie à aulne noir (unité 11).

Table 6.3 : 1. Zonation : Sédiments nus.- Communautés herbacées pionnières - saulaie – frênaie. 2. Communauté d'hélophytes, méandre actif et frênaie. 3. Communauté pionnière herbacée. 4. Saulaie et aulnaie. 5. Méandre actif. 6. Inondation terrain agricole. 7. Inondation frênaie 8. Inondation forêt de hêtre.

7 Application de la procédure aux systèmes de référence

7.1 Aar

7.1.1 Définition du style fluvial

Dans ce cas, le style est assez simple à déterminer. D'après le MNT et d'après plusieurs cartes historiques, il est clair que l'Aar est un cours d'eau en méandres, de type méandres de courbure (avec court-circuit par tangence).

Profitons de l'occasion pour vérifier la validité du graphique de Leopold (LANGBEIN ET LEOPOLD 1966). Rappelons que la pente de l'Aar à cet endroit est de 0.1‰ et que le débit morphogène (Q2) est de 504 m3/s.

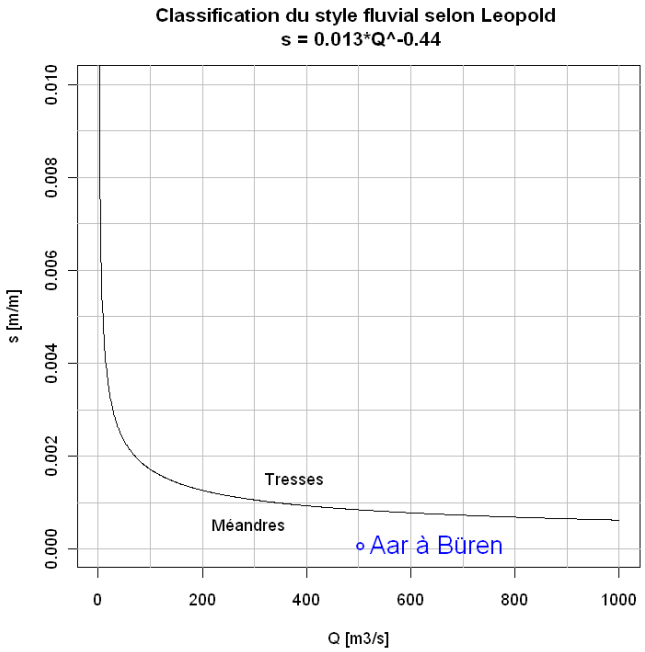


Figure 7.1 : La pente et le débit morphogène de l'Aar le classent dans les cours d'eau en méandres selon la formule de Leopold (1957).

7.1.2 Définition de l'espace fonctionnel

La largeur de l'espace fonctionnel correspond à l'amplitude maximum d'un méandre dans le secteur d'étude. Or l'amplitude maximum est atteinte lorsqu'un méandre se court-circuite.

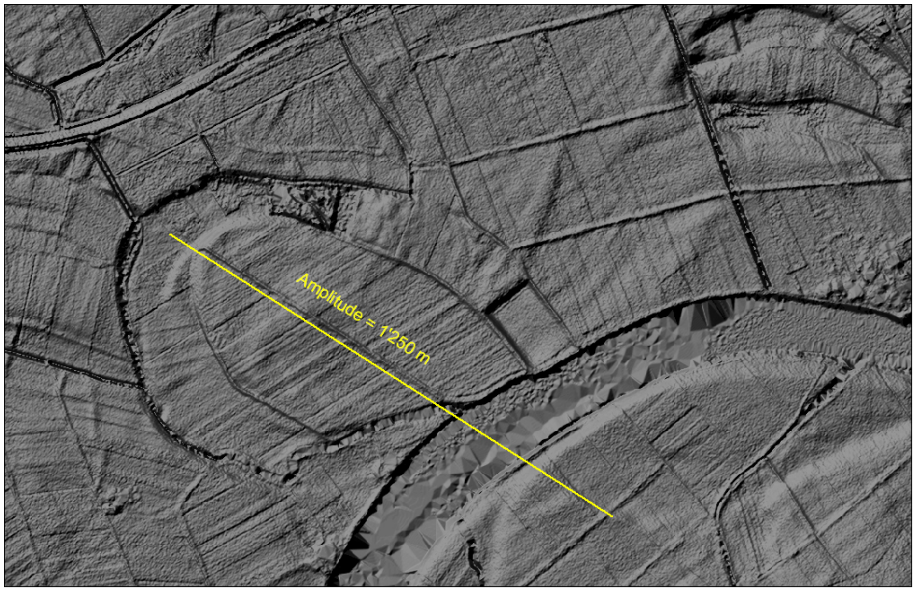


Figure 7.2 : Détermination de la largeur de l'espace fonctionnel pour l'Aar.

La partie inférieure de l'ancien méandre n'est plus visible. Pour l'estimer, on utilise la courbe du méandre et le fait que le court-circuit par tangence intervient au trois quart de l'amplitude du méandre. L'amplitude est mesurée au centre du cours d'eau et non aux extrémités. La largeur du cours d'eau sera ajoutée à l'espace

fonctionnel. Précisément, la largeur à prendre en considération est la largeur plein bord mesurée dans un point d'inflexion. Pour l'Aar, elle est de 130m ce qui donne un espace fonctionnel de 1380 m de large.

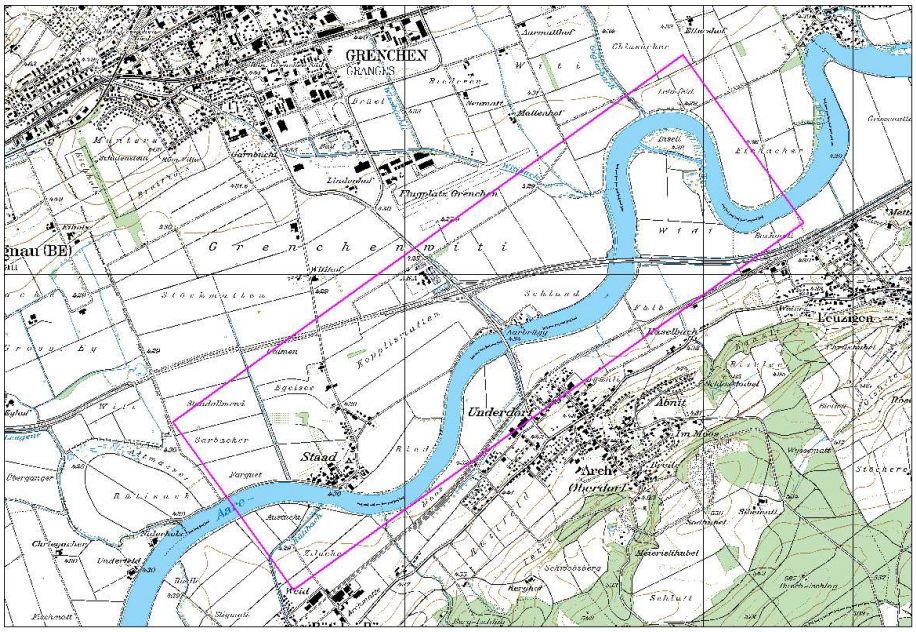


Figure 7.3 : Délimitation de l'espace fonctionnel de l'Aar.

Ici, l'espace fonctionnel est un rectangle. Sa longueur est de 4'200 m et sa largeur est de 1380 m. La longueur de l'Aar dans cet espace est de 5'930 m. Le coefficient de sinuosité de 1.41, ce qui est assez bas pour un système de méandres de courbure. Dans cet exemple, les limites amont et aval sont fixées arbitrairement. Notons également que le rapport entre l'amplitude maximum d'un méandre et la largeur du cours d'eau est environ égale à 10.

7.1.3 Caractérisation de la dynamique

Des recherches historiques sont nécessaires pour comprendre la dynamique de l'Aar. Son bassin versant a été fortement modifié lors des deux premières corrections des eaux du Jura. La première correction a eu lieu entre 1868 et 1891. Les travaux de la première correction n'ont pas affecté directement notre secteur, car l'Aar n'a pas été modifié entre Büren et Soleure. Cependant, les travaux en amont ont des conséquences importantes sur la dynamique de l'Aar. Le fait de d'avoir détourné l'Aar dans le Lac de Bienne modifie sensiblement le régime de charriage et la fréquence des inondations. En effet la plupart des sédiments transportés par l'Aar se déposent dans le Lac de Bienne, ce qui réduit l'apport en transport solide. Les crues sont également laminées par l'effet de rétention du Lac de Bienne, ce qui réduit la fréquence des inondations (c'était d'ailleurs un but de la correction).

La deuxième correction des eaux du Jura a lieu entre 1962 et 1973. Cette fois, le tronçon de l'Aar situé entre Büren et Soleure a été

modifié. Les rives ont été stabilisées entre Büren et Soleure, et l'Aar a été approfondi de 2 mètres et élargi de 30 m entre Nidau et Büren, de plus la suppression d'un obstacle situé près de l'embouchure de l'Emme fait baisser le niveau d'eau d'environ 1.50 m.

Les deux corrections des eaux du Jura conduisent à la suppression de toute dynamique. Cela dit, même avant 1861, l'Aar ne devait pas se mouvoir rapidement. En effet, une carte de 1818 montre un tracé quasi similaire au tracé actuel.

Figure 7.4 : MNT de l'Aar, topographie actuelle.

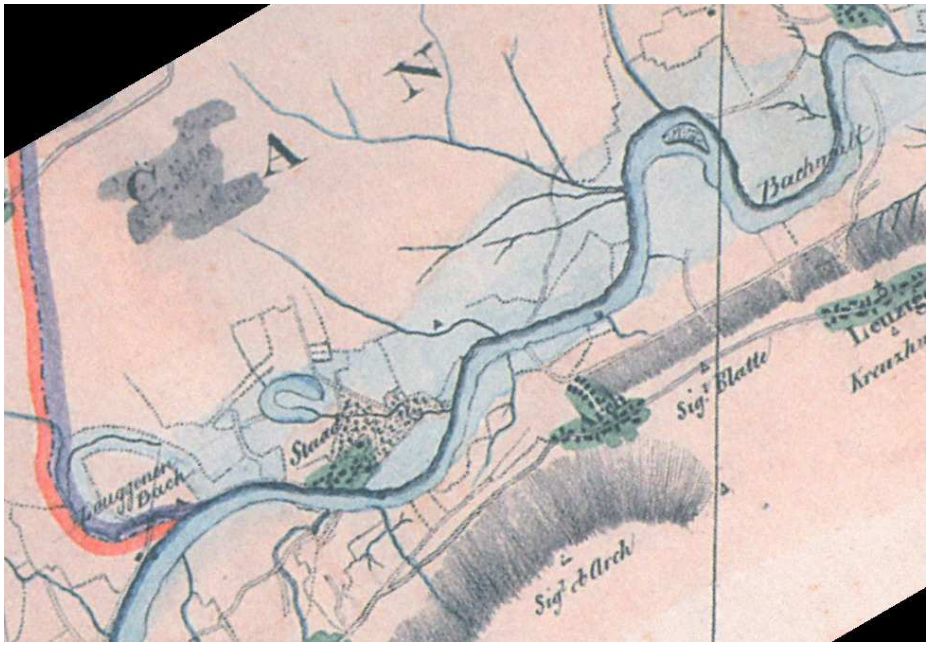


Figure 7.5 : Carte de l'Aar de 1817-1818 faite par Trechsel et Opfikofer.

Par contre, les inondations devaient être assez fréquentes, puisque la plaine de l'Aar était très marécageuse (NAST, 2006, p.7). « *Peu de*

personnes savent que ce paysage a été presque entièrement façonné par la main de l'homme. Sans son intervention, il ne serait pas ponctué de routes et de voies ferrées, mais de cours d'eau et d'étangs. Des marais, des forêts primitives et des roseaux s'étendraient à perte de vue. Le promeneur n'entendrait qu'un assourdissant concert de chants d'oiseaux et le bourdonnement incessant de milliers de moustiques. ».

La végétation de l'Aar, en conditions naturelles, semble dépendante avant tout d'une dynamique d'inondation ; en conséquence, la détermination de la mosaïque des âges n'est pas pertinente pour ce cas.

Pour connaître le niveau d'inondation, nous nous sommes référé au niveau de l'Aar du 1er avril 2006, enregistré à la station de Brügg Aegerten, en effet ce jour là, le débit était proche du débit de Q5 et le niveau était de 428.5 m. Comme la pente de l'Aar est d'environ 0.1‰ dans toute cette région et que la station est située 10 km en amont du secteur étudié, nous avons utilisé l'altitude de 427.5 m comme niveau d'inondation pour Q5 pour le secteur d'étude. Comme la pente du terrain est très faible, nous avons supposé que ce niveau était égal pour tout l'espace fonctionnel.

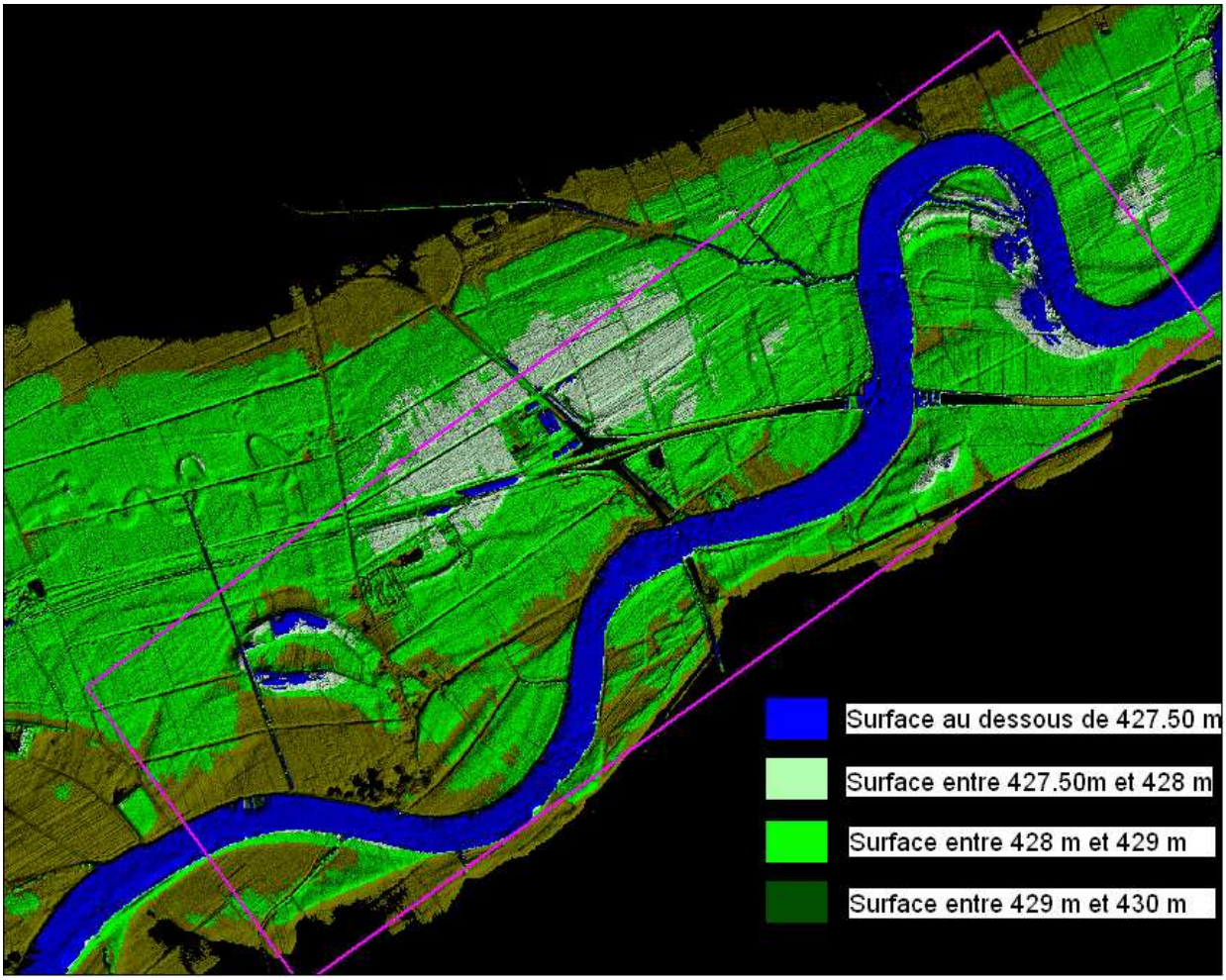


Figure 7.6 : Surfaces proches de l'Aar inondées pour Q5 dans son état actuel (couleur bleue).

On observe que seule une petite fraction de la surface est atteinte par Q5. Les surfaces en bleu situées loin de l'Aar ne sont pas atteintes par débordement, mais probablement par la nappe. Selon notre procédure, elles ne font pas partie des surfaces inondées. Sur la base de cette image, on peut calculer que la fraction de l'espace fonctionnel submergé par Q5 (sans le cours d'eau) est de 0,94% (4.7 ha / 496.5 ha).

7.1.4 Evaluation des valeurs naturelles

7.1.4.1 Biocénoses et habitats

Mosaïque des âges : comme ce descripteur n'a pas été jugé pertinent pour ce type de méandre (voir chapitre 7.1.3), il n'a pas été évalué.

Inondation : la surface nette d'inondation est de 0,94%, la note est donc de 1.9.

Annexes hydrauliques : on compte une annexe hydraulique dans l'espace fonctionnel pour 2.25 méandres, la densité d'annexe hydraulique est donc de 0.44 et le bonus est de 11.1 (= 25 x 0.44).

Récapitulation : la note qui évalue l'indice des biocénoses et habitats est de 13 (= 1.9 + 11.1), pour l'Aar dans son état actuel et dans l'espace fonctionnel défini au chapitre 7.1.2.

7.1.4.2 Connectivité longitudinale terrestre

L'Aar, malgré ses méandres, présente une connectivité terrestre plutôt basse. Ce déficit est dû au fait que la rivière est entourée de cultures intensives ne lui laissant guère d'espace en dehors d'une mince bande boisée et d'un milieu humide attenant aux environs de Leuzigen. Pour l'évaluation, la bande riveraine de 10m est présente sur moins de la moitié du tronçon (42%), et celles de 30m (11%) et 50m (7%) se trouvent seulement au niveau des cordons boisés des affluents et d'un milieu humide. La note de cet indice est donc de 0.5*42 + 0.3*11 + 0.2*7 = 25.7.

7.1.4.3 Géomorphologie

Cartographie des rives : D'après une cartographie sommaire basée sur une orthophoto, le secteur de l'Aar comporte 18.5% de berge en pente douce et pas de berge d'érosion en pente abrupte.

Variation de la vitesse de l'eau : Ce descripteur devant être mesuré in situ, il n'est pas évalué ici.

Variation de la profondeur de l'eau : Ce descripteur devant être mesuré in situ, il n'est pas évalué ici.

Récapitulation : La note de la géomorphologie, dans ce cas uniquement fondée sur la composition des rives, est de 37 (= 18.5 x 2).

7.1.4.4 Récapitulation

Ce système, très stabilisé, obtient une note de 13 pour les biocénoses et habitats, de 25.7 pour la connectivité longitudinale terrestre et de 37 pour la géomorphologie, soit une note globale de 22.2 (= 0.5 x 13 + 0.25 x 25.7 + 0.25 x 37).

7.2 Thur

7.2.1 Définition du style fluvial

La Thur a été corrigée dès 1850. Contrairement à l'Aar, les anciens méandres n'ont pas été figés, mais coupés. Un tracé rectiligne a été mis en place. Actuellement un plan de revitalisation de la Thur est en cours, divers tronçons ont déjà été revitalisés, d'autres sont en projet.

L'étude de cartes historiques et le MNT vont nous permettre de définir le style fluvial de la Thur.

Chemin constituant un repère

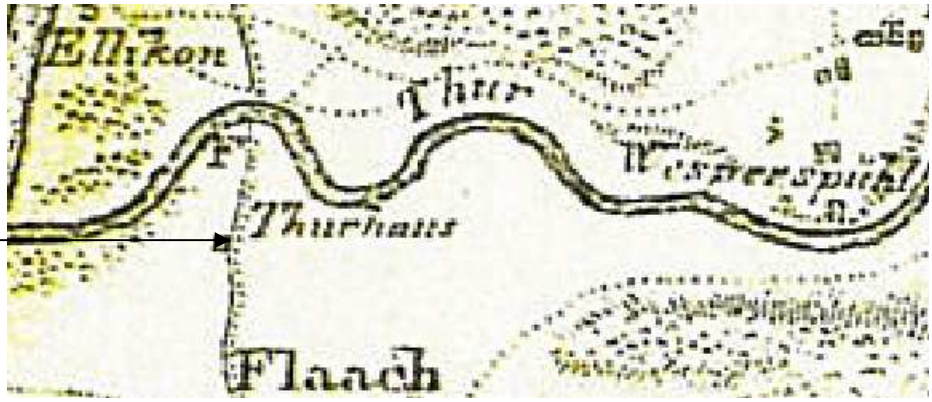


Figure 7.7 : Carte de la Thur de Heinrich Keller en 1828.

Chemin constituant un repère

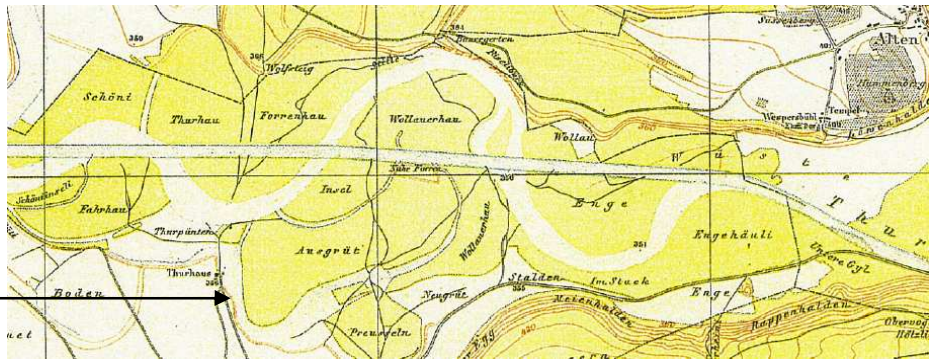


Figure 7.8 : Wild-Karte de la Thur, 1849.

Chemin constituant un repère

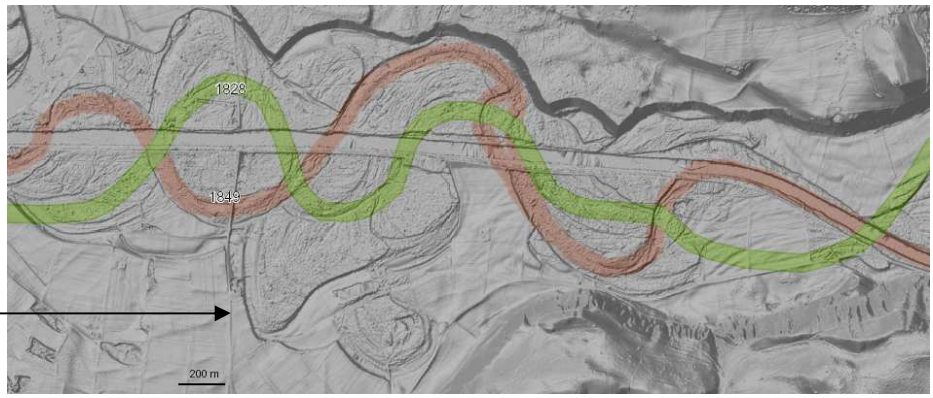


Figure 7.9 : Superposition des tracés de la Thur de 1828 et 1849 avec le MNT.

D'après la forme des méandres, la différence de position du cours d'eau entre 1828 et 1849 et d'après les anciens bras visibles sur le MNT, nous pouvons dire que nous sommes en présence de méandres de type migrant, sans court-circuit.

Le graphique de Léopold confirme que les conditions de pente et de débit correspondent à un système de méandres.

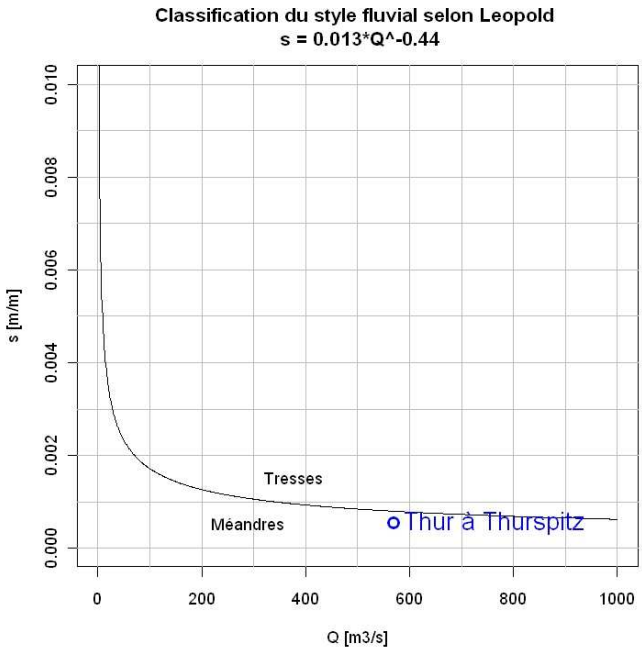


Figure 7.10 La pente (0,57 ‰) et le débit morphogène (Q2 = 571 m3/s) de la Thur la classent dans les cours d'eau en méandres selon la formule de Leopold.

7.2.2 Définition de l'espace fonctionnel

Le tracé de 1828 présente des méandres plus réguliers que ceux de 1849, c'est pourquoi il est choisi pour déterminer l'amplitude maximum des méandres.

Figure 7.11 : Détermination de l'espace fonctionnel des méandres de la Thur d'après son tracé de 1828.

L'amplitude maximum d'un méandre est estimée à 610 m, alors que la largeur plein bord avant correction est estimée à 90 m. C'est pourquoi, l'espace fonctionnel aura une largeur de 700 m.

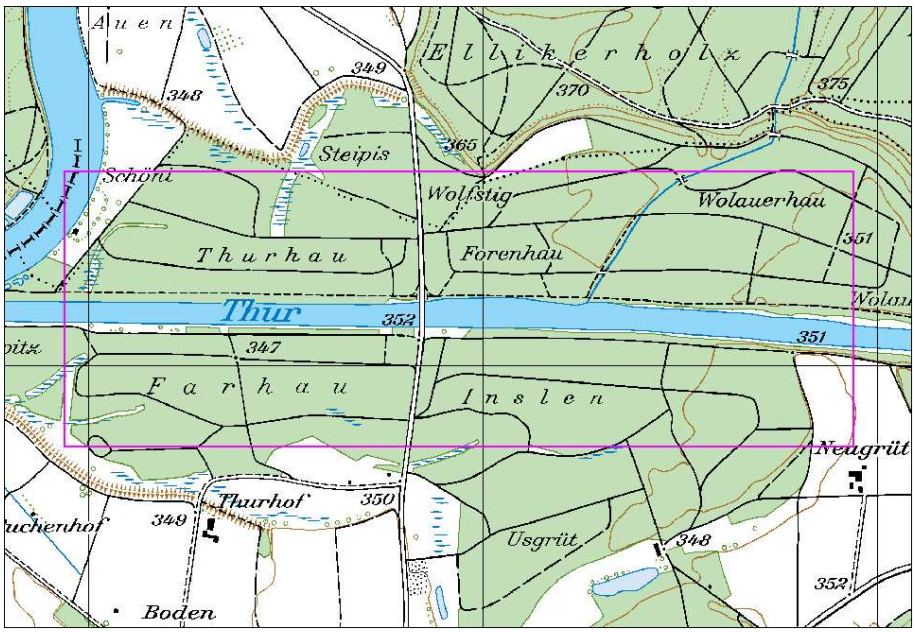


Figure 7.12 : Espace fonctionnel de la Thur près de Thurspitz.

L'espace fonctionnel est un rectangle de 700 m x 2000 m, soit 140 ha. Le coefficient de sinuosité de la Thur à cet endroit avant sa correction était de 1.31, ce qui correspond à un Ψ_{max} d'environ 60°. Notons que l'amplitude des méandres est environ égale à 7x la largeur plein bord.

7.2.3 Caractérisation de la dynamique

L'observation des tracés de 1828 et 1849 montre que la Thur a un fort potentiel d'érosion et migre rapidement. On voit qu'en l'espace de 21 ans, les méandres ont migré d'une demi longueur d'onde. On en déduit que 100% de la surface est érodée est 42 ans, donc la vitesse moyenne d'érosion est de 2.38 % de l'espace fonctionnel par année, soit 3.3 ha par année. Cette érosion est très importante, mais semble correspondre au caractère de la Thur qui connaît des grandes variations de débit et un transport solide important. Voyons maintenant la mosaïque de la végétation qui en résulte.

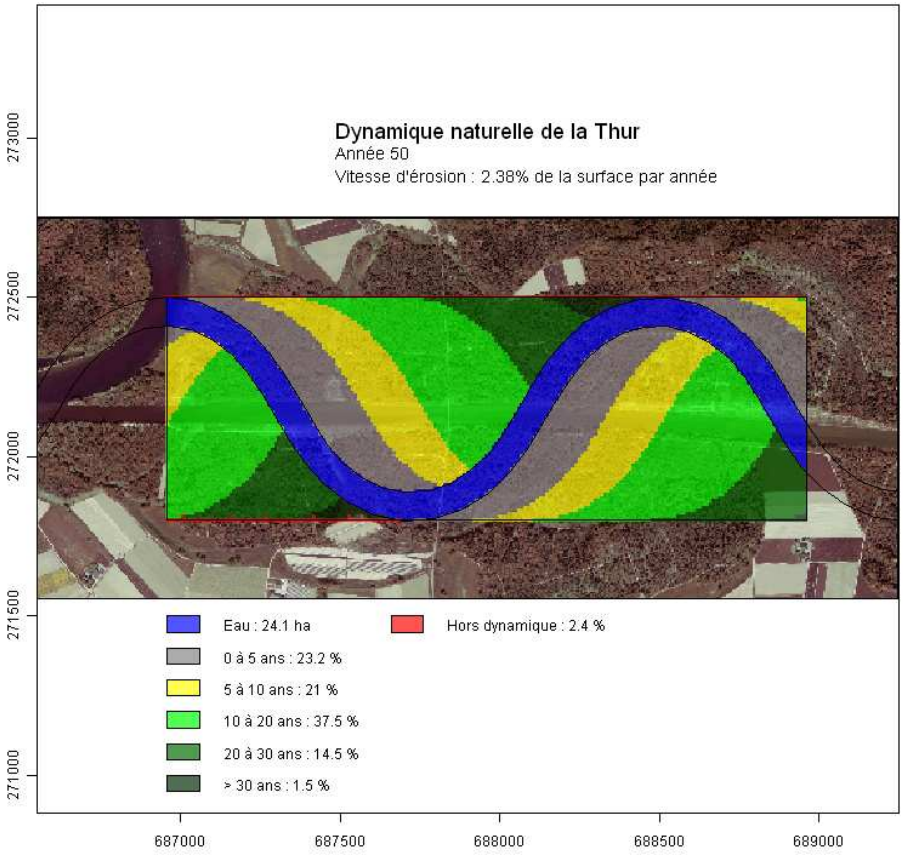


Figure 7.13 : Mosaïque de la végétation de la Thur dans des conditions naturelles, basée sur l'âge des stations.

On observe une mosaïque variée, la dynamique relativement rapide donne peu de compartiments dont l'âge est supérieur à 30 ans.

Examinons maintenant un autre état qu'on obtiendrait si la Thur évoluait dans un espace restreint. En effet, le projet de deuxième correction de la Thur prévoit un espace de divagation d'environ 400m de large pour ce tronçon, largeur du cours d'eau comprise, ce qui correspond à diminuer de moitié l'amplitude des méandres.

Pour évaluer la mosaïque qui en résulte, nous supposerons que la sinuosité du cours d'eau ne change pas, donc Ψ_{max} vaut toujours 60°, et la surface érodée par année reste la même. Comme l'espace à disposition est de 2000m x 400m, la vitesse d'érosion sera de 2.38 x (7/4)% = 4.17% de l'espace restreint par année. Ainsi la surface érodée par année reste de 3.33 ha.

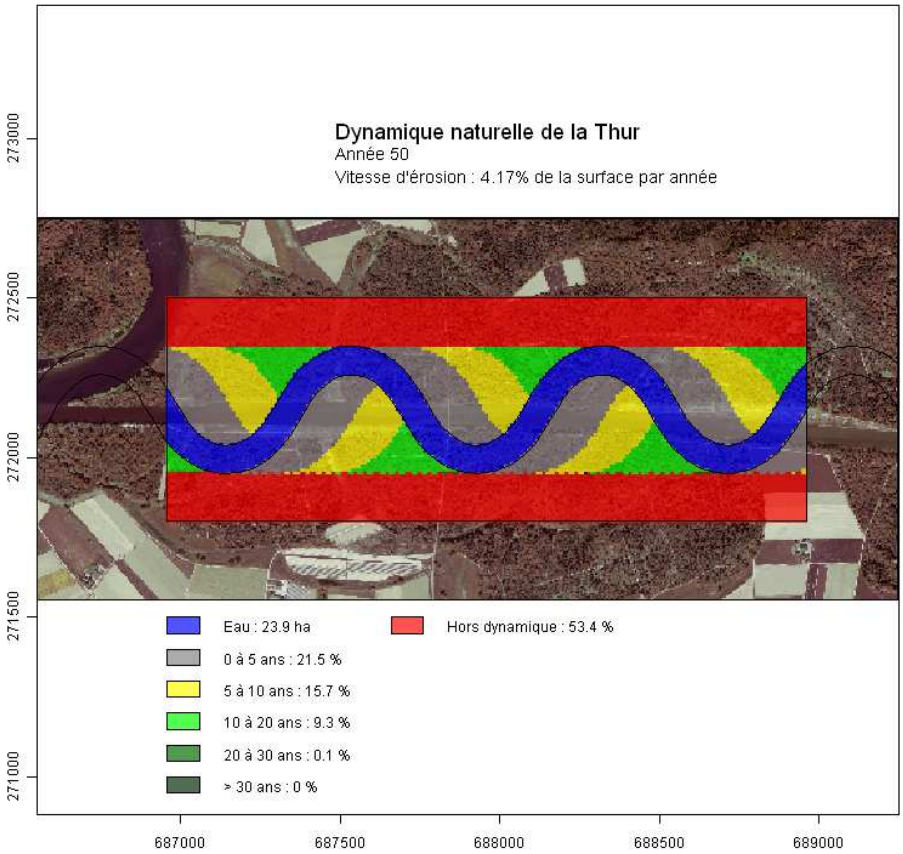


Figure 7.14 : Mosaïque des âges des stations de la Thur avec une dynamique naturelle dans un espace inférieur à l'espace fonctionnel.

Avec cette variante, on voit que les compartiments jeunes sont bien représentés, par contre les stations de 10 à 20 ans sont minoritaires et les stations de plus de 20 ans sont absentes.

7.2.4 Evaluation des valeurs naturelles

7.2.4.1 Biocénoses et habitats

Mosaïque des âges des stations : Cet indice est évalué pour la Thur dans son état naturel (avant correction), et dans son état futur (après revitalisation). Dans le projet de revitalisation l'espace fonctionnel a une largeur de 400m au lieu de 700m dans l'état naturel.

					Thur espace fonctionnel		Thur espace restreint	
Formation végétale (Kuhn et Amiet 1988) ou Homécie (Gillet et al. 1991)	Unités zones alluviales (Gallandat et al. 1993)	Compartiment Outil prédictif (SCZA 2007)	Âge de la station	% de Ef valeur opt.	%	note	%	note
Formations herbacées pionnières et form. d'hélophytes	3, 4, 5, 17.1	Al1	0-5 ans	10.8	23.2	100	21.5	100
Fourrés d'essences à bois tendre (saules, aulnes)	6, 7, 8, 9 pp	Al2.1, Al2.2	5-10 ans	10.7	21	100	15.7	100
Forêt d'essences à bois tendre (saules, aulnes)	6, 7, 8, 9 pp	Al2.3	10-20 ans	21	37.5	100	9.3	24.8
Forêt d'essences à bois tendre en transition	6, 7, 8, 9 pp	Al3.1, Al3.2	20-30 ans	19.6	14.5	73.98	0.10	0.69
Forêt d'essences à bois durs et autres forêts en station alluviale	10, 11, 12, 13, 14, 15, 16.1	Al4	30 ans et plus	37.9	1.5	3.96	0.00	0.00
					Note moyenne	75.59		45.10

Selon la mosaïque des âges calculée au point 7.2.3, la Thur dans son état naturel aurait un score de 75.59 et la Thur dans un espace restreint à 400m de large aurait un score de 45.10. Cela dit, dans le deuxième cas, on pourrait aussi imaginer que l'espace situé hors de la dynamique de rajeunissement est de la forêt de plus de 30 ans. Dans ce cas le score remonterait à 65.10.

Inondation : l'indice d'inondation n'a pas été jugé pertinent pour ce type de méandres très dynamique. Il n'est donc pas évalué.

Annexes hydrauliques : ce paramètre est délicat à évaluer car dans l'état actuel, des bras morts sont bien présents dans l'espace fonctionnel et même en dehors. Mais il est difficile de savoir si ces annexes hydrauliques sont dues à une dynamique naturelle de la Thur, ou si elles résultent de la rectification de la Thur par l'Homme qui a déconnecté artificiellement ces anciens bras en creusant un tracé rectiligne sur toute la longueur du secteur étudié. La procédure recommande de ne prendre en compte que les annexes hydrauliques qui sont la conséquence d'une dynamique naturelle des méandres. En effet, les annexes artificielles peuvent s'atterrir et ne sont pas renouvelées spontanément. Mais dans le cas de la Thur, il semble que ces annexes soient durables et ajoutent une réelle plus value au système, c'est pourquoi elles sont comptabilisées. Dans les deux cas évalués, nous supposerons que l'espace fonctionnel comporte une annexe hydraulique pour deux méandres, soit un bonus de 12.5.

Récapitulation : La note de l'indice biocénose et habitats est de 88.1 pour la Thur dans son état naturel avant correction. La note de la Thur dans un espace restreint à 400m est de 57.6, si on suppose que la zone située hors dynamique n'est pas de la forêt alluviale.

7.2.4.2 Connectivité longitudinale terrestre

A l'état naturel, la connectivité terrestre de la Thur est bonne puisque ses rives sont constituées de forêts. Elle n'est pas tout à fait de 100% car en amont du secteur, la Thur est très proche d'une falaise, ce qui

limite la bande riveraine. Pour l'évaluation, on supposera que la bande riveraine de 10m est présente sur 100% du tracé, la bande riveraine de 30m sur 90% du tracé et la bande de 50m sur 85%. La note de cet indice pour l'état naturel est donc 0.5*100 + 0.3*90 + 0.2*85 = 94.

Dans l'état avec espace restreint, si on suppose que les méandres sont confinés par une limite qui coupe la bande riveraine, la connectivité longitudinale terrestre est interrompue là où le cours d'eau atteint la limite. Dans ce cas, la bande riveraine de 10m serait présente sur 93% de la longueur, la bande de 30m sur 86% et la bande de 50m sur 79%. La note de cet indice pour l'état avec espace restreint serait de 88.1 (0.5*93 + 0.3*86 + 0.2*79).

7.2.4.3 Géomorphologie

Composition des rives : la dynamique de ce système étant très importante, on peut raisonnablement supposer que la proportion de rive abrupte et de rive en pente douce dépasse 50% pour les deux états évalués. La note de ce descripteur est donc de 100%.

Variation de la vitesse de l'eau : Ce descripteur ne peut pas être mesuré in situ, il n'est pas évalué ici.

Variation de la profondeur de l'eau : Ce descripteur ne peut pas être mesuré in situ il n'est pas évalué ici.

Récapitulation :

La note géomorphologie de la Thur dans son état naturel est de 100% et dans son état avec un espace fonctionnel restreint est de 100% également. Faute de mesures possibles, cette évaluation est fondée uniquement sur la composition des rives. Le fait d'avoir un espace restreint, mais une dynamique naturelle ne péjore pas, a priori, les critères basés sur le lit et ses berges.

7.2.4.4 Récapitulation

Pour l'état naturel :

La note des biocénoses et habitats est de 88.1, la note de géomorphologie est de 100 et la note de connectivité longitudinale terrestre est de 94. La note finale est donc de 92.6.

Pour l'état avec espace restreint :

La note des biocénoses et habitats est de 57.6, la note de géomorphologie est de 100 et la note de connectivité longitudinale terrestre est de 88.1. La note finale est donc de 75.8.

7.3 Venoge

7.3.1 Définition du style fluvial

La Venoge est un système proche de l'état naturel, même si elle évolue dans un espace restreint. Ce confinement est dû d'une part à la topographie, car la Venoge coule dans une vallée étroite, et d'autre part à un certain nombre de points fixes et de stabilisations de berge qui doivent leur existence à divers bien à protéger, notamment une route cantonale et une voie de chemin de fer. Malgré cela, la Venoge présente dans plusieurs secteurs une dynamique active, comme en témoigne de nombreuses traces d'érosion et de sédimentation. Il suffit d'observer une carte ou une photo aérienne récente pour constater que la Venoge est un cours d'eau en méandres. Pour l'application de la procédure nous allons nous focaliser sur le secteur situé dans la zone alluviale de Bussigny, afin d'observer un secteur naturel et homogène.

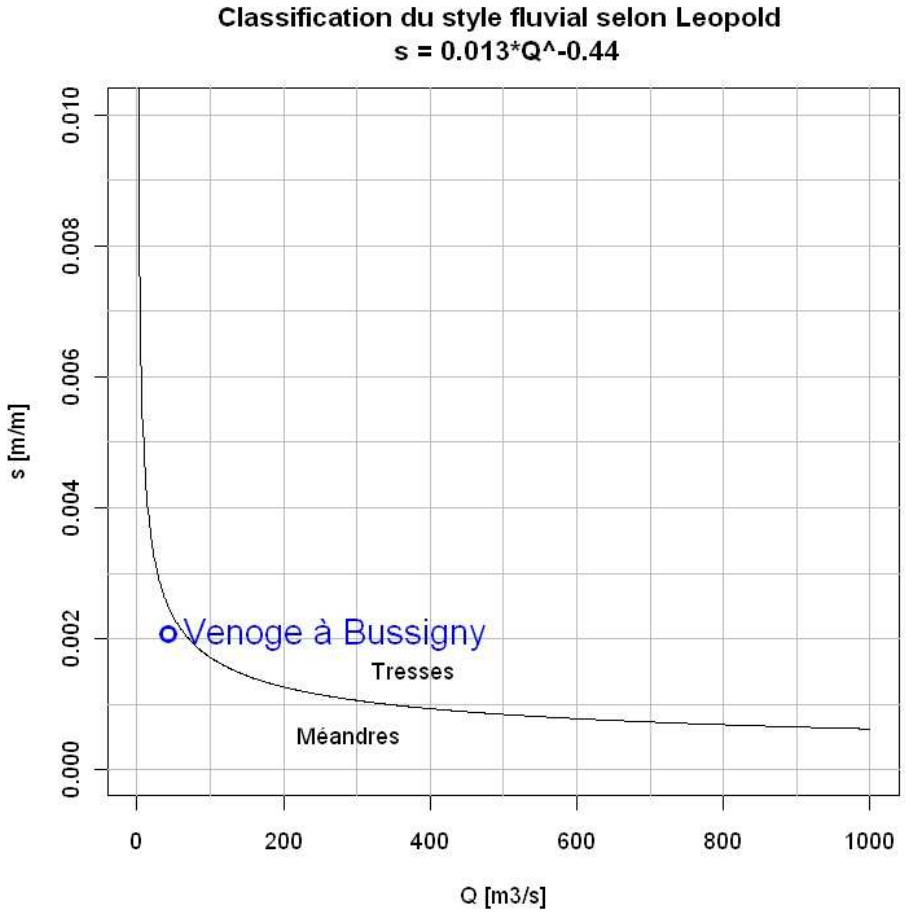


Figure 7.15 : Avec un débit morphogène de 46 m3/s et une pente de 2.1‰, la Venoge se classe parmi les cours d'eau en méandres, selon la formule de Leopold (1957).

On remarque que d'après la graphique de Leopold, la Venoge est un cours d'eau en méandres, mais assez proche d'être un cours en tresses.

Le type de méandre prédominant est le type intermédiaire (avec courts-circuits par déversement), comme le montre cette carte nationale de 1980. En analysant la dynamique, nous verrons que la plupart des méandres se déplacent également par migration.

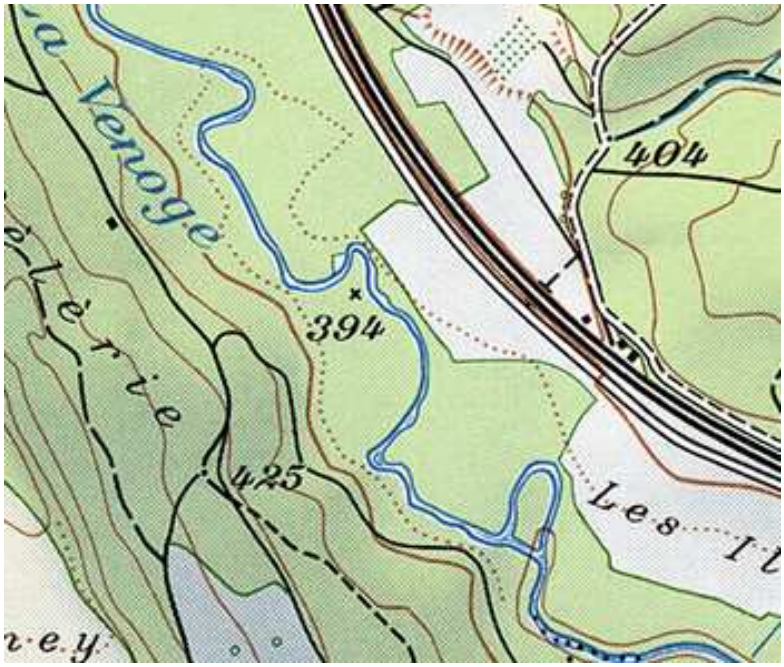


Figure 7.16 : Méandre de la Venoge court-circuité par déversement, carte nationale de 1980.

7.3.2 Définition de l'espace fonctionnel

L'espace fonctionnel est déterminé en mesurant l'amplitude du méandre le plus grand. Dans notre secteur, il s'agit du méandre court-circuité. Son amplitude est de 100m et la largeur plein bord de la Venoge à cet endroit est de 20m, ce qui donne un espace fonctionnel de 120m de large. Les limites amont et aval correspondent à peu près à celles du périmètre de la zone alluviale. L'espace fonctionnel a une longueur de 1260 m et une surface de 15.68 ha. La longueur du cours d'eau dans cet espace est de 1740 m, donc le coefficient de sinuosité vaut 1.38.

On remarquera que le rapport entre la largeur plein bord et l'amplitude des méandres est égal à 5, ce qui est légèrement inférieur à la valeur par défaut à utiliser pour ce type de méandres. La raison de cette différence peut provenir d'une imprécision sur l'estimation de la largeur du débit plein bord, et également du milieu forestier et de certaines stabilisations qui modifient la dynamique du système.

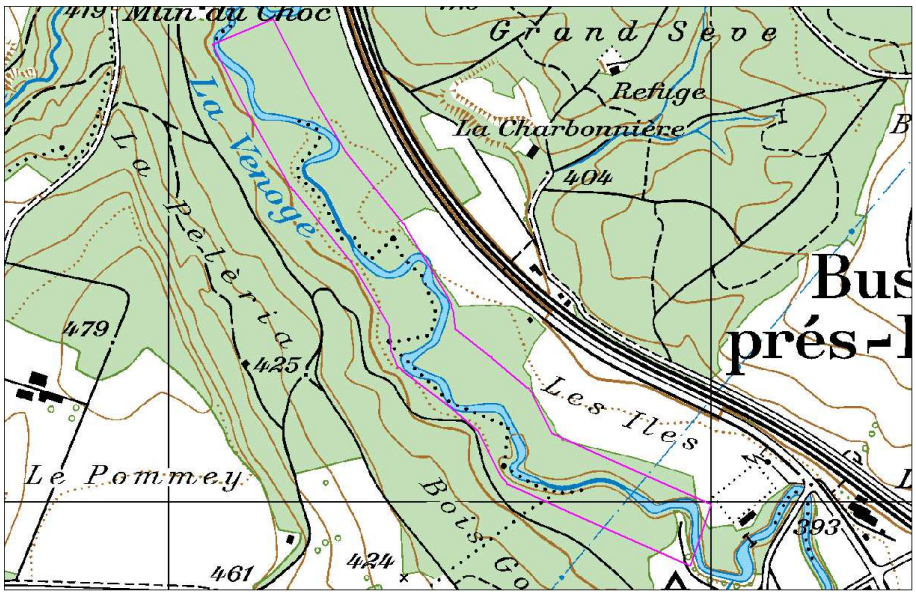


Figure.7.17 Espace fonctionnel de la Venoge dans la zone alluviale de Bussigny VD (objet 120).

7.3.3 Caractérisation de la dynamique

Selon notre connaissance du terrain, la végétation présente à la Venoge est influencée à la fois par une dynamique d'inondation et d'érosion et sédimentation

La dynamique est difficile à caractériser car la Venoge comporte une alternance de secteurs stables et de secteurs dynamiques. De plus, les méandres ne sont pas réguliers et évoluent à la fois par migration et par développement. En superposant les cartes de 1968 et de 2005, on a pu mesurer la fraction de la surface qui a été rajeunie dans ce laps de temps.

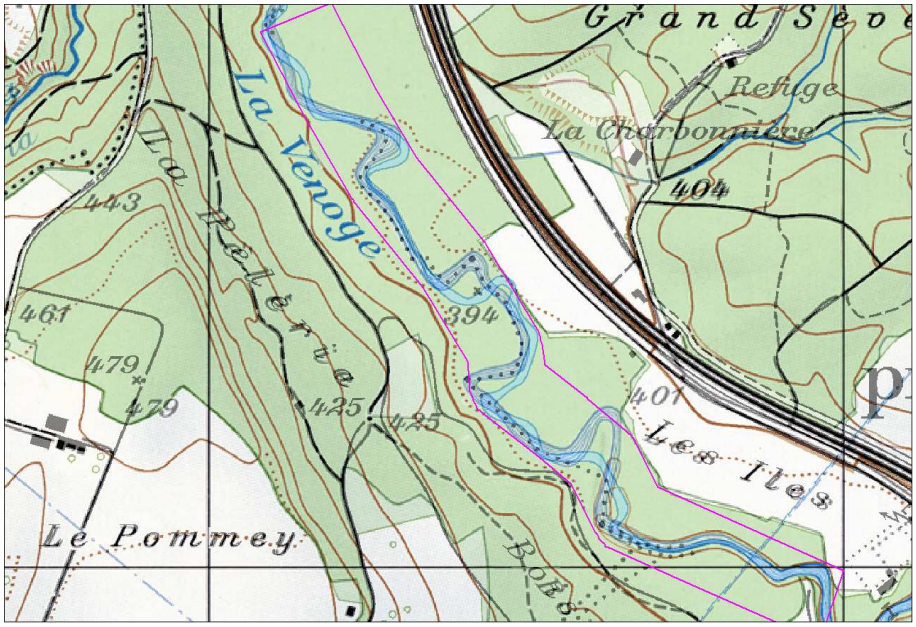


Figure.7.18 : Dynamique de la Venoge, superposition des cartes nationales de 1968 et de 2005.

Le tracé plus foncé et plus épais correspond au cours de la Venoge en 1968. On voit qu'en 37 ans, une petite proportion de l'espace fonctionnel a été rajeunie. Ce tronçon n'est pas stabilisé, mais la présence d'une falaise limite l'érosion en rive droite.

Des mesures de surfaces basées sur ces deux tracés montrent qu'environ 1.32 ha, soit 9% de l'espace fonctionnel a été rajeuni. On peut donc en déduire que la vitesse moyenne de rajeunissement est de 0.24% de l'espace fonctionnel par année.

La mosaïque des âges des stations est évaluée en considérant une érosion équivalente à un système de méandres migrants dont l'amplitude, la sinuosité et la vitesse de rajeunissement sont égaux à ce qui a été évalué aux points précédents de la procédure.

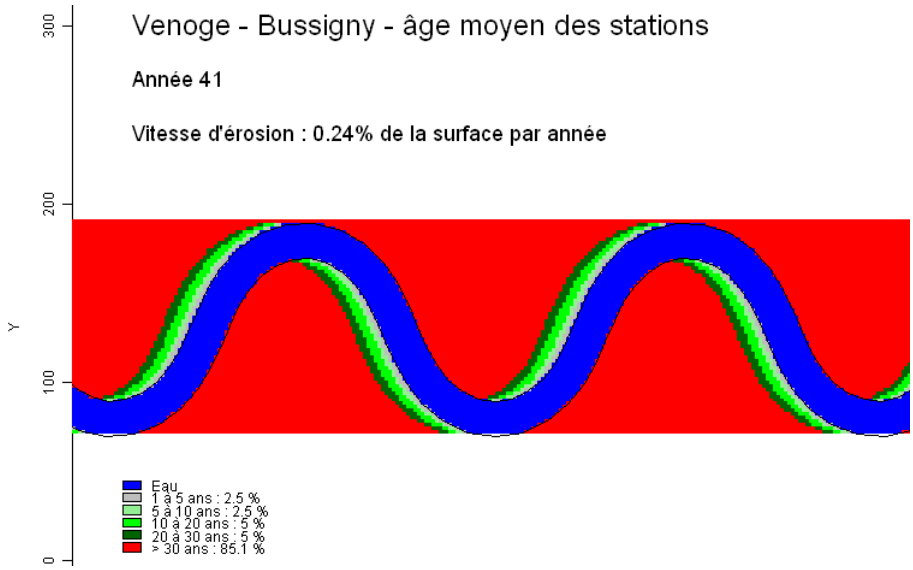


Figure. 7.19 : Erosion équivalente pour la zone alluviale de Bussigny.

La simulation de dynamique montre que :

- 2.5% de l'espace fonctionnel est une station de 1 à 5 ans,
- 2.5% de l'espace fonctionnel est une station de 5 à 10 ans,
- 5% de l'espace fonctionnel est une station de 10 à 20 ans,
- 5% de l'espace fonctionnel est une station de 20 à 30 ans,
- 85% de l'espace fonctionnel est une station de plus de 30 ans.

La comparaison avec la carte de végétation des zones alluviales montre que ces proportions semblent réalistes. En effet, la carte de la végétation réalisée d'après l'état de 2007 permet de connaître les unités de végétation alluviales réellement présentes dans le secteur d'étude. Or d'après la correspondance entre les unités de végétation et leurs âges, il est possible de vérifier la prédiction du modèle numérique. On remarquera que la surface de la zone alluviale est environ deux fois plus grande que l'espace fonctionnel.

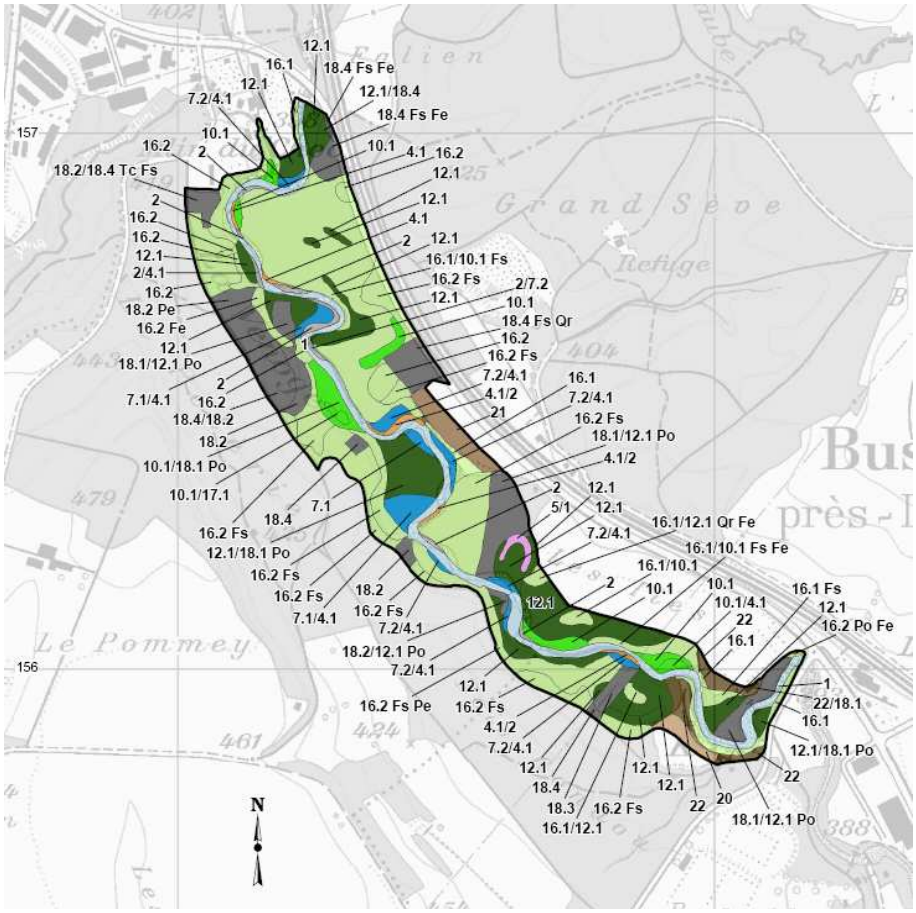


Figure 7.20 : Carte de végétation des îles de Bussigny (zone alluviale 120).

Veg1	Classes d'âges
1	0
2	1 -5 ans
4.1	1 -5 ans
5	1 -5 ans
7.1	50%(10 -20 ans) et 50%(20 -30 ans)
7.2	50%(5 -10 ans) et 50%(10 -20 ans)
10.1	30 +
12.1	30 +
16.1	30 +
16.2	hors dynamique
18.1	30+
18.2	hors dynamique
18.3	30 +
18.4	hors dynamique
20	hors dynamique
21	hors dynamique
22	hors dynamique

classes	m2	%
1 - 5 ans	7949	2.4
5 - 10 ans	3016	0.9
10 - 20 ans	6262	1.9
20 - 30 ans	3246	1.0
30 +	163954	50.5
hors dynamique	140051	43.2
Total	324479	100.0

Si l'on tient compte du fait que la superficie de la zone alluviale vaut le double de l'espace fonctionnel, mais que les milieux jeunes sont tous situés près du cours d'eau (donc à l'intérieur de l'espace fonctionnel), on peut dire que la correspondance entre le modèle numérique et le relevé de terrain est bonne.

Maintenant, il faut encore évaluer la dynamique d'inondation :

En utilisant l'approximation que la section d'écoulement est un rectangle de 20 m de large, on constate que le débit plein bord est atteint pour une profondeur moyenne de 1.5 m, un débit de 46 m3/s, une pente de 2.1‰ et un coefficient de rugosité (K) de 28 $m^{1/3}$/s, si on

utilise la formule de Manning-Strickler. La section d'écoulement est donc de 30 m2. Le débit Q5 de la Venoge, mesuré à la station fédérale d'Ecublens, situé 2 km en aval est de 67 m3/s, ce qui correspond à une section d'écoulement de 40 m2, si on suppose qu'elle est proportionnelle au débit. Pour calculer la surface inondée par Q5, on utilisera une carte montrant l'altitude relative de chaque point par rapport à l'altitude du fond du lit. Par simplification, on supposera que la surface atteinte par Q5 se situe 10cm plus haut que le débit plein bord, ce qui représente une section d'écoulement supplémentaire de 10m2.

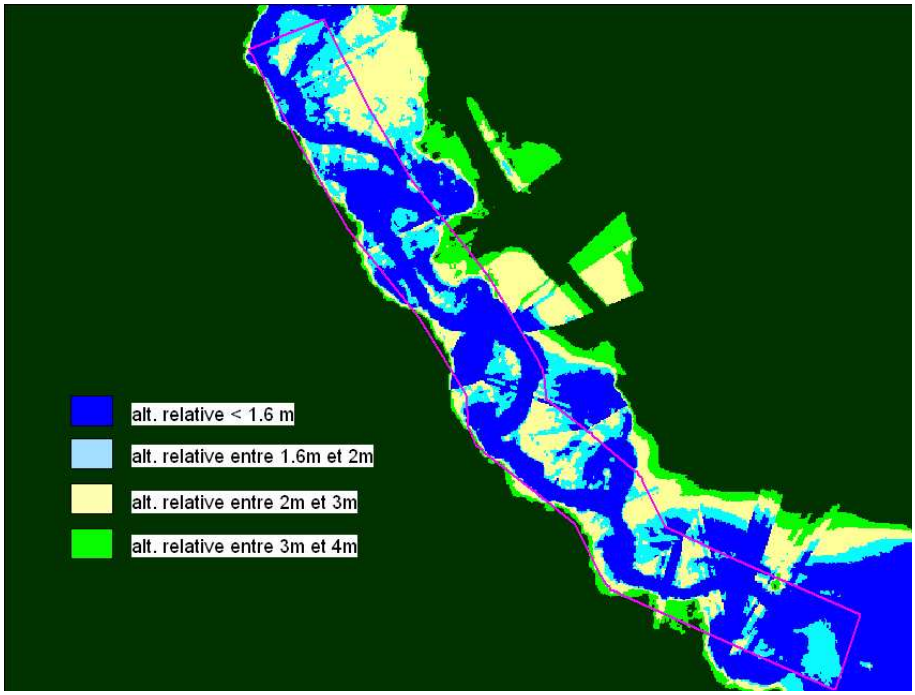


Figure 7.21 : Carte d'inondation de la Venoge vers Bussigny pour Q5.

Cette carte montre que 47% de l'espace fonctionnel est inondé pour une crue de temps de retour de 5 ans. On voit que les parties avec des méandres actifs sont plus sujettes à l'inondation que les parties stables. Ce résultat est confirmé par l'observation empirique des crues de la Venoge par les deux auteurs de l'étude, et par le débordement assez fréquent et important dans la forêt alluviale.

7.3.4 Evaluation des valeurs naturelles

7.3.4.1 Biocénoses et habitats

Mosaïque des âges :

Unités zones alluviales (Gallandat et al. 1993)	Compartiment Outil prédictif (SCZA 2007)	Âge de la station	% de Ef valeur opt.	%	note
3, 4, 5, 17.1	Al1	0-5 ans	10.8	2.5	23.1
6, 7, 8, 9 pp	Al2.1, Al2.2	5-10 ans	10.7	2.5	23.4
6, 7, 8, 9 pp	Al2.3	10-20 ans	21	5	23.8
6, 7, 8, 9 pp	Al3.1, Al3.2	20-30 ans	19.6	5	25.5
10, 11, 12, 13, 14, 15, 16.1	Al4	30 ans et plus	37.9	85	100.0
					39.2

La note de la mosaïque des âges de l'état actuel de la Venoge est de 39,2. Cette note relativement basse est due à la vitesse très lente des processus d'érosion et sédimentation.

Inondation : la surface nette d'inondation par Q5 est de 47%, ce qui donne une note de satisfaction de 94.

Annexes hydrauliques : on compte une annexe hydraulique pour 5.5 méandres, le bonus est donc de 4.5 (= 25*(1/5.5)) pour les annexes hydrauliques.

Récapitulation :

La note de la Venoge pour l'indice biocénose et habitats est de 0.5*39.2 + 0.5*94 + 4.5 = 71.1

7.3.4.2 Connectivité longitudinale terrestre

La connectivité terrestre de la Venoge est bonne puisque ses rives sont principalement constituées de forêts. Elle n'est tout de même pas de 100%, car la bande riveraine est limitée, sur la rive gauche, par la présence de cultures intensives. Pour l'évaluation, la bande riveraine de 10 m est présente sur plus de 97%, celle de 30m sur 95% et celle de 50m sur 80% du tracé. La note de cet indice est donc de 0.5*97 + 0.3*95 + 0.2*80 = 93.

7.3.4.3 Géomorphologie

Composition des rives : Dans l'espace fonctionnel, la Venoge présente 19.5% de berge en pente douce et 21.7% de berge en pente abrupte, soit un total de 41.2%.

Variation de la vitesse de l'eau : Ce descripteur n'a pas été mesuré in situ, il n'est pas évalué ici.

Variation de la profondeur de l'eau : Ce descripteur n'a pas été mesuré in situ, il n'est pas évalué ici.

Récapitulation : La note de la géomorphologie, dans ce cas uniquement fondée sur la composition des rives, est de 82.4.

7.3.4.4 Récapitulation

La Venoge dans son état actuel dans le secteur de la zone alluviale de Bussigny obtient une note de 71.1 pour les biocénoses et habitats, de 93 pour la connectivité longitudinale terrestre et de 82.4 pour la géomorphologie. La note globale est donc de 79.4.

8 Bibliographie

Adam P., Malavoi J.-R. et Debiais N. 2007: "*Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau - Fiche 15 : Reméandrage ou recréation de cours d'eau".* DEMAA - Service eaux de surface. Seine - Normandie. 85-92.

Agridea 2008: "Bordures tampon. Comment les mesurer, comment les exploiter ?*"* Agridea. Brochure. 8 pp.

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

Beck J. R. 2006: "*Streambank Erosion Hazard Mapping: Concepts, Methodology and Application on the Venoge River (Switzerland)".* PHD, EPFL – Section des sciences et ingénierie de l'environnement. Lausanne. 228 pp.

Bonnard L., Roulier C. et Paccaud G. 2009: "*Synthese der Zustandserhebungen in den Auen von nationaler Bedeutung - Auswertung der Erstaufnahmen und der Pilotphase zur Erfolgskontrolle Auen".* 27 pp.

Bourque P. A. 2004: http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html. Université Laval.

Braudrick C. A., Dietrich W. E., Leverich G. T. et Sklar L. S. 2009: "*Experimental Evidence for the Conditions Necessary to Sustain Meandering in Coarse-Bedded Rivers".* PNAS, **106** (40). 16936-16941.

Bravard J.-P. et Petts F. 2000: "*Les cours d'eau - Dynamique du système fluvial".* Armand Colin (2e édition). Paris. 222 pp.

Degoutte G. 2006: "*Diagnostic, aménagement et gestion des rivières - Chapitre 3: formes naturelles des rivières; ripisylve; évolution des berges".* Tec et Doc. 55-76.

Dister E. 1980: "*Geobotanische Untersuchungen in der hessischen Rheinaue als Grundlage für die Naturschutzarbeit".* Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Georg-August-Universität zu Göttingen. Göttingen. 170 pp.

Drescher A. 1977: "*Die Auenwälder der March zwischen Zwerndorf und Marchegg*". Dissertation. Universität Wien. Formal- und Naturwissenschftlichen Fakultät. 97 pp.

Dürrer H. 1989: "*Menaces sur les prairies fluviales*". Thema 8, p. 14-16.

Ellenberg H. 1996: "*Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht".* Eugen Ulmer. Stuttgart. 1095 pp.

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

Gepp J., Baumann N., Kauch E. P. et Lazowski W. 1986: "*Auengewässer als Ökozellen".* Grüne Reihe des Bundesministeriums für Gesundheit. Bundesministerium für Gesundheit und Umweltschutz. Wien. 322 pp.

Gerken B. 1988: "*Auen, verborgene Lebensadern der Natur".* Rombach. Freiburg. 132 pp.

Gillet F., De Foucault B. et Julve P. 1991: "*La phytosociologie synusiale intégrée: objets et concepts".* Candollea, **46**. 315-340.

Goeggel W. 2004: "Definition der Referenz bei der Beurteilung von Fliessgewässern im Rahmen des Modul-Stufen-Konzeptes". EAWAG. 17 pp.

Hager H., Matic S., Anic I. et Kulhavy J. 2008: "*Floodplain forests of the temperate zone of Europe".* Emil Klimo. 624 pp.

Huet M. 1949: "Aperçu des relations entre la pente et les populations piscicoles des eaux courantes. Schweiz. Zeitschr. Hydrol., **11**. 322-351.

Koenzen U. 2005: "*Fluss- und Stromauen in Deutschland - Typologie und Leitbilder".* Bundesamt für Naturschutz. Bonn. 327 pp.

Kuhn N. et Amiet R. 1988: "*Inventaire des zones alluviales d'importance nationale".* Département fédéral de l'Intérieur, OFEFP. Berne. 41 pp.

Langbein W. B. et Leopold L. B. 1966: "*River Meanders - Theory of Minimum Variance".* Geological Survey Professional Paper, **422-H**. H1-H15.

Larionov G. A., Gendugov V. M., Dobrovol'skaya N. G., Kiryukhina Z. P. et Litvin L. F. 2008: "*Mechanisms of Lateral Erosion in Rills on Slopes".* Eurasian Soil Science, **41** (3). 294-301.

Le Grand-Piteira N. 2006: "*Ruissellement avec effets de mouillage: gouttes et méandres sur un plan incliné".* PHD, Paris 7 - ESPCI. Paris. 232 pp.

Leopold L. B. et Gordon Wolman M. 1957: "*River Channel Patterns: Braided, Meandering and Straight".* Geological Survey Professional Paper, **282-B**. 39-84.

Leopold L. B. et Gordon Wolman M. 1960: "*River Meanders".* Bulletin of the Geological Society of America, **71**. 769-794.

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

Moor M. 1958: "*Pflanzengesellschaften schweizerischer Flussauen".* Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchswes., **34** (4). 221-360.

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

OFEG, OFEFP, OFAG et OCAM 2000: "*Un nouveau défi : réserver de l'espace pour les cours d'eau".* Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Office fédéral de l'environnement des forêts et du paysage (OFEFP), Office fédéral de l'agriculture (OFAG) et Office des constructions et de l'aménagement du territoire du Canton de FR Berne. Prospectus. 8 pp.

Roché J. E. 2010: "*Etude de la Loire et de l'Allier sur l'ensemble de leur cours (2009-2012) - 1. Eléments de bibliographie sur l'écologie des communautés d'oiseaux nichant le long des cours d'eau (Programme "STORI")".* Université de Bourgogne (UMR CNRS BioGéoSciences). Dijon. 58 pp.

Roché J. et Frochot B. 1993: "*Ornithological contribution to river zonation".* Acta Oecologica, **14** (3). 415-434.

Rosgen D. 1996: "*Applied River Morphology".* Wildland Hydrology. Pagosa Spring, Colorado. 350 pp.

Roulier C. 1998: "*Typologie et dynamique de la végétation des zones alluviales de Suisse. Volume I: texte, tableaux, figures. Volume II: annexes (tableaux de végétation)".* Commission géobotanique de l'Académie Suisse des Sciences Naturelles. 138 pp.

Schnitzler A. et Carbiener R. 2007: "*Forêts alluviales d'Europe - Ecologie - Biogéographie - Valeur intrinsèque".* Editions Tec & Doc. Paris. 387 pp.

SCZA - Service conseil Zones alluviales 2007: "*Plan d'aménagement du Rhône PA-R3 - Outil prédictif du développement des milieux riverains"*. Yverdon-les-Bains. 71 pp.

Sieber U., von Blücher U. et Ledergerber N. 2003: "*Idées directrices. Cours d'eau suisses. Pour une politique de gestion durable de nos eaux.".* Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG). Berne. 12 pp.

Trémolières M., Schnitzler A. 2007: "*Protéger, restaurer et gérer les zones alluviales - Pourquoi et comment ? - Floodplain Protection, Restoration, Management - Why and how ?".* Editions TEC & DOC, Lavoisier. Paris. 239 pp.

van den Berg J. H. 1995: "*Prediction of Alluvial Channel Pattern of Perennial Rivers".* Geomorphology, **12**. 259-279.

Vigne L. 2009: "*Liaison entre la variabilité hydraulique et morphologique et la biodiversité sur la Venoge".* Master, EPFL - Section Génie Civil – LCH. Lausanne. 91 pp.

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

Wasson J.-G., Malavoi J.-R., Maridet L., Souchon Y. et Paulin L. 1998: "*Impacts écologiques de la chenalisation des rivières".* Gestion des milieux aquatiques 14. Cemagref.

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

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

Service conseil Zones alluviales

Grégory Paccaud, Christian Roulier

Yverdon-les-Bains, le 24 décembre 2010

22.6.2011 / S:\AutresProjets\16. Méandres\Rapport\Rapport.doc

Annexe 1

Guide d'application de la procédure

Le but de la procédure est de définir le besoin d'espace d'un cours d'eau en méandres et de décrire et évaluer l'écosystème qui lui est associé. La procédure peut s'appliquer à un état existant, passé ou futur ; elle comporte quatre étapes :

1 Définition du style fluvial

2. Définition de l'espace fonctionnel

3 Caractérisation de la dynamique

4. Evaluation des valeurs naturelles

1 Etape 1 : définition du style fluvial

Le but de l'étape 1 est de déterminer si le style fluvial naturel du secteur examiné est bien un cours d'eau en méandres. Si tel est le cas, la deuxième phase de l'étape 1 consiste à définir le type morphologique de méandres.

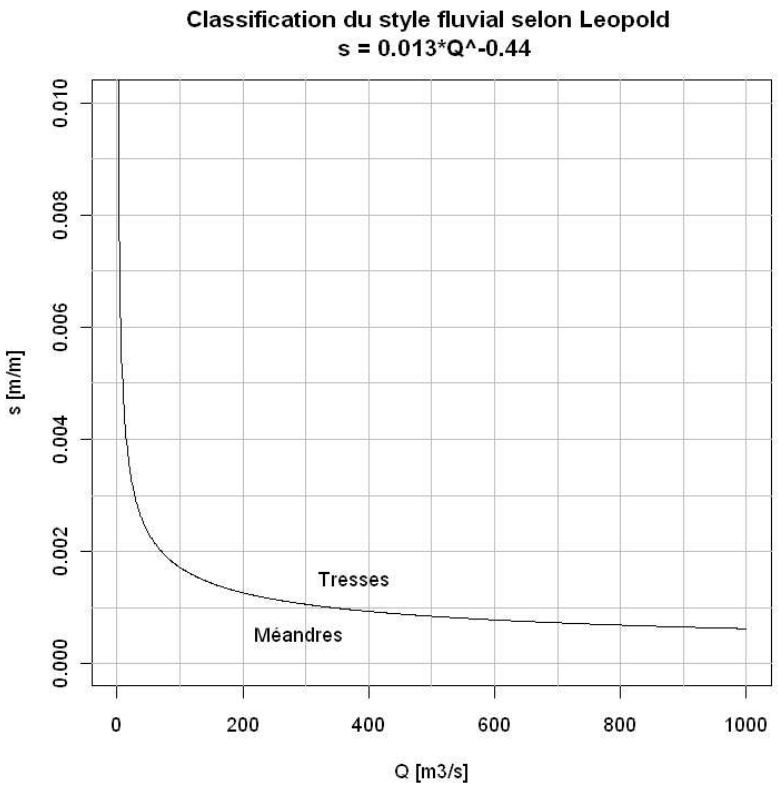
1.1 Style fluvial

La détermination du style fluvial naturel peut se baser sur différentes sources d'information.

Références temporelles : cartes historiques, modèle numérique de terrain de haute précision ou frontières administratives (p. ex. : limites communales).

Références spatiales : cours d'eau similaire en terme de débit, de pente, de substrat et de transport solide, même cours d'eau à proximité du secteur étudié.

Si de telles informations ne sont pas disponibles, ou que les caractéristiques du bassin versant ont été fortement modifiées par rapport à une référence historique, il est possible d'utiliser le diagramme de LEOPOLD (1957). Le style fluvial du cours d'eau peut-être prédit sur la base de deux paramètres : le débit plein bord (Q) et la pente du cours d'eau (s).



Si le débit plein bord n'est pas connu, il peut être assimilé à un débit de temps de retour de deux ans (Q2). La pente du cours d'eau est égale à la pente de la vallée divisée par la sinuosité du cours d'eau. Si cette valeur n'est pas connue, il est recommandé d'utiliser une valeur par défaut de 1.3. En résumé, le cours d'eau est en méandres si :

$s < 0.013 * Q^{-0.44}$

Q : débit plein bord en m3/s (valeur par défaut =Q2)

s : sv / sin

sv : pente de la vallée m/m

sin : sinuosité du cours d'eau m/m (valeur par défaut = 1.3)

Si le style fluvial naturel est bien un cours d'eau en méandres, on peut poursuivre la procédure.

1.2 Type de méandres

La forme des méandres et leur façon d'évoluer caractérisent leur type morphologique naturel. La façon dont les méandres se court-circuitent est déterminante pour qualifier ce type :

- Pas de court-circuit -> méandres migrants
- Court-circuit par tangence -> méandres de courbure
- Court-circuit par déversement -> méandres intermédiaires

Cette détermination peut être faite sur la base de documents historiques ou par l'observation du modèle numérique de terrain. Dans le cas où il n'y a pas d'information disponible sur la nature des court-circuitages ou le type de méandres, nous recommandons d'utiliser par défaut le type intermédiaire, c'est-à-dire avec des courts-circuits par déversement.

2 Etape 2 : délimitation de l'espace fonctionnel

L'espace fonctionnel a une largeur constante qui correspond à l'amplitude maximale que pourrait avoir un méandre dans le secteur d'étude dans des conditions naturelles. Les limites amont et aval de l'espace fonctionnel sont fixées en fonction de la zone d'intérêt, et le centre de l'espace fonctionnelle correspond à la position moyenne du cours d'eau. Il peut s'agir de la ligne du fond de vallée (thalweg).

La largeur de l'espace fonctionnel (*A*) peut être déterminée d'après des références temporelles ou spatiales (cf. étape 1). Si ce n'est pas possible, on peut utiliser une estimation basée sur la largeur du cours d'eau (*B* = largeur plein bord mesurée dans les points d'inflexions).

- Méandres migrants : $A = 6 \times B$
- Méandres intermédiaires : $A = 7 \times B$
- Méandres de courbure : $A = 11 \times B$

En principe l'amplitude d'un méandre est mesurée au centre du cours d'eau, on rajoutera donc la largeur du cours d'eau à la largeur de l'espace fonctionnel.

3 Etape 3 : caractérisation de la dynamique

Deux types de dynamiques ayant un effet sur l'écosystème lié aux cours d'eau en méandres ont été mis en évidence. Il s'agit de la dynamique d'inondation et de la dynamique de rajeunissement qui dépend des processus d'érosion et de sédimentation. Le but de cette étape est d'identifier et de quantifier la dynamique potentielle dans l'espace fonctionnel.

3.1 Choix de la dynamique dominante

Nous avons observé que, naturellement, selon les systèmes de méandres, la dynamique de rajeunissement pouvait être très lente et ne pas influencer la mosaïque de la végétation. De même, il se peut que la dynamique d'inondation n'influence pas la végétation riveraine, soit parce que les inondations sont peu fréquentes, soit parce que la nature du terrain et la topographie font que d'éventuels débordements

sont rapidement évacués ou infiltrés et n'ont pas vraiment d'incidence sur la végétation présente. Le choix de la dynamique dominante est donc dicté par l'importance des effets de cette dynamique sur l'écosystème, nous en proposons trois catégories :

- Écosystème influencé à 100% par la dynamique d'inondation
- Écosystème influencé à 100% par la dynamique de rajeunissement
- Écosystème influencé à 50% par la dynamique de rajeunissement et 50% par la dynamique d'inondation.

Le choix de cette dynamique repose sur la connaissance de la végétation du site. Si cette information n'est pas connue, elle peut être estimée d'après le type morphologique de méandre :

- Méandre migrant : 100% de rajeunissement
- Méandre de courbure : 100% d'inondation
- Méandre intermédiaire : 50% de rajeunissement et 50% inondation

3.2 Dynamique d'inondation

L'inondation sera exprimée par le pourcentage de l'espace fonctionnel inondé par une crue d'un débit de temps de retour de 5 ans (Q5). Les surfaces inondées sont comptabilisées uniquement en dehors du lit du cours d'eau et sont rapportées à la surface de l'espace fonctionnel sans le cours d'eau. Cet indice doit être calculé sur la base d'une carte d'inondation.

Indice d'inondation = (EF inondé par Q5 / EF)*100

EF = surface de l'espace fonctionnel sans le cours d'eau.

3.3 Dynamique de rajeunissement (érosion et sédimentation)

3.3.1 Vitesse moyenne de rajeunissement

La vitesse moyenne de rajeunissement est le pourcentage de l'espace fonctionnel (sans le cours d'eau) érodé par année. Nous supposerons que, sur un secteur d'étude, la surface perdue par érosion est égale à la surface gagnée par sédimentation.

Cette vitesse est calculée par comparaison de deux états temporels de différentes façons :

On peut mesurer la surface qui a été rajeunie entre deux états et on en déduit la vitesse moyenne en divisant le pourcentage de surface rajeuni par le laps de temps qui sépare les deux états.

Pour des méandres migrants, considérant que 100% de l'espace fonctionnel est rajeuni lorsqu'un méandre s'est déplacé d'une

longueur d'onde vers l'aval, on déduit la vitesse de rajeunissement d'après la vitesse de migration des méandres.

Pour des méandres libres, considérant que 75% de la surface est rajeunie lorsqu'un méandre aura fait un cycle complet de croissance, on déduit la vitesse de rajeunissement d'après la vitesse de développement des méandres.

3.3.2 Mosaïque des âges

Connaissant la vitesse moyenne de rajeunissement, le type morphologique de méandres et pour les méandres de courbure, la sinuosité, on peut estimer les proportions de l'espace fonctionnel (%) réparties dans les classes d'âge suivantes :

- 1 à 5 ans
- 5 à 10 ans
- 10 à 20 ans
- 20 à 30 ans
- plus de 30 ans
- hors dynamique

Ces proportions sont calculées sur la base de simulations numériques fondées sur la courbe du méandre. Elles peuvent être déduites des tables figurant sur l'annexe 2.

Les zones hors dynamique sont évaluées d'après les obstacles présents dans l'espace fonctionnel.

4 Etape 4 : évaluation des valeurs naturelles

L'évaluation des valeurs naturelles se base sur trois indices :

- biocénoses et habitats (poids de 50%),
- connectivité longitudinale terrestre (poids de 25%),
- géomorphologie (poids de 25%).

Ces indices sont fondés sur des sous-indices, appelés « descripteurs ».

Les valeurs naturelles sont évaluées par des notes comprises entre 0 et 100. En aucun cas, une note de peut dépasser 100.

4.1 Biocénoses et habitats (poids de 50%)

4.1.1 Inondation (poids de 100%, 50% ou 0%)

Le poids de ce descripteur est obtenu à l'étape 3.1.

La proportion (en %) de l'espace fonctionnel inondé par Q5 est obtenue à l'issue de l'étape 3.2.

La note est calculée de la manière suivante :

Note = % de l'espace fonctionnel inondé par Q5 x 2.

4.1.2 Mosaïque de la végétation (poids de 0%, 50% ou 100%)

Le poids de ce descripteur est défini à l'étape 3.1.

Les classes d'âges obtenues à l'étape 3.3 sont comparées à un état idéal de référence dont les proportions sont :

Âge de la station	% de Ef valeur opt.
1-5 ans	10.8
5-10 ans	10.7
10-20 ans	21
20-30 ans	19.6
30 ans et plus	37.9

Pour chaque classe d'âge une note entre 0 et 100 est attribuée par interpolation linéaire entre 0 et la valeur optimale de la classe d'âge. On calcule ensuite la moyenne de ces notes en considérant que chaque classe d'âge a le même poids. Exemple :

Âge de la station	% de Ef valeur opt.	% de Ef valeur selon étape 3	Note
1-5 ans	10.8	20	100
5-10 ans	10.7	20	100
10-20 ans	21	15	71.4
20-30 ans	19.6	15	76.5
30 ans et plus	37.9	30	79.2

Dans cet exemple la note de la mosaïque de la végétation est de 85.4 = (100+100+71.4+76.5+79.2)/5.

4.1.3 Annexes hydrauliques (bonus max de 25)

Bonus = 25 x Densité des annexes hydrauliques

Densité des annexes hydrauliques = nombre d'annexes/nombre de méandres dans l'espace fonctionnel.

La note du bonus des annexes hydrauliques est additionnée à la note résultant de la mosaïque des âges et de l'inondation.

4.2 Connectivité longitudinale terrestre (poids de 25%)

La largeur de la bande riveraine est délimitée tout le long du cours d'eau sur les deux rives. Les types d'occupation du sol suivant sont à inclure dans la bande riveraine :

- Prairie extensive, pâturage extensif, surface à litière,
- Pâturage boisé, berge boisée, bosquet champêtre,
- Forêt alluviale, forêt de berge.

Une fois la bande riveraine définie de chaque côté du cours d'eau, on mesure la longueur totale où cette bande dépasse 10m de large. On rapporte cette longueur à la longueur totale du cours d'eau multipliée par deux (deux rives) et on obtient un pourcentage de la longueur du cours d'eau où la bande riveraine dépasse 10m de large. On nommera cette valeur B10.

On répète l'opération pour une bande de 30m de large, puis pour une bande de 50m de large. On obtient donc ainsi une valeur B30 et une valeur B50.

Finalement, basé sur la considération qu'une bande de 10m permet d'assumer 50% des fonctions de connectivité longitudinale terrestre, qu'une bande de 30m en assume le 80% et qu'une bande de 50m correspond au 100%, l'indice de connectivité longitudinale est calculé de la façon suivante :

Note = 0.5*B10+0.3*B30+0.2*B50

4.3 Géomorphologie (poids de 25%)

Cet indice se fonde sur trois descripteurs :

Les deux derniers descripteurs demandent des mesures in situ, ce qui n'est pas toujours possible, c'est pourquoi, dans certains cas, ils peuvent être abandonnés ; si tel est le cas, l'indice de géomorphologie se résumera au descripteur 4.3.1.

4.3.1 Rives abruptes et rives en pente douce (poids de 100% ou 33.3%)

La présence de bancs de sédiments à l'intérieur des courbes de méandres et de berges d'érosion à l'extérieur des courbes est un indicateur de qualité des systèmes de méandres. Ces deux types de rives sont cartographiés et rapportés à la longueur totale des berges.

- % des rives abruptes à l'extérieur des courbes,

– % des rives plates à l'intérieur des courbes.

Une note de 100 équivaut à une représentation des deux types de rives (berge d'érosion abrupte ou berge en pente douce) d'au moins 50 % de la longueur des berges présentes dans l'espace fonctionnel.

Note = (% de rive abrupte + % de rive en pente douce) x 2

4.3.2 Variation de la vitesse du courant (poids de 33.3% ou 0%)

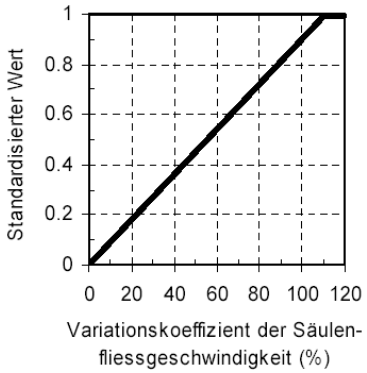
L'indicateur 16 « Hydraulique : variation de la vitesse d'écoulement » du Guide de suivi de l'EAWAG est appliqué et adapté (Woolsey et al. 2005) pour décrire les conditions d'écoulement de l'eau dans le système.

La mesure de la vitesse de l'eau s'effectue sur plusieurs profils transversaux par rapport au cours d'eau.

Un coefficient de variation des vitesses de l'eau est calculé : c'est le quotient de l'écart-type des vitesses et de leur valeur moyenne.

$$VC_{Fliessgeschwindigkeit} = \frac{\sigma_{Fliessgeschwindigkeit}}{\mu_{Fliessgeschwindigkeit}} \; 100 \; [\%]$$

La conversion en indice de satisfaction s'effectue selon le graphe ci-dessous.



Pour la procédure « méandres » nous utilisons une valeur comprise entre 0 et 100, donc il faut multiplier la valeur standardisée du suivi EAWAG par 100.

4.3.3 Variabilité de la profondeur d'écoulement

Au même titre que la vitesse d'écoulement de l'eau, la profondeur de l'eau est un bon indicateur de la variabilité du cours d'eau.

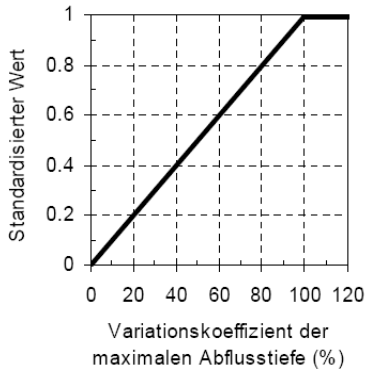
La mesure de la profondeur de l'eau s'effectue sur plusieurs profils transversaux par rapport au cours d'eau. On utilise les profils transversaux mesurés selon le standard de l'OFEV dans les tronçons de cours d'eau d'importance nationale et les hauteurs d'eau mesurées

par étiage ou, pour des scénarios éventuels, calculées par modélisation.

Un coefficient de variation de la profondeur de l'eau est calculé : c'est le quotient de l'écart-type des profondeurs maximales et de la valeur moyenne de ces profondeurs maximales.

$$VC_{\max.Tiefe} = \frac{\sigma_{\max.Tiefe}}{\mu_{\max.Tiefe}} \; 100 \; [\%]$$

La conversion en indice de satisfaction s'effectue selon le graphe ci-dessous



Pour la procédure « méandres » nous utilisons une valeur comprise entre 0 et 100, donc il faut multiplier la valeur standardisée du suivi EAWAG par 100.

4.4 Note globale des valeurs naturelles

La note globale est calculée en effectuant la moyenne pondérée des trois indices :

Note globale = 0.5 x Note biocénose et habitat + 0.25 x Note connectivité longitudinale terrestre + 0.25 x géomorphologie

Annexe 2

Répartition de l'espace fonctionnel dans les différentes classes d'âge

Rapport Amplitude / largeur plein bord	3	3	3	3	3	3	3	3
Sinuosité	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Vitesse de rajeunissement [% / an]	**0.1**	**0.5**	**1**	**1.5**	**2**	**2.5**	**3**	**4**
1 - 5 ans [%]	1.1	5.8	11.6	17.4	23.1	28.7	34.4	45.7
5 - 10 ans [%]	1.2	5.8	11.4	16.9	22.4	27.3	30.9	34.4
10 -20 ans [%]	2.3	11.4	22.4	30.8	34.2	33	29.4	19.3
20 - 30 ans [%]	2.3	11.1	19.7	19.7	14.9	9.6	5.1	0.6
30 et plus [%]	93.1	65.8	34.9	15.1	5.5	1.4	0.2	0

Rapport Amplitude / largeur plein bord	3	3	3	3	3	3	3	3
Sinuosité	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Vitesse de rajeunissement [% / an]	**0.1**	**0.5**	**1**	**1.5**	**2**	**2.5**	**3**	**4**
1 - 5 ans [%]	1.2	6.8	13.7	20.4	27.1	33.9	40.9	54.3
5 - 10 ans [%]	1.6	6.8	13.4	20.5	27.2	32	34.2	31.7
10 -20 ans [%]	2.6	13.4	27.2	34.2	31.6	26.3	20.8	13.3
20 - 30 ans [%]	2.9	13.6	20.8	14.3	10.3	6.7	3.8	0.7
30 et plus [%]	91.8	59.4	25	10.6	3.9	1.1	0.3	0

Rapport Amplitude / largeur plein bord	6	6	6	6	6	6	6	6
Sinuosité	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Vitesse de rajeunissement [% / an]	**0.1**	**0.5**	**1**	**1.5**	**2**	**2.5**	**3**	**4**
1 - 5 ans [%]	1	5.5	10.7	16	21.4	26.6	32	42.5
5 - 10 ans [%]	1.1	5.3	10.6	16	21.1	25.9	29.9	35.2
10 -20 ans [%]	2.2	10.6	21.1	29.9	35.1	35.7	32.5	21.7
20 - 30 ans [%]	2.1	10.5	19.3	21.6	16.8	10.6	5.5	0.6
30 et plus [%]	93.6	68.1	38.3	16.6	5.7	1.3	0.1	0

Rapport Amplitude / largeur plein bord	6	6	6	6	6	6	6	6
Sinuosité	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Vitesse de rajeunissement [% / an]	**0.1**	**0.5**	**1**	**1.5**	**2**	**2.5**	**3**	**4**
1 - 5 ans [%]	1.1	5.6	11.4	17.3	23	28.7	34.5	45.9
5 - 10 ans [%]	1.2	5.8	11.6	17.2	22.8	28.6	33.2	38.3
10 -20 ans [%]	2.3	11.6	22.8	33.2	38.2	34.7	28.5	15.4
20 - 30 ans [%]	2.2	11.4	21.7	21.1	12.1	7.1	3.8	0.4
30 et plus [%]	93.2	65.6	32.5	11.3	3.9	0.9	0.1	0

Rapport Amplitude / largeur plein bord	9	9	9	9	9	9	9	9
Sinuosité	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Vitesse de rajeunissement [% / an]	**0.1**	**0.5**	**1**	**1.5**	**2**	**2.5**	**3**	**4**
1 - 5 ans [%]	1	5.2	10.4	15.7	20.9	26.1	31.3	41.4
5 - 10 ans [%]	1	5.2	10.5	15.5	20.5	25.2	29.4	35.2
10 -20 ans [%]	2.1	10.5	20.5	29.4	35.1	36.3	33.6	22.8
20 - 30 ans [%]	2.1	10.3	19.2	22.1	17.7	11.1	5.7	0.6
30 et plus [%]	93.7	68.8	39.4	17.3	5.8	1.3	0.1	0

Rapport Amplitude / largeur plein bord	9	9	9	9	9	9	9	9
Sinuosité	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Vitesse de rajeunissement [% / an]	**0.1**	**0.5**	**1**	**1.5**	**2**	**2.5**	**3**	**4**
1 - 5 ans [%]	1.1	5.5	11	16.5	21.9	27.3	32.8	43.6
5 - 10 ans [%]	1.1	5.5	10.9	16.3	21.7	27.2	31.9	38.6
10 -20 ans [%]	2.2	10.9	21.7	31.9	38.6	37.1	31.4	17.4
20 - 30 ans [%]	2.2	10.9	21.1	23.2	14	7.5	3.8	0.4
30 et plus [%]	93.4	67.2	35.3	12	3.9	0.9	0.1	0

Annexe 3

Résumé de l'application de la procédure aux trois cas d'étude

Les trois cas d'étude sont des secteurs de cours d'eau en méandres du Plateau suisse :

L'Aar entre Büren an der Aare et Altreu (BE, SO) est complètement stabilisé, son état actuel est évalué.

La Thur juste avant son embouchure dans le Rhin (ZH) a été corrigée de façon rectiligne au XIXe siècle, elle est maintenant en voie de revitalisation. Son état naturel (avant correction) est évalué ainsi que son état futur (après revitalisation).

La Venoge dans la zone alluviale de Bussigny (VD) est proche de l'état naturel, son état présent est évalué.

1 Etape 1 : définition du style fluvial

1.1 Style fluvial

Aar : méandres

Thur, états naturel et futur : méandres

Venoge : méandres

1.2 Type de méandres

Aar : méandres de courbure, évalué d'après le modèle numérique de terrain.

Thur, états naturel et futur : méandres migrants, évalué d'après des cartes historiques.

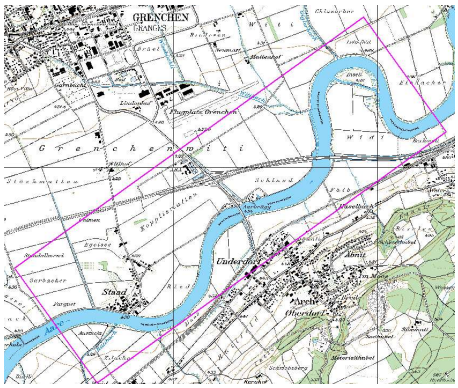
Venoge : méandres intermédiaires, d'après la carte nationale de 1980 où on voit clairement un méandre court-circuité par déversement.

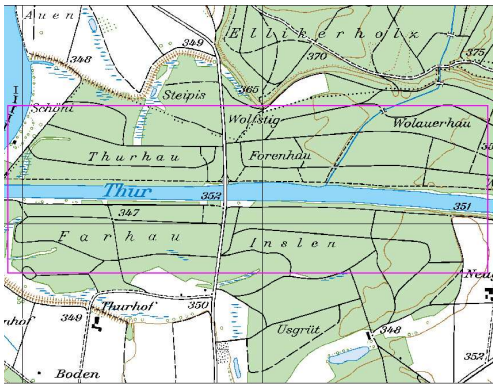
2 Etape 2 : délimitation de l'espace fonctionnel

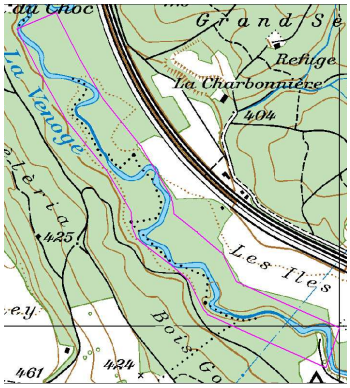
Aar : longueur de l'espace fonctionnel de 4'200 m. Amplitude maximale d'un méandre de 1'250 m, largeur plein bord de 130m, largeur de l'espace fonctionnel de 1'380 m. Sinuosité de 1.41.

Thur, états naturel et futur : longueur de l'espace fonctionnel de 2000 m. Amplitude maximale d'un méandre de 610 m, largeur plein bord de 90 m, largeur de l'espace fonctionnel de 700 m. Sinuosité de 1.31.

Venoge : longueur de l'espace fonctionnel de 1'260 m. Amplitude maximale d'un méandre de 100 m, largeur plein bord de 20 m, largeur de l'espace fonctionnel de 120 m. Sinuosité de 1.38.







Aar : espace fonctionnel *Thur : espace fonctionnel* *Venoge : espace fonctionnel*

3 Etape 3 : caractérisation de la dynamique

3.1 Choix de la dynamique dominante

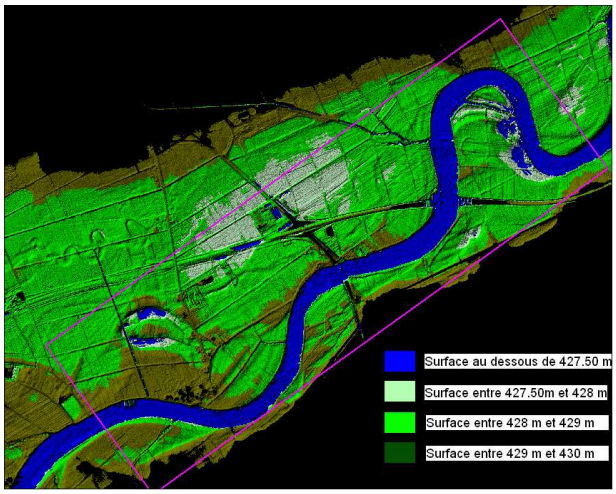
Aar : 100% de dynamique d'inondation, voir carte historique et document historique.

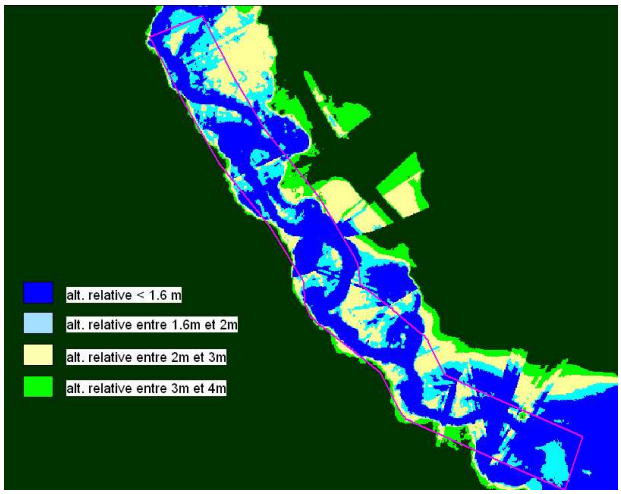
Thur, états naturel et futur : 100% de dynamique de rajeunissement, selon cartes historiques et connaissance de la dynamique.

Venoge : 50% de rajeunissement et 50% d'inondation, selon connaissance du milieu.

3.2 Dynamique d'inondation

Sur les images suivantes, les surfaces en bleu sont inondées par Q5.





Aar : carte d'inondation par Q5 *Venoge : carte d'inondation par Q5*

Aar : 0.94% de l'espace fonctionnel inondé par Q5.

Thur, états naturel et futur : descripteur non pertinent

Venoge : 47% de l'espace fonctionnel inondé par Q5.

3.3 Dynamique de rajeunissement (érosion et sédimentation)

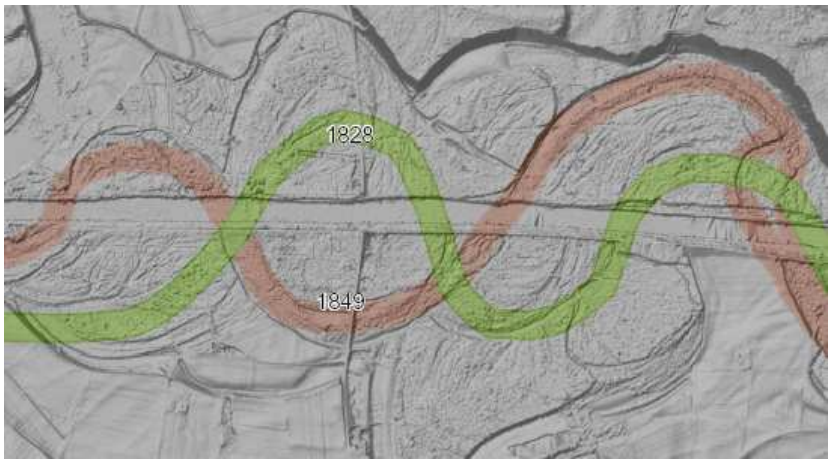
3.3.1 Vitesse moyenne de rajeunissement

Aar : non pertinent

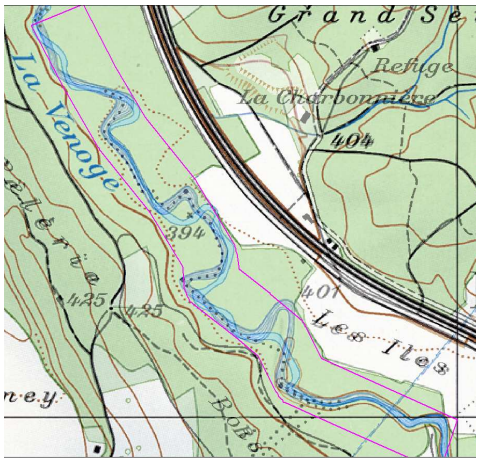
Thur, état naturel : 2.38% de surface rajeunie par année, estimée selon vitesse de migration des méandres entre 1828 et 1849.

Thur, état futur : 2.38% de l'espace fonctionnel rajeuni par année, mais 4.17% de l'espace restreint à 400 m de large.

Venoge : 0.24% de surface rajeunie par année, selon surface érodée entre 1968 et 2005.



Thur *: tracé de 1828 (jaune) et tracé de 1849 (rouge)*

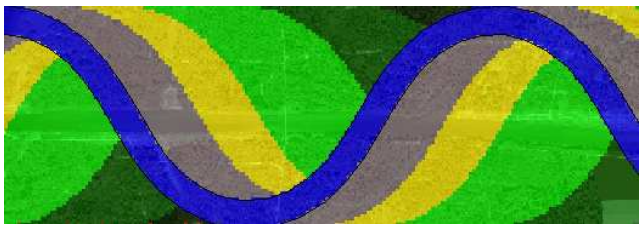


Venoge : Tracés de 1968 et 2005

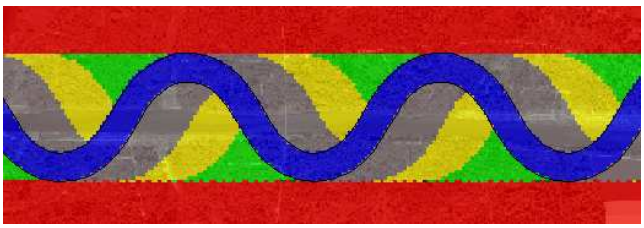
3.3.2 Mosaïque des âges

Aar : non pertinent

		Thur espace fonctionnel		Thur espace restreint		Venoge – Bussigny	
Âge de la station	% de Ef valeur opt.	%	note	%	note	%	note
1-5 ans	10.8	23.2	100	21.5	100	2.5	23.1
5-10 ans	10.7	21	100	15.7	100	2.5	23.4
10-20 ans	21	37.5	100	9.3	24.8	5	23.8
20-30 ans	19.6	14.5	74.0	0.1	0.7	5	25.5
30 ans et plus	37.9	1.5	4.0	0	0.0	85	100.0



Thur, état naturel : mosaïque des âges



Thur, état futur : mosaïque des âges

4 Etape 4 : évaluation des valeurs naturelles

4.1 Biocénoses et habitats (poids de 50%)

4.1.1 Inondation (poids de 100%, 50% ou 0%)

Aar : note = 1.9 (0.94% x2), selon résultat de l'étape 3.2

Thur, états naturel et futur : non pertinent

Venoge : note = 94 (47% x 2), selon résultat de l'étape 3.2

4.1.2 Mosaïque de la végétation (poids de 0%, 50% ou 100%)

Aar : non pertinent

Thur état naturel : note = 75.6, selon résultat de l'étape 3.3.2

Thur état futur : note = 45.1, selon résultat de l'étape 3.3.2

Venoge : note = 39.2, selon résultat de l'étape 3.3.2

4.1.3 Annexes hydrauliques (bonus max de 25)

Aar : 1 annexe pour 2.25 méandres, bonus de 11.1 (= 25 x (1/2.25))

Thur, états naturel et futur : 1 annexe pour 2 méandres, bonus de 12.5 (= 25 x (1/2))

Venoge, 1 annexe pour 5.5 méandres, bonus de 4.5 (=25 x (1/5.5))

4.1.4 Note de l'indice

Aar = **13** (1.9 + 11.1)

Thur, état naturel = **88.1** (75.6 + 12.5)

Thur, état futur = **57.6** (45.1 + 12.5)

Venoge = **71.1** (0.5*39.2 + 0.5*94 + 4.5)

4.2 Connectivité longitudinale terrestre (poids de 25%)

Aar : B10 = 42%, B30 = 11%, B50 = 7%, effectué selon l'interprétation de l'orthophoto. Note = 0.5*42 + 0.3*11 + 0.2*7 = **25.7.**

Thur état naturel : B10 = 100%, B30 = 90%, B50 = 85%, car la connectivité est légèrement limitée à cause de la présence d'une falaise dans la partie nord-est de l'espace fonctionnel. Note = 0.5*100 + 0.3*90 + 0.2*85 = **94**.

Thur état futur : B10 = 93%, B30 = 86%, B50 = 79%, car on suppose que la connectivité est légèrement limitée lorsque le sommet des méandres est tangent à la limite de l'espace de divagation. Note = 0.5*93 + 0.3*86 + 0.2*79= **88.1**.

Venoge : B10 = 97%, B30 = 95%, B50 = 80%, selon interprétation de l'orthophoto. Note = 0.5*97 + 0.3*95 + 0.2*80 = **93**.

4.3 Géomorphologie (poids de 25%)

4.3.1 Rives abruptes et rives en pente douce (poids de 100% ou 33.3%)

Aar : rive en pente douce = 18.5%, rive abrupte d'érosion = 0%, estimé d'après l'orthophoto et la connaissance du site. Note = **37**.

Thur états naturel et futur : comme ces systèmes ne sont pas stabilisés et très dynamiques on peut raisonnablement supposer que la proportion de rive en pente douce dépasse 25% et la proportion de rive abrupte d'érosion aussi. Note = **100**.

Venoge : rive en pente douce = 19.5%, rive abrupte d'érosion = 21.7%, estimé d'après l'orthophoto et la connaissance du site. Note = **82.4**.

4.3.2 Variation de la vitesse du courant (poids de 33.3% ou 0%)

Non évalué pour les trois cas d'étude.

4.3.3 Variabilité de la profondeur d'écoulement

Non évalué pour les trois cas d'étude.

4.4 Note globale des valeurs naturelles

Aar = 0.5*13 + 0.25*25.7 + 0.25*37 = **22.2**.

Thur, état naturel = 0.5*88.1 + 0.25*94 + 0.25*100 = **92.6**.

Thur, état futur = 0.5*57.6 + 0.25*88.1 + 0.25*100 = **75.8**.

Venoge = 0.5*71.2 + 0.25*93 + 0.25*82.4 = **79.5**.