

La Recréation de Cours d'Eau

du retour en fond de vallée
au reméandrage



Fonds européen agricole pour
le développement rural :
l'Europe investit dans les
zones rurales



Étapes de création d'un nouveau lit

Notions

essentielles



- 1 Maîtriser les notions essentielles (page 6)
- 2 Définir la maîtrise d'ouvrage et recueillir l'avis des riverains
- 3 Identifier les financements et se renseigner sur la procédure administrative (page 11)

Conception

du projet



- 4 Recueil des données existantes, y compris historiques (page 5)
- 5 Mesures de terrain, topographie (page 11)
- 6 Recherche et analyse des contraintes (page 12)
- 7 Délimitation et caractérisation de la zone d'emprise du nouveau tracé (page 12)
- 8 Choix des zones de déviation (point A, départ) et de restitution (point B, arrivée) (page 14)
- 9 Dimensionnement du nouveau lit entre A et B
Recherche d'une **station de référence** exploitable (page 15)

Méthode Avec Station de Référence / ASR

- Mesurer sur la station de référence :
 - Gabarit (largeur, profondeur pleins bords)
 - Pente, sinuosité
 - Longueur d'onde, amplitude
 - Granulométrie
- Calcul de la longueur du tracé

Méthode Sans Station de Référence / SSR

- Etude hydrologique simplifiée et choix du débit de dimensionnement (débit morphogène)
- Choix des paramètres hydrauliques et géométriques (rugosité, pente, sinuosité, rapport de forme)
- Calcul du gabarit (largeur et profondeur à pleins bords)
- Calcul de la longueur du tracé

- 10 Définition du tracé en plan (page 20)
- 11 Choix des modes de connexion amont et aval (page 22)
- 12 Dessin du plan d'exécution, validation des riverains et des partenaires (page 25)

Réalisation

des travaux



- 13 Implantation du tracé, vérification et validation avec les riverains (page 27)
- 14 Creusement du lit primaire et contrôle, ajustement des sections (page 28)
- 15 Diversification et recharge exogène (page 28)
- 16 Passerelles et autres types de franchissements (page 31)
- 17 Pêche de sauvetage et mise en eau (page 30)
- 18 Transfert des alluvions et comblement de l'ancien lit (page 30)
- 19 Dispositifs d'abreuvement et plantations éventuelles de ligneux (page 31)
- 20 Pose des clôtures (page 31)
- 21 Remise en état des parcelles et semis des surfaces travaillées (page 31)



Présentation générale

Les cours d'eau déplacés

Ils sont monnaie courante dans la région. Le tracé ne se trouve plus à sa position d'origine en fond de vallée. Cette situation, complètement artificielle, résulte d'aménagements hydrauliques réalisés il y a plus ou moins longtemps, principalement pour :

- utiliser la force hydraulique (en particulier pour alimenter un moulin à eau) ;
- tenter de lutter contre les inondations ;
- libérer l'espace agricole et essayer d'assainir les terres (les rendre moins humides) ;
- irriguer des parcelles.

Des altérations nombreuses

Le lit déplacé présente un tracé en plan, une pente et une section d'écoulement qui n'ont généralement plus rien à voir avec ceux du lit d'origine, et il est souvent situé au-dessus du talweg (point bas) de la vallée : on parle dans ce cas d'un lit perché.

Cette situation est source de perturbations nombreuses et durables :

- Banalisation des habitats aquatiques (lit rectiligne, profondeur, substrat et vitesse homogènes) ;
- Vitesses importantes en crue, lames d'eau limitantes à l'étiage, réchauffement des eaux, colmatage, perte de capacité d'auto-épuration ;
- Perte de la fréquence de connexion du lit avec les zones humides associées ;
- Modification des relations entre la nappe et le cours d'eau, et altération des débits (souvent une réduction des débits d'étiage) ;
- Débordements possibles dans les parcelles en contre-bas.



Le lit de ce sous-affluent de la Seine, le Cagnard (à gauche) est déplacé en dehors de son talweg (à droite).

X Fournials - CATER

Le lit d'origine

Il peut être encore totalement ou partiellement visible. Il est parfois en eau (cas 1). Mais généralement, il a été tellement modifié au fil du temps (cas 2 et 3) qu'il a fini par disparaître (cas 4) **fig.1**.

Dans le cas 4, le lit totalement disparu ...



... peut parfois être retrouvé dans des documents anciens,



... mais souvent, il n'apparaît plus ni sur le terrain ni dans aucun document.

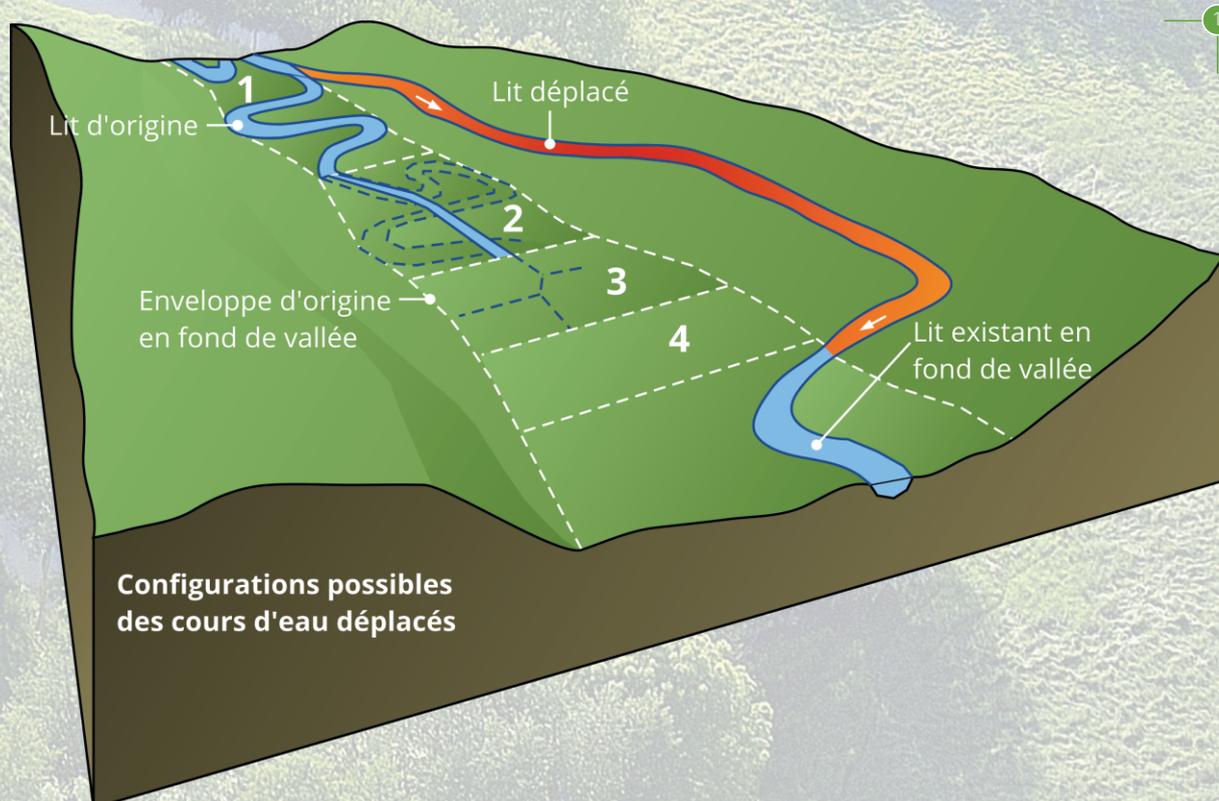


La configuration en lit perché

se rencontre très souvent dans l'édification ancienne des moulins à eau sur les petits cours d'eau à faible pente, où le lit déplacé prend souvent le nom de bief. Sur la photo ci-contre le lit du cours d'eau, à droite, a été déplacé en dehors du fond de vallée, à gauche (la Gièze, affluent de la Seine).



X Fournials - CATER



Configurations possibles des cours d'eau déplacés



Dans cette dernière situation, le gestionnaire désireux de restaurer le lit d'origine se retrouve devant une page blanche ! Ce guide tente d'apporter un éclairage le plus complet possible sur la technique de restauration adaptée à ce cas précis, la récréation *ex nihilo*. Seul le renvoi de l'intégralité du débit en fond de vallée sera traité. Les cas où une partie seulement du débit est rétablie en fond de vallée, par exemple pour le maintien d'une alimentation en eau d'un moulin ou d'un plan d'eau, ne seront pas abordés dans la mesure où la conception de l'ouvrage hydraulique de répartition demanderait l'élaboration d'un document spécifique. Ce document, n'abordera pas non plus la conception des rampes qui sont nécessaires dans certains cas pour assurer la continuité écologique.



Certains documents anciens peuvent apporter une aide précieuse pour déterminer l'emprise et la morphologie du lit originel : plans de masse annexés à certains règlements d'eau de moulin, ancien cadastre du XIX^{ème} siècle, photographies aériennes après la seconde guerre mondiale. Ils sont disponibles auprès des Archives Départementales, de l'IGN (Geoportail.fr) et des services de l'État comme la DDT(M).





Notions essentielles

La recreation ex nihilo est la voie à privilégier pour la restauration physique et biologique maximale d'un cours d'eau déplacé. La seule recharge en granulats du lit déplacé n'est qu'une solution de repli. Comme pour toute restauration hydromorphologique, les contraintes et les pressions doivent être levées de préférence en amont et à l'échelle du bassin versant : limitation du ruissellement, amélioration de la qualité de l'eau, restauration de la continuité écologique, etc.

Il s'agit de reconstruire de toutes pièces un nouveau lit aux caractéristiques naturelles, apte à assurer toutes les fonctions qu'il remplit normalement, en remplacement total du lit déplacé.

Toutes les tailles de cours d'eau sont concernées, du plus petit ruisseau au plus grand fleuve de la région, même si la majorité des projets est réalisée sur des cours d'eau de largeur modérée (moins de 10 mètres).

Le lit recréé doit être adapté au type de cours d'eau

Il existe en effet, selon les contextes géomorphologiques et climatiques, différents grands types de cours d'eau (ou types de lits), différenciés par le nombre de chenaux et leur sinuosité : cours d'eau rectilignes ou à méandres, cours d'eau en tresses ou anastomosés.

Le cours d'eau à méandres est le principal type de cours d'eau rencontré dans la région. Il se caractérise, pour l'essentiel, par un chenal d'écoulement unique, bien marqué, et plus ou moins sinueux selon le contexte géomorphologique.

C'est donc à lui, dans la plupart des cas, qu'aura affaire le gestionnaire souhaitant s'engager dans une restauration hydromorphologique.

Le fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau à méandres est donc essentiel à connaître. Les principaux éléments à retenir dans l'objectif de concevoir des projets de recreation de lit sont exposés ci-après.



Un cours d'eau à méandres libres, le Tortillon à Vassy.

J. Guesnon - AFB 14

Différents types de cours d'eau à méandres peuvent être distingués **fig.2** :

- **à méandres libres** comme la Sée à Cuves (50), dont la sinuosité n'est pas limitée latéralement par la proximité des deux versants délimitant la plaine alluviale ;
- **à méandres contraints** comme la Vire en amont de Pont-Farcy (50) : le lit majeur est étroit et la topographie limite le méandrage.

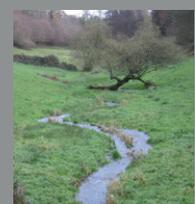


X. Fourniaux - CATER



En tête de bassins versants

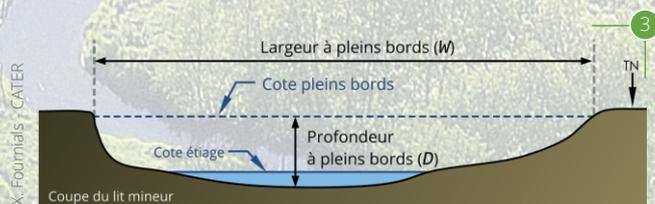
dans les vallons encaissés à forte pente, on rencontre aussi des petits cours d'eau dont le tracé est presque rectiligne naturellement. Les méthodologies présentées dans ce guide y sont également applicables, à condition de prendre en compte la spécificité de leur profil (tracé moins sinueux, pente plus forte).



X. Fourniaux - CATER



La plupart des déplacements de lits dans la région a concerné les petits cours d'eau à méandres libres, car le bénéfice pour l'exploitation agricole du lit majeur a pu être obtenu avec des terrassements limités.



Le gabarit hydraulique du lit mineur de tout cours d'eau à chenal unique est déterminé par la **largeur (W)** et la **profondeur (D)** du lit à pleins bords **fig.3**. Ces dimensions déterminent globalement la **section d'écoulement totale du lit mineur** (c'est-à-dire avant débordement). Comme ces dimensions évoluent naturellement au sein du cours d'eau (augmentation générale et progressive vers l'aval avec le débit qui augmente, et variabilités locales à l'échelle d'un même tronçon), on retiendra plutôt des valeurs moyennes sur un tronçon donné.

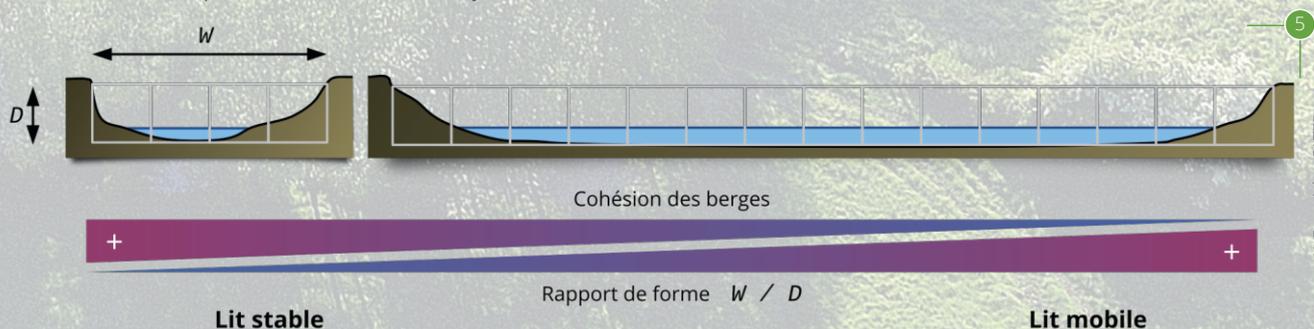
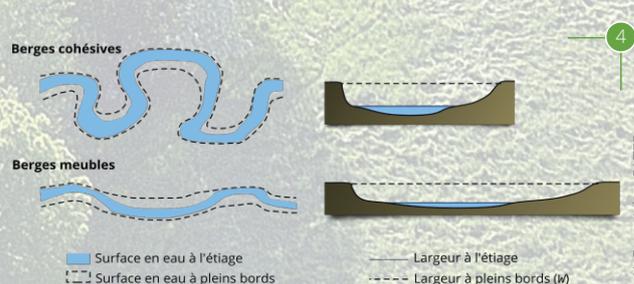
On identifie aussi le **rapport de forme (W/D)** très lié à l'activité du cours d'eau et aux matériaux des berges **fig.4 et 5**. En Normandie, les berges de cours d'eau sont majoritairement composées d'argiles et de limons, matériaux assez cohésifs et donc relativement résistants à l'érosion par le courant, sans compter la protection offerte par la végétation (ripisylve). Par ailleurs, les pentes sont globalement faibles et les débits modestes (petits cours d'eau) : les systèmes sont



Un profil de rive végétalisée indique une berge plutôt stable.

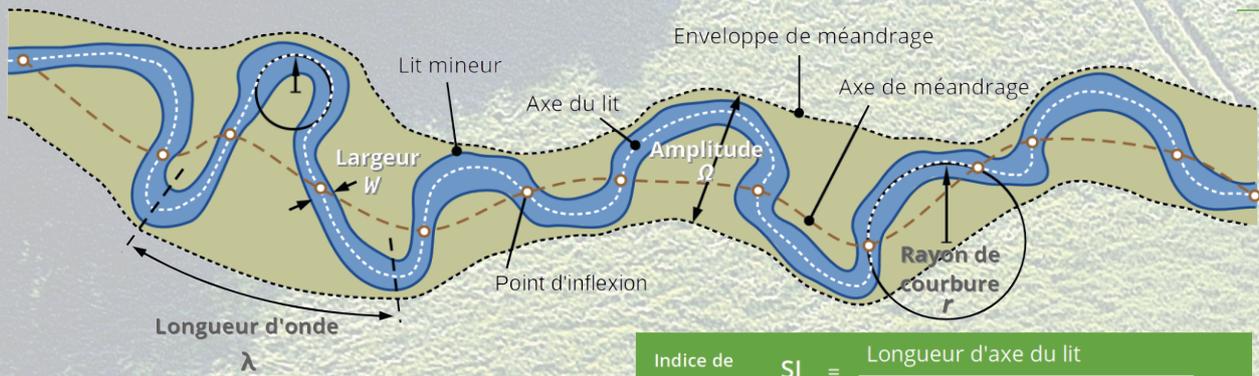
de faible énergie (pente x débit). Dans ce contexte, on observe des cours d'eau au tracé relativement stable dans le temps, peu mobile latéralement, et assez encaissé : la profondeur est plus importante au regard de la largeur que sur les cours d'eau à dynamique latérale active, très larges et peu profonds.

Des études sur des petits cours d'eau de plaine en région Centre et en Bretagne ont montré que **ce rapport W/D est généralement compris entre 6 et 8**.



Les petits cours d'eau de plaine

en Normandie sont peu puissants, les ajustements sont lents et ils ont peu de capacité à récupérer seuls d'une altération : leur résilience est faible. C'est pourquoi, les travaux de recréation de lit doivent être réalisés avec le plus juste dimensionnement de section et de tracé en plan. Le « laisser faire » risque d'engendrer un temps d'attente très long et de la déception. Quant aux sédiments grossiers, il faut les ajouter, car on les trouve rarement en creusant le nouveau lit et il est peu probable qu'ils arrivent tout seuls.



Indice de sinuosité* $SI = \frac{\text{Longueur d'axe du lit}}{\text{Longueur d'axe de méandrage}}$

$SI < 1,05$	« sub-rectiligne »
$1,05 < SI < 1,25$	« sinueux »
$1,25 < SI < 1,5$	« très sinueux »
$SI > 1,5$	« méandrique »

*Méthode de Allen (1984)

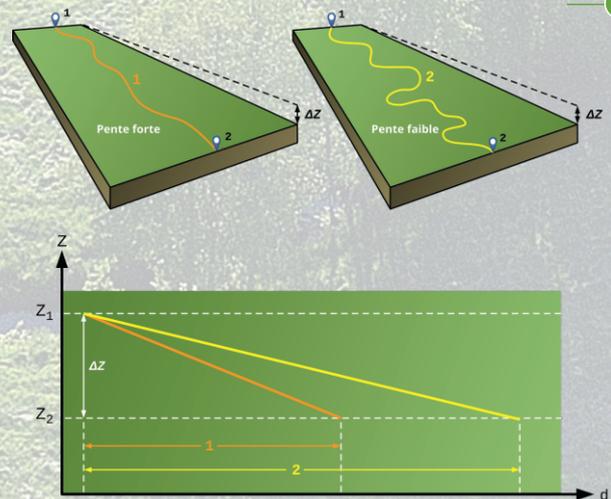
6
X. Fournials - CATER

Le tracé en plan du lit mineur d'un cours d'eau à méandres libres est caractérisé par des dimensions particulières, comme la **longueur d'onde** (λ), l'**amplitude** (Ω), la **sinuosité** (SI) **fig.6**.

Diverses études ont permis de montrer que ses dimensions sont **proportionnées par la largeur W** :

- la **longueur d'onde** (λ) **vaut en moyenne de 10 à 12 W**, et varie généralement de 6 à 15 W selon les cours d'eau,
- l'**amplitude** (Ω) **est aussi en moyenne de 10 à 12 W** et varie généralement de 5 à 20 W selon les cours d'eau,
- la **sinuosité est très variable** d'un cours à l'autre et selon la méthode de calcul. On utilise la méthode du rapport de longueurs (Allen,1984) pour déterminer un indice de sinuosité (SI) **fig.6**. On a montré que, à pente égale, plus les berges sont cohésives plus le lit est sinueux (et *vice versa*).

La pente (i) d'un cours d'eau s'ajuste pour lui permettre d'évacuer correctement les sédiments qui lui arrivent. Lorsqu'il y parvient, le cours d'eau adopte sa pente d'équilibre. Cependant, cette pente dépend de nombreux facteurs à l'échelle du bassin (géologie, hydrologie, apport en sédiments...) et de la vallée (morphologie, pente...). Ils évoluent le long du cours d'eau et potentiellement dans le temps. Les mécanismes aboutissant à cette pente d'équilibre sont encore peu connus et il est hasardeux, voire impossible, de la déterminer *a priori*. Cependant, il est



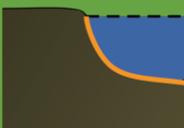
7
X. Fournials - CATER



Formule de Manning-Strickler

Le débit transitant dans une portion de cours d'eau est lié aux dimensions du gabarit (section d'écoulement totale), à la pente et à la rugosité du lit mineur par l'incontournable formule de Manning-Strickler.

$$Q_b = K_s S R_h^{2/3} i^{1/2}$$





important de noter que, d'une manière générale, **le tracé du cours d'eau est lié à sa pente : plus le tracé sera long** (et donc sinueux) **et plus sa pente sera faible** (et vice versa) *fig.7*. C'est un élément à retenir en particulier pour un projet de récréation de lit.

Le débit (Q) d'un cours d'eau en un point donné est variable au cours du temps et constitue le principal moteur de la dynamique fluviale. En géomorphologie fluviale, on appelle **débit dominant** celui qui est majoritairement responsable du développement et du maintien des dimensions de la section du cours d'eau (débit dit morphogène), car c'est le débit le plus efficace, compte tenu de la pente, en matière d'érosion de transport sédimentaire. De nombreuses études sur les cours d'eau peu ou pas altérés ont montré que le débit dominant est proche du **débit de pleins bords**, et que ce dernier est équivalent à une crue annuelle à biennale *fig.8*.

Pour calculer un débit transitant dans une section de cours d'eau, on utilise fréquemment la **formule de Manning-Strickler** (encadré ci-dessous). Cette dernière fait appel au coefficient de rugosité K_s . C'est un coefficient multiplicatif, sans réelle signification physique, destiné à rendre compte de la capacité du chenal à "freiner" les écoulements.



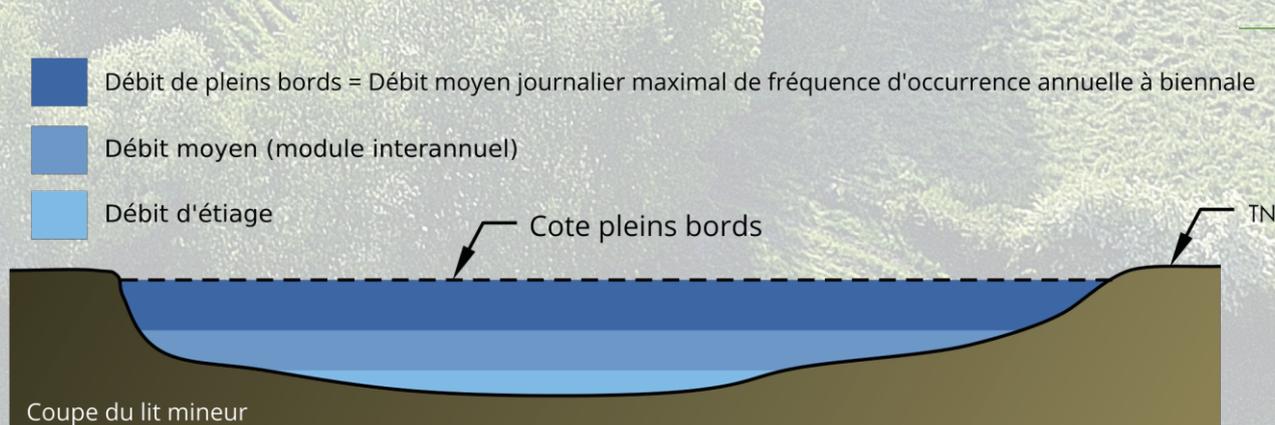
Les débits de pleins bords naturels

Diverses études sur les cours d'eau peu ou pas altérés ont montré que le temps de retour du débit de pleins bords est de l'ordre de :

- **1 an en zone de marais**
- **1,5 an sur géologies imperméables** (schistes, grès, granites, argiles, marnes ...)
- **2 ans sur géologies perméables** (calcaires, craies, sables ...).

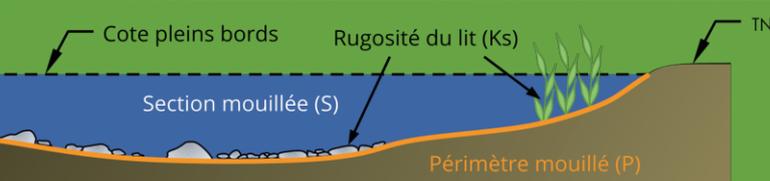
Ce débit de pleins bords naturel servira de **référence** pour le **dimensionnement** du gabarit hydraulique du **nouveau lit**.

L'ordre de grandeur de ce coefficient pour les petits cours d'eau de plaine, naturels et diversifiés, est de 5 à 20 m^{1/3}/s en fonction de divers paramètres tels que la largeur du lit, son encombrement, son irrégularité, sa sinuosité, la densité de végétation, la granulométrie du fond, etc.



8

X Fournais - CATER



Q_b : débit de pleins bords en m³/s (« b » pour « bankfull »)
 K_s : coefficient de rugosité à pleins bords en m^{1/3}/s
 S : section mouillée à pleins bords en m²
 P : périmètre mouillé à pleins bords en m
 R_h : rayon hydraulique (S/P) à pleins bords en m
 i : pente de la ligne d'énergie à pleins bords, en m/m, assimilable à la pente de la ligne d'eau ou à celle du fond.

X Fournais - CATER



Les sédiments grossiers (graviers, cailloux, pierres) tapissent le fond de lit des petits cours d'eau, bien qu'ils soient de faible énergie. Ils sont majoritairement hérités d'un fonctionnement passé. En effet, ils sont lentement repris par le courant depuis les berges et/ou le fond (stockage ancien) et transportés vers l'aval occasionnellement (débit liquide suffisant). Le transport de cette **charge de fond** est un phénomène dit « à seuil ». **Les éléments de gros calibre (blocs)** sont souvent présents mais sont peu voire plus pris en charge par les écoulements actuels.



F. Goulimy - FDDPPWA 50

Reconstitution du matelas alluvial par recharge en granulats sur le nouveau lit de l'Elle à Bérigny.

La majeure partie du débit solide des petits cours d'eau de plaine d'aujourd'hui est composée de **particules fines** provenant surtout de l'érosion superficielle des versants (recouverts d'un sol) mais aussi des berges. Leur transport se fait en suspension dans la colonne d'eau, à la même vitesse que le courant : la **charge en suspension** est majoritaire. À l'époque actuelle, on observe des excès d'apports de particules fines par amplification de l'érosion des sols des bassins versants. Ces fines se déposent là où les vitesses sont plus faibles et conduisent à des altérations chroniques des fonctions des substrats grossiers : c'est le colmatage minéral.

Il est important de noter que **la granulométrie moyenne des sédiments du fond du lit est liée à sa pente** : plus la pente d'un cours d'eau est élevée, plus la granulométrie est grossière (et *vice versa*).



X. Fourniais - CATER

Matériaux grossiers en pied de berge sur un affluent du Couesnon.

Par ailleurs, plus on se rapproche des sources, et plus la granulométrie, généralement, est hétérogène (mal triée).

Dès lors qu'il était totalement inexistant avant intervention et sauf cas particuliers, **la recréation ex nihilo d'un lit de cours d'eau doit impérativement être complétée par une recharge en granulats** de manière à reconstituer son matelas alluvial (cf. guide *La Recharge en Granulats*).



Avant toute intervention, un diagnostic

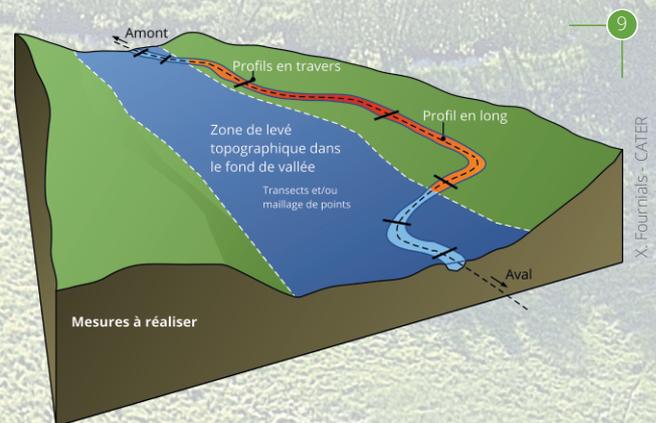
doit être établi à l'échelle du bassin et du cours d'eau, afin de définir l'**opportunité** et les **objectifs** de la restauration hydromorphologique. À l'échelle plus locale du tronçon et du segment altéré, il s'agira de vérifier la **pertinence** de la recréation du lit. Avoir l'**accord de principe du ou des propriétaires** potentiellement concernés est également essentiel pour éviter des déconvenues.

La procédure administrative à suivre, et le **contenu des dossiers demandés** le cas échéant, doivent être définis suffisamment en amont du projet, en concertation avec les services de la DDT(M). Ces éléments vont participer à la définition des études à mener. Une visite de terrain avec l'Agence de l'eau et l'AFB est aussi nécessaire pour définir les conditions techniques et financières du projet.

Une fois ces bases posées, il est important :

- de définir le **gabarit hydraulique** (largeur et profondeur à pleins bords), la **pente**, la **sinuosité**, l'**éventail granulométrique** à recréer ainsi que l'**emprise disponible** pour le passage du nouveau lit ;
- d'identifier en parallèle les différentes **contraintes** (techniques, financières et sociales) liées au projet : inondabilité, réseaux, accès, ouvrages de franchissement, topographie, parcellaire, enveloppe budgétaire, etc. Concernant les réseaux, on utilisera le téléservice « Réseaux et canalisations » et on consultera les services municipaux dès que possible.

Un certain nombre de données de base est nécessaire à la définition de tout projet **fig.9**. Ainsi, la réalisation d'un **profil en long** du linéaire concerné, suffisamment élargi en amont et en aval (au moins sur 300 m au total), et de **profils en travers** en amont, en aval et au sein du segment déplacé, ainsi qu'un travail de **levés topographiques dans le fond de vallée**



X. Fourniaux - CATER

permettent de connaître les **gabarits existants** et le **profil de pente** sur le site, de coter les ouvrages éventuels existants et de **déterminer la zone d'emprise du futur tracé**. La consistance du levé topographique et le matériel utilisable sont à déterminer au cas par cas.

L'étude de la topographie du fond de vallée est une étape préalable et souvent incontournable en l'absence totale d'indication de l'ancien lit. En effet, **dans les fonds de vallée très peu marqués** (larges et plats), il est rare de retrouver l'ancien lit même avec des sondages pédologiques : fond de vallée très remanié depuis des décennies voire des siècles (piétinement, labour, drainage, terrassement).



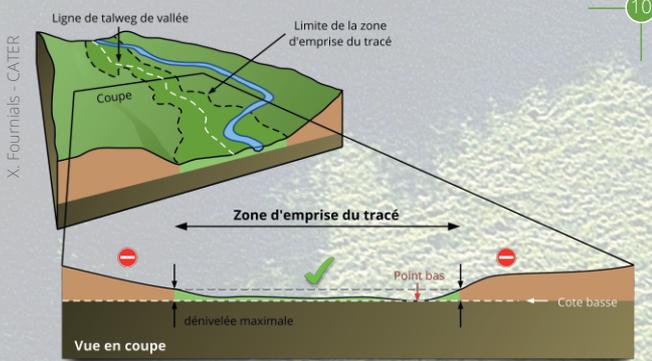
F. Gouilly - FDPPMA 50

Fait rarissime jusqu'à présent dans la région. Découverte de l'ancien matelas alluvial du cours d'eau lors du creusement d'un nouveau tracé dans les prairies (La Sinope) ; L'ancien tracé était par ailleurs visible sur le terrain avant creusement.



En régie ou pas ?

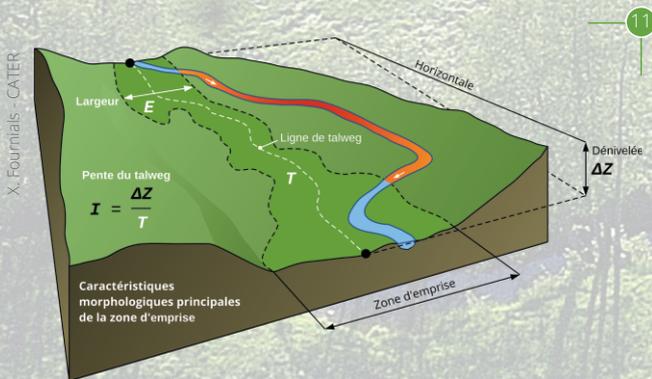
La conception du projet est réalisable par un technicien de rivière qui a accès à l'ensemble des données et méthodes. En revanche, le recours à un **bureau d'études** est préférable si des risques liés aux **inondations** demandent la réalisation d'une modélisation de l'impact hydraulique, si des besoins de franchissement imposent des calculs d'**ouvrages d'art** importants, ou si des risques mécaniques sur des **infrastructures** (bâtiments, voiries, réseaux) demandent des études géotechniques.



E. Corre - CAC



Réalisation d'un levé topographique au tachéomètre électronique.



X. Fournials - CATER

10

Dans la pratique, on ne peut donc se baser que sur le relief et les levés topographiques pour :

- **positionner le lit aux points bas** afin de s'assurer d'un **fonctionnement hydraulique correct** (retour des eaux de débordement et connexion à la nappe alluviale le cas échéant) ;
- **déterminer les possibilités d'aménagement**, car dans la pratique, outre l'acceptation des propriétaires riverains, la pente et la sinuosité du nouveau lit sont conditionnées à **l'inclinaison générale du terrain** à disposition et à **la largeur d'emprise transversale** (contraignant par exemple l'amplitude du tracé).

La délimitation et la caractérisation de la zone d'emprise du tracé est le tout premier objectif des levés topographiques. Concrètement, il s'agit de délimiter au voisinage immédiat des **points bas** du fond de vallée topographique, dont la liaison forme la **ligne de talweg** (ou ligne de collecte des eaux), la **zone de cote altimétrique proche** des points bas, à l'intérieur de laquelle il est possible de faire passer le nouveau lit : **on transforme la ligne de talweg en bande de terrain fig.10**.

Des **contraintes foncières et/ou techniques** peuvent venir réduire l'extension de cette zone (présence de bâtiments, réseau affleurant, passage imposé dans un ouvrage ou interdit dans une parcelle, etc.).

Au-delà de sa délimitation, certaines **caractéristiques morphologiques de la zone d'emprise** sont essentielles à déterminer **fig.11**, notamment :

- **Longueur (T)** de sa ligne de talweg
- **Largeur (E)**
- **Pente (I)**

11



L'ancien lit. S'il existe toujours ou si son tracé peut être retrouvé sur le terrain et/ou d'après des documents anciens suffisamment précis (échelle), on se base bien entendu sur ces éléments. On n'oublie pas cependant de vérifier si la topographie du fond de vallée n'a pas été sensiblement modifiée (remblai, notamment). Si l'ancien lit ne peut pas être retrouvé, des levés topographiques doivent être réalisés.





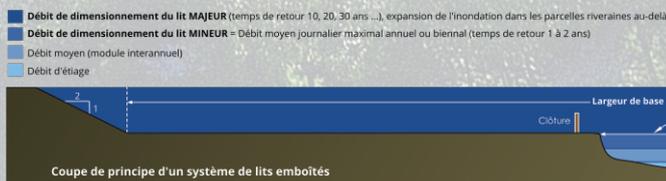
Dans certains cas, les **contraintes du site** imposent d'avoir recours au système de lits emboîtés. C'est le cas par exemple lorsque :

- la **fréquence d'inondation** des terrains adjacents en lit majeur doit être significativement inférieure au débit de pleins bords naturel **fig.12** ;
- le **contournement d'un obstacle** impose exceptionnellement de passer en dehors de la zone d'emprise **fig.13** ;
- la **pente de la vallée** est trop **peu marquée** pour tracer un lit respectant la pente adéquate, du fait, notamment, d'anciens remblais ou de la sédimentation d'une retenue effacée, qui ont amené un exhaussement du fond de vallée naturel **fig.14** ;
- la **rehausse** éventuelle **de ligne d'eau** en amont du nouveau lit n'est pas tolérée par les riverains et impose de ramener le nouveau tracé à une cote inférieure sur tout ou partie du linéaire **fig.34** (cas n°2 page 24).

Le principe de ce type d'aménagement **fig.15** est de :

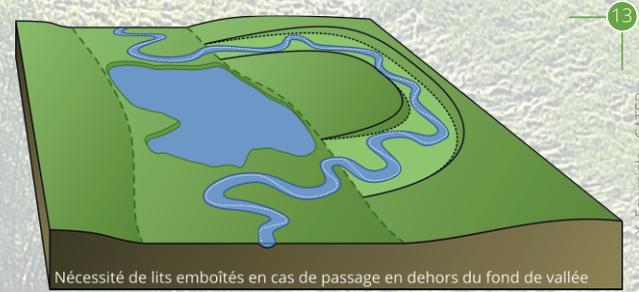
- **creuser un lit de crue** le moins profond possible (plutôt large), dimensionné au niveau de protection souhaité (quinquennal, décennal, etc.) ;
- **recréer le lit mineur** dans le fond de cette emprise, dimensionné au débit de pleins bords naturel.

Ce système de **lits emboîtés** permet au nouveau lit d'avoir un fonctionnement hydromorphologique proche du naturel car le gabarit, la pente et la sinuosité seront adaptés au nouveau lit majeur aménagé.



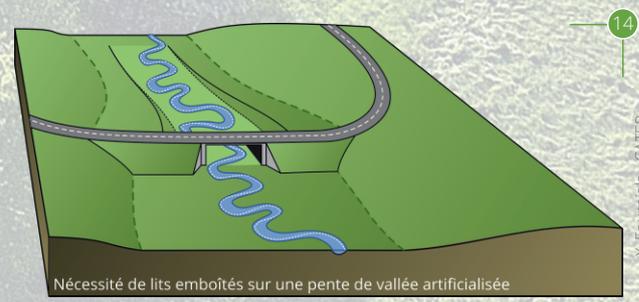
12

X. Fournials - CATER



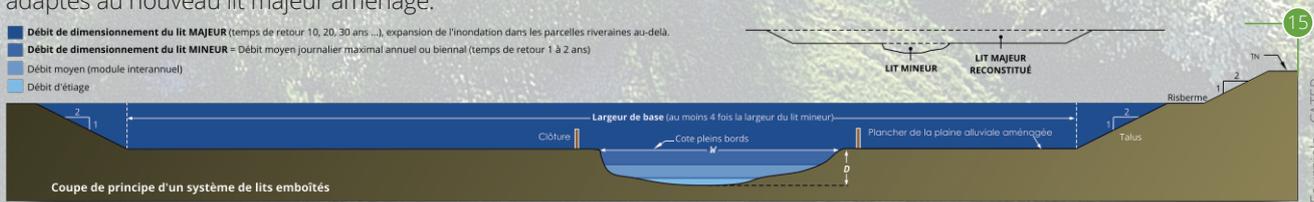
13

X. Fournials - CATER



14

X. Fournials - CATER



15

X. Fournials - CATER

Dans le cas d'un fond de vallée bien marqué, quelques profils (transects) peuvent suffire à confirmer et à préciser la localisation du talweg.

Sinon, un maillage plus ou moins dense de points de mesures sera nécessaire afin de déterminer la zone d'emprise du nouveau lit la plus pertinente.



Lit visible sur la photo aérienne et le terrain (Belnoë).

BD ORTHO - IGN ©

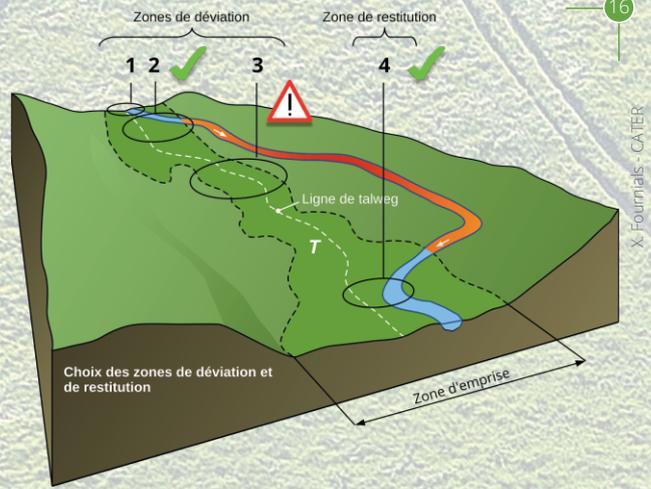


La détermination des zones de déviation et de restitution est une étape importante.

En effet, dans le cas des cours d'eau perchés en particulier, la position de la déviation à partir du tracé existant est une zone particulièrement sensible au risque d'érosion, le plus souvent régressive.

La zone de déviation du lit sera, dès que possible, positionnée **en amont de la portion perchée**, au sein de la zone d'emprise du tracé identifiée, et à un endroit où le lit existant est **le plus proche possible de la ligne de talweg**. Sa localisation idéale est alors en **zone 1**, à défaut, elle peut être placée par exemple en **zone 2** *fig.16 et 17*.

Si pour des questions de contraintes techniques ou foncières, seul un positionnement au niveau de la portion perchée est envisageable, par exemple en **zone 3**, il faut être particulièrement **vigilant**. En effet, s'il y a une dénivellée importante entre le fond de vallée et le fond dur du lit existant, l'érosion régressive (cf. encadré ci-dessous) possible peut avoir des effets collatéraux dommageables en amont. Pour éviter ces risques, il est alors nécessaire de prévoir un aménagement spécifique : si la pente est très forte, on doit prévoir des seuils de fond en blocs non liaisonnés ou une rampe en enrochement.



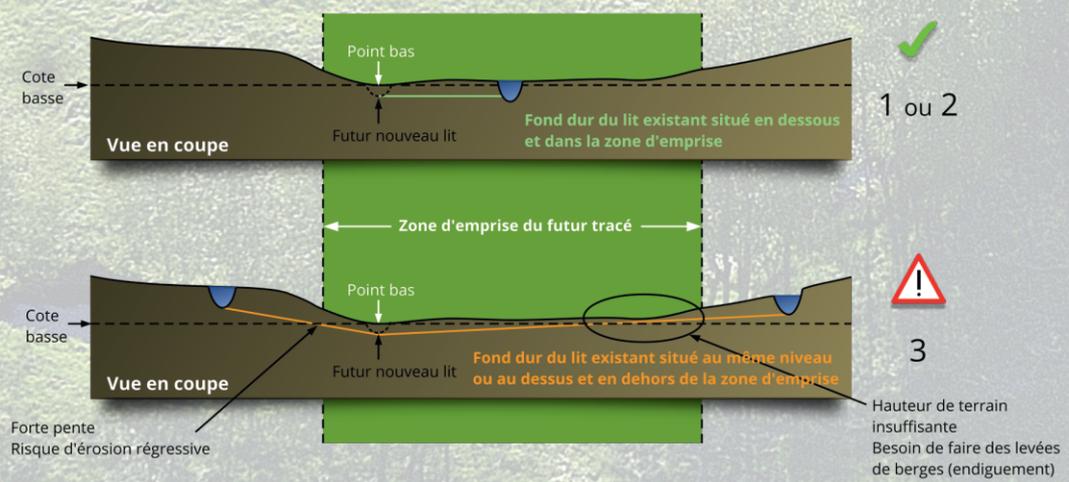
16

X. Fournials - CATER



Exemple de rampe en enrochements régulièrement répartis rendue nécessaire pour la restauration d'une partie (contrôlée) des débits en fond de vallée sur le cours de l'Huisne à Mauves-sur-Huisne (61).

X. Fournials - CATER

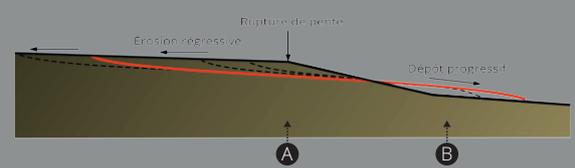


17

X. Fournials - CATER



L'érosion régressive est une érosion du fond du lit provoquant l'incision (enfoncement) d'un cours d'eau. Initiée par une augmentation brutale de la pente, elle se propage progressivement vers l'amont jusqu' au rétablissement d'une pente d'équilibre.





Si la pente est plus modérée, il est préférable, et généralement suffisant, de bien tapisser le fond et les berges de la partie pentue avec un matériau de recharge très grossier (pierres et blocs). Cette granulométrie sera plus grosse que sur le reste du lit restauré, situé en fond de vallée. **La taille des alluvions doit toujours être adaptée à la pente du lit.**

La zone de restitution ne peut se situer qu'au sein de la zone d'emprise du tracé identifiée, dans le fond de vallée. Encore une fois, on choisit de préférence un **endroit où le lit actuel est le plus proche possible de la ligne de talweg de vallée (zone 4)**. Une fois les zones de déviation et de restitution décidées, les **points A et B** sont positionnés sur la ligne de talweg **fig.18** et considérés comme les **bornes du nouveau lit** qu'il s'agit dorénavant de dimensionner.

Le dimensionnement du nouveau lit est réalisé, dans la mesure du possible, à partir d'une **station de référence** (cf. méthode ASR page 16).

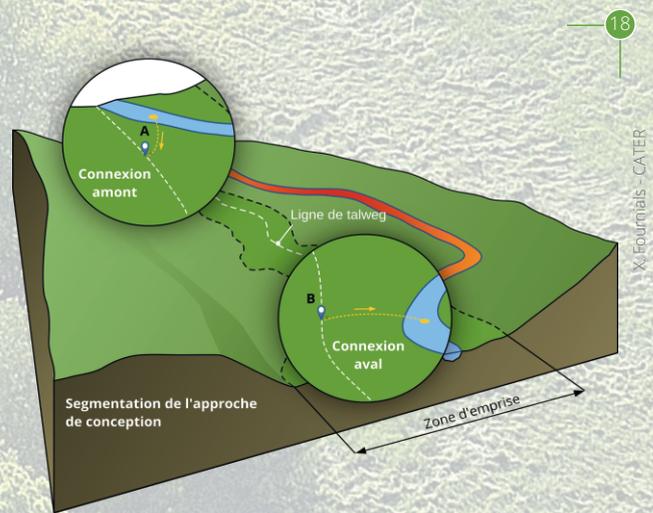
La station de référence doit indiquer les **principales caractéristiques morphologiques à recréer** sur le nouveau lit, comme un modèle à reproduire. Elle doit donc présenter le moins possible d'altérations physiques et être représentative du type de cours d'eau concerné (style fluvial, taille et pente notamment).

On recherche, au plus proche possible, à l'amont ou à l'aval du site une portion jugée **non dégradée**. S'il n'y a pas de station de référence à proximité il faut chercher une station ailleurs, y compris sur **un autre bassin**, mais elle doit être **similaire au site projet** en terme de géologie, surface de bassin, régime de débit, forme et pente de la vallée. C'est ce qu'on appelle les variables de contrôle de l'hydromorphologie.

Dans tous les cas, les pentes de vallée (I) doivent être similaires et la largeur du fond de vallée (E) sur le site projet **fig.19** doit être au moins égale à l'amplitude (Ω) des méandres de la station de référence.

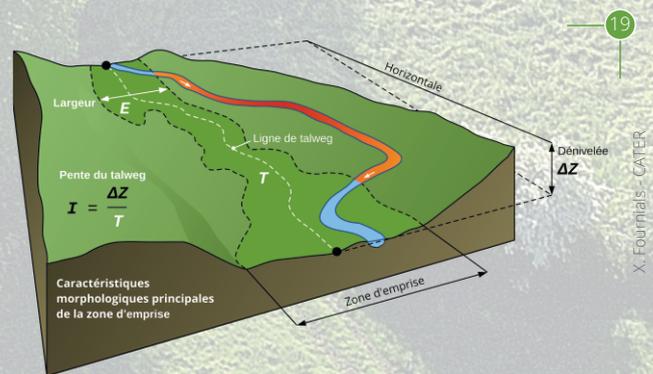
Cependant, parce qu'il est **souvent très difficile** de trouver une référence valable, le présent document propose **aussi une seconde option** de dimensionnement (cf. méthode SSR page 18).

Une fois dimensionné, le nouveau lit sera relié au lit existant par des segments de connexions amont et aval (cf. page 24).



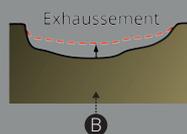
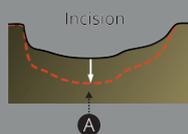
18

X. Fournils - CATER



19

X. Fournils - CATER



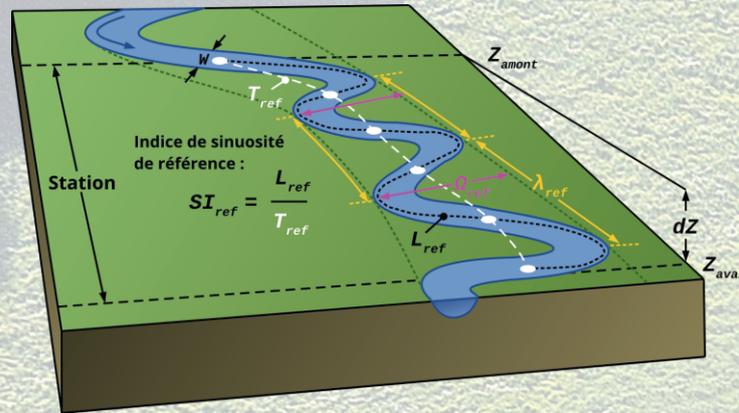
Ci-contre, exemple d'érosion régressive et d'incision. Nouveau lit en sortie de plan d'eau sur Le Vesbire, affluent de la Drôme (14)



F. Goujony - FDP/PPMA 50



Dimensionnement du nouveau lit Méthode avec station de référence / ASR



20

X. Fournials - CATER

La longueur de la station de référence vaut au moins **14 fois la largeur moyenne à pleins bords** *fig.20*. Sur les petits cours d'eau de moins de 3 mètres, il faut compter par exemple un linéaire de 50 mètres. Elle est si possible délimitée par des radiers (points hauts). On commence par mesurer la dénivellation totale de la station $dZ = Z_{\text{amont}} - Z_{\text{aval}}$ ainsi que la longueur de l'axe de méandrage T_{ref} afin, dans un premier temps, de s'assurer que les pentes de vallée sont similaires. On compare l à $l_{\text{ref}} = dZ / T_{\text{ref}}$.

Les mesures à réaliser sur la station de référence retenue sont au nombre de 4 :

1 - Le tracé en plan est étudié de préférence sur le terrain *fig.20*. Les mesures concernent la **longueur développée du lit** (L_{ref}) ainsi que la **longueur de l'axe de méandrage** (T_{ref}), deux grandeurs permettant de déterminer l'indice de sinuosité de référence (SI_{ref}). Ensuite, on mesure plusieurs valeurs de longueur d'onde (λ_{ref}) et d'amplitude (Ω_{ref}), pour moyennes.

2 - La pente moyenne du lit (i_{ref}) *fig.21* est déterminée sur le terrain, le long de la ligne de talweg du lit mineur (reliant les parties les plus profondes) en mesurant la cote du fond du lit aux **points hauts du profil**, soit de radiers à radiers s'ils existent, soit sur les faciès les plus courants de la station. On parlera de « pente de référence ».

3 - Le gabarit hydraulique de référence (W_{ref} et D_{ref}) est mesuré **dans les inflexions du tracé**, là où le lit mineur est le plus étroit, le moins profond, et le plus symétrique (faciès radier ou plat courant généralement) *fig.21*. On cherche, en somme, les **sections limitantes** qui contrôlent le débit de pleins bords sur un tronçon de cours d'eau. Par ailleurs, on prévoit plusieurs mesures pour en retenir des moyennes. On peut réaliser des profils en travers complets ou simplement repérer la cote « pleins bords » (rupture de pente au niveau de la berge la plus basse ; cf. protocole CARHYCE) et mesurer uniquement la largeur et la profondeur à pleins bords.



Réalisation d'un profil en travers du lit mineur du Beuvron aval (50).

X. Fournials - CATER

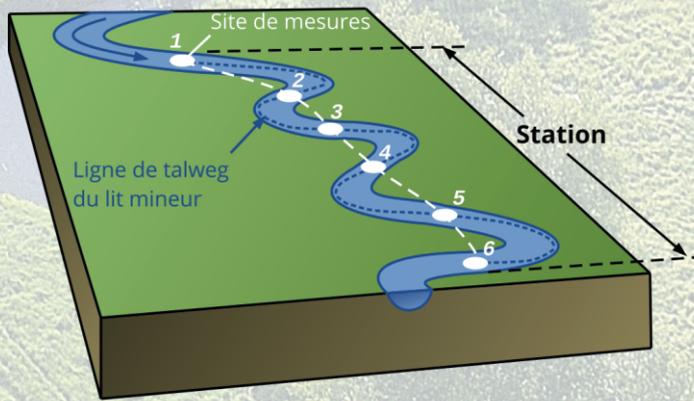


Reméandrage du ruisseau de la Pourcelière, affluent de la Vée (61). Exemple d'un cas où la forte pente de la zone d'emprise (4,8%) a conduit le maître d'ouvrage à augmenter la sinuosité du nouveau lit afin de maintenir une pente raisonnable au regard du type de cours d'eau.

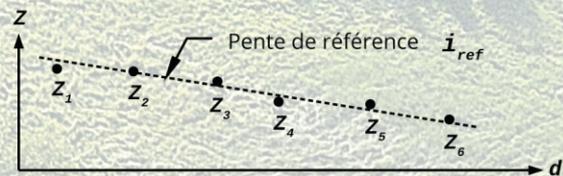
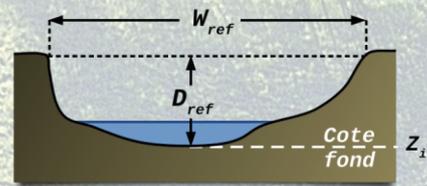


M. Scelles - INRN

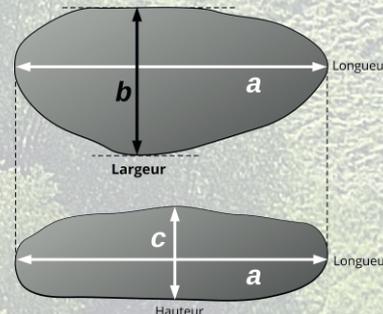




Mesures à réaliser sur sites



4 - La granulométrie de la couche d'armure (matériaux les plus grossiers du transport solide) aide à préciser le matériau de recharge à prévoir. On utilise la **méthode de Wolman** consistant à mesurer 100 éléments (ou 50, cf. protocole CARHYCE) sur au moins un radier. On mesure au pied à coulisse, en millimètres, la largeur de la particule, c'est-à-dire la dimension intermédiaire (b) perpendiculaire à la plus grande (a) **fig.22**. On peut aussi prélever et ramener les éléments à la carrière pour s'assurer de leur concordance avec le matériau choisi pour la recharge du nouveau lit.

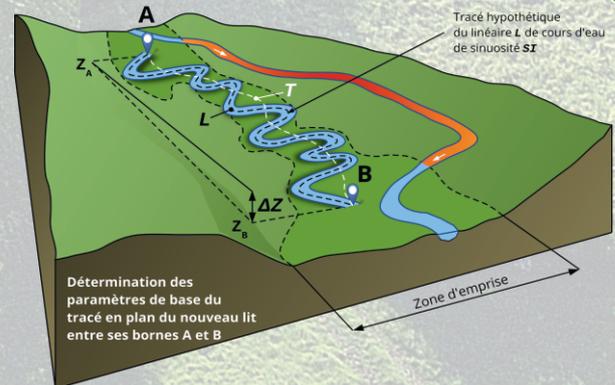


À gauche : dimensions d'une particule de substrat. On retient uniquement la dimension **b** de la perpendiculaire au plus grand axe. À droite : application de la méthode de Wolman sur la Druance (14).

On détermine in fine la longueur (L) de lit à recréer autour de la ligne de talweg (T) entre les bornes A et B **fig.23.**

$$L = S i_{ref} \cdot T$$

Ces éléments contribuent à la définition du tracé en plan (voir page 20).



Bras de connexion entre l'Elle en bief et son lit restauré en fond de vallée à Bérigny (50). Positionné en travers de la vallée, ce tronçon présente une pente importante. Pour limiter les contraintes hydrauliques sur le fond du lit, la pente a été adoucie en allongeant le tracé par le développement d'une série de méandres.





Dimensionnement du nouveau lit Méthode sans station de référence / SSR

Il s'agit de déterminer les principales grandeurs de dimensionnement du lit (variables de réponse) à partir des données et grandeurs imposées par le terrain (variables de contrôle).

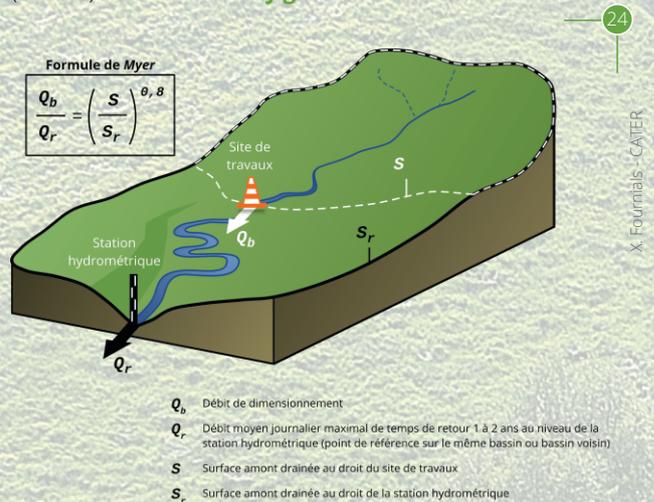
La formule de Manning-Strickler (cf. page 8) permet de déterminer des différents paramètres morphologiques du nouveau lit, interdépendants les uns des autres pour la plupart. Plus précisément, on cherche à **caler le duo « gabarit-pente » du nouveau lit de manière à ce qu'il fasse transiter à pleins bords un débit de dimensionnement égal au débit moyen journalier maximal de temps de retour 1 à 2 ans** en fonction du type cours d'eau concerné.

Les variables de contrôle découlent des données imposées par le terrain. Au-delà de la **forme générale**, de la **largeur** (E) et de la **pente** (I) de la **zone d'emprise du tracé** (fond de vallée) déjà précisées, la **nature (cohésive ou non)** des futures **berges** doit être appréciée et le **débit de dimensionnement** (Q_b) évalué (cf. ci-dessous).

Les variables de réponse sont déduites des variables de contrôle. On cherche alors à déterminer la **pente** (i) et donc la **sinuosité** (SI) du lit, son gabarit à pleins bords (**largeur** W, **profondeur** D) et son **rapport de forme**, qui constituent les caractéristiques techniques du projet de recréation de lit. La **granulométrie du fond** sera choisie en fonction de la pente (puisque l'on a pas de référence).

Les différentes étapes sont les suivantes :

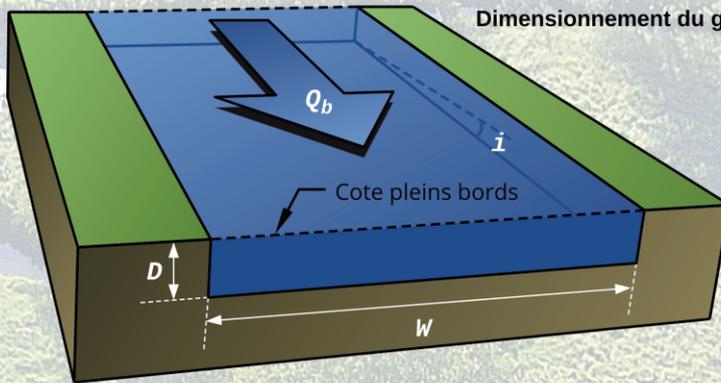
1 - Le débit de dimensionnement (Q_b) du lit mineur peut être estimé depuis les **bases de données hydrologiques régionales** (compilées dans la banque hydro), avec l'aide d'un hydrologue (DREAL) le cas échéant **fig.24**.



2 - Le coefficient de rugosité (K_s) du futur lit mineur doit être évalué en tenant compte du fait que, dans les premiers temps, le nouveau lit est plus "lisse" qu'un lit naturel (le plein développement de la végétation ligneuse, arbustes et arbres, demandant plusieurs décennies). Une rugosité surévaluée (valeur de K_s trop petite) va conduire, pour une pente et un débit donné, à surévaluer la section (largeur, profondeur) nécessaire à l'écoulement de ce débit. **On retiendra donc, empiriquement, une valeur de l'ordre de 25 m^{1/3}/s**, valeur supérieure aux valeurs "naturelles" moyennes (cf. page 9).



Dimensionnement du gabarit hydraulique moyen à pleins bords



$$W = \left(\frac{Q_b (1+2\alpha)^{2/3}}{K_s i^{1/2} \alpha^{5/3}} \right)^{3/8}$$

$$D = \alpha W$$

NB. Dans les formules, α est l'inverse du rapport de forme W/D (i.e. $\alpha = D/W$)

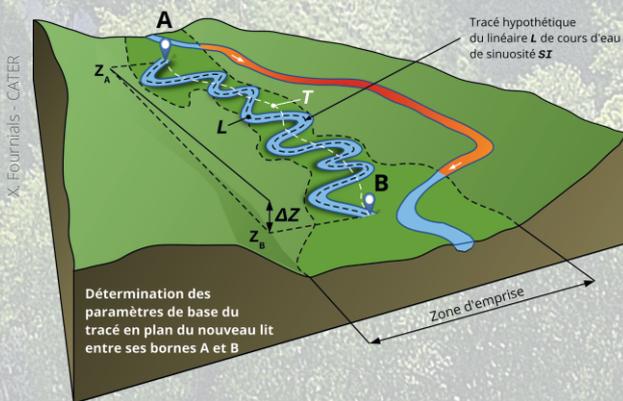
X. Fournials - CATER

3 - La pente (i) et la sinuosité (SI) du nouveau tracé sont ensuite déterminées conjointement, car liées l'une à l'autre. On donne au **nouveau lit un indice de sinuosité d'au moins 1,2 - 1,3**. La **longueur (L)** du lit ainsi que sa **pente (i)** en seront ensuite déduites.

$$L = SI.T \text{ et } i = \Delta Z/L \text{ fig.26}$$

4 - Le rapport de forme (Largeur W / Profondeur D) est choisi conformément au type de cours d'eau et notamment à la sinuosité et à la cohésion des futures berges (horizons pédologiques dans l'emprise du tracé). Généralement, on prend une **valeur de 6 à 8** pour les petits cours d'eau de plaine à faible énergie et aux berges plutôt cohésives.

5 - Le gabarit hydraulique (W et D) à donner au futur tracé découle des données précédentes. En effet, sur la base d'une section simplifiée de forme rectangulaire (fond plat, berges verticales), les valeurs de **largeur (W)** et de **profondeur (D)** moyennes du lit à pleins bords peuvent être calculées à partir du débit de dimensionnement (Q_b), de la pente moyenne du lit (i), du rapport de forme (W/D) et du coefficient de rugosité (K_s) **fig.25**.



Détermination des paramètres de base du tracé en plan du nouveau lit entre ses bornes A et B

Tracé hypothétique du linéaire L de cours d'eau de sinuosité SI

X. Fournials - CATER



Nouveaux lits à pleins bords :

- la Druance à Pontécoulant (14) à gauche,
- le Soquet (50) à droite.



X. Fournials - CATER

F. Goulmy - FDPRIMA 50



Définition du tracé en plan

Quelle que soit la méthode utilisée, on aboutit aux principaux paramètres de dimensionnement du nouveau lit :

- la **longueur** (L) de lit à créer entre A et B
- le **gabarit** à respecter (W et D)

À partir de maintenant, il s'agira de définir :

- le **tracé en plan** à donner entre A et B
- le **creusement** sur le terrain
- les **connexions** au lit existant

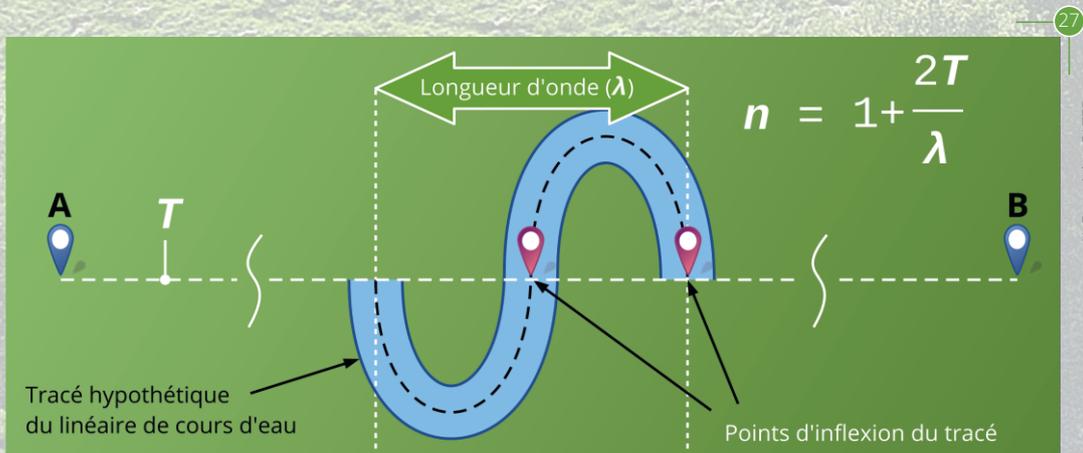
Le choix du tracé en plan du nouveau lit se fait sur plan (sous SIG par exemple). Il s'agit de **définir la manière de dérouler les L mètres de cours d'eau prévus entre les points A et B en suivant l'axe de la ligne de talweg de vallée sans sortir de la zone d'emprise définie**. Ce lit, sinueux, doit alors louvoyer de part et d'autre de la ligne de talweg, la franchissant à multiples reprises, constituant autant de **points d'inflexion** du tracé.

On détermine d'abord le nombre de points d'inflexion (n) afin de respecter les **formes en plan des cours d'eau à méandres libres** (cf. page 8). Pour ce faire, une longueur d'onde peut être vue comme un motif théorique qui se répète, sur lequel on observe 2 inflexions **fig.27**. Le nombre total n de points d'inflexion est alors calculé par la formule ci-dessous, prenant en compte le fait que les points A et B constituent respectivement le premier et le dernier point d'inflexion.

Pour la valeur de la **longueur d'onde** (λ) on prendra :

- Pour les cas étudiés selon la **méthode SSR**, une valeur moyenne de **10 à 12 W** ;
- Pour les cas étudiés selon la **méthode ASR**, la valeur moyenne mesurée sur la **station de référence** (λ_{ref}).

Ces n points d'inflexion doivent être positionnés sur la ligne de talweg. Ils servent de **base de construction au dessin du tracé**.





Le positionnement des points ne doit pas suivre un schéma régulier

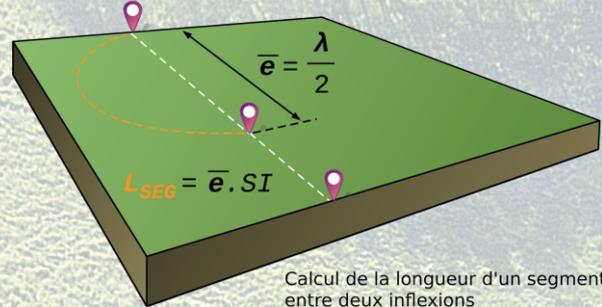
(espacement constant) afin d'éviter toute répétition homogène du motif, aboutissant à un tracé régulier et symétrique, complètement inadapté. On s'aide d'une valeur moyenne d'espacement (\bar{e}) égale à la moitié de la longueur d'onde (λ) **fig.28**. Pour chaque intervalle, elle est réajustée aléatoirement de plusieurs dizaines de pourcents en plus ou en moins (tout en respectant au maximum le nombre total n d'inflexions) sur l'ensemble de la longueur (T) **fig.29**.

Concrètement, l'espacement entre les inflexions (e) et la longueur des segments (L_{SEG}) de lit entre les inflexions (sur une demi onde) sont donc calculés comme suit, afin de permettre ou de faciliter l'implantation (piquetage) du projet sur le terrain (cf. **fig.36** page 27).

En ce qui concerne l'amplitude (Ω)

- Pour les cas étudiés selon la **méthode SSR**, elle découlera fatalement de la longueur des segments (L_{SEG}) de la longueur totale du lit (L) et donc de la sinuosité et de la pente choisies auparavant. On essaiera d'**avoir au moins 4 W et idéalement 6 W et plus**.
- Pour les cas étudiés selon la **méthode ASR**, on essaiera d'**atteindre la valeur mesurée sur la station de référence (Ω_{ref})**

Espacement moyen entre inflexions. Valeur à faire varier le long de la ligne de talweg.

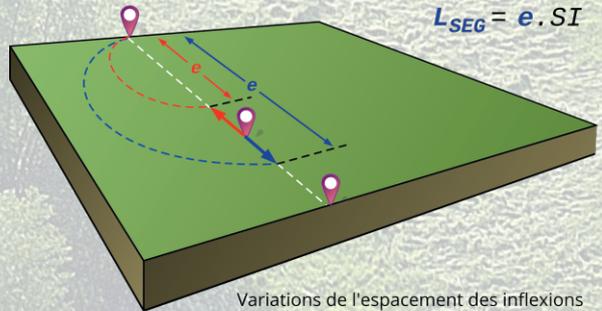


28

X. Fournials - CATER

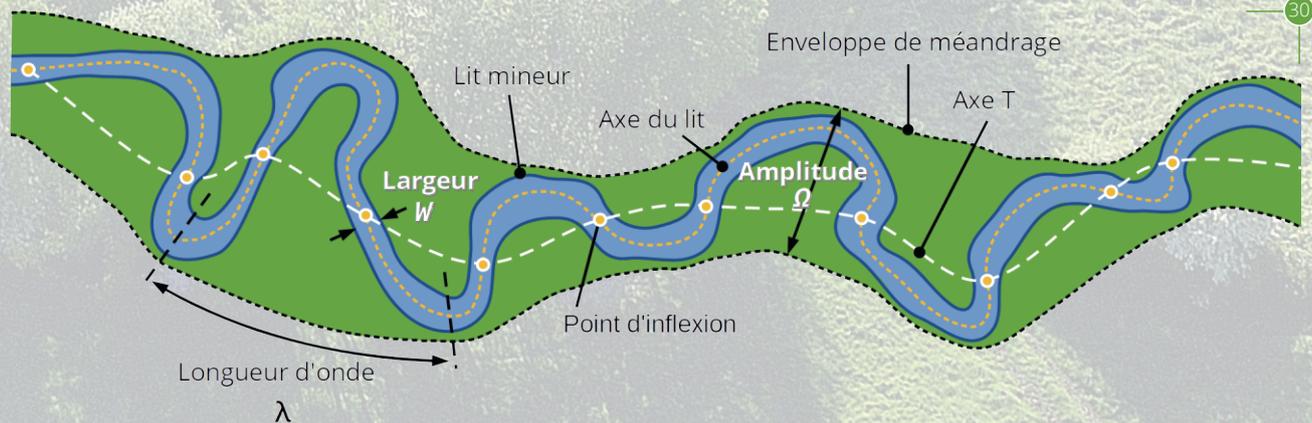
$$L_{SEG} = e \cdot SI$$

$$L_{SEG} = e \cdot SI$$



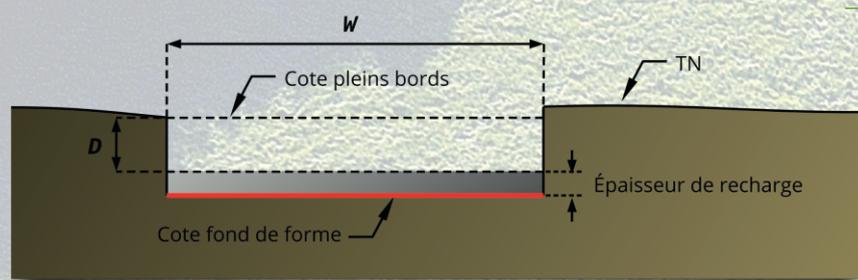
29

X. Fournials - CATER



30

X. Fournials - CATER



31

X. Fournials - CATER

Les cotes altimétriques des inflexions

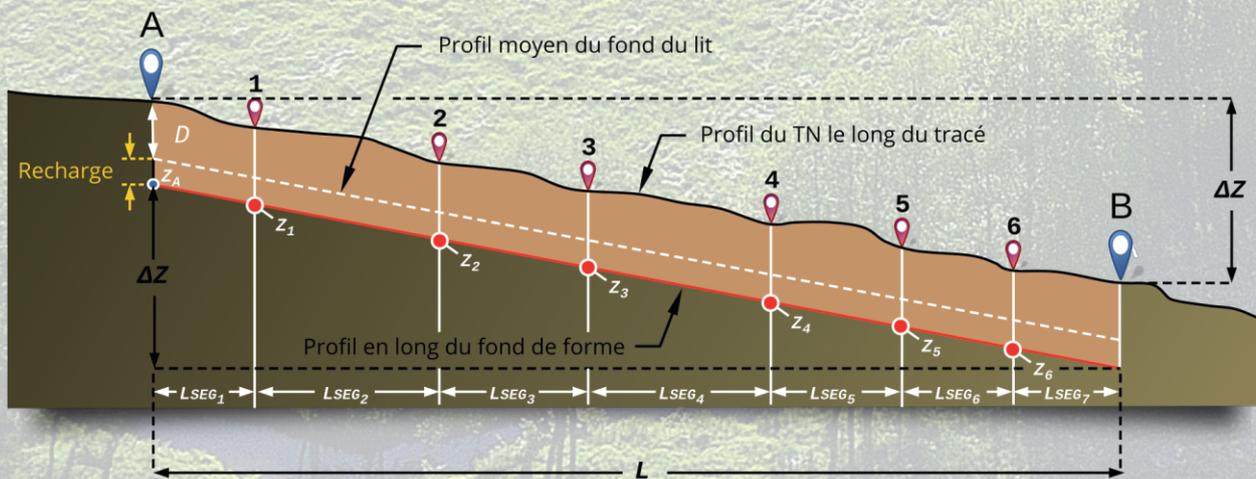
peuvent également être calculées pour permettre les terrassements et surtout leur contrôle. Le calcul doit tenir compte de l'épaisseur de recharge sur radiers : on détermine alors la cote du fond de forme (creusement du lit) avant recharge **fig.31**.

Pour ce faire, on détermine tout d'abord la cote de fond de forme au départ A du nouveau lit (Z_A) : en soustrayant à la cote du terrain naturel en A la profondeur moyenne du lit (D) ainsi que l'épaisseur de recharge sur radier. Puis, les cotes sont calculées en progressant vers l'aval, jusqu'au point B selon la formule **fig.32**.

Les connexions amont et aval sont les bras de raccordement du nouveau tracé au lit actuel **fig.33**.

La manière de réaliser ces connexions (A'-A et B'-B') dépend :

- pour la connexion amont, de **la situation de la déviation** (zone 1, 2 ou 3 cf. **fig.16** page 14) : déviation en fond de vallée ou en situation perchée ;
- de **la cote altimétrique (fond dur) du lit existant en A' et B'** (par rapport à A et B) : fond au même niveau ou non ;
- de **la longueur des connexions** : point A proche ou éloigné de A' par exemple.

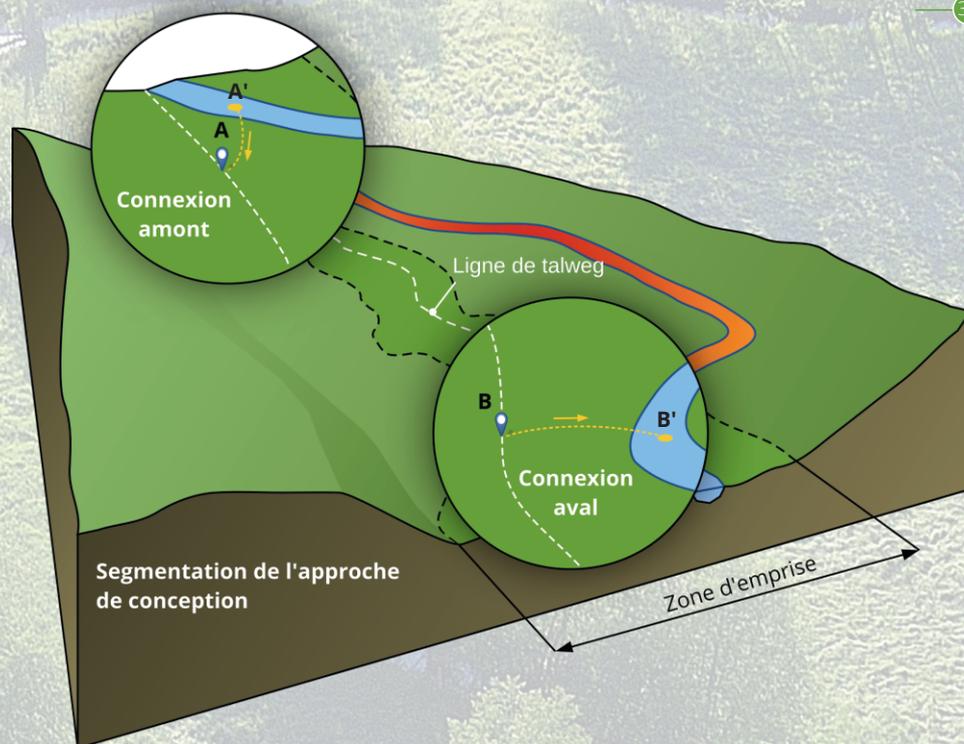


32

X. Fournials - CATER

$$Z_k = Z_{k-1} - i \cdot LSEG_k$$

J. Jarnet - EDR/DVA/G1



Il existe une **multitude de configurations possibles** avec, pour chacune ou presque, sa solution et d'éventuelles options. On se focalise uniquement sur la **configuration à rechercher en priorité dans tout projet : des points A et B positionnés sur le talweg de vallée et (très) proches du lit existant (connexions courtes).**



Les dimensions théoriques

du gabarit (W et D) et la pente (i) issus de la phase de conception assurent, pour une rugosité donnée, la capacité d'écoulement théorique à respecter (Q_b). Celle-ci devra s'exprimer, travaux finis, dans les zones de contrôles hydrauliques aux points hauts du profil en long (comme sur les cours d'eau naturels) qui sont généralement positionnés dans les inflexions du tracé en plan.

Il est bien évidemment exclu de créer un nouveau lit présentant des dimensions homogènes (W et D) tout le long du tracé. La forme de la section (largeur, profondeur, inclinaison des berges) sera **ajustée en phase chantier** dans les méandres, en dehors des zones d'inflexion.



Pour la connexion amont, on compare la cote du fond dur (hors dépôts de fines) du lit existant au **point de déviation A'** à la cote projet du fond rechargé au **point de départ A** *fig.34* :

- **Si les cotes en A et A' sont sensiblement égales (cas 1)**, aucun problème particulier ne se pose : la pente de la connexion est très faible à nulle (d'où l'intérêt que le linéaire soit réduit au maximum). Il faudra éventuellement aménager une transition douce en largeur en cas de sur-largeur amont (rétrécissement progressif).
- **Si la cote en A' est nettement inférieure à la cote en A (cas 2)** (sur-profondeur du lit existant), le décrochement au niveau de la connexion provoquera, dans la plupart des cas, une **rehausse de la ligne d'eau dans le lit amont par rapport à la situation initiale**.

Dans le cas 2, la rehausse de la ligne d'eau devra être acceptée par les propriétaires concernés. Il s'agit alors de réaliser une transition douce et progressive de la profondeur par recharge en granulats afin de favoriser le transit sédimentaire et ne pas risquer d'impacter le nouveau lit.

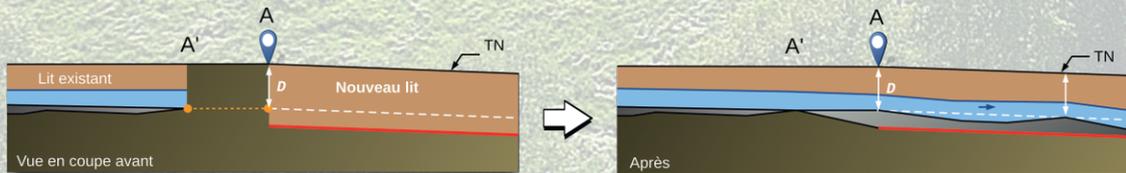
Sinon, il faut prévoir un système de lits emboîtés sur le nouveau tracé tel que présenté précédemment (cf. page 13).

Pour la connexion aval, les choses sont sensiblement identiques sur le principe, mais inversées.

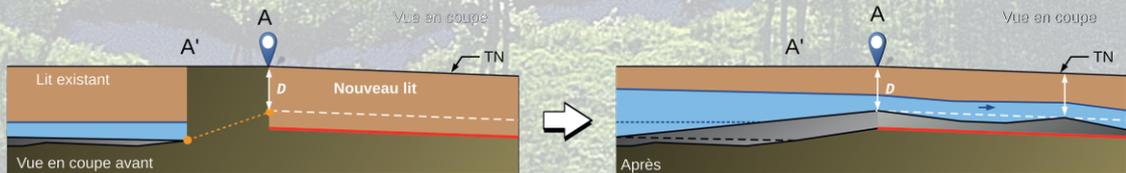
- **Si les cotes en B et B' sont sensiblement égales**, on agit de la même manière que pour la connexion amont.
- **Si la cote en B' est nettement inférieure à la cote en B**, on réalise une recharge en gros éléments (cailloux, pierres, blocs) de façon à rattraper, plus progressivement, la différence de niveau.

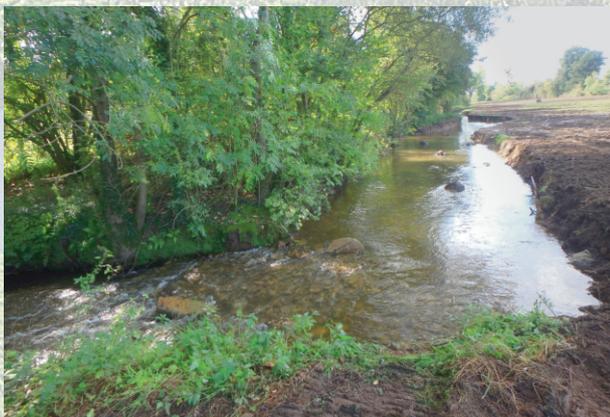
Attention : Le nouveau lit dimensionné ne saurait être plus profond que le lit existant, que ce soit en amont ou en aval. Par ailleurs, il ne faut pas caler la profondeur du nouveau lit en fonction de celle du lit existant sans s'assurer préalablement qu'elle correspond au gabarit naturel.

Cas 1 (cotes sensiblement égales)



Cas 2 (cote du lit existant en dessous du nouveau lit)





C. Doire - CA MSWN

Connexion aval du nouveau tracé du Beuvron aval (50). Le nouveau lit arrive pratiquement à la même cote que le lit existant.

Le matelas alluvial est reconstitué par recharge en granulats. On prévoira un mélange hétérogène, constitué d'une large gamme de tailles, des graviers aux blocs, avec une dominante pierres - cailloux (cf. guide *La Recharge en Granulats*). La quantité de matériau à prévoir peut être déterminée d'après l'épaisseur moyenne à utiliser et la superficie à couvrir (produit de la largeur pleins bords par le linéaire), à ajuster en fonction du volume réutilisable de matériau de l'ancien lit (cf. page 30).

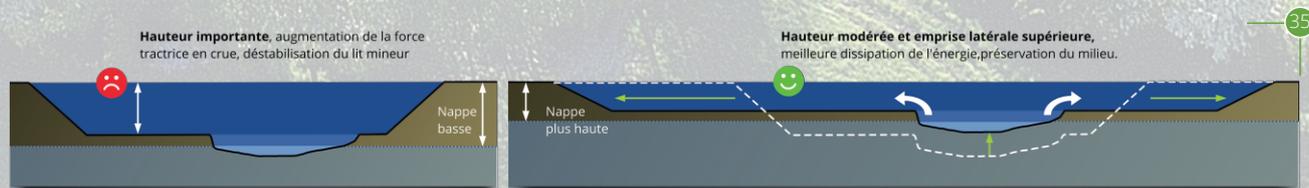
L'inondabilité des parcelles concernées par le passage du nouveau lit et potentiellement de celles situées en amont est, dans la plupart des cas, augmentée après travaux.

- **En priorité, on veille à ce que ce soit compris et accepté** par les propriétaires et exploitants concernés.
- **Sinon** on peut avoir recours au **système de lits emboîtés** présentés précédemment.

A l'intérieur du lit majeur reconstitué, **le lit mineur a les mêmes caractéristiques morphologiques** que celles qu'elles auraient eu autrement (gabarit, pente, sinuosité, granulométrie) mais décalées verticalement vers le bas. La cote pleins bords du lit mineur correspond alors au plancher du **lit majeur reconstitué**. Ce dernier doit avoir :

- une **largeur de base d'au moins 4 fois** la largeur pleins bords du **lit mineur (W)**, et **idéalement de 6 fois** et plus.
- une **profondeur la plus réduite possible**. En effet, cela permet de minimiser les contraintes hydrauliques (forces tractrices) sur le lit mineur restauré lors des crues débordantes, grâce à un meilleur étalement de la lame d'eau pour un même débit [fig.35](#) et l'impact sur les zones humides latérales.
- une **pente de talus modérée** (fruit de 2:1 minimum). La longueur de pente ne doit pas être trop importante pour limiter les érosions. Si besoin, on réalise des risbermes : replats intermédiaires pour casser l'énergie (cf. [fig.15](#), page 13).

En zone de pâtures, l'emprise du lit majeur reconstitué ne doit pas forcément être considérée comme perdue par les exploitants. On installe les clôtures en bordure du lit mineur, comme sur n'importe quel cours d'eau.



35

X. Fournials - CATER

CATER



Réalisation



F. Goulimy - FDPPMA 50

Cette vue aérienne basse altitude du nouveau lit du Soquet, affluent de la Sienne (50) illustre parfaitement les attendus en terme de diversité et d'hétérogénéité du tracé en plan dans la recréation ex nihilo des petits cours d'eau de plaine.

La période des travaux est importante. La création d'un nouveau lit consiste avant tout en des travaux de terrassement qui doivent être effectués en période de débits stabilisés de basses eaux et en dehors des périodes de reproduction des espèces piscicoles indicatrices (souvent des salmonidés). Les sols doivent être les plus portants possible pour limiter les ornières et les coûts de remise en état en fin de chantier.

- **Sur les cours d'eau salmonicoles**, si la période de juillet à octobre paraît idéale en terme de portance des sols et de débit, la meilleure fenêtre semble toutefois être le **printemps ou tout début d'été** (d'avril à début juillet) qui permet de donner plus de temps au nouveau lit pour se stabiliser et à la reprise de végétation avant les prochaines crues (automne).
- **Sur les cours d'eau cyprinicoles** ou intermédiaires, fin de printemps et début d'été étant à éviter (reproduction), la bonne fenêtre sera plutôt **d'août à octobre**.
- Pour des travaux réalisés au printemps et en été il faut être vigilant vis-à-vis de la faune terrestre (nidification des oiseaux et cycle biologique des insectes par exemple).

L'implantation du tracé défini par l'étude préalable est la toute première étape après les **travaux préparatoires** (installation du chantier, gestion de la végétation ...).

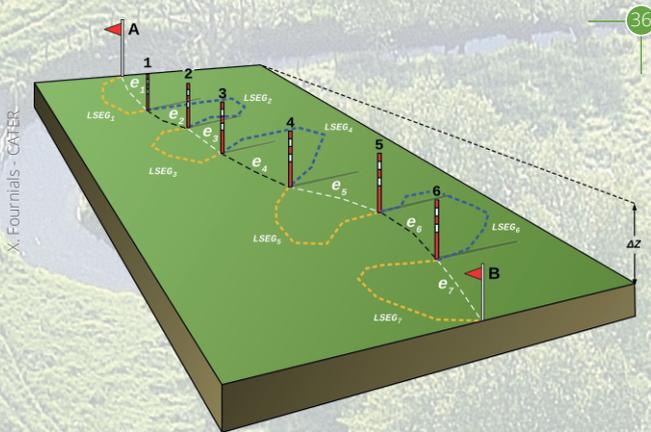
Dans les prairies ou autres zones humides ouvertes, une **fauche de la zone de tracé** prévisionnelle (enveloppe de méandrage) facilite les interventions. Si pour les grands cours d'eau l'implantation du projet peut bien sûr se faire par des **méthodes topographiques classiques** (tachéomètre, GPS), sur les petits cours d'eau la méthode peut être adaptée. Ainsi, on procède d'abord au **positionnement des points d'inflexion** à l'aide de jalons (piquetage).



Implantation du tracé et piquetage : suite à la remise en fond de vallée de la Mèze, un nouveau lit est créé pour la reconnecter à la Calabrière, son affluent (61). Un piquetage permet de repérer l'implantation et de visualiser à l'échelle les formes du futur lit.



S. Hervé - CC-BY-NC



X. Fourniaux - CATER

D'un jalon à l'autre, le **tracé des segments** peut se faire au décamètre posé au sol (herbes fauchées) dont on déroule la bonne longueur (L_{SEG}) à chaque segment. La série des segments mis bout à bout dessine le tracé en plan du futur lit **fig.36**.

Globalement, pour chaque segment, surtout sur les petits cours d'eau, on **évite** les méandres de **forme bien arrondie** (arc de cercle) et les **tracés en plan symétrique** (pas de report systématique d'une forme, quelle qu'elle soit, d'un méandre à l'autre) : on doit **privilégier un tracé hétérogène, irrégulier et plutôt « anguleux »** (sans pour autant abuser des angles aigus). La possibilité d'arrondir les courbures est de toute façon très limitée, sur les petits cours d'eau, par l'amplitude de travail du bras de pelle.

Une vérification de l'implantation s'impose avant toute intervention des engins sur site, et, le cas échéant, permet de valider ou d'ajuster le tracé avec les riverains. **Une fois le tracé validé et arrêté, on peut le piqueter plus finement ou le marquer au sol.**

Les terrassements peuvent se faire en plusieurs étapes. Au-delà du décapage de terre végétale, un **lit primaire** est d'abord ouvert à la pelle mécanique. Le godet sera adapté à la taille du cours d'eau et à la morphologie de la section à ouvrir. Sur les tracés exigus (très petits cours d'eau), les godets orientables et/ou inclinables sont très utiles car ils facilitent les manœuvres.

La section moyenne théorique (WxD) est ouverte (tranchée de section rectangulaire). Il faut alors respecter le tracé en plan marqué ou piqueté au sol, la largeur moyenne à pleins bords (W) prévue et les cotes de fond de forme calculées dans les inflexions (cf. **fig.37** page 28).



F. Goulmy - FDPPMA 50

Décapage de la terre végétale et creusement du lit primaire. L'Elle à Bérigny (50).



F. Goulmy - FDPPMA 50

Exemple de bouchon temporaire laissé en extrémité amont du projet.



Creusement du lit primaire de section rectangulaire.

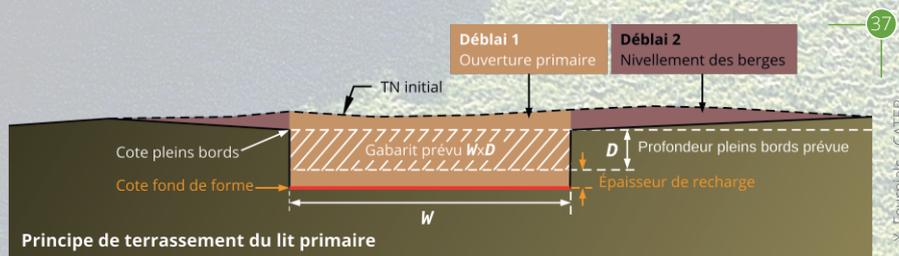
À gauche : travaux en cours sur l'Elle à Bérigny (50) ; à droite l'opération est terminée sur le Beuvron aval à Saint Senier de Beuvron (50).



F. Goulmy - FDPPMA 50



F. Goulmy - CAMSMN



X. Fourniaux - CATER

On procède toujours vers l'amont en réalisant d'abord la connexion aval, et en laissant un "bouchon" en entrée du nouveau lit. De cette façon, on s'assure de l'écoulement des eaux de nappe le cas échéant, de terrasser "au sec" et d'effectuer la mise en eau de manière contrôlée.

En cours de creusement, il peut être utile de vérifier les cotes de terrassement au niveau de chantier et la largeur de tranchée à la mire graduée ou au décimètre, pour repérer et rectifier les erreurs éventuelles. En fonction des modelés du terrain (creux et bosses), il est souvent nécessaire de vérifier ponctuellement la profondeur de tranchée. Si elle est

trop importante par rapport à la profondeur moyenne à pleins bords prévue (D), il sera sans doute nécessaire de niveler l'une ou l'autre des berges, ou les deux, à la bonne hauteur D (pente très douce depuis le TN en retrait vers le nouveau haut de berge rabaisé **fig.37**).

La diversification du lit primaire permet d'obtenir le lit définitif. Des terrassements supplémentaires se font soit en complément de la recharge sur les plus petits cours d'eau (1 à 2 m), soit avant pour les cours d'eau plus importants (plus de 3 m).

Sur les petits cours d'eau, certains travaux de finitions peuvent être réalisés après recharge du lit, afin de donner un peu plus de diversité immédiatement après travaux. Cela favorise aussi la reprise végétale et donc une intégration paysagère plus rapide. Par exemple, **certaines portions de berges pourront être poussées** au godet vers l'intérieur du lit afin de pincer ponctuellement les écoulements et diversifier les vitesses.

Il est aussi intéressant de prévoir d'**ancrer** en berge ou dans le lit divers **éléments naturels amenant de la rugosité**, des caches et autres éléments favorisant des turbulences hydrauliques (branches, souches ...).

Sur les cours d'eau plus larges, il est utile d'**approfondir le lit dans les méandres** afin de créer les mouilles tout en **élargissant à l'extrados**. On prévoira d'**adoucir la pente de la berge dans l'intrados**. On travaillera davantage sur la **partie aval des méandres**, en aval de l'apex, notamment sur les portions de faible amplitude **fig.38, 39 et 40**.



En haut à gauche : travaux d'arasement léger des berges. En haut à droite : vue globale de l'opération. Ci-dessus : replantation d'une souche (vivante) de saule sur le nouveau lit. Ruisseau de la Croisette, Saint-James (50).

M. Taillat - FdPPVA 50

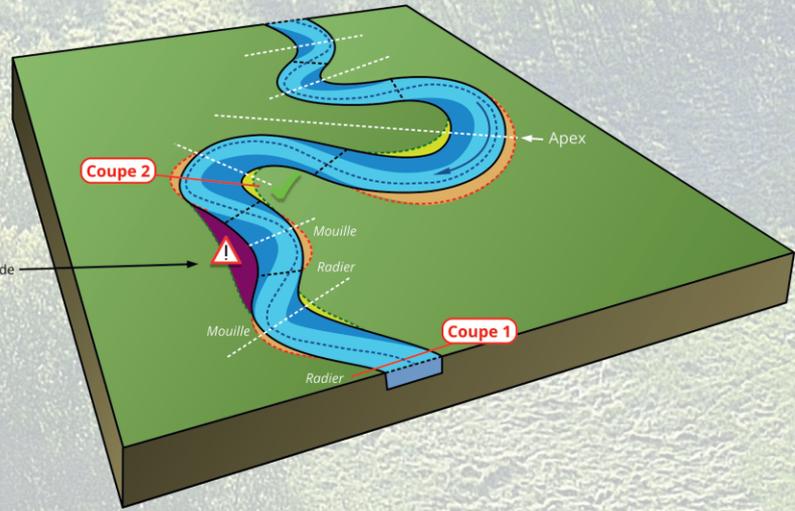


- Emprise du **lit primaire** initial (Gabarit $W \times D$)
- Débit de pleins bords = débit de dimensionnement du lit primaire (Cruée annuelle à biennale)
- Débit de basses eaux
- Zones d'inflexion du tracé
- Talweg du lit mineur

Actions de diversification du lit primaire

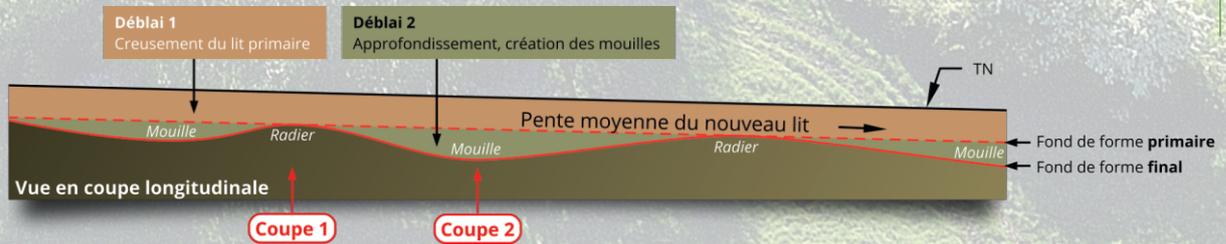
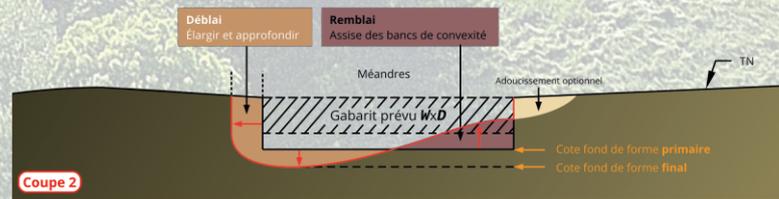
- Zone d'élargissement des extrados (berge sub-verticale)
- Recul du haut de berge en extrados
- Zone d'adoucissement des intrados (berge en pente)
- Recul du haut de berge en intrados

Ne pas adoucir la pente des berges dans les intrados au point de reculer le haut de berge dans l'alignement des extrados : Risque de redressement du tracé en crue ! (surtout si la sinuosité est peu marquée)



M. Taillet - FDPPIVA 50

Travaux de finition, pincement d'écoulement sur un petit cours d'eau pour diversifier les formes du lit.





La reconstitution du matelas alluvial par recharge en granulat est une étape importante et **souvent incontournable** (cf. guide *La Recharge en Granulats*). Globalement, pour une recréation de lit, on pose **d'abord une couche non mobilisable** de matériaux de type pied de butte ou tout-venant (0-150 à 400 mm), **puis le matériau de recharge (mélange graviers, pierres, cailloux)**. Quelques **blocs** peuvent être utilisés en plus pour diversifier les écoulements et créer des abris hydrauliques.

L'ancien lit déplacé perd sa fonction ou son statut de cours d'eau dans le cas d'une restauration totale. Au-delà d'une **pêche électrique de sauvetage** qui est presque toujours nécessaire, il est particulièrement intéressant de **réutiliser pour le nouveau lit tout ou partie des alluvions grossières (graviers, cailloux, pierres) éventuellement présentes**. Cela permet non seulement d'éviter un gâchis manifeste et d'économiser du volume d'achat, mais aussi, et surtout, d'optimiser le temps de réponse biologique en **ensemencant le nouvel écosystème** (végétation, invertébrés, micro-organismes...). On les place de préférence en amont du nouveau lit et après la mise en eau.

En fonction du contexte local, il peut être nécessaire de reboucher l'ancien lit (bien sûr avant tout avec les volumes issus de l'ouverture du nouveau lit) ou au



Ancien lit rebouché au point de dérivation vers le nouveau lit du Soquet, affluent de la Sienne (50).



En haut : Sinuosité, berges basses, recharge hétérogène, seuils, mouilles et banc de convexité, bois mort : facteurs de diversité du milieu nouvellement formé. Ruisseau de la Croisette, Saint-James (50). À gauche : Reprise des matériaux du bief (Le Soquet, 50). À droite : Développement rapide de la végétation aquatique typique des eaux courantes (ici des callitriche) peu de temps après les travaux (La Sinope, 50).

contraire de le maintenir ouvert, ne serait-ce qu'en partie, pour permettre par exemple la continuité de certains écoulements (fossés, voiries, eaux pluviales ...). Le remblaiement partiel de l'ancien lit peut consister à agir sur une partie de sa longueur ou de sa hauteur, ou encore à n'obstruer que ses extrémités. **L'équilibre des volumes de terrassement doit donc être étudié dès la conception** pour chaque projet, afin d'évaluer au cas par cas les besoins d'apports ou d'exports, sources majeures de définition du coût prévisionnel des travaux. La seule constante technique qui peut être évoquée en cas de restauration totale est la nécessité de former un **bouchon étanche** en entrée de **l'ancien lit** afin que **tout le débit** amont passe bien par le **nouveau lit**.



Reconstitution du matelas alluvial sur le Beuvron (50). On pose d'abord une couche non mobilisable de matériaux de type pied de butte ou tout-venant (0-150 à 400mm).



G. Doare - CAWISYN



À l'issue des travaux, c'est l'**hétérogénéité des largeurs, des profondeurs, de la pente du lit et des berges, de la taille et de l'épaisseur des sédiments** (cailloux, pierres, blocs) le long du tracé qui permet, vraisemblablement après quelques petites crues, de recréer la **succession naturelle des faciès d'écoulement** (radiers, plats, mouilles ...) et la **diversité des habitats** (hétérogénéité des vitesses, des hauteurs d'eau et des substrats), garantes de l'atteinte des objectifs initiaux.

La mise en eau du nouveau lit se fait de manière **progressive** en "grignotant" peu à peu le bouchon laissé en amont. Elle peut être l'occasion d'inaugurer l'ouvrage en présence des élus locaux et des partenaires.



F. Goulmy - FDPPWA 50

Le godet ouvre la brèche dans le bouchon laissé à l'entrée du nouveau lit de l'Elle à Berigny (50).

Les aménagements connexes peuvent suivre immédiatement ou après quelques montées de débits morphogènes, en fonction des contraintes locales. Les passerelles peuvent être aménagées avant ou après la mise en eau alors que les **abreuvoirs de type descente** se font après (calage). Les clôtures se posent à la fin. On n'oubliera pas de **semer les surfaces travaillées** (terre à nue) avec, par exemple, un gazon type Ray-grass.

Les plantations d'arbres et d'arbustes, si on a renoncé à la végétalisation spontanée, sont réalisées avant la pose des clôtures **à l'automne de la même année ou l'année suivante**.

Des effets secondaires et temporaires sont régulièrement observés. Le **développement d'algues vertes** (cladophores ou autres), quelques mois seulement après les travaux, suivi d'une **forte croissance d'herbacées dans le lit** (faux-cresson surtout) sont des phénomènes courants. Ils sont généralement l'expression la plus visible d'un stress qu'a subi le milieu du fait des travaux (écosystème neuf, pas encore équilibré), amplifiée par une eau riche en nutriments, et d'une **augmentation brutale, mais temporaire, de la température des eaux** (fort éclaircissement du nouveau lit par rapport à l'ancien, le temps que la végétation arbustive se développe et apporte un peu d'ombrage). Il ne faut pas s'en alarmer mais surveiller, et **faire preuve de pédagogie avec les élus et les riverains pendant la phase transitoire**.



F. Goulmy - FDPPWA 50

Diversité des écoulements et de la végétation quelques temps après travaux.



Ce qu'il faut retenir !

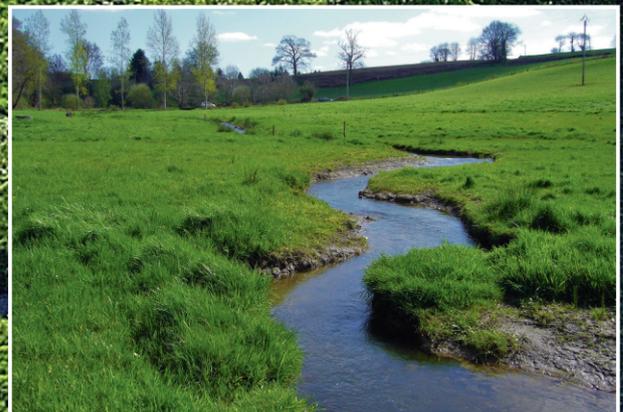
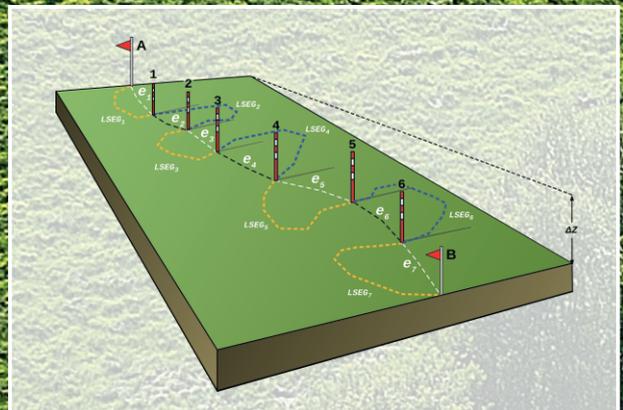


Dans tout projet de restauration hydromorphologique de ce type, on doit chercher à reproduire les critères de bon état physique des petits cours d'eau de plaine, notamment :

- Une capacité moyenne d'écoulement à pleins bords proche du débit moyen journalier maximal de temps de retour 1 à 2 ans.
- Une sinuosité d'au moins 1,2.
- Une largeur et une profondeur moyennes à pleins bords proches des valeurs naturelles, et d'un rapport cohérent par rapport au type de cours d'eau.
- Une hétérogénéité de la section le long du tracé (variation de la largeur, de la profondeur, de la pente des berges). Jamais on ne fera quelque chose de régulier.



- Bien comprendre le fonctionnement des cours d'eau et savoir à quel type de cours d'eau on a affaire avant de se lancer dans quoi que ce soit !
- Prévoir un minimum de topographie dans le fond de vallée si la localisation du talweg n'est pas visuellement évidente !
- Pas de section trapézoïdale !
- Prévoir une recharge d'au moins 20 cm !
- Éviter de connecter le départ du nouveau lit à un tronçon de cours d'eau perché !



Les membres de la CATER de Normandie



CATER de Normandie - Le moulin de Ségrie, Ségrie-Fontaine - 61100 Athis Val de Rouvre
02 33 62 25 10 - contact@cater-normandie.fr - www.cater-normandie.fr