

**ANNEXE - Eléments techniques pour l'élaboration d'un dossier de restauration hydromorphologique linéaire de cours d'eau**

*M. Bramard, L. Boutet-Berry, version 2, Aout 2017.*

La restauration d'un cours d'eau consiste à assister son autoréparation lorsque celui-ci a été dégradé, endommagé ou détruit. Cette réparation nécessite une mise en œuvre soignée des travaux afin de permettre une cicatrisation rapide et une remise en état des habitats présents.

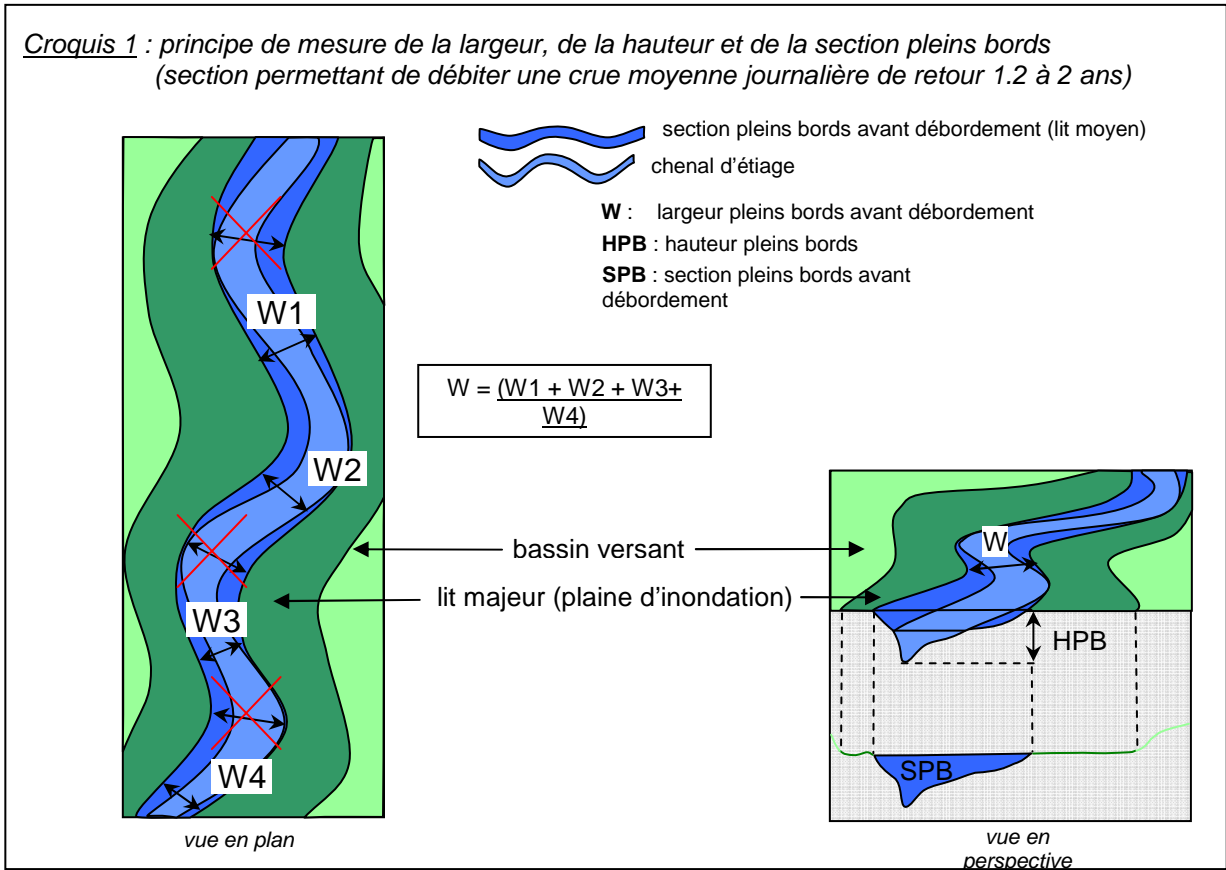
Que les cours d'eau soient temporaires ou permanents, la forme des lits obéit à des lois générales qui doivent être prises en compte afin d'une part d'assurer une bonne stabilité morphologique et une bonne résilience, et d'autre part de conserver (ou de restaurer s'ils ont été abimés) les habitats naturels sur les sites modifiés, comme à l'aval, pour la continuité du transit sédimentaire et l'équilibre morphodynamique des cours d'eau (*Malavoi JR. et Bravard JP., 2010. Eléments d'hydromorphologie fluviale. ONEMA 224p*)

Le **gabarit** du lit des cours d'eau de plaine, de pleins bords avant débordement (lit moyen), correspond approximativement à une crue moyenne journalière de retour de 1.2 à 2.5 ans (moyenne 2 ans). Une des premières étapes du projet est de définir la largeur du cours d'eau à pleins bords.

**1- Le Gabarit : largeur et hauteur plein bord**

**1.1 – Généralités**

Les mesures de largeur plein bords doivent être réalisées en dehors des sinuosités car celles-ci présentent des élargissements consécutifs aux mouvements latéraux du lit (fosses de concavités correspondant à des zones d'érosion, et bancs de convexité correspondant à des zones de dépôt). Plusieurs mesures de hauteur et largeur doivent être réalisées entre les sinuosités ou dans les portions rectilignes. (croquis 1)



Il faut éviter les secteurs artificialisés (recalibrage, bourrelets de curage, endiguement, rectification, déplacements, mises en bief etc.).

Des sur-élargissements sont souvent observables dans les parties urbaines, sur les portions sur-piétinées par le bétail, aux abords de plantations monospécifiques de peupliers ou de conifères, à l'amont et à l'aval des ouvrages (seuil fixes ou mobiles, gués, radiers de ponts etc...).

Des berges hautes naturelles peuvent également être observables particulièrement dans les secteurs de rupture de pente naturelle (failles géologiques par exemple), ou de changements brusques d'orientation des vallées. Ces secteurs ne conviennent pas non plus pour définir la section plein bord moyenne.

**En dehors de sections naturelles bien conservées, la section** plein bord moyenne peut être estimée :

- à partir des calculs de débit crue moyenne journalière de retour 1.2 à 2 ans (mesures directes de débit moyen journalier en crue bisannuelle, ou rétro-calcul à partir de la taille du bassin versant sur la base d'une station de jaugeage proche). Certains contextes hydrogéologiques et pédologiques sont difficilement extrapolables (secteurs karstiques particulièrement).

- à partir de l'observation d'un tronçon amont ou aval en bon état, du tronçon du cours d'eau à restaurer au niveau de banquettes matures de réajustement ou défaut, d'un cours d'eau voisin en bon état.

Sous nos latitudes, en plaine, les cours d'eau, en dehors de tout impact anthropique, sont généralement bordés d'une ripisylve fournie.

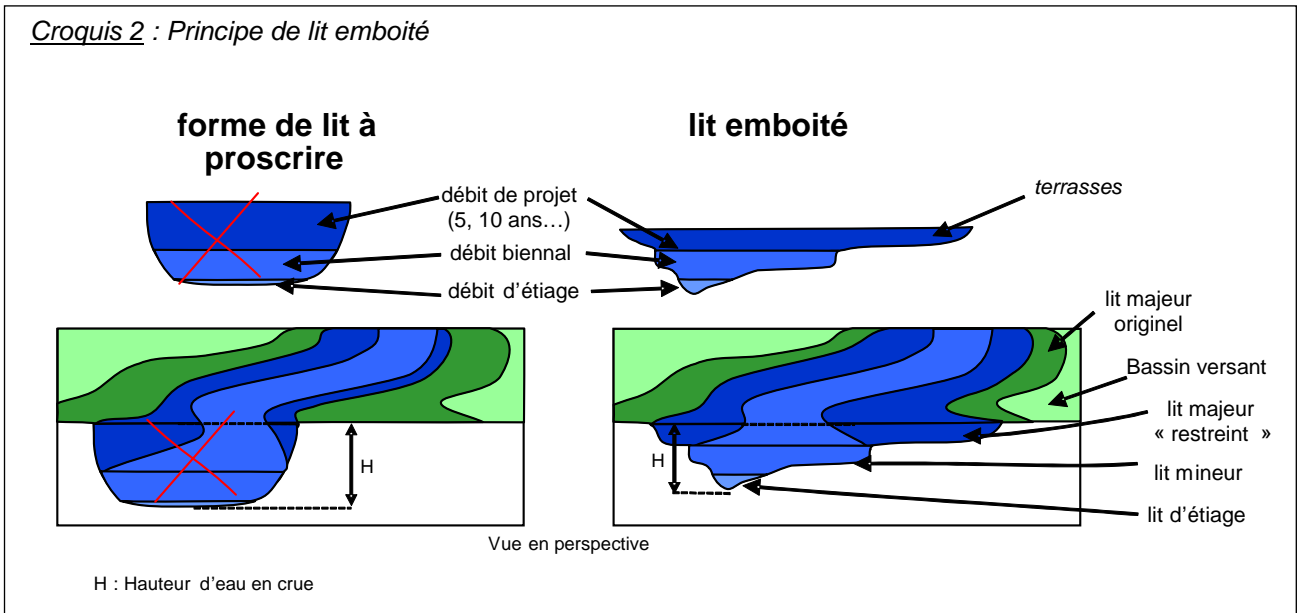
Une majorité des petits cours d'eau de région de plaine a des transits sédimentaires peu développés : berges assez cohésives, petit bassin versant, couverture végétale assez importante en lit majeur... En conséquence, le rapport largeur de lit / hauteur de berge est faible (le cours d'eau est étroit et profond).

ATTENTION, cela ne signifie pas que le cours d'eau soit incisé (auquel cas le débit de plein bord serait supérieur à celui d'une crue de retour 2ans).

Si aucun enjeu lié à l'inondation des terres riveraines (risques liés aux biens et aux personnes) n'est identifié, **le gabarit à retenir pour recréer un lit mineur de cours d'eau est donc la section correspondant à la crue moyenne journalière de retour bisannuel** (récurrence de 1.2 an pour les zones de source et marais, 1.7 an pour les cours d'eau sur substrat imperméable –schiste, granite...- et 2 ans pour les cours d'eau sur substrat perméable –calcaire)

Il faut absolument éviter un surdimensionnement du lit (qui entrainerait une sédimentation), il est même généralement recommandé un léger **sous-dimensionnement**, le travail du cours d'eau ajustant par la suite le gabarit à son régime de crue.

Si des risques liés aux inondations sont avérés ou si le terrain naturel est ponctuellement trop haut, le lit doit alors être emboîté (croquis 2) c'est-à-dire que le lit mineur (au gabarit de crue biennale) est emboîté dans un lit majeur « reconstitué » ou « restreint » (au gabarit de crues supérieures à la crue biennale).



Les problèmes liés au surdimensionnement doivent faire l'objet :

↳ de mesures correctives car la hauteur d'eau en crue étant plus élevée, les forces d'arrachement sont plus importantes. Ainsi,

**La taille de la granulométrie de fond** doit être augmentée, les berges retalutées en terrasses, la végétation replantée.

**Les nouvelles berges** seront terrassées verticalement (voir croquis 3) autant que faire se peut (selon la nature des sols et les engins de terrassement utilisés)

**Les talus** (pour les lits emboîtés), pourront être terrassés verticalement ou en pente douce selon les contraintes d'occupation des sols, les enjeux floristiques et faunistiques, et les modalités d'entretien envisagées (les talus en pente douce se prêtent plus facilement à un entretien mécanisé mais représentent une certaine emprise foncière).

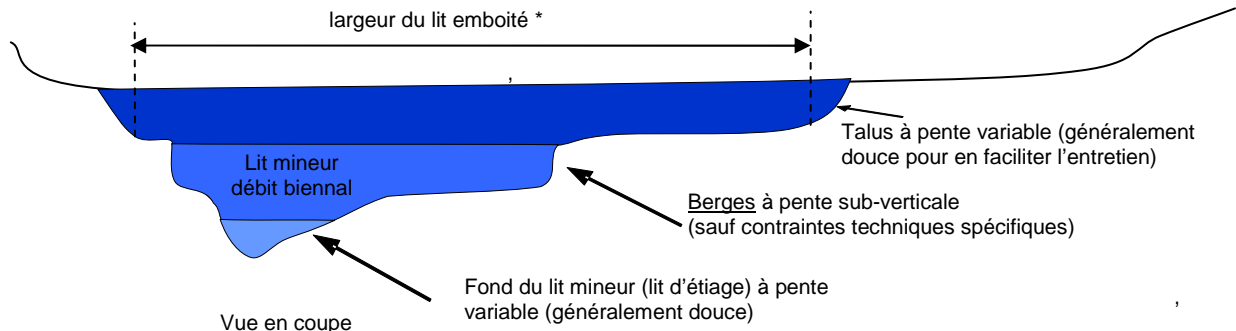
**Le fond du lit mouillé** (inondé la majeure partie de l'année) doit le plus généralement être terrassé en pente douce, le pendage latéral favorisant l'implantation d'un **lit d'étiage**.

Le terrassement du lit mineur doit faire l'objet d'un terrassement assez précis (si le cours d'eau est peu puissant), avec un pendage longitudinal permettant de recréer des faciès d'écoulement (succession de radiers et de fosses) favorables à la dispersion d'énergie et aux habitats pour la faune.

Si des terrasses sont créées, les pentes de berges et talus adaptés au contexte local et la terre arable repositionnée avant semis et plantation, il est rarement nécessaire de faire appel à des techniques très sophistiquées de protection en génie civil ou végétal). Un profil de lit emboîté permet de répartir les charges hydrauliques en dehors du mineur (de débit biennial), et limite les apports de fines dans le lit d'étiage.

Croquis 3 : principe de terrassement d'un lit emboîté

**lit emboîté**



\* lit majeur restreint

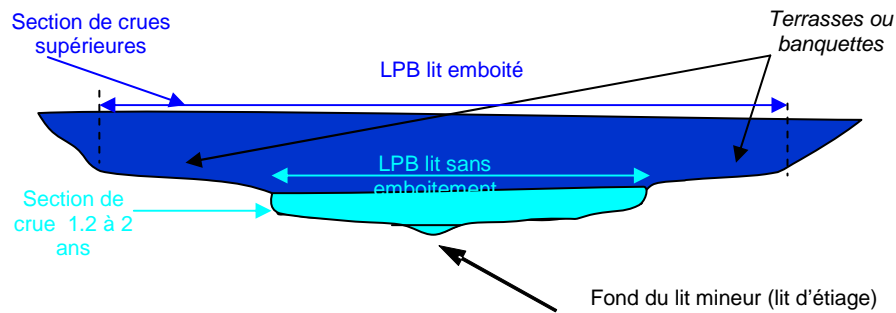
↳ de mesures compensatoires car un surdimensionnement du lit peut altérer le régime des crues et des étiages, la recharge des nappes phréatiques, les capacités autoépurations du lit mineur mais également des bandes enherbées et des zones humides. Cela peut entraîner également une perte de connectivité latérale associée parfois à une discontinuité vers des zones de reproduction ou de grossissement pour certaines espèces.

Les mesures compensatoires peuvent consister à créer à l'amont ou à l'aval une zone d'expansion de crue, à travailler sur le ralentissement dynamique par augmentation de la rugosité, l'allongement du lit, la restauration de méandres etc.).

**b/ gabarit de la section "de crue annuelle à biennale"**

- pour les zones de radiers (Croquis 4)
  - o à localiser au niveau des points d'inflexion des sinuosités
  - o retenir des largeurs pleins bords moyennes relevées sur le secteur de référence pour sous-dimensionner et ainsi anticiper les ajustements que le cours ne manquera pas de faire sur son nouveau lit.
  - o réaliser des berges verticales
  - o réaliser un fond de lit incliné afin d'assurer un pincement de lit plus marqué en zone centrale. Ce type de terrassement favorise des vitesses d'écoulement plus rapides en fond de lit, et une augmentation de la hauteur d'eau moyenne. Cela permet d'améliorer l'auto-curage du fond du lit et le maintien de substrats grossiers sans colmatage, garantissant un meilleur accueil de la faune aquatique et de meilleures fonctions auto-épurations du cours d'eau (plus de surfaces d'échange eau-sédiments, et plus d'écoulements hyporhéïques).

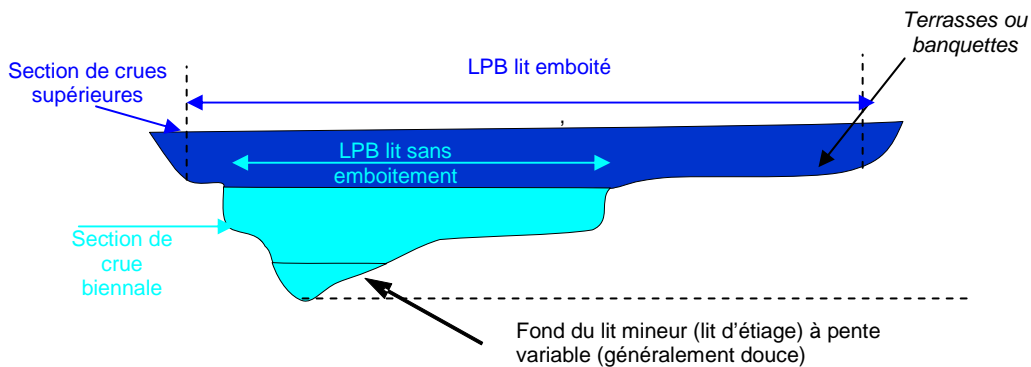
Croquis 4 : Gabarit de lit proposé sur les radiers (vue en coupe sans emboitement en bleu clair : avec emboitement en bleu foncé))



- pour les zones de fosses (croquis 5) :

- o à localiser dans les courbures de méandres
- o retenir les hauteurs et largeurs pleins bords minimales relevées sur le secteur de référence pour sous-dimensionner et ainsi anticiper les ajustements que le cours ne manquera pas de faire sur son nouveau lit.
- o Les berges toujours sub-verticales, en zone de concavité comme en zone de convexité
- o réaliser un fond du lit mineur incliné en pente douce de la berge convexe vers la berge concave afin d'assurer un pincement du lit à l'étiage (dans la mesure des possibilités selon le matériel employé).

Croquis 5 : Gabarit proposé sur les fosses de concavité (vue en coupe lit sans emboitement en bleu clair / avec emboitement en bleu foncé))



Des faciès de transition (plats lents ou lotiques selon configuration locale), devront ensuite venir s'intercaler avec des dimensions intermédiaires.

**b/ gabarit du lit dit "de crue supérieure à la biennale"**

La largeur du lit emboité en pied de talus (lit majeur restreint voir croquis 3) doit être au moins égale à **4 fois la largeur des radiers** pour permettre une détente hydrocinétique suffisante en crue.

Les deux sections de crue se succèdent via des terrasses subhorizontales de chaque rive d'une largeur variant en alternance au gré de la sinuosité (croquis 6, photo 1).

Croquis 6 : **Exemple** de largeurs minimales et maximales des banquettes pour une Largeur Plein sur radier du gabarit de crue de récurrence biennale de 0.8m (vue en plan)

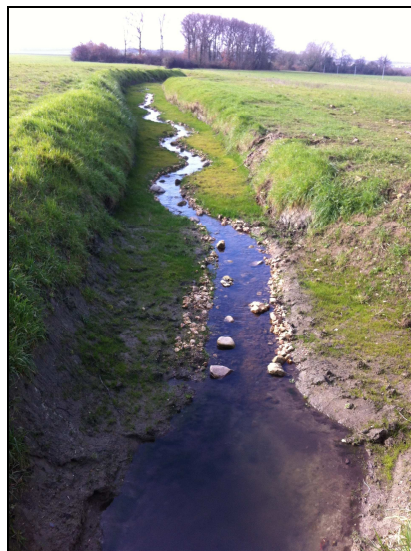
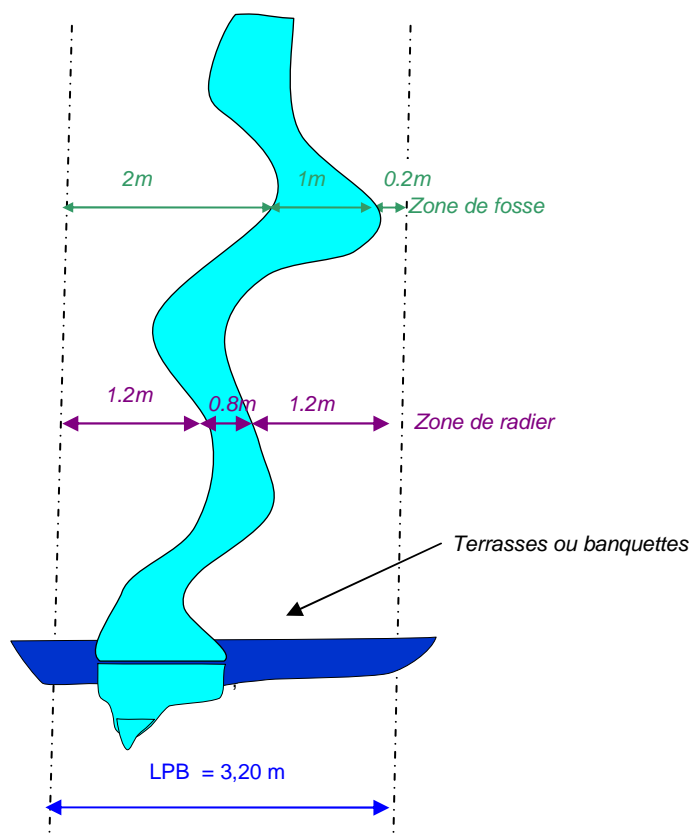


Photo 1 : Lits emboîtés pour la restauration du cours d'eau le Bourdigal, 86 (L.Boutet-Berry, 2016)

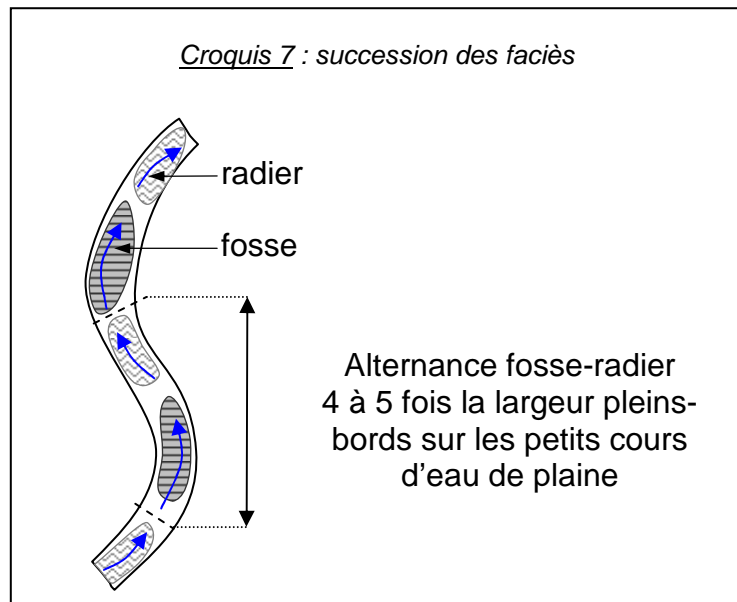
## 2. Alternance des faciès d'écoulements et sinuosités

### 2.1 - Généralités

Les faciès d'écoulement (fosses-radiers pour les cours d'eau de plaine) se succèdent à un rythme plus ou moins régulier, mais selon une moyenne assez constante correspondant à tous les 4 à 5 fois la largeur plein bord de crue de récurrence biannuelle (croquis 1 et 6).

Les fosses se créant principalement dans la partie concave des méandres, les radiers sur les points d'inflexion. Il est donc logique de retrouver une fosse de concavité puis un radier tous les 4 à 5 fois la largeur plein bord de gabarit de récurrence biennale.

Par ailleurs, sur les petits cours d'eau de plaine, les radiers représentent 30 à 40 % du linéaire d'un cours d'eau, et dans tous les cas au moins 10% du linéaire.

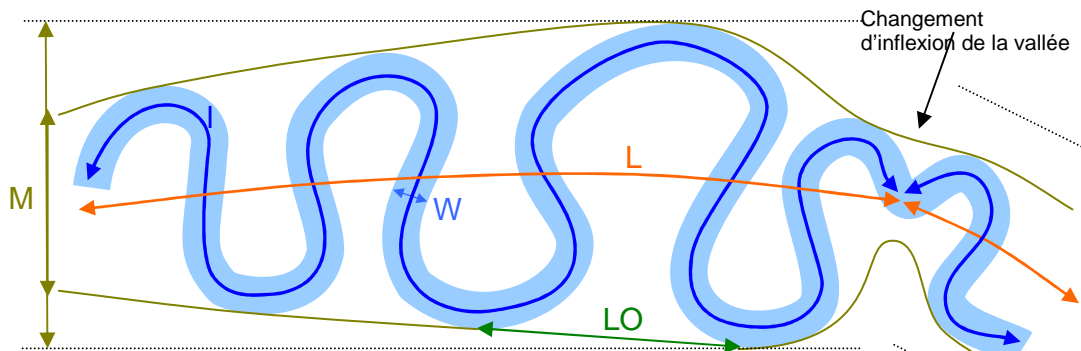


La succession des sinuosités offre une palette large de répartition des granulats de surface, des vitesses de courant, des hauteurs d'eau, des pentes du fond du lit et des berges. Tous ces éléments offrent des supports d'habitats variés que l'on ne retrouve pas dans les portions rectilignes.

La sinuosité est une variable d'ajustement principale de la pente en fonction des apports solides et liquides (les variables secondaires étant la nature des berges et la présence de végétation essentiellement arbustive). Les cours d'eau ayant fait l'objet de coupures artificielles de méandres, tendent, par les phénomènes de dépôts-érosions, à reconstituer des sinuosités autour d'une moyenne correspondant à leurs conditions physiques et hydrologiques naturelles.

Pour permettre une bonne reconstitution des habitats et la durabilité des aménagements, les travaux doivent donc permettre de conserver (quand ils existent) ou de restaurer ces sinuosités.

Croquis 8 : morphométrie des rivières à méandres



Légende

W: Largeur pleins bords

M: Enveloppe de méandrage (de 5 à 20W, moyenne 10 à 12W)

I : Longueur développée du cours d'eau

L: Longueur du cours d'eau en suivant l'axe de M

Si = I/L : Coefficient de sinuosité (ici= 2.5)

LO : Longueur d'onde des méandres : moyenne de 8 à 15W (ici méandres écrasés, valeur faible de 8W)

Parmi les caractéristiques physiques des sinuosités naturelles (croquis 8), doivent être également conservées ou reproduites, dans la mesure du possible :

- les longueurs d'ondes de méandres (plus le cours d'eau est dynamique et plus celles-ci sont élevées),
- l'amplitude des méandres, qui peut se traduire également par la définition d'une enveloppe de méandrage correspondant à un espace de liberté, restreint ou non, pour la divagation latérale du cours d'eau.

## 2.2 – Caractéristiques des radiers en fonction du coefficient de sinuosité

Au regard :

- de la largeur plein bord de crue de récurrence 1.2 à 2 ans retenue (L<sub>pb 2ans</sub>)
- de la longueur de tracé sinueux (longueur du tracé rectiligne X coefficient de sinuosité projet)
- du dénivelé entre le point aval et le point amont

Les radiers doivent avoir les caractéristiques suivantes :

Nombre de radiers = longueur du linéaire reméandré / (5 X L<sub>pb 2ans</sub>)

Longueur des radiers = (de 10 à 20% X longueur du linéaire reméandré) / nombre de radiers

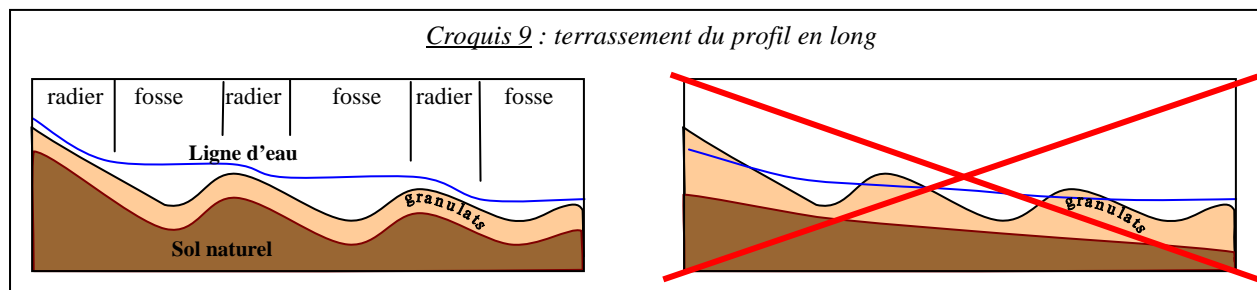
Dénivelé par radier entre la tête et le pied de radier = cote aval - cote amont / nombre de radiers.



### 3- Préconisation pour le terrassement du lit

#### 3.1 - Profil en long

Le terrassement d'un nouveau lit doit anticiper une recharge moyenne de 15 à 30 cm de matériaux.



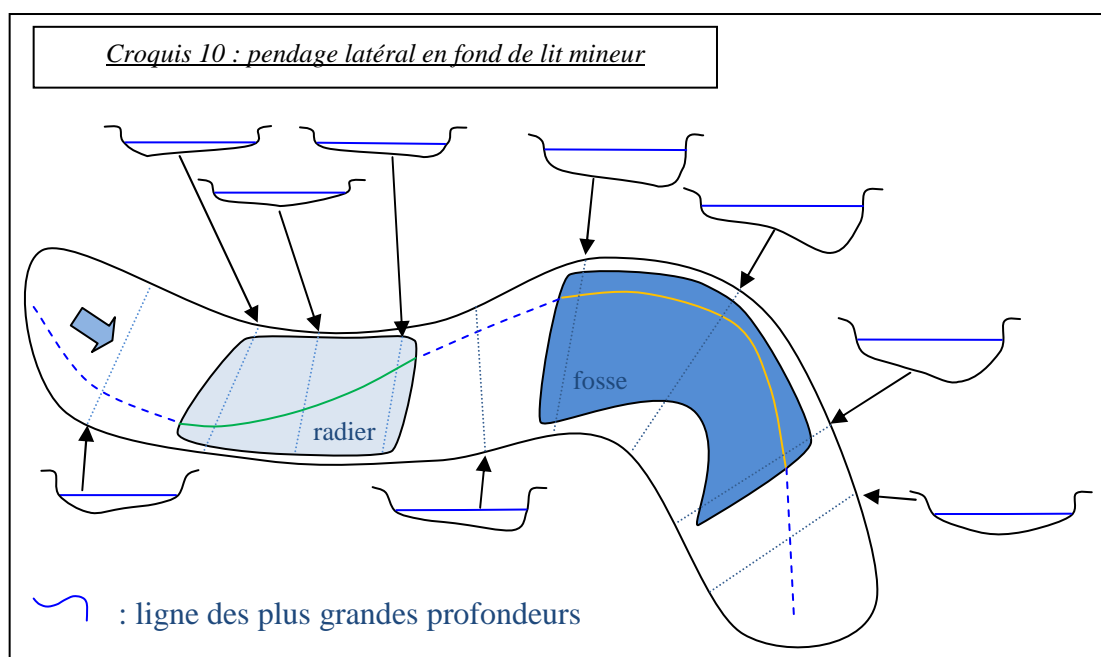
Sur les cours d'eau à débits d'étiages très faibles, le tracé du profil en long (différences d'altitude entre radiers et profonds) ne doit pas être modelé uniquement par l'apport de matériaux exogènes (croquis 9 droite), mais doit absolument être élaboré au moment du terrassement (croquis 9 gauche).

#### 3.2 - Profils en travers

Les formes du lit sont adaptées aux tracés en long et en plan du cours d'eau et aux régimes de débit.

Il est donc nécessaire de réaliser un terrassement du lit du cours d'eau adapté au tracé en plan (croquis 10).

Le terrassement peut être assez approximatif si le cours d'eau a des possibilités d'ajustement élevées lors des crues morphogènes (forte énergie, sédiments du fond et des berges mobilisables...). Pour les cours d'eau à faible énergie (faible pente, faible débit, BV réduit...), le terrassement doit être soigné.



Il est important de prévoir :

- un pendage latéral du fond du lit mineur :
  - o sur les mouilles : vers l'extrados des virages (points les plus profonds figurés en orange sur le croquis 10),
  - o sur les radiers : en décalant l'axe des points les plus profonds d'une rive à l'autre de l'amont vers l'aval (figuré en vert),
  - o sur les faciès intermédiaires (figuré en pointillé bleu) : en assurant une transition entre fosses et radiers,
- sur tous les profils en travers : des berges sub-verticales,
- d'indiquer le gabarit à plein bord projeté sur les radiers et les fosses.

**Pour pouvoir réaliser les profils en travers précis demandés, il est nécessaire de prévoir un godet tilt / attelage tilt permettant d'orienter dans tous les sens des godets de tailles diverses.**

## **4- Les substrats, la granulométrie**

### **4.1 – Généralités**

La restauration du matelas alluvial et de la couche d'armure est nécessaire pour protéger le fond du lit, reconstituer les écoulements hyporhéiques et les habitats pour la faune (*La recharge en granulats premiers retours d'expériences sur les travaux menés dans le Centre-Ouest de la France sur des petits cours d'eau, Bramard et al, ONEMA 2010*).

Il est nécessaire :

- d'adapter l'étendue granulométrique à la configuration naturelle du site
- de préciser les tailles dominantes (D50 et D90) et la concentration en fines,
- de trouver des sources d'approvisionnement en matériaux adaptées (nature géologique, sensibilité à l'érosion mécanique et au gel, matériaux alluvionnaires, matériaux de carrière, matériaux de criblage des terres riveraines etc.).

### **4.2 – Les différentes sources d'approvisionnement**

Deux possibilités sont offertes :

#### **a/ Récupérer de la pierre locale**

Un criblage sur place des terres remaniées par les travaux est possible mais est assez lourd à mettre en place.

Il est possible également de récupérer de la pierre de champ issue du criblage de parcelles agricoles à l'aide d'épierreuses.

Généralement, ce type d'opération permet d'obtenir un granulats de bonne qualité, propre, avec une D50 correspondant bien au besoin (dominante cailloux grossiers et petites pierres, 32 à 128mm), mais généralement exempt de fractions les plus petites et les plus grossières nécessaires à la reconstitution d'un matelas alluvial.

Des compléments de petits volumes d'autre origine peuvent être apportés par :

- des grosses pierres et petits blocs (de 128 à 400mm) de carrière ou du matériau de récupération

- du gravier grossier et petits cailloux (8 à 32 mm). Ce dernier peut être constitué de matériau alluvionnaire ou de matériaux concassés primaires correspondant à la géologie locale (dans tous les cas, le concassé calcaire est à proscrire). Sur certaines carrières, le bon mélange peut être obtenu à part égale de 10-20mm (appellation commerciale mignonette) et 20-40 (gravier à béton).

Le gravier peut être soit mélangé aux pierres de champ, soit disposé en plages en tête de radier.

Compte tenu de la pente assez forte et des apports de matériaux attendus (également suite à la phase travaux), il n'est pas préconisé d'ajout de fraction plus fine malgré la faiblesse des débits d'étiage.

Après une recharge en pierres de champ sur au moins 15 cm d'épaisseur, les pierres grossières et les blocs correspondant à la fraction héritée relevé sur le site sont disposés à la main pour améliorer la rugosité, la tenue des substrats et reconstituer habitats pour les invertébrés et d'éventuels poissons. Elles sont posées en alternant des dispositions en amas, ou dispersées, dans le but de concentrer ou de répartir les vitesses d'écoulement (dans un objectif de favoriser un maximum de diversité).

Il est proposé une proportion approximative de 20% de gravier-petits cailloux, 60% de pierres de champ, 20% de petits blocs.

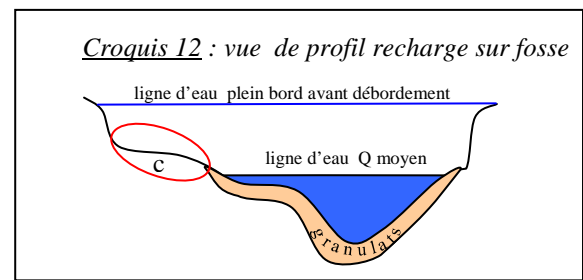
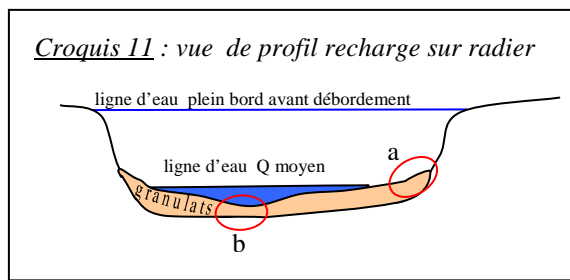
#### **b/ Recharger en matériau alluvionnaire**

Les proportions approximatives de 20% de graviers, 60% de cailloux et pierres, 20% de petits blocs doivent être également recherchées, l'épaisseur de matériau de recharge doit également être supérieure à 20 cm.

La fourniture en cailloux et pierres locales n'étant pas toujours aisée, l'emploi de matériau alluvionnaire constitue la meilleure alternative. Des carrières en bord de Loire proposent un brut d'extraction (0-150) uniquement débarrassé du sable (2-150). Si celui-ci est débarrassé de graviers fins (mignonette 20-150), il est important de prévoir un ajout de cette fraction à hauteur de 10% compte tenu de la taille du cours d'eau et des faibles débits.

Les volumes nécessaires peuvent être calculés à partir d'une moyenne de 20 cm de granulats.

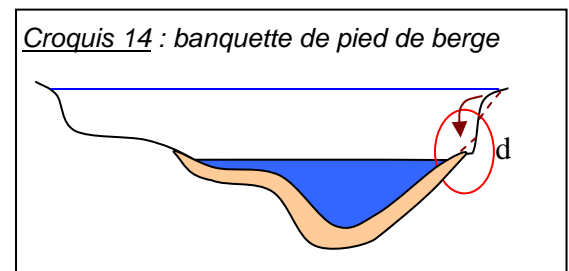
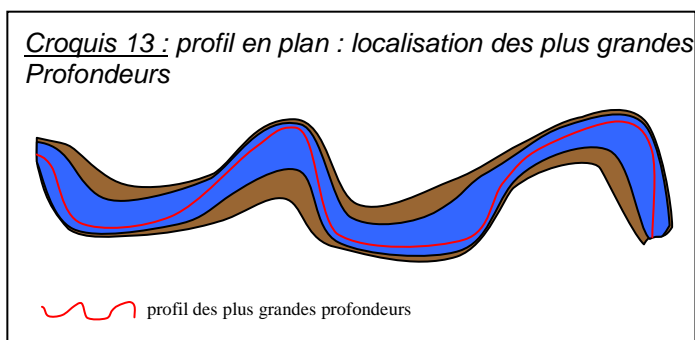
La mise en place des matériaux pour la reconstitution du matelas alluvial doit être réalisée de façon à favoriser une hétérogénéité latérale des sections mouillées en lit mineur et moyen (lit mouillé et pente des berges). Elle doit permettre de bien marquer la succession des faciès d'écoulement (une alternance fosse-radier en moyenne tous les 5 fois la largeur plein bord), en favorisant un maximum de diversité.



Sur les radiers et plats en secteur rectiligne, la reconstitution du matelas alluvial occupe quasiment toute la largeur du lit (croquis 12). Elle remonte légèrement en berge (a) afin de permettre des ajustements inévitables de la section du lit mineur lors des premières crues.

Au niveau des fosses (croquis 12), elle est limitée à la section correspondant au débit moyen (module), elle n'est pas nécessaire sur les banquettes en berge convexe (c).

De même que pour le terrassement (voir chapitre 3), il est préconisé de positionner les granulats de manière à accentuer le pincement du lit (croquis 11, b), afin de concentrer les écoulements d'étiage et favoriser un auto-curage. Ce profil en « V », ne doit pas être centré systématiquement, mais doit être ajusté à la sinuosité du cours d'eau (croquis 13).



L'érosion des berges et le colmatage des granulats déposés peuvent être significatifs la première année avant reprise de la végétation rivulaire. Une petite banquette en pied de berge sub-verticale est préconisée dans la partie concave des méandres, afin de prévenir ce phénomène (croquis 14 : d).

## 5- La restauration des berges

Si la section à pleins bords avant débordement est bien calibrée (crue de retour 1.2 à 2 ans), voire légèrement sous dimensionnée, les contraintes en berges sont faibles. La stabilisation des berges par quelque moyen que ce soit (génie civil ou végétal) n'est pas nécessaire.

La reprise d'une végétation de bordure spontanée et adaptée (végétation amphibie, hélrophytes, aulne, saule etc.) sera favorisée par l'hydratation régulière des berges et les variations saisonnières naturelles des niveaux d'eau.

Pour assurer une bonne reprise, cela peut nécessiter toutefois localement (sur sols pauvres en limons type marne, arène granitique ;..) un décapage préalable de la terre végétale et un repositionnement en berge après travaux de terrassement.

Un semis herbacé simple (Fétuques - Ray-grass) permettra une couverture rapide des berges pour limiter les risques d'érosion et de transfert de fines. D'autres essences naturelles herbacées ou arbustives viendront très vite enrichir le milieu.

La plantation d'arbres d'essences locales adaptées aux rives de cours d'eau est préconisée pour la stabilisation des berges les plus hautes. Elle doit être localisée en pied de berge pour assurer un ombrage rapide du cours d'eau.

Compte tenu du développement de maladies touchant le frêne (chalarose) et l'aulne glutineux (phytophthora), les plans doivent provenir de pépinières indemnes ou de provenance locale (prélèvement de jeunes plans sur des secteurs de recrus naturels surabondants).

Le risque de chalarose apparaissant comme très important et le plus impactant, les aulnes sont à privilégier. Quelques saules peuvent être également implantés pour assurer un couvert minimal, mais ils ne doivent pas être utilisés en masse compte tenu de leur caractère assez envahissant (surtout en petit cours d'eau) et les contraintes plus fortes d'entretien qu'ils entraînent.

## **CONCLUSION**

Les éléments techniques décrits dans cette note permettent d'élaborer la trame pour définir des travaux de restauration hydromorphologique linéaire de cours d'eau. Des éléments complémentaires concernant la mise en œuvre de ces travaux devront être définis en tant que de besoin (date de réalisation, précautions pendant la phase travaux pour respecter le milieu et la qualité d'eau, remise en état des accès, suivis éventuels...).