

Michel BRAMARD
ONEMA

Formation restauration hydromorphologique
Travaux à l'intérieur du lit mineur : banquettes et recharges en granulats




Tournage et montage CATER de Normandie

Réseau Technique Milieux Aquatiques de Normandie
Sérigny (61) - Formation RHM du 28 juin 2016

- Reconstitution du diaporama de l'intervention filmée.
- Attention certaines diapositives sont constitués d'éléments superposés, référez vous aux diaporamas sources pour voir l'intégralité du contenu.

- Source_1_NotionsHydromorphologie_M-BRAMARD_ONEMA




Stage restauration AMBOISE juin 2015
Restauration de petits cours d'eau : les fondamentaux

M Bramard

→ Faut-il restaurer?
Pour quoi?
Pour qui?
Pour où?
Pour quand?
Comment ?
A quel coût?

Les travaux et aménagements

Qu'est-ce qui fonctionne?
Qu'est-ce qui ne fonctionne pas?
Qu'est-ce qui est susceptible de fonctionner?

 ONEMA
Office national de l'eau
et des pêches aquatiques
et
de la pêche maritime

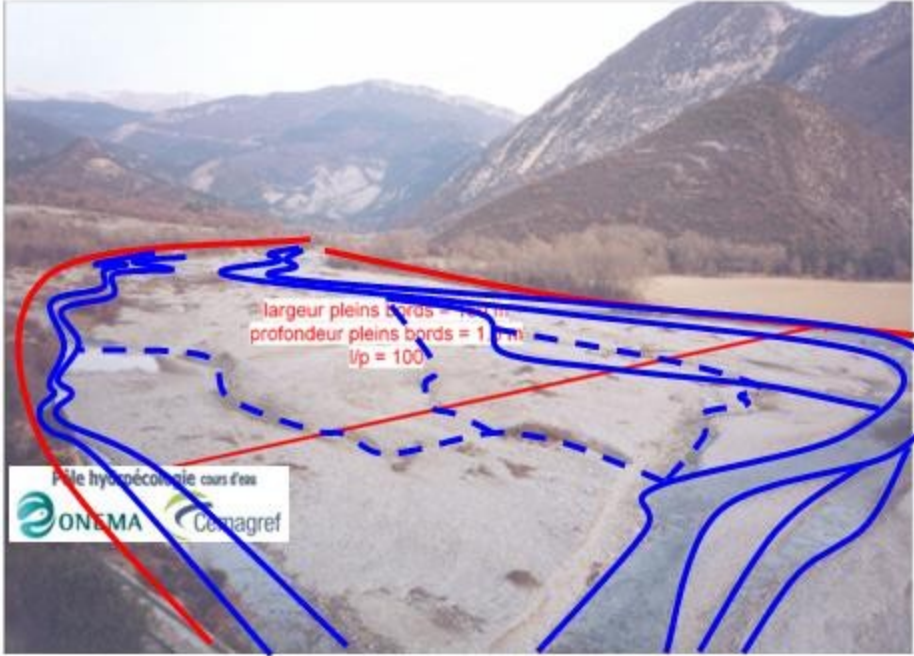


sinuosité sur cours d'eau à forte pente



Il n'existe que très peu de rivières ayant naturellement des lits rectilignes : lits de cours d'eau s'écoulant directement sur la roche mère (bed-rock) d'origine glaciaire ou issus d'accidents géologiques

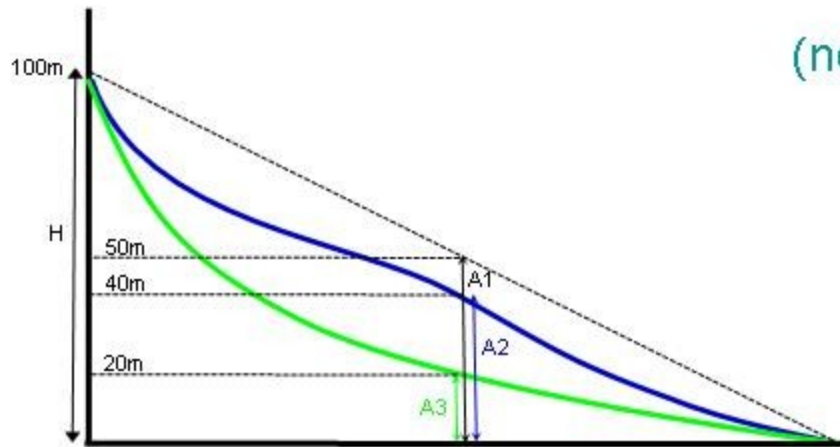
Le tracé en plan



Les lits en tresse (cours d'eau de piedmont à forte charge sédimentaire) ont un lit mineur relativement rectiligne, mais présentent à l'étiage des bras multiples sinueux

(le nombre de bras intervient comme variable de réponse aux évolutions des flux liquides et solides)

Les profils de pente (notion de pente d'équilibre)



« profil en long »

Indice de concavité (Longbein W.B. 1964)

$$IC = 2AH$$

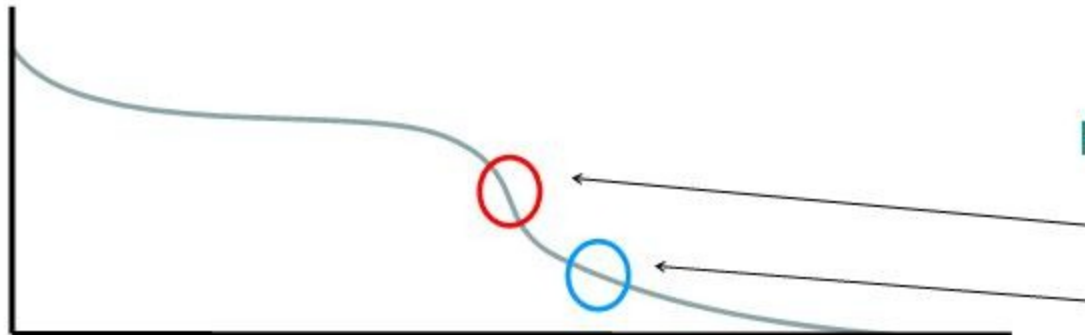
sur cet exemple : **IC1 = 1** ($2 \times 50/100$)

IC2 = 0,8 ($2 \times 40/100$)

IC3 = 0,4 ($2 \times 20/100$)

H : dénivelé total

A : dénivelé à mi-parcours

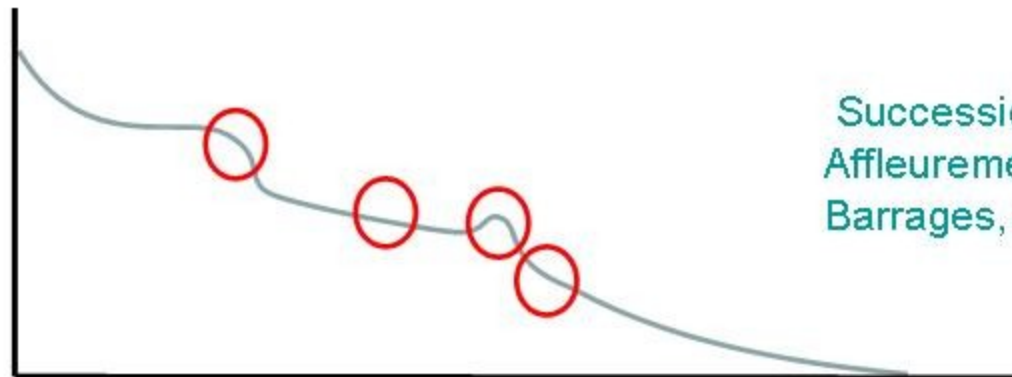


Profil CE de plateau

zone de travaux?

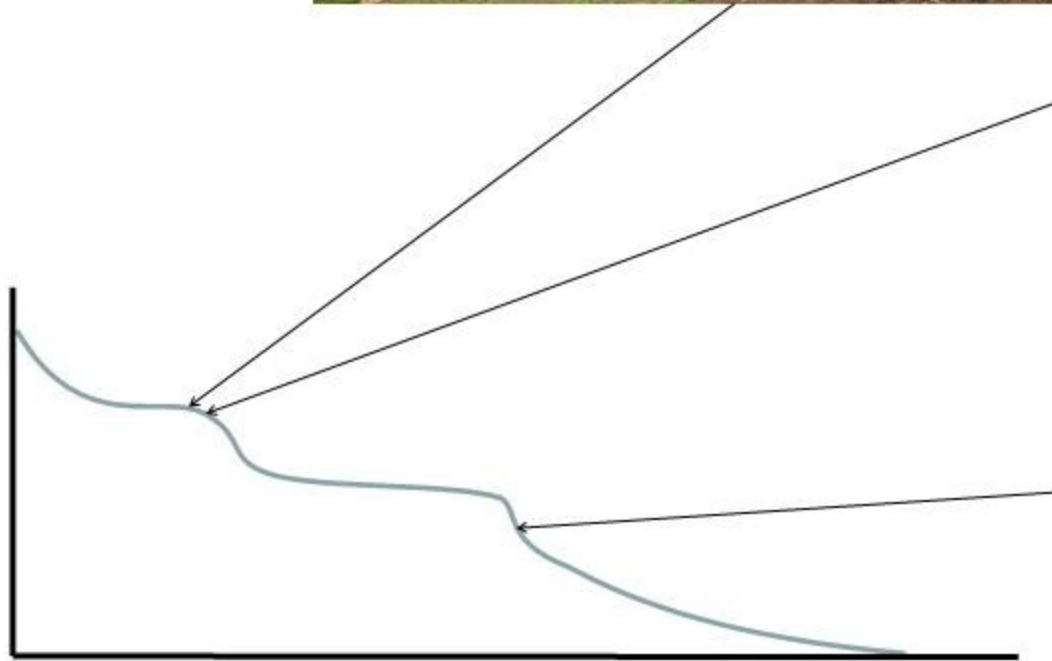
station de référence?

station témoin?



Successions de vallons encaissés et d'alvéoles
Affleurements de roches « dures », lacs...
Barrages, seuils,...

analyser un projet
gabarit / tracé en plan / granulométrie
+ dimensionnement OH et calage



- des zones de production
- des zones de transfert
- des zones de dépôt

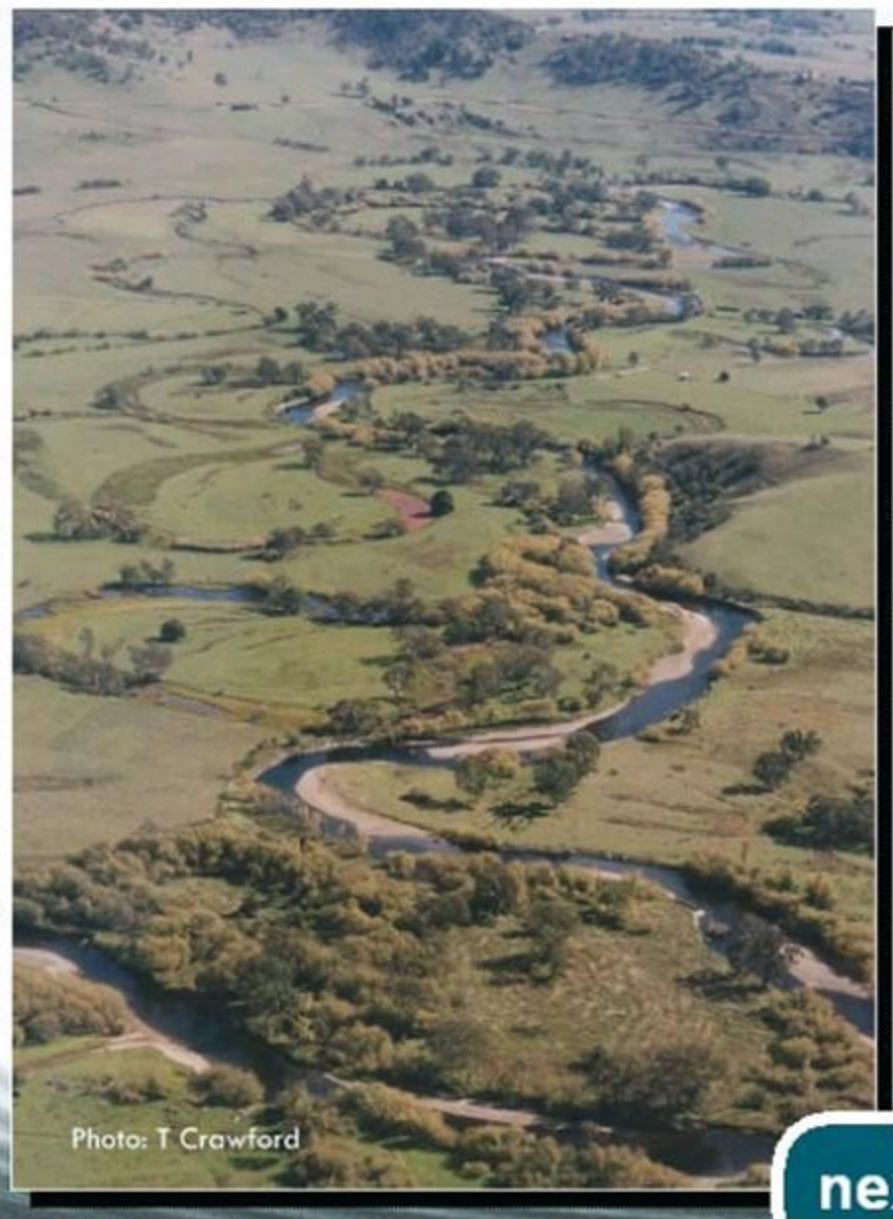


Photo: T Crawford

ne

largeur pleins bords = 150 m
 profondeur pleins bords = 1.5 m
 $l/p = 100$

Pôle hydroécologie cours d'eau



Etablir un diagnostic

Le rapport de forme



M
Bramard



Boivre avec ripisylve l/p : 9

M
Bramard

lit sur-élargi Boivre (86) l/p : 17

lit rectifié (ancien bief), suppression ripisylve et piétinement bovins

Les composantes physiques
des lits du cours d'eau
(lits mineur, moyen*, majeur)



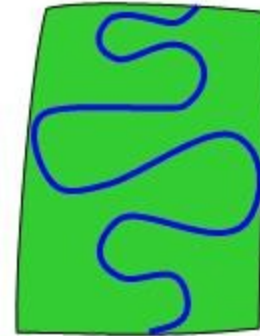
Le lit majeur
Enveloppe de méandrage, espace de mobilité,
espace de fonctionnalité

largeur de l'enveloppe de
méandrage en vallée

non contrainte : **12 à 24 x W**



vue en coupe



vue aérienne

contrainte sur un
coté du lit majeur



vue en coupe



vue aérienne

contrainte sur deux
cotés du lit majeur



vue en coupe



vue aérienne

failles géologiques, anciens méandres géologiques, vallées glaciaires en auge ...

La formation de canyons résulte de
processus géodynamiques très
particuliers (généralement
surrections) à ne pas confondre avec
des phénomènes d'incision localisés
dans l'espace ou dans le temps



Les composantes physiques
des lits du cours d'eau
(lits mineur, moyen*, majeur)

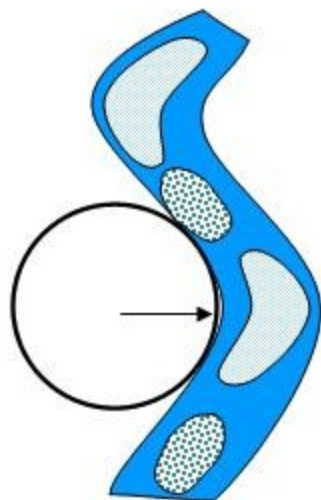
Le tracé en plan

Le tracé du lit mineur est **très variable** et dépend :

- de la forme de la vallée, des débits (S et L), de la géologie, des contraintes latérales, de la végétation, et des pressions humaines...

Mais le rythme et la longueur des méandres sont assez réguliers*.

Rayon de courbure variable



Longueur d'onde des
méandres :
6 à 15 W
moyenne 12 fois

* plus les sédiments sont fins et homogènes et plus les formes sont régulières

Le tracé en plan

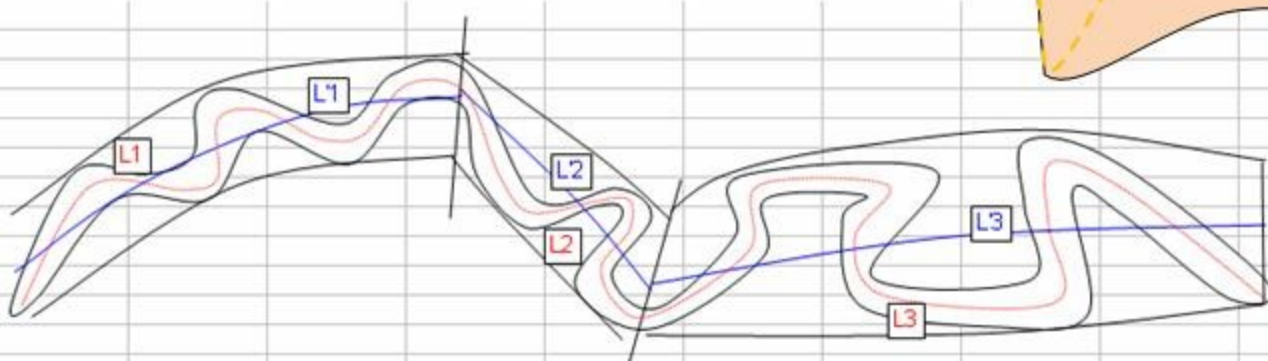
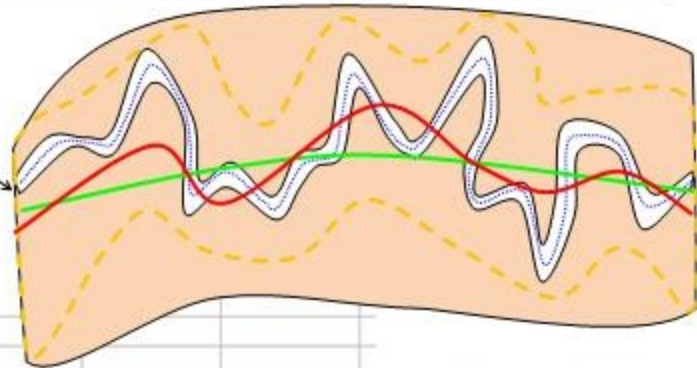


Attention :

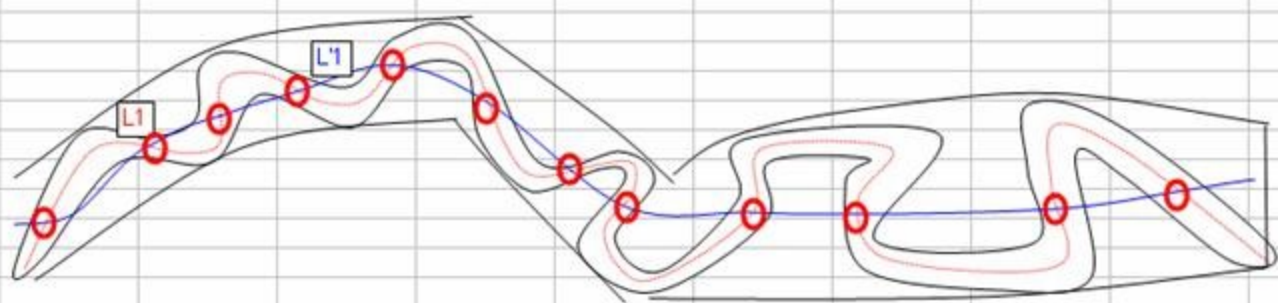
2 Méthodes sur cartographie ou terrain pour la détermination du coefficient de sinuosité

Le tracé en plan

Mesurer L dans l'axe de l'enveloppe de méandrage (en rouge) plutôt que dans l'axe de la vallée (en vert)



Coefficient de sinuosité méthode 1 : en suivant les changements d'inflexion de la vallée
 $= (L1 + L2 + L3) / (L'1 + L2 + L3) = \text{Longueur lit mineur} / \text{longueur de la vallée}$



Coefficient de sinuosité méthode 2 : en suivant les changements les points d'inflexion des méandres
 $= L1 / L'1 = \text{Longueur lit mineur} / \text{longueur de la vallée}$

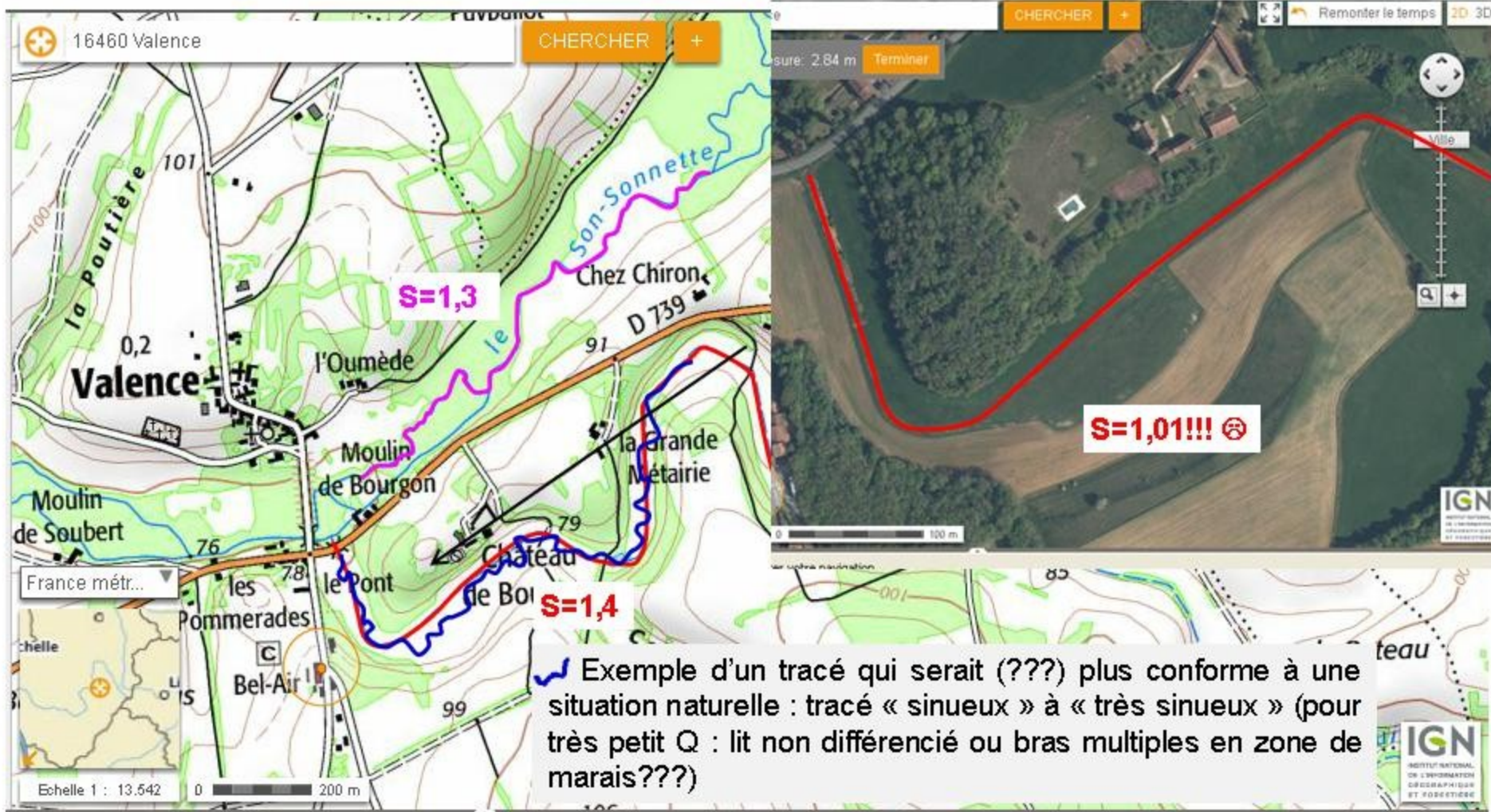
Attention :
à ne pas confondre méandres récents (actifs) et méandres anciens (encaissés, paléo-méandres). Il peut être intéressant de mesurer la sinuosité du lit mineur et celle du lit majeur.

Coef de sinuosité	Classe de sinuosité
$Si < 1,05$	Quasi rectiligne
$1,05 < Si < 1,25$	Sinueux
$1,25 < Si < 1,5$	Très sinueux
$Si > 1,5$	Méandrique

Attention :

Distinguer la sinuosité de la vallée (méandres encaissés, paléo-méandres), de la sinuosité du lit mineur actuel

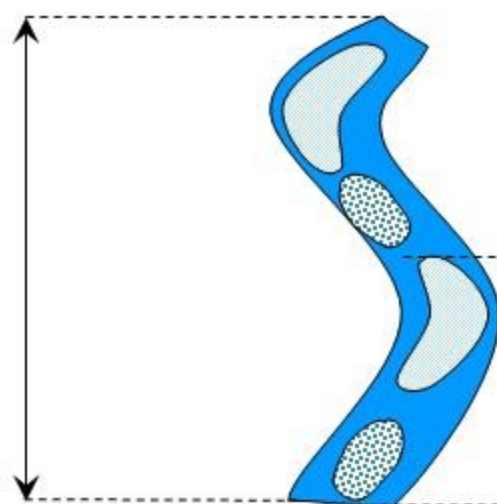
Sur cet exemple le coefficient de sinuosité du petit affluent (R des Bourgons) apparaît plus important que la petite rivière dans laquelle il se jette (la Sonsonnette LPB env 12m). En fait, l'amplitude des méandres ne semble pas conforme à son gabarit (LPB env 3 m). Il apparaît rectiligne (rectifié?), et ses « courbes » ne correspondent qu'à celles induites par la vallée dans laquelle il s'écoule...





Les constantes physiques

Longueur d'onde des
méandres :
6 à 15 W
moyenne 12 fois



vue aérienne

Alternance fosse – radier :
4 à 10 fois W
moyenne 6 fois

Très petits cours d'eau
forestiers : plutôt 5 W

Les « singularités »

Par définition, les singularités (affleurements rocheux, failles, éboulements, encombres...) n'obéissent pas à des règles de dimensionnement selon des constantes reproductibles. Selon les cours d'eau, elles peuvent avoir une incidence de très faible à forte sur les autres composantes morphologiques du cours d'eau



Les
seuils



Pour les cours d'eau s'écoulant sur alluvions (ne s'écoulant pas naturellement sur roche mère), les seuils constituent des « accidents », des entraves à l'écoulement, que le cours d'eau tentera d'éroder, casser ou contourner



Ancien nassis
contourné sur
la Loue 25



Il existe naturellement quelques exceptions, mais même les formations tufeuses naturelles, (les nassis des régions karstiques) finissent par subir l'érosion du cours d'eau...

Les « singularités »

Les encombres, embâcles

Sur les petits cours d'eau peu puissants, de nombreuses micro-sinuosités se forment et contribuent à une très forte hétérogénéité du milieu.

La végétation et les embâcles jouent un rôle structurant non négligeable, plus nettement marqué dans les secteurs forestiers.



secteur forestier



secteur prairial

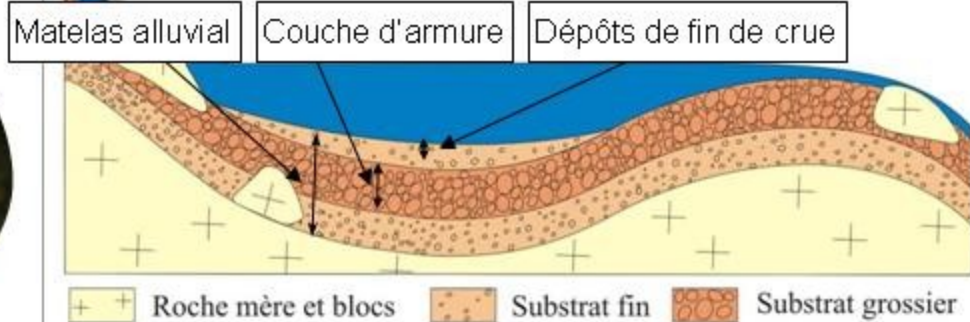
Les aléas de ce type (excès ou déficit d'entretien, chablis, barrages de castor...), peuvent avoir des effets variables en terme d'habitats, effets considérés comme plus ou moins positifs ou négatifs (vis-à-vis de certains types d'organismes vivants ou de certaines fonctionnalités). Ils peuvent parfois avoir un rôle important dans la genèse de certaines formes alluviales (annexes hydrauliques, lits anastomosés...).

Le matelas alluvial

ATTENTION : la couche d'armure protège de l'érosion de la roche mère jusqu'à une certaine limite : au-delà d'une certaine augmentation du gabarit (incision progressive, curage...), ou à l'occasion d'une crue exceptionnelle (en force ou en durée), la couche d'armure peut être mise en mouvement et laisser la roche mère à nu.



Le matelas alluvial

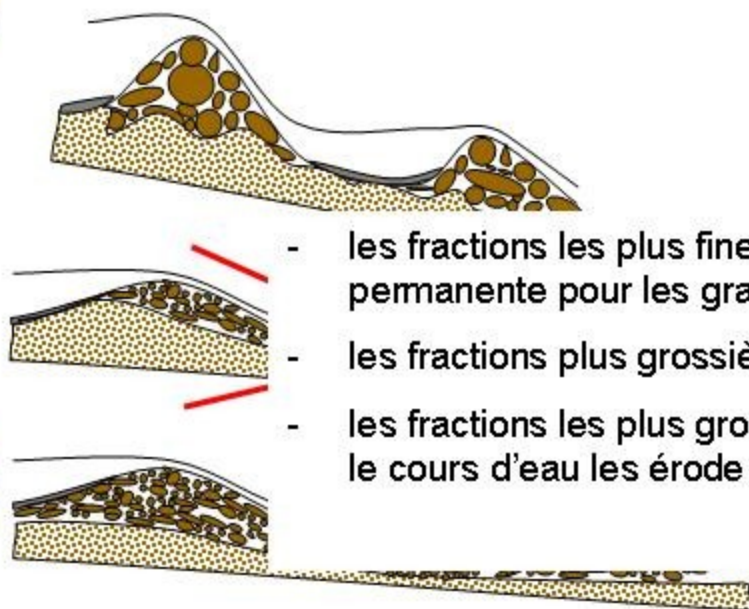


Le matelas alluvial est une composante très importante du lit mineur.

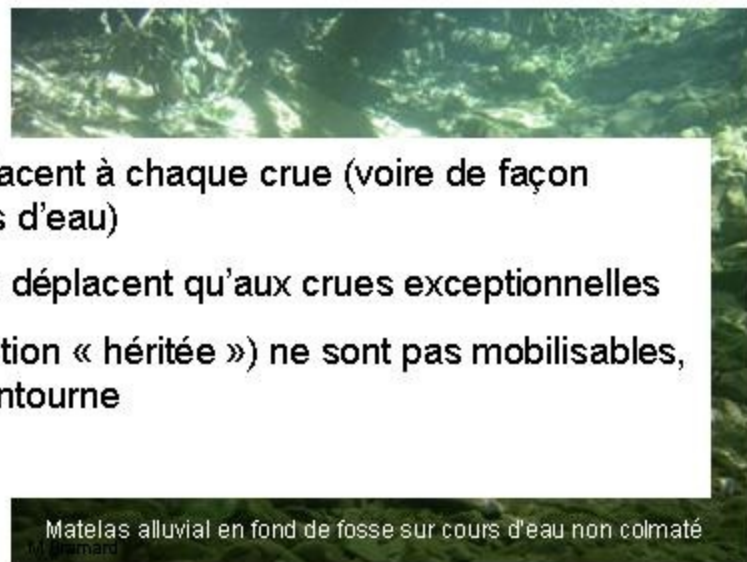
Fonctions mécaniques, bio-chimiques, biologiques...

- En plaine il recouvre l'ensemble du fond du lit mineur.

ATTENTION au diagnostic concernant le matelas alluvial et les problématiques d'incision (ainsi qu'aux illustrations utilisées)



- les fractions les plus fines se déplacent à chaque crue (voire de façon permanente pour les grands cours d'eau)
- les fractions plus grossières ne se déplacent qu'aux crues exceptionnelles
- les fractions les plus grosses (fraction « héritée ») ne sont pas mobilisables, le cours d'eau les érode ou les contourne



Evolution de la couche superficielle du substrat

Le « **pavage** » est un terme évoquant une disparition des sédiments les plus fins ne laissant qu'une couverture uniforme des fonds par des granulats très grossiers.

Il est généralement employé pour désigner des phénomènes **anthropiques**. Affectant le plus souvent l'aval de grands barrages bloquant le transit sédimentaire, il peut cependant être observé en petit cours d'eau sur des portions rectifiées à berges hautes (endiguement, incision...).

Pavage (petit cours d'eau en cours d'incision)



« **tuilage** »

Le matelas alluvial

ATTENTION : la couche d'armure protège de l'érosion de la roche mère jusqu'à une certaine limite : au-delà d'une certaine augmentation du gabarit (incision progressive, curage...), ou à l'occasion d'une crue exceptionnelle (en force ou en durée), la couche d'armure peut être mise en mouvement et laisser la roche mère à nu.



Matelas alluvial et couche d'armure



Fraction héritée? Matériaux n'ayant pas été mobilisés à la dernière crue (algues).



Etablir un diagnostic

Le matelas alluvial

Le substrat est-il naturel ? L'étendue granulométrique est-elle importante ? La fraction héritée est-elle encore présente ?

Le substrat est-il colmaté en raison :

- d'apports trop importants du bassin versant, du lit majeur ?
- d'érosions de berges ?
- d'un gabarit agrandi ?
- d'une modification du rapport de forme
- de la présence d'embâcles ou de seuils?
- ...

Le substrat original est conservé dans la zone forestière à l'abri des perturbations : dominante Pierres cailloux (30 à 150mm), accessoires Blocs



Etablir un diagnostic Le matelas alluvial

Le transit sédimentaire est-il :

-important ?

-suffisant ?

-le seuil est-il transparent ?

-...



OUI aval (79) seuil partiellement abaissé rempli de sédiments
(maintien d'une petite pelle)



Cailloux colmatés par

« Faux » cailloux
concrétion calcaire
sur bois, Le Gateau
(79)

Exemple de cours d'eau de plaine en état naturel et en équilibre morphodynamique

Berges basses, méandres bien développés, fraction héritée présente (pente proche de 5‰)



Autres exemples de référence granulo pour les « petits cours d'eau » de plaine
Les Garnaudières (affluent Boivre)





Cours d'eau sableux
type landais
ruisseau de l'Agrière
(17)
photo M Fleury

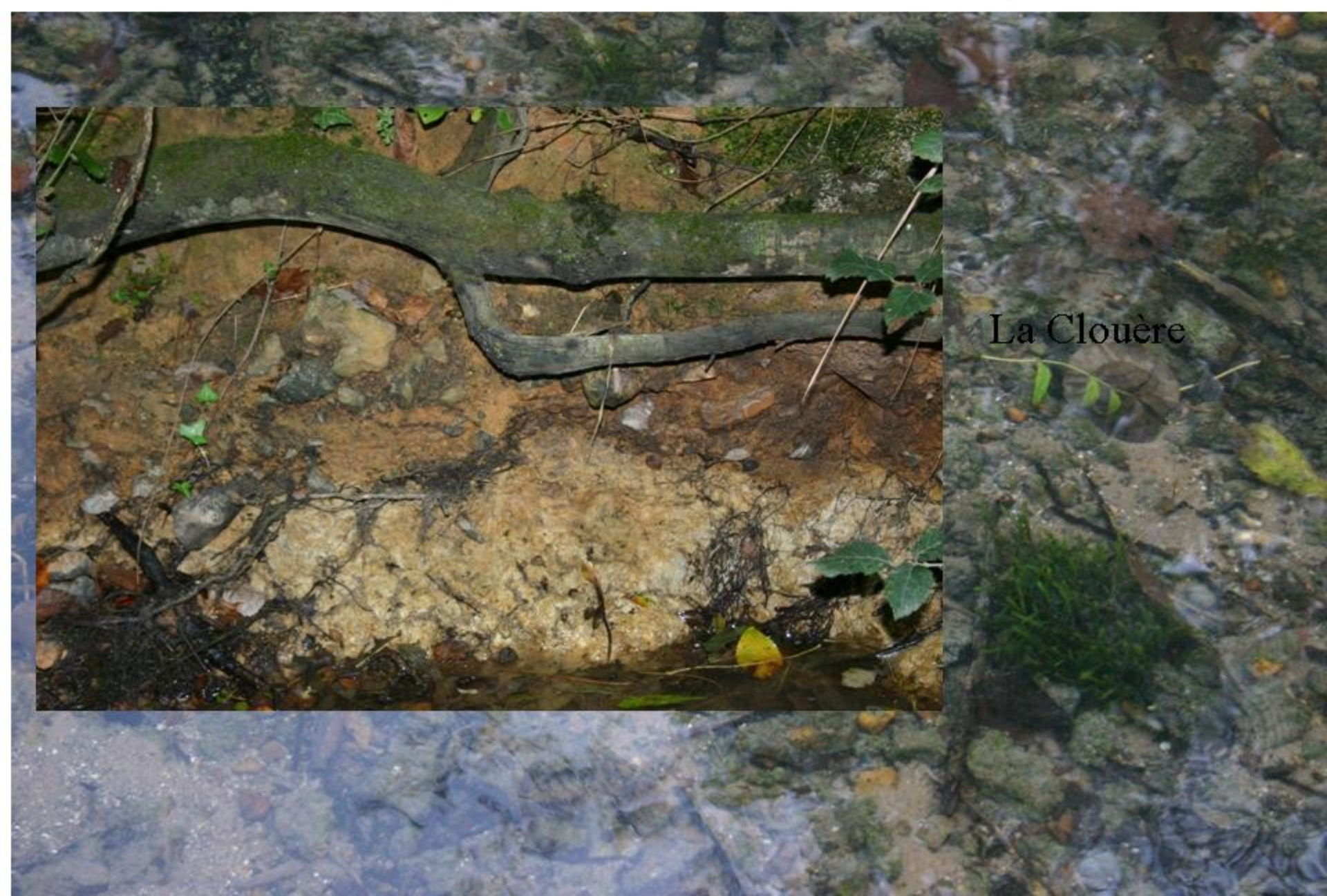
La Petite Blourde (86)



La Clouère (86)



La Clouère



La Puce, affluent de la Loue (ornans 25)
apports latéraux de sédiments



Apport latéral de
matériaux d'un fossé
La Brenne (37)



Ancienne couche d'armure Sèvre nantaise (79)



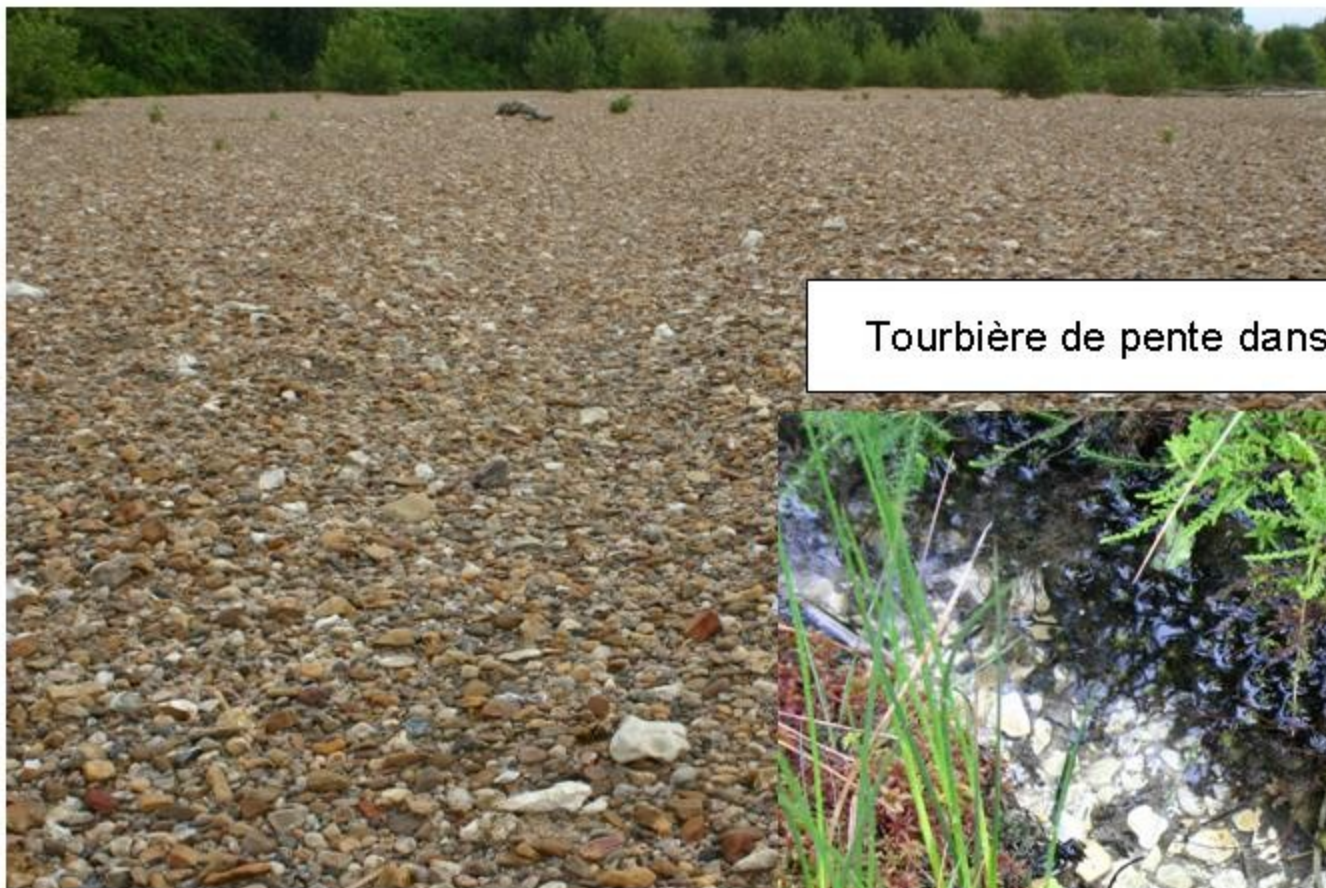
Répartition des granulats visibles sur la Vienne ou la Creuse
(largeur 40 à 60m)



La présence de *Margaritifera auricularia*, espèce pouvant vivre de 50 à 100 ans sans quasiment changer de place, indique que ce type de substrat est très stable. (rivières non exploitées pour les granulats en lit mineur)

15 cm

La Loire à Port Boulet (37). $I = 300\text{m}$?



Tourbière de pente dans le pays fort (18). $I = 0,40\text{m}$

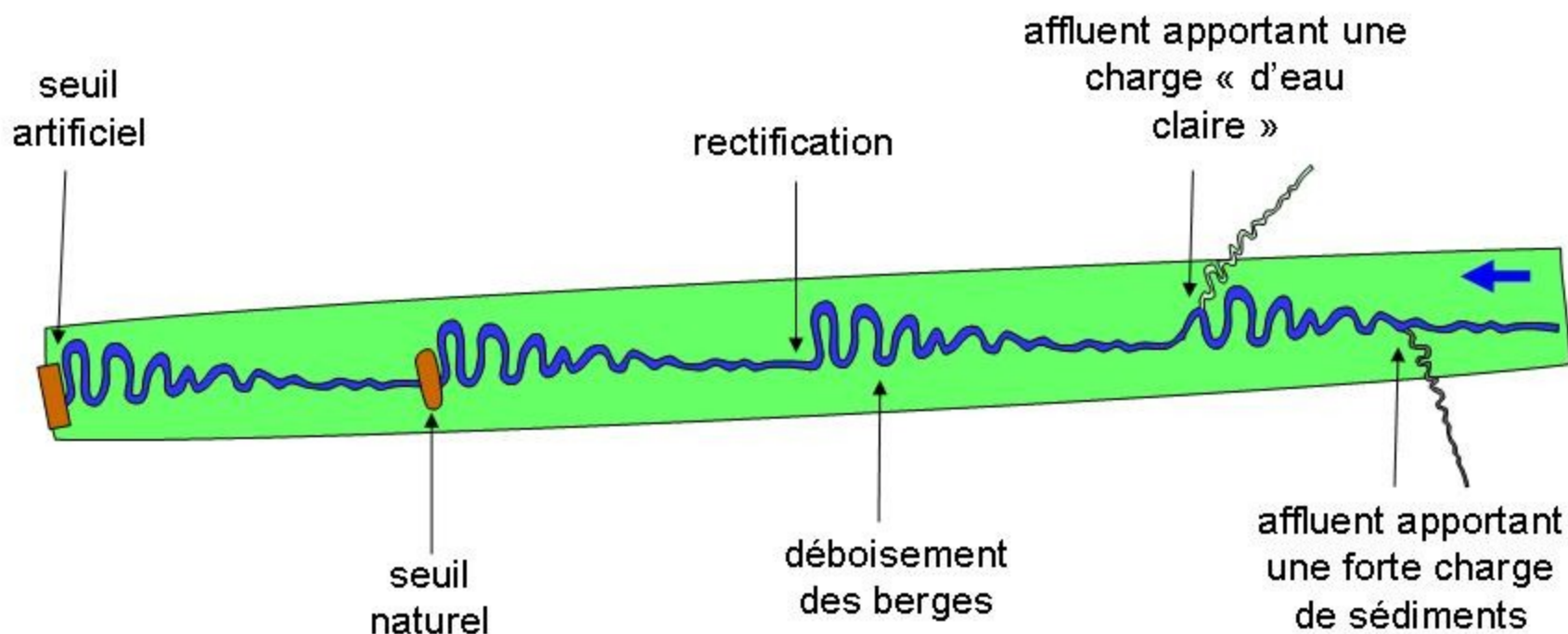


Etablir un diagnostic

Le tracé en plan

Bien comprendre les facteurs ayant contribué à la situation actuelle :

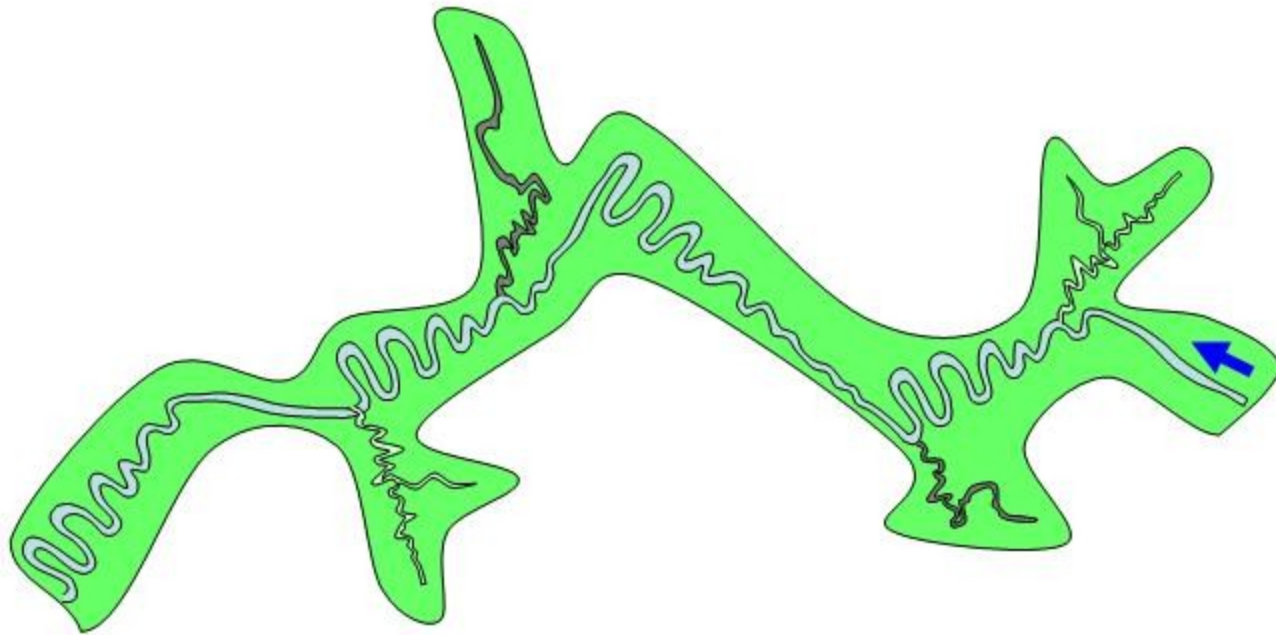
l'analyse du tracé en plan à l'échelle d'un sous-bassin peut faire apparaître des situations variées résultant de pressions naturelles ou anthropiques, et d'ajustements morphologiques plus ou moins anciens.



Etablir un diagnostic

Le tracé en plan

La lecture des cartes peut s'avérer complexe, la compréhension des processus globaux intégrant le passé géomorphologique, la pédologie, l'occupation des sols, les évolutions climatiques... s'avère très difficile surtout pour les petits cours d'eau, à la fois peu et mal décrits, et très vulnérables à toutes les pressions anthropiques.



Etablir un diagnostic Le tracé en plan



« Fermez les ruisseaux esclaves, les près ont assez bu. » Les bucoliques III, 111. Virgile 70-19 av JC



« ... gens de bras pour aplanir les chemins, bastir ponts à passer les eaux, curer les rivières. »

Lucullus 115-49 av JC



« Marius luy fit caver une grande tranchée et canal, dedans laquelle il destourna bonne partie de l'eau de la rivière ». Marius. 157-86 av JC



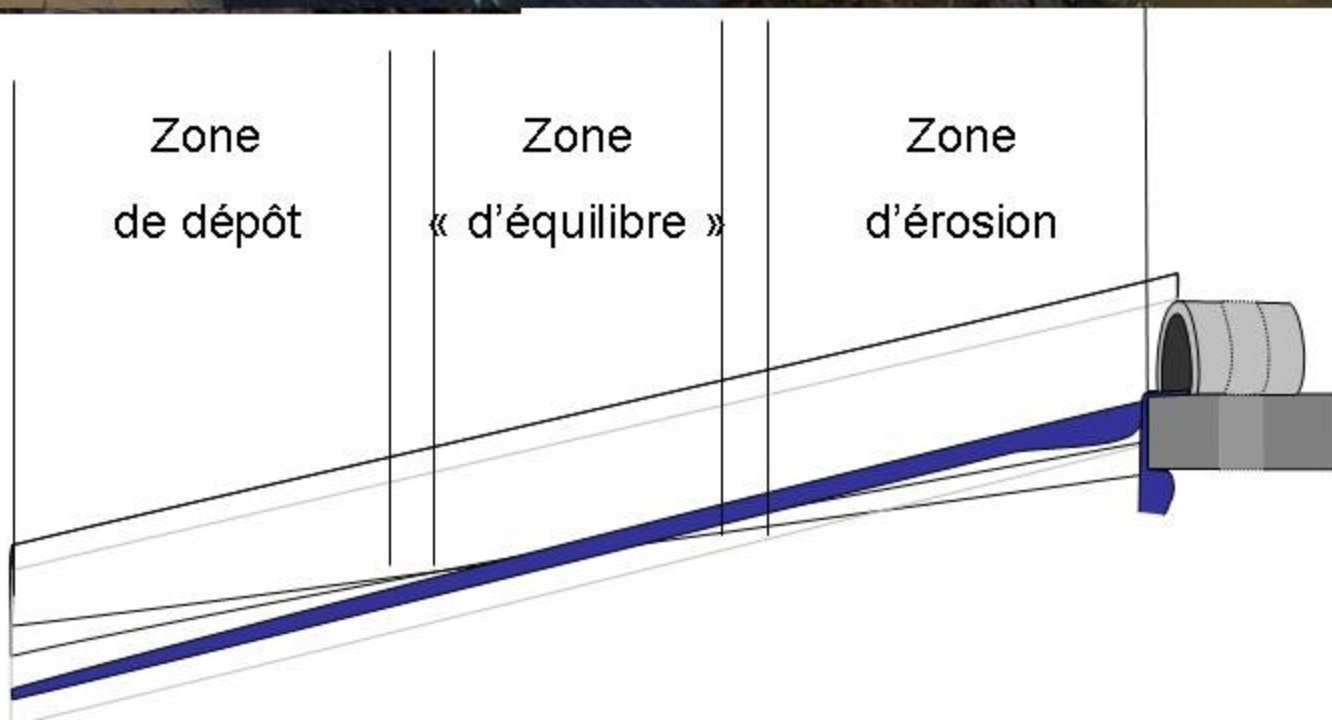
Établir un diagnostic Les sur-largeurs

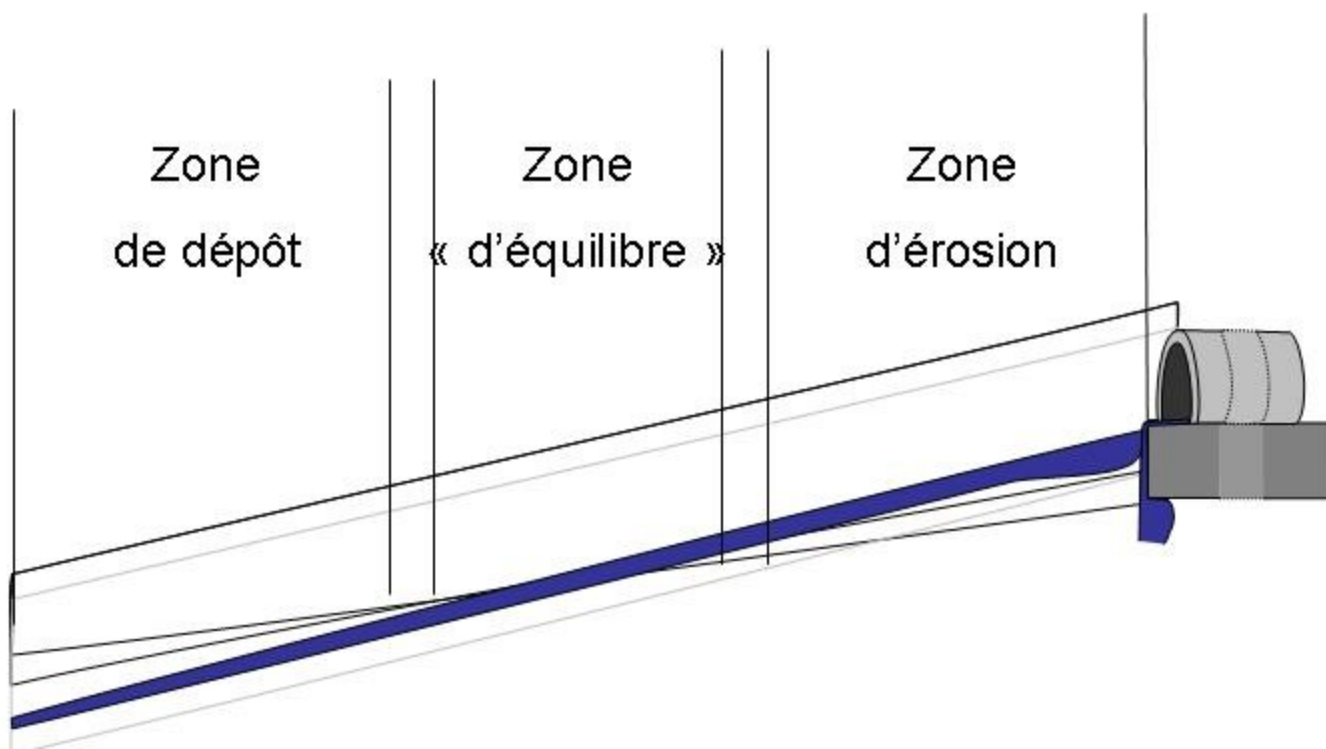
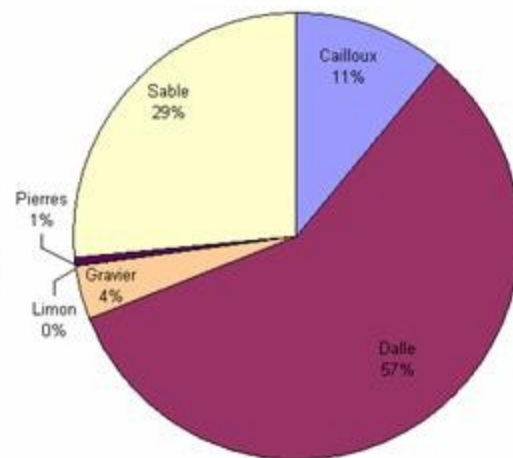
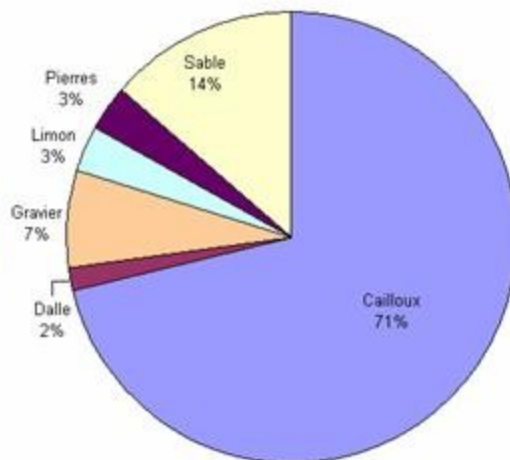
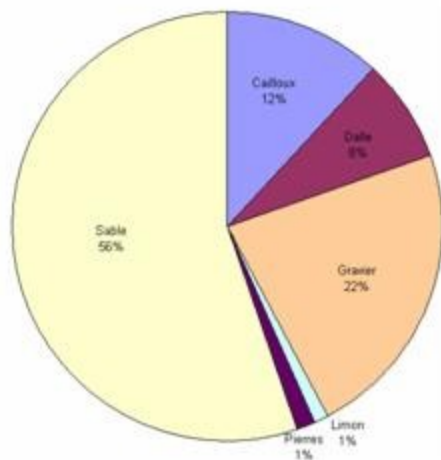


Comment repérer les **sur-largeurs** ?

Les indices : colmatage (vitesses d'écoulement lentes, homogènes), atterrissements, berges nues avec érosions généralisées, arbres en saillie, encoches répétées, développement importants de végétaux aimant les limons (selon types de cours d'eau vrai et faux cresson, callitriches, iris, nénuphars...) à relier avec l'ensoleillement.

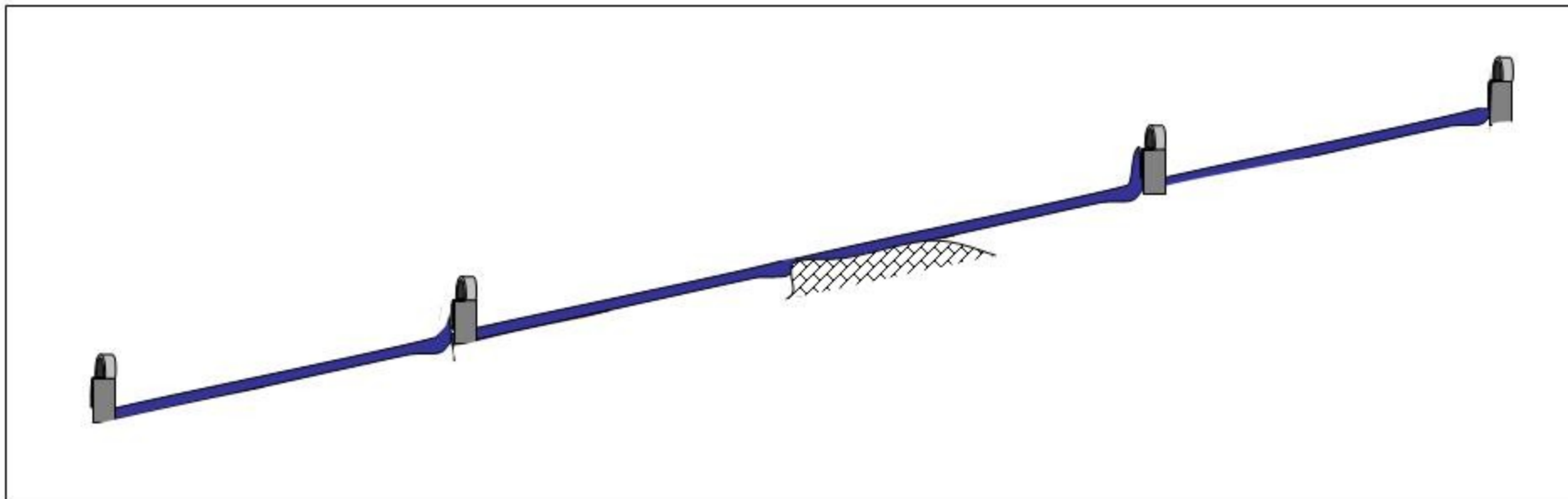






Les cours d'eau se présentent comme une succession de « biefs » séparés par des « points durs », entre lesquels les différentes zones érosion-équilibre-dépôts se succèdent

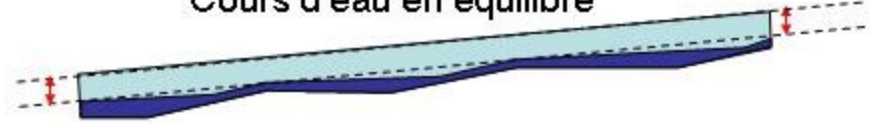
Les techniques d'aménagement doivent pouvoir s'adapter à ces variations locales



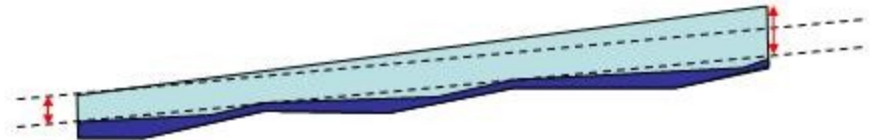
L'incision est un processus qui peut être violent et très rapide sur certains sols (ici une érosion progressive)



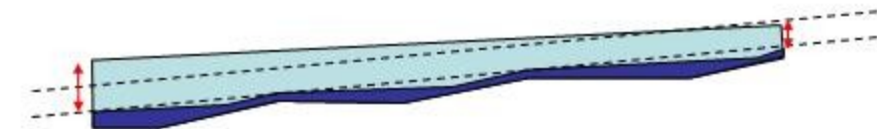
Cours d'eau en équilibre



Une érosion progressive se repère par une diminution des hauteurs de berges de l'amont vers l'aval



Une érosion régressive se repère par une augmentation des hauteurs de berges de l'amont vers l'aval



Erosion régressive / progressive

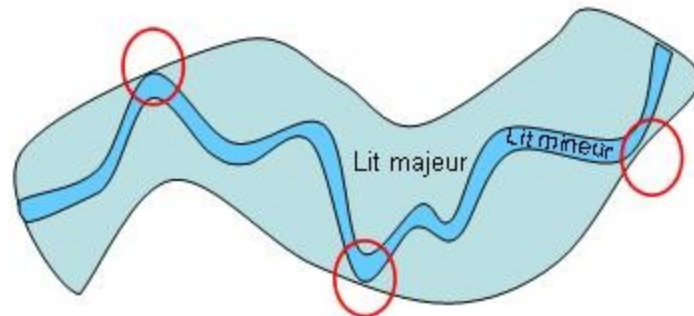


Ancien bief. Boivre (dpt 86) vue vers l'amont

Attention : pour les portions de cours d'eau anciennement perchées (biefs d'irrigation ou de moulin...), les hauteurs de berges ne correspondent pas à la cote naturelle du fond de talweg (dignes quasi horizontales).

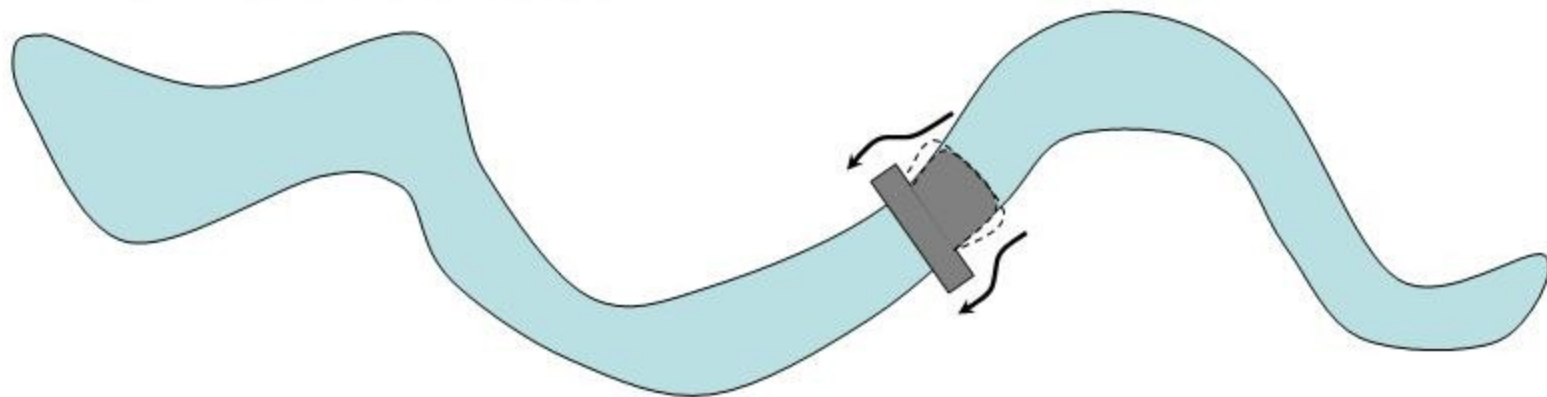
Une disparition du seuil, une ouverture de vanne... se traduiront par des berges (relativement) plus hautes à l'aval sans pour autant entraîner systématiquement une érosion régressive... (au-delà du fond naturel).

Attention : dans les points d'inflexion de la vallée, il peut être normal d'observer des berges hautes : le cours actuel se trouvant en contact direct avec les coteaux ou des terrasses



Réfection d'un radier de pont (rehausse)
sur cours d'eau à berges non protégées
(absence de ripisylve)

Sens
d'écoulement

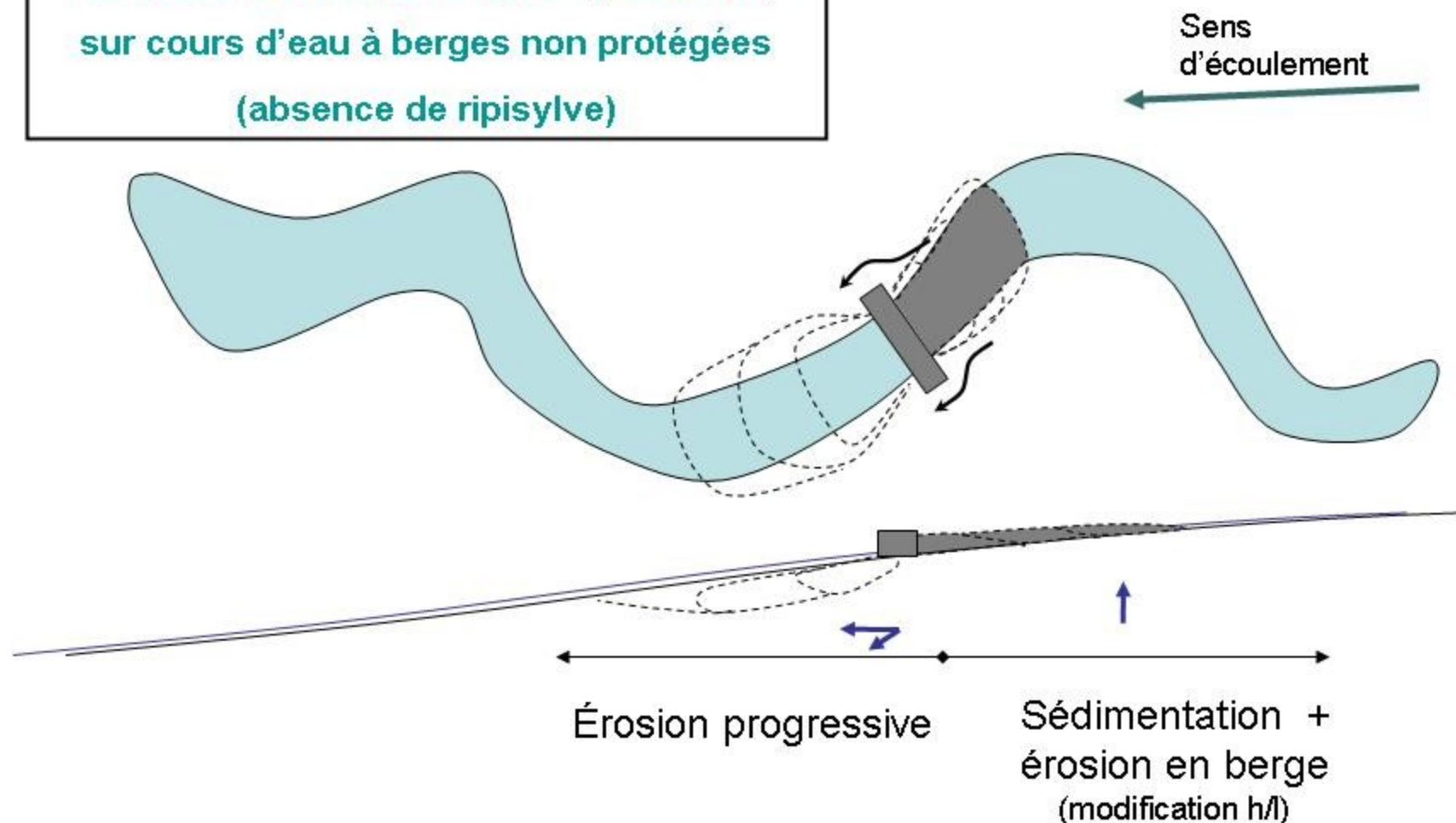


Un ouvrage transversal entraîne un **blocage des sédiments à l'amont**

Un ouvrage transversal entraîne également, par modification des écoulements, des **érosions de berges à l'amont** (le cours d'eau « essaie » de contourner l'obstacle).

La position de l'ouvrage (plus ou moins oblique), sa longueur (qui fait varier la charge sur l'ouvrage) et la forme du seuil (centrage ou étalement des écoulements) influent sur ces phénomènes d'érosion. La nature des berges et les protections naturelles ou anthropiques offrent une résistance plus ou moins efficace)

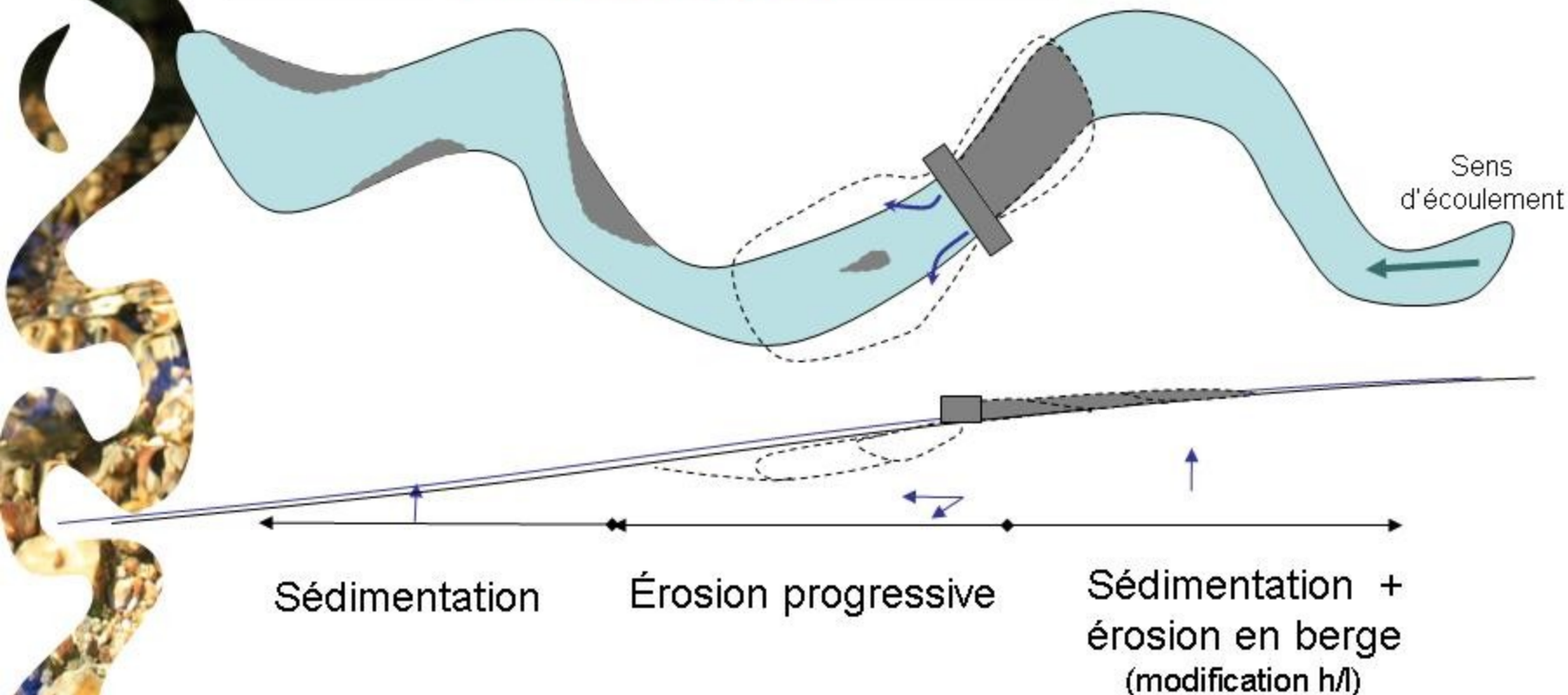
Réfection d'un radier de pont (rehausse)
sur cours d'eau à berges non protégées
(absence de ripisylve)



La sédimentation à l'amont de l'ouvrage **est régressive** et peut bloquer des matériaux au delà du « plan d'eau » (remous hydraulique).

A l'aval, le déficit de sédiment entraîne une **érosion progressive**.

Réfection d'un radier de pont (rehausse)
sur cours d'eau à berges non protégées
(absence de ripisylve)



L'augmentation de la hauteur de chute entraîne une augmentation de l'énergie : la fosse de dissipation s'agrandit (érosions de berges, incision et déchaussement de l'ouvrage...)

Si le blocage sédimentaire est inférieur aux apports dûs aux érosions de berges, des dépôts peuvent apparaître à l'aval...

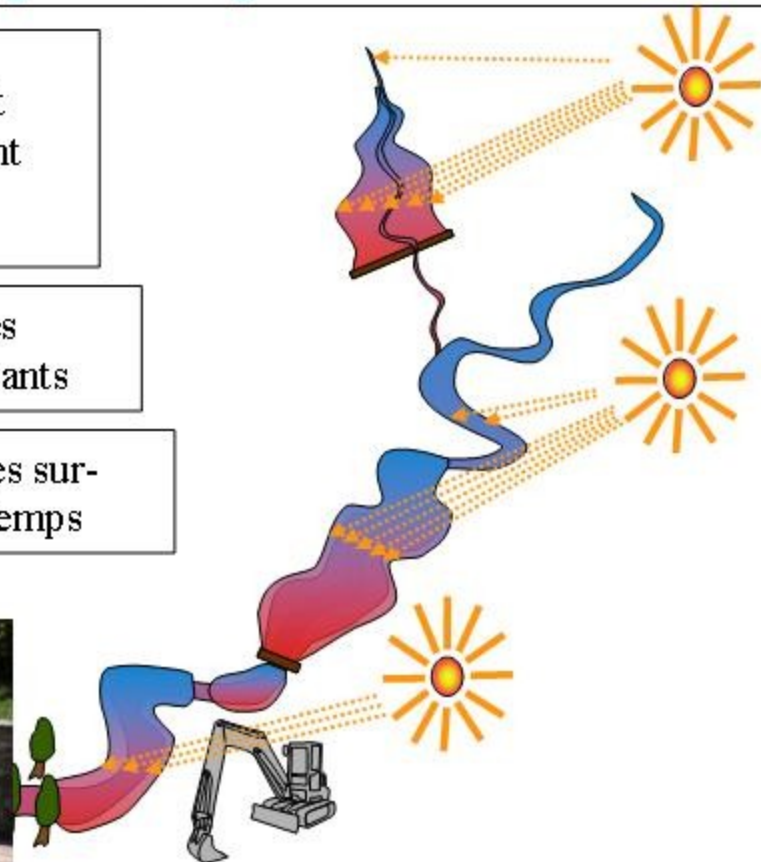
Bien intégrer la problématique Température de l'eau

Les bilans thermiques montrent que c'est essentiellement la surface d'ensoleillement qui fait varier la température de l'eau

Les étangs et les seuils peuvent avoir des impacts individuels ou cumulés très importants

A l'amont et l'aval de beaucoup d'ouvrages, les sur-largeurs et les impacts s'accroissent avec le temps

Les recalibrages augmentent



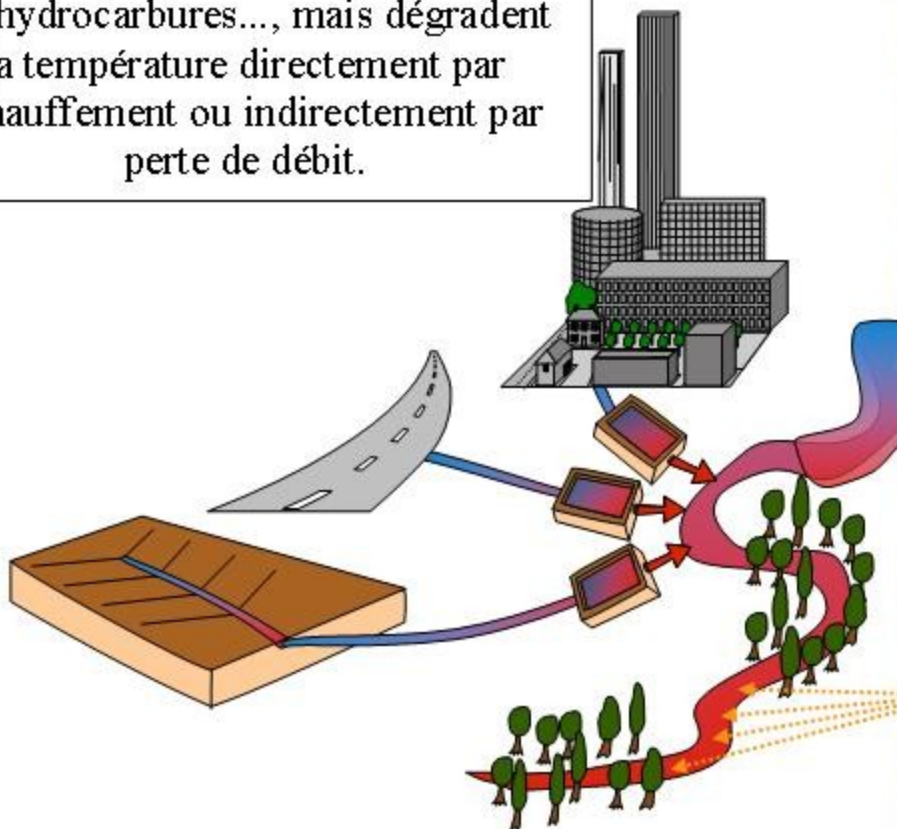
L'altération de la ripisylve à cause des travaux lourds ou d'une mauvaise gestion, impacte à la fois la largeur de la rivière et l'ombrage du cours d'eau



Bien intégrer la problématique Température de l'eau

Les surfaces imperméabilisées et les collecteurs de drains à ciel ouvert ont des impacts très marqués lors des épisodes pluvieux estivaux

Les collecteurs, quand ils existent, traitent la plupart du temps les MES, les hydrocarbures..., mais dégradent la température directement par échauffement ou indirectement par perte de débit.



Date de relève de Température : 24 juin 2015 (T° de l'air 24°C, 16h15)

B Caraty SD ONE MA 79 -photos non réalisées le jour du relevé-

Source



50m

Mare (450m², plein soleil au moment des relevés, environ 25-30cm de profondeur)



300m

Portion légèrement reméandrée avec recharge en granulats : T° 550m en aval de la source



180m

Portion rectifiée recalibrée avec seuil : T° 370m en aval de la source



- Source_3_AmenagerBanquettes_M-BRAMARD_ONEMA



Aménager une banquette en rivière

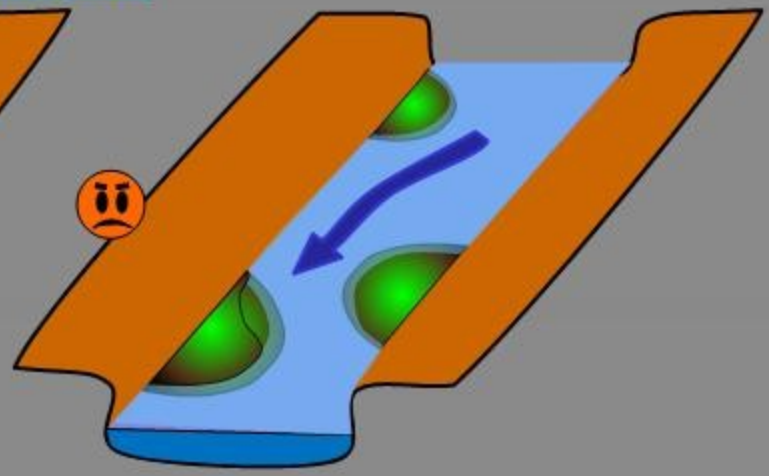
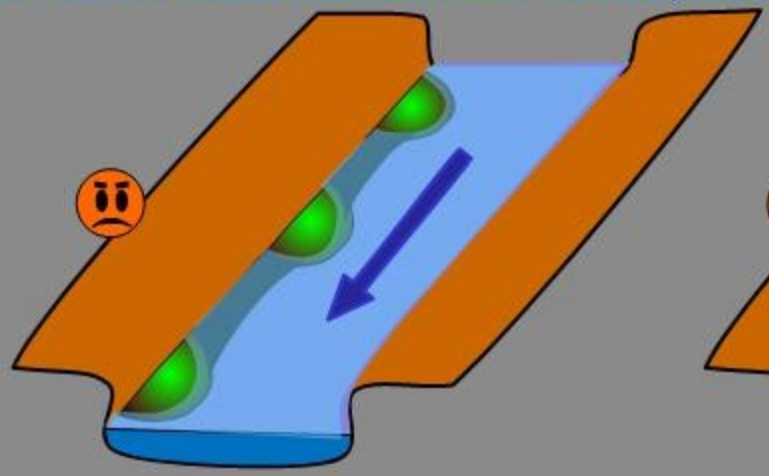
Pourquoi? Comment?
Retour d'expériences et conseils pratiques.



10^e forum des Techniciens Médiateurs de Rivières à Lathus
Michel Bramard – 6 novembre 2015



Positionnement et dimensionnement des banquettes



Quelques « erreurs » assez faciles à identifier :

⇒ banquettes non alternées : l'écoulement reste rectiligne, peu de gains en matière d'habitats, coûts peu optimisés (surtout si travaux de stabilisation amont et aval des banquettes par du génie végétal...)

⇒ banquettes trop rapprochées (la déviation du courant provoquée par la banquette amont vient éroder la banquette suivante)





D'autres critères (de réussite ou d'échec) apparaissent moins facilement identifiables.

Critères de dimensionnement

Quelle méthode?* (la question s'applique à l'ensemble des travaux de restauration linéaire de cours d'eau)

- **par analogie**, (reproduire les caractéristiques morphologiques d'un tronçon non altéré du même cours d'eau)
- **par approche empirique régionalisée** (par mimétisme des formes fluviales caractéristiques à l'échelle d'une région homogène)
- **par méthode analytique** (à partir d'équations de transport solide et de modèles hydrauliques)

Les différentes approches nécessitent généralement d'être combinées.

- par «pifométrie»



(* Brookes et Shields, 1996 ; Hey, 2006 ; Rosgen, 2007) in LE LEU, W. 2013



En copiant les formes issues des ajustements morphologiques naturels?



Glissement de berge dans une fosse de concavité (migration latérale)



Reprofilage de berges par des bovins



Glissement de berge suite à une incision (érosion progressive)



Développement de végétaux aquatiques et sédimentation

Beaucoup de symptômes de ces ajustements sont interprétés comme des désordres hydromorphologiques...



En copiant les formes issues des ajustements morphologiques naturels?

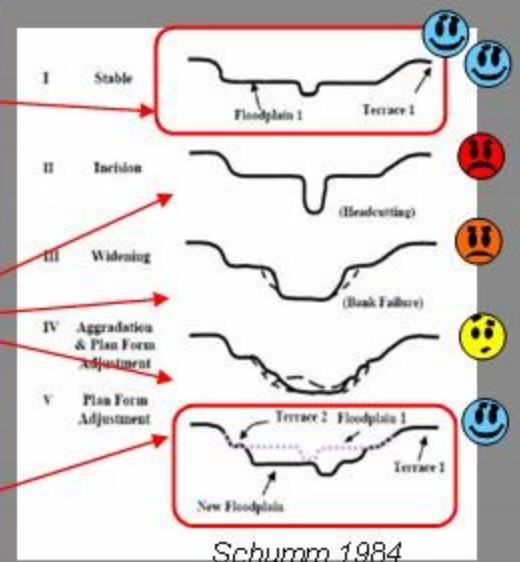


Petit cours d'eau rectifié en phase finale de réajustement (avec pente très faible)

Il vaut mieux
 - soit restaurer les formes de lit telles qu'elles étaient avant les perturbations (si c'est possible)

plutôt que d'essayer de stabiliser ou créer des formes transitoires (gains fonctionnels plus importants et meilleure résilience)

- soit se rapprocher d'une nouvelle forme proche de « l'équilibre »



Un cours d'eau (*) en équilibre (dynamique) a tendance à concentrer l'énergie aux débits d'étiage et à disperser l'énergie pour les débits de crue (Ward, A. and S. Trimble. 2003), avec le cas échéant un lit emboîté*

* pour les cours d'eau à faible pente
 ** on parle de lit « emboîté » pour un lit mineur inséré dans un lit majeur « restreint » (et pas un lit d'étiage inséré dans un lit mineur)



Longueur des banquettes

⇒ La bibliographie propose peu d'éléments* de dimensionnement des longueurs : 4x la largeur (Besson et al 2009), variable et jusqu'à 12 fois la largeur (Collectif . Fédération de pêche Côtes d'Armor 2010 : configuration des risbermes)

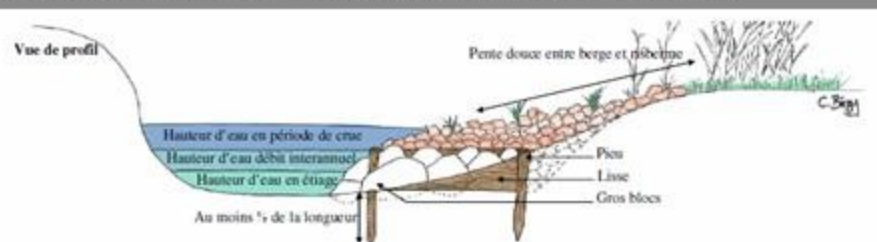
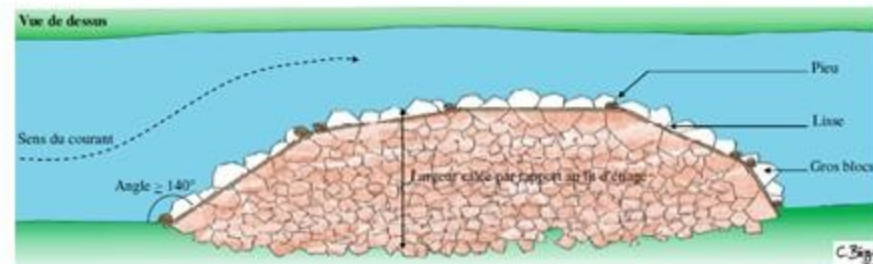


Figure n°31: Vue de profil d'une risberme



La « largeur » de référence à prendre en compte pour le dimensionnement peut être comprise soit :

- comme une simple indication de rapport de forme (rapport l/L de la banquette)

- soit en se basant sur une largeur de référence** «plein bord avant débordement» (notée généralement W)

* pour cette présentation la recherche bibliographique n'a pas été exhaustive
 ** largeur projet qui doit être définie précisément dans le diagnostic avant travaux



Longueurs des banquettes

Les formes naturelles d'atterrissement sur certains cours d'eau à fort transport solide présentent une rythmicité (qui peut être parfois très régulière) avec une moyenne de 5 à 7 W (Malavoi JR. et Bravard JP. 2010).



Ce rythme, qui s'observe également* pour les alternances de faciès d'écoulement (en moy 6W) et la formation des méandres (en moy 12W), constitue une bonne indication pour le dimensionnement des travaux...

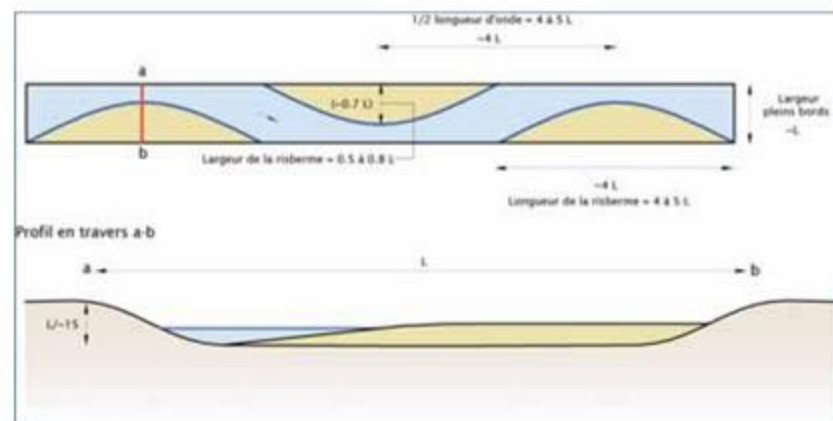


Figure 18 : Schéma type d'implantation de risbermes alternées (L est la largeur à pleins bords) (figure Malavoi-Biotec).

* pour les cours d'eau coulant sur alluvions



Epaisseur des banquettes

⇒ Les objectifs définis dans le projet (pincement du lit à l'étiage, en conditions moyennes d'écoulement, en crue...) doivent être suffisamment clairs pour permettre un calage adapté et précis (plus ou moins précis selon les enjeux, le type de milieu et la technique utilisée)

Exemple : objectif ⇒ accélérer les vitesses d'écoulement sur une zone favorable* à la reproduction de la Truite fario

La période de réalisation des travaux (généralement à l'étiage) ne permet pas toujours une évaluation immédiate des effets escomptés.

La méthode de réalisation employée ici (recharge en granulats) a permis de réajuster le tir rapidement, sans surcoûts élevés, pour être efficace sur des débits proche du module.



banquette trop basse : vitesses de courant lentes sur toute la section mouillée



banquette bien calée : vitesses d'écoulement rapides en saison de reproduction de la truite



Nature des matériaux

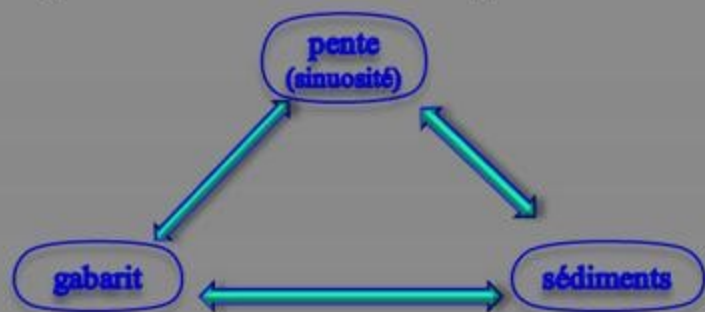
- ⇒ Tous types de matériau sont employés :
 - banquettes minérales, (cailloux, pierres, blocs, mélange)
 - banquettes « végétales » : terre, argile (avec ou sans semis), bois mort (pieux jointifs, fascines, déchets d'abattage, peignes...)
 - mixte : horizontal (bordure bois et intérieur terre), ou vertical (« lasagne » alternant des couches de bois mort et de terre), sous couche pierreuse et dessus terreux...
- ⇒ Les structures en bois morts semblent présenter globalement une durée de vie assez courte (du même ordre que les embâcles se constituant naturellement en rivière).
- ⇒ Les effets de sédimentation espérés sont souvent déçus (les cours d'eau à transport sédimentaires suffisant s'ajustent naturellement d'eux-mêmes)
- ⇒ le « durcissement » des structures par des gros blocs tend à artificialiser le milieu
- ⇒ la « sécurisation » des travaux par les techniques végétales (plançons, tressage, boudins coco, géonattes...) augmente considérablement les coûts sans « garantir » une meilleure tenue dans le temps



Dimensionnement des travaux

⇒ même si certains matériaux et modes opératoires présentent plus d'avantages que d'autres, les caractéristiques dimensionnelles des ouvrages priment sur la nature des matériaux employés

Comme pour d'autres types de restauration hydromorphologiques ambitieux, les paramètres dimensionnels du nouveau milieu créé doivent être analysés de façon globale et simultanée, pour assurer une bonne résilience des structures créées.



Paramètres principaux à prendre en compte dans les projets de restauration morphologique

Après travaux :

- les trajectoires seront allongées : est-ce qu'on se rapprochera de la pente d'équilibre du cours d'eau?
- le gabarit sera-t-il conforme?
- les sédiments (grossiers) sont-ils suffisants en volume et en étendue granulométrique?



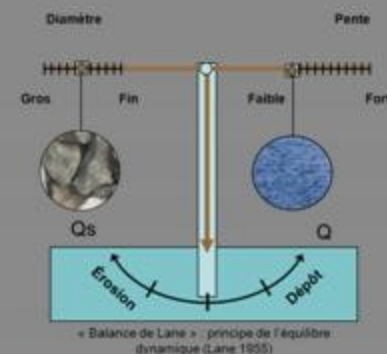
Dimensionnement des travaux

Si oui aux 3 questions, les ajustements seront très modérés (!ce n'est pas une science exacte 😊 et il peut y avoir des aléas climatiques « malvenus » 😞 sur des travaux « frais »).

Si non à l'une des 3 questions, les ajustements seront plus forts : comment et où ?

Les granulats

Le matelas alluvial est-il épais? L'étendue granulométrique est-elle importante? Des matériaux sont-ils disponibles en lit mineur? en berges?



Facteur important : les sédiments grossiers constituant à la fois une variable de contrôle et de réponse



Le « gabarit »

La capacité hydraulique **naturelle** des cours d'eau s'adapte aux conditions moyennes de transport (débits liquide et solide).

Les dimensions du lit mineur s'ajustent en fonction des crues (dites « morphogènes ») qui correspondent à des occurrences proches de

- sources, zones de marais : **Q : 1 à 1,2**
- substrats imperméables **Q : 1,7**
- substrats perméables **Q : 2**

Le débit de référence à prendre en compte est celui de la **crue journalière** d'occurrence 1 à 2 ans

Si les travaux sont très importants* (lit et berges) il faut légèrement sous-dimensionner pour tenir compte des ajustements à venir

Les incidences après travaux seront différentes selon la technique employée : déblai/remblai («simple» modification du rapport de forme), ou remblai seul (réduction du gabarit), ou déblai seul (augmentation de gabarit).



Le « gabarit »

Sur les petits cours d'eau les stations de jaugeage et les chroniques de débits sont généralement absentes...

On peut :

- estimer les débits à partir des données du futur gabarit (largeur lit et hauteur de berges), pente, rugosités (formule de Manning-Strickler ...).
- comparer aux données de stations de débits proches (pluvio, coef de ruissellement...), projeter le Q2, le module, à la superficie du BV au niveau des travaux
- prendre en référence une station proche non impactée
- en cas d'absence de station de référence, repérer les indices de largeur conformes (portions les plus étroites), l'implantation des végétaux sensibles à l'enneigement des systèmes racinaires, les portions absentes de colmatage ou de pavage*...

(méthode analytique, approche empirique régionalisée, analogie)



Le rapport de forme



Boivre avec ripisylve l/p : 9

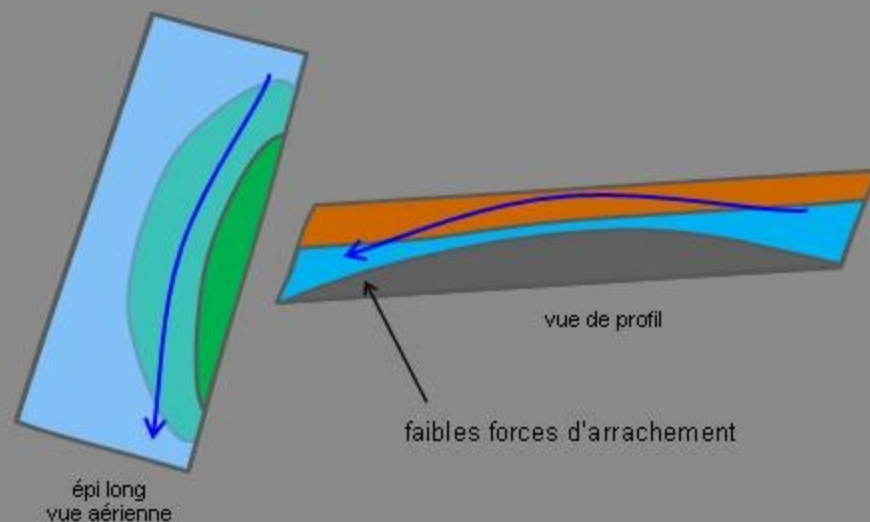
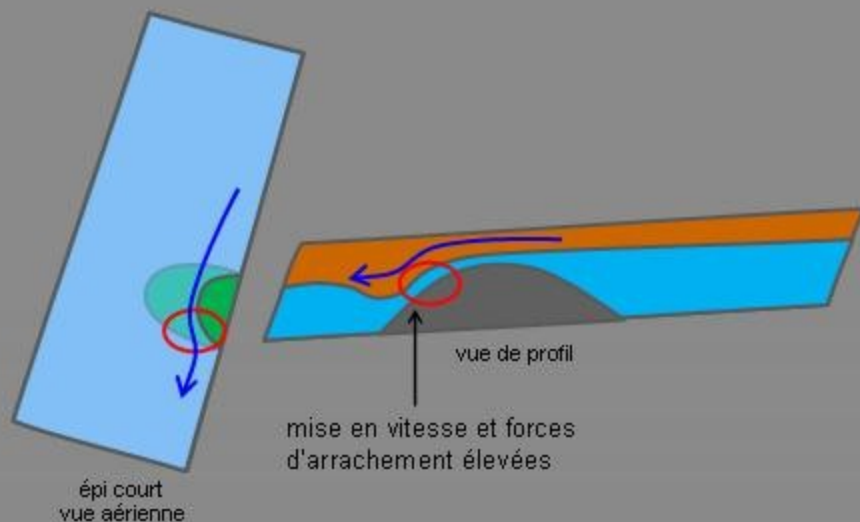
Exemple de lit sur-élargi Boivre (86) :
l/p = 17

lit rectifié (ancien bief), suppression
ripisylve (rangée de peupliers) et
piétinement bovins



Quelques pistes pour mieux comprendre

⇒ banquettes trop courtes



Sur des ouvrages longs, les contraintes hydrauliques en crue* sont plus faibles

⇒ il vaut mieux proscrire les banquettes trop courtes type « gros épis »

*selon la conception de l'ouvrage et les conditions locales, les contraintes varient entre le début et la fin de la crue, le long des épis ainsi comme le long de la digue.



Quelques pistes pour mieux comprendre

⇨ banquettes trop étroites ou trop larges

Si des matériaux grossiers sont absents du matelas alluvial ou de trop faible taille :

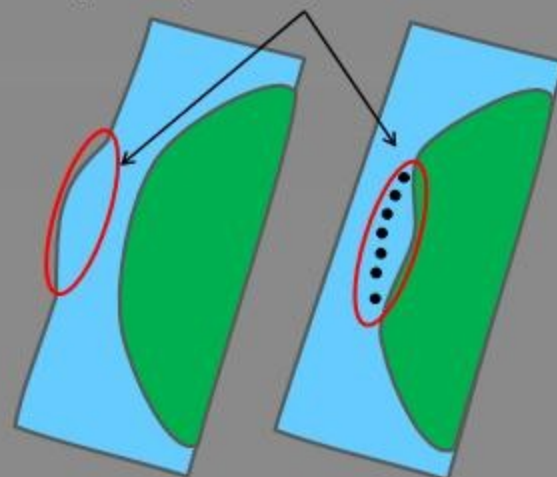
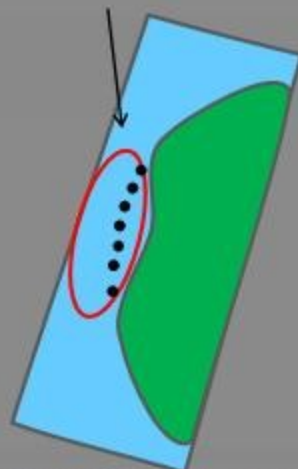
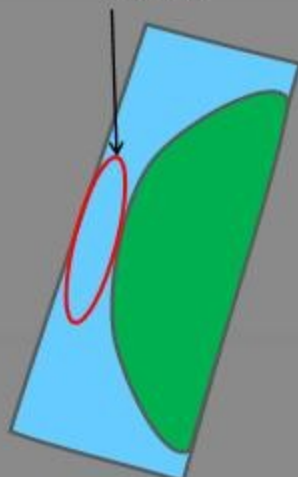
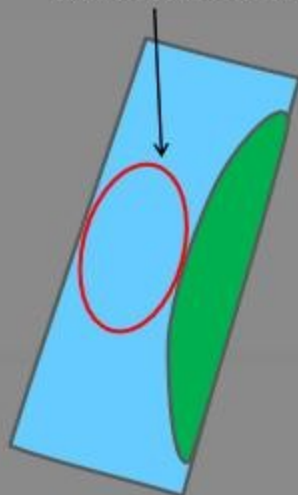
- 1^{er} temps : incision du chenal
- 2^{ème} temps, sapement avec un basculement des matériaux de la banquette ou un sous-cavement faisant apparaître les infrastructures

Si des matériaux grossiers sont présents dans le matelas alluvial et bloquent l'incision du chenal :

- le cours d'eau ajuste son gabarit en érodant soit la berge en face*, soit la banquette

pincement insuffisant : les vitesses de courant restent faibles, le fond est colmaté...

pincement trop important, les vitesses de courant et les forces d'arrachement sont très importantes



ou les deux ☹!

banquette trop étroite
vue aérienne

banquette trop large
vue aérienne



* selon la cohésion des matériaux en berge, présence et importance de la ripisylve



Quelques pistes pour mieux comprendre

⇒ banquettes trop étroites ou trop larges

Il peut être volontairement recherché de forcer une migration latérale (pour améliorer la qualité d'un tracé en plan trop rectiligne).

Très souvent, les berges anciennes du cours d'eau, de nature très cohésives, résistent mieux et c'est la bannette, de fabrication plus récente qui subit l'érosion latérale

Forcer une migration latérale nécessite :

- une berge opposée friable, non protégée (protections artificielles ou ripisylve)
- ou un durcissement très important de la bannette ce qui présente des risques d'une certaine artificialisation du milieu et des surcoûts importants! De nombreux maîtres d'ouvrage préfèrent anticiper en réalisant un retalutage de la berge opposée*.

* technique de déblai-remblai permettant de réutiliser pour la bannette les matériaux issus du retalutage de la berge opposée

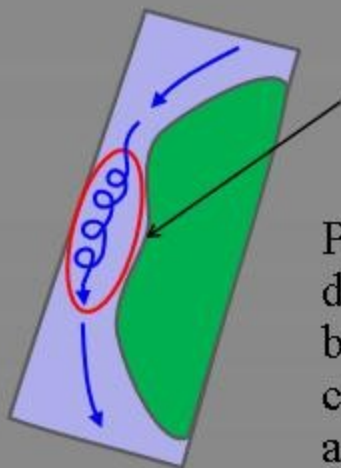


Quelques pistes pour mieux comprendre

⇒ banquettes trop étroites ou trop larges

Un autre facteur pouvant favoriser l'érosion de la berge est la création de courants tourbillonnaires consécutifs de la courbure du tracé en plan.

Tout comme dans les méandres naturels, il est normal que se forme une fosse de concavité dans l'extrados et un banc de convexité dans l'intrados entraînant à terme une surlargeur dans la courbe.



Pour limiter les ajustements et les dépôts de sédiments, le tracé de la berge peut en partie anticiper cette évolution prévisible en adoptant une forme « en haricot » (premiers tests en cours)





① Récapitulatif des valeurs limites de contraintes tractrices en fonction de l'âge. Les nouvelles valeurs limites sont en gras et les valeurs de rupture d'ouvrage sont soulignées. Les chiffres entre parenthèse renvoient aux références d'où sont issues les valeurs. Les lettres renvoient au cours d'eau concerné.

Techniques	Contrainte tractrice (N/m²)					
	Moins de 1 an après la réalisation	1 à 2 ans après la réalisation	3 à 4 ans après la réalisation	5 à 6 ans après la réalisation	3 à 4 ans après la réalisation	9 ans et plus après la réalisation
Plantation d'hélophytes	5 ^(a)		30 ^(b)			
Ensemencement	20 ⁽²⁾	30 ⁽²⁾	100 ^(b)			
Fascine d'hélophytes	30 ^(b)	30 ⁽²⁾	60 ^(b)			
Clayonnage et tressage	10 ^{(2)(b)}	120 ^(b)	120 ^{(1)(1)(b)}			
Bouture	75 ⁽²⁾	150 ⁽¹⁾	165 ⁽¹⁾			
Saule jeune (moins de 2 ans)	100 ⁽⁴⁾		140 ⁽²⁾			800 (20 ans) ⁽²⁾
Lit de plants et plançons jusqu'en pied de berge	108 ⁽¹⁾	134 ⁽¹⁾	150 ⁽¹⁾			
Lit de plants et plançons avec fascine de saule en pied de berge	141 ⁽³⁾	172 ⁽³⁾	116 ⁽³⁾ (rupture fascine)			
Lit de plants et plançons avec enrochement en pied de berge	196 ⁽¹⁾ ; 37 ⁽¹⁾	204 ^(b)	212 ⁽¹⁾			77 ⁽¹⁾
Fascine de saule en pied de berge	141 ⁽³⁾ ; 50 ⁽¹⁾	240 ^(b) ; 116 ⁽³⁾	> 300 ⁽²⁾			98 ⁽¹⁾
Couche de branches à rejets avec enrochement en pied de berge	244 ^(b)	300 ^{(2)(2)(b)}	450 ⁽²⁾	51 ^(b)		
Caisson en bois végétalisé	500 ⁽²⁾	60 ⁽²⁾	600 ⁽²⁾	153 ^(b)	109 ^(b) ; 381 ⁽³⁾	98 ⁽¹⁾
Enrochement végétalisé	200 ⁽¹⁾	300 ⁽²⁾	350 ⁽²⁾			
Enrochement nu	250 ⁽¹⁾	250 ^(b)	250 ^(b)			

1 : (Faber, 2004) ; 2 : (Venti *et al.*, 2003) ; 3 : (Florineth, 1982, 1995) ; 4 : (Adam *et al.*, 2008) 5 : (Gerstgraser, 1998) ; 6 : (Witzig, 1970) ; 7 : (Lachat, 1994) ; 8 : (Schiechl et Stern, 1996) ; 9 : (Gerstgraser, 2000).
a : Arve ; b : Avançon d'Anzeindaz ; c : Bens ; d : Dadon ; e : Gelon ; f : Guiers vif ; g : Néphaz ; h : Pamphiot ; i : Petite Gryonne ; j : Volane ; k : Isère.

SCIENTES EAUX & TERRITOIRES – ARTICLE HORS SÉRIE N°27 – 2016



La recharge en granulat offre des alternatives qui ne sont pas encore bien intégrées dans le panel des solutions possibles!

La résistance des matériaux est importante dès les premiers mois (pour s'ajuster plus ou moins dès les premières crues).

Le choix de la technique doit s'adapter également à la gestion future (banquette fusible en cas de grosse crue? entretien régulier ou épisodique???)

Attention, les valeurs relevées ont été menées sur un panel d'opérations parfois limité. Les facteurs de réalisation et positionnement des aménagements, les conditions hydromorphologiques ne sont pas indiquées (migration latérale, incision, transit sédimentaire, régime hydrologique...).



Quelques pistes pour mieux comprendre

⇒ banquettes trop étroites ou trop larges



cordon de granulats grossier, remblaiement de terre derrière



Exemple de redressement de la bordure d'une banquette en matériau très cohésif (argile)

La bordure en granulats ne présente pas une cohésion permettant de créer ex nihilo des berges typiquement* sub-verticales. C'est par les phénomènes d'érosion-dépôts que la verticalité des nouvelles berges se fait progressivement**.

* pour les cours d'eau à régime régulier

** sauf pour les banquettes de resserrement du lit d'étiage en eau une grande partie de l'année



Quelques pistes pour mieux comprendre

⇒ banquettes trop étroites ou trop larges

En cas de déficit de sédiments grossiers, en raison des vitesses de courant accélérées par le pincement du lit, il peut être nécessaire de recharger en granulats.



Incision de 0,5m suite à une création de banquette (déblai-remblai) en absence de matelas alluvial

La stabilisation verticale du lit par de la recharge (création de radiers), ne se fera pas au droit des banquettes (zones des fosses) mais sur les points d'inflexion des nouvelles sinuosités

Le linéaire de radier est à adapter selon la pente mais toujours $\geq 10\%$.



Quelques pistes pour mieux comprendre

⇒ forme des banquettes



Forme naturelle de bannette régulièrement submergée (vue en étiage).

Forme naturelle de bannette rarement submergée (vue en étiage).

⇒ Les banquettes (« atterrissements ») en lit régulièrement inondé sont constituées de matériaux plutôt grossiers*.

Les formes sont adoucies avec un pendage latéral et longitudinal.

⇒ Progressivement les banquettes s'engraissent sont plus rarement inondées et deviennent terreuses. Les formes sont quasi horizontales (pente longitudinale bannette = à pente longitudinale des berges du cours d'eau).

Les bordures de la bannette constituent à terme les nouvelles berges du lit mineur (ici emboîté).

Elles sont sub-verticales.

*pour le type de cours d'eau considéré, selon l'énergie et la géologie locale... avec un tri granulométrique plus ou moins marqué



Quelques pistes pour mieux comprendre

⇒ calage altitudinal

Les forces d'arrachement.

Le calage de l'altitude des banquettes n'est pas toujours bien étudié.

⇒ Cela représente un risque important de tenue de l'aménagement.

⇒ C'est une question majeure à se poser avant d'employer des banquettes minérales ou végétales.

Beaucoup de banquettes sont calées empiriquement juste au-dessus du module



Si le cours d'eau est très contraint latéralement et sujet à des à-coups hydrauliques importants (souvent le cas en milieu urbain), les contraintes en crues sont très élevées : la sanction peut être immédiate!!!



Quelques pistes pour mieux comprendre

⇒ forme des banquettes



Forme naturelle de bannette régulièrement submergée (vue en étiage).

Forme naturelle de bannette rarement submergée (vue en étiage).

⇒ Les banquettes (« atterrissements ») en lit régulièrement inondé sont constituées de matériaux plutôt grossiers*.

Les formes sont adoucies avec un pendage latéral et longitudinal.

⇒ Progressivement les banquettes s'engraissent sont plus rarement inondées et deviennent terreuses. Les formes sont quasi horizontales (pente longitudinale bannette = à pente longitudinale des berges du cours d'eau).

Les bordures de la bannette constituent à terme les nouvelles berges du lit mineur (ici emboîté).

Elles sont sub-verticales.

*pour le type de cours d'eau considéré, selon l'énergie et la géologie locale... avec un tri granulométrique plus ou moins marqué



Quelques pistes pour mieux comprendre

⇒ calage altitudinal

Les forces d'arrachement.

Le calage de l'altitude des banquettes n'est pas toujours bien étudié.

⇒ Cela représente un risque important de tenue de l'aménagement.

⇒ C'est une question majeure à se poser avant d'employer des banquettes minérales ou végétales.

Beaucoup de banquettes sont calées empiriquement juste au-dessus du module



Si le cours d'eau est très contraint latéralement et sujet à des à-coups hydrauliques importants (souvent le cas en milieu urbain), les contraintes en crues sont très élevées : la sanction peut être immédiate!!!

banquettes dans un contexte urbain à très fortes contraintes



Quelques pistes pour mieux comprendre

Face aux risques :

⇒ soit on emboîte* suffisamment (si disponibilité foncière).



Exemple de pose d'énrochements sur une dérivation afin de réduire l'emprise des talus pour permettre un emboitement et un étalement suffisants de la masse d'eau en crue

⇒ calage altitudinal

Les forces d'arrachement.

Un emboitement minimal de 3 à 5W suffit généralement à limiter les risques de coupures aux seules banquettes, sans éroder les talus (Ward A. et al 2004).



Exemple de début de coupure de banquette suite à un épisode de crue exceptionnel sur un lit faiblement emboité (< 3W)

Mais dans certaines conditions (apports pluviaux très importants, régimes montagnard et méditerranéen) et lorsque l'on vise des gains fonctionnels plus importants**, il faut viser 6W et plus)

⇒ soit on n'utilise qu'une recharge minérale (sans terre avec une étendue granulométrique adaptée)

* lit mineur dans un lit majeur restreint

** régulation des débits, autoépuration, biodiversité...

La Dive du Nord à Marnes (79)

Bassin versant : 83 km² Module : 1.07 m³/s (dépassé 6 mois par an)

Biennale : 2.9 m³/s (2.7 x le module). Débit spécifique moyen annuel : 5.1 l/s/km²



Module

Quelques pistes pour mieux comprendre

⇒ calage altitudinal

Les durées de submersion.

Comparaison de deux cours d'eau proches et de gabarit similaire mais à régimes hydrauliques différents*

La Dive du Nord à Marnes (79)

Bassin versant : 83 km² Module : 1.07 m³/s (dépassé 6 mois par an),

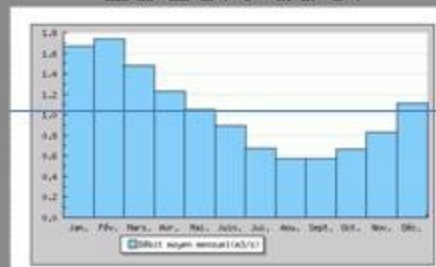
Biennale : 2.9 m³/s (2.7 x le module). Débit spécifique moyen annuel : 5.1 l/s/km²

Le Thouet au Tallud

Bassin versant : 83 km² Module : 1.12 m³/s (dépassé 6 mois par an),

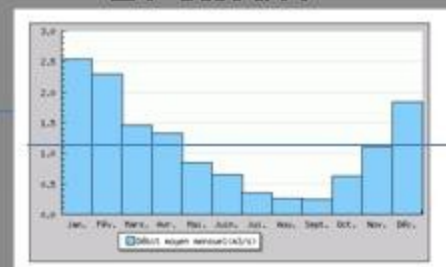
Biennale : 12.4 m³/s (11.07 x le module). Débit spécifique moyen annuel : 13.5 l/s/km²

La Dive du N



cours d'eau de nappe

Le Thouet



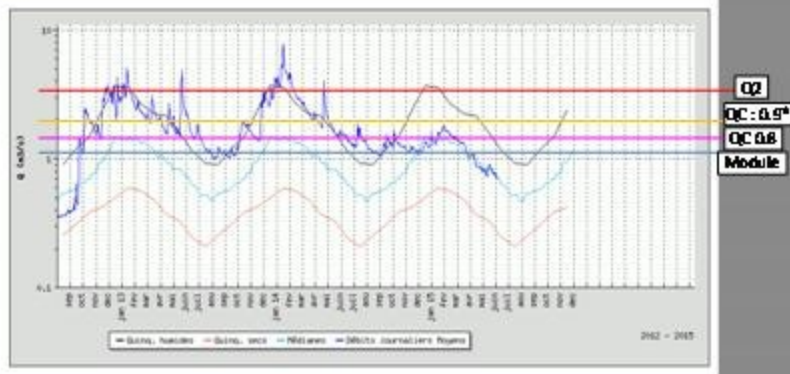
cours d'eau à régime contrasté

La comparaison des simples données du module n'apporte pas d'aide suffisante pour un bon calage des aménagements.

* données banque hydro : <http://www.hydro.eaufrance.fr>



Comparaison graphique des débits journaliers d'une année avec ceux du passé



* Q classé non dépassé 90% du temps

Débits classés données calculées sur 10906 jours

Fréquences	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90	0.88	0.86	0.84	0.82	0.80	0.78	0.76	0.74	0.72	0.70	0.68	0.66	0.64	0.62	0.60	0.58	0.56	0.54	0.52	0.50
Donc (m³/s)	3.890	3.240	2.810	2.480	2.200	1.950	1.720	1.520	1.350	1.200	1.080	0.980	0.900	0.830	0.770	0.720	0.670	0.630	0.590	0.560	0.530	0.500	0.470	0.450	0.430	0.410	0.390	0.370	0.350

Les durées de submersion.

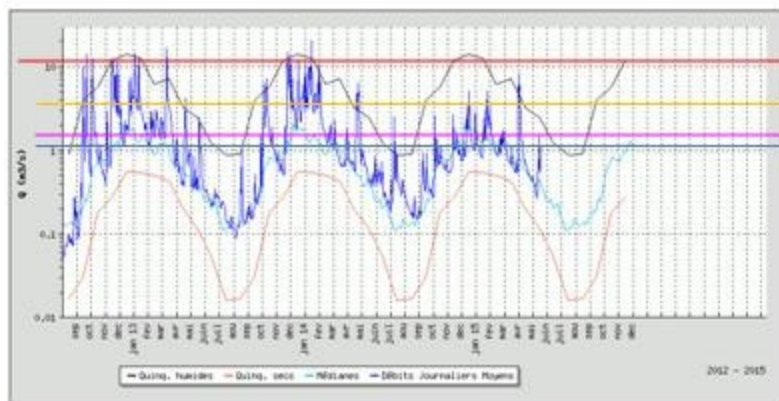
La Dive du N

Avec les débits classés, on observe que sur ce cours d'eau de nappe, les variations de débit sont lentes. Juste au dessus du module, la submersion des banquettes sera progressive, de faible amplitude, mais très longue (de l'ordre de 2 à trois mois d'affilée).

Pour des banquettes végétalisées, la cote des banquettes devra être calée quasiment entre la crue annuelle et le Q2 (cote naturelle de débordement?). Pour un calage plus bas, les végétaux à employer doivent être en capacité à résister à de très longues submersions.



Comparaison graphique des débits journaliers d'une année avec ceux du passé



• Q classé non dépassé 90% du temps

Débits classés données calculées sur 6641 jours

Fréquences	0.99	0.98	0.95	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.08	0.05	0.01
Debit (m³/s)	9.720	6.310	3.740	2.560	1.900	1.000	0.600	0.596	0.445	0.301	0.190	0.098	0.067	0.048	0.014

Crues (loi de Gumbel - septembre à août) - données calculées sur 45 ans

Fréquence	Qj (m³/s)	Qix (m³/s)
Xp	2.380	2.480
Grades	1.480	1.520
Biennale	2.900 [2.500, 3.500]	3.000 [2.600, 3.600]
Quinquennale	4.600 [4.000, 5.700]	4.800 [4.100, 5.900]
Décennale	5.700 [4.900, 7.200]	5.900 [5.100, 7.400]
Vicennale	6.800 [5.800, 8.700]	7.000 [6.000, 8.900]
Cinquantennale	8.200 [6.900, 11.00]	8.400 [7.100, 11.00]
Centennale	Non calculée	Non calculée

Valeurs actuellement mobilisables pour caler les aménagements

Les durées de submersion.

Le Thouet

Sur ce cours d'eau à régime plus contrasté, les submersions sont importantes, très fréquentes mais de courtes durées.

Si un calage au module n'est pas envisageable non plus, un calage légèrement supérieur (Q non dépassés entre 80% et 90% du temps) devrait pouvoir suffire (la submersion totale potentielle est d'environ 70j mais répartie en de nombreux épisodes de quelques jours)



Quelques pistes pour mieux comprendre

⇒ calage altitudinal / largeur d'emboîtement



Les laisses de crue permettent de penser à un bon calage et une bonne dispersion d'énergie



érosion localisée au droit d'une aspérité

Le calage fin des débits doit être traduit en cote projet (ce qui n'est pas toujours aisé).

En cas de fort doute sur les données exploitées (par extrapolation, à partir de chroniques trop courtes...), il ne faut pas hésiter à majorer les altitudes retenues (ou à passer à de la banquette minérale).

! Il faut faire attention à avoir un terrassement bien horizontal* pour assurer une répartition des vitesses homogène lors des submersions. Chaque aspérité est susceptible de provoquer des dégâts importants sur une banquette jeune.

* pour les banquettes végétales



! Attention : les matériaux se tassent avec le temps (même après un bon compactage mécanique). Il faut compter une réduction des volumes de 10 à 12% pour du tout venant alluvionnaire, et de 20 à 30 % pour une terre argileuse* !

Remblais à l'avancement



Remblais ordonnés



Les techniques doivent être adaptées en fonction de la nature des matériaux travaillés, des niveaux d'eau (et des possibilités de travailler ou non à sec), de la pluviométrie etc.

Un cordon de granulats grossiers permet de limiter les risques de départs de MES vers le cours d'eau (effet barrière et filtre).
En plus de sa fonction de variable d'ajustement il crée des habitats intéressants pour la faune.



Pose de terre derrière un cordon pierreux

* Règles professionnelles, N°C.C.1 RD, oct 2013. Travaux de terrassements des aménagements paysagers.

- Photos et vidéos diverses hors diaporama



Quelques pistes pour mieux comprendre

La réalisation des banquettes nécessite donc une certaine anticipation des ajustements après travaux. Il faut savoir articuler l'assouplissement ou la rigidification des structures afin de réaliser un projet pertinent, résilient, pas cher, offrant une bonne diversité du tracé en plan (alternance d'angles marqués et de courbes plus souples) et en long (succession des faciès).

Si le départ de beaucoup de sédiments est un risque à éviter, il ne doit pas conduire à un sur-aménagement très cher et ne présentant pas forcément de bonnes garanties de tenue sur le moyen et long terme.



! Attention : les matériaux se tassent avec le temps (même après un bon compactage mécanique). Il faut compter une réduction des volumes de 10 à 12% pour du tout venant alluvionnaire, et de 20 à 30 % pour une terre argileuse* !

Remblais à l'avancement



Remblais ordonnés



Les techniques doivent être adaptées en fonction de la nature des matériaux travaillés, des niveaux d'eau (et des possibilités de travailler ou non à sec), de la pluviométrie etc.

Un cordon de granulats grossiers permet de limiter les risques de départs de MES vers le cours d'eau (effet barrière et filtre).
En plus de sa fonction de variable d'ajustement il crée des habitats intéressants pour la faune.



Pose de terre derrière un cordon pierreux

* Règles professionnelles, N°C.C.1 RD .oct 2013. Travaux de terrassements des aménagements paysagers.



«Pied-de-mouton» pour le tassement de matériaux terreux



Terre argileuse compactée au «Pied-de-mouton»



Terre lissée au godet : peu favorable à la prise d'un semis herbacé



Semis manuel dès la fin des travaux



Crénelage d'un talus perpendiculaire à la pente pour favoriser la reprise du semis

Certains travaux préparatoires (par exemple sous-couches d'étanchéité argileuses, réservation de la terre arable...), ou de finition (décompactage de la surface des sols, semis herbacé) nécessitent un matériel adapté et une finition assez soignée. Le suivi est nécessaire pour s'assurer d'une bonne efficacité (par exemple sur-semis, arrosage...)



Cas particulier des banquettes sous des ouvrages d'art



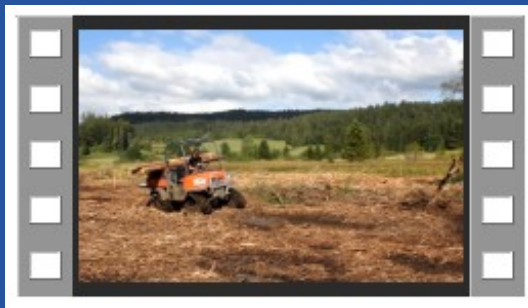
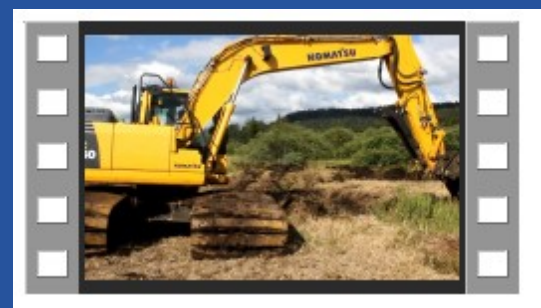
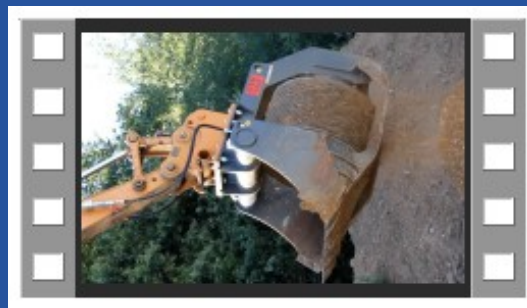
Les règles de dimensionnement sont (devraient être) du même type (longueurs, largeurs, calage altitudinal, choix des matériaux...).



! Attention à ne pas générer des contraintes hydrauliques non compatibles avec la continuité piscicole ou à la tenue des matériaux naturels

Il peut être privilégié l'emploi de banquettes en encorbellement qui ne réduisent pas la section d'écoulement de l'OH (attention aux points de raccordement)

- Voir le montage vidéo (base de connaissance)



- Présentation d'outils (base de connaissance)

Michel BRAMARD
ONEMA

Formation restauration hydromorphologique
Travaux à l'intérieur du lit mineur : banquettes et recharges en granulats



Tournage et montage CATER de Normandie

Réseau Technique Milieux Aquatiques de Normandie
Sérigny (61) - Formation RHM du 28 juin 2016