

**Journée technique**  
**La restauration sédimentaire des cours d'eau**  
**Du diagnostic à la réalisation et l'évaluation**

Toulouse 16 mai 20213

Les travaux de restauration hydromorphologique.

Principes et expériences

## La restauration du transit sédimentaire

### La restauration

- du matelas alluvial (de façon active ou passive)
- des processus d'alimentation ou réalimentation de la charge fine et grossière aspects qualitatifs et quantitatifs

La restauration des apports « naturels » (accès aux stocks latéraux (terrasses), apports de l'amont, des affluents, des fossés...)

C'est aussi la restauration des conditions hydromorphologiques permettant le transit partiel de ces sédiments en évitant :

- le départ massif vers l'aval
- le colmatage excessif (minéral, organique, le concrétionnement)

Attention : l'objectif de suppression complète d'impacts négatifs (apports excessifs de fines généralement) peut être antinomique avec le désir de renouvellement naturel des sédiments grossiers.



## La restauration du transit sédimentaire : objectifs

Stopper la dégradation du milieu (incision)

Restaurer certaines fonctionnalités :

- Ecoulements hyporéiques
  - Auto-épuration, régulation thermique, zone de nurserie et refuge
- Meilleure résilience des cours d'eau
- Habitats
- Aspect paysager
- ...

Le dimensionnement des travaux **et les moyens de suivis** doivent être calibrés en fonction de ces objectifs.

## RECHARGE EN GRANULATS OUTIL À TOUT FAIRE ?

La restauration du matelas et du transit ne doit pas être dissociée des autres composantes hydromorphologiques :

Gabarit, pente relative-tracé en plan, faciès d'écoulement, connectivité aux ZH etc. et des contraintes de gestion.

### **Ne pas confondre l'outil et l'objectif opérationnel**

- Reconstituer le matelas alluvial (ou améliorer sa consistance, son épaisseur)
- Rehausser un lit incisé
- Pincer un lit trop large
- Diversifier les pentes longitudinales et latérales (lit d'étiage, faciès d'écoulement)
- Reconstituer des habitats spécifiques (selon espèces cibles)
- Protéger des berges de façon souple (+ ou -)
- Constituer des ouvrages fusibles
- ...

Relativement facile à mettre en place, dans la majorité des cas cette technique ne peut restaurer suffisamment un gabarit trop grand, un tracé rectiligne, des faciès d'écoulement homogènes...

## Un large panel d'utilisation depuis une quinzaine d'années

A toute échelle



Restauration d'habitats (juv TRF)



Recharge radier : répartition des débits entre lit principal et secondaire  
+ habitats Grande mulette + frayère LPM

Rattraper une incision, restaurer un style fluvial





Remise en état de source piétinée  
(écoulements hyporhéiques, habitat agrion)



Protection souple de berge érodée



Création de gué



Création de radiers sur les points d'inflexion  
(rehausse de 0,5 - 0,6m)



Rivières de contournement de bief en remplacement d'un seuil infranchissable  
création ex nihilo



Resserrement d'un bief de moulin trop large  
(avec meilleure répartition des débits vers la rivière).



Comblement d'un plan d'eau, reconstitution du lit  
mineur de la source d'alimentation.



**Contournements d'étangs (et autres infrastructures ponctuelles ou linéaires)**





**Effacements d'étangs**



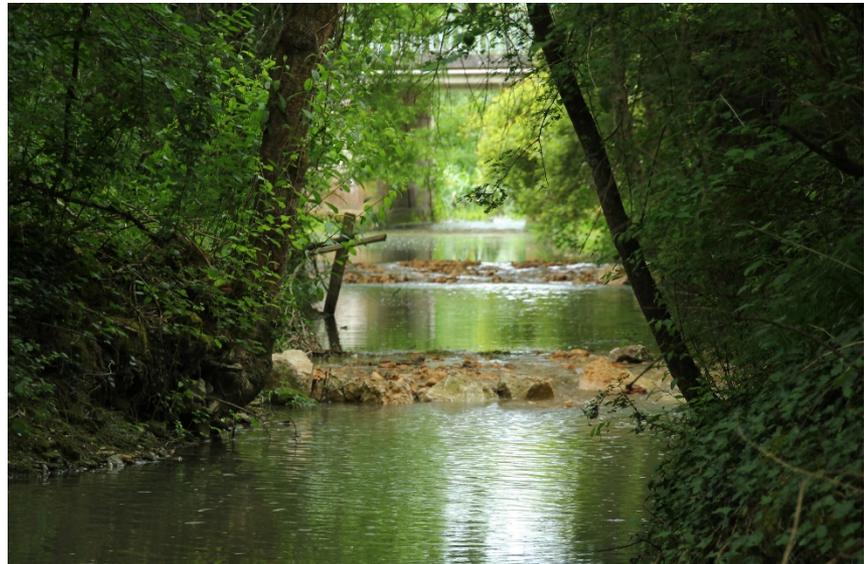


**Reméandrages, remises dans le talweg**





**Restauration continuité pont (succession de radiers)**



# Evolution des techniques

Adaptation aux contraintes spécifiques (par exemple faibles débits)  
et optimisation des coûts



2007

Rehaussement et pincement d'un lit rectiligne trop profond trop large uniquement avec de la recharge

Travail de la pelle (remodelage des berges) entre deux livraisons de granulats, optimisation des volumes, emploi de matériaux de récupération (argile, pierres de champs...)



2021

Rehaussement et pincement d'un lit trop profond et trop large rectiligne (sous-couche d'argile, banquettes terreuses).

## Infiltration excessive



Radiers trop courts, granulats trop grossiers ou trop homogènes, absence de fines...

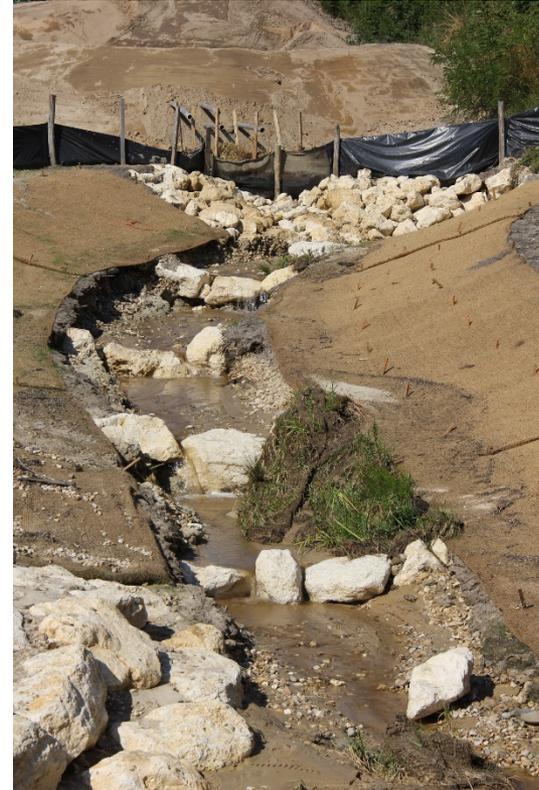
Récupération plus ou moins rapide selon le type de cours d'eau.



## Granulométrie trop fine



Granulométrie trop fine, disparition des granulats  
Réapparition d'un seuil infranchissable



Discontinuités entre les blocs, incision,  
obstacle...



Disparition du substrat,  
apparition roche mère (argile)

## Problèmes les plus fréquemment rencontrés

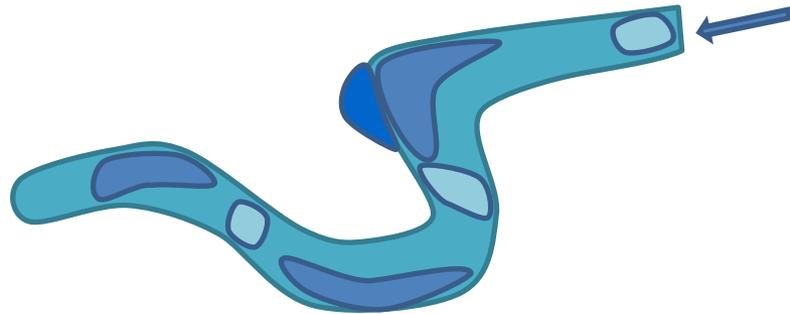
### Granulométrie trop grossière



Mauvais positionnement



Trop près d'un dalot : effet spray



Dans une courbe : granulats éjectés en aval

## Problèmes les plus fréquemment rencontrés

### Mauvaise répartition de la pente



Pente trop forte + contrainte latérale (effet spray)



Pente trop faible (mauvaise répartition amont-aval)



Pente trop forte (mauvaise répartition amont-aval)

! Pente d'équilibre

**Lit trop rectiligne**



2002



3 ans après travaux

Quelques mouvements de matériaux grossiers  
Glissement des plages de gravier frayère



12 ans après travaux

Marques généralisées d'incision

Rehaussement d'un lit rectifié très incisé

## Absence de matelas alluvial



Problèmes d'incision (et ou envasement selon gabarit, pente...) et dommages colatéraux

SSM : réponse biologique non ou peu positive.  
Temps d'ajustement très important.

Compléments granulats : au moins deux ans pour que les invertébrés se réinstallent complètement.

# Problèmes les plus fréquemment rencontrés

## + Mauvaises conditions de chantier



Sensibilité des sols, gestion nappe, gestion eaux latérales, pluies abondantes, période de travaux...



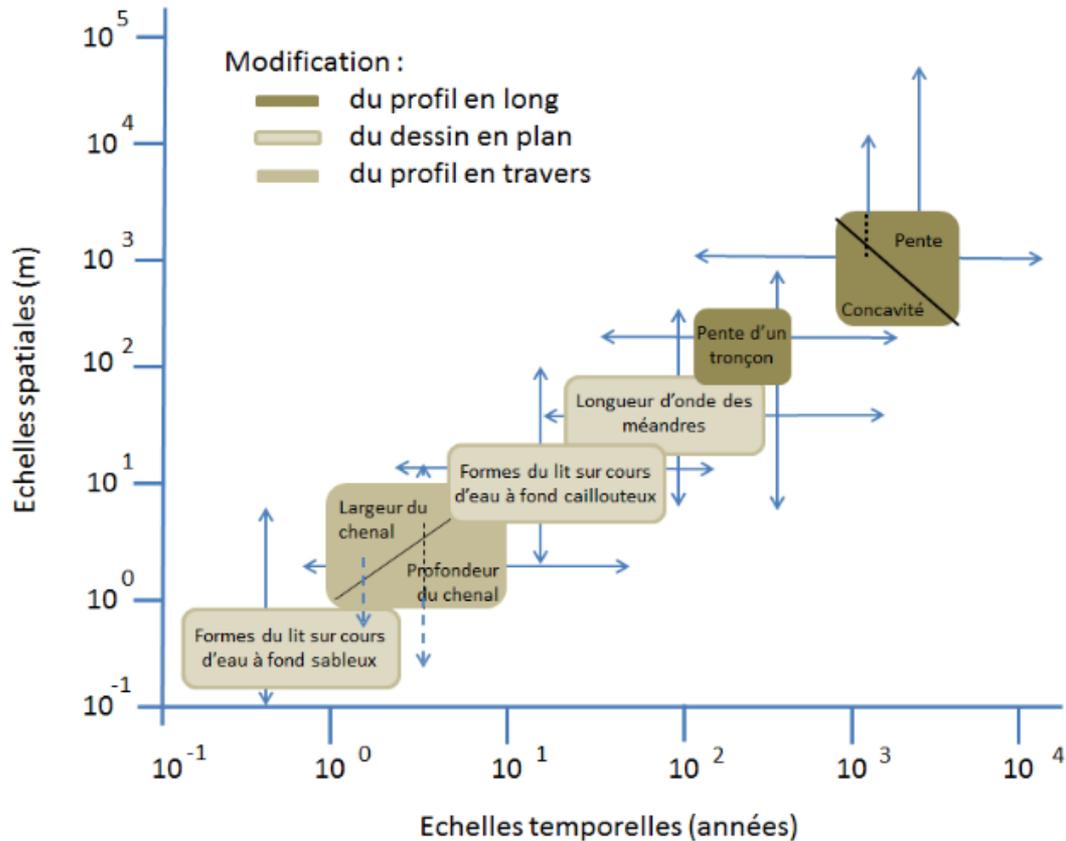


Figure 11 : Échelles spatiales et temporelles de l'ajustement des formes fluviales (d'après Knighton, 1984).



Estimer quelle part de sédiments va partir et quelle va être l'incidence sur les formes du lit mineur ?

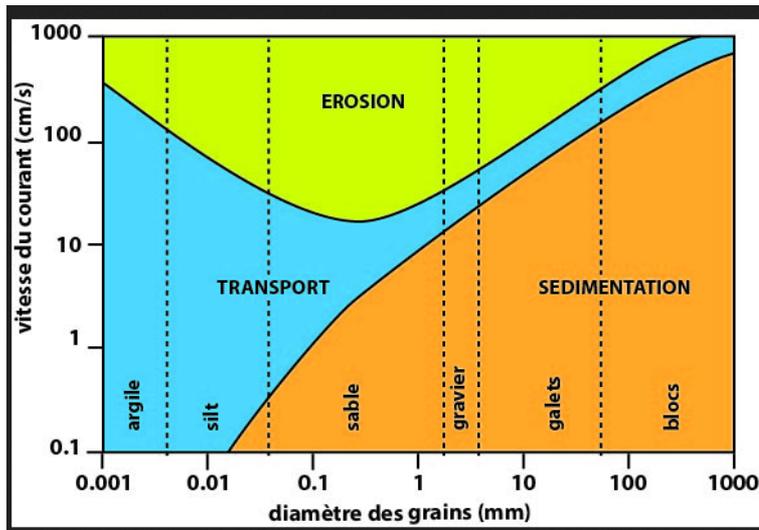


Diagramme de Hjulstörn.

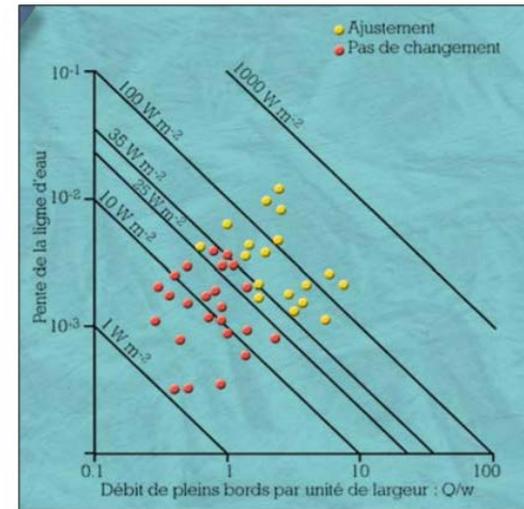
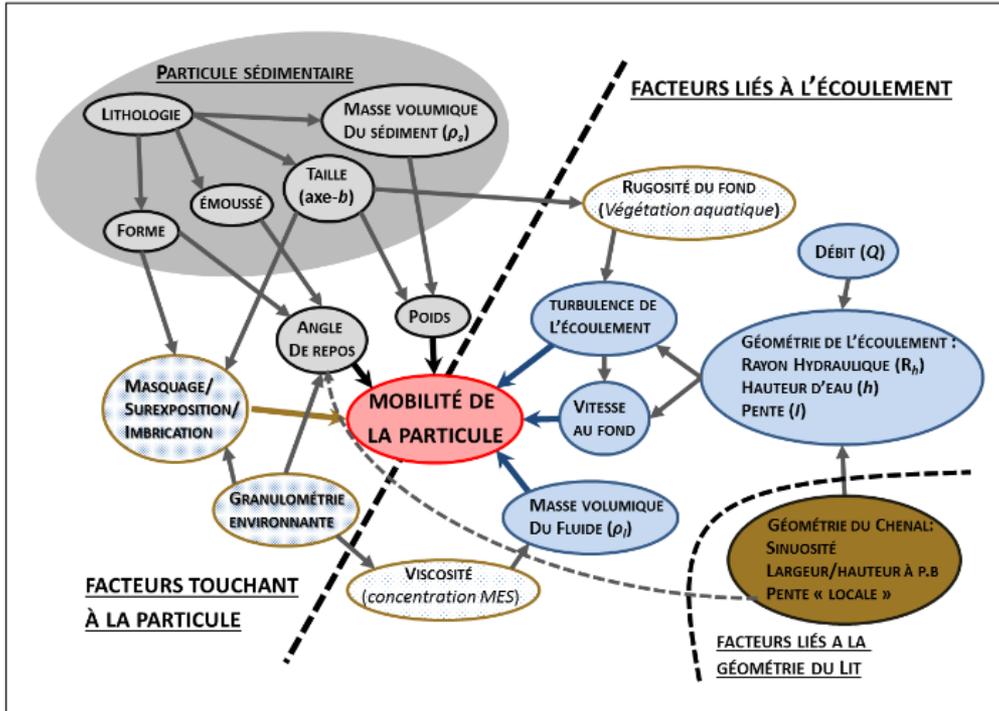


Figure 2. Seuils de puissance spécifique. Capacité des rivières à ajuster leur lit en fonction de leur puissance spécifique (Malavoi et Bravard, 2010, p. 41 d'après Brookes, 1988).

Les estimations sont souvent simplistes, vitesses de courant (moyennes) et puissance spécifique.

Nécessite de faire la séparation entre la force tractrice due à la résistance des grains qui est la seule responsable de la mise en mouvement et du transport des particules, et la force tractrice due à la résistance des formes.

# Importance de la nature des granulats employés



Mathieu Cassel. Caractérisation des particules dans les lits à galets : expérimentation, développements, méthodologiques et applications in situ. Géographie. Université de Lyon, 2017

**Parfois grosse difficulté à trouver des granulats adaptés.**

Origine géologique, forme des grains, étendue granulométrique, teneur en sédiments fins...

Figure 32. Facteurs qui influencent *in situ* la mise en mouvement et le déplacement d'une particule sédimentaire (modifié d'après Chapuis, 2012).

Le bon granulat constitue un facteur majeur (mais pas unique) de la réussite des travaux

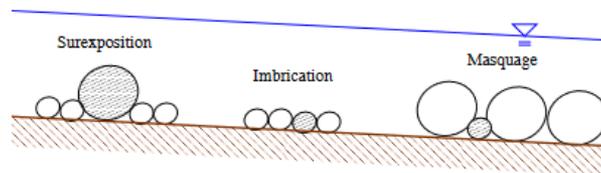


Figure 3.7. Schématisation des principes du masquage et de la surexposition dans l'imbrication des particules.

Estimer quelle part de sédiments va partir et quelle va être l'incidence sur les formes du lit mineur ?

TABLEAU II

Valeurs de débit de mise en mouvement (exprimé par rapport au débit à plein bord) et nombre de jours de charriage dans les rivières du massif ardennais

N°	Taille (km <sup>2</sup> )	Q* (m <sup>3</sup> /s)	Réurrence Q <sub>b</sub> (série partielle)	Q* de mise en mouvement (Q <sub>mm</sub> ) (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>mm</sub> /Q <sub>b</sub>	Réurrence Q <sub>mm</sub> (série partielle)	Nombre de jours de charriage/an	Série d'observations hydrologiques	Référence	
Rulles d'Anlier	1	16,2	1,3	0,40	1,05	0,80	0,35	19	1973-1980	Petit, 1987
Semois Membre	2	1 235	130	0,44	130	1	0,44	10,1	1980-2004	Gob <i>et al.</i> , 2005
Lesse Eprave	5	419	36	1,9	<Q <sub>b</sub>	<1	—	—		Petit <i>et al.</i> , 1996
Lesse Villers/lesse	6	1 090	105	1,0	<Q <sub>b</sub>	<1	—	—		Petit <i>et al.</i> , 1996
Lhomme Eprave	8	474	52	0,92	35	0,7	0,63	12	1969-1991	Petit <i>et al.</i> , 1996
Ourthe orientale	10	192	21	1,2	8,4	0,4	—	15		Petit <i>et al.</i> , 1996
Ourthe Hotton	11	940	85	0,61	81	0,95	0,55	5,2	1979-2005	
Ourthe Durbuy	12	1 215	100	0,54	98	0,98	0,53	5,3	1997-2005	
Ourthe Hamoir	13	1 607	160	1,10	120	0,75	0,52	6,3	1966-2005	
Ourthe Sauheid	14	2 904	300	0,97	230	0,77	0,49	6,3	1980-2005	Petit <i>et al.</i> , 1996
Belleval	15	12,5	0,8	—	—	—	—	—	1972-1973	Mercenier, 1973
Mer	16	1,4	0,18	—	—	—	—	—	1975-1975	Mercenier, 1973
Aisne Juzaine	18	183	23,8	1,51	10,9	0,46	0,30	11	1975-2005	
Chavanne Bra	19	12	2,9	—	1,3-1,7 <sup>(a)</sup>	0,45-0,6 <sup>(a)</sup>	—	—	2002-2005	
Lienne Lorcé	20	146	21,3	0,66	9,4	0,44	0,30	16	1977-2005	
Amblève Targnon	21	807	86	0,53	62	0,72	0,41	10,5	1998-2005	Houbrechts, 2005
Waidage (1)	22	0,26	0,04 <sup>(b)</sup>	—	0,035	0,88	0,6 <sup>(e)</sup>	0,2	1989-1992	Assani et Petit, 1995
Waidage (2)	22	0,26	0,04 <sup>(b)</sup>	—	0,025	0,63	0,2 <sup>(e)</sup>	2,0	1989-1992	Assani et Petit, 1995
Hoëgne Solwaster	—	19,4	—	—	3,12	—	0,26	8,6	1993-2005	
Hoëgne Pepinster	23	189	36,8	1,0	17	0,46	0,34	8,3	1971-2005	
Vesdre Pepinster	24	565 <sup>(a)</sup>	90	2,8 <sup>(c)</sup>	53	0,59	0,5	4,9	1992-2005	
Wavelinse	25	4,3	0,2	—	0,15	0,75	—	11	1973-1975	Dave, 1975
Berwinne Dalhem	26	118	13,8	1,5	4	0,29	0,20	15,5	1967-2005	
Gueule Sipenaken	27	121	12,5	0,9	8	0,64	0,35	4,1	1994-2005	
Gueule Hommerich	28	144	14,2	0,9	10	0,70	0,45	3	1970-2005	
Gueule Meersen	29	329	24	2,4	24	1	2,4	0,8	1970-2005	

\* Débit journalier. Les débits à plein bord de ces stations ont été publiés dans Petit et Pauquet (1997) et dans Petit *et al.* (2005).

Ru des Waidages : (1) système avec embâcles, (2) système sans embâcles.

<sup>(a)</sup> En aval de la confluence avec la Hoëgne.

<sup>(b)</sup> Valeur du débit dont la récurrence est de 1 an.

<sup>(c)</sup> Régime des débits influencé par des barrages écrêteurs.

<sup>(d)</sup> Mobilisation dans le secteur en *step-pool* pour 0,45 Q<sub>b</sub> mais, dans le secteur à méandres, la mobilisation ne débute que pour 0,6 Q<sub>b</sub>.

<sup>(e)</sup> Inverse du nombre d'événements atteints ou dépassés par an.

Les gabarits hydrauliques des TBV sont très fortement sur-estimés (sur cette région 0,5an voire moins), pour 0,9 à 1,5 ans pour les grands cours d'eau.

Les durées de charriage sont très variables mais peuvent être très faibles.

Le début du charriage démarre souvent à partir de 0,5QPB pour les petits CE

Importance de la taille des granulats, du classement, de la disponibilité.

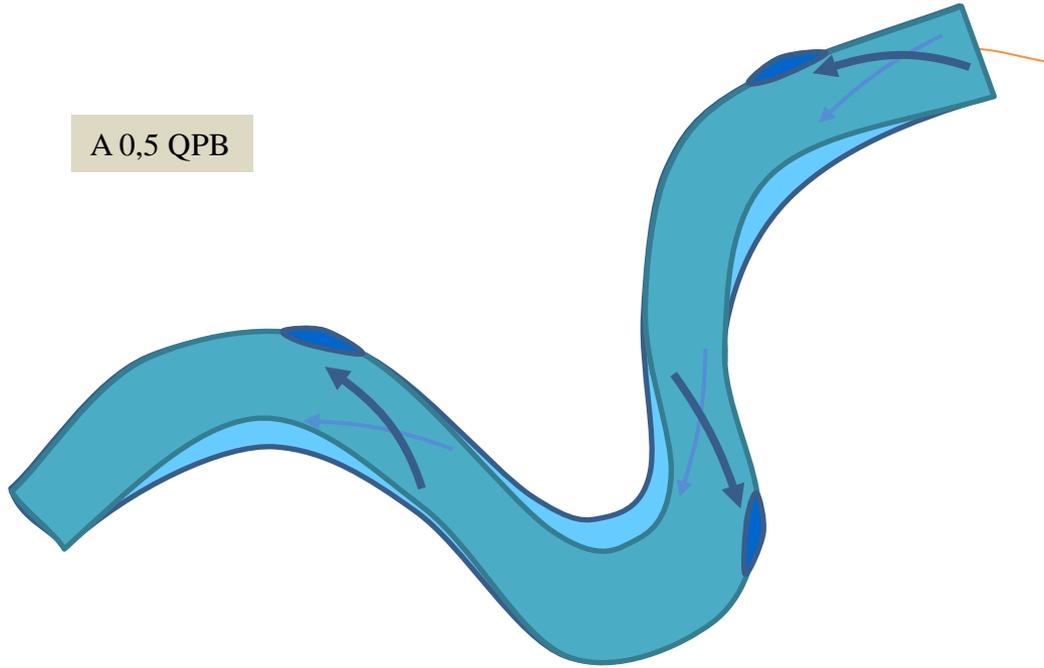
Importance de la sinuosité, des variations de formes...

Importance du bois mort sur les très petits cours d'eau forestiers

**Les Travaux de terrassement nécessitent de très forts sous-dimensionnement**

Estimer quelle part de sédiments va partir et quelle va être l'incidence sur les formes du lit mineur ?

A 0,5 QPB



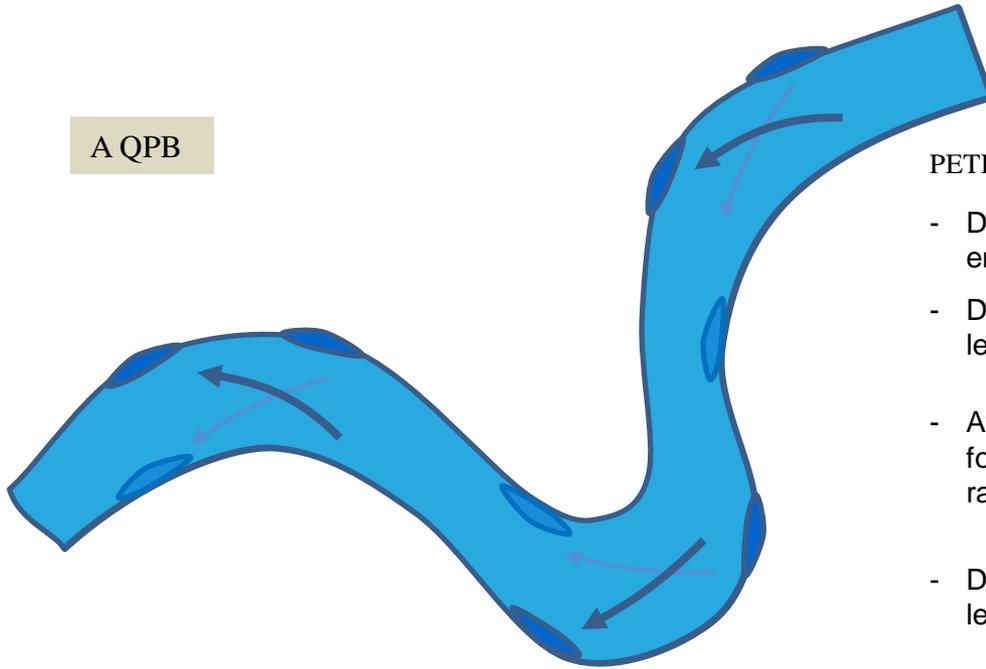
-  Radier
-  Fosse
-  Ecoulement de fond
-  Ecoulement de surface

Inspiré de Petit F. 1989



Estimer quelle part de sédiments va partir et quelle va être l'incidence sur les formes du lit mineur ?

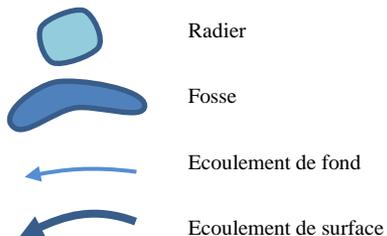
A QPB

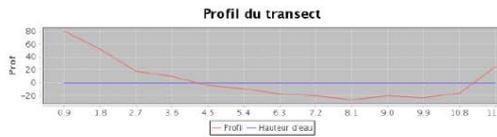
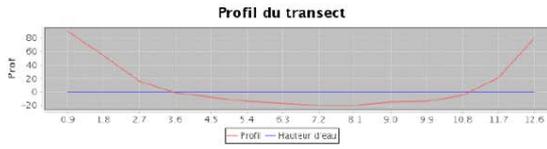
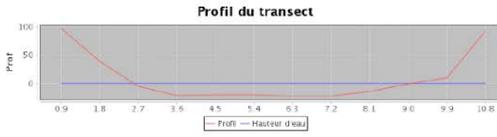
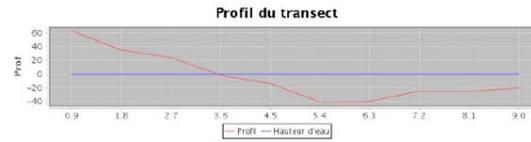


PETIT F. observe sur la Rulles :

- Des variations longitudinales très fortes des forces tractrices en lien avec des variations topographiques marquées
- De plus fortes variations latérales des forces tractrices dans les fosses
- Avec l'augmentation du débit (entre  $Q_m$  et  $Q_{PB}$ ) une plus forte augmentation des forces tractrices dans les fosses par rapport au radier (de  $5\text{Nm}^{-2}$  à  $15\text{Nm}^{-2}$  pour les fosses, de  $5$  à  $7\text{Nm}^{-2}$  pour les radiers).
- Des forces tractrices très élevées (pics jusqu'à  $25\text{Nm}^{-2}$ ) dans les fosses pour  $Q_{PB}$
- Avec ces puissances (de  $10$  à  $15\text{Nm}^{-2}$ ) des cailloux fins (20-30mm) sont arrachés des fosses, alors que seuls des graviers fins (10mm) arriveront à franchir les radiers.
- Il faut sur ce tronçon de la Rulles des crues  $>Q_{PB}$  pour que des graviers franchissent les radiers.

Les forces tractrices se décalent  
avec la montée des eaux





Par exemple sur le site démonstration de la HEM, il a été constaté après les premières crues un approfondissement des fosses et en engraissement des radiers

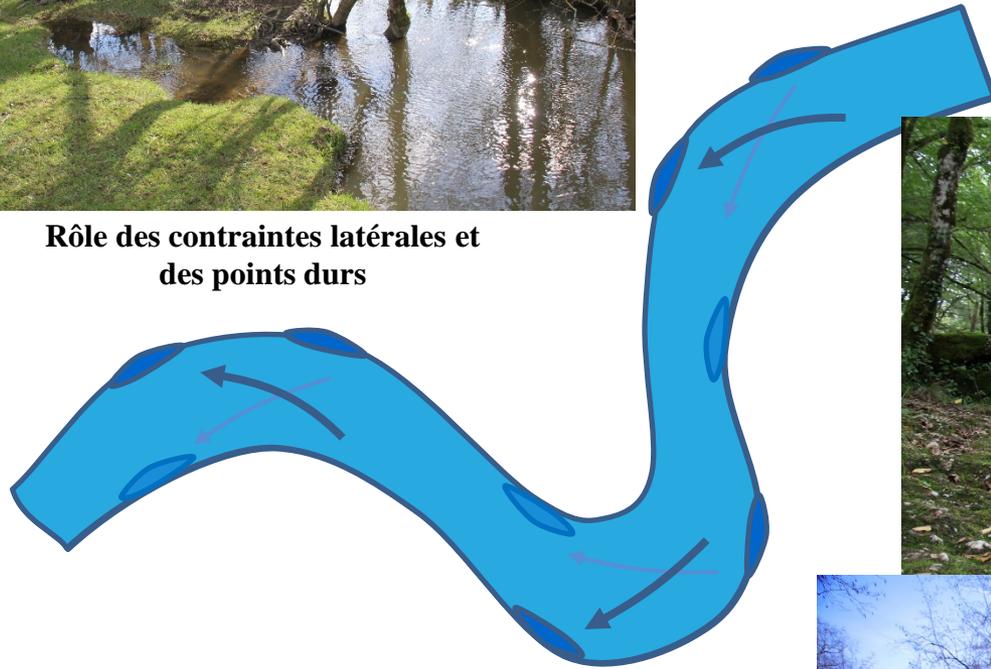
C'est semble-t-il le cas également sur la Saye (contexte sableux), travaux automne 2022, relevés CARHYCE à faire en 2023



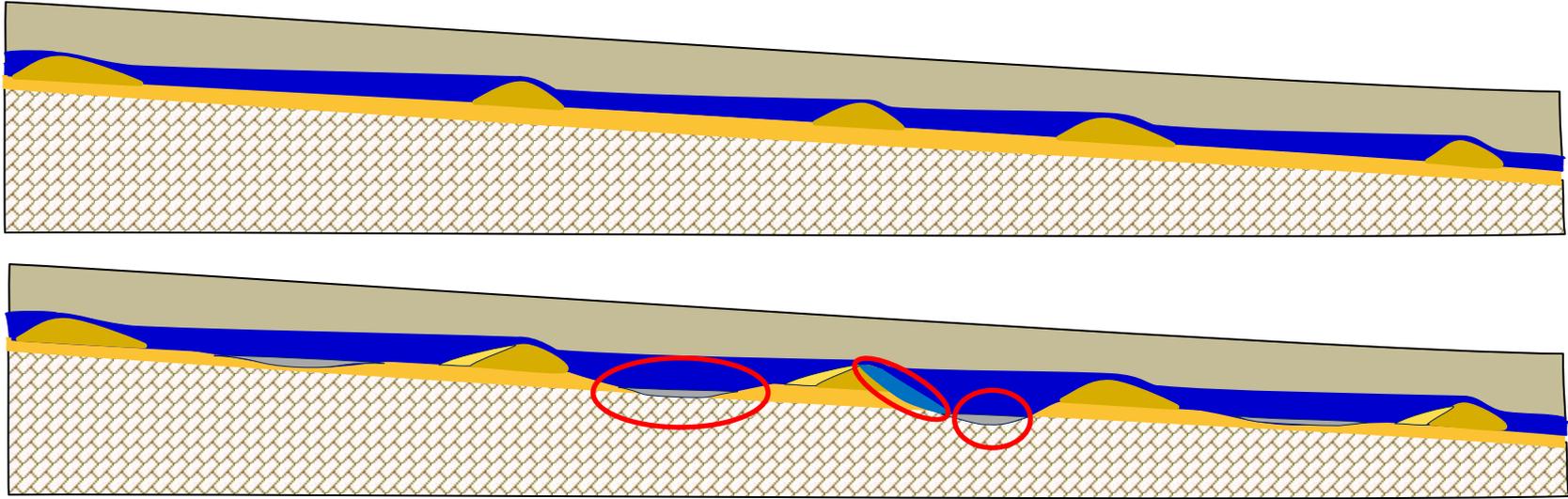
Carte des sites de démonstration.



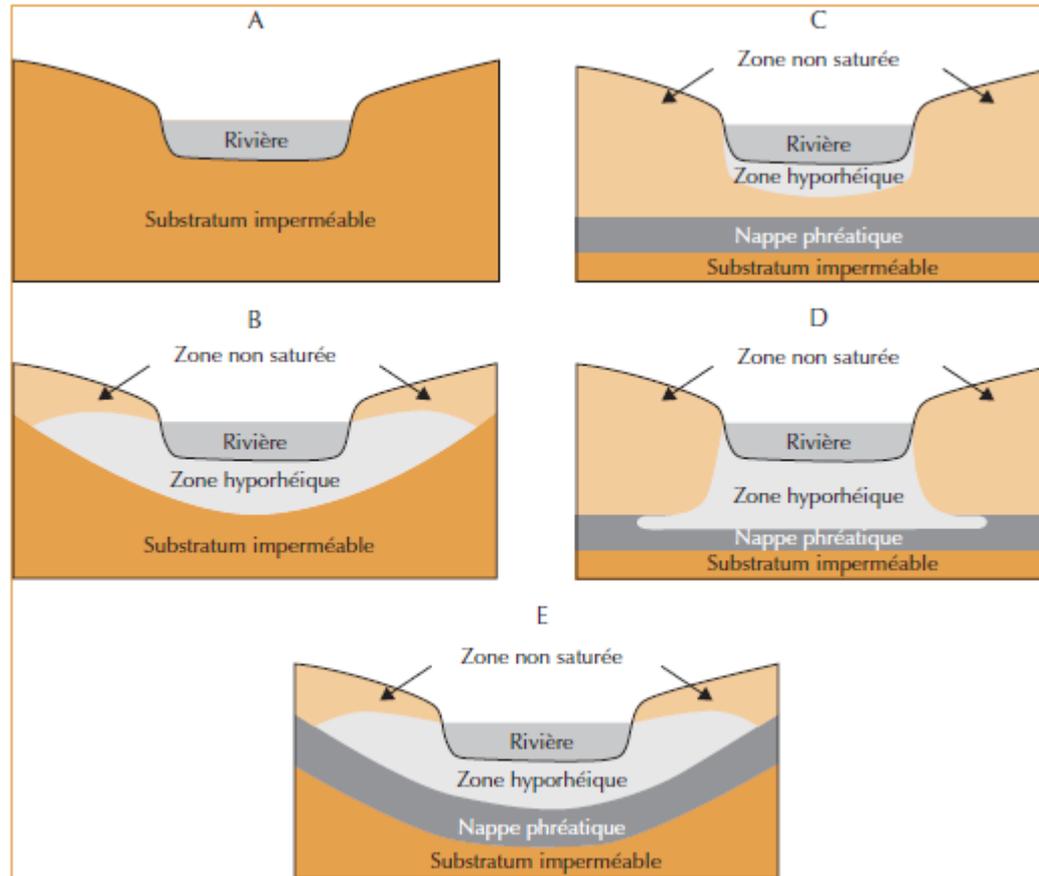
**Rôle des contraintes latérales et des points durs**



Exemple de réaction après aménagement de radiers.



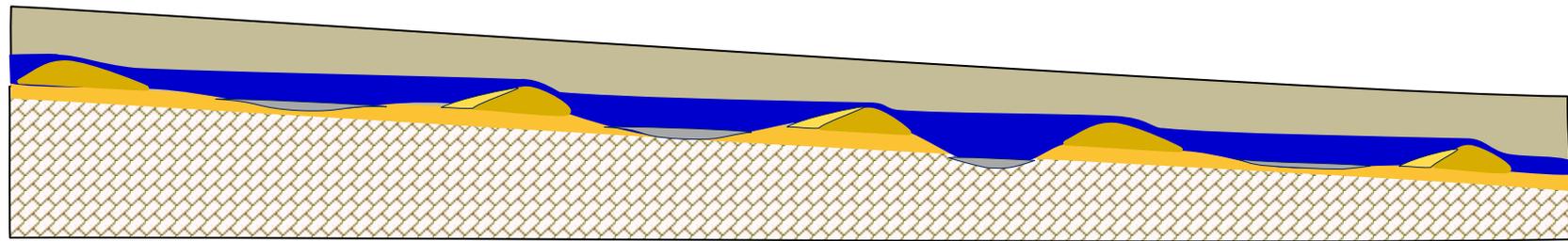
## Restaurer les écoulements hyporhéiques



▲ Figure 1 – Les différents types de zone hyporhéique. Modifié d'après Malard *et al.* (2000).

Datry T. et Al., 2008, La zone hyporhéique une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau.

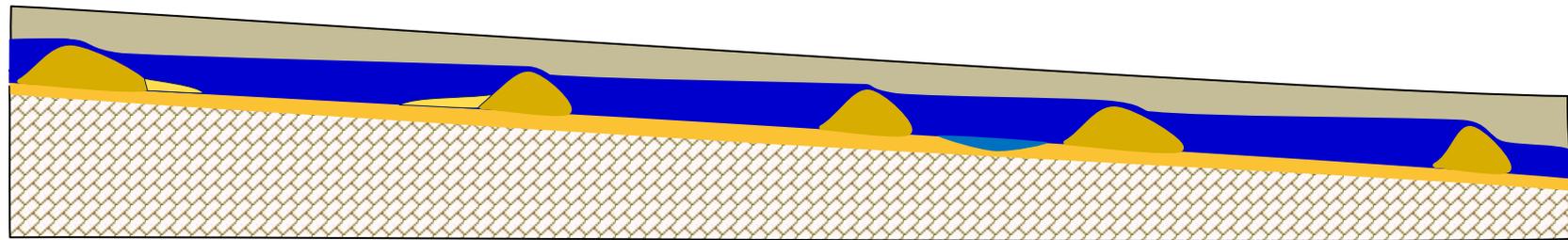
Exemples de réaction après aménagement.



QJX à  
plein bord

Q5 - Q10.

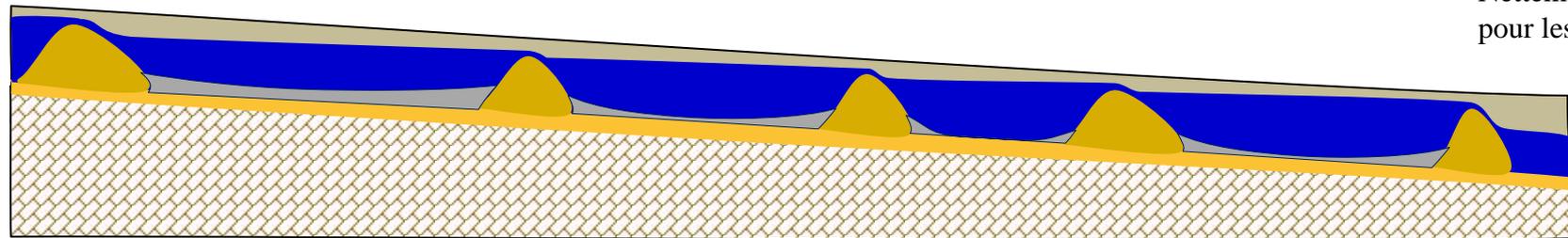
Faible rehaussement des lignes d'eau



Q1,5.Q2

Fort rehaussement des lignes d'eau

Nettement moins  
pour les TBV



0,5Q1 - Q1.

Très fort rehaussement des lignes d'eau

Prévoir un sous dimensionnement de 10 à 30%  
pour les réajustements de forme

Exemples de réaction après  
aménagement sur un lit emboîté.



1<sup>ère</sup> crue après aménagement

Banquettes légèrement trop basses

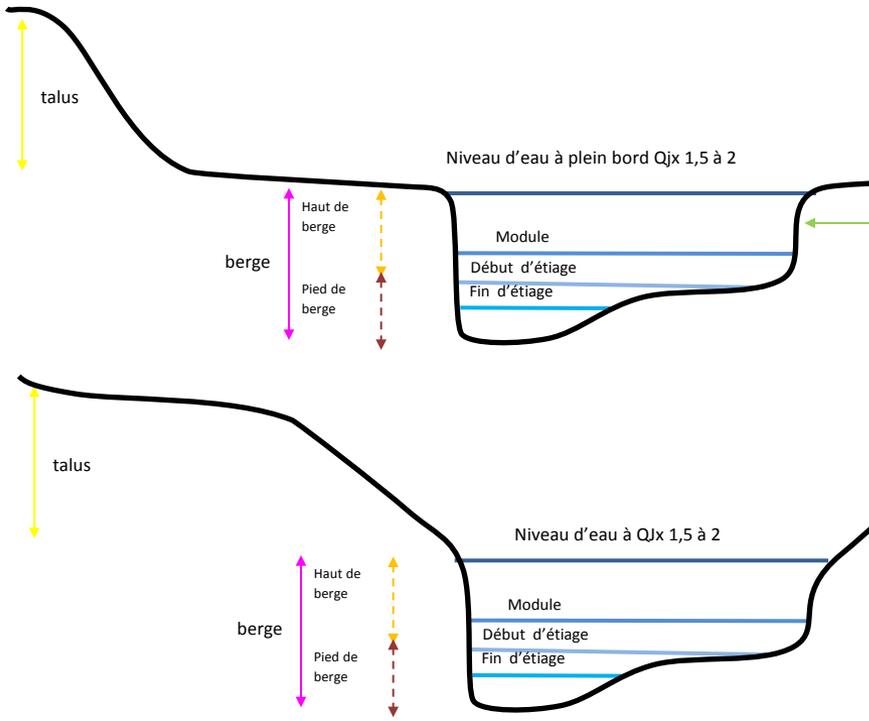


7 ans après

Bon calage



# Privilégier un lit emboîté à un lit en V



Banquettes trop basses



Large emboitement



Faible emboitement

**Une granulométrie peu étendue et de faible taille peut être une option en zone d'enjeux inondation (mais nécessite un renouvellement + ou - fréquent).**



Radier fusible en contexte de contrainte d'inondations fortes



**Ne pas oublier la gestion**

Merci de votre attention !

