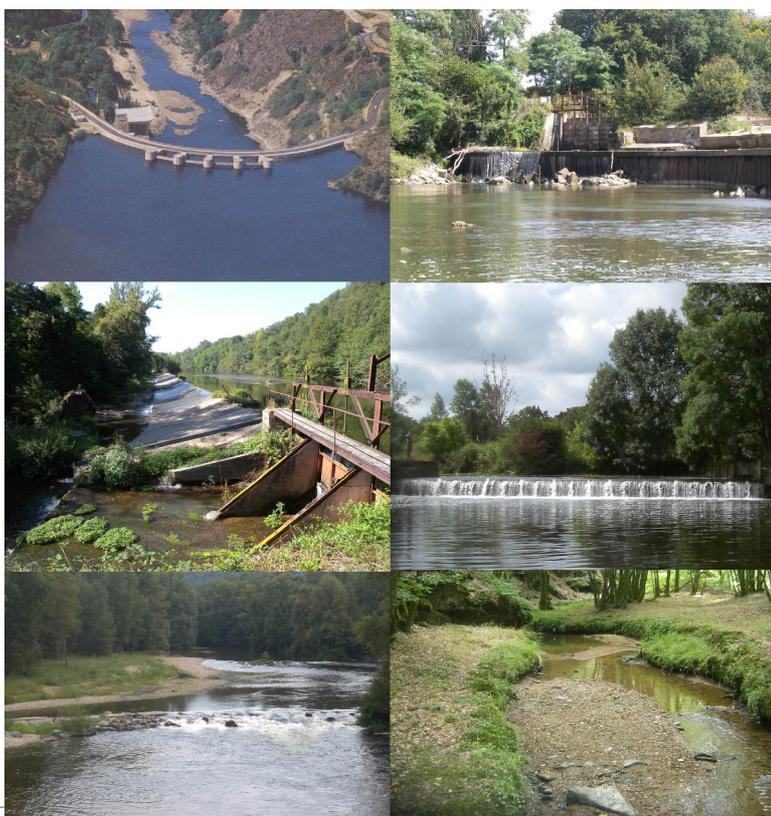


0706/2013

Synthèses des connaissances & proposition d'une méthode d'évaluation de l'impact des ouvrages transversaux sur la continuité sédimentaire des cours d'eau



Certifiée
QUAL/2007/30046b



Direction régionale de l'Environnement,
de l'Aménagement et du Logement Centre

www.centre.developpement-durable.gouv.fr

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

Présent
pour
l'avenir

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
V1.0	25/08/11	Projet
V1.1	20/09/11	Projet
V1.2	27/07/12	Projet
V1.3	01/10/12	Projet
V2.0	22/04/13	Version 2
V2.1	02/05/13	Version 2.1
V2.2	07/06/13	Version 2.2

Affaire suivie par

Stéphane BRAUD - DREAL Centre / SLBLB
Tél. : 02.36.17.41.89
Courriel : stephane.braud@developpement-durable.gouv.fr

Rédacteurs

Stéphane BRAUD - DREAL Centre / SLBLB

Adrien ALBER - DREAL Centre / SEB

Ce document a été également élaboré grâce :

- aux contributions de Jean-Noël Gautier (Agence de l'Eau Loire-Bretagne), Stéphane Rodrigues (Université de Tours) et Pierre Steinbach (Onema),
- et aux conseils de J.R. Malavoi (EDF), de Nicolas Forray (Directeur de la DREAL Centre) et de Jérôme Dumont (DDT de l'Ardèche).

Pour la rédaction de ce document, nous nous sommes inspirés d'un certain nombre de publications (cf. références pages 66) et nous nous sommes tout particulièrement appuyés sur l'ouvrage « Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière » (J-R Malavoi et al., 2011).

Relecteurs

Gérard DEGOUTTE - Irstea

Pierre STEINBACH - Onema

Johann MOY - Agence de l'Eau Loire-Bretagne

Benoit CAMENEN - Irstea

Alain RECKING - Irstea

AVANT-PROPOS

Éléments de Contexte

Longtemps considérés comme une ressource disponible ou comme une gêne pour l'écoulement des crues, les sédiments grossiers transportés par les cours d'eau sont aujourd'hui clairement identifiés comme un facteur essentiel permettant de préserver et de restaurer l'équilibre hydromorphologique et écologique de la rivière. Ce transport des éléments grossiers est, par conséquent, un contributeur essentiel pour l'atteinte du bon état écologique des cours d'eau.

Dans ce contexte, le législateur a souhaité introduire la notion de « **transport suffisant** » qu'il faut assurer sur certains cours d'eau (article L214-17 du code de l'Environnement). Ainsi, s'ils « empêchent le bon déroulement du **transport naturel** des sédiments », les ouvrages transversaux sont considérés comme des "obstacles à la continuité écologique" (article L214-109 du code de l'Environnement)». Cependant, aucune définition juridique n'existe pour déterminer le caractère suffisant ou naturel du transport assuré.

Objectif et public visé

Les fiches suivantes ont pour objectifs de faciliter l'application de cette législation et de proposer une démarche visant à apprécier l'impact des ouvrages transversaux (seuils et barrages) sur la continuité sédimentaire. Elles s'adressent aux techniciens des structures en charge de la mise en œuvre administrative ou opérationnelle de cette nouvelle réglementation (services de police de l'eau, chargés de mission « continuité écologique », syndicats de rivières, bureaux d'études, etc.)

« Encore une étude ! »

A ce jour, il n'existe pas de méthode simple et rapide permettant d'évaluer l'impact des ouvrages transversaux sur la continuité sédimentaire. Nous proposons dans ce document une démarche pour répondre à l'objectif visé tout en tenant compte des délais courts imposés par la réglementation. Une partie des actions que nous préconisons sont effectivement des compléments aux approches habituellement mises en œuvre lors des diagnostics d'ouvrages. Toutefois, nous avons essayé de proposer pour chaque étape des approches allégées, lorsqu'elles pouvaient permettre de répondre à la question posée.

Comment intégrer cette nouvelle préoccupation dans un programme d'intervention déjà avancé ?

L'enjeu de la continuité sédimentaire est une préoccupation nouvelle qui n'a pas été initialement intégrée dans un grand nombre de programme d'interventions en cours de définition. Cette intégration ne doit pas annihiler tout le travail produit et les décisions prises lors de la concertation réalisée. S'il est indispensable que toutes les nouvelles études intègrent cet enjeu, il nous semble raisonnable d'accepter une phase de transition pour les projets déjà engagés. Cependant, l'attitude à adopter sera différente selon l'ambition de la solution retenue et selon le montant financier engagé par les partenaires du projet.

Avertissements

La continuité écologique n'est traitée, dans ce document, qu'à travers le rétablissement de la continuité sédimentaire au droit des ouvrages transversaux. Bien sûr, la restauration d'un cours d'eau doit être abordée plus globalement afin d'apporter des solutions opérationnelles qui répondent à l'ensemble des autres composantes de la continuité écologique (continuité pour la libre circulation des poissons migrateurs, rétablissement des échanges sédimentaires latéraux entre la plaine alluviale et le lit mineur) mais également à d'autres objectifs directement liés (exemples : rétablissement de l'hydrologie naturelle d'un cours d'eau, réduction du réchauffement de l'eau en étiage et des effets de l'eutrophisation favorisés dans la retenue d'un ouvrage, etc.).

Même si le présent document cible principalement le rétablissement de la continuité du transport des sédiments grossiers, les ouvrages transversaux peuvent également générer un excès de sédiments fins, qui peuvent contribuer à la dégradation de la qualité de certains habitats (quelques cas particulier d'altération de la continuité du transport des sédiments fins sont traités dans ce document).

Ce document évolutif intégrera au fil du temps les conclusions des groupes de travail nationaux et consolidera son assise grâce aux différentes expérimentations réalisées sur le bassin.

SOMMAIRE

PARTIE A : SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES

- **Fiche N°1** – Quels enjeux ? (page 5)
- **Fiche N°2** - De l'origine des sédiments au transport suffisant (page 10) ou fonctionnement naturel et dysfonctionnement.
- **Fiche N°3**- Ouvrages transversaux : Typologie et principaux impacts (page 17)

PARTIE B : DÉMARCHE D'ÉVALUATION DE L'IMPACT DES OUVRAGES TRANSVERSAUX SUR LA CONTINUITÉ SÉDIMENTAIRE DES COURS D'EAU

- **Fiche N°4** – Vers une meilleure connaissance de l'enjeu sédimentaire sur le bassin Loire-Bretagne (page 21)
- **Fiche N°5** – Diagnostic à l'échelle d'un petit bassin versant (page 24)
- **Fiche N°6** – Diagnostic détaillé à l'échelle d'un seuil ou d'une série de seuils (page 30)

PARTIE C : GESTION DES OUVRAGES

- **Fiche N°7** - Préconisations de gestion des seuils (page 39)
- **Fiche N°8** - Préconisations de gestion des barrages (page 42)

PARTIE D : ANNEXES

- **ANNEXE 1** – Outils et protocoles de mesures (page 45)
- **ANNEXE 2** - Des formules pour l'étude des conditions hydrauliques... (page 64)
- **ANNEXE 3** - Quelques références pour aller plus loin (page 66)
- **ANNEXE 4** – Glossaire (page 68)

FICHE 1 : QUELS ENJEUX ? OU POURQUOI S'INTÉRESSER AU TRANSPORT SÉDIMENTAIRE ?

DISTINCTION ENTRE SÉDIMENTS GROSSIERS ET SÉDIMENTS FINS

On distinguera dans ce document :

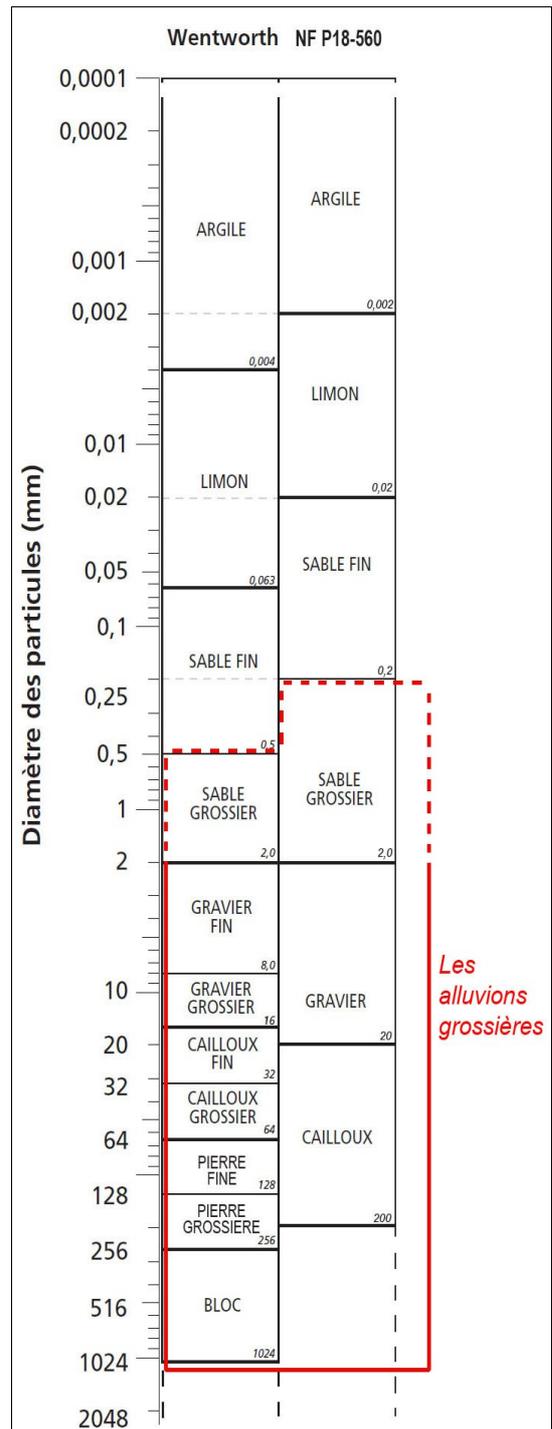
- les sédiments dits « fins » dont le diamètre est inférieur à **0,2 - 0,5 mm**
- les sédiments dits « grossiers » dont le diamètre est supérieur à **0,2 - 0,5 mm**.

La limite fixée entre « sédiment grossier » et « sédiment fin » est relative. Le positionnement des sables dans l'une ou l'autre de ces catégories dépend à la fois de l'objectif visé et du contexte géomorphologique (rivière graveleuse de tête de bassin versant, estuaire, etc). De plus, selon les auteurs et les disciplines (géologie, pédologie, travaux routiers, etc.), plusieurs échelles granulométriques ont été définies afin de caractériser la taille des grains. L'illustration N°1 compare par exemple l'échelle granulométrique de Wentworth, sur laquelle s'appuient plusieurs protocoles décrits dans ce document, et celle issue de la norme française NF P18-560.

Les sédiments « fins » et « grossiers » se distinguent par :

- leurs propriétés physiques vis-à-vis du transport solide (mode de transport, cohésion, etc.)
- leur contribution à la morphologie des cours d'eau
- leur degré d'attractivité exercé sur la faune et la flore.

Les sédiments charriés sur le fond d'une rivière correspondent à la fraction la plus grossière du flux sédimentaire total transporté par les lits fluviaux. Ils constituent ce qu'on appelle la « charge de fond ».



Ill. 1: Comparaisons de deux échelles granulométriques

RÔLE DE LA CHARGE DE FOND DANS L'ÉQUILIBRE DYNAMIQUE

Les rivières alluviales tendent à ajuster leur morphologie, définie par des **variables de « réponse »** (nombre de chenaux en eau, sinuosité, largeur, profondeur, etc), à des **variables de « contrôle »** qui leur sont imposées.

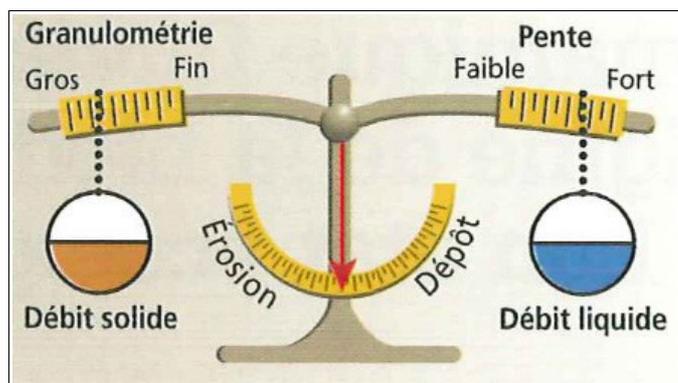
Les deux principales variables de contrôle sont:

- le **débit liquide** qui, couplé à la pente du lit détermine la capacité du cours d'eau à éroder et transporter les sédiments ;
- les **apports sédimentaires** au cours d'eau (charge de fond) et leur caractéristique (granularité dominante).

Ce fonctionnement se traduit par une variabilité de la morphologie des cours d'eau dans:

- **l'espace**, en particulier d'amont en aval d'un même bassin versant du fait de l'évolution de la pente de vallée, du débit moyen, etc ;
- le **temps**, si les variables de contrôle d'un cours d'eau donné changent (par exemple, augmentation du débit moyen).

La **balance de Lane** (illustration 2) schématise les principes de la dynamique fluviale : De manière très simplifiée, la dynamique fluviale peut donc être présentée comme l'oscillation permanente de l'aiguille d'une balance en fonction de la variation des apports en sédiments grossiers (débit solide) et des variations hydrologiques (débit liquide).



Ill. 2: Balance de Lane (1955) © Onema

Si les variables de contrôle fluctuent tout en restant stationnaires à moyen terme, les processus d'érosion et de dépôt se compensent globalement à l'échelle du tronçon : la morphologie du cours d'eau « oscille » autour d'un état dit d'« **équilibre dynamique** ».

Si les variables de contrôle changent de manière systématique et durable à moyen terme (du fait d'un changement climatique ou d'une extraction de sédiments par exemple), les processus d'érosion et de dépôt ne se compensent plus à l'échelle du tronçon : la morphologie du cours d'eau s'ajuste de manière significative (changement de style fluvial, incision du lit par exemple). Le cours d'eau est dit **en déséquilibre**.

Les causes à l'origine d'un déséquilibre ne sont pas systématiquement attribuables aux activités anthropiques. Le changement climatique à la fin du petit âge glaciaire a, par exemple, contribué aux changements morphologiques observés sur certains cours d'eau.

RÔLE ÉCOLOGIQUE DES SÉDIMENTS

Rôle écologique des sédiments grossiers

Les sédiments grossiers contribuent au bon fonctionnement des biocénoses aquatiques et terrestres, notamment celles inféodées aux zones courantes et aux bancs alluviaux exondés une partie de l'année.

Le substrat alluvionnaire joue différentes fonctions dans les cycles biologiques:

- **habitat d'alimentation** du fait des interstices résultant de l'agencement des alluvions grossières dans lesquels circulent ou se stockent la matière organique et des organismes vivants,
- **habitat de reproduction** en tant que support de ponte pour les poissons et les invertébrés sur les substrats submergés, et pour les oiseaux, les insectes et autres invertébrés sur les substrats émergés,
- **habitat de refuge** vis-à-vis des conditions hydrauliques et des prédateurs (ex: protection des œufs, zone de croissance des juvéniles, camouflage de certaines espèces, refuge pour les invertébrés, etc.)



III. 3: Invertébrés aquatiques (*simuliidae*) vivant sur des éléments grossiers © G. Archambaud

Le substrat participe également à l'**auto-épuration** de l'eau en favorisant les processus biologiques de dégradation de la matière organique et les cycles biogéochimiques (cycle de l'azote et du phosphore notamment) à la surface (biofilm) et au sein du substrat submergé.

Ces fonctions sont déterminées par les caractéristiques sédimentaires du lit (taille des particules, épaisseur, hétérogénéité, porosité, conductivité hydraulique), sa dynamique (transport des sédiments, formation de dépôts, etc), et par les conditions hydrodynamiques pour les habitats aquatiques (vitesses de l'écoulement, hauteur d'eau, turbulence).

Il est important de noter que tous les animaux et végétaux n'utilisent pas les mêmes granulométries ni les mêmes caractéristiques hydrodynamiques (vitesse et hauteur d'eau), d'où l'importance de la variété des dépôts alluvionnaires (J. Charrais, 2013).

Il est également nécessaire de rappeler que les fonctions biologiques des habitats aquatiques ne sont pas déterminées uniquement par la structure physique et la dynamique du substrat. De nombreux autres facteurs entrent en jeu: l'hydrologie, la physico-chimie de l'eau, l'ensoleillement, la température, la ripisylve.

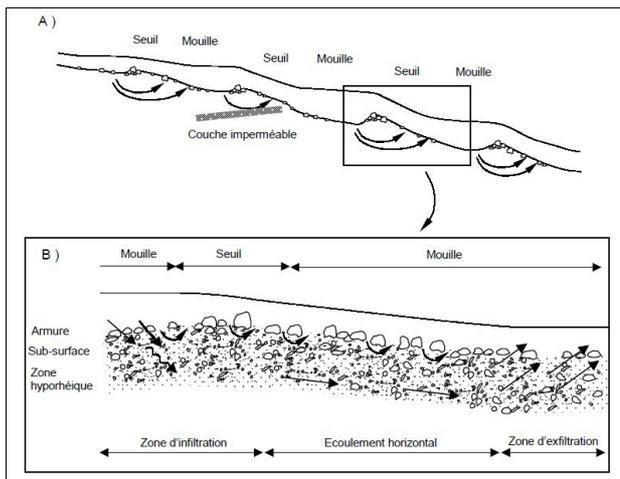


III. 4: Truite fario en pleine reproduction © L. Perrin

Rôle écologique des sédiments fins

Les sédiments fins (des argiles aux sables fins) transitent naturellement dans les cours d'eau. Ils peuvent jouer un rôle important dans certains contextes (basses vallées, estuaires, deltas).

Cependant, l'accumulation de sédiments fins dans des lits à sédiments grossiers peut avoir un impact écologique important.



III. 5: Écoulements d'eau à plusieurs échelles entre la surface et la zone hyporhéique* (S. Gayraud et al., 2002) : A) Échanges hydriques induits par les discontinuités géomorphologiques et géologiques ; B) Détail des mouvements hydriques au sein d'une séquence mouille-seuil-mouille.

DYSFONCTIONNEMENTS SÉDIMENTAIRES

Impacts d'un déficit sédimentaire

Un cours d'eau en déficit sédimentaire est en déséquilibre avec les flux hydrologiques, il tend à ajuster sa morphologie (profil en long, largeur, profondeur). Cet ajustement peut induire des impacts aussi bien sur le fonctionnement écologique du cours d'eau que sur les usages humains, de manière directe ou indirecte.

Les conséquences sur les écosystèmes peuvent être l'altération de la structure et de la diversité des habitats aquatiques qui ne peuvent plus remplir leurs différentes fonctions biologiques (lieu de vie,

support de ponte et fonction d'abri) ce qui impacte par conséquent les peuplements faunistiques et floristiques.

On peut également mentionner les impacts de l'abaissement du chenal principal sur les cours d'eau à chenaux multiples : l'enfoncement de la ligne d'eau du chenal principal provoque une exondation plus fréquente et plus longue des annexes fluviales, ne leur permettant plus de remplir certaines de leurs fonctions écologiques (frayères, etc.)

Parallèlement, lorsque le déficit en sédiments grossiers engendre une incision généralisée du cours d'eau, les usages humains associés aux milieux alluviaux peuvent également être perturbés (cf. tableau ci-dessous).

Usages humains	Conséquences possibles de l'incision d'un cours d'eau sur les usages
Ressource en eau potable	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Abaissement du niveau des nappes d'accompagnement, pouvant causer le tarissement de certains puits d'alimentation en eau potable et augmenter les coûts de gestion des ouvrages de captage ➤ Remontée des bouchons vaseux et des fronts de salinité dans les estuaires, augmentant le risque de « contamination » des nappes par remontées des biseaux salés dans les estuaires etc.
Ouvrages traversants	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Déstabilisation des ouvrages transversaux (ponts, seuils, barrages) par enfoncement du fond du fait de l'érosion régressive ou progressive et déstabilisation des fondations d'ouvrages. ➤ Déstabilisation des traversées sous-fluviales (conduites diverses) ➤ etc.
Occupation du sol en zone inondable	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <u>Cours d'eau à chenal unique</u> : Augmentation de la capacité hydraulique du lit mineur par effet de chenalisation et réduction du rôle de stockage du lit majeur d'où une augmentation de la puissance hydraulique avant débordement et une accélération du transit pouvant aggraver les crues dans les zones situées à l'aval ➤ <u>Cours d'eau à chenaux multiples</u>: déconnexion de bras secondaires permettant l'implantation d'une végétation ligneuse au sein de ces anciens chenaux de crues pouvant augmenter localement le niveau d'eau en crue (cas de la Loire moyenne) ➤ etc.
Paysage	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Modification du style fluvial et des paysages des vallées alluviales se traduisant notamment par la chenalisation des cours d'eau ➤ etc.

Altérations constatées affectant les usages - à partir de Landon, 2007

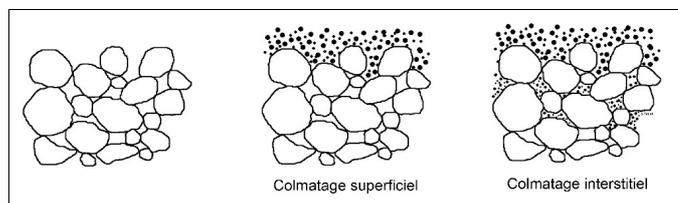
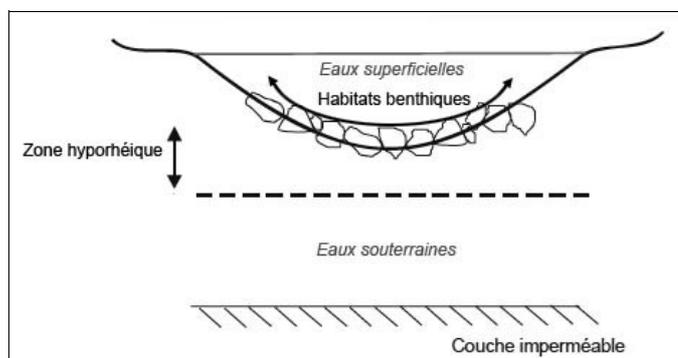
Impacts écologiques des sédiments fins dans un lit à charge de fond naturellement grossière

Qu'est-ce que le colmatage ?

Le **colmatage** correspond au phénomène de dépôt et l'infiltration de sédiments fins de nature organique ou minérale (argile, limon et sables fin) dans les habitats aquatiques.

On différencie deux niveaux de colmatage :

- le **colmatage superficiel** (recouvrement des habitats benthiques)
- le **colmatage interstitiel** (infiltration des sédiments fins dans la zone hyporhéique*).



III. 6: A) Zones affectées par le colmatage, B) distinction entre le colmatage superficiel et interstitiel.

La taille des particules incriminées dans les phénomènes de colmatage varie selon l'objectif des études recensées (études sur le benthos* : < 2 mm ; études sur les frayères de Salmonidés : < 0,8 mm ; études sur l'hyporhéos* : < 0,063 mm). Ces particules participent toutes au colmatage mais ces

divergences reflètent leur capacité différente à pénétrer le lit des cours d'eau.

Le colmatage se produit essentiellement sur des zones lenticulaires, dans des conditions hydrauliques quasi-stagnantes ne permettant pas au cours d'eau de transporter ces particules fines. C'est un phénomène naturel sur certaines annexes fluviales des cours d'eau de plaines (bras morts, boires, etc.). Cependant, ces conditions de dépôts peuvent être recréées artificiellement, du fait de la retenue d'un ouvrage.

Impacts du colmatage

L'accumulation de sédiments fins peut avoir des impacts écologiques importants sur les cours d'eau à charge de fond naturellement grossière :

- homogénéisation des habitats aquatiques (réduction de leur attractivité) ;
- diminution de la taille des interstices et de leur volume cumulé ;
- modification de la structure et de la stabilité du substrat ;
- diminution des échanges d'eau et de matières entre la surface et la zone hyporhéique ;
- réduction de la disponibilité des ressources trophiques et de l'oxygène ;
- réduction de la qualité énergétique des ressources trophiques sur lesquelles les sédiments fins se déposent ;
- réduction de la luminosité (liée au transport massif de sédiments fins par suspension), pouvant provoquer par exemple une diminution de la production primaire (GRAHAM, 1989).

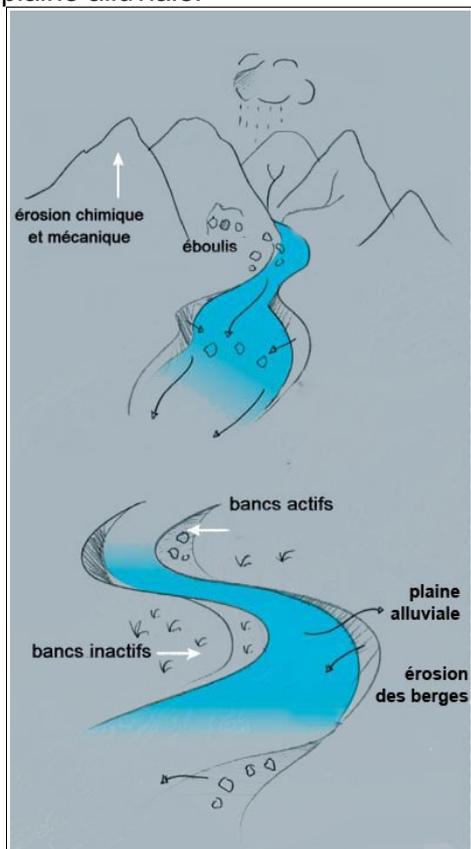
Le colmatage peut induire un glissement typologique des peuplements, les espèces inféodées aux substrats sablo-limoneux se substituant aux espèces inféodées aux espèces inféodées aux lits à charge de fond grossière.

FICHE 2 : DE L'ORIGINE DES SÉDIMENTS AU TRANSPORT SUFFISANT

ORIGINE ET PARCOURS DES SÉDIMENTS

La dynamique sédimentaire d'un cours d'eau implique trois séquences fonctionnelles qui se succèdent d'amont en aval à l'échelle du bassin versant (cf. illustration N°7):

- la **production**, qui correspond au « recrutement » des sédiments à partir des versants ;
- le **transfert** correspondant aux processus de transport des sédiments;
- le **stockage** à plus ou moins long terme qui correspond par exemple à l'accumulation des sédiments sous forme de bancs ou au dépôt stocké à moyen terme au sein de la plaine alluviale.



III. 7: La dynamique sédimentaire d'un cours d'eau © Malavoi, 2011 - modifié

Si les têtes de bassin constituent des zones préférentielles pour la «recrutement» des sédiments (érosion des versants...), les séquences de transfert et de stockage sont, quant à elles, naturellement présentes sur tous les tronçons du cours d'eau.

Apports sédimentaires externes au cours d'eau

Les sédiments érodés, transportés et déposés par un cours d'eau ont deux principales origines:

- la **production primaire** correspondant aux sédiments issus des versants (cônes d'éboulis, glissements de terrain, colluvions, etc.) et recrutés par des processus d'ablation de la roche mère ou par la mobilisation de dépôts accumulés en pied de versants ;



III. 8: Apport des versants (production primaire) © Onema

- la **production secondaire** correspondant aux apports sédimentaires des affluents.

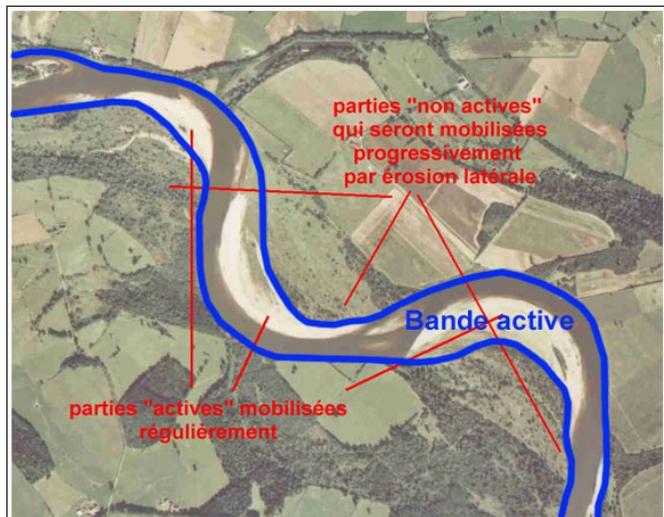


III. 9: Apports d'un affluent qui construit son cône alluvial dans le lit principal (production secondaire) © Onema

Transfert du stock alluvial interne

Un cours d'eau stocke des sédiments :

- dans son lit sous la forme de dépôts (bancs, dunes, etc.) et sur une épaisseur plus ou moins importante. La notion de « **bande active** » désigne l'espace occupé par le lit d'étiage et par les dépôts alluviaux peu ou pas végétalisés et régulièrement remaniés.



Ill. 10: Délimitation de la bande active sur la Loire



Ill. 11: Dépôt alluvial sur un petit cours d'eau de tête de bassin, le Chagnon (18) © A. Alber

- Dans sa plaine alluviale délimitée sur les cartes géologiques du BRGM au 1:50000ème par les alluvions modernes (Fz) et les moyennes terrasses (Fy).



Ill. 12: Carte géologique au 1/50 000 (<http://infoterre.brgm.fr>) © BRGM



Ill. 13: Érosion des berges de la Loire au lieu dit « Le Grand Fleury » © S. Braud

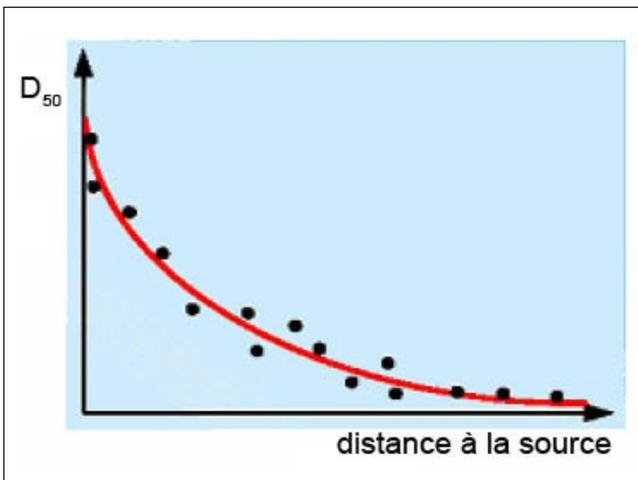
Les sédiments stockés dans la bande active sont mobilisés régulièrement par les crues et alimentent le transport solide du cours d'eau. La vitesse de transfert des particules et des bancs alluviaux varie de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres par an.

Les sédiments stockés dans la plaine alluviale sont mobilisés à plus long terme par l'érosion des berges. Il est reconnu que la plaine alluviale est une source sédimentaire de première importance pour les cours d'eau à dynamique latérale active dont le fonctionnement naturel se traduit par des processus réguliers et fréquents d'érosion de berge (élongation et recouplement de méandre par exemple).

VARIABILITÉ SPATIALE DES SÉDIMENTS

Les caractéristiques du substrat varient dans l'espace à différentes échelles :

- A l'échelle **régionale**, la quantité et la granularité dominante des sédiments charriés par les cours d'eau varient en fonction des caractéristiques des bassins versants (lithologie, relief, couverture végétale) et du climat.
- A l'échelle **du cours d'eau**, la taille des sédiments diminue d'amont en aval. Sternberg (1875) a proposé un modèle théorique de décroissance de la granularité de la charge de fond d'un cours d'eau qui devrait, selon lui, en l'absence d'apports latéraux, suivre une loi exponentielle.

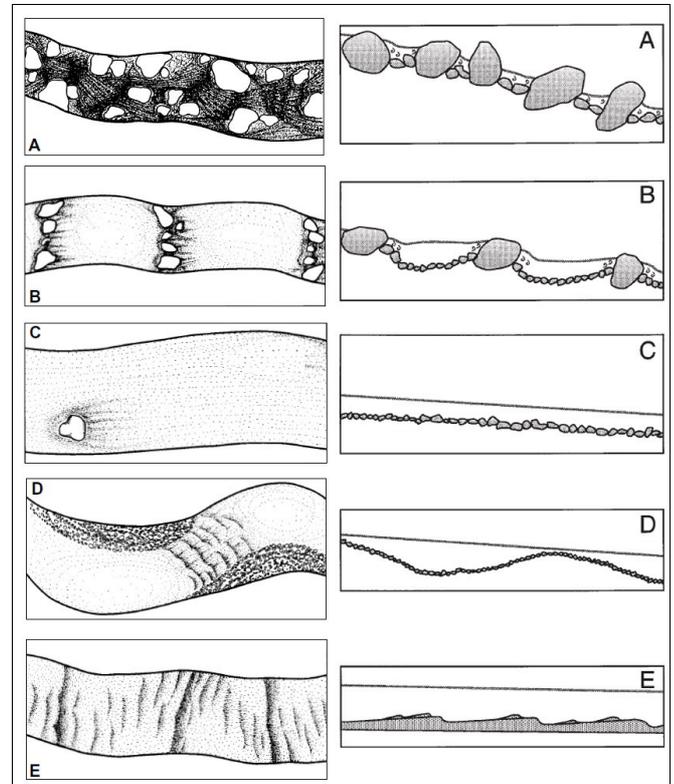


Ill. 14: Courbe théorique de décroissance du diamètre moyen des sédiments (Sternberg, 1875)

La décroissance granulométrique s'explique par :

- **l'usure des particules** : au cours de leur transport, les grains s'entre-choquent, s'usent et leur taille tend ainsi à diminuer. Cette « usure » est particulièrement importante pour les graviers et les galets (éclatement, broyage). L'intensité de ce processus dépend de la nature lithologique et de la taille de la particule.
- **le tri granulométrique** : la taille des particules que le cours d'eau est capable de transporter (compétence) tend à diminuer vers l'aval, à mesure que sa pente diminue.

La forme des dépôts sédimentaires évolue également de l'amont vers l'aval à mesure que la pente et la taille des sédiments diminuent, et que le débit augmente. La figure 15 illustre une séquence type dans le contexte des petites rivières de montagne (classification adaptées aux petites rivières de montagne de l'ouest américain).



Ill. 15: Schématisation de la variabilité amont-aval des dépôts sédimentaires © Montgomery et Buffington 1997

- (A) lit à blocs (la taille des éléments issus de l'érosion des versants ne permet pas une réorganisation en séquences régulières),
- (B) alternances en marche-cuvette (organisation en séquences d'éléments très grossiers provoquant une érosion à l'aval immédiat),
- (C) lit à fond plat (L'essentiel du fond du lit est composé d'un remplissage caillouteux relativement grossier qui laisse apparaître en surface quelques blocs. Les bancs alluvionnaires y sont quasi inexistantes),
- (D) alternance de séquences seuil-mouille
- (E) dunes (organisation caractéristique des tronçons de cours d'eau sableux).

Il importe de noter, qu'en réalité, la taille des sédiments et le type de dépôt sédimentaire peuvent évoluer de manière discontinue d'amont en aval des cours d'eau. Par exemple, la taille des sédiments peut augmenter vers l'aval si un affluent délivre au cours d'eau une quantité importante de sédiments plus grossiers, ou encore si sa pente augmente localement. Dans l'exemple ci-dessous, le site amont (photographie du haut) est caractérisé par un dépôt sablo-graveleux alors que le site aval (photographie du bas) correspond à un lit constitué de blocs.



III. 16: Contre-exemple de la décroissance granulométrique sur l'Arnon © A. Alber

La taille des sédiments dans le lit des cours d'eau varie également à des échelles plus locales, que se soit entre les différentes unités morphodynamiques (chenal principal et secondaire, annexe fluviale, bourrelets de berges naturels, etc) ou même à l'échelle de chaque unité. Par exemple, la taille des sédiments sur un banc est plus élevée sur les formes de résistance (têtes de banc et seuil) et tend à décroître de la tête à la queue de banc.

Cette variabilité induit une certaine difficulté à caractériser la classe granulométrique représentative d'un cours d'eau en un point donné. Cependant, elle ne doit pas masquer l'organisation des alluvions qui prévaut au sein des lits fluviaux qui s'explique par les conditions hydrauliques qui dépendent elles-mêmes de la morphologie du cours d'eau (pente, largeur, profondeur, courbure).

Enfin, on observe aussi un tri vertical des sédiments dans les différentes formes de dépôt. En contexte de granularité étendue, on peut constater, après une crue, sur certaines unités morphologiques (chenal principal, entrée de chenaux secondaires, etc.), une concentration d'éléments plus grossiers à la surface du lit que dans les dépôts sous-jacents. En effet, lors de la décrue, la décroissance de la compétence du

cours d'eau provoque l'abandon de la charge de fond mais permet l'évacuation des particules les plus fines vers l'aval. Tant que ces éléments de surface ne sont pas entraînés, l'armure ainsi constituée « protège » les sédiments plus fins de la couche sous-jacente. Ce processus aboutit donc à une différence de composition granulométrique entre la couche de surface (l'armure) et la couche sous-jacente (sous-couche).

Du fait de la grande variabilité granulométrique au sein des lits fluviaux, une vigilance est requise dans toute étude granulométrique. Ainsi, Si l'on cherche à connaître le diamètre médian (d_{50}) des particules transportées, il est nécessaire d'échantillonner la sous-couche qui est plus représentative. Par contre, si on s'intéresse au seuil de mise en mouvement de ces particules, l'échantillonnage portera sur la couche d'armure, puisque l'armure protégera les sédiments plus fins de la sous-couche et « retardera » de fait leur mise en mouvement. Le protocole et les sites d'échantillonnage dépendent ainsi de la question à laquelle on cherche à répondre.



III. 17: Exemple d'armure en plan et en coupe © J.R. Malavoi

- En haut à gauche : couche de surface (l'armure)
- En bas à gauche : sous-couche sous l'armure constituée également d'éléments grossiers mais noyés dans une matrice plus fine
- à droite : coupe en travers permettant d'observer l'armure en surface et l'hétérogénéité de la sous-couche

Il est important de ne pas confondre l'armurage et le pavage, qui se caractérisent pourtant tous les deux par une concentration d'éléments plus grossiers à la surface du lit que dans les dépôts sous-jacents. L'armure est souvent considérée comme un phénomène naturel, dynamique, une protection temporaire souvent remaniée (annuellement), alors que le pavage correspond à un déséquilibre et est constitué de sédiments très grossiers pratiquement immobiles, ou dont la mise en mouvement n'est possible que pour des crues exceptionnelles.

LES MECANISMES DE TRANSPORT DES SÉDIMENTS

Le transport des particules dans le lit des cours d'eau peut être décomposé en 3 phases:

- une phase de mise en mouvement,
- une phase de transport selon différents modes,
- et une phase de dépôt.

Mise en mouvement des particules

La mise en mouvement des particules au repos dépend :

- de leur caractéristique (**taille, poids**),
- des **forces de cohésion** entre elles (cf. illustration 18 et 19). Par exemple, la mise en mouvement d'une particule d'argile nécessite une vitesse d'écoulement supérieure en comparaison à une particule sableuse alors que son poids est bien inférieur. (d'autres facteurs rentrent en ligne de compte comme le tassement, etc.),



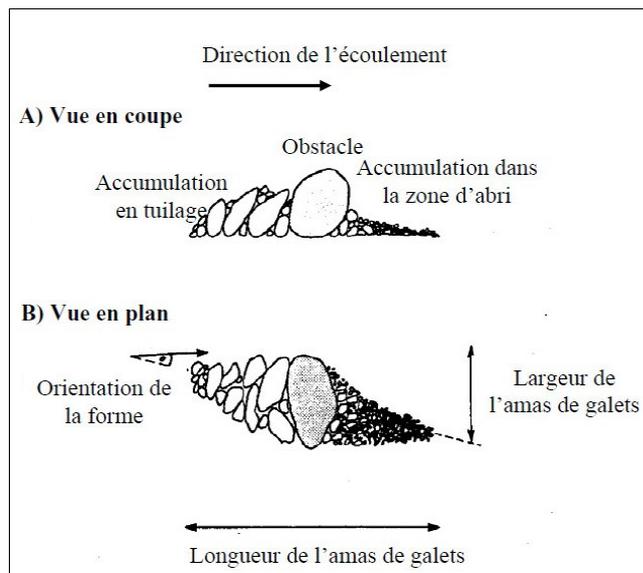
III. 18: Sédiments cohésifs © S. Rodrigues



III. 19: Sédiments non cohésifs © S. Rodrigues

- de la force exercée par l'écoulement (notion de **force tractrice**),

➤ de leur **agencement**. Lorsque l'éventail granulométrique est étendu, on peut observer des phénomènes de masquage par lesquels des particules grossières protègent des grains plus fins et retardent ainsi la mise en mouvement de ces derniers. Sur l'illustration N° 20, du fait de la présence d'une particule grossière, des sédiments se sont accumulés en amont de cet obstacle avec une disposition en tuiage. En aval, des éléments plus fins se sont déposés dans la zone d'abri. C'est la stabilité de l'élément le plus grossier qui commande la stabilité de l'ensemble de cet amas de sédiments et donc son aptitude à être mobilisé.

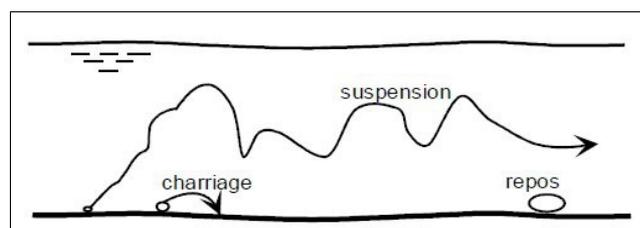


III. 20: disposition en tuiage © H. Lamarre, 2001

Modes de transport des sédiments

Il est couramment admis que le transport de matériaux solides en rivière se fait sous deux formes :

- par **charriage** sur le fond lorsque l'écoulement ne peut les mettre en suspension. Ils se déplacent alors en contact quasi-permanent avec le fond par roulement ou par petits sauts ;
- en **suspension** lorsque l'écoulement est suffisamment puissant pour les transporter au sein de la colonne d'eau.



III. 21: Modes de transport des particules © G. Degoutte

Certains auteurs distinguent un 3ème mode de transport, la saltation, qui est un mode intermédiaire entre le charriage et la suspension. Les particules sont transportées par grands bonds dans un espace de quelques dizaines de centimètres au-dessus du fond du lit. Ce mode de transport est généralement assimilé au charriage.

L'éventail granulométrique du matériel alluvial transporté est également variable selon les fluctuations du débit liquide. Ainsi, lors d'une crue, les grains de sables peuvent être tout d'abord transportés par charriage lors de la montée de crue, puis mis en suspension au pic de crue et enfin re-déposer en fin de crue.

Par contre, une fois mis en mouvement, les limons se déplacent vers l'aval sensiblement à la même vitesse que l'eau et ne se déposeront plus que sous des conditions hydrauliques quasi stagnantes.

ÉLÉMENTS D'APPRÉCIATION DU « TRANSPORT SUFFISANT »

Le Code de l'Environnement fixe une obligation d'assurer un « **transport suffisant** » des sédiments au droit des ouvrages situés sur les cours d'eau, parties de cours d'eau et canaux classés en liste 2 au titre de l'article L.214-17.

Aucune définition juridique de la notion de « transport suffisant » n'existe à ce jour. Néanmoins, la continuité sédimentaire constitue l'un des éléments de qualité hydromorphologique fixé par la DCE. Aussi, l'objectif visé par l'article L.214-17 est **la non-dégradation et la restauration des habitats aquatiques** afin de garantir la vie des biocénoses aquatiques inféodées au substrat alluvial (poissons, invertébrés, végétaux).

Le caractère « suffisant » du transport de sédiment fait ainsi référence implicitement à un **niveau d'ambition** permettant de préserver et/ou restaurer le bon état écologique des cours d'eau.

Deux questions opérationnelles se posent pour évaluer si le transport des sédiments est suffisant au droit d'un ouvrage :

(a) l'ouvrage perturbe-t-il le transport naturel des sédiments ?

(b) cette perturbation altère-t-elle le fonctionnement de la biocénose ?

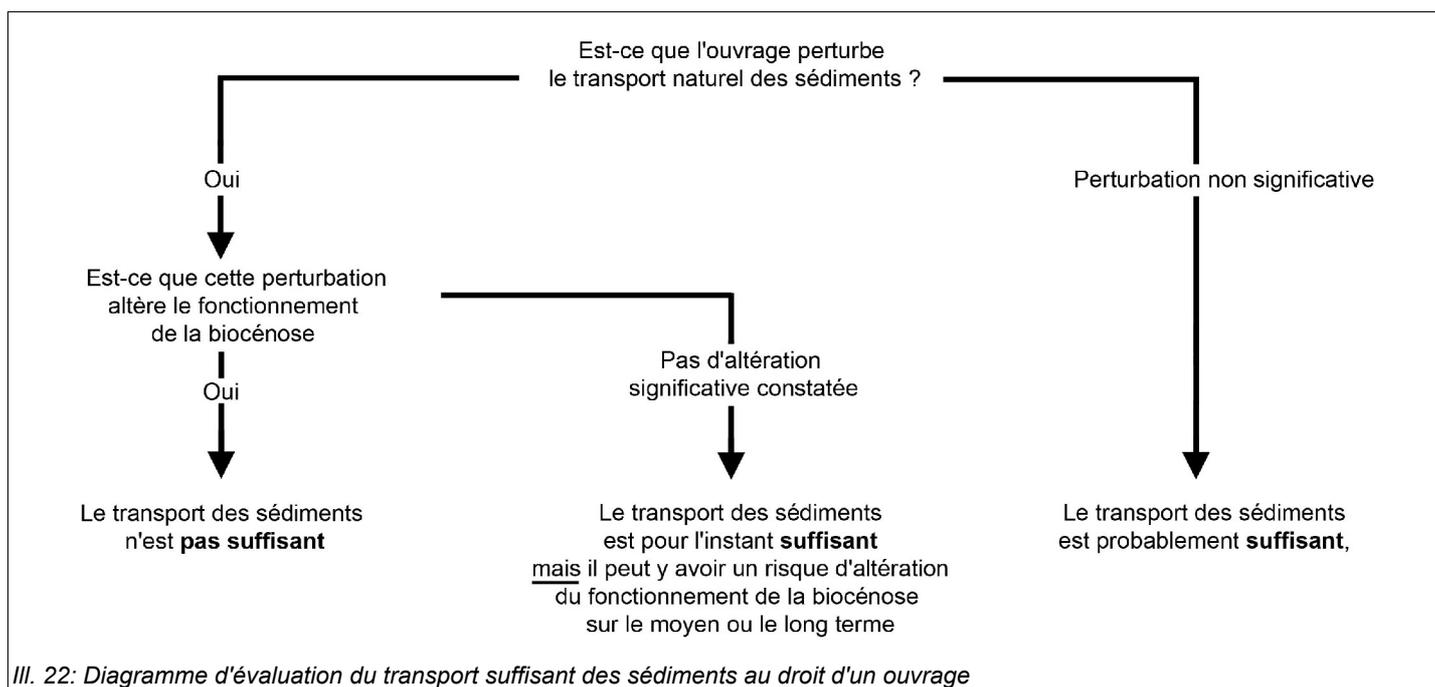
Quelle est la fraction granulométrique concernée ?

Les obligations réglementaires vis-à-vis de la continuité sédimentaire visent principalement la **fraction granulométrique grossière** charriée par les cours d'eau en raison de son rôle écologique.

Pourtant l'**accumulation de sédiments fins** dans la retenue d'un ouvrage peut engendrer des impacts écologiques négatifs importants à l'amont de l'obstacle (envasement) et à l'aval, en cas de relargage massifs de sédiments fins (colmatage possible de zones ayant un rôle essentiel dans le cycle biologique des espèces aquatiques : frayère, zone d'alimentation, etc.).

Mais améliorer la continuité sédimentaire des particules grossières au droit d'un seuil permet, en pratique, de limiter le risque d'envasement en amont de l'ouvrage.

Par ailleurs, il importe de noter que la gestion des sédiments fins nécessite souvent d'agir sur la production à l'échelle du bassin versant (réduction de l'érosion des sols, etc.).



Ill. 22: Diagramme d'évaluation du transport suffisant des sédiments au droit d'un ouvrage

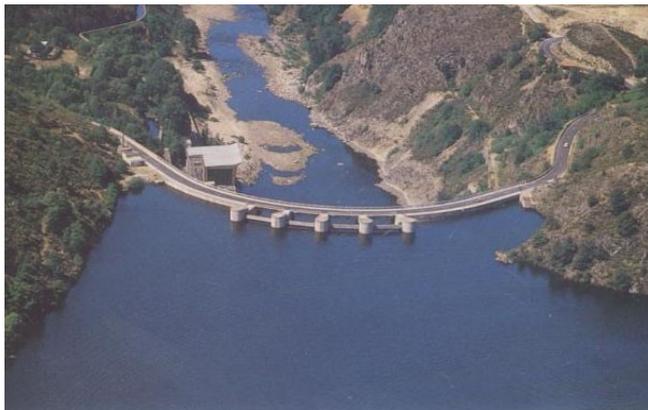
FICHE 3: TYPOLOGIE DES OUVRAGES TRANSVERSAUX ET IMPACTS SUR LE TRANSPORT DES SEDIMENTS GROSSIERS

TYPOLOGIE DES OUVRAGES

Les ouvrages transversaux sont classés en deux catégories en fonction de leur niveau d'obstruction du fond de vallée :

- les **barrages** qui obstruent une grande partie du fond de vallée, soit bien plus que le lit mineur;
- les **seuils** qui barrent tout ou partie du lit mineur (définition SANDRE, 2008).

La limite de 5 m parfois utilisée pour distinguer ces deux catégories n'a pas de sens géomorphologique. De même, par abus de langage, certains ouvrages sont communément dénommés « barrages au fil de l'eau », « barrage à clapets », « barrages à aiguilles », etc. alors qu'il s'agit de seuils.



Ill. 23: A) Barrage de Grangent sur la Loire. Source non connue ; B) Seuil sur l'Indre © S.Braud

Au sein des seuils, on peut également distinguer deux familles d'ouvrages :

- les **seuils fixes** sont des ouvrages en travers du cours d'eau, au-dessus desquels l'eau s'écoule. Ils correspondent souvent à des seuils de prise d'eau de moulins ou d'irrigation, ou à des seuils de stabilisation (d'un pont par exemple). La structure bétonnée de ces ouvrages est moins sensible aux dégradations provoquées par le charriage des blocs que les vannes ou clapets des seuils mobiles.
- les **seuils mobiles** sont en réalité formés d'une partie fixe dont l'emprise transversale est plus ou moins large et d'une ou plusieurs parties mobiles. Ces parties mobiles permettent, lorsqu'elles sont manœuvrées, d'évacuer une partie des eaux en dessous du niveau du seuil. Lorsque leurs parties mobiles sont fermées, ils fonctionnent comme un seuil fixe avec un écoulement par surverse. Ils sont souvent rencontrés au niveau des usines. Ils ont « l'avantage » de maintenir des biefs à une cote non excessive par rapport aux berges, tout en offrant une forte capacité d'évacuation lors des crues grâce à la gestion des parties mobiles.

La plupart des seuils sont en réalité constitués à la fois de parties fixes et de parties mobiles. Ainsi, il conviendrait mieux de parler de **seuils mixtes** à dominante fixe ou à dominante mobile.

Concernant les parties mobiles, différents types de dispositifs existent mais les principaux sont les vannes, les clapets et les aiguilles:

➤ Les organes dites **vannes levantes** ou vannes « à guillotine » constituent la forme « traditionnelle » des ouvrages mobiles. Bien que l'automatisation puisse faciliter leur manœuvre, la plupart des ouvrages demandent une intervention manuelle, et les contraintes techniques, notamment en termes de possibilité de manœuvre, limitent les dimensions que l'on peut raisonnablement leur donner, ce qui implique des pertuis, en général peu larges. Elles ont l'avantage, d'un point de vue sédimentaire, de s'ouvrir par le fond ce qui permet de laisser transiter une partie de la charge de fond lorsqu'elles sont ouvertes.



III. 24: Seuil à vannes © J.R. Malavoi

➤ Les **clapets** sont apparus au cours de la seconde moitié du XX^{ème} siècle et ont pour principal avantage de faciliter le passage des flottants. Leur manœuvre au moyen d'un vérin et leur motorisation permet d'en faire des ouvrages beaucoup plus larges que la plupart des vannes, et la plupart sont automatiques ou semi-automatiques (l'ouverture est ajustée ou déclenchée en fonction du niveau amont). Leur principal inconvénient, du point de vue sédimentaire est de limiter le charriage des sédiments grossiers (par rapport aux vannes levantes), puisque l'écoulement se fait uniquement par surverse. Afin de remédier à cela, sur certains ouvrages, on retrouve les deux systèmes (clapet et vanne levante).



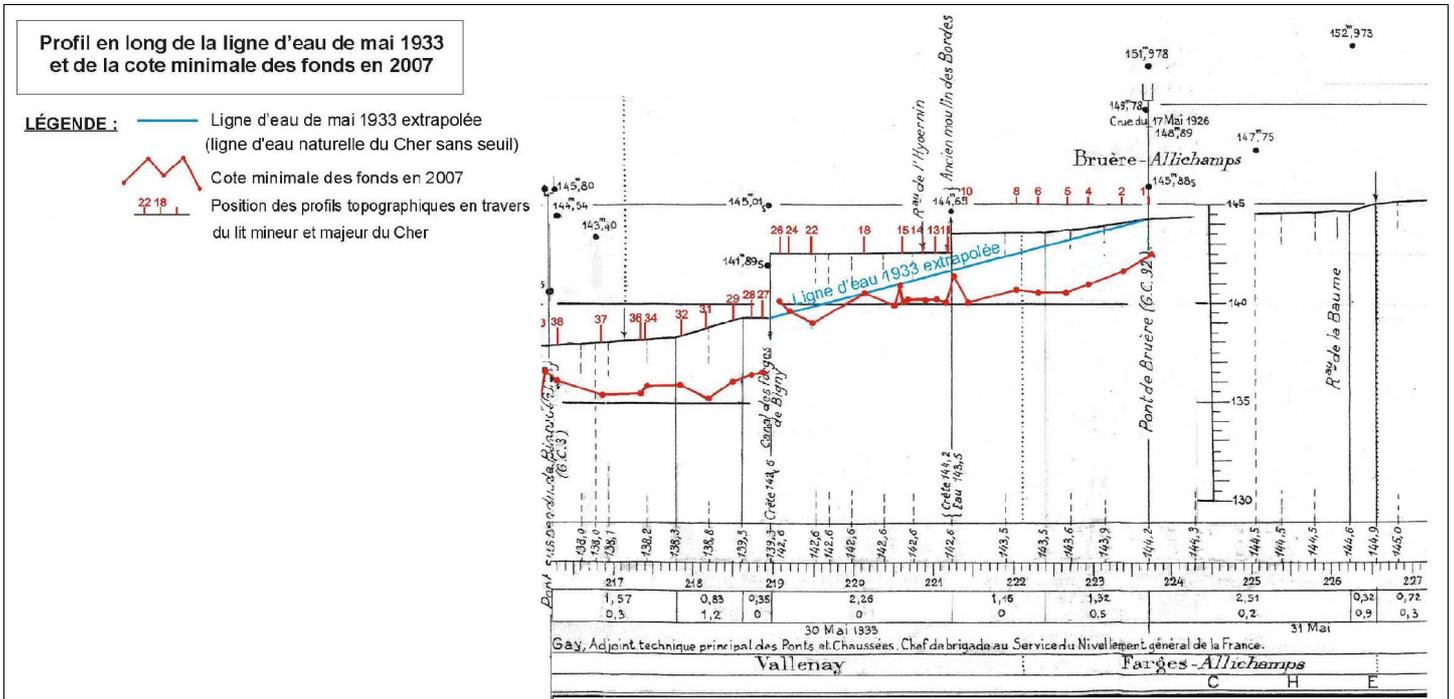
III. 25: Seuil à clapet © J.R. Malavoi

➤ Les **aiguilles** constituent un type d'ouvrage mobile mis en œuvre principalement sur les ouvrages de navigation au XIX^{ème} siècle. L'avantage de ce dispositif, du point de vue sédimentaire, est qu'il peut être enlevé lors des crues, ce qui peut rendre l'ouvrage totalement transparent. De par le caractère assez pénible et dangereux de leur manœuvre, ce type de dispositif tend toutefois à être progressivement remplacé par des ouvrages motorisés.



III. 26: « Barrage » à aiguille © CETMEF

IMPACTS DES OUVRAGES SUR LE TRANSPORT DES SÉDIMENTS GROSSIERS



III. 27: Profil en long de la ligne d'eau et du fond du lit du Cher, altéré par la présence du seuil de Bigny © SOMIVAL, 2009

Afin de ne pas confondre les processus liquides et solides observables dans les retenues d'ouvrage, nous parlerons dans ce document:

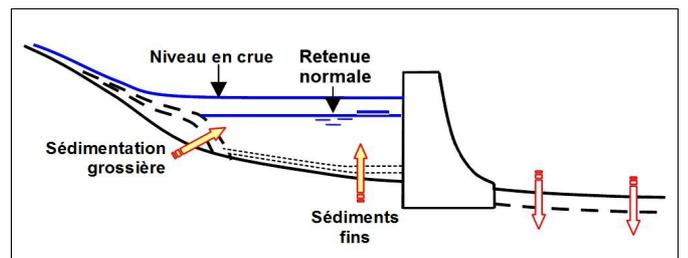
- de **comblement** de la retenue pour désigner le **remplissage** par des sédiments,
- et nous dirons que la retenue est **totaletement atterrie** pour signifier qu'elle est **pleine** de sédiments.

Impacts à l'amont de l'ouvrage

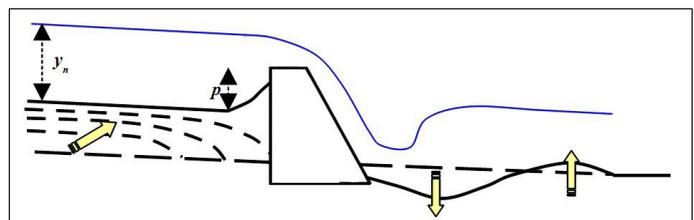
Un ouvrage transversal réduit la pente de la ligne de charge du cours d'eau (ou ligne d'énergie) à son amont, et donc sa capacité à transporter les sédiments grossiers. Cependant, à partir d'un certain débit de crue, les « petits » seuils peuvent retrouver une pente de ligne d'eau proche de la pente naturelle originelle.

En l'absence d'une gestion adaptée des ouvertures de vannes ou lorsque l'ouvrage n'est pas équipé de vannes fonctionnelles du point de vue du transport solide, et tant que la retenue n'est pas totalement atterrie, les éléments les plus grossiers sont bloqués et s'accumulent dans la retenue, et la

fréquence de franchissement de l'ouvrage par des sédiments de taille intermédiaire est réduite. Ce franchissement se réduit aux événements hydrologiques lors desquels l'énergie du cours d'eau est suffisante pour maintenir ces sédiments de taille intermédiaire (ex : sables grossiers) en suspension.



III. 28: Schéma du comblement d'une retenue de barrage © G. Degoutte



III. 29: Schéma de l'évolution des fonds après la construction d'un seuil © G. Degoutte
P: la pelle est la différence entre la crête du seuil et le fond du lit en amont de l'ouvrage

Cet effet de piégeage perdure en général jusqu'à ce que la retenue soit totalement atterrie et que l'ouvrage devienne plus ou moins « transparent » au transport solide, c'est-à-dire que les sédiments charriés ne sont plus bloqués par le seuil.

Néanmoins, la pente à l'amont de l'ouvrage reste plus faible que la pente initiale avant aménagement même lorsque la retenue est totalement atterrie. La continuité sédimentaire ne peut être que partiellement rétablie.

Pour les seuils situés sur des cours d'eau à écoulement fluvial, même lorsque l'atterrissement de la retenue est terminé, il reste une différence d'altitude entre le fond du lit en amont de l'ouvrage et la crête du seuil (la pelle*). Une erreur fréquente consiste à croire qu'une pelle signifie que l'ouvrage n'est pas encore atterri. A l'amont immédiat du seuil, la vitesse s'accroît du fait du resserrement des filets liquides. C'est pourquoi, lorsque l'atterrissement de la retenue est terminé, les matériaux charriés ne restent pas bloqués malgré la contre-pente et franchissent le seuil (G. Degoutte, 2012).

Impacts en aval de l'ouvrage

Les alluvions grossières, piégées en amont de l'ouvrage, vont manquer à l'aval. Cela peut entraîner une érosion progressive du lit mineur et, dans le cas des rivières à graviers, un pavage du lit ou la disparition à plus ou moins long terme des alluvions en aval de l'ouvrage. La réduction de cette charge grossière réduit les fonctions des habitats aquatiques (lieu de vie, supports de ponte et abris...) pouvant rendre le milieu abiotique, à terme (cf. page 6).

Mais cette situation n'est pas systématique, même à l'aval de certains grands ouvrages, comme, par exemple, certains barrages écrêteurs de crues à pertuis ouvert ou des barrages qui dérivent une grande partie du débit liquide.

Si l'ouvrage n'est pas équipé d'un dispositif permettant de dissiper l'énergie de la chute d'eau, une fosse de dissipation se crée en aval de l'aménagement, érodant le fond du lit.

IMPACTS SUR LE TRANSPORT DES SÉDIMENTS FINS

A l'amont, la réduction de la pente de la ligne d'énergie crée des conditions hydrauliques propices au dépôt des sédiments fins (écoulement quasi stagnant). La surface cumulée des habitats altérés dépend du profil en long du cours d'eau, de la hauteur de l'ouvrage et du taux de fractionnement du tronçon.

A l'aval de certains barrages, après des opérations de vidange, relarguant d'importants volumes de sédiments fins, certaines zones ayant un rôle essentiel dans le cycle biologique des espèces aquatiques (frayère, zone d'alimentation, etc.) ont été colmatées. Ce phénomène s'explique par l'importance du volume de sédiments fins remis en mouvement et surtout par l'abaissement trop brutal du débit à la fin de ce type de manœuvre.

FICHE 4 : VERS UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DES DYSFONCTIONNEMENTS SÉDIMENTAIRES SUR LE BASSIN LOIRE-BRETAGNE

Échelle de travail : bassin Loire-Bretagne, région, département

Objectif : établissement d'une liste de bassins versants prioritaires pour engager des études

OBJECTIF

Le transport sédimentaire est, à ce jour, mal connu sur le bassin Loire-Bretagne. En dehors de quelques études ponctuelles, cet aspect du fonctionnement des cours d'eau a été peu abordé. De ce fait, lors de ce premier classement, l'enjeu de la continuité sédimentaire n'a été qualifié de fort que sur deux cours d'eau du bassin : la Loire et l'Allier (cf. tableau de la liste 2 du document technique¹ d'accompagnement de l'arrêté du 10 juillet 2012).

Cette fiche propose une évaluation du risque d'altération de la dynamique sédimentaire des lits fluviaux à l'échelle du bassin Loire-Bretagne. L'objectif est d'établir une liste des bassins versants prioritaires pour engager des études de la continuité sédimentaire et ré-évaluer l'enjeu sédimentaire, en vue du prochain classement.

MÉTHODE UTILISÉE

L'**enjeu** vis-à-vis de la continuité sédimentaire peut être qualifié de « **fort** » lorsque le risque de **dysfonctionnement sédimentaire** est susceptible d'induire un **dysfonctionnement écologique**.

Pour cette étape, nous nous sommes appuyés sur l'outil SYRAH-CE², développé par le pôle Hydroécologie des cours d'eau Onema-Irstea, qui fournit, à l'échelle du tronçon :

- une caractérisation du Fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau et des Pressions anthropiques
- une évaluation de l'altération probable de certains de leurs paramètres hydromorphologiques.

¹ Document d'accompagnement de l'arrêté du 10 juillet 2012 portant sur la liste 2 des cours d'eau, tronçons de cours d'eau ou canaux classés au titre de l'article L. 214-17 du code de l'environnement du bassin Loire-Bretagne : http://www.donnees.centre.developpement-durable.gouv.fr/SDAGE/classement_L214-17/Doc_tech_acccompagnement_L214-17_LB.pdf

² SYStème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau

Les concepteurs de l'outil SYRAH-CE jugeait délicat la construction de relations directes et simples entre les pressions et les altérations hydromorphologiques. « En conséquence, une approche de type risque, reposant sur un raisonnement probabiliste, a été privilégiée » (L. Vallette, 2012). Nous ne détaillerons pas ici la construction utilisée pour établir ces probabilités et nous renvoyons aux différentes notices produites par l'Irstea sur le sujet (le tableau N°1 présente, de façon synthétique, les données utilisées pour évaluer la probabilité d'altération de deux paramètres).

L'outil SYRAH-CE évalue, pour chaque tronçon de cours d'eau et chaque paramètre (« Continuité latérale », « Continuité biologique - migrateurs », « Continuité sédimentaire », « Structure et substrat du lit », etc.), la probabilité d'altération selon 5 niveaux (altération très faible, faible, moyenne, forte et très forte) et pour différents paramètres : exemple :

Classe d'altération de la continuité sédimentaire	très faible	faible	Moyenne	Forte	Très forte
Probabilité obtenue pour le tronçon étudié	1 %	2 %	12 %	70 %	15 %

Dans cet exemple, on note que le paramètre du tronçon étudié a une probabilité de 70% d'être fortement altérée. La valeur de 70% et la répartition des probabilités (secondes probabilités maximales réparties de part et d'autre de la valeur maximale) traduisent une relative confiance dans le résultat obtenu.

Nous avons extraits de l'outil SYRAH-CE le résultat de ces évaluations pour deux paramètres :

- le paramètre « Continuité sédimentaire » qui évalue le risque de déficit ou d'excès du bilan sédimentaire.
- le paramètre « Structure et substrat du lit » qui évalue le risque de réduction de l'épaisseur du substrat, la modification de sa structure granulométrique ou son colmatage par des fines.

Pour ces deux paramètres, nous avons sélectionné les tronçons obtenant un **risque élevé d'altération**. Pour cela, nous avons retenu les tronçons dont la somme des classes d'altération forte et très forte était supérieure à 70%. (cf. illustration N°30 et N°31)

Limites de l'approche

L'approche proposée est basée sur l'évaluation du risque de dysfonctionnement sédimentaire s'appuyant sur l'identification d'un certain nombre de pressions ou aménagements pouvant engendrer ce type d'altérations. Il s'agit donc d'une approche indirecte du problème, qui ne permet pas d'obtenir une liste exhaustive des cours d'eau à étudier.

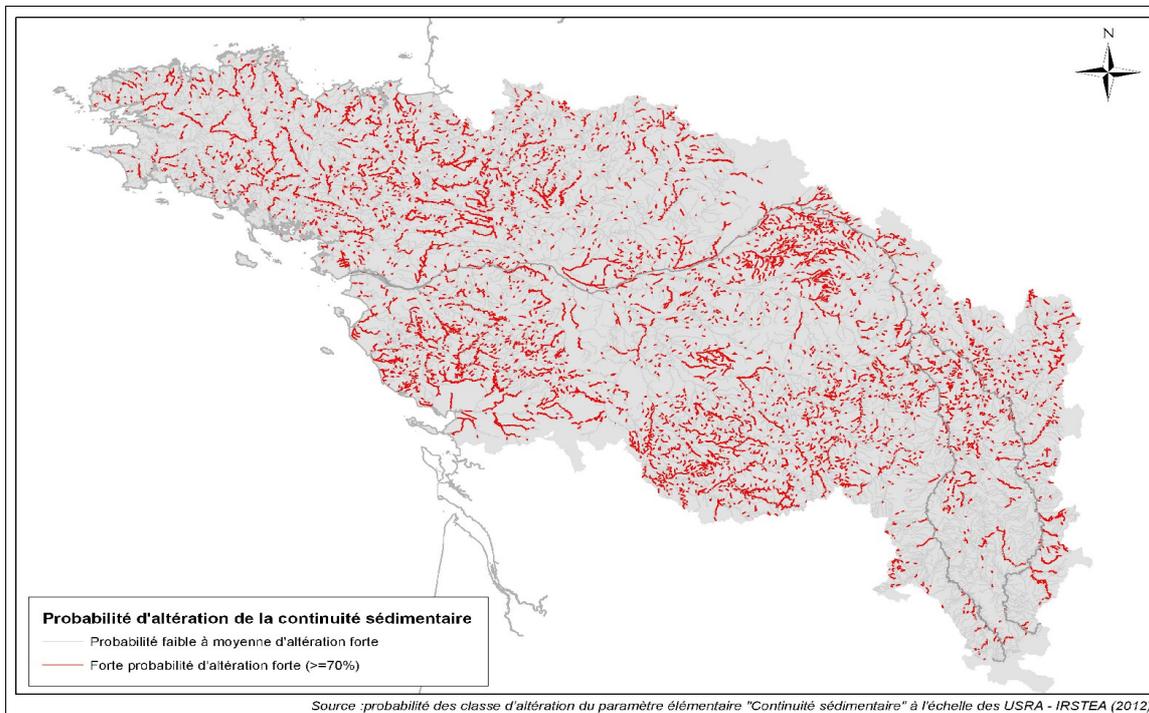
De plus, « les probabilités de degré d'altération restent des probabilités, c'est à dire qu'elles peuvent ne pas se traduire par un impact hydromorphologique observé : ainsi une probabilité d'altération forte de 70% ne devrait se concrétiser par une altération forte observable que dans 7 cas sur 10 en moyenne (selon les experts) ; il reste donc, toujours en moyenne, 3 cas sur 10 où cette classe d'altération (forte) ne devrait pas être observée sur le terrain. » (L.Valette, 2012)

De façon générale, les approches à petite échelle (à l'échelle de la France ou d'un grand bassin versant), conduisent à faire un certain nombre de simplifications et à utiliser les données disponibles sur l'ensemble du territoire d'étude et donc, pas forcément, la données la plus pertinente localement. Et même si elles sont disponibles sur tout le territoire d'étude, ces données sont souvent incomplètes et parfois erronées. Ainsi, l'absence de donnée de pression sur un secteur du à un défaut de recensement peut s'interpréter à tort comme une absence de risque.

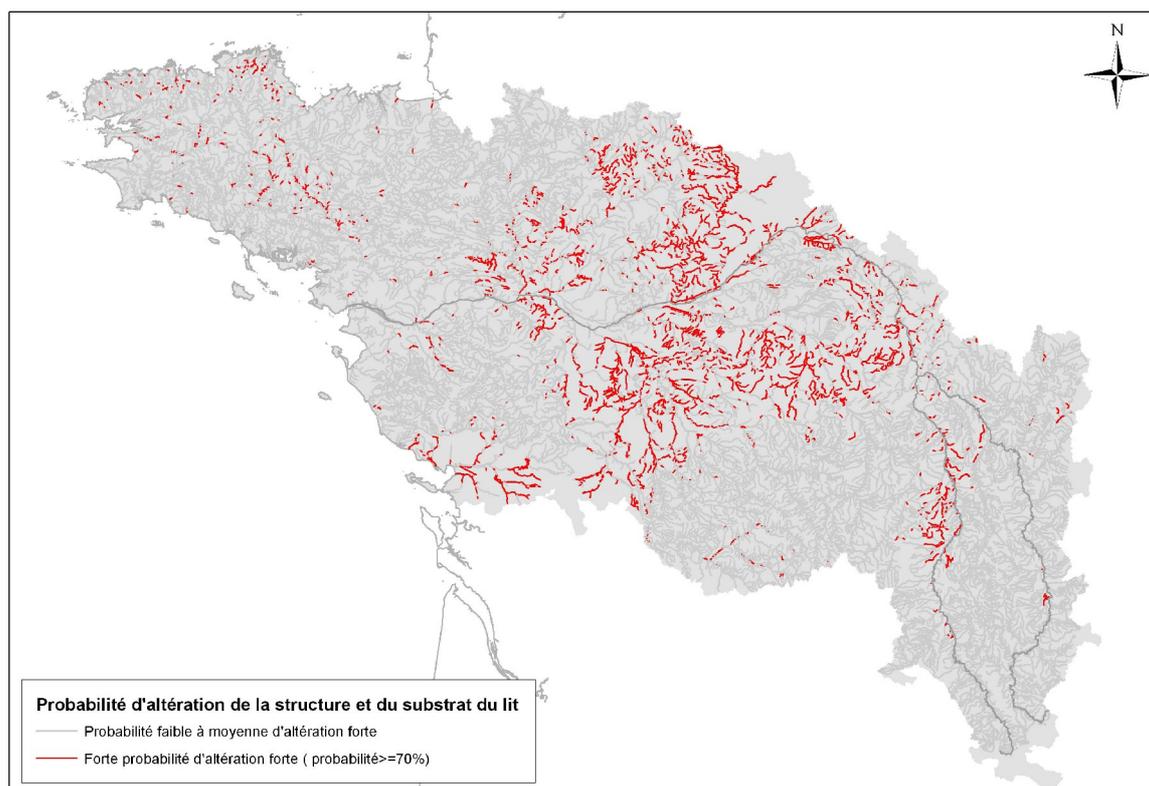
Il est donc inévitable que, dans certains cas, l'appréciation du degré d'altération hydromorphologique diffère de l'expertise formulée localement.

Risque d'altération		Métrique	Altération	Causes de l'altération	Données de pression utilisées	Données de pondération
Continuité Qs		Bilan sédimentaire	Bilan excédentaire	Réduction capacité de charriage	Surlargeur, Rang	Qs
			Bilan déficitaire	Piégeages Qs, extractions Qs	Plans d'eau déconnectés, Présence barrage dans 2 tronçons aval, Densité de seuils ponérée, Plans d'eau sur cours d'eau	
Structure et substrat du lit	Faciès d'écoulement	Proportion et diversité de faciès	Modification	Chenalisation, amont seuil	Rectitude, Densité de seuils pondérée, Plans d'eau sur cours d'eau	Puissance Vallée, Qs, Rang
	Substrat	Epaisseur	Réduction, voire disparition	Piégeages Qs, extractions Qs	Plans d'eau déconnectés, Présence barrage dans 2 tronçons amont	Qs
				Chenalisations diverses	Rectitude	
		Granulométrie	Déséquilibre (modification structure granulométrique)	Piégeages Qs, extractions Qs Chenalisations diverses	Surface BV interceptée (LGE), Densité de seuils pondérée, Qs Rectitude	Puissance Vallée
	Porosité, conductivité hydraulique	Colmatage	Augmentation apports de fines Réduction capacité Qs via chenalisation	Erosion LGE Occupation du sol type agricole (LGE), Rang, Surlargeur, Rectitude	Puissance Vallée	

Tableau 1: Tableau synthétique résumant les paramètres pris en compte pour évaluer le risque d'altération des paramètres élémentaires « continuité sédimentaire » et « structure et substrat du lit » - Irstea



III. 30: Tronçons de cours d'eau présentant un risque élevé d'altération de la continuité sédimentaire (SYRAH-CE)



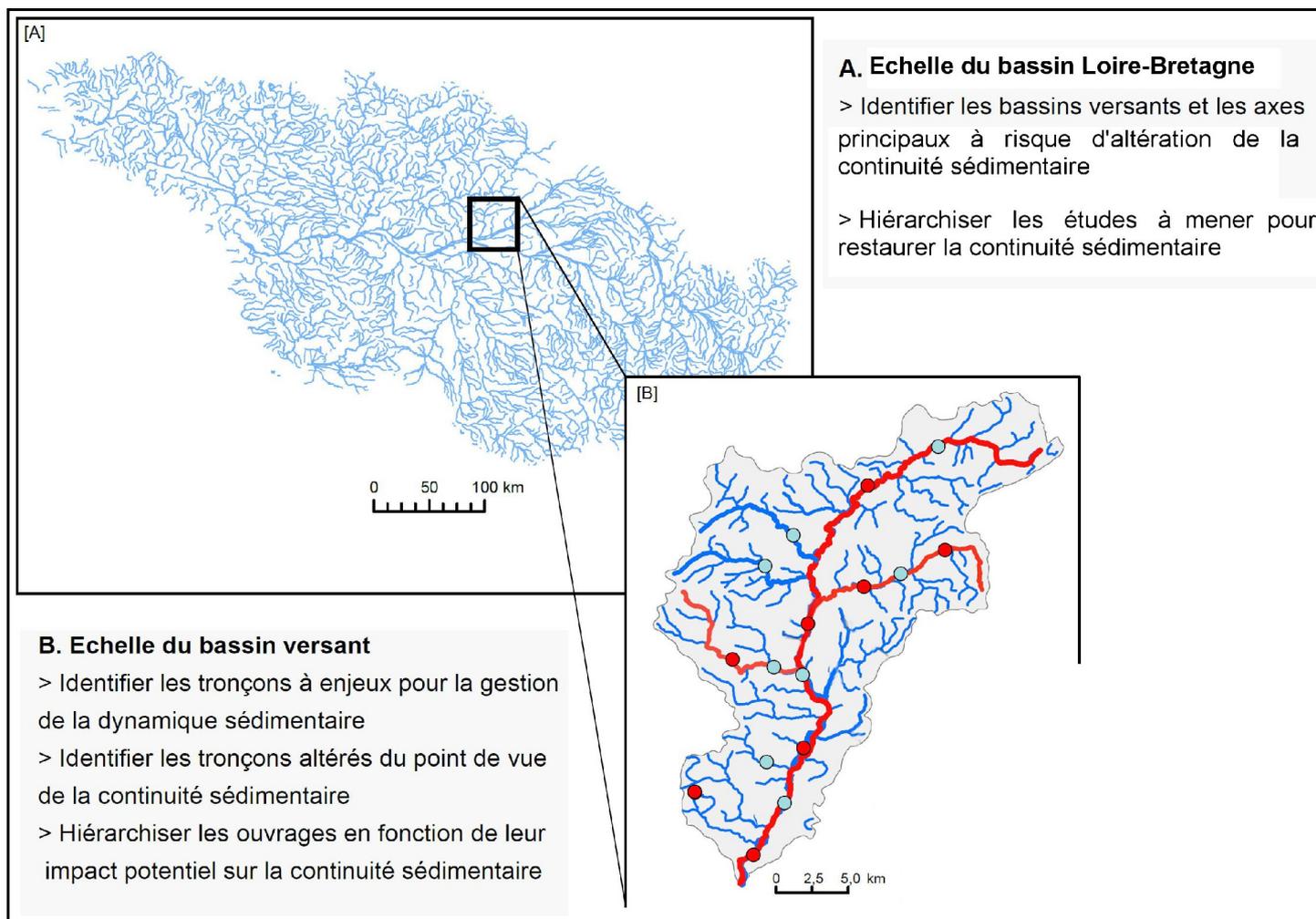
III. 31: Tronçons de cours d'eau présentant un risque élevé d'altération du substrat et de la structure du lit (SYRAH-CE)

AVERTISSEMENT : Ces cartes ne sont pas des diagnostics de l'enjeu sédimentaire du bassin Loire-Bretagne mais un outil de prospection évaluant la probabilité du risque de dysfonctionnement sédimentaire et proposant une liste de cours d'eau sur lesquels il serait pertinent de mener des études et de ré-évaluer l'enjeu sédimentaire en vu du prochain classement.

FICHE 5 – DIAGNOSTIC DES DYSFONCTIONNEMENTS SÉDIMENTAIRES À L'ÉCHELLE D'UN BASSIN VERSANT

Échelle de travail : bassin versant.

Objectif : identifier les secteurs altérés du point de vue de la continuité sédimentaire et établir une liste d'ouvrages pouvant être responsables de cette altération.



OBJECTIFS

Cette fiche présente un raisonnement, plutôt qu'une méthodologie détaillée. Des exemples de cartes à produire seront insérées dans cette fiche, suite au stage de Louis Manière (stage en cours).

Les deux objectifs visés lors de cette étape sont :

- le diagnostic des problèmes de continuité sédimentaire à l'échelle d'un bassin versant,
- l'établissement d'une liste d'ouvrages transversaux pouvant avoir contribué à ces altérations.

CADRE MÉTHODOLOGIQUE

Trois questions structurent le raisonnement, à l'échelle du bassin versant :

- Comment fonctionne le bassin versant du point de sa dynamique sédimentaire ?
- Est-ce que la dynamique sédimentaire de certains tronçons est altérée (anomalies non explicables par des facteurs naturels)?
- Quels sont les ouvrages transversaux sur lesquels il faut évaluer l'impact sur la continuité sédimentaire en priorité ?

Ce questionnement peut se décliner en 4 étapes :

- caractérisation du contexte géomorphologique
- localisation des pressions pouvant altérer la dynamique sédimentaire
- identification d'anomalies ou de divergences de la dynamique sédimentaire du cours d'eau étudié par rapport aux modèles théoriques
- établissement d'une liste d'ouvrages transversaux pouvant avoir contribué à ces altérations

Pour réduire le temps consacré aux relevés de terrain, les photographies aériennes et certaines bases de données (BD Topo, etc.) peuvent être judicieusement exploitées pour repérer certaines informations ou pour préparer le terrain. Les protocoles à déployer sont décrits page 45.

1. Caractérisation du contexte géomorphologique

La première étape consiste à caractériser le contexte géomorphologique du bassin versant à partir des données disponibles. L'enjeu est de disposer, à la troisième étape, des éléments qui permettront d'expliquer certaines divergences naturelles de la dynamique sédimentaire du bassin versant par rapport aux modèles théoriques et à ne pas les traduire comme des altérations.

1.1. Zonage du bassin versant

Cette première sous-étape consistera à faire ressortir l'hétérogénéité du bassin versant étudié. un découpage en sous-bassins versants homogènes du point de vue du fonctionnement sédimentaire sera réalisé sur les bases de différents critères :

- le relief
- la géologie et surtout le caractère plus ou moins érodable des versants
- l'occupation du sol et tout particulièrement l'occupation du couvert végétal des versants (limitation de l'érosion),
- l'hydrologie,
- etc.

1.2. Sectorisation du réseau hydrographique

Cette sous-étape consistera à découper le réseau hydrographique en tronçons géomorphologiques homogènes*. On pourra s'appuyer sur la discrimination réalisées dans le cadre du projet SYRAH-CE. Les tronçons ont été découpés en fonction de quatre caractéristiques hydromorphologiques qui ont été choisies en raison de leur capacité à expliquer les formes fluviales et donc à pouvoir, plus aisément, déceler les altérations ultérieurement :

- la largeur du fond de vallée alluvial,
- la pente et la géométrie du fond de vallée,
- l'hydrologie (via l'ordination de Strahler),
- et la nature du substratum géologique, quand le fond de vallée n'est pas alluvial,

1.3 compléments de terrain

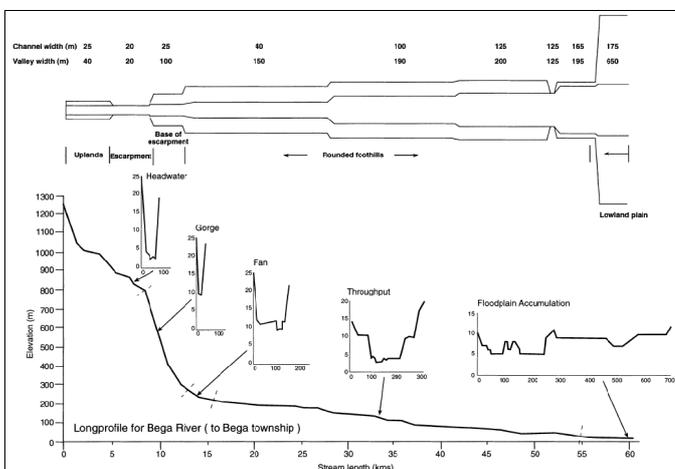
Cette analyse de bureau sera complétée par une visite de terrain afin de vérifier l'intensité de la production sédimentaire du bassin versant. Les investigations consisteront à parcourir les zones pouvant potentiellement fournir des matériaux aux cours d'eau, c'est à dire :

- les cours d'eau de tête de bassin positionnés au pieds de versants érodables : repérage d'éboulements, d'apports très grossiers dans le cours d'eau, etc.
- La rive extérieure (extrados) de méandres marqués : repérage de berges sub-verticales, évaluation de l'érodabilité de la berge (cf. protocole page 54), etc. En cas de doute cette évaluation pourra s'appuyer sur l'étude diachronique de photographies aériennes sur un pas de temps suffisant (supérieur à 10 ans)

1.4 Réalisation de cartes décrivant le contexte géomorphologique

Les cartes à produire doivent permettre :

- d'identifier les zones de production sédimentaire,
- de faire ressortir la variabilité sédimentaire naturelle entre les sous-bassin versant,
- de faire ressortir la variabilité longitudinale d'un certain nombre de paramètres de contrôle de la dynamique sédimentaire de chaque cours d'eau (pente de la vallée, largeur du fond de vallée, puissance, etc.)



III. 32: Exemple de sectorisation à l'échelle d'un petit bassin versant (Brierley et Fryirs, 2000)

2. localisation des pressions pouvant altérer la dynamique sédimentaire

2.1 Le recensement de terrain

Un diagnostic de la continuité sédimentaire doit s'appuyer sur un recensement aussi exhaustif que possible des ouvrages transversaux. Ce recensement viendra compléter, le cas échéant, le référentiel national déjà existant (ROE³).

Les données à acquérir sont, par ordre de priorité:

- la hauteur de chute, et si possible la cote NGF de la crête du seuil,
- la présence/absence de parties mobiles,
- la longueur du remous liquide en basses eaux,
- le ratio de la largeur du pertuis par rapport à la largeur plein bord moyenne du cours d'eau,
- les modalités de gestion (curages réguliers, ouverture, etc.),
- l'évaluation du niveau d'envoie en crue, en particulier pour les ouvrages situés sur des cours d'eau sablo-graveleux à écoulement fluvial. (cf. protocole d'envoie en crue page 61)

Les autres pressions à localiser sont :

- les protections de berge bloquant l'érosion latérale
- les tronçons de cours d'eau présentant des signes évidents de recalibrage (surlargeur) ou reprofilage du cours d'eau
- les linéaires de berge effondrée du fait du piétinement par le bétail ce qui peut, dans le cas de berges argilo-limoneuse, apporter artificiellement des sédiments fins au cours d'eau et contribuer, dans une certaine mesure, à son colmatage.

Pour ces données de pressions, s'il n'est pas envisageable de prospecter l'intégralité des cours d'eau du bassin versant, on réalisera le recensement sur l'ensemble du cours d'eau principal et sur un échantillon de tronçons représentatifs et bien répartis sur le réseau hydrographique du bassin versant. Les pressions et altérations recueillies sur les affluents seront ensuite extrapolées régionalement en fonction du contexte naturel et anthropique (zone urbaine ou zone agricole intensive par exemple). Cette approche est similaire à celle retenue pour le protocole AURAH-CE (AUDIT RAPIDE de

³Le Référentiel des obstacles à l'écoulement

2.2 Les archives

Ce recensement de terrain sera complété par l'exploitation de données d'archives qui pourront permettre d'identifier des interventions ayant modifiées la dynamique sédimentaire (reprofilage, extractions en lit mineur, etc.).

2.3 Carte d'évolution de l'occupation des sols

Les changements d'occupation des sols peuvent engendrer des modifications importantes du fonctionnement sédimentaire des bassins versants.

Par exemple, l'imperméabilisation des sols, du fait de l'urbanisation, accroît la vitesse et le volume du ruissellement, et peut entraîner une érosion accrue des versants naturels, des berges et du lit du cours d'eau. De même, la modification des conditions de ruissellement en zone agricole (fossés, drainages, rejets, etc.) détournés vers des parcelles où avant il n'y avait pas de concentration des écoulements en surface peut enclencher une production sédimentaire inhabituelle et la formation de ravines.



III. 33: ravine sur le bassin de la Gartempe © S. Braud

Ainsi, on réalisera une carte d'évolution de l'occupation du sol sur les 30 dernières années en faisant ressortir :

- les zones imperméabilisées
- les modifications du parcellaire agricole,
- les zones de suppression ou de colonisation des boisements.

3. identification de divergences de la dynamique sédimentaire du (ou des) cours d'eau étudié(s) par rapport aux modèles théoriques

Cette étape consiste à décrire le (ou les) cours d'eau étudié(s) d'amont en aval et à identifier les divergences de certains paramètres descriptifs par rapport aux modèles théoriques.

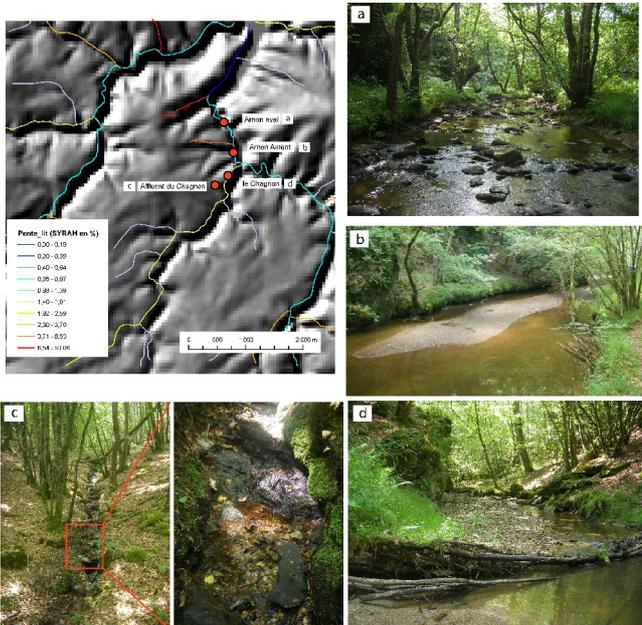
3.1 Relevés des caractéristiques des tronçons

Dans l'idéal, il conviendrait de parcourir l'ensemble du réseau hydrographique du bassin versant. A minima, on appliquera le protocole sur tous les cours d'eau classés en liste 2 et sur leurs affluents situés sur des sous-bassins productifs (cf. 1^{ère} étape).

On parcourra donc l'ensemble du cours d'eau en observant la variabilité des faciès d'écoulement. A chaque changement de faciès (par exemple lors du passage d'une zone lotique à la zone lentique de la retenue d'un ouvrage transversal) et lors de changement de tronçons géomorphologiques homogènes, on choisira deux stations représentatives des secteurs amont et aval de ces limites et on décrira :

- le type morphologique du sous-tronçon (exemple de classification : lits à fond rocheux, lits à blocs, lits à fond plat, alternance de séquences seuil-mouille, dunes)
- la densité et les caractéristiques géométriques des formes d'accumulation
- la granulométrie dominante du lit et des formes d'accumulation (cf. protocole page 47), l'éventail granulométrique visible en surface et l'épaisseur d'alluvions.
- la granulométrie dominante du lit des affluents, La station sera choisie, en amont immédiat de la confluence avec le cours d'eau principal.
- La largeur moyenne du lit à plein bord et la hauteur des berges
- l'intensité du colmatage (Méthode d'Archambaud page 51)

En parallèle, des « indicateurs » d'altérations peuvent être relevés sur le terrain (signes d'incision du lit, affleurement du substratum, etc.).



III. 34: Exemples d'observations sur le Haut-Arnon (18) pouvant être relevées lors d'une prospection de terrain à l'échelle d'un bassin versant: (a) type de faciès et granularité dominante, (b) forme d'accumulation sableuse due à la rupture du profil en long contrôlée par un affleurement rocheux à l'aval, (c) ravines apportant des sédiments au cours d'eau, (d) forme d'accumulation de gravier à l'amont d'un arbre en travers du lit. © A. Alber

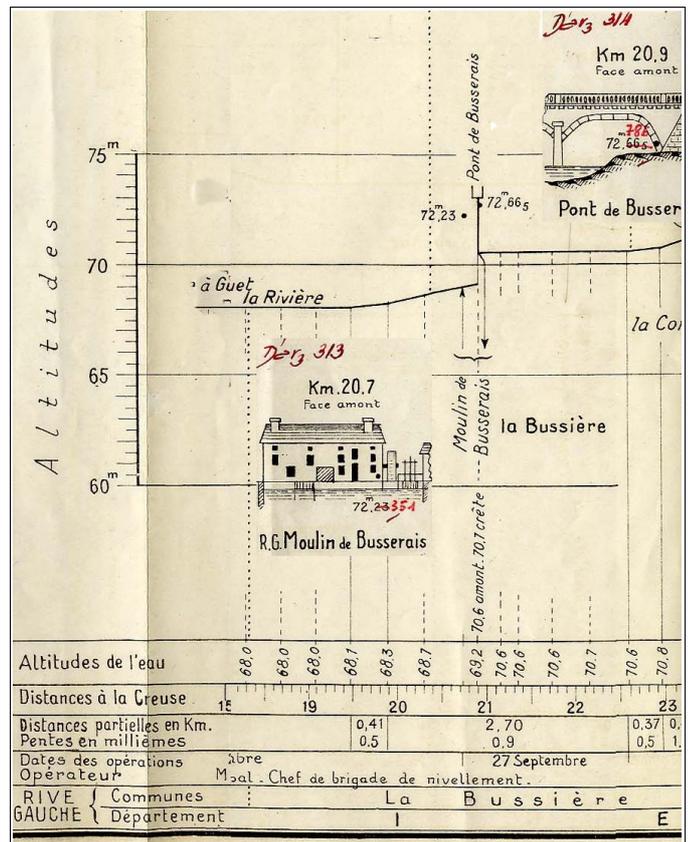
3.2 évolution du profil en long

L'IGN met à disposition un certain nombre de profils en long du fil d'eau de cours d'eau, relevés au début du XX^{ème} siècle.

http://geodesie.ign.fr/fiches/index.php?module=e&action=e_profils

Ces mesures de hauteur d'eau sont approximativement datées (3^{ème} ligne en partant du bas). Selon la date de mise en service de la station hydrométrique la plus proche (<http://www.hydro.eaufrance.fr>), on peut parfois associer un débit ou un type d'événement hydrologique (crue, étiage, module, etc.) à chaque cote de ligne d'eau. La comparaison de cette donnée avec une hauteur d'eau récente relevée pour un débit équivalent peut, sur des zones non influencées, fournir un certain nombre d'informations et par exemple l'identification d'un phénomène d'incision. Les cotes données sur ces profils sont généralement des cotes NGF-Lallemand Orthométriques et non NGF-IGN69 Normales. Les surcharges en rouge correspondent à la conversion des cotes des repères utilisés ce qui permet de convertir les altitudes de l'eau dans le système normal. Sinon, l'IGN propose également des grilles de corrections entre les altitudes du Système NGF-Lallemand et les altitudes du Système NGF-IGN69

<http://geodesie.ign.fr/index.php?page=grilles>)



III. 35: Ancien profil en long de la Gartempe © IGN

3.3 repérage des divergences

On s'attachera à reporter toutes les données collectées sur un profil en long ou sur une carte. On positionnera également sur ce document les affluents et les différents éléments du contexte géomorphologique :

- les limites de tronçons homogènes
- les variations des pentes de la vallée ou de la puissance fluviale,
- les zones de production sédimentaire et leur degré de connectivité au cours d'eau
- la granulométrie dominante des affluents
- etc.

L'exercice consistera à relever toutes les discontinuités et divergences de la dynamique sédimentaire du cours d'eau par rapport aux modèles théoriques (décroissance théorique de la granulométrie, disparition d'une frange de l'éventail granulométrique par rapport à la station amont, etc.) et à essayer de les expliquer par les éléments du contexte géomorphologique. Il restera donc une liste d'anomalies non explicables par une cause naturelle.

4. établissement d'une liste d'ouvrages transversaux pouvant avoir contribué à ces altérations

Cette dernière étape consistera à croiser les anomalies précédemment identifiées avec la position des pressions et en particulier des ouvrages transversaux.

Les ouvrages situés en amont immédiat d'une anomalie seront suspectés de contribuer à ces dysfonctionnements. Il conviendra donc de mener des investigations poussées sur ces ouvrages afin de vérifier leur impact sur la continuité sédimentaire.

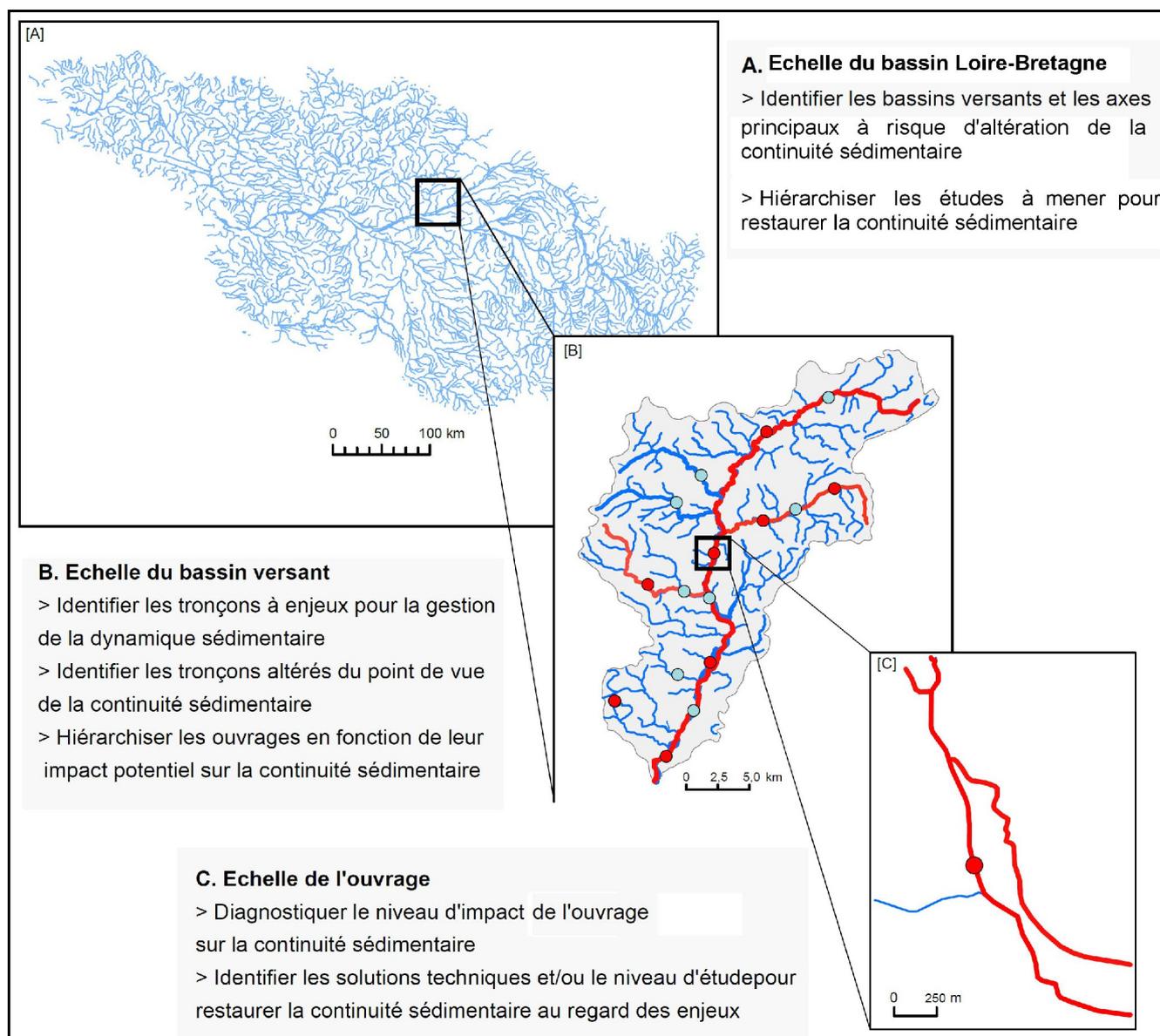
Les ordres de priorité seront pondérés en fonction:

- du potentiel de production sédimentaire amont : L'ouvrage sera en priorité forte s'il est proche des zones de production (zone amont d'un sous-bassin versant actif, aval immédiat d'une confluence avec un affluent à fort transport solide, etc)
- de l'intensité du dysfonctionnement identifié en aval de l'ouvrage (incision, disparition des sédiments grossiers, etc.)
- des caractéristiques intrinsèques de l'ouvrage (barrages/seuil, hauteur, présence ou non de partie mobile, type de vannes, etc., ennoisement en crue)

FICHE 6- DIAGNOSTIC DÉTAILLÉ À L'ÉCHELLE D'UN SEUIL OU D'UNE SÉRIE DE SEUILS

Échelle de travail : ouvrage ou série d'ouvrages (tronçon de cours d'eau).

Objectif : évaluer l'impact de l'ouvrage sur la continuité sédimentaire



OBJECTIF

La fiche précédente a pour objectif d'apporter des éléments de diagnostic afin d'évaluer l'enjeu sédimentaire à l'échelle d'un petit bassin versant et d'identifier une série d'ouvrages présentant des risques forts d'altération de la continuité sédimentaire.

A cette étape, les ouvrages retenus sont donc :

- soit des ouvrages identifiés comme pouvant intercepter une fraction non négligeable des

sédiments grossiers du cours d'eau (cours d'eau situés dans des contextes de bassin versant producteurs de sédiments grossiers et présentant des signes de dysfonctionnement sédimentaire pouvant impacter la biocénose)

- soit des ouvrages qui, du fait de leur retenu, crée des linéaires d'habitats colmatés* relativement importants.

Sur la base du diagnostic à l'échelle du petit bassin versant, la présente fiche propose, dans une suite

logique, un raisonnement permettant d'évaluer le niveau d'altération de la continuité sédimentaire généré par un seuil ou par une série de seuils situés sur un même tronçon hydromorphologique homogène. Sauf cas très particuliers, les barrages ont pratiquement toujours un impact fort sur les sédiments grossiers, nous nous limiterons donc à proposer une démarche pour évaluer l'impact des seuils.

A ce stade, il est important de conserver à l'esprit les éléments de contexte, mis en exergue lors du diagnostic à l'échelle du petit bassin versant (caractéristiques du sous-bassin versant étudié, occupation du sol ...). Selon la problématique qui aura été identifiée à l'étape précédente, deux approches sont alors possibles:

- évaluer l'impact d'un seuil sur le transport des sédiments grossiers
- évaluer l'impact d'un seuil sur le colmatage ou « l'ensablement »

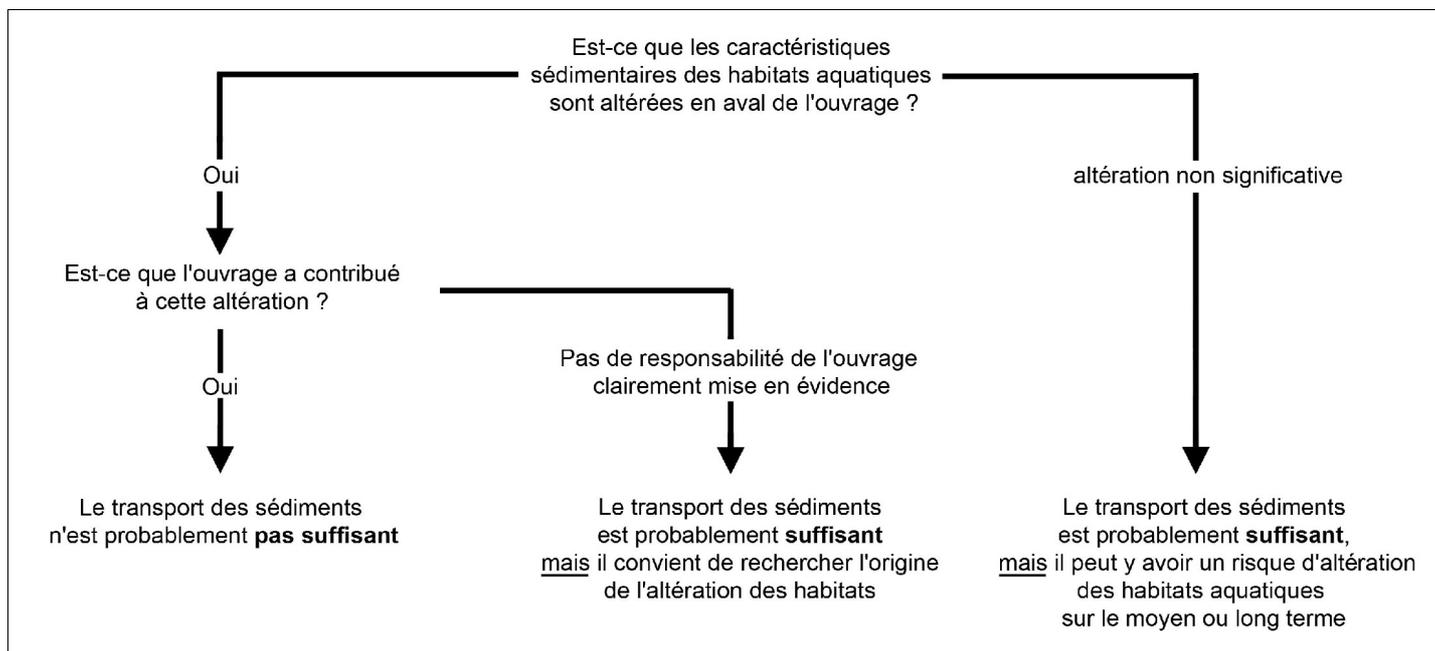
Seul la première approche sera décrite dans cette fiche.

DÉMARCHE PROPOSÉE AFIN D'ÉVALUER L'IMPACT D'UN SEUIL SUR LE TRANSPORT DES SÉDIMENTS GROSSIERS

Afin de juger du niveau d'altération de la continuité sédimentaire généré par l'ouvrage, nous proposons de répondre successivement aux deux questions suivantes :

- Est-ce que les caractéristiques sédimentaires des habitats aquatiques sont altérées en aval de l'ouvrage ?
- Est-ce que l'ouvrage est une des causes de cette altération ?

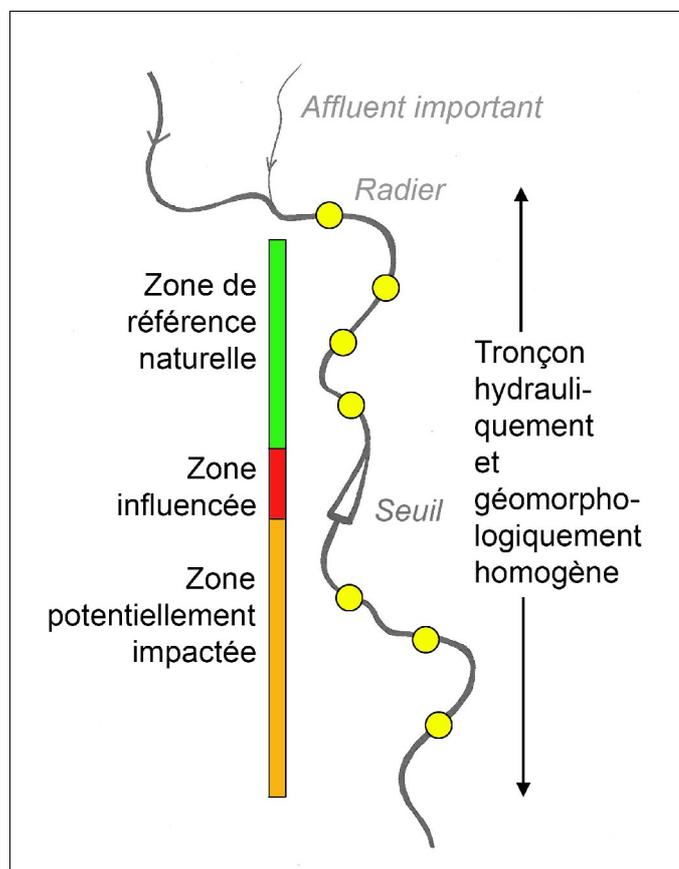
Remarque : comme nous l'avons vu précédemment, les causes potentielles du dysfonctionnement sédimentaire des cours d'eau sont multiples (extractions en lit mineur, reprofilage, etc.).



III. 36: Raisonnement simplifié permettant d'évaluer l'impact d'un seuil sur le transport des sédiments grossiers

Faute de typologie opérationnelle qui permettrait d'évaluer « l'écart » de l'état de chaque tronçon de cours d'eau à une référence naturelle comparable, aussi bien d'un point de vue sédimentaire que du point de vue de la réponse biologique, nous proposerons des protocoles basés sur le principe de la comparaison relative de stations situées sur un même tronçon géomorphologique homogène mais réparties de part et d'autre de la retenue du seuil. Ces deux zones seront intitulées dans la suite du document :

- zone dite de « référence naturelle », située en amont des remous solide et liquide de l'ouvrage (non influencée par l'ouvrage), et dans une zone peu anthropisée (pas ou peu de protection de berge, pas en aval immédiat d'un autre ouvrage)
- zone dite « potentiellement impactée », située en aval de l'ouvrage.

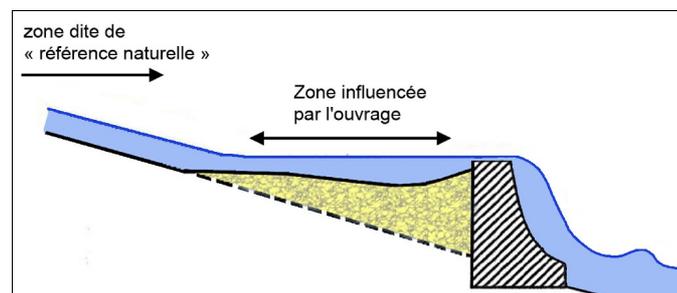


III. 37: identification des stations de mesures

L'approche proposée à cette échelle de travail repose sur l'hypothèse que, dans un contexte non anthropisé, la granularité des sédiments mobiles constituant les mêmes unités hydromorphologiques, devrait être relativement similaires sur l'ensemble d'un tronçon géomorphologique homogène*.

Dans un premier temps, il est donc nécessaire d'identifier la limite entre deux zones :

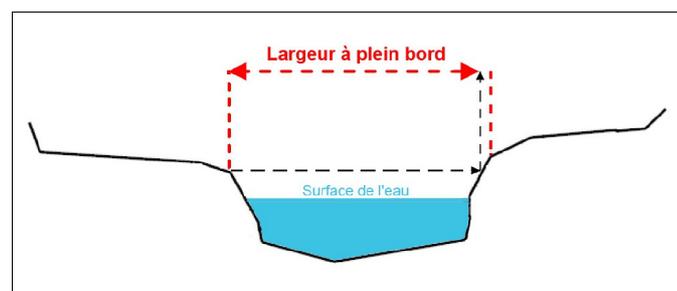
- la zone à écoulement libre, en amont de la zone d'influence de l'ouvrage. Si la morphologie est peu artificialisée, on devrait identifier des faciès d'écoulement moins lenticques et plus variés qu'en amont immédiat de l'ouvrage,
- la zone où la ligne d'eau est influencée en amont de l'ouvrage, c'est à dire la zone sur laquelle, en basses eaux, on observe des faciès d'écoulement de type lenticque (« plan d'eau ») souvent appelée « remous liquide »



III. 38: Localisation des zones naturelle et influencée

On procède ensuite à l'évaluation de la largeur moyenne à plein bord de la zone dite de « référence naturelle ». Cette mesure permettra de dimensionner la zone des relevés. Ces largeurs à plein bord sont relevées rapidement à l'aide d'un télémètre entre les deux bords de berge et perpendiculairement à l'écoulement (illustration ci-dessous). La largeur moyenne à plein bord peut également être évaluée préalablement en analysant les orthophotographies disponibles sur les cours d'eau les plus larges.

NB : Ces mesures doivent être réalisées de préférence au droit des points d'inflexion du tracé en plan, et en évitant les sections dissymétriques complexes, notamment les zones de surlargeur dans les sinuosités actives.



III. 39: Mesure de la largeur à plein bord

1^{ÈRE} QUESTION : EST-CE QUE LES CARACTÉRISTIQUES SÉDIMENTAIRES DES HABITATS AQUATIQUES SONT ALTÉRÉES EN AVAL DU SEUIL ?

Nous aurions souhaité évaluer directement l'impact sur le bon fonctionnement des biocénoses. Cependant, comme nous l'avons déjà précisé, aucun indicateur biologique de l'état écologique ne permet, à ce jour, d'évaluer le risque de dysfonctionnement écologique engendré par le dysfonctionnement sédimentaire d'un cours d'eau. C'est pourquoi, nous proposons de limiter cette approche à une évaluation de la diversité voire de l'attractivité des habitats disponibles pour la faune aquatique (cf. protocoles IAM ou protocoles de diversité des habitats en annexe, page 50).

Le principe général sera le même que pour l'approche à l'échelle du petit bassin versant mais la taille de la zone d'investigation permettra de parcourir l'intégralité du tronçon, de densifier le nombre de stations représentatives et de mettre en œuvre des protocoles plus précis qu'à l'étape précédente.

Il convient en premier lieu de définir les variables à retenir pour caractériser l'habitat. La méthode originelle des microhabitats considère uniquement trois variables, que sont la hauteur d'eau, la vitesse du courant et le substrat. D'autres méthodes plus poussées ajoutent la végétation, les sous-berges, l'ombrage, la température, etc. aux trois variables de base. Même si ces variables complémentaires ne sont pas indispensables pour atteindre l'objectif visé dans ce document, ces éléments peuvent permettre de répondre à d'autres besoins de connaissance. Bien sûr le niveau de précision souhaité sera à mettre en adéquation avec les moyens et le temps disponibles.

Dans un second temps, l'analyse proprement dite consistera à comparer les informations récoltées sur le sous-tronçon dit « de référence naturelle », situé en amont des remous solide et liquide de l'ouvrage aux informations récoltées sur le sous-tronçon situé en aval de l'ouvrage et dit « potentiellement impacté ». La comparaison de la structuration des habitats minéraux du tronçon aval par rapport au tronçon amont permettra de répondre à la question initiale.

Protocole allégé

Étant donné l'objectif visé et si les moyens disponibles ne permettent pas la mise en œuvre complète des protocoles cités précédemment, il est

possible d'envisager une approche reposant uniquement sur trois paramètres descriptifs de l'habitat : le substrat et la hauteur d'eau et l'épaisseur d'alluvions. On pourra également réduire les tailles des stations à une distance minimale de 14 fois la largeur à plein bord (soit légèrement plus que la largeur maximale théorique de 2 successions de radiers/mouilles)

On représentera donc l'ensemble des placettes homogènes du point de vue du substrat sur la zone de référence naturelle et sur la zone potentiellement impactée. On couplera cette information avec des protocoles de type Wolman sur l'ensemble des radiers de la zone d'étude. Au niveau de ces radiers, un certain nombre de caractéristiques géométriques (largeur, pente de la ligne d'eau et hauteurs des berges) du lit seront relevées afin de vérifier que les stations sont comparables entre elles. En effet, même si le tronçon étudié est considéré comme globalement homogène, il existe des contraintes liées à la géométrie locale du cours d'eau qui modifient les contraintes hydrauliques et conditionnent la répartition des sédiments.

L'analyse consistera à comparer les données collectées sur les deux zones étudiées. Des conclusions sont attendues en particulier concernant:

- la densité surfacique de placettes à dominante grossières de part et d'autre de la retenue
- la diversité des placettes en terme de substrats dominants et hauteur d'eau
- la présence de secteurs présentant une très faible épaisseur d'alluvions
- la proportion d'affleurement du substratum ou de pavage en aval de l'ouvrage
- la comparaison des diamètres caractéristiques permettant de décrire la distribution granulométrique des sédiments constituant les radiers: d10, d50, d84 et d90.
- l'absence en aval de l'ouvrage de certaines franges de l'éventail granulométrique présentes sur la zone de « référence naturelle »

L'interprétation des « anomalies » sera à mettre en relation avec le contexte. Par exemple, dans le cas de cours d'eau de tête de bassin où le lit peut être

constitué naturellement de très gros éléments non mobiles (blocs...), l'évaluation du D50 pourra ne pas être pertinente. Il sera également important d'identifier un éventuel phénomène de pavage en aval de l'ouvrage avant d'interpréter les résultats. Enfin, l'analyse de ces anomalies tiendra compte de l'incertitude sur la mesure, qui sera évaluée en fonction de la variabilité de l'information obtenue sur le sous-tronçon amont.

Enfin, en cas d'incertitude sur un éventuel phénomène de pavage ou de doute sur la mobilité de certains éléments, il pourrait être intéressant de coupler cette approche avec un système de marquage des éléments les plus grossiers afin de s'assurer qu'ils sont bien mobiles en crue.

2^{NDE} QUESTION : EST-CE QUE LE SEUIL A CONTRIBUÉ À CETTE ALTÉRATION ?

On ne peut pas répondre à cette question en proposant une seule approche. En effet la démarche à suivre dépendra du contexte, des données disponibles, etc. Nous nous limiterons donc à proposer une démarche pour les cas les plus fréquents et à fournir quelques pistes pour les cas particuliers.

la retenue du seuil a-t-elle été curée ?

Cette première étape consiste à récolter toutes les informations concernant la gestion de l'ouvrage. En effet, ces précisions, si elles sont disponibles et fiables, peuvent permettre de poser quelques hypothèses quant à l'impact de l'ouvrage:

- si les caractéristiques sédimentaires des habitats aquatiques sont altérées en aval du seuil et si la retenue a fait l'objet de plusieurs curages, ces éléments conduisent à supposer qu'il y a un lien entre l'impact de l'ouvrage sur la continuité sédimentaire et l'altération des habitats.
- si les caractéristiques sédimentaires des habitats aquatiques ne sont pas altérées en aval du seuil, si la retenue a fait l'objet de plusieurs curages et si les sédiments extraits ont systématiquement été réinjectés dans le lit en aval de l'ouvrage, ces éléments conduisent à supposer que l'ouvrage a un impact sur la continuité sédimentaire mais que la gestion réalisée réduit l'impact sur les habitats.

Est-ce que des sédiments grossiers sont piégés dans la retenue du seuil ?

La méthode proposée s'appuie sur la théorie qui veut qu'une rupture significative de la pente du profil en long du fond du lit d'un cours d'eau, en amont de l'ouvrage transversal, traduise un comblement partiel de la retenue, c'est à dire un piégeage passé des sédiments (Malavoi et al., 2011).

Les mesures consistent à relever l'altitude de points du profil en travers du lit mineur sur la zone en amont de la zone d'influence de l'ouvrage et dans le remous liquide de l'ouvrage (précision acceptable : 5 cm). Les relevés sont réalisés, à minima, sur une distance de 14 fois la largeur à plein bord sur la zone naturelle (soit légèrement plus que la largeur maximale théorique de 2 successions de radiers/mouilles) et sur l'ensemble de la zone influencée, avec un espacement d'environ 1 fois la largeur à plein bord. Cette donnée permettra de tracer le profil en long du fond moyen du cours d'eau. Pour un diagnostic allégé, on se limitera à relever le profil en long des points bas du lit (thalweg).

Les cotes relevées seront alors positionnées sur un graphique. Des courbes de tendance linéaire seront tracées sur les deux zones, puis les 2 droites seront comparées visuellement.

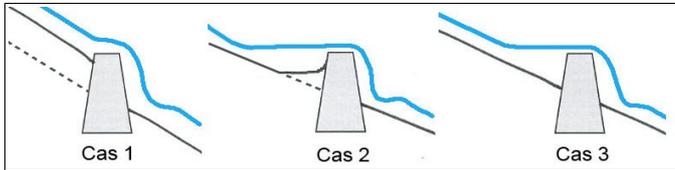
Pour l'analyse, on fera abstraction de deux zones particulières:

- la zone de transition entre la zone naturelle et la zone influencée car dans le cas de cours d'eau à forte pente le passage d'un écoulement torrentiel à fluvial pourrait générer une fosse au droit du changement de régime.
- l'amont immédiat du seuil qui peut présenter une discontinuité de pente

On pourra ainsi différencier 3 stades de comblement:

- Cas1 : le cas particulier où il n'y a pratiquement plus de retenue liquide, même à l'étiage, on retrouve les faciès d'écoulements naturels juste en amont de l'ouvrage. Le nouveau fond du lit se retrouve perché, sensiblement à la hauteur de la crête du seuil. Cette situation se rencontre dans des contextes de rivières torrentielles.

- Cas 2 : On observe bien une retenue liquide mais la pente du profil en long du fond du lit du cours d'eau, présente une rupture significative, en amont de l'ouvrage.
- Cas 3 : la retenue liquide est également bien marquée, mais la pente du fond du lit ne présente pas de rupture significative, en amont de l'ouvrage.



III. 40: Différents stades de comblement de la retenue d'un seuil

Remarque : plus la pente naturelle du lit est faible, plus cette démarcation est difficile à identifier.

Le dernier paramètre qui sera pris en compte sera l'ancienneté de l'ouvrage. En effet, plus l'ouvrage est ancien, plus on peut être confiant dans l'interprétation du comblement actuel de la retenue (à condition de connaître les modes de gestion de la retenue : curage ...). En effet une retenue peut alterner des périodes de comblement et de « vidange » naturelle lors d'événements hydrauliques. Ainsi, il est préférable d'attendre plusieurs crues morphogènes avant d'interpréter le comblement de la retenue. Pour un seuil, on peut estimer que le comblement observé sur plus de 50 ans fournit, sauf exception, une tendance fiable de l'évolution de la retenue. Remarque : la grande majorité des seuils du bassin Loire-Bretagne ayant plus de 50 ans, l'étude du comblement de leurs retenues devrait fournir des informations pertinentes.

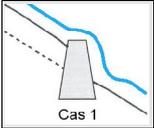
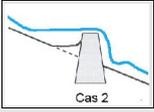
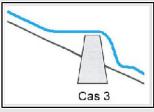
stades de comblement de la retenue du seuil	Altération des caractéristiques sédimentaires des habitats en aval de l'ouvrage	Ancienneté de l'ouvrage	Évaluation de l'impact du seuil
Cas 1  seuil en rivière torrentielle	Altération non significative		Constat d'un piégeage passé des sédiments mais pas d'altération des habitats. Cette situation peut traduire une actuelle quasi-transparence de l'ouvrage du point de vue du transport sédimentaire.
	Altération avérée		Constat d'un piégeage passé des sédiments (L'ouvrage a contribué à l'altération des habitats) et pourtant une actuelle quasi-transparence de l'ouvrage du point de vue du transport sédimentaire. Cette situation peut correspondre à trois cas de figure: <ul style="list-style-type: none"> - soit l'altération due au piégeage passé des sédiments est très marquée, et l'actuel rétablissement de la continuité sédimentaire n'est pas suffisant pour rétablir la situation. Dans ce cas, le volume de sédiments piégés dans la retenue peut représenter une opportunité pour restaurer les habitats. - soit l'atterrissement de la retenue est relativement récent, la continuité sédimentaire est donc rétablie au droit de l'ouvrage mais les processus de restauration des habitats sont en cours et nécessitent encore du temps. - soit la cause principale de l'altération des habitats est à chercher ailleurs. Dans ce cas, le volume de sédiments piégés dans la retenue peut également représenter une opportunité pour restaurer les habitats.
Cas 2 	Altération non significative	ancien	Cette rupture significative dans la retenue traduit un comblement partiel de la retenue et donc un piégeage passé des sédiments (Malvoï et al., 2011). Cette situation peut correspondre à deux cas de figure: <ul style="list-style-type: none"> - soit l'impact de l'ouvrage sur la continuité sédimentaire est mineur (ouvrage relativement petit et volume stocké relativement faible relativement au transport annuel du cours d'eau) - soit l'ouvrage est quasi-transparent. En effet, cette différence de configuration avec le cas précédent ne signifie pas forcément que l'ouvrage n'est pas transparent aujourd'hui. Pour les seuils situés sur des cours d'eau en écoulement fluvial, même lorsque l'atterrissement de la retenue est terminé, il reste une pelle. Une erreur fréquente consiste à croire qu'une pelle signifie que le seuil n'est pas encore atterri. - soit il y a une reprise d'un stock alluvial fossile par érosion latérale ou par érosion du fond qui compense le déficit en aval de l'ouvrage.
		récent	Constat d'un piégeage passé des sédiments. Dans ce cas de figure, il est délicat de conclure sur l'intensité de l'impact du seuil. En effet la dégradation des habitats est peut-être en cours et ne sera peut-être détectable qu'à moyen ou long terme. Il convient alors de compléter le diagnostic par une évaluation de l'impact actuel de l'ouvrage.
	Altération avérée		Constat d'un piégeage passé des sédiments. L'ouvrage bloque probablement encore une partie de la charge de fond (dans la retenue liquide ou en amont du remous solide)
Cas 3 	Altération non significative	ancien	Pas d'identification d'un piégeage passé des sédiments, en amont du seuil. L'ouvrage semble quasi-transparent du point de vue du transport solide. À partir des éléments de contexte de l'étude menée à l'échelle du bassin versant (puissance spécifique du tronçon, intensité du transport solide) et des informations obtenues sur la gestion de l'ouvrage (curages, ouvertures des vannes en crue ...), on peut classer l'ouvrage dans deux catégories: <ul style="list-style-type: none"> - soit l'ouvrages n'est pas piégeant, c'est parfois le cas sur les cours d'eau très puissants ou sur les ouvrages disposant de dispositifs de dégrèvement fonctionnels ; - soit l'ouvrage est potentiellement piégeant, mais il n'existe pas ou peu d'apport solide.
		récent	Dans ce cas de figure, il est délicat de conclure quant à l'intensité de l'impact. En effet la dégradation des habitats est peut-être en cours et ne sera peut-être détectable qu'à moyen ou long terme. Il convient alors de compléter le diagnostic par une évaluation de l'impact actuel de l'ouvrage.
	Altération avérée		Pas d'identification d'un piégeage passé des sédiments mais il y a un impact. À partir des éléments de contexte de l'étude menée à l'échelle du bassin versant (puissance spécifique du tronçon, intensité du transport solide) et des informations obtenues sur la gestion de l'ouvrage (curages réguliers, ouvertures des vannes en crue ...), on peut classer l'ouvrage dans deux catégories: <ul style="list-style-type: none"> - soit la retenue a fait l'objet de curages et les sédiments n'ont pas été réinjectés en aval de l'ouvrage. L'impact actuel de l'ouvrage et de sa gestion est donc fort. - soit la cause principale de l'altération des habitats est à chercher ailleurs.

Tableau 2 : Tableau d'analyse de l'impact d'un seuil sur la continuité sédimentaire.

Ce tableau d'analyse n'est qu'un schéma de principe et ne traite pas tous les cas particuliers. Rappelons également que cette approche ne prend pas comme référence le transport de sédiments qui devraient transiter naturellement sur le tronçon de cours d'eau étudié, sans les obstacles en amont.

Ce tableau sera modifié ou complété ultérieurement en fonction des conclusions du groupe de travail national travaillant sur le sujet.

N.B.: Dans le cas d'une retenue totalement atterrie, même si le seuil peut être jugé transparent du point de vue sédimentaire, il reste impactant du point de vue de la continuité pour la libre circulation des poissons migrateurs.

INVESTIGATIONS COMPLÉMENTAIRES

Carottages dans la retenue du seuil

Seuls des prélèvements d'échantillons du sous-sol de la retenue permettent d'apprécier correctement:

- le volume de sédiments piégés
- la caractérisation granulométrique des sédiments piégés.

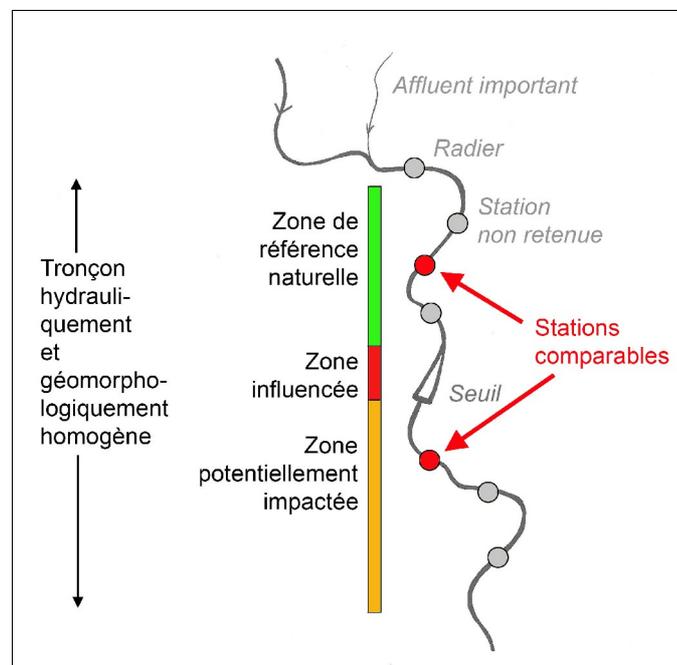
Les carottages sous-fluviaux nécessitent souvent de faire appel à des sociétés spécialisées et engendrent des coûts non négligeables.

Évaluation de l'impact actuel du seuil sur la continuité sédimentaire par des mesures directes du transport solide

Comme nous l'avons vu précédemment, l'impact de l'ouvrage sur la continuité sédimentaire peut évoluer dans le temps. Il est parfois nécessaire d'évaluer dans quelle mesure l'ouvrage interrompt actuellement le transport des sédiments grossiers.

Selon le contexte granulométrique différents préleveurs permettent d'estimer le transport solide sur une station de mesure. Les protocoles associés à ces préleveurs sont relativement chronophages si bien qu'ils ne sont, en général, mis en œuvre que par des organismes de recherche. Quant à la méthode des pièges à sédiments, elle semble être un bon compromis temps/pertinence mais elle n'est utilisable uniquement sur des cours d'eau à faible transport solide et pour une charge de fond relativement grossière.

Quel que soit le dispositif retenu, le principe consistera à comparer les sédiments charriés sur deux stations situées sur un même tronçon géomorphologique homogène mais réparties de part et d'autre de la retenue du seuil (zone de référence naturelle et zone potentiellement impactée). Il conviendra de retenir deux stations comparables. En effet, même si le tronçon étudié est considéré comme globalement homogène, il existe des contraintes liées à la géométrie locale du cours d'eau qui modifient les contraintes hydrauliques et conditionnent l'activité sédimentaire. Ainsi, Au niveau des stations potentielles (radiers), un certain nombre de caractéristiques géométriques du lit seront relevées afin de vérifier que les stations sont comparables entre elles (largeur du lit mineur, pente de la ligne d'eau et hauteurs des berges).



Ill. 41: Position des stations de mesure de la charge de fond

L'analyse consistera à comparer les volumes et la structure granulométrique des échantillons prélevés. Rappelons que l'objectif n'est pas d'estimer précisément le transport solide mais de travailler en relatif.

L'analyse consiste à comparer la structure granulométrique des deux stations en relevant en particulier les anomalies suivantes :

- le $d_{50_{aval}}$ et le volume des sédiments mobiles prélevés en aval sont très inférieurs aux valeurs de l'amont (blocage)
- l'éventail granulométrique des sédiments représentatifs de la station aval présente un

déficit important d'une gamme des sédiments grossiers mobiles présents sur la station amont (blocage), etc.

Les différences devront être significatives afin de tenir compte de l'incertitude sur la mesure. Rappelons, que seuls le respect des protocoles et la multiplication des mesures permettent de réduire l'incertitude importante de ce type de mesure.

LIMITES DE L'APPROCHE ET CAS PARTICULIERS

Limites

Le diagnostic proposé s'applique davantage aux seuils qu'aux barrages. Le diagnostic de l'impact d'un barrage sur la continuité sédimentaire nécessitera des investigations plus poussées. On pourra par exemple proposer:

- Une modélisation hydro-sédimentaire des manœuvres d'ouverture de vannes.
- Une évaluation du niveau de colmatage des frayères situées en aval de l'ouvrage, avant et après des opérations de vidange d'ouvrages ou de chasses.
- Etc.

La principale limite de cette approche est qu'elle ne s'intéresse pas au transport de sédiments qui devrait transiter naturellement sur le tronçon de cours d'eau étudié, sans les obstacles en amont. Ainsi, si l'ouvrage évalué n'est pas l'ouvrage le plus en amont, il est possible que la station de « référence naturelle » retenue soit en fait déjà une référence altérée.

S'il ressort du diagnostic à l'échelle du petit bassin versant que c'est la problématique de colmatage ou d'ensablement qui est dominante, la démarche décrite dans cette partie n'est pas adaptée.

Cas particuliers

Une dynamique active en aval de l'ouvrage (érosion des berges) peut, dans certains cas,

compenser le déficit créé par l'ouvrage (uniquement si les caractéristiques granulométriques de la berge sont comparables à celles du fond du lit). Dans ce cas, les habitats peuvent n'être dégradés que sur un linéaire réduit. Dans ce cas l'ouvrage a un impact sur la continuité sédimentaire mais l'attractivité des habitats peut être jugé acceptable.

Si la retenue de l'ouvrage s'est récemment atterri. La continuité sédimentaire peut être rétablie mais la réponse de l'hydrosystème en aval de l'ouvrage va prendre du temps. L'évaluation des habitats en aval ne traduira pas le fonctionnement actuel de l'ouvrage.

De même, l'impact d'un ouvrage dont la crête a récemment été relevée ou dont les organes de vidange ont été modifiés est plus difficile à diagnostiquer. En effet, l'état des habitats en aval ne correspond plus à l'impact engendré par la configuration actuelle

Le seuil peut être positionné sur une singularité géologique de la plaine alluviale ce qui peut créer une discontinuité naturelle du profil en long du lit du cours d'eau. En cas de doute, la seule solution est de procéder à plusieurs carottages dans la retenue et en amont de celle-ci afin de visualiser le profil en long du substratum et afin de comparer les épaisseurs d'alluvions stockées.

Si le diagnostic à l'échelle du bassin versant a identifié un potentiel impact induit par l'effet cumulé d'ouvrages, il conviendra d'adapter l'aire d'étude en retenant une zone de référence naturelle en amont du premier ouvrage et la zone potentiellement impactée en aval du dernier. Cependant, du fait du principe retenu (comparaison de stations), l'aire d'étude ne pourra aller au delà du tronçon géomorphologique homogène. En effet, il est trop complexe de comparer les caractéristiques granulométriques d'habitats situés sur des contextes géomorphologiques différents.

La suppression de seuils même redevenus transparents peut réduire (au moins pendant un temps) les conséquences d'une incision due à une autre cause.

FICHE 7 – PRÉCONISATIONS DE GESTION DES SEUILS IMPACTANT LE TRANSPORT SÉDIMENTAIRE

Toute action sur un ouvrage afin de restaurer la continuité du transport des sédiments grossiers doit s'inscrire dans une réflexion plus globale de gestion et de restauration du transport solide à l'échelle du bassin versant ou au moins du cours d'eau concerné.



Ill. 42: Seuil de Bigny sur le Cher © S. Braud

QUELLES OBLIGATIONS S'IMPOSENT DÉJÀ ?

Dans le cadre de leurs règlements d'eau, l'application des obligations de gestion de la plupart des seuils existants (anciens moulins le plus souvent) impose l'ouverture des vannes, dès que la cote légale est atteinte (exemple en fin de partie). Ainsi, les obligations en vigueur sur les anciens moulins visent à assurer le libre écoulement des eaux par les vannes de décharges, avec la capacité d'entraînement qui en découle pour les sédiments. Contrairement à l'interprétation de certains riverains, la cote légale de retenue n'est pas un niveau d'eau minimum à conserver en permanence. Au contraire, il s'agit d'une ligne d'eau maximale. En d'autres termes : un seuil de débordement à ne pas dépasser pour les vannes fermées qui impose l'ouverture régulière des parties mobiles de l'ouvrage lorsque les débits augmentent.

Le respect de cette règle de bonne gestion des ouvrages hydrauliques tend à réduire globalement l'impact des seuils sur le fonctionnement et la qualité des cours d'eau. Pour les sédiments, cette disposition générale contribue au transit des

sédiments en fonction de la taille des particules (au moins pour ce qui concerne les sédiments fins), des débits d'ouverture correspondant à la cote légale (fréquence de dépassement élevée) et de la dimension des sections d'évacuation (largeur profondeur).

Dans le cadre des nouvelles dispositions à examiner au titre de la continuité écologique (L 214-17), l'approche relative du transport suffisant des sédiments ne doit pas réduire le champ d'application des mesures simples de gestion, globalement favorables au transit des sédiments fins (voire grossiers) et déjà en vigueur dans le cadre des règlements d'eau des ouvrages.

exemple: Ordonnance du Roi du 7 Juillet 1824 sur la fixation de la hauteur des eaux des moulins et usines et les faucardements et curages des rivières et cours d'eau

TITRE 1 - Fixation de la hauteur des eaux, Article 4 : Les propriétaires ou fermiers des usines seront responsables de la conservation des repères. Toutes les fois que les eaux s'élèveront de dix à douze centimètres sur les déversoirs, ils seront tenus de lever leurs vannes de décharge afin de procurer un débouché suffisant.

(Article 1er - La hauteur des eaux des rivières et ruisseaux du département d'Indre et Loire sur lesquels il existe des usines, des déversoirs ou des vannes, ne pourra, à l'amont de chaque bassin, et dans toute l'étendue du reflux, être maintenue à moins de seize centimètres au-dessous des terrains les plus bas, s'il n'existe pas ou s'il est impossible d'établir d'autre voie d'écoulement pour les eaux que celle du bief de l'usine).

LES SOLUTIONS

5 familles de solutions se dessinent dans le cas où le transport suffisant n'est pas assuré:

➤ la destruction de l'ouvrage par dérasement (destruction totale appelée aussi « effacement »), ou simple arasement (destruction partielle par abaissement important de la crête de l'ouvrage ou maintien d'un seuil de fond anti-érosion régressive). Cette solution permet généralement une restauration complète et définitive de la libre circulation des poissons migrateurs au droit d'un ouvrage et de la continuité sédimentaire du cours d'eau; Le transport solide peut alors reprendre de manière naturelle, après une période d'ajustement plus ou moins longue ; ce sont les solutions les plus efficaces.

➤ la modification de l'ouvrage (abaissement de la crête de l'ouvrage, modification de la partie mobile..)

➤ l'établissement de consignes d'ouverture. Rappelons qu'à minima, il convient d'appliquer les manœuvres d'ouvrage imposées par les règlements d'eau en vigueur (ouverture systématique des vannes de décharges quand le niveau du bief atteint la cote légale de retenue d'un ancien moulin. A défaut de disposition existante, il peut être établi des consignes d'ouverture complète des vannes en période de crues, en précisant les conditions de débits suffisants pour entraîner les sédiments vers l'aval (dans le cas d'un seuil mobile équipée de vannes suffisamment bien dimensionnées)

➤ le transfert des matériaux de l'amont vers l'aval du seuil ; La méthode consiste en général à déposer en aval du seuil, en un point pertinent, les sédiments grossiers curés dans la retenue de l'ouvrage impactant, et à attendre que la rivière fasse le travail de réagencement des alluvions sous formes d'habitats naturels. Le problème principal est que les sédiments

ainsi réinjectés sont assez vite exportés en aval, particulièrement si le cours d'eau s'est fortement incisé. Le déclenchement de ces opérations peut se faire sur la base de seuils de comblement de la retenue.

➤ l'acceptation du piégeage définitif de la charge de fond et la mise en œuvre en aval, si cela est techniquement et socio-économiquement possible, des solutions alternatives (espace de mobilité et recharge alluviale par érosion latérale). Afin de favoriser ces processus, il pourra être nécessaire dans certains cas d'accompagner ce choix de gestion en retirant les éventuelles protections de berges existantes là où l'érosion est acceptable et en dévégétalisant, scarifiant et arasant certains bancs végétalisés.

Aucune solution n'a été privilégiée dans cette fiche. En effet, le choix doit s'opérer en intégrant un certain nombre de considérations indépendantes de l'objectif de continuité sédimentaire, comme par exemple la continuité pour la libre circulation des poissons migrateurs, le contexte juridique de l'ouvrage, les règles de gestion de l'ouvrage ou les contraintes locales d'usages, etc. Nous renvoyons le lecteur à la méthodologie proposée dans le document réalisé pour le SDAGE Rhône-Méditerranée (références page 66).

On notera la similitude entre les actions privilégiées pour rétablir la continuité sédimentaire et celles mises en avant afin de rétablir la libre circulation des poissons migrateurs, au droit d'un ouvrage impactant. La seule divergence réside dans l'ordre d'intervention: en effet, pour la continuité sédimentaire on privilégiera des interventions d'amont en aval sur le cours d'eau, alors que pour les grands migrateurs, on privilégiera souvent une action d'aval vers l'amont. Il convient également de rappeler qu'une passe à poisson n'améliore bien sûr pas la continuité sédimentaire.

Solution envisageable pour rétablir la continuité sédimentaire	Efficacité quant au rétablissement de la continuité sédimentaire sur le long terme (cas d'un ouvrage jugé très impactant)	Précautions & remarques
Dérasement (enlèvement de l'ouvrage et de ses fondations)	 <p>Rétablissement de la continuité sédimentaire naturelle sur le long terme, sans coût d'entretien.</p>	À éviter en contexte d'érosion régressive active lorsque l'évolution prévisible pourrait altérer le substratum en amont de l'ouvrage
Maintien d'un seuil de fond anti-érosion (arasement de l'ouvrage en général jusqu'au niveau naturel du lit du cours d'eau en amont de l'ouvrage)	 <p>Rétablissement de la continuité sédimentaire naturelle sur le long terme.</p>	Une vigilance doit être maintenue car si les processus d'érosion perdurent en aval de l'ouvrage, l'aménagement maintenu pourrait devenir un obstacle au franchissement piscicole ou pourrait être déstabiliser du fait de l'affouillement.
Arasement partiel	 <p>Amélioration de la continuité sédimentaire.</p>	Efficacité variable selon la hauteur abaissée et le contexte
Modification de la partie mobile	 <p>Amélioration de la continuité sédimentaire.</p>	Efficace si les consignes de gestion sont respectées
Consignes d'ouverture complète des vannes en période de crues	 <p>Amélioration de la continuité sédimentaire.</p>	Efficace si les vannes sont suffisamment bien dimensionnées et si les consignes de gestion sont respectées
Transfert des sédiments grossiers	 <p>Efficacité conditionnée par les moyens mis en œuvre</p>	Bilan carbone et coût élevé à long terme
Acceptation du piégeage et recherche de solutions alternatives en aval (espace de mobilité).	 <p>Mise en œuvre complexe et efficacité variable.</p>	Il s'agit plus d'une mesure compensatoire devant participer à réduire le déficit en aval de l'ouvrage.

Évaluation simplifiée des solutions pouvant être mises en œuvre pour corriger l'impact fort d'un ouvrage transversal sur la continuité sédimentaire.

FICHE 8 – PRÉCONISATIONS POUR LA GESTION DES BARRAGES LIMITANT LE TRANSPORT SUFFISANT DES SEDIMENTS



Ill. 43: Barrage de Poutès © Bernard Bost

Dans ce document, nous avons systématiquement qualifié l'impact potentiel des barrages sur la continuité sédimentaire de fort. Il convient tout de même de pondérer ce jugement en fonction des caractéristiques de l'ouvrage et des modes de gestion qui sont mis en place.

Le volume sédimenté d'un barrage est facilement déterminable en étudiant l'évolution de la capacité totale de la retenue.

N.B.: Le taux de sédimentation des barrages évalué par rapport à la capacité utile de l'ouvrage ne permet pas d'apprécier le niveau de piégeage de l'ouvrage. En effet, ce paramètre ne prend pas en compte la sédimentation ayant lieu en dessous de la prise d'eau (dans la réserve dite « morte ») ni l'amont du remous solide grossier.

Il convient également de différencier au sein de cette sédimentation deux types de dépôts :

- les dépôts minéraux
- la sédimentation organique liée aux apports de la ripisylve et qui, dans certains contextes particuliers, peut être prépondérante.

La part correspondant à la sédimentation organique ne doit bien sûr pas être pris en compte pour évaluer l'impact du barrage sur le transport des sédiments grossiers.

Les barrages non équipés de dispositifs de dégrèvement

En plus des barrages non équipés d'ouvrages de dégrèvement, ces préconisations concernent aussi les barrages dont les dispositifs de dégrèvement

fonctionnent mal ou sont sous dimensionnés, ou dont les retenues sont trop longues, trop volumineuses, trop larges pour que le transport de fond puisse atteindre les dispositifs de dégrèvement (EDF avance le seuil de 10 millions de m³, volume de la retenue à partir duquel les opérations de transparence seraient inefficaces).

Sur ces barrages, trois solutions techniques existent pour restaurer tout ou partie du transport solide :

- soit on détruit l'ouvrage (on parle de dérèglement) en gardant éventuellement un radier de fond pour éviter une érosion régressive provenant de l'aval (on parle d'arasement). Le transport solide peut alors reprendre de manière naturelle, après une période d'ajustement plus ou moins longue ; C'est généralement la méthode la plus efficace.
- soit on modifie l'ouvrage (nouvelle vanne de fond, nouvelle échancrure ...). Ce scénario, peut représenter un coût ou des contraintes techniques fortes.
- soit on transfère à pas de temps plus ou moins régulier les alluvions de l'amont vers l'aval de l'obstacle. La méthode consiste en général à déposer en aval du barrage, en un point pertinent, une certaine quantité de granulats (variable selon l'objectif visé), généralement dragués en queue de retenue de l'ouvrage impactant, et à attendre que la rivière fasse le travail de réagencement des alluvions pour reformer des habitats naturels. Le problème principal est que les sédiments ainsi réinjectés sont assez vite exportés en aval, particulièrement si le cours d'eau s'est fortement incisé. Certains projets sont donc accompagnés de modifications de la géométrie du lit mineur, notamment son élargissement pour réduire la capacité de charriage et garantir une plus grande longévité aux dépôts. Pour ce qui concerne les quantités à réinjecter, elles varient en fonction de l'objectif visé (égales à la capacité moyenne annuelle de charriage si l'on vise un retour à un bilan sédimentaire équilibré ; plus faibles dans les autres cas). Cette solution est très onéreuse sur le long terme.

➤ soit on accepte le piégeage définitif de la charge de fond et on met en œuvre en aval, si cela est techniquement et socio-économiquement possible, des solutions alternatives (espace de mobilité et recharge alluviale par érosion latérale). Afin de favoriser ces processus, il pourra être nécessaire dans certains cas d'accompagner ce choix de gestion en retirant les éventuelles protections de berges existantes là où l'érosion est acceptable et en dévégétalisant, scarifiant et arasant certains bancs végétalisés.

Les barrages équipés de dispositifs de dégrèvement fonctionnels et les barrages écrêteurs de crues à pertuis ouvert

La plupart des dispositifs de dégrèvement (« passes » ou « vannes » selon la terminologie localement employée) n'ont généralement été initialement conçus et construits que pour vidanger le plan d'eau afin d'inspecter l'ouvrage ou pour éviter l'engrèvement de la prise d'eau et non pour garantir le transit de la totalité de la charge solide entrante.

Ils sont donc généralement d'assez petite taille et leur position, en général en pied du barrage, est souvent proche de la prise d'eau, ce qui n'est pas toujours le meilleur positionnement par rapport au transit sédimentaire global. Toutefois, ces ouvrages peuvent éventuellement (en fonction de leur forme, de leur manœuvrabilité, de leur position) être utilisés pour améliorer la continuité du transport solide.

Les opérations de « transparence » consistent à ouvrir les vannes de fond en période de crue et parallèlement, à abaisser le niveau d'eau de la retenue. Cela nécessite de pouvoir évacuer au début de l'événement plus de débit que l'entrant et de pouvoir évacuer le maximum de la crue par les vannes de l'ouvrage (et non par déversement). Le plan d'eau retrouve alors une pente quasi-naturelle, un chenal se recrée au sein du remous solide de la retenue et des processus naturels de transfert de sédiments se remettent en marche. On dit alors que l'ouvrage devient « transparent ». On parle également de « chasse d'hydrocurage ». EDF gère un certain nombre d'ouvrage de cette façon.

N.B.: Il convient de ne pas confondre ces opérations avec:

➤ les chasses d'entretien qui sont réalisées en ouvrant les vannes de fond mais en maintenant le plan d'eau à côte haute, ce

qui ne permet pas d'augmenter la pente et limite les processus d'entraînement aux sédiments situés à proximité de l'ouvrage

➤ les opérations de vidange pendant lesquelles on procède également à un abaissement du plan d'eau mais en période de basses eaux

Le suivi d'opérations de transparences réalisées ces dernières années montre 2 principaux problèmes :

➤ le redépôt rapide et brutal des alluvions évacuées et homogénéité des faciès ainsi créés ;

➤ l'apport massif de sédiments fins qui peut conduire au colmatage de certains tronçons. Cette problématique est d'autant plus grave dans des contextes montagnards où les sédiments fins ne devraient que transiter portés par les eaux courantes.

Les mesures susceptibles de réduire l'impact des opérations de transparence concernent essentiellement leurs modalités de réalisation.

Un des facteurs clefs est le choix du débit de déclenchement des opérations qui doit être suffisamment élevé pour obtenir un bon entraînement des sédiments et une dilution correcte des matières en suspension ;

Le deuxième élément important est la durée de la chasse ou transparence. Une baisse trop rapide des débits évacués en fin d'opération, afin de remplir l'ouvrage, peut conduire à :

➤ des dépôts massifs de MES sur une très courte distance en aval de l'ouvrage

➤ un piégeage des poissons dans des annexes déconnectées

Il conviendrait donc de maintenir un débit soutenu en fin d'opération. Les règlements actuels se basent souvent sur le débit de pointe de la crue alors qu'une approche sur le volume de la crue serait plus favorable au charriage et à l'entraînement vers l'aval des sédiments fins. La principale contrainte pour le gestionnaire est le manque à gagner pendant toute la phase où l'eau ne peut pas être turbinée.

A défaut, des lâchers d'eau, à partir des vannes de demi-fond (moins chargées en sédiments), pourraient être réalisés quelques temps après

l'opération de transparence afin d'essayer de décolmater les frayères et habitats aquatiques situés en aval de l'ouvrage. Mais l'efficacité de ce type de manœuvres demande à être vérifiée.

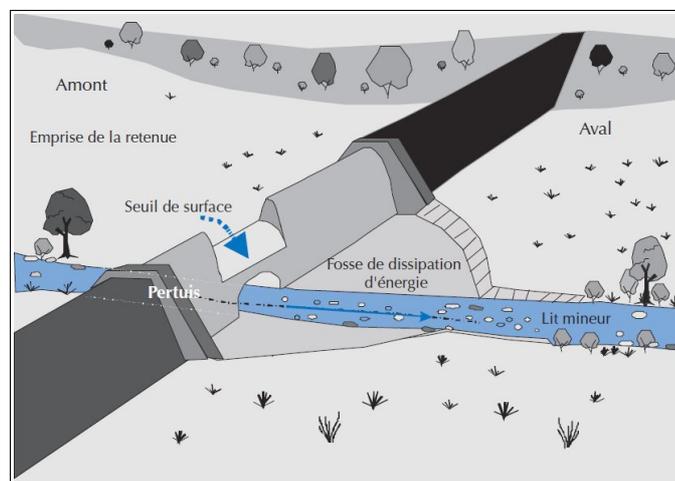
Dernier élément important : la conception de l'ouvrage. En effet, réaliser une chasse suppose que le barrage soit équipé de vannes de fond permettant d'évacuer un débit très important (débit de crue augmenté du sur-débit lié à la vidange concomitante du plan d'eau).

Ainsi, avant d'envisager ce type d'opération, il convient donc de vérifier en particulier :

- si le dimensionnement des organes évacuateurs est suffisant pour permettre d'abaisser rapidement le plan d'eau (rapport entre le volume de la retenue et le débit d'évacuation des vannes)
- si l'ouvrage est conçu pour supporter des abaissements rapides du plan d'eau
- l'importance des risques environnementaux (impact sur la faune piscicole de hausse rapide des niveaux d'eau, risque de forts apports en MES...)

En cas d'impossibilité technique de mettre en œuvre ce type de transparence, on peut envisager le redimensionnement des vannes de fond de la retenue.

Le principe du barrage écrêteur de crues à pertuis ouvert, appelé parfois « barrage à sec » ou retenue sèche », est le suivant: il s'agit de barrer un talweg en laissant à l'eau un passage restreint pour limiter le débit en cas de crue. Le pertuis régule les flux supérieurs à sa capacité d'évacuation (en général le débit de la crue décennale) et la retenue se remplit avec l'excédent de débit. Quand le niveau d'eau atteint le seuil de surface, ce dernier évacue les débits arrivants et permet d'assurer la sécurité de l'ouvrage. Du fait de sa conception et de l'ouverture permanente du pertuis, son impact sur le transport sédimentaire est relativement faible.



Ill. 44: Principe du barrage à pertuis ouvert © Christine Poulard et al.

ANNEXE 1

OUTILS ET PROTOCOLES DE MESURES

Compartiments et/ou paramètres analysés	Protocoles	Informations produites	Page
1- Les sédiments de la couche de surface.	1- Protocole simplifié d'échantillonnage des sédiments (AURAH-CE)	Analyse granulométrique simplifiée de la fraction grossière des sédiments de la couche de surface.	47
	2- Protocole d'échantillonnage des sédiments, dit « méthode de Wolman » (CARHYCE).	Analyse granulométrique de la fraction grossière des sédiments de la couche de surface.	48
	3- Prélèvement de surface pour les grands cours d'eau.	Analyse granulométrique des sédiments de la couche de surface, pour les grands cours d'eau.	49
	4- Description des habitats aquatiques.	Description de la structure et de l'organisation des habitats aquatiques et évaluation de leur attractivité pour la faune.	50
2- Les sédiments fins.	1- Méthode d'Archambaud.	Évaluation visuelle de l'intensité du colmatage.	51
	2- Méthode des « bâtonnets ».	Évaluation de l'oxygénation du substrat.	52
	3- Méthode de la tige graduée.	Évaluation de l'épaisseur de sédiments fins.	53
3- Les berges.	1- Description des strates sédimentaires de la berge.	Évaluation de l'érodabilité des berges.	54
4- Les caractéristiques géométriques du lit.	1- protocole pour les cours d'eau peu profond.	Réalisation de profils en travers et en long (description et suivi).	56
	2- protocole pour les cours d'eau profonds (> 1m).	Réalisation de profils en travers et en long sur de grands cours d'eau.	56
	3- Les chaînes d'érosion.	Suivi des processus de dépôt et d'érosion du fond du lit.	57
5- Les sédiments mobiles et leurs transports.	1- Le traçage des particules.	Évaluation des seuils de mise en mouvement des particules et des vitesses de transport.	58
	2- Les pièges à sédiments.	Évaluation quantitative de la charge de fond grossière.	59
	3- Les échantillonneurs.	Évaluation quantitative du transport sédimentaire.	60
6- Les ouvrages transversaux.	1- Niveau d'ennoisement du seuil de l'ouvrage en crue.	Identification simplifiée des ouvrages ayant potentiellement peu d'impact sur la continuité sédimentaire.	61
	2- protocole ICE.	Description normalisée des ouvrages transversaux afin d'évaluer leurs impacts sur la continuité écologique.	63

PRÉAMBULE TRAITANT DE L'ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

Généralités sur les protocoles

Une analyse granulométrique peut viser deux principaux objectifs opérationnels :

- (1) caractériser le contexte du site et le type de cours d'eau concerné par la taille granulométrique de la charge solide dominante charriée : rivière à sables, à graviers, à blocs.
- (2) identifier des dysfonctionnements géomorphologiques au regard du fonctionnement du cours d'eau.

La définition des actions à engager dépend de ces deux questions. Par exemple, l'analyse de la variabilité longitudinale du profil granulométrique le long d'un cours d'eau est un élément de diagnostic essentiel. Elle permet par exemple de détecter une dérive des caractéristiques granulométriques qui peut avoir une origine naturelle (apports d'un affluent) ou anthropique (la présence d'un seuil).

L'étude granulométrique consiste donc à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon de sédiments. L'analyse peut se faire par tamisage, diffraction laser, mesure directe,... A partir de ces mesures, on établit la distribution statistique des différentes classes de taille qui composent l'échantillon.

La détermination de la classe granulométrique caractéristique d'un tronçon de cours d'eau est un exercice délicat. L'opérateur est confronté aux questions suivantes :

- Où prélever ?
- Quelle couche sédimentaire prélever (surface / sous-couche) ?
- Comment prélever ?
- Quelle quantité prélever ?

Sans apporter de solution clef en main (variable selon les moyens disponibles et la faisabilité), il est tout de même possible de formuler quelques conseils:

➤ tout d'abord, appliquer le même protocole sur toute la zone d'étude afin de pouvoir comparer les données

➤ adapter la méthode à l'objectif de la mesure (par ordre d'exigence: décrire la granularité des substrats supports ou abris pour les biocénoses aquatiques, classer le cours d'eau dans une typologie granulométrique, évaluer le transport solide du tronçon de cours d'eau).

➤ Baser l'analyse granulométrique d'un tronçon de cours d'eau sur un nombre d'éléments ou un volume de sédiments « suffisant » pour disposer d'un échantillon représentatif. Des tests statistiques ont permis d'évaluer le protocole optimal qu'il conviendrait de mettre en œuvre. Ainsi pour obtenir une précision de $\pm 20\%$ sur le Dmoy de la **sous-couche**, il faudrait prélever au moins **50 échantillons**. Pour obtenir le Dmoy de la **couche de surface** avec une précision de $\pm 15\%$, il faut prélever environ 100 **éléments**.

➤ Lorsqu'on réalise des comparaisons inter-tronçons, confronter des prélèvements réalisés dans des zones de dépôts présentant des caractéristiques hydrodynamiques similaires (seuils, thalweg, bancs ...)

Les perspectives

Une référence sédimentaire

Afin de réaliser ces études, il aurait semblé pertinent et logique d'évaluer « l'écart » de l'état de chaque cours d'eau à une référence naturelle comparable d'un point de vue sédimentaire. Même si cette piste semble très intéressante, un important travail de recueil de données et d'analyse reste à faire avant de pouvoir établir une typologie opérationnelle.

Un indicateur biologique

A ce jour, aucun indicateur biologique de l'état écologique (IPR, IBGN et le futur IBG « DCE Compatible ») ne permet d'évaluer le dysfonctionnement sédimentaire d'un cours d'eau. En effet, les notes produites par ces indicateurs sont intégratrices de nombreuses perturbations.

Des travaux de recherche sont en cours afin d'élaborer de nouveaux indicateurs susceptibles de répondre à ce besoin.

DESCRIPTION DES SÉDIMENTS DE LA COUCHE DE SURFACE.

1- Protocole simplifié d'échantillonnage des sédiments de la couche de surface (méthode AURAH-CE)

Le protocole détaillé dans cette fiche est issu de la méthode d'Audit Rapide de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau (AURAH-CE)

Objectifs :

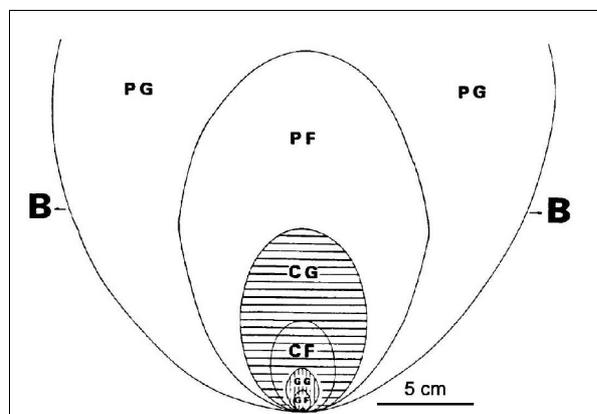
Évaluer sommairement la classe granulométrique de la fraction la plus grossière des sédiments mobiles afin d'élaborer un indicateur du fonctionnement hydromorphologique du cours d'eau. L'analyse granulométrique couplée à la puissance spécifique devrait permettre d'estimer la fréquence minimale de mise en mouvement des matériaux du lit et donc de comprendre les processus de mobilisation des sédiments

Protocole :

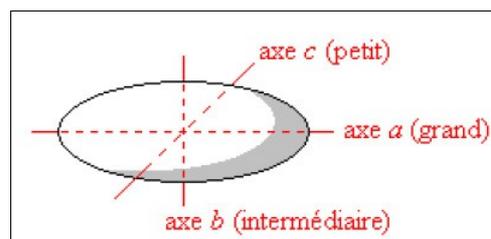
L'opérateur repère tout d'abord un radier sur le linéaire de la station (les radiers sont, théoriquement, les zones de dépôt de la fraction la plus grossière de la charge alluviale de fond en transit, car ils sont soumis à des phénomènes brutaux de diffusion de l'écoulement). Puis, l'opérateur évalue la classe granulométrique des éléments en place en utilisant la grille simplifiée adoptée pour la méthode microhabitat «EVHA» (Malavoi et Souchon, 1989) : sur la tête du radier, les opérateurs observent le substrat dans un cercle d'environ 2m de diamètre. Dans ce cercle, ils évaluent visuellement le diamètre des sédiments au niveau de l'axe intermédiaire (cf. illustration N°47) à l'aide du gabarit suivant (cf. illustration N°46).

Type	Taille (mm)	Code microhabitats
Granulométrique		
Rocher ou Dalle	> 1024	R ou D
Bloc	256-1024	B
Pierre Grossière	128-256	PG
Pierre Fine	64-128	PF
Caillou Grossier	32-64	CG
Caillou Fin	16-32	CF
Gravier Grossier	8-16	GG
Gravier Fin	2-8	GF
Sable Grossier	0.5-2	SG
Sable Fin	0.0625-0.5	SF
Limon	3.9-62.5 μ	L
Argile	< 3.9 μ	A

Ill. 45: Échelle granulométrique utilisée (Wentworth modifiée)



Ill. 46: Gabarit pour l'évaluation granulométrique visuelle (Malavoi et Souchon, 1989). (échelle modifiée)



Ill. 47: Définition des axes caractéristiques d'une particule (Chapuis, 2008)

Les opérateurs renseignent ensuite un tableau avec le code de la classe granulométrique la plus grossière présente sur au moins 10% de la surface observée, puis le code de la classe granulométrique qui représente le plus de surface (dominante) sur la zone d'observation et enfin la seconde classe granulométrique dominante.

Avantages : Le principal avantage de cette méthode est bien sûr sa rapidité de mise en œuvre.

Limites :

Comme nous l'avons précisé, le protocole granulométrique de la méthode AURAH-CE consiste à évaluer la classe granulométrique moyenne des radiers. Ainsi, on sait que l'on biaisera volontairement la connaissance de la granulométrie du cours d'eau vers les fractions grossières. Il faut donc bien garder à l'esprit que la granularité des éléments mesurés sur les radiers ne correspond pas à la granularité moyenne des sédiments du tronçon. La comparaison relative est par contre pertinente puisque les dépôts se sont constitués sous des conditions hydrodynamiques similaires.

Dans le cas de l'étude du transport des sédiments, ce protocole d'analyse n'est pas suffisant car il ne permet pas de savoir si les sédiments observés sont mobiles. Il peut alors être intéressant de compléter l'analyse par d'autres protocoles.

2- Protocole d'échantillonnage des sédiments, dit « méthode de Wolman »

Le protocole détaillé dans cette fiche est celui utilisé dans la méthode de suivi des CARactérisation de l'HYdromorphologie des Cours d'Eau (CARHYCE).

Objectifs :

Les objectifs visés par ce protocole sont très semblables à ceux du protocole AURAH-CE.

Protocole :

Le protocole utilisé par la méthode Wolman rend le résultat moins dépendant de l'appréciation de l'opérateur. Il consiste à prélever de façon aléatoire 100 éléments sur le radier le plus grossier de la station, de les mesurer à l'aide d'un pied à coulisse, de les classer à l'aide du même gabarit que pour le protocole AURAH-CE, et d'obtenir ainsi une courbe et des percentiles granulométriques (D50, ...).



III. 48: Méthode de Wolman © USDA

Avantages :

Cette méthode est plus fiable que la précédente.

Limites :

On retrouve les mêmes limites que pour le protocole de la méthode AURAH-CE. Cependant ce protocole est plus long à mettre en œuvre.

Amélioration du protocole

Lorsque l'objectif est plus ambitieux (modélisation hydro-sédimentaire, étude géomorphologique préalable à l'effacement d'un ouvrage ...), il est possible d'améliorer le protocole:

- En « automatisant » le prélèvement. En effet, lorsqu'on prélève les éléments manuellement un par un et de façon aléatoire, on a tendance à privilégier les grains les plus gros. Les solutions sont multiples et vont de la règle de prélèvement (« prélever l'élément situé à la pointe du pied ») aux outils d'échantillonnage (grille réfractaire ou cordes à nœuds désignant les éléments à extraire et imposant un pas d'espace régulier) et jusqu'aux préleveurs.
- En répartissant les placettes sur l'ensemble des unités hydromorphologiques non végétalisées de la station étudiée afin d'avoir une information plus représentative de la véritable charge de fond. De plus, dans certains contextes particuliers, par exemple lorsqu'une matrice sablo-graveleuse se déplace au sein du lit pavé et figé d'un cours d'eau de plaine, il semblerait plus pertinent d'étudier d'autres unités morphologiques que les seuils afin de caractériser la charge de fond.
- En complétant les mesures de surface par des prélèvements dans la sous-couche, en particulier lorsqu'on pressent la présence d'une armure « temporaire ».

3- Prélèvements de surface pour les grands cours d'eau

Sur les grands cours d'eau, du fait des profondeurs importantes, le prélèvement ne peut pas se faire manuellement. Nous listons ci-dessous quelques dispositifs qui peuvent être déployés dans ces contextes particuliers.

- La benne Van Veen fonctionne comme une pince qui est maintenue ouverte par un crochet. Le choc sur le fond la ferme automatiquement. Elle doit être lestée si les vitesses sont trop fortes .



III. 49: La benne Van Veen © G. Raccasi

- Le cône de Berthois est constitué d'un cône qui est tracté sur le fond du chenal pour prélever des sédiments.



III. 50: Le cône de Berthois © G. Raccasi

- le « préleveur filet » est constitué tout simplement d'un filet fixé au bout d'une perche ajustable en fonction de la profondeur d'eau. L'ouverture se ferme à l'aide d'une corde.



III. 51: Le « Préleveur filet » © P. Jugé

4- Description des habitats aquatiques

Objectifs :

A qualité d'eau et niveau trophique égaux, les capacités piscicoles d'un site d'eau courante sont déterminées par la diversité et la qualité des habitats aquatiques. La méthode utilisée consiste à réaliser une cartographie codifiée de chacune des composantes retenues pour qualifier la qualité physique, puis de considérer leur combinaison. Les compositions des différentes mosaïques et de leur superposition peuvent ainsi être appréciées et confrontées. Cette approche fournit donc des images comparables de l'hétérogénéité et de l'attractivité biogène d'un tronçon de cours d'eau.

Composantes retenues pour décrire l'habitat :

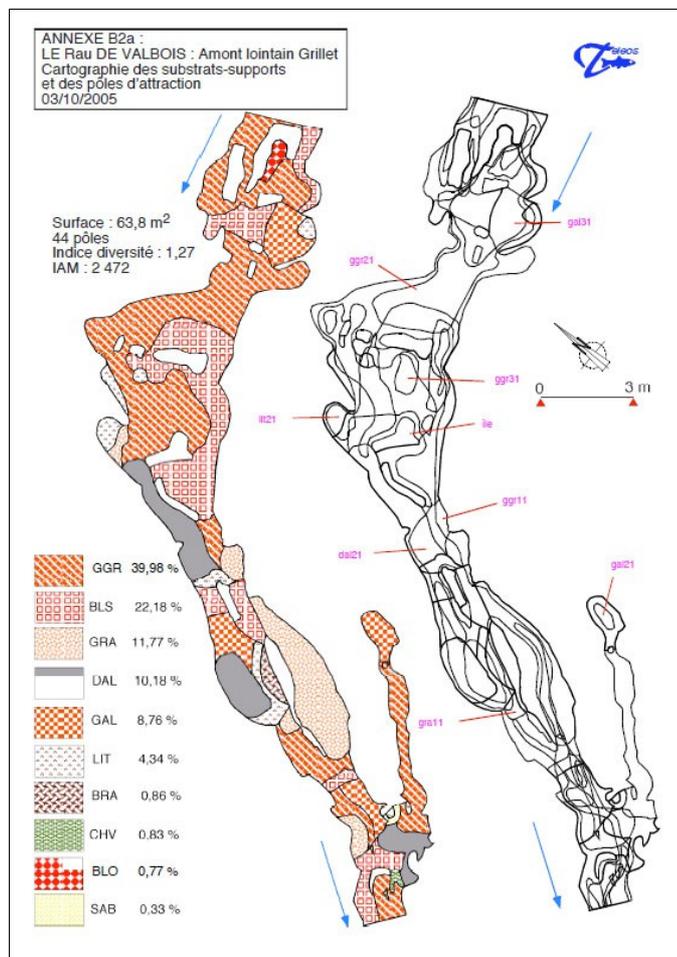
La méthode originelle des micro-habitats considère uniquement trois variables pour caractériser l'habitat, que sont la hauteur d'eau, la vitesse du courant et le substrat. D'autres méthodes plus poussées ajoutent la végétation, les sous-berges, l'ombrage, la température, etc. aux trois variables de base. Bien sûr le niveau de précision souhaité sera à mettre en adéquation avec les moyens et le temps disponibles pour réaliser l'étude.

Protocoles :

Différents protocoles existent. Dans le cadre d'un stage en cours, une adaptation de ces protocoles sera proposée. Nous nous limiterons dans cette fiche à rappeler quelques généralités et à renvoyer sur quelques documents de référence qui décrivent précisément les protocoles à suivre.

Ces méthodes peuvent être déployées soit sur l'ensemble du tronçon étudié soit à l'échelle de la station. La station est définie comme une séquence de faciès "type" et doit être représentative des situations rencontrées sur le tronçon de cours d'eau étudié. Les mesures de hauteur et de vitesses sont à réaliser pour un débit d'étiage moyen proche du débit moyen mensuel sec inter-annuel (moyenne des débits mensuels d'étiage).

Certains protocoles proposent même des indicateurs d'évaluation. C'est le cas par exemple de la méthode d'analyse standard des mosaïques d'habitats (Indice d'Attractivité Morphodynamique pour les poissons : IAM) mise au point par le CSP (1993–1997), puis finalisée par TELEOS (1999–2003).



III. 52: Cartographie des substrats-soutis © Téléos

$$IAM = \left[\sum_{i=1}^n S_i \times \text{Attract.}(\text{subs.}) \right] \times \text{Var}(\text{subs.}) \times \text{Var}(\text{h.e.}) \times \text{Var}(v.)$$

où :

- v. : vitesses
- h.e. : hauteurs d'eau
- subs. : substrats/soutis
- Attract. : attractivité des substrats supports.

III. 53: Formules utilisées pour la méthode IAM

Quelques références :

- Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques (J-R. Malavoi, Y. Souchon, 2002)
- Méthode standard d'analyse de la qualité de l'habitat aquatique à l'échelle de la station : l'IAM (F. Dégiorgi, N. Morillas. et J-P. Grandmottet, 2002)
- Quantification de la perte de diversité d'habitat sur des cours d'eau du massif armoricain – Impacts sur les peuplements pisciaires (F. Languille, D. Roubertou, 2001)

LES SÉDIMENTS FINS

1 - Méthode d'Archambaud

Objectifs :

L'objectif de cette méthode est d'évaluer l'intensité du colmatage.

Protocole :

L'Irstea d'Aix-en-Provence (Archambaud et al., 2005) a développé une méthode d'évaluation visuelle sommaire mais reproductible du colmatage de surface et du niveau d'enchâssement des éléments grossiers du substrat. Elle consiste à soulever un de ces éléments et à estimer sa facilité d'extraction ainsi que la densité du nuage de fines qui est libéré lors de cette extraction.

Cinq classes de colmatage ont été définies selon ces deux critères :

Code 1 : Si les éléments se soulèvent facilement, nous attribuons la classe 1. Les éléments sont posés sur la sous-couche granulométrique et ne génèrent pas de nuage de limon lorsqu'ils sont soulevés.

Code 2 : Si les éléments se soulèvent plus difficilement, nous attribuons la classe 2 en fonction de la quantité de limon qui se libère dans l'eau sous les éléments. Le nuage généré est peu dense, c'est-à-dire que la couche de surface est collée par une couche de limon légèrement colmatante, qui lie les éléments entre eux.

Code 3 : Si les éléments se soulèvent avec un nuage de limon assez épais, nous attribuons la classe 3. Les éléments sont très enchâssés.

Code 4 : Si les éléments se soulèvent difficilement, nous attribuons la classe 4. Le nuage de limon produit est très dense. La structure est enchâssée dans une sous-couche très compacte dont l'emprise est forte sur les éléments.

Code 5 : Si les éléments ne se soulèvent pas ou très difficilement (structure cimentée ou sous forme d'un dallage) nous attribuons la classe 5. C'est le cas lorsque la granulométrie est recouverte par une épaisse couche de limon,

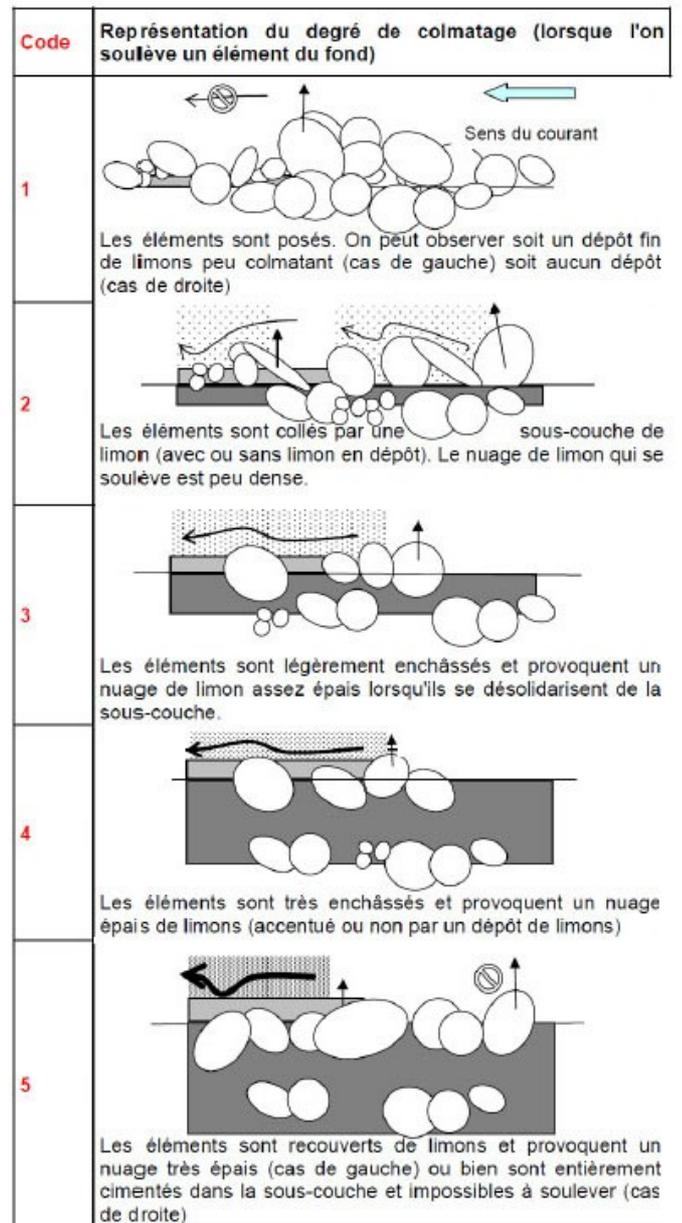


Illustration 1: Méthode d'évaluation du degré de colmatage et d'enchâssement des matériaux du substrat alluvial (Archambaud et al., 2005)

2- Méthode des bâtonnets

Objectifs :

Aucune méthode fiable, reproductible et facile à mettre en œuvre à grande échelle et en routine n'est vraiment disponible pour évaluer l'intensité du colmatage du lit des cours d'eau. Toutefois, il est possible de l'appréhender en évaluant la profondeur d'oxygénation du substrat via le développement de bactéries sulfo-réductrice sur des supports en bois (Marmonier et al., 2004).

Protocole :

Cette méthode consiste à implanter dans les sédiments des substrats artificiels en bois pour une durée d'un mois. Au contact des zones désoxygénées, ces substrats artificiels changent de couleur, passant du brun jaunâtre au noir. Ce changement de couleur est lié aux activités microbiennes stimulées par le substrat carboné. La couleur noire est sans doute attribuable à un dépôt de sels de manganèse. Cette méthode offre donc une mesure fonctionnelle des conditions d'oxygénation du milieu.

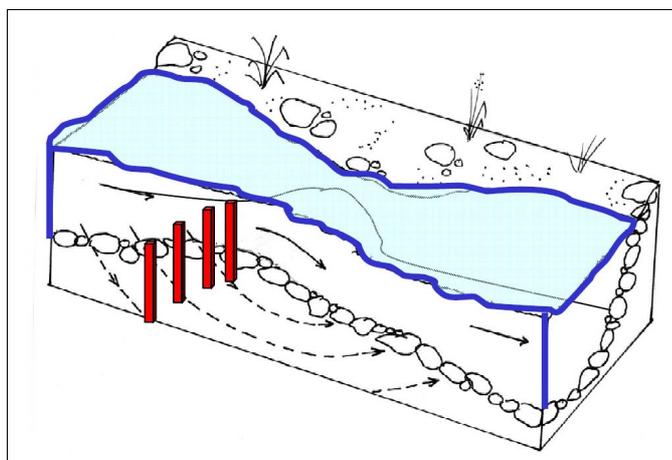
Les substrats artificiels sont des carrelets de bois clair (pin, sapin) d'une longueur de 30 cm. Après avoir repéré 2 radiers (ou plats courants) sur la station, 4 bâtonnets sont installés sur la tête de chacun d'entre eux.

Au moins 1 mois après l'installation de ces dispositifs expérimentaux, les opérateurs récupèrent le dispositif. Lors de leur retrait, la longueur entre le sommet du piquet (partie affleurant avec l'eau) et la première zone de noircissement (même ponctuelle) d'une des 4 faces est mesurée en cm (précision millimétrique) avec un double-décimètre.

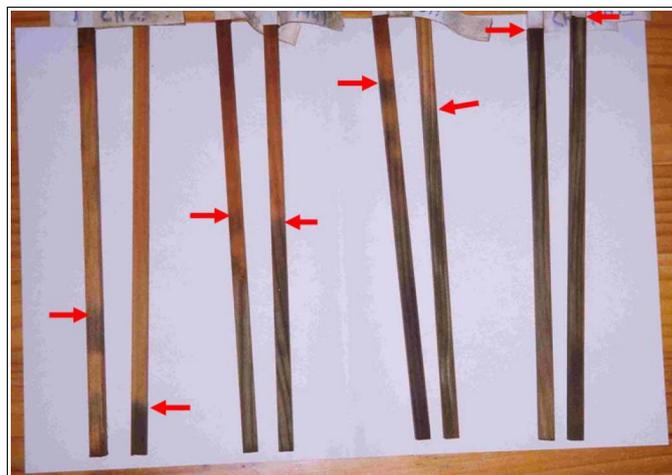
Le passage de la couleur claire au noir donne la profondeur d'alternance oxygéné-hypoxique (ex : substrat totalement colmaté = zone de noircissement au sommet du bâton = 0.0 cm et substrat totalement poreux = aucune zone de noircissement = 30,0 cm).



III. 54: Bâtonnets utilisés pour évaluer le colmatage © Onema



III. 55: Positionnement des bâtonnets © Onema



III. 56: Analyse des profondeurs d'alternance oxygéné-hypoxique © Onema

3- Méthode de la tige graduée

Objectifs :

L'objectif est d'évaluer l'épaisseur de sédiments fins qui recouvre un substrat plus grossier. En multipliant les mesures, on peut ainsi obtenir des estimations de volumes.

Protocole :

L'opérateur pose la tige métallique graduée sur le fond du lit. Il relève la graduation correspondant au niveau de la surface de l'eau. Il enfonce la tige dans le substrat. Un blocage ou un crissement signifie qu'on atteint des horizons plus grossiers. Il suffit alors de noter la nouvelle graduation correspondant au niveau de la surface de l'eau. L'épaisseur de sédiments fins est la différence de ces deux niveaux.



III. 57: Evaluation de l'épaisseur de sables dans la Gartempe à l'aide d'une tige métallique graduée © S.Braud

LES BERGES

1- Description des strates sédimentaires de la berge.

Objectif

La mise en œuvre de ce protocole permet de qualifier le potentiel d'érodabilité des berges.

Protocole

Selon l'histoire géomorphologique de la vallée, la nature, la hauteur, la structure stratigraphique des berges peuvent présenter une grande variabilité. **Une seule observation ne suffit donc pas pour qualifier, à l'échelle d'un tronçon par exemple, l'ensemble du linéaire de berges.**

Les différentes étapes du protocole sont présentées ci-dessous :

Étape 1: recherche d'une portion de berge non végétalisée et non protégée

Repérer, si possible, un secteur où le pied de berge atteint sensiblement le fond moyen du lit, voire le talweg.

Même si la berge est végétalisée par de la végétation naturelle, il est souvent possible de distinguer au moins une partie du talus, notamment la base. Si des éléments gênent la « lecture » de la berge (végétation, dépôt ou effondrement de sédiments au pied de la berge), il convient de les supprimer ou déplacer. On essaiera d'obtenir une berge sub-verticale sur environ 50 cm de large.

Dans le cas de berges inaccessibles, on procédera à un carottage de la rive. Pour les petits cours d'eau, on pourra utiliser une tarière pédologique. Il s'agit d'une tige dont la tête est constituée de deux lames et qui, en pénétrant dans le sol, enveloppent l'échantillon qu'on souhaite extraire. La manipulation consiste à extraire successivement plusieurs carottes d'environ 15 cm de longueur.



Ill. 58: Tarière pédologique



Ill. 59: Dégagement du pied de berge © S. Braud

Étape 2 : qualification de la granulométrie.

Il s'agit de préciser la granulométrie dominante, ou des deux strates dominantes, avec si possible un repérage stratigraphique.

Exemple: 0 à - 2 mètres : limon ; 2 à - 3 mètres : graviers, sables

Pour les sédiments grossiers, la description peut se faire visuellement où à l'aide d'un pied à coulisse.

Pour les sédiments fins, nous conseillons l'évaluation empirique (au doigté) sur des échantillons de sol que vous humidifierez légèrement s'ils sont secs :

➤ Les sables

- A l'état humide, le toucher est rugueux.
- Aucune rugosité entre les doigts : moins de 15 % de sable.
- Forte rugosité, grains de sable visibles à l'œil nu, effritement rapide de l'échantillon entre les doigts : plus de 50 % de sable.

➤ Les limons

- Toucher doux, soyeux.
- Le limon humidifié tâche les mains, pas l'argile ni le sable

➤ Les argiles

- Toucher collant.
- Plus de 17-20 % d'argile : il est possible de faire un boudin.
- Plus de 30 % d'argile : il est possible de faire un anneau avec le boudin. La terre colle fortement aux doigts.

Étape 3 : Interprétation de l'érodabilité de la berge

Nous savons que la nature cohésive ou non des berges est l'une des variables de contrôle des processus géodynamiques.

En dehors des berges rocheuses pour lesquelles la question ne se pose pas, l'appréciation de la cohésion des berges, et donc de leur érodabilité potentielle, peut se faire de manière sommaire en évaluant la proportion de sédiments cohésifs dans la berge (limons et argiles) et leur position stratigraphique (sommet de berge, pied de berge, etc.). C'est le pied de berge qui est la partie la plus fragile vis-à-vis de l'érosion. Si la partie supérieure de la berge est cohésive mais le pied non cohésif, les processus d'érosion latérale peuvent être assez actifs ;

Ce degré d'érodabilité peut donc être décliné en quatre classes : nulle, faible, moyenne, forte :

- **érodabilité nulle.** Il s'agit de berges rocheuses ou dont la granulométrie grossière, souvent héritée, fait que les particules ne peuvent plus être entraînées par le cours d'eau actuel,
- **érodabilité faible.** Ce sont les berges argileuses (extrêmement cohésives) ou argilo-limoneuses (très cohésives) sur toute la hauteur de la berge. Remarque : La présence de végétation sur tout ou partie du talus de la berge peut être un indicateur d'une probable faible érodabilité.
- **érodabilité moyenne.** Ce sont les berges où le limon est dominant soit dans la texture des alluvions (limon-sableux, voire sable-limoneux), soit dans la stratigraphie (il occupe plus des 4/5e de la hauteur de berges).
- **érodabilité forte.** Les sédiments sableux à caillouteux (jusqu'aux blocs dans les torrents de montagne), dominant sur au moins le 1/4 inférieur de la berge (érodabilité forte), voire sur toute la hauteur (érodabilité très forte),

Étape 4 : Évaluation de l'intensité des processus géodynamiques fluviaux

L'objectif de ces analyses est généralement d'appréhender l'intensité des processus géodynamiques fluviaux. J-R Malavoi propose une typologie simplifiée de cette dynamique en fonction de trois variables :

- la puissance du cours d'eau ;
- l'érodabilité de ses berges ;
- l'importance et la nature des apports solides directement ou indirectement injectés.

	1	2	3	4
Puissance spécifique - ω	< 10 W/m ²	10 - 30 W/m ²	30 - 100 W/m ²	> 100 W/m ²
Erodabilité des berges - B	Nulle	Faible	Moyenne	Forte
Apports solides - A	Nuls	Faibles	Moyens	Forts

III. 60: Les 4 classes des variables permettant de discriminer la réactivité géodynamique des cours d'eau (J-R Malavoi, 2011).

CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES DU LIT

1- protocole pour les petits cours d'eau peu profonds.

Objectifs :

La description des caractéristiques géométriques du lit (profils en travers; profil en long, largeur à plein bord, etc.) permet de préciser le contexte hydraulique du tronçon étudié (section mouillée, pente, etc.) ou de suivre l'évolution du cours d'eau suite à une perturbation ou une restauration.

Matériel nécessaire:

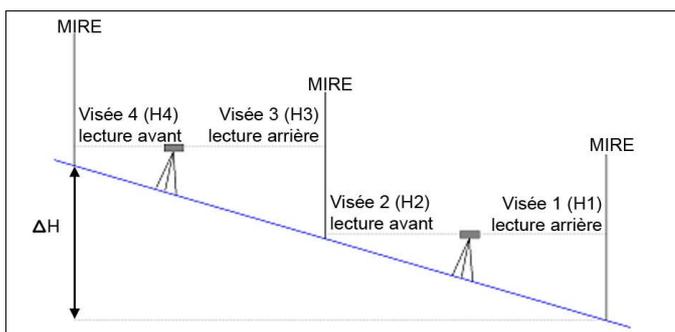
- une mire graduée
- un niveau topographique ou un clisimètre (moins précis mais plus rapide).
- Un topofil ou un distancemètre électronique
- des bornes de géomètres



III. 61: Utilisation du clisimètre © Beni Basler

Protocole :

Il s'agit de mesurer le long d'un cheminement des différences de niveau entre différents points et de mesurer la distance horizontale entre chacun des points.



III. 62: Principe du nivellement de la pente d'un cours d'eau

Dans l'exemple ci-dessus, la différence de hauteur se calcule selon la formule suivante:

$$\Delta H = \sum(\text{lectures arrière}) - \sum(\text{lectures avant}) \\ = (H1+H3) - (H2+H4)$$

La principale difficulté consiste à rattacher les mesures réalisées dans le système de référence vertical de la France (système NGF/IGN69). L'IGN a mis en place un réseau de repères de nivellement sur tout le territoire et les fiches de ces bornes sont accessibles sur le site <http://www.geoportail.gouv.fr>. Si ces repères sont trop éloignés de la zone d'étude, il est possible d'implanter une borne de géomètre et de travailler en local ou d'obtenir l'altitude de ce point à l'aide de d'un GPS différentiel.

Il est préférable de rattacher les altitudes mesurées à un ou plusieurs points de nivellement dont l'altitude est connue dans le système de nivellement légal en France NGF/IGN69.

Rappel : il est possible de mesurer une distance avec un niveau de géomètre en prenant la différence des deux lectures au niveau des lignes stadimétriques et en multipliant le résultat par 100.

2- protocole pour les grands cours d'eau profonds.

Objectifs :

Les objectifs sont les mêmes que pour le protocole petits cours d'eau.

Matériel utilisé :

Une embarcation, un échosondeur et un GPS.

Protocole :

Un échosondeur couplé à un GPS de précision métrique permet l'acquisition de données bathymétriques géoréférencées. Ce couplage peut être issu d'un sondeur (mono-faisceaux ou multi-faisceaux⁴) possédant un GPS intégré¹ ou alors en reliant un échosondeur et un GPS. Ce matériel, doit pouvoir faire de l'acquisition automatique sur un pas de temps régulier.

⁴ Contrairement aux sondeurs classiques, les sondeurs multi-faisceaux permettent de mesurer des profondeurs sur toute une fauchée perpendiculaire à l'axe du bateau. Le fond est ainsi exploré sur une large bande.

3- chaînes d'érosion

Objectifs :

Évaluer la dynamique sédimentaire d'un banc exondé lors d'un événement de crue (généralement, lorsque la charge de fond est mobilisable, on observe une érosion en crue et un dépôt en décrue).

Protocole :

Le principe consiste à faire pénétrer des chaînes métalliques dans le plancher alluvial. Ces chaînes sont repérées en x,y,z puis sont relevées après chaque crue. Le positionnement de la chaîne est ensuite interprété.

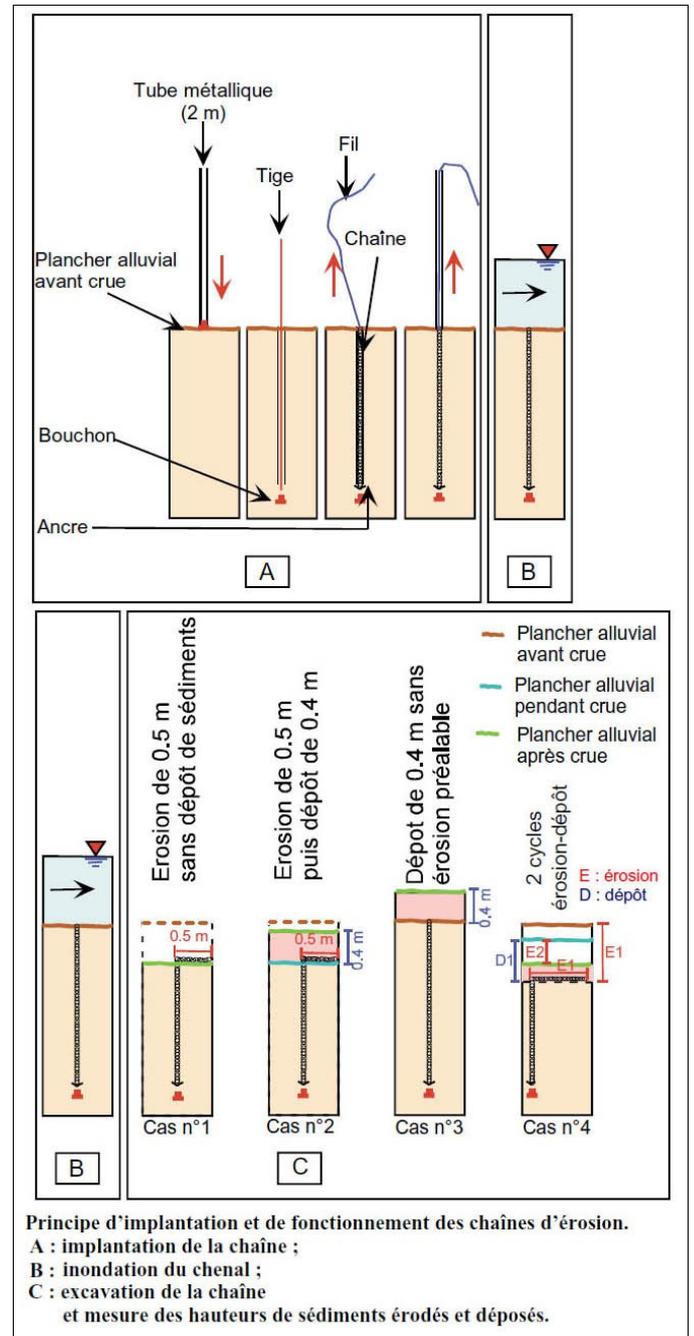
En complément à une comparaison de données topographiques, cette méthode fournit des éléments de compréhension fine des processus d'érosion (souvent associés à la montée de crue) et de dépôt (processus fréquent en décrue) ayant eu lieu entre les deux campagnes de mesure.



Ill. 63: Mise en place d'une chaîne d'érosion © J-R Malavoi

Contrainte principale:

L'enfoncement des chaînes ne peut être réalisé que lorsque le banc est exondé en basses eaux. Le dispositif ne peut donc pas être implanté dans le lit d'étiage.



Ill. 64: Principe d'implantation et de fonctionnement des chaînes d'érosion (S. Rodrigues, 2004)

LES SÉDIMENTS MOBILES ET LEURS TRANSPORTS.

1- Le traçage des particules

Objectif :

Le principe de toutes les méthodes listées dans ce paragraphe consiste à relever la position de particules marquées avant et après les crues et à calculer la distance parcourue par ces éléments. Les objectifs principaux sont donc d'évaluer les seuils de mise en mouvement des particules et leurs vitesses de déplacement.

Matériels:

Plusieurs technologies existent:

- le marquage des éléments avec de la peinture
- l'insertion dans les sédiments de transpondeurs passifs
- l'insertion dans les sédiments de radio-émetteurs

Protocole du marquage des éléments avec de la peinture :

La peinture des particules est la solution la plus simple à mettre en œuvre. Le marquage peut se faire quelle que soit la taille des grains à l'inverse des technologies suivantes. La principale limite de cette méthode est le taux très faible d'éléments retrouvés (parfois inférieur à 1%).



III. 65: Particules peintes © Ployon

Protocole pour les transpondeurs :

Pour évaluer l'amplitude spatiale de la mobilité des particules, des transpondeurs passifs (PIT-tag) peuvent être implantés dans les sédiments. Les éléments sont recherchés après la crue au moyen d'une antenne portable. La taille des transpondeurs (environ 2,5 cm de long) limite le suivi à des éléments de taille relativement importante. La faible portée de détection des antennes portables rend la recherche des éléments marqués très chronophage. Le taux de retour est variable selon le contexte (dynamique du cours d'eau, profondeur d'enfouissement, ...):

- environ 80 % sur le ruisseau Moras au Québec
- 36% sur l'Ain



III. 66: transpondeurs passifs © équipe de Thomas Buffin-Bélanger

Protocole des radio-émetteurs :

Afin d'évaluer les périodes de mobilité des particules, des radio-émetteurs peuvent également être implantés dans les sédiments. Des antennes fixes, situées sur les rives, enregistrent l'amplitude des signaux émis par ces émetteurs et permettent d'établir leur position de façon continue pendant les crues. La principale contrainte de cette technique est la taille relativement importante des émetteurs et le coût très élevé du dispositif.

2- Les pièges à sédiments

Objectif :

Caractérisation granulométrique des sédiments charriés et évaluation approximative du volume charrié lors d'un événement.

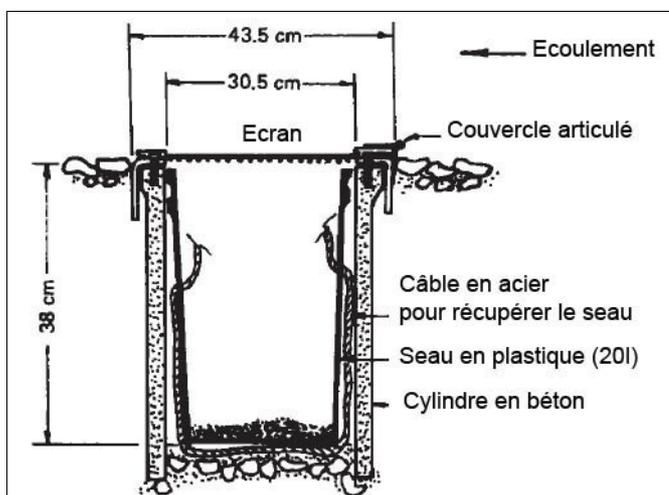
Protocole:

Dans le lit des cours d'eau, il est possible d'implanter des pièges à sédiments artificiels ou trappes à sédiments (illustration ci-dessous). Le protocole consiste à implanter un ou plusieurs pièges à vider le(s) dispositif(s) avant une crue (sur alerte météo) et à récupérer les sédiments piégés après l'événement, lorsque les sites sont de nouveau accessibles sans danger. Les sédiments seront séchés puis passeront dans différents tamis avant d'être pesés. Le nombre de classes granulométriques sera limité afin de réduire la durée de l'analyse. Le dispositif peut être positionné en amont et en aval d'un ouvrage afin d'en évaluer l'impact par comparaison. Après analyse, les sédiments seront réinjectés dans le cours d'eau.

l'analyse consiste à étudier:

- la structure granulométrique de l'échantillon sachant que le dispositif ne permet d'intercepter que les sédiments les plus grossiers de la charge de fond (sur-évaluation)
- le volume prélevé si le récipient n'est pas plein

L'analyse de ces anomalies tiendra compte de l'incertitude et des biais de la mesure. On conseillera de multiplier la mesure afin de réduire cette incertitude.



Ill. 67: Coupe du piège à sédiments en béton mis en place sur l'Harris Creek © Church et al., 1991

Grâce aux conseils de Thomas Dépret (thèse en cours), un dispositif allégé, constitué d'un pot en terre cuite et d'un sceau de maçon est en cours d'expérimentation sur quelques cours d'eau du bassin Loire-Bretagne.



Ill. 68: Piège à sédiment © T. Dépret

Le dispositif est également à adapter en fonction de la largeur du lit et de l'activité sédimentaire (nombre et dimensionnement des pièges).



Ill. 69: Alignement des pièges sur un transect de cours d'eau © Thomas Dépret

Limites:

- Il est préférable de multiplier la mesure afin de limiter les erreurs d'interprétation.
- Étant donné que le dispositif nécessite d'intervenir à pied dans le cours d'eau, le tirant d'eau doit être inférieur à 50 cm en basses eaux.
- Du fait du petit volume des récipients utilisés, il est préférable de l'appliquer sur des cours d'eau à faible transport solide, sauf si on a les moyens de mécaniser l'extraction des bennes (cf. pièges à sédiments mis en place sur la East Fork

River). Ainsi, la principale difficulté de la mesure est de bien dimensionner le piège à sédiment; ce dimensionnement ne peut se faire que par essais successifs, à moins d'avoir une bonne connaissance du transport solide du cours d'eau.

- Le dispositif risque d'être emporté sur les cours d'eau dynamiques où l'épaisseur des alluvions mobilisées en crue sur le fond du lit dépasse une vingtaine de centimètres.

Les fosses

Il faut également cité le cas particulier d'anciennes gravières capturées par le cours d'eau ou de fosses artificielles dont on sait qu'elles piègent pratiquement toute la charge de fond. Les mesures bathymétriques successives des dépôts sédimentaires dans ces fosses permettent d'estimer le volume annuel transitant par charriage en amont du site.

3- Les échantillonneurs

Objectif :

Prélever les sédiments en mouvements pendant un temps donné afin de calculer le débit de sédiments sur un transect de cours d'eau. Ces jaugeages « solides » permettent d'appréhender les processus de transport de la charge de fond et les relations non linéaires liant débit solide et débit liquide (valeurs différentes en crue et en décrue) et donc d'évaluer le transport solide annuel.

Matériel :

Ils existent de nombreux échantillonneurs. Chaque échantillonneur est spécifique à un mode de transport et à une gamme de sédiments. Ils peuvent donc être utilisés de façon complémentaire. Ils sont conçus pour perturber le moins possible les écoulements.



Ill. 70: Échantillonneur BTMA © N. Claude



Ill. 71: Échantillonneur Helley Smith © J.R. Malavoi

Protocole:

Les mesures sont effectuées sur plusieurs verticales d'un même transect. Puis, par intégration, on calcule le débit solide transitant dans le tronçon de cours d'eau pour un débit liquide donné.

Inconvénient :

Pour être fiable, et afin d'obtenir un jeu de données suffisant pour l'exploitation, le protocole à suivre nécessite des investigations très lourdes aussi bien en moyens techniques qu'en temps.

Avantage :

c'est la méthode la plus fiable permettant d'estimer le transport solide.

CARACTÉRISATION DES OUVRAGES TRANSVERSAUX

1- Évaluation de l'ennoisement du seuil de l'ouvrage en crue.

Objectif :

L'objectif de ce protocole est de qualifier le risque de rupture de la continuité sédimentaire. Il s'agit, à partir d'une méthode simple et peu onéreuse de réaliser un premier tri des ouvrages afin de consacrer plus d'énergie aux ouvrages les plus impactants. L'indicateur retenu est uniquement basé sur une des caractéristiques intrinsèques de l'ouvrage : la hauteur relative de l'aménagement.

Domaine d'application :

Ce protocole ne peut s'appliquer qu'en régime fluvial* (régime non torrentiel) et il n'est pertinent que sur les cours d'eau sablo-graveleux.

Protocole

La méthode est basée sur les deux hypothèses suivantes:

- *L'impact d'un ouvrage est fonction de sa taille (pour un même tronçon de cours d'eau, une même gestion ...).*
- *Un ouvrage qui barre plus que le lit mineur*

Principe

Un premier tri des ouvrages peut se faire en séparant les seuils des barrages, au sens géomorphologique du terme, c'est à dire en fonction de leur niveau d'obstruction du fond de vallée :

- les seuils barrent tout ou partie du lit mineur du cours d'eau (définition SANDRE, 2008)
- les barrages obstruent une grande partie du fond de vallée, c'est à dire plus que le lit mineur et qui ont un impact potentiel fort sur la continuité sédimentaire (sauf cas particuliers)

Partant de l'hypothèse que l'impact potentiel d'un ouvrage est en partie dépendant de la taille relative de l'ouvrage (hauteur de l'ouvrage relativisée en fonction de l'hydrologique et des caractéristiques géométriques du cours d'eau), la méthode permettra de scinder le groupe des seuils en deux sous-catégories.

Dans le cas des cours d'eau à régime fluvial* dans lequel transite une charge de fond sablo-graveleuse, nous proposons un protocole expérimental s'appuyant sur la loi d'alignement des charges (loi de pelle) décrite dans le guide de l'agence de l'eau RMC (cf. références page 66). La taille relative des seuils est évaluée en fonction de l'ennoisement de l'ouvrage, lors de crues morphogènes. En effet, certains « petits » seuils sont complètement noyés en crue, si bien qu'ils modifient peu la charge et ont donc moins d'impact sur le transport solide, lors de ces événements. Ainsi, nous proposons de différencier :

- les seuils qui ne provoquent pas de forte dénivelée de la ligne d'eau lors d'une crue morphogène et que nous qualifierons de seuils noyés (cf. illustration N°72).
- les seuils qui restent en mode dénoyé lors d'une crue morphogène* .

Nous proposons à l'opérateur d'observer la ligne d'eau au droit du seuil pour un débit proche de la crue morphogène*. Cette observation nécessite d'avoir observé le site à l'étiage et d'avoir quelques repères visuels. Bien sûr, si l'ouvrage est noyé pour des débits inférieurs, il sera classé dans la catégorie « seuil noyé en crue ». Remarque : cette différenciation peut également se calculer (en fonction du type de crête et des cotes de la crête du seuil et de l'eau en amont et aval de l'ouvrage)..

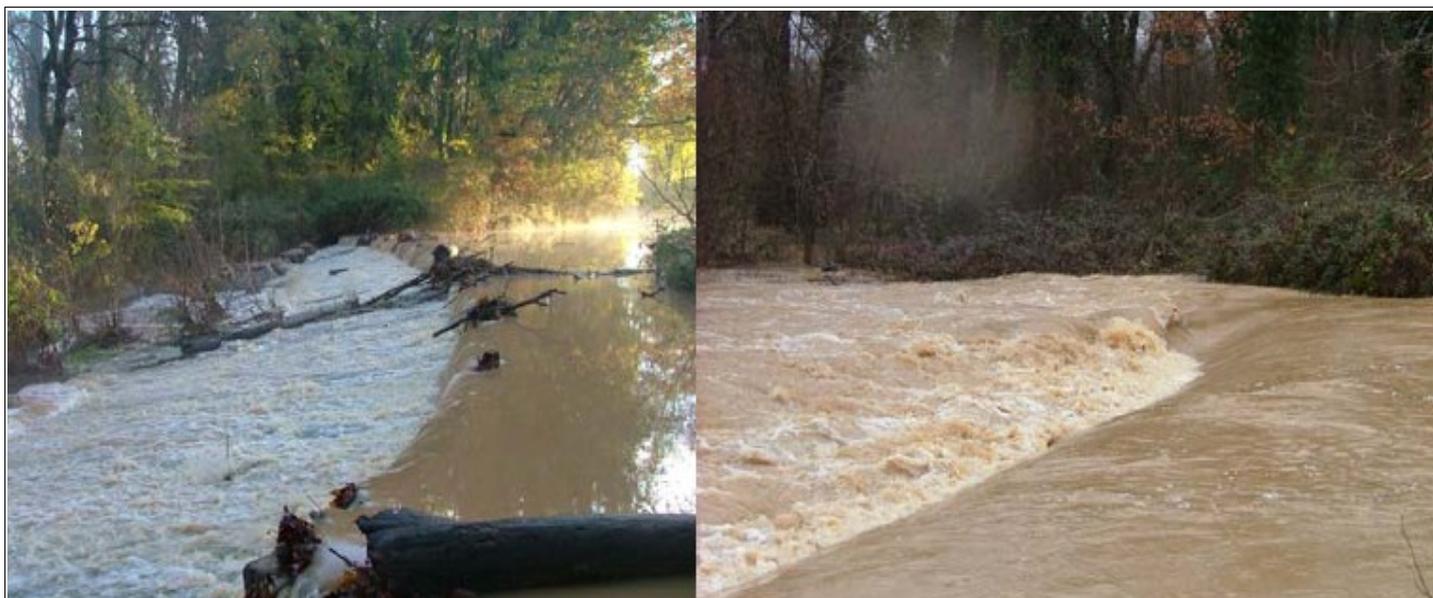
Pour les seuils mobiles, régulièrement ouverts en crue, le fonctionnement sera évalué vannes ouvertes (vanne guillotine en position haute ou clapet en position basse). La perte de charge sera évaluée au niveau de la partie mobile.

Nous proposons donc de différencier trois classes de taille d'ouvrage :

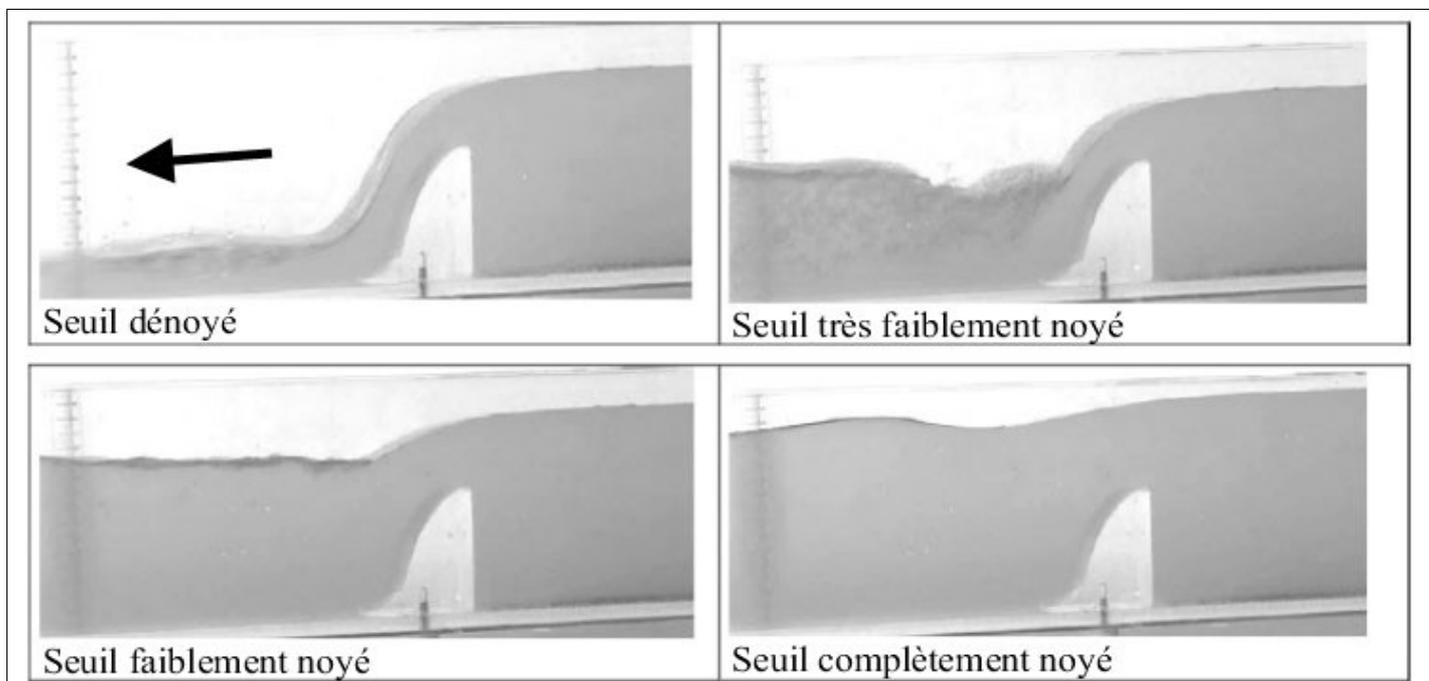
- les barrages (obstruant plus que le lit mineur) présentant un risque fort de perturbation significative de la continuité sédimentaire
- les « grands » seuils provoquant une forte dénivelée de la ligne d'eau pour des crues

morphogènes (**seuil dénoyé en crue**). Ces ouvrages présentent un risque moyen de perturbation significative de la continuité sédimentaire

- les « petits » seuils provoquant une faible dénivelée de la ligne d'eau pour des crues morphogènes (**seuil noyé en crue**). Ces ouvrages présentent un risque faible de perturbation des sédiments sablo-graveleux.



III. 72: Photographies d'un seuil dénoyé à gauche et faiblement noyé à droite sur un affluent de l'étang de Berre © G.Degoutte



III. 73: Différentes phases de l'ennoiement d'un seuil © José VAZQUEZ – ENGEES

PROTOCOLE ICE

Objectif

Il s'agit du protocole national de production d'Informations sur la Continuité Ecologique (ICE). C'est un outil national qui doit permettre d'évaluer le risque d'entrave à la continuité écologique généré par les obstacles à l'écoulement.

Protocole

Nous renverrons au guide de mise en œuvre dès qu'il sera mis en ligne.

ANNEXE 2

DES FORMULES POUR L'ÉTUDE DES CONDITIONS HYDRAULIQUES...

Nous nous limiterons à présenter les 2 formules les plus utilisées dans le cadre de projets de restauration de cours d'eau, en précisant les questions auxquelles elles permettent de répondre, leurs avantages et leurs limites.

La puissance fluviale spécifique

Formules :

La puissance brute (Ω) est calculée comme suit :
 $\Omega = \gamma Q J$ (en watt/m),

La puissance spécifique (ω) est calculée comme suit : $\omega = \Omega / l$ (en watt/m²)

où

γ est le poids volumique de l'eau (9810 N/m³),
 Q le débit (m³/s) (souvent le débit de pleins bords),
 J la pente de la ligne d'énergie en m/m,
 l la largeur du lit pour le débit utilisé (m).

Objectif : Cette variable sert à évaluer de manière grossière la capacité d'un cours d'eau à éroder et transporter les sédiments. Par exemple, cette variable permet d'évaluer en première approche l'aptitude d'un cours d'eau à retrouver un équilibre dynamique après une altération hydromorphologique (sous réserve d'apports sédimentaires amont et d'érodabilité du fond du lit et des berges). Ainsi cette variable permet d'évaluer la consistance des travaux de restauration à mener en complément des capacités propres du lit à s'ajuster.

Avantages : le principal intérêt de cette variable est qu'elle peut être calculée et ne nécessite pas d'investigations importantes (débit morphogène, pente de la ligne d'eau et largeur du lit). Elle est de plus intégratrice du fonctionnement morphodynamique global (style fluvial, transport sédimentaire, érosion de berge, etc.).

Principales précautions à prendre :

- Des valeurs « seuil » de puissance fluviale spécifique sont proposées dans les guides opérationnels : 35 W/m², seuil au dessus duquel les capacités d'ajustement du cours d'eau sont fortes et 25 W/m², seuil en dessous duquel le cours d'eau la

dynamique du cours d'eau reste modérée (Brookes, 1988). Elles ont été identifiées à partir d'observations d'un échantillon de cours d'eau dans des contextes particuliers. Elles ne doivent pas être considérées comme des frontières précises, mais peuvent être utiles dans le cadre d'un diagnostic. Le guide opérationnel « Éléments d'hydromorphologie fluviale » (J.R. Malavoi et J-P Bravard, 2010) conseille ainsi de croiser cette donnée avec deux autres paramètres que sont l'érodabilité des berges et les apports solides afin de classer le cours d'eau au sein d'une typologie géodynamique (cf. tableau ci-dessous). Pour exemple, le type $\omega 4/B3/A3$ (à forte puissance spécifique, apports solides et érodabilité des berges moyens), correspond à des cours d'eau qui sont probablement très réactifs et sur lesquels des travaux de restauration qui pourraient y être réalisés seraient efficaces et avec des résultats positifs rapides.

- La formule nécessite l'utilisation du débit morphogène du tronçon de cours d'eau. Dans le cas d'un cours d'eau peu altéré, on prendra le débit de plein bord; par contre, dans le cas d'un cours d'eau recalibré, il sera préférable d'utiliser la crue biennale. D'une manière plus générale, il est conseillé d'évaluer la puissance pour ces deux débits.
- Étant donné sa simplicité d'acquisition, il est tentant d'utiliser cette variable pour d'autres usages. Elle reste pertinente pour une approche à large échelle, mais ne permet pas, par exemple, de conclure à elle seule sur l'intensité de la dynamique sédimentaire d'un cours d'eau.

	1	2	3	4
Puissance spécifique - ω	< 10 W/m ²	10 - 30 W/m ²	30 - 100 W/m ²	> 100 W/m ²
Erodabilité des berges - B	Nulle	Faible	Moyenne	Forte
Apports solides - A	Nuls	Faibles	Moyens	Forts

III. 74: Classes des variables permettant de discriminer la réactivité géodynamique des cours d'eau (Malavoi, Bravard, 2010)

Calcul du seuil de mise en mouvement des particules

Formules:

La formule de la contrainte tractrice s'écrit :

$$\tau = \rho g h J \text{ en N/m}^2$$

La formule du nombre adimensionnel de Shields, noté τ^* ou θ , s'écrit:

$$\tau^* = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)D} \approx \frac{hJ}{1.65D}$$

Où

J est la pente de l'écoulement qui est souvent assimilée à la pente du lit.

g est l'accélération de la gravite,

ρ_s et ρ sont respectivement les densités du sédiment et de l'eau,

h la hauteur d'écoulement

et D est le diamètre de la particule.

Objectif: Shields a montré qu'un grain était mis en mouvement lorsque τ^* dépassait une valeur critique τ^*_c . A partir de ces formules et de celle de Manning-Strickler, pour une pente et un diamètre de grain donné, on peut déterminer pour quel débit et avec quelle fréquence annuelle ce grain est mis en mouvement.

Inconvénients: l'utilisation de cette formule nécessite beaucoup plus d'investigations que la précédente et en particulier des données bathymétriques et une étude granulométrique.

Principales précautions à prendre :

- Il n'existe cependant pas de consensus en ce qui concerne la valeur de τ^*_c valeurs comprises entre 0,03 et 0,06 on été proposées depuis les travaux de Shields. Il semblerait que 0,03 soit bien adapte aux rivières a sable avec des pentes très faibles, et qu'une valeur de l'ordre de 0,045 serait plus adaptée aux rivières a graviers (Recking, 2009).
- Pour les lits sableux, il sera préférable d'intégrer dans les formules, l'influence de la rugosité liée aux formes du lit (dunes).
- Cette formule n'est pas utilisable dans la retenue d'un seuil .

Évaluation du flux de sédiments transportés

Formules:

cf. l'ouvrage « *Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière* » (Malavoi et al. 2011 – page 56)

Commentaires: Il existe des dizaines de formules permettant d'estimer le flux de sédiments transportés. Elles ont toutes été établies pour des conditions hydrauliques bien particulières si bien qu'il convient d'être très vigilant quant à leurs domaines de validité (forte pente, lit à sable...).

N.B.:

- Il est essentiel d'être vigilant quant aux conditions d'expérimentation dans lesquelles les formules empiriques ont été établies.
- De plus, les formules empiriques ont du mal à traduire la complexité de certains processus. Ainsi, de nombreuses formules ont été établies à partir de l'observation en laboratoire de lits composés de particules de taille identique, ce qui ne correspond pas à des conditions naturelles (exemple : courbe de Hjulström, 1935).

ANNEXE 3 : QUELQUES RÉFÉRENCES POUR ALLER PLUS LOIN

-  Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière (J.R. Malavoi, C. Garnier, N. Landon, A. Recking, Ph. Baran, 2011)
<http://www.Onema.fr/Elements-de-connaissance-transport-solide>
-  Éléments d'hydromorphologie fluviale (J.R. Malavoi et J-P Bravard, 2010)
<http://www.Onema.fr/hydromorphologie-fluviale>
-  L'origine des sédiments et leur transport (J-N Gautier)
-  Les cours d'eau – Dynamique du système fluvial (J-P Bravard et F. Petit, 2002)
-  Diagnostic, aménagement et gestion des rivières (G. Degoutte, 2006) Nouvelle édition en 2012
-  La gestion des rivières – Transport Solide et atterrissements (Agence de l'eau RMC, 1999)
http://www.eaurmc.fr/espace-dinformation/guides-acteurs-de-leau/agir-sur-lhydromorphologie-des-milieus-aquatiques.html?eID=dam_frontend_push&docID=695
-  Stratégie d'intervention de l'agence de l'eau sur les seuils en rivière (J.R. Malavoi, 2003)
http://www.eau-loire-bretagne.fr/espace_documentaire/documents_en_ligne/guides_milieus_aquatiques/Etude_Seuil.pdf
-  Détermination des solutions techniques pour la restauration de la continuité écologique sur un ouvrage transversal (SDAGE Rhône-Méditerranée, 2011)
http://www.riviere-languedocroussillon.fr/telechargement/Guides/CCTP_continuite.pdf
-  Vers la définition du transport solide suffisant en rivière : utilisation d'indicateurs biologiques Etude bibliographique et propositions d'indices (*J. Charrais, 2013*)
-  SYRAH-CE : description des données et modélisation du risque d'altération de l'hydromorphologie des cours d'eau pour l'Etat des lieux DCE (L. Valette et al., 2012)
-  Protocole AURAH-CE (AUDIT RAPIDE de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau) - Méthode de recueil d'informations complémentaires à SYRAH-CE sur le terrain (L. Valette et al., 2010)
-  Le colmatage minéral du lit des cours d'eau : revue bibliographique des mécanismes et conséquences sur les habitats et les peuplements de macroinvertébrés (S. Gayraud, E. Hérouin, M. Philippe, 2001 publié en 2002)
http://www.csp.ecologie.gouv.fr/BFPP/bfpp/Article/365_366/365p339.pdf
-  Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques (J-R. Malavoi, Y. Souchon, 2002)
http://www.Onema.fr/BFPP/bfpp/Article/365_366/365p357.pdf
-  Méthode standard d'analyse de la qualité de l'habitat aquatique à l'échelle de la station : l'IAM (F. Degiorgi, N. Morillas et J-P. Grandmottet, 2002)
<http://www.teleos.info/images/IAM.pdf>
-  Quantification de la perte de diversité de l'habitat sur des cours d'eau du massif armoricain – impacts sur les peuplements pisciaires (*F. Languille, 2001*)
-  Performances et améliorations des techniques de bathymétrie fluviale au Cemagref de Lyon

(N. Lamy, 2009)

http://cemadoc.Irstea.fr/exl-php/docs/PUB_DOC/22452/2009/LY2009-PUB00026978__PDF.txt

 Enseignements de retours d'expériences de barrages à pertuis ouverts, de 1905 à nos jours
(C. Poulard et al.)

<http://www.set-revue.fr/sites/default/files/archives/2008/DG2008-PUB00026458.pdf>

ANNEXE 4 : GLOSSAIRE

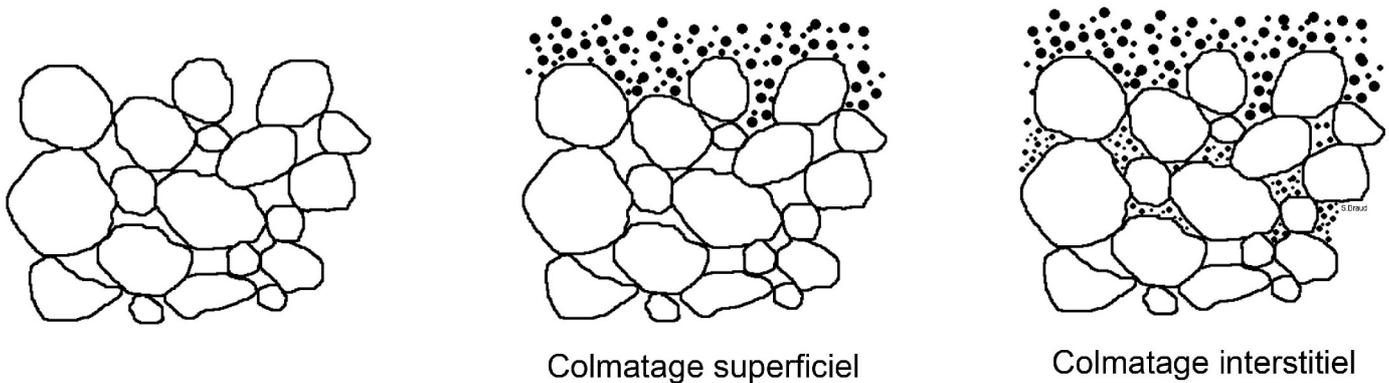
Arasement : destruction partielle d'un ouvrage par abaissement de sa crête ou maintien d'un seuil de fond anti-érosion régressive

Retenue **totale**ment atterrie : Stade ultime du comblement de la retenue d'un ouvrage; à ce niveau, elle ne peut théoriquement plus stocker de sédiments et l'ouvrage est alors considéré comme quasi-transparente du point de vue de la continuité sédimentaire.

Bande active: partie du lit en eau ou constituée de bancs alluviaux peu ou pas végétalisés.

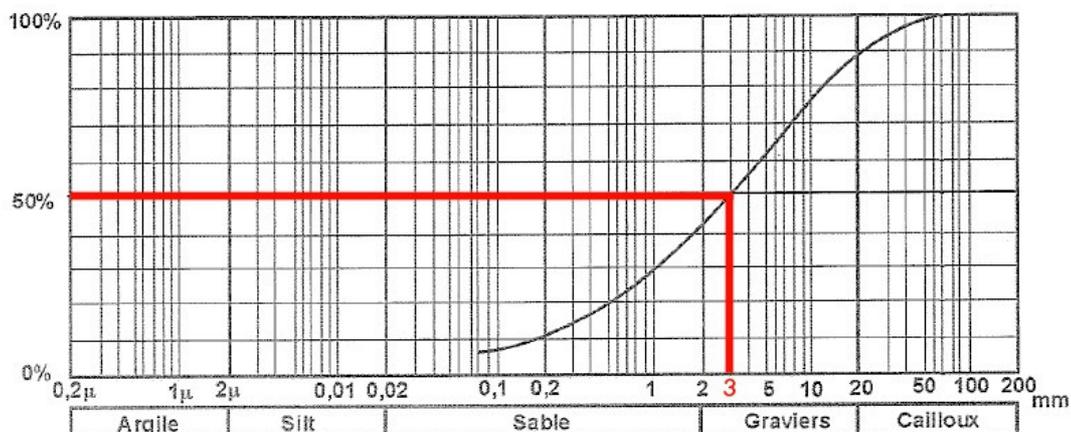
Benthos : Ensemble des organismes vivants à proximité du fond des eaux.

Colmatage : dépôt de sédiments fins (argiles limons, sables fins) sur le substrat alluvial lui-même et dans les interstices entre les particules grossières composant ce substrat. Ce colmatage entraîne une réduction de la perméabilité du substrat (réduction des échanges avec le milieu interstitiel, substrat moins mobile). On différenciera le colmatage superficiel (recouvrement des alluvions grossières par des sédiments fins, uniformisant temporairement les fonds) du colmatage interstitiel (infiltration des sédiments fins en profondeur).



III. 75: Différenciation du colmatage superficiel du colmatage interstitiel

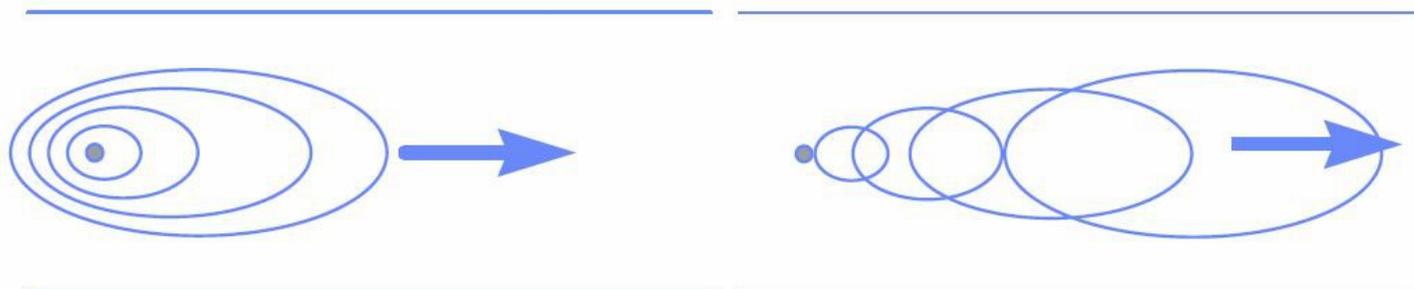
Diamètre médian d'un échantillon de sédiments (**d50**) : La courbe granulométrique ci-dessous représente le pourcentage en poids des grains en fonction de leur diamètre. Sur l'exemple ci-dessous, le diamètre médian (d50) vaut 3 mm, ce qui signifie que 50% du poids de l'échantillon est composé de grains inférieurs à 3 mm.



III. 76: schéma de la courbe granulométrique d'un échantillon © G. Degoutte

Écoulement fluvial : écoulement pour lequel l'information d'une perturbation locale de l'écoulement (caillou lancé dans l'eau ou obstacle) est remontée vers l'amont (les rides générées s'échappent vers l'aval mais également un peu vers l'amont). La forme de la ligne d'eau est alors imposée par un contrôle aval (l'aval influence l'amont). Cet écoulement correspond au cas où le nombre de **Froude** est inférieur à 1.

Écoulement torrentiel : écoulement pour lequel l'information d'une perturbation locale de l'écoulement (caillou lancé dans l'eau ou obstacle) n'est pas remontée vers l'amont (aucune ride ne remonte vers l'amont). On parle alors de contrôle amont . Cet écoulement correspond au cas où le nombre de Froude est supérieur à 1.



ondes générées par un caillou lancé ou un obstacle située dans un cours d'eau à régime fluvial (à gauche) et torrentiel (à droite) © CETMEF, 2011

Érosion régressive : érosion qui se propage de l'aval vers l'amont (c'est-à-dire dans le sens inverse de l'écoulement de l'eau)

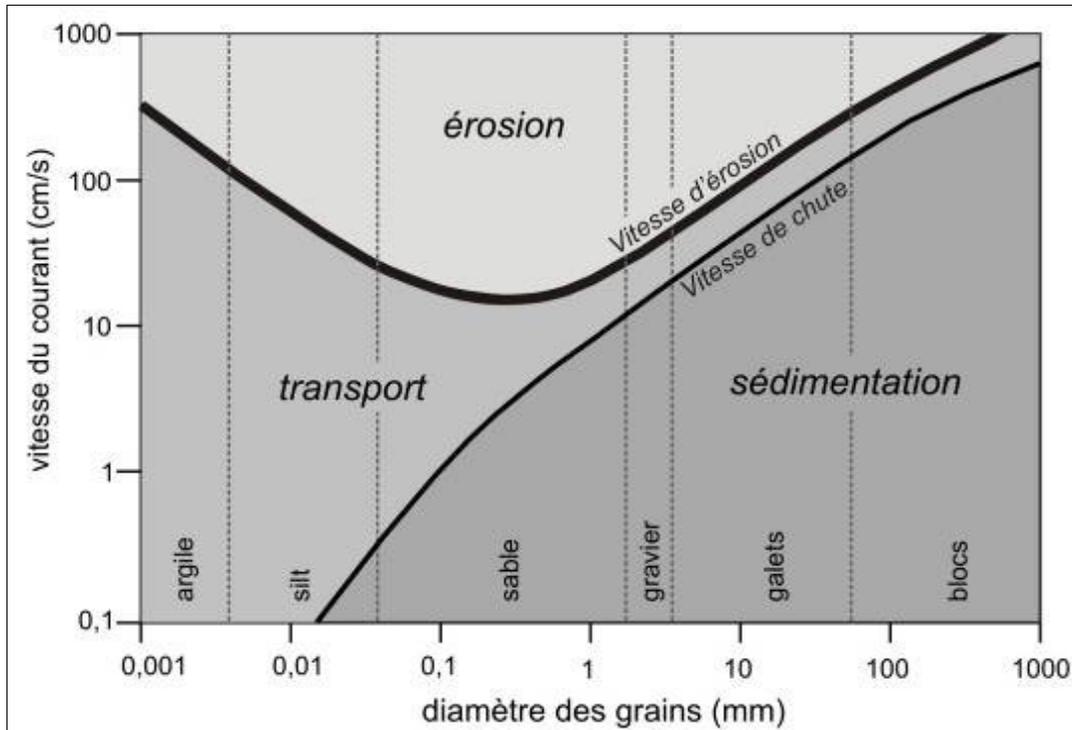
Érosion progressive : érosion qui se propage de l'amont vers l'aval

Dérasement : destruction totale de l'ouvrage (fondations comprises) appelée aussi « effacement »

Incision : abaissement généralisé du fond d'un cours d'eau, résultat d'une érosion régressive ou d'une érosion progressive.

Le diagramme de **Hjulström** (1935) : Ce diagramme illustre bien le comportement des particules en fonction de leur taille et de la vitesse du courant. Ce diagramme a été basé sur des expériences en laboratoire afin de déterminer la vitesse minimale (ou critique) d'un courant nécessaire pour mobiliser, transporter et déposer des grains. La courbe de la vitesse d'érosion présente une limite très nette au niveau du couple « diamètre 0,5 mm et vitesse 20 cm/s » traduisant un comportement différent entre les particules fines et grossières pour la phase de mobilisation:

- pour les particules moyennes à grossières (à partir des sables grossiers), plus les particules sont grossières, plus grande est la vitesse nécessaire pour leur transport; la vitesse du flux nécessaire pour mobiliser les grains augmente donc avec leur granulométrie.
- Pour les particules fines (jusqu'aux sables fins), la courbe démontre la nécessité d'une forte vitesse du flux pour les mobiliser. Ce comportement paradoxal est la conséquence de la grande force de cohésion qui existe entre les particules les plus fines. Quand ces particules sont déjà arrachées, elles sont peut être transportées à des vitesses nettement plus faibles.

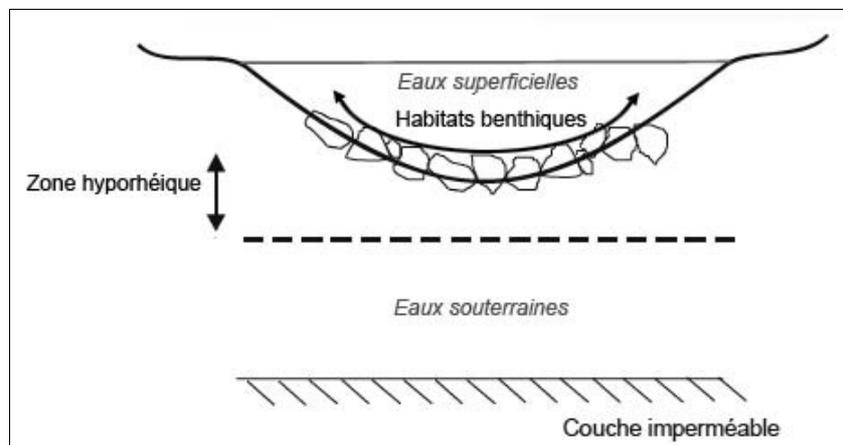


III. 77: Le diagramme de Hjulström © D. PINTO MARTINS

Granularité d'un sédiment : Caractéristique géométrique d'un grain (et non granulométrie d'un sédiment)

Granulométrie ou **analyse granulométrique** : étude ou mesure de la granularité des sédiments

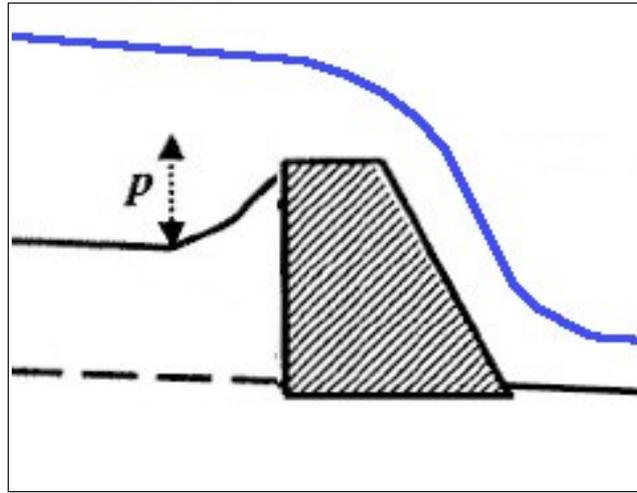
zone **hyporhéique** : Ensemble des sédiments contenant une partie des eaux de surfaces, situés au-dessous et à côtés d'un cours d'eau.



III. 78: Localisation de la zone hyporhéique

Longueur développée (d'un méandre): longueur mesurée entre un point amont et un point aval du cours d'eau en suivant l'axe du lit mineur

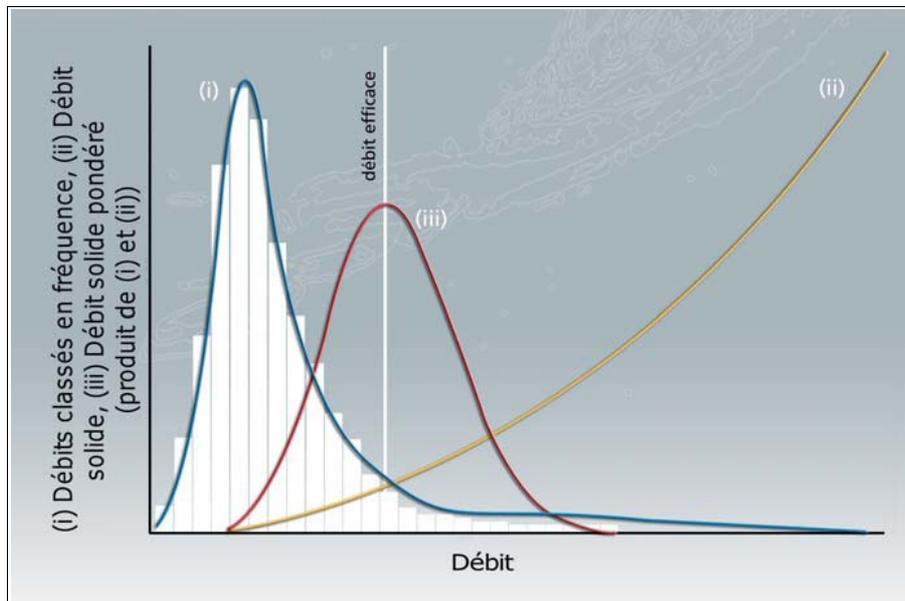
Pelle : la pelle est la différence entre la crête du seuil et le fond du lit en amont de l'ouvrage



Ill. 79: pelle de la retenue d'un ouvrage © G. Degoutte

Poisson lithophile : Poisson pondant ses œufs sur un substrat de type galets et graviers

Débit ou crue morphogène : Le débit morphogène est celui qui façonne le plus le lit du cours d'eau. Il est évalué en calculant le débit « effectif », c'est-à-dire celui qui transporte le plus de sédiments au cours d'une année hydrologique normale. Pour un grand nombre de rivières, ce débit correspond à une crue de période de retour allant de 1 à 5 ans, voir 10 ans sur certains cours d'eau en tresse. Il en résulte que contrairement à une idée répandue, ce ne sont pas les crues très rares qui façonnent le lit des cours d'eau. On estime qu'il correspond généralement aussi à un écoulement « à pleins bords ».



Ill. 80: Modèle de calcul quantité-fréquence du transport sédimentaire (Barry et al., 2008).

Pour le cours d'eau étudié, la courbe (i) représente la fréquence d'occurrence des débits ; la courbe (ii) représente le transport sédimentaire pour des débits croissants ; la courbe (iii) est le produit des deux précédentes (iii)=(i) x (ii) et donne une distribution en fréquence du transport de sédiments.

Nombre de Froude : est un nombre adimensionnel qui permet de caractériser le régime d'écoulement

(torrentiel ou fluvial) d'un cours d'eau. Formule :
$$\frac{v}{\sqrt{g \cdot y \cdot m}}$$

avec v : vitesse de l'écoulement en m.s^{-1}

g : accélération de la pesanteur (9.81 m.s^{-2})

y_m : tirant d'eau moyen dans la section soit la hauteur d'eau en m

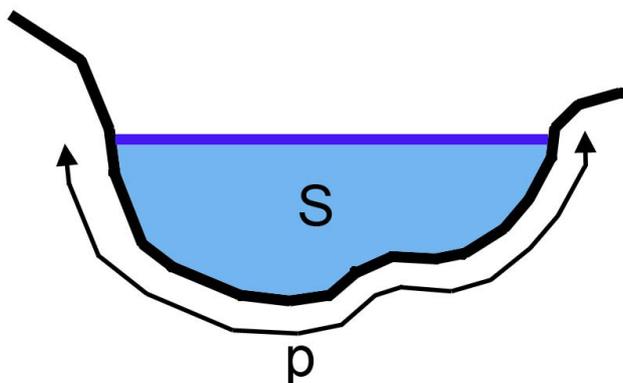
Si $Fr > 1$: régime torrentiel

Si $Fr < 1$: régime fluvial

Rayon hydraulique (Rh) : le rayon hydraulique est le rapport de la surface mouillée (S) par le périmètre mouillé (p). $Rh = S/p$

la surface mouillée est la surface d'eau comprise dans le plan de coupe de la section en travers.

Le périmètre mouillé est la longueur curviligne de l'interface entre l'eau et le lit.



Tronçon géomorphologique homogène : Un tronçon homogène doit en théorie, selon les lois de la géomorphologie fluviale, présenter des caractéristiques géomorphologiques homogènes : géométrie du lit, pente, sinuosité, style fluvial, etc. Si un tronçon homogène présente des portions de son linéaire manifestement différentes les unes des autres, on peut alors suspecter une ou plusieurs altérations hydromorphologiques. Le tronçon est, en effet, le niveau élémentaire de fonctionnement de la dynamique fluviale et plus particulièrement, l'échelle de réponse des processus hydromorphologiques aux contraintes des structures géomorphologiques et au régime hydrologique. C'est donc à cette échelle de sectorisation que se focalisera l'analyse des altérations hydromorphologiques.

Pour alimenter SYRAH-CE, l'Irstea a retenu, parmi toutes les variables de contrôle de la morphologie fluviale, quatre caractéristiques hydromorphologiques afin de définir les tronçons homogènes :

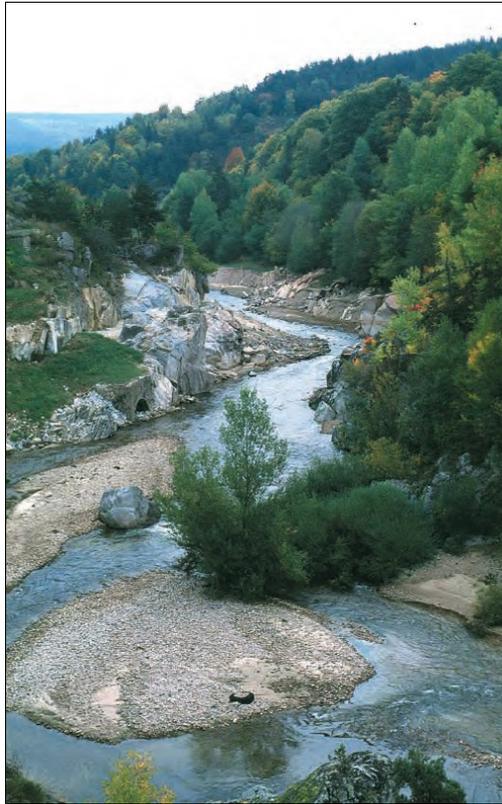
- la largeur du fond de vallée alluvial (bande d'alluvions modernes, caractérisée par les sigles Fz et Fyz sur les cartes géologiques)
- la pente et la forme du fond de vallée qui permettent respectivement d'apprécier l'énergie du cours d'eau et le degré de contrainte de la dynamique latérale du cours d'eau
- l'hydrologie qui conditionne la largeur du cours d'eau. Cette caractéristique a été appréhendée à partir de l'ordination de Strahler (système hiérarchique descendant de numérotation des cours d'eau). Bravard et Petit (2000) ont démontré qu'il y avait une bonne corrélation entre le rang de Strahler et la taille de la rivière.
- la nature du substratum géologique qui a été principalement utilisée quand le fond de vallée n'était pas alluvial et qui fournit des informations sur la nature des apports de versants ou affluents, la dynamique fluviale ou de perturbation potentielle du débit liquide.

(Source : Irstea)

Index des illustrations

III. 1: Comparaisons de deux échelles granulométriques.....	5
III. 2: Balance de Lane (1955) © Onema.....	6
III. 3: Invertébrés aquatiques (simulidae) vivant sur des éléments grossiers © G. Archambaud.....	7
III. 4: Truite fario en pleine reproduction © L. Perrin.....	7
III. 5: Écoulements d'eau à plusieurs échelles entre la surface et la zone hyporhéique* (S. Gayraud et al., 2002) : A) Échanges hydriques induits par les discontinuités géomorphologiques et géologiques ; B) Détail des mouvements hydriques au sein d'une séquence mouille-seuil-mouille.....	7
III. 6: A) Zones affectées par le colmatage, B) distinction entre le colmatage superficiel et interstitiel..	9
III. 7: La dynamique sédimentaire d'un cours d'eau © Malavoi, 2011 - modifié.....	10
III. 8: Apport des versants (production primaire) © Onema.....	10
III. 9: Apports d'un affluent qui construit son cône alluvial dans le lit principal (production secondaire) © Onema.....	10
III. 10: Délimitation de la bande active sur la Loire.....	11
III. 11: Dépôt alluvial sur un petit cours d'eau de tête de bassin, le Chagnon (18) © A. Alber.....	11
III. 12: Carte géologique au 1/50 000 (http://infoterre.brgm.fr) © BRGM.....	11
III. 13: Érosion des berges de la Loire au lieu dit « Le Grand Fleury » © S. Braud.....	11
III. 14: Courbe théorique de décroissance du diamètre moyen des sédiments (Sternberg, 1875).....	12
III. 15: Schématisation de la variabilité amont-aval des dépôts sédimentaires © Montgomery et Buffington 1997.....	12
III. 16: Contre-exemple de la décroissance granulométrique sur l'Arnon © A. Alber.....	13
III. 17: Exemple d'armure en plan et en coupe © J.R. Malavoi	13
III. 18: Sédiments cohésifs © S. Rodrigues.....	14
III. 19: Sédiments non cohésifs © S. Rodrigues.....	14
III. 20: disposition en tuilage © H. Lamarre, 2001.....	14
III. 21: Modes de transport des particules © G. Degoutte.....	14
III. 22: Diagramme d'évaluation du transport suffisant des sédiments au droit d'un ouvrage.....	16
III. 23: A) Barrage de Grangent sur la Loire. Source non connue ; B) Seuil sur l'Indre © S. Braud.....	17
III. 24: Seuil à vannes © J.R. Malavoi.....	18
III. 25: Seuil à clapet © J.R. Malavoi.....	19
III. 26: « Barrage » à aiguille © CETMEF.....	19
III. 27: Profil en long de la ligne d'eau et du fond du lit du Cher, altéré par la présence du seuil de Bigny © SOMIVAL, 2009.....	20
III. 28: Schéma du comblement d'une retenue de barrage © G. Degoutte.....	20
III. 29: Schéma de l'évolution des fonds après la construction d'un seuil © G. Degoutte.....	20
III. 30: Tronçons de cours d'eau présentant un risque élevé d'altération de la continuité sédimentaire (SYRAH-CE).....	24
III. 31: Tronçons de cours d'eau présentant un risque élevé d'altération du substrat et de la structure du lit (SYRAH-CE).....	24
III. 32: Exemple de sectorisation à l'échelle d'un petit bassin versant (Brierley et Fryirs, 2000).....	27
III. 33: ravine sur le bassin de la Gartempe © S. Braud.....	28
III. 34: Exemples d'observations sur le Haut-Arnon (18) pouvant être relevées lors d'une prospection de terrain à l'échelle d'un bassin versant: (a) type de faciès et granularité dominante, (b) forme d'accumulation sableuse due à la rupture du profil en long contrôlée par un affleurement rocheux à l'aval, (c) ravines apportant des sédiments au cours d'eau, (d) forme d'accumulation de gravier à l'amont d'un arbre en travers du lit. © A. Alber.....	29
III. 35: Ancien profil en long de la Gartempe © IGN.....	29
III. 36: Raisonnement simplifié permettant d'évaluer l'impact d'un seuil sur le transport des sédiments grossiers.....	32
III. 37: identification des stations de mesures.....	33
III. 38: Localisation des zones naturelle et influencée.....	33
III. 39: Mesure de la largeur à plein bord.....	33

III. 40: Différents stades de comblement de la retenue d'un seuil.....	36
III. : Position des stations de mesure de la charge de fond.....	38
III. : Seuil de Bigny sur le Cher © S. Braud.....	40
III. : Barrage de Poutès © Bernard Bost.....	43
III. : Principe du barrage à pertuis ouvert © Christine Poulard et al.	45
III. : Définition des axes caractéristiques d'une particule (Chapuis, 2008).....	49
III. : Méthode de Wolman © USDA.....	50
III. : La benne Van Veen © G. Raccasi.....	51
III. : Le cône de Berthois © G. Raccasi.....	51
III. : Le « Préleveur filet » © P. Jugé.....	51
III. : Cartographie des substrats-supports © Téléos.....	52
III. : Formules utilisées pour la méthode IAM.....	52
III. : Bâtonnets utilisés pour évaluer le colmatage © Onema.....	54
III. : Positionnement des bâtonnets © Onema.....	54
III. : Analyse des profondeurs d'alternance oxygéné-hypoxique © Onema.....	54
III. : Evaluation de l'épaisseur de sables dans la Gartempe à l'aide d'une tige métallique graduée © S.Braud.....	55
III. : Tarière pédologique.....	56
III. : Dégagement du pied de berge © S. Braud.....	56
III. : Les 4 classes des variables permettant de discriminer la réactivité géodynamique des cours d'eau (J-R Malavoi,2011).....	57
III. : Utilisation du clisimètre © Beni Basler.....	58
III. : Principe du nivellement de la pente d'un cours d'eau.....	58
III. : Mise en place d'une chaîne d'érosion © J-R Malavoi.....	59
III. : Principe d'implantation et de fonctionnement des chaînes d'érosion (S. Rodrigues, 2004).....	59
III. : Particules peintes © Ployon.....	60
III. : Coupe du piège à sédiments en béton mis en place sur l'Harris Creek © Church et al., 1991.....	61
III. : Piège à sédiment © T. Dépret.....	61
III. : Alignement des pièges sur un transect de cours d'eau © Thomas Dépret.....	61
III. : Échantillonneur Helley Smith © J.R. Malavoi.....	62
III. : Photographies d'un seuil dénoyé à gauche et faiblement noyé à droite sur un affluent de l'étang de Berre © G.Degoutte.....	64
III. : Différentes phases de l'ennoiement d'un seuil © José VAZQUEZ – ENGEES.....	64
III. : Classes des variables permettant de discriminer la réactivité géodynamique des cours d'eau (Malavoi, Bravard, 2010).....	66
III. : Différenciation du colmatage superficiel du colmatage interstitiel.....	70
III. : schéma de la courbe granulométrique d'un échantillon © G. Degoutte.....	70
III. 77: Le diagramme de Hjulström © D. PINTO MARTINS.....	72
III. : Localisation de la zone hyporhéique.....	72
III. 79: pelle de la retenue d'un ouvrage © G. Degoutte.....	73
III. 80: Modèle de calcul quantité-fréquence du transport sédimentaire (Barry et al.,2008).....	73



*Le site du barrage de Saint-Étienne-du-Vigan,
après les travaux de restauration, 1998 © L. Fauron – Onema*

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**

Ministère de l'Écologie, du Développement Durable,
des Transports et du Logement
Direction régionale de l'Environnement,
de l'Aménagement et du Logement Centre
5 avenue Buffon – BP 6407
45 064 Orléans cedex 2
Tél. : 02 36 17 41 41
Fax : 02 36 17 41 01

www.centre.developpement-durable.gouv.fr