



Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière

J.R. Malavoi, C.C. Garnier, N. Landon,
A. Recking, Ph. Baran.



L'office national de l'eau et des milieux aquatiques

Créé en avril 2007 par la loi sur l'eau du 30 décembre 2006, l'Onema est un établissement public sous tutelle du ministère en charge du développement durable. Organisme technique français de référence sur la connaissance et la surveillance de l'état des eaux et sur le fonctionnement écologique des milieux aquatiques, sa finalité est de favoriser la gestion globale et durable de la ressource en eau et des écosystèmes aquatiques. Il contribue ainsi à la reconquête de la qualité des eaux et l'atteinte de leur bon état d'ici à 2015, objectif fixé par la directive cadre européenne sur l'eau.

L'Onema est présent sur l'ensemble de la France métropolitaine ainsi que dans les départements et collectivités d'outre mer au titre de la solidarité de bassin.

Ses 900 agents ont pour mission de :

- n mobiliser la recherche publique, soutenir des programmes de recherche et organiser une expertise de haut niveau pour accompagner et évaluer la mise en œuvre des politiques publiques de l'eau ;
- n coordonner le système d'information sur l'eau et participer à l'acquisition des données relatives à l'eau et aux milieux aquatiques, aux activités et aux services associés ;
- n mettre à disposition ces informations auprès des autorités européennes et nationales, des gestionnaires de l'eau ou du grand public ;
- n contribuer au contrôle des usages de l'eau et à la surveillance des milieux aquatiques, participer à la prévention de leur dégradation, à leur restauration et à la préservation de la biodiversité ;
- n apporter aux acteurs de la gestion de l'eau son appui technique et sa connaissance de terrain.

Pour mener à bien ses missions, il travaille en étroite collaboration et en complémentarité avec l'ensemble des acteurs de l'eau.



Cet ouvrage poursuit la collection « Comprendre pour agir » qui accueille des ouvrages issus de travaux de recherche et d'expertise mis à la disposition des enseignants, formateurs, étudiants, scientifiques, ingénieurs et des gestionnaires de l'eau et des milieux aquatiques.

Il est consultable sur le site internet de l'Onema (www.onema.fr), rubrique publications ainsi que sur le portail national « les documents techniques sur l'eau » (<http://www.documentation.eaufrance.fr/>).



Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière



J.R. Malavoi, C.C. Garnier, N. Landon, A. Recking, Ph. Baran.

P r é f a c e





Le transport solide, à savoir le charriage des sédiments grossiers par les cours d'eau au gré des crues, est l'un des éléments majeur du bon fonctionnement des hydrosystèmes fluviaux. En effet, le cycle vital de nombreuses espèces fluviatiles est étroitement lié à un habitat composé en grande partie de dépôts alluvionnaires grossiers.

La préservation de cette charge alluviale grossière est indispensable au bon état écologique des eaux. C'est pour cette raison que le bon fonctionnement du transport sédimentaire est aujourd'hui inscrit comme un objectif fort dans les textes juridiques encadrant la gestion de l'eau et des milieux aquatiques :

- la directive cadre européenne sur l'eau de 2000, dans son annexe 5, fait de la continuité écologique l'un des éléments de qualité hydromorphologique pour la classification de l'état écologique d'un cours d'eau. Le « très bon état » ne peut même être atteint que si « la continuité de la rivière n'est pas perturbée par des activités anthropogéniques et permet une migration non perturbée des organismes aquatiques et le transport de sédiments » ;

- l'article L. 214-17 du Code de l'Environnement relatif aux classements de cours d'eau prévoit que soit établie pour chaque bassin ou sous-bassin, « une liste de cours d'eau, parties de cours d'eau ou canaux dans lesquels il est nécessaire d'assurer le transport suffisant des sédiments et la circulation des poissons migrateurs. Tout ouvrage doit y être géré, entretenu et équipé selon des règles définies par l'autorité administrative, en concertation avec le propriétaire ou, à défaut, l'exploitant ».

Cette reconnaissance à un haut niveau juridique du rôle du transport sédimentaire justifiait la rédaction d'un document technique de synthèse sur cette thématique.

Cet ouvrage répond à ce besoin et permettra aux gestionnaires et aux usagers des cours d'eau de découvrir le sujet ou de compléter leurs connaissances sur ce compartiment-clé des hydrosystèmes fluviaux.

Patrick Lavarde
Directeur général
Onema

Odile Gauthier
Directrice de l'eau et de la biodiversité
MEDDTL

P o u r q u o i s'intéresser au transport solide ?



Tout d'abord, précisons que nous avons volontairement choisi de focaliser ce document sur le transport solide des **sédiments fluviaux dits « grossiers »** car la majorité des chercheurs en hydromorphologie et en écologie fluviale considère que c'est le déficit chronique, souvent d'origine anthropique, de cette charge alluviale de fond qui est à l'origine de nombreux dysfonctionnements observés aujourd'hui sur les cours d'eau français. Il n'en reste pas moins que des sédiments fins transitent aussi naturellement dans les hydrosystèmes et qu'ils y jouent un rôle important, particulièrement à l'aval (basses vallées, estuaires, deltas).

On pourrait admettre qu'il n'est pas nécessaire de gérer le transport solide d'une rivière et qu'elle est capable de le gérer toute seule. Néanmoins, on peut distinguer différents problèmes de gestion liés à la présence ou l'absence d'alluvions dans le cours d'eau.

Dans la mesure où les rivières servent divers usages, il convient de gérer cette charge alluviale de fond afin qu'elle n'engendre pas de risques importants vis à vis des enjeux humains et socio-économiques majeurs.

Les problèmes de gestion liés aux atterrissements dans le lit mineur des cours d'eau

La présence d'alluvions en rivière est généralement perçue négativement par les populations riveraines. Les demandes fréquentes de **curage** émanant des riverains et relayées par les élus sont principalement motivées par la volonté de réduire la fréquence et l'ampleur des inondations des terrains situés à proximité des zones d'atterrissements. Cet argument systématiquement avancé pour justifier le recours au curage n'est pas infondé dans la mesure où les petites crues d'occurrence annuelle à quinquennale ont une puissance insuffisante pour remobiliser complètement les dépôts d'alluvions existant dans le lit mineur. L'encombrement du chenal par des bancs alluviaux, surtout s'ils sont végétalisés, entraîne parfois une rehausse de la ligne d'eau qui suffit à créer des débordements localisés de la rivière. La formation d'atterrissements et leur végétalisation dans les traversées urbaines peut donc être problématique car susceptible d'induire une réduction de la section d'écoulement.

Un autre argument, plus rarement exprimé par les riverains pour justifier un curage, est de préserver le foncier en limitant la pression érosive sur les berges au droit de zones à enjeux. Les atterrissements qui se forment jouent en effet le rôle d'épis déflecteurs et accélèrent l'érosion de la berge opposée à l'atterrissement.



Les problèmes de gestion liés au déficit sédimentaire

La gestion du transport solide est aujourd'hui rendue nécessaire aussi par le fait que de nombreux cours d'eau ont connu et connaissent encore des dysfonctionnements hydrosédimentaires importants, caractérisés notamment par des **processus d'incision généralisée** liés à des perturbations anthropiques majeures, sur lesquelles nous reviendrons dans le corps de ce document :

- stabilisation volontaire des versants depuis la fin du XIX^e siècle, ce qui bloque les sédiments « à la source » ;
- extractions massives de granulats entre 1945 et 1985 environ ;
- implantation de nombreux ouvrages faisant obstacle au transport naturel de la charge de fond (barrages et seuils).

Or, de nombreux milieux, infrastructures ou usages sont fortement altérés par ces processus d'incision qui vont parfois jusqu'à la disparition totale du substrat alluvial :

- les ouvrages d'art (ponts, digues, protections de berges) qui se déchaussent et sont très coûteux à reconstruire ou à sur-protéger ;
- les dispositifs d'alimentation en eau potable, qui, lorsqu'elle est réalisée à partir de captages en nappe alluviale, peut être fortement perturbée, tant en qualité qu'en quantité ;
- les milieux naturels du lit mineur qui peuvent être gravement altérés, les alluvions inondées et exondées sont un habitat majeur pour la faune et la flore ;
- les milieux naturels du lit majeur (bras morts notamment) qui peuvent se trouver asséchés ou déconnectés.

L'objectif de ce document, destiné aux divers gestionnaires des cours d'eau, des techniciens de rivière aux décideurs politiques ou administratifs, est donc double :

- faire partager les éléments de connaissance actuellement disponibles sur le transport solide grossier en rivière, les processus physiques, le rôle biologique, les dysfonctionnements et leurs causes ;
- fournir des éléments de méthode qui leur permettront de gérer au mieux les sédiments grossiers transitant dans les cours d'eau, qui présentent la caractéristique d'être à la fois indispensables au bon fonctionnement des hydrosystèmes tout en pouvant entraîner des perturbations sur le plan des socio-systèmes.

Cinq chapitres seront développés :

- le premier récapitule les éléments de connaissance scientifique dont nous disposons aujourd'hui ;
- le deuxième présente les principales altérations connues du transport solide et leurs conséquences ;
- le troisième fait le point sur les divers aspects de la réglementation actuelle concernant le transport solide ;
- le quatrième fournit de grandes orientations quant à la gestion du transport solide ;
- le cinquième donne enfin des principes de mise en œuvre concrète des divers éléments présentés dans les chapitres précédents, notamment dans le cadre d'un **plan de gestion des sédiments**.

Sommaire



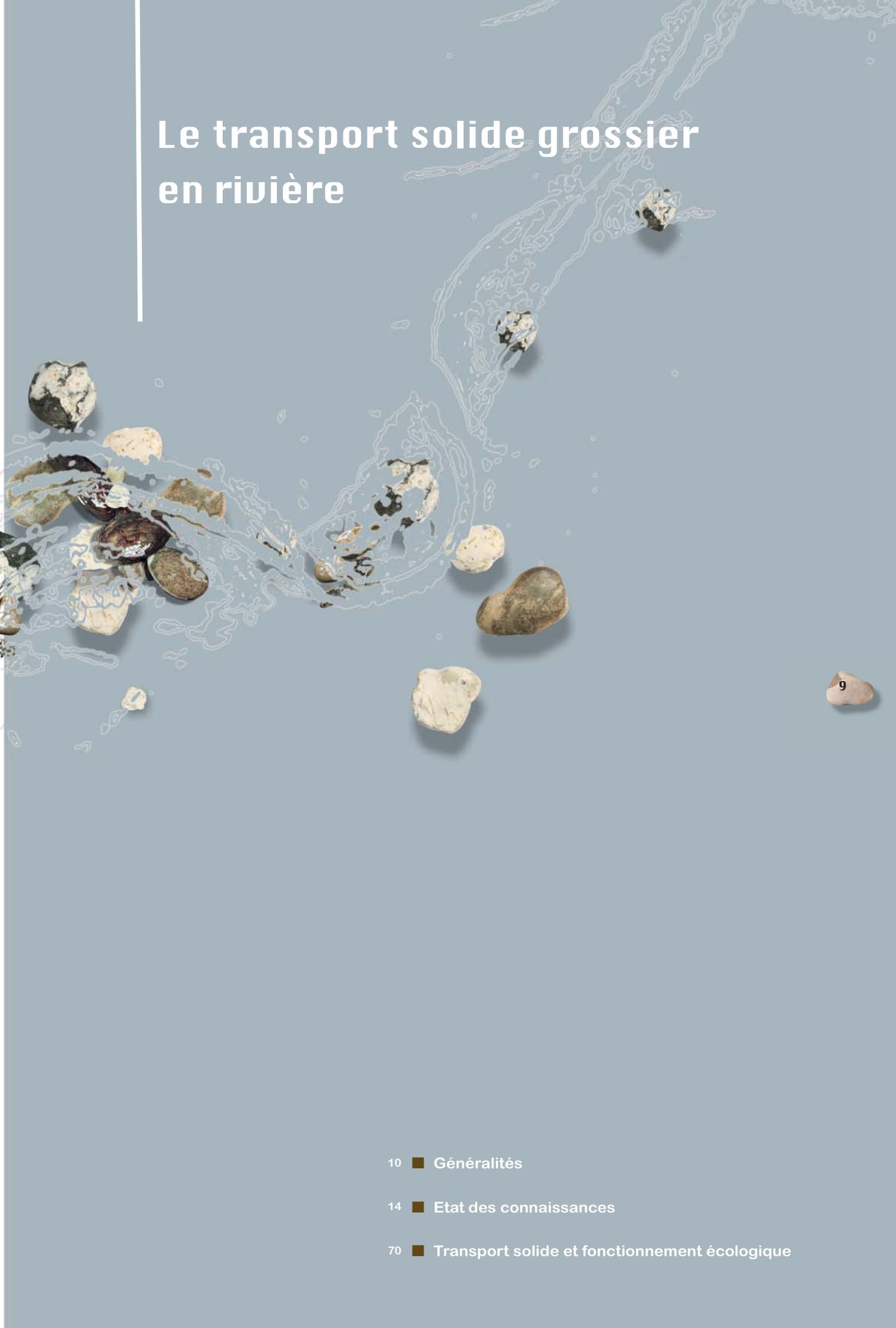


9	■ Le transport solide grossier en rivière
81	■ Les altérations anthropiques du transport solide
111	■ Droit applicable au transport sédimentaire
133	■ Orientations générales de gestion et de restauration
149	■ Éléments d'aide à l'élaboration d'un plan de gestion du transport solide
195	■ Annexes
209	■ Références bibliographiques



8

Le transport solide grossier en rivière



10 ■ Généralités

14 ■ Etat des connaissances

70 ■ Transport solide et fonctionnement écologique

Généralités

Le concept d'équilibre dynamique

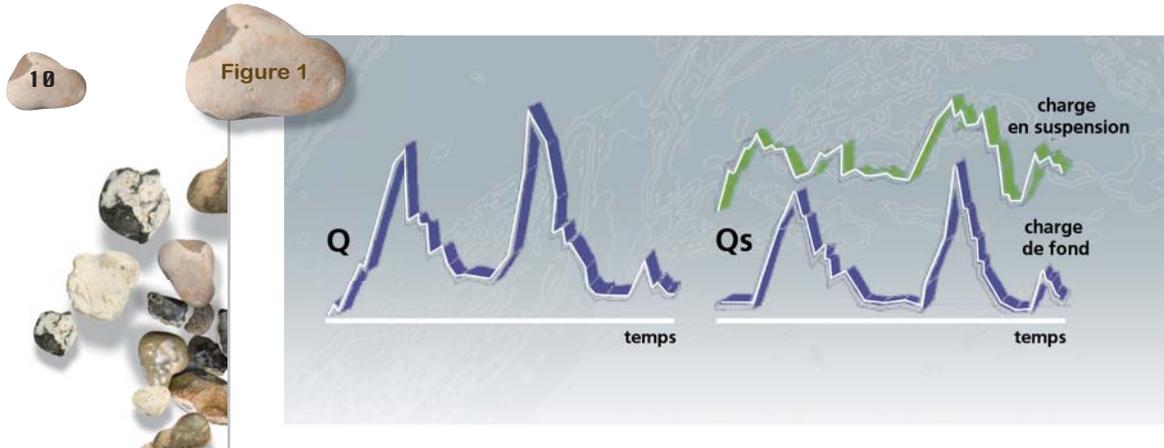
Dans des conditions naturelles, les rivières tendent à établir une combinaison « dynamiquement stable » entre deux types de variables :

- des variables de « contrôle », c'est-à-dire celles qui s'imposent à la rivière et contrôlent son évolution physique ;
- des variables de « réponse », qui permettent à la rivière de s'ajuster aux mutations des variables de contrôle.

Parmi les variables de contrôle, deux sont fondamentales, agissent de façon concomitante et régissent en grande partie la dynamique fluviale (Figure 1) :

- d'une part, le débit liquide (noté Q) qui, couplé à la pente donne au cours d'eau **sa puissance**. La puissance est, pour simplifier, le produit pente x débit x poids volumique de l'eau. Elle est fonction des conditions hydrologiques et de la morphologie générale (pente et forme de la vallée) et locale (style fluvial) du cours d'eau. Sa variabilité est donc à la fois spatiale (morphologie différente selon les tronçons de rivière) et temporelle (notamment sur le court terme par le biais des crues). La puissance brute (Ω) est calculée comme suit : $\Omega = \gamma QJ$ (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) (on prend 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) ;

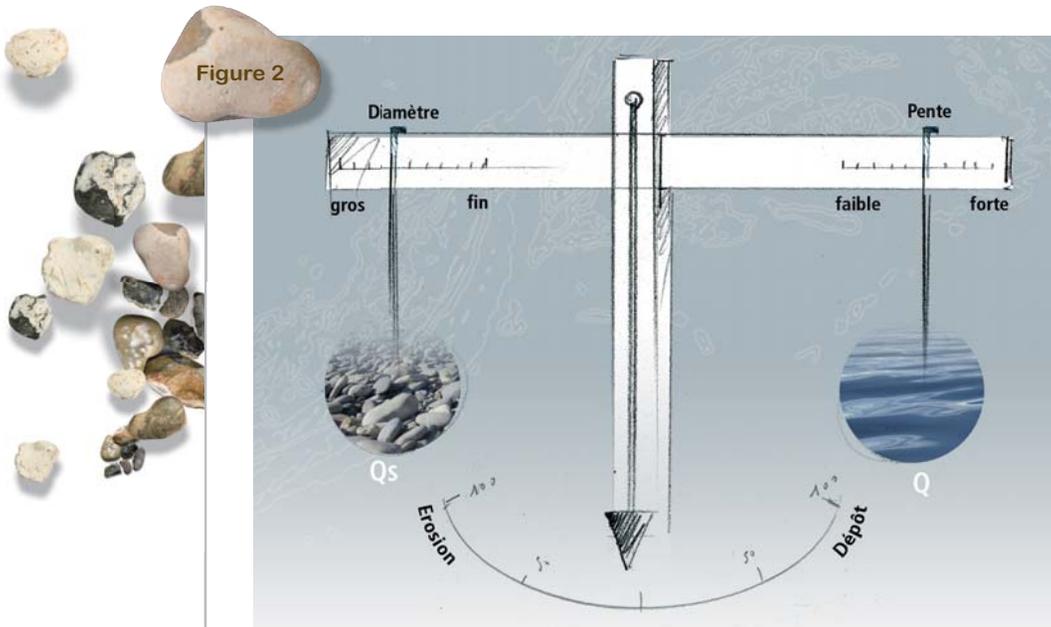
- et d'autre part, le débit solide (Q_s), particulièrement la charge alluviale de fond composée de sédiments grossiers.



Les deux principales variables de contrôle de la dynamique fluviale.

La balance de Lane (1955, Figure 2) montre que toute rivière cherche son équilibre entre la charge alluviale imposée (débit (Q_s) et granulométrie) et le débit liquide (Q), qui couplé à la pente, fournit l'énergie capable de l'évacuer.

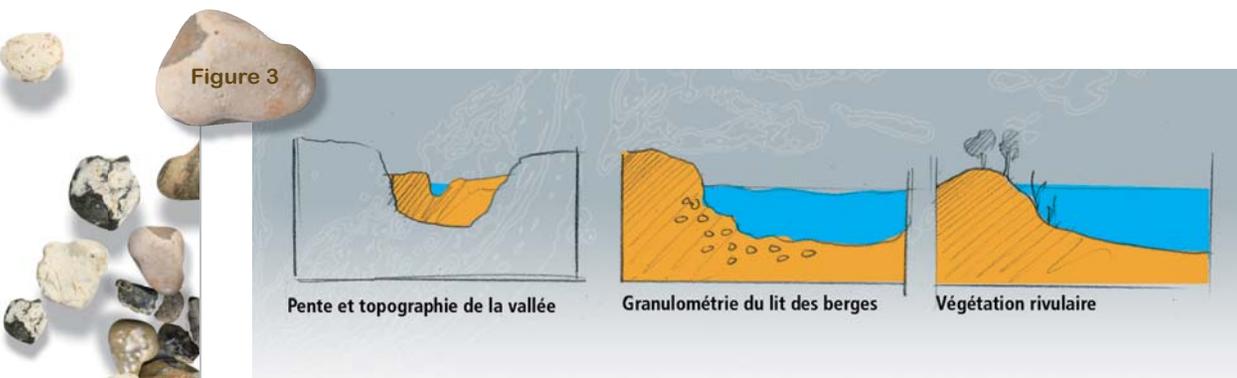
De manière très simplifiée, la dynamique fluviale peut donc être présentée comme l'oscillation permanente de l'aiguille d'une balance dont l'un des plateaux serait rempli de sédiments grossiers (variable Q_s), et l'autre d'eau (variable Q). Les quantités respectives et les rapports de ces deux éléments étant extrêmement fluctuants (à l'échelle de la journée, de l'année, du millier d'années), il s'ensuit un ajustement permanent de la morphologie du cours d'eau, autour de conditions moyennes, par le biais des processus d'érosion-dépôt.



La « balance de Lane ».

D'autres variables de contrôle interviennent à divers degrés dans les processus géodynamiques et les formes qui en résultent (Figure 3) :

- la pente et la géométrie de la vallée, mises en place depuis des centaines de milliers, voire des millions, d'années, sous le contrôle majeur de la géologie du bassin versant et des mouvements tectoniques ;
- les caractéristiques sédimentologiques du fond du lit et des berges, qui conditionnent leur érodabilité et qui sont elles aussi liées à l'histoire géologique (faciès des roches plus ou moins altérable) et géomorphologique (processus de surface) du bassin versant mais également à son évolution hydro-climatique plus ou moins récente (glaciations) ;
- la végétation des berges, qui est une variable « vivante » et par conséquent beaucoup plus fluctuante que les deux précédentes (car très sensible aux évolutions climatiques et aux actions anthropiques).



Les variables de contrôle secondaires de la dynamique fluviale.

En plus de ces variables de contrôle, des évènements géologiques (mouvements tectoniques) ou climatiques (variations du niveau des mers) majeurs peuvent aussi influencer sur la morphologie et la dynamique des cours d'eau.

On admet alors que tout cours d'eau dispose d'une gamme assez large de variables de réponse, pour modéliser sa morphologie en fonction des fluctuations des débits liquides et solides.

Parmi ces variables de « réponse » on trouve notamment :

- la largeur du lit à pleins bords (la géométrie de pleins bords correspond à la section d'écoulement du cours d'eau avant débordement dans le lit majeur ou plaine alluviale holocène. C'est le *plenissimum flumen* des juristes sur les cours d'eau domaniaux) ;
- la profondeur moyenne à pleins bords ;
- la pente du lit ;
- la sinuosité.

On dit que les rivières naturelles sont en "équilibre dynamique" ou en "quasi-équilibre" (selon l'échelle de temps choisie pour analyser ce phénomène) et qu'elles ajustent continuellement leur largeur, leur pente, leur sinuosité etc. au gré des fluctuations des variables de contrôle.

Equilibre dynamique signifie donc, non pas absence de modification des caractéristiques physiques du cours d'eau mais au contraire ajustement permanent autour de conditions moyennes.

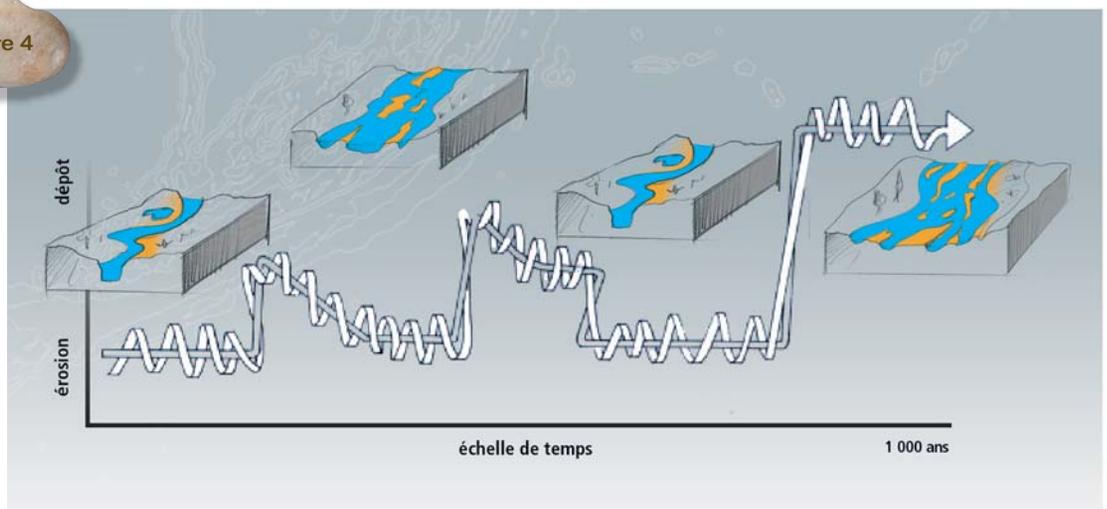
La démarche fondamentale que doit suivre un bon diagnostic hydromorphologique est donc d'identifier le seuil à partir duquel ces oscillations et les modifications géométriques qui les traduisent ne sont plus liées au processus d'équilibre mais deviennent des indicateurs de dysfonctionnements.

Dans la réalité, le débit liquide et le débit solide ne sont pas les seuls paramètres impliqués dans la mise en action des processus d'ajustement. Ainsi toute modification de l'une des variables de réponse est en théorie susceptible d'entraîner, par un processus complexe d'interactions et de rétroactions, une mutation de tout ou partie du système. C'est ainsi par exemple, qu'un recoupement de méandre, ou l'extraction de granulats en lit mineur, peuvent entraîner des modifications intenses et durables des processus d'érosion et de dépôt.

La morphologie d'un cours d'eau, ou pour simplifier son style fluvial, peut donc varier dans l'espace mais aussi dans le temps en fonction des modifications de Q et Qs (Figure 4).

12

Figure 4



Les modifications du style fluvial au cours du temps (d'après Sear, 1996). Les oscillations verticales reprennent celles, horizontales, présentées dans le schéma de Lane (Figure 2). Les dessins présentent leur traduction morphologique théorique.

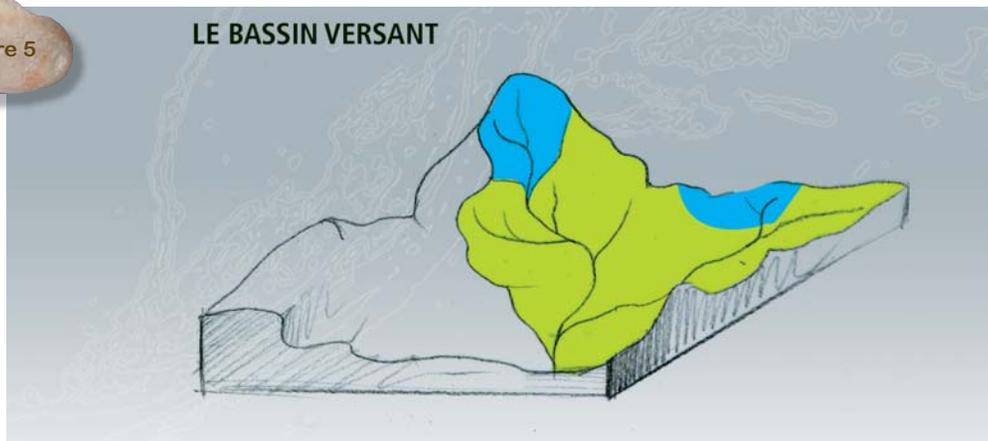
Si ces modifications sont de faible ampleur (simples oscillations autour de valeurs moyennes) le style fluvial d'équilibre reste sensiblement le même, en tout cas sur le court terme (50 ans, siècle...). Si ces modifications sont durables, par exemple du fait de la réduction de la charge solide liée à des changements climatiques majeurs ou des interventions anthropiques lourdes (barrages par exemple), le style fluvial peut lui aussi changer de manière durable et n'évoluer ensuite que faiblement autour d'une nouvelle forme d'équilibre. On parle alors de métamorphose fluviale.

Si le changement est fort mais relativement peu durable (par exemple, événement climatique localisé qui aurait apporté un gros volume d'alluvions), le cours d'eau s'orientera quelque temps vers un nouveau style puis reviendra progressivement à son style antérieur. Sur le long terme, les modifications et les changements de styles peuvent être assez fréquents, en fonction des fluctuations de Q et Qs ou de perturbations externes majeures (oscillation du niveau marin, mouvements tectoniques, etc.).

Les deux variables majeures de contrôle

C'est à l'échelle du bassin versant (BV) que sont générées les deux variables de contrôle majeures de la dynamique fluviale.

Figure 5



Un bassin versant (BV) et ses sous-bassins. Rappelons que le BV se définit toujours par rapport à un point précis du réseau hydrographique.

■ Le débit liquide

Les précipitations, atteignant la surface réceptrice que l'on nomme bassin versant, ruissellent plus ou moins directement et plus ou moins vite, selon la nature du sol, du sous-sol, et selon l'occupation ou les usages de la surface. A l'exutoire de chaque bassin versant élémentaire, puis du bassin le plus grand, se forme alors un débit liquide (Q) qui est le volume d'eau sortant de ce bassin par unité de temps et qui s'exprime en m^3/s , m^3/j , m^3/an (mètres cubes par seconde, par jour, par an).

Sur sol imperméable (roche mère, zones urbanisées, sols compactés ou battants) le ruissellement prendra le pas sur l'infiltration : une même pluie engendrera donc plus de débit à l'exutoire du BV que sur sol perméable (sol sableux par exemple). De même, un sol présentant les mêmes caractéristiques de perméabilité sera plus ruisselant s'il est mis en culture que s'il est couvert de forêts.

■ Le débit solide

Le débit solide d'un cours d'eau trouve lui aussi son origine dans le bassin versant, notamment via les apports dits externes. C'est la proposition de principes de « bonne gestion » de ce débit solide qui fait l'objet de cet ouvrage.

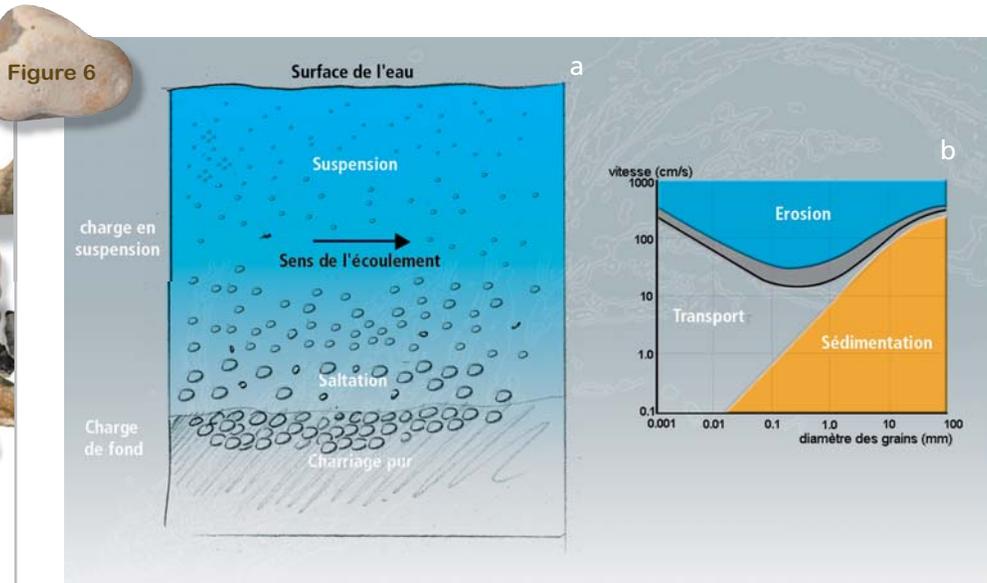
Etat des connaissances

La dichotomie charriage-suspension

Il est couramment admis que le transport de matériaux solides en rivière se fait sous deux formes (Figure 6a) :

- par **charriage** sur le fond lorsque ces matériaux dépassent un certain diamètre et que le courant ne peut les mettre en suspension. Ils se déplacent alors en contact quasi-permanent avec le fond par roulement et petits sauts ;
- en **suspension** lorsque les matériaux sont suffisamment fins et le courant suffisamment puissant pour les transporter au sein de la colonne d'eau.

La courbe de Hjulstrom (Figure 6b) présente une limite très nette au niveau du couple « diamètre 0,5 mm/vitesse



Dichotomie charriage-suspension.

20 cm/s », que beaucoup interprètent comme une limite charriage/suspension. Notons cependant que ce même sable de 0,5 mm pourra être transporté en suspension pour des vitesses plus importantes. La classe des sables toute entière est une classe intermédiaire entre le charriage et la suspension, fonction des vitesses d'écoulement et de la turbulence. On comprend mieux aussi grâce à cette courbe, le caractère « transitoire » du transport par charriage. Au-delà de cette valeur de l'ordre de 0,5 mm, si le grain est mis en mouvement pour une certaine vitesse d'écoulement, il se redépose pour une valeur à peine inférieure, alors que, lorsque l'on est dans la classe des limons, une fois le grain en mouvement, il se déplace vers l'aval sensiblement à la même vitesse que l'eau et ne se déposera plus que sous des conditions hydrauliques quasi stagnantes.

NB Certains auteurs distinguent un 3^{ème} mode de transport, la **saltation**, qui est un mode intermédiaire entre le charriage « vrai » et la suspension. Les particules se propagent par grands bonds dans un espace de quelques dizaines de centimètres au-dessus du fond du lit mineur où se déroule le charriage « vrai ».

La charge de fond et son origine

Si les concepts de puissance sont assez bien définis, il n'en va pas de même pour ceux liés à la charge solide, deuxième variable majeure de l'équilibre géodynamique.

NB Nous ne développerons ici que les processus liés au charriage, donc à la production de la charge solide dite « de fond » ou *bed load*.

■ Apports externes

Production primaire

Il s'agit de la production de sédiments grossiers qui arrivent quasi-directement au cours d'eau par le biais de processus gravitaires plus ou moins simples.

La production primaire est issue de formes d'érosion associées à un ou plusieurs processus d'ablation de la roche mère ou de dépôts de matériaux meubles des versants (cônes et talus d'éboulis, colluvions, loess, sols et lithosols, moraines).

On peut distinguer plusieurs formes et processus associés :

- les écroulements directs (Figure 7a) et ceux avec processus relais - tabliers d'éboulis c 7b-c) ou couloirs d'avalanche par exemple - (Figure 7d) ; résultat de plusieurs processus, combinés ou non (processus mécaniques comme l'alternance gel-dégel, processus chimique comme la karstification, processus gravitaire comme la mise en surplomb par érosion différentielle liée à la nature plus ou moins résistante des roches) ;

Figure 7



a-b-d © N. Landon
c © J.R. Malavoi

Exemple d'apports externes par production primaire. (a) écroulements directs (b et c) tabliers d'éboulis (d) couloir d'avalanche.

■ **la reptation**, c'est-à-dire le déplacement de particules au sein d'une formation meuble de versant sous l'action de la gravité. Souvent marquée le long des versants raides où la météorisation a produit une couverture de débris le plus souvent de faible calibre (les colluvions). Les chablis (arbres déracinés) peuvent favoriser la mise en surface de particules plus grossières, et sous condition de forte pente, ces formes peuvent évoluer plus ou moins rapidement vers le ravinement (Figure 8 a) ;

■ **les glissements de terrain**, c'est-à-dire les formations mises en mouvement par décollement des horizons humidifiés dû aux arrivées d'eau d'infiltration. Ces glissements deviennent intéressants pour la production de charge de fond lorsqu'ils sont composés d'une part importante de matériaux grossiers (ex. les moraines, les olistostromes). Ces surfaces sont rarement importantes et le plus souvent d'autres processus prennent le relais du glissement ou intensifient l'érosion, c'est le cas du ravinement (Figure 8).



Ces types de production primaire active ne se rencontrent que dans des conditions particulières (têtes de bassins montagnards non ou peu végétalisés) et ne participent réellement à la charge de fond des cours d'eau que s'ils sont en connexion étroite avec le réseau hydrographique.

De plus, ces sources de production primaire se sont fortement taries depuis la fin du XIX^e siècle sous l'effet de plusieurs facteurs ayant agi de manière synergique (nous y reviendrons dans un autre chapitre) :

■ changements climatiques (réchauffement) favorisant la végétalisation des versants et la réduction des processus érosifs et de glissement ;

■ réduction des pratiques agropastorales dominantes jusqu'au XIX^e siècle et qui limitaient artificiellement cette végétalisation par surpâturage ;

- aménagements à grande échelle visant la réduction de ces apports solides notamment par les travaux dits de Restauration des Terrains de Montagnes (RTM) : stabilisation des pentes par des plantations, seuils de « correction torrentielle », plages de dépôt torrentiel, etc.

Production secondaire

Il s'agit des apports des affluents, constitués eux-mêmes d'apports externes et internes.

Figure 9



© J.R. Malavoi

Exemple d'apports externes secondaires.

■ Apports internes

Conceptuellement, les apports internes sont ceux « produits » par le cours d'eau lui-même. On parlera aussi de « stock alluvial interne ».

Il se présente sous deux formes :

- le stock disponible dans le lit mineur lui-même et généralement en transit progressif vers l'aval (macroformes alluviales et fond du lit) ;
- le stock du lit majeur et des terrasses, injecté progressivement dans le cours d'eau par les processus d'érosion latérale.

Stock en lit mineur

Deux sous-types peuvent être distingués : les macroformes alluviales et le fond du lit mineur.

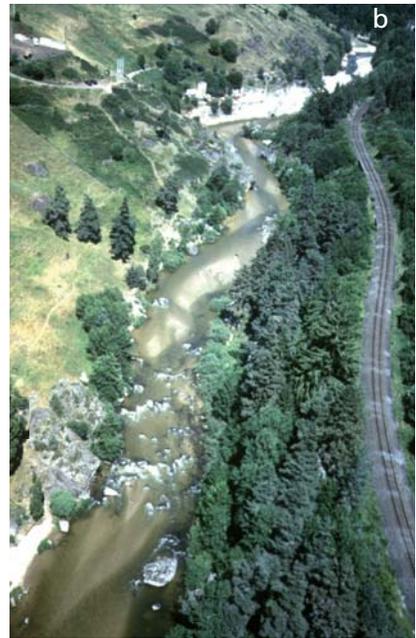
1- Les macroformes alluviales

Il s'agit des masses sédimentaires de volume important, transportées par charriage, et qui migrent plus ou moins rapidement vers l'aval. On peut les identifier assez facilement sur le terrain ou sur photographies aériennes car il s'agit généralement d'entités discrètes présentant une forme tridimensionnelle particulière.

Leur quantité, leur forme, leur répartition spatiale sont fonction de la quantité des apports externes et internes. Lorsque ces apports sont très importants, le lit mineur peut n'être constitué que d'une succession de macroformes (Figure 10a). Si les quantités augmentent encore et que les berges sont très érodables, un tressage peut se développer.



Figure 10



b © J.R. Malavoi

Exemples de macroformes en transit.

Ces macroformes constituent l'essentiel du débit solide observable et mesurable. Elles peuvent transiter intégralement, sans échange de matière avec le fond, notamment lorsque celui-ci est protégé par une « armure » granulométrique ou par un tapis végétal (Figure 11).



Figure 11



a-b © J.R. Malavoi

Fronts de dunes actives (a) sur la Loire sableuse et (b) sur le Doubs graveleux. Elles migrent sans reprise du stock situé en aval, protégé par un tapis végétal.

2- Le fond du lit

En dehors des macroformes, qui sont à la fois des unités de stockage et des formes de transport des alluvions fluviales, une partie de la charge de fond peut être mobilisée directement sur le fond du lit mineur, si celui-ci est alluvial et s'il n'existe pas de pavage.

Lorsque ce prélèvement sur le fond n'est pas compensé par un apport de l'amont, il y a alors incision du lit mineur. Si ce processus se pérennise (par exemple, suite à la mise en place d'un barrage ou au piégeage des apports amonts dans une ancienne fosse d'extraction), le déséquilibre initialement temporaire se transforme en déséquilibre à long terme.

Figure 12



a © J.R. Malavoi - b © N. Landon

Exemples de mobilisation directe du fond alluvial sans remplacement par des apports amont (généralement dans un contexte de dysfonctionnement hydrosédimentaire : érosion régressive ou progressive liée à un aménagement). Le résultat est l'incision du lit mineur.

Stock du lit majeur et des terrasses

Sous nos latitudes, l'essentiel du stock alluvial grossier potentiellement disponible au transport se trouve aujourd'hui dans les terrasses des fonds de vallée. Seules les têtes de bassin des rivières de montagne disposent encore d'apports solides importants provenant d'une production externe « primaire ».

Les terrasses sont constituées d'énormes volumes d'alluvions déposées par les cours d'eau du pléistocène (lors des périodes glaciaires et inter-glaciaires) et que l'on identifie généralement sur les cartes géologiques du BRGM (Bureau de Recherche Géologiques et Minières) par les codes Fz (plaine alluviale holocène), Fyz et Fy (terrasses du Würm).

Les terrasses plus anciennes (Fx et plus) peuvent aussi constituer un stock disponible si elles sont suffisamment proches du lit mineur actif pour être soumises aux processus d'érosion latérale.

En effet, l'injection dans le cours d'eau de ce stock alluvial « fossile » se fait par le biais des processus d'érosion latérale (Figure 13).

NB Les volumes injectés peuvent être de l'ordre de grandeur de la capacité de charriage locale du cours d'eau.

Figure 13



a © N. Landoni-b © J.R. Malavoi

Exemples de reprise du stock alluvial pléistocène par érosion latérale de basses terrasses.

La propagation de la charge de fond

Une fois injectée dans le cours d'eau, la charge de fond se propage plus ou moins rapidement en fonction des conditions géomorphologiques locales (changements de pente, élargissement du lit, ouvrages modifiant les conditions d'écoulement, etc.) et des débits capables de la mobiliser.

■ Formes de propagation de la charge de fond

La forme la plus fréquente que revêt le transport par charriage est une macroforme sédimentaire que l'on nomme banc ou dune. Il existe actuellement un flou terminologique autour de ces deux termes. Pour certains auteurs (Yalin et Da Silva, 2001 notamment) les dunes (dunes) sont des macroformes de taille et longueur d'onde proportionnelles à la profondeur tandis que les bancs (bars) sont de taille et de longueur d'onde proportionnelles à la largeur à pleins bords. Les macroturbulences à l'origine des dunes seraient des vortex à axe horizontal, tandis que celles générant les bancs seraient à axe vertical.

La propagation de la charge de fond se fait sous une forme tridimensionnelle caractéristique que l'on peut donc identifier, localiser et dont on peut dessiner les contours et les volumes.

On observe généralement une contre-pente vers l'amont et une face aval active (front de progradation ou « face d'avalanche ») à pente forte, proche de la pente d'équilibre des matériaux granulaires (40-45°). Voir Figure 14.

Rappelons qu'il existe cependant un type de propagation sur fond plat (plane bed) lorsque l'écoulement devient torrentiel ($Fr > 1$) sur les cours d'eau sableux. On trouve aussi des antidunes lorsque l'écoulement est très torrentiel (Fr très > 1).



Figure 14



a- b © J.R. Malavoi

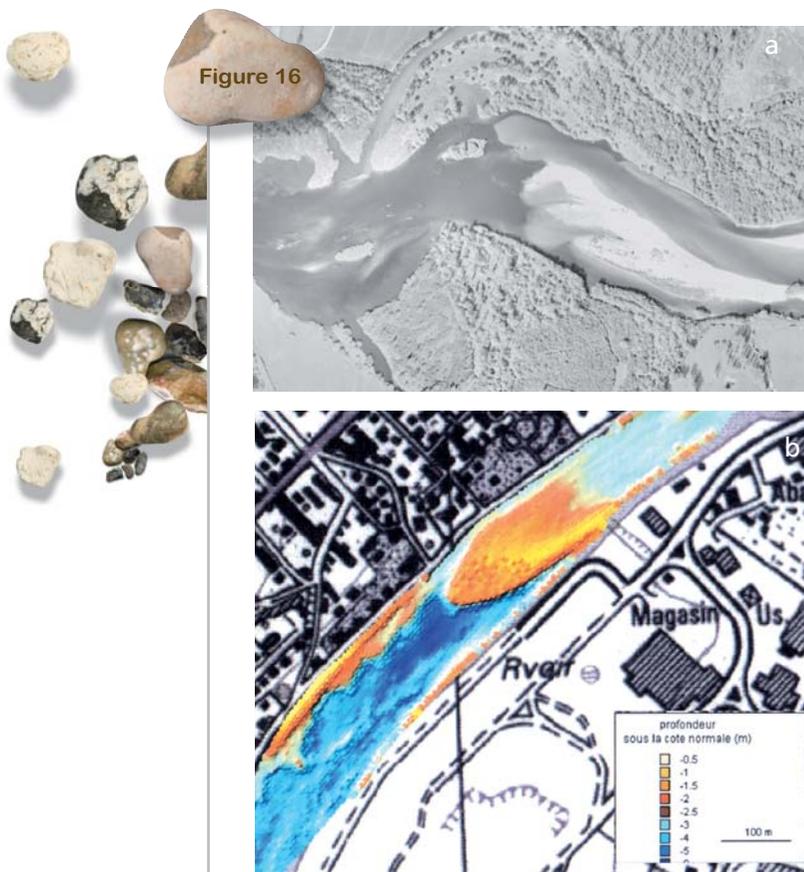
Exemples de dunes/bancs (a) sur le Doubs aval (b) dans un caniveau...

Si la charge solide est importante (en volume) les macroformes peuvent être jointives, le « front » de chaque dune progressant sur la « queue » de dune le précédant, elle-même se propageant vers l'aval, etc. (Figure 15).



(a) champ de dunes sableuses sur l'Allier aval et (b) caillouteuses sur l'Allier amont.

Inversement, s'il y a peu de sédiments en transit, les macroformes migrent de façon isolée et sont d'autant plus faciles à localiser et à mesurer (Figure 16). Il existe bien sûr toutes les situations intermédiaires entre ces extrêmes.



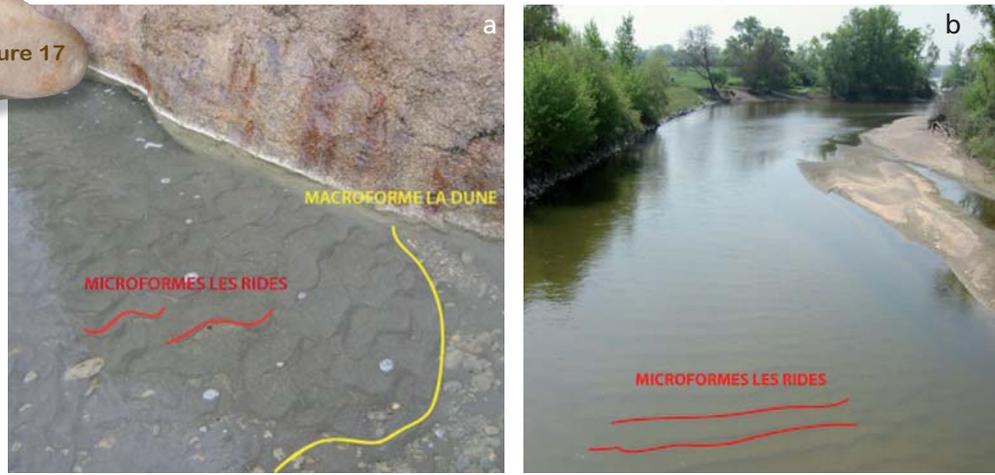
a- fond BDOrtho® 2001© IGN 2011
b- fond SCAN 25® © IGN 2011

(a) macro-dune en migration sur le Doubs, plus ou moins piégée dans une ancienne fosse d'extraction (pseudo-delta), (b) dune graveleuse isolée, en migration dans le lit mineur du Doubs en aval immédiat de Dole (mesures bathymétriques).

NB A la surface des macroformes (dunes) on peut trouver des microformes sédimentaires appelées rides. Elles se déplacent sous l'impulsion de courants à faible vitesse et on les trouve généralement sur les cours d'eau sableux, bien que l'on puisse parfois observer des rides caillouteuses.



Figure 17



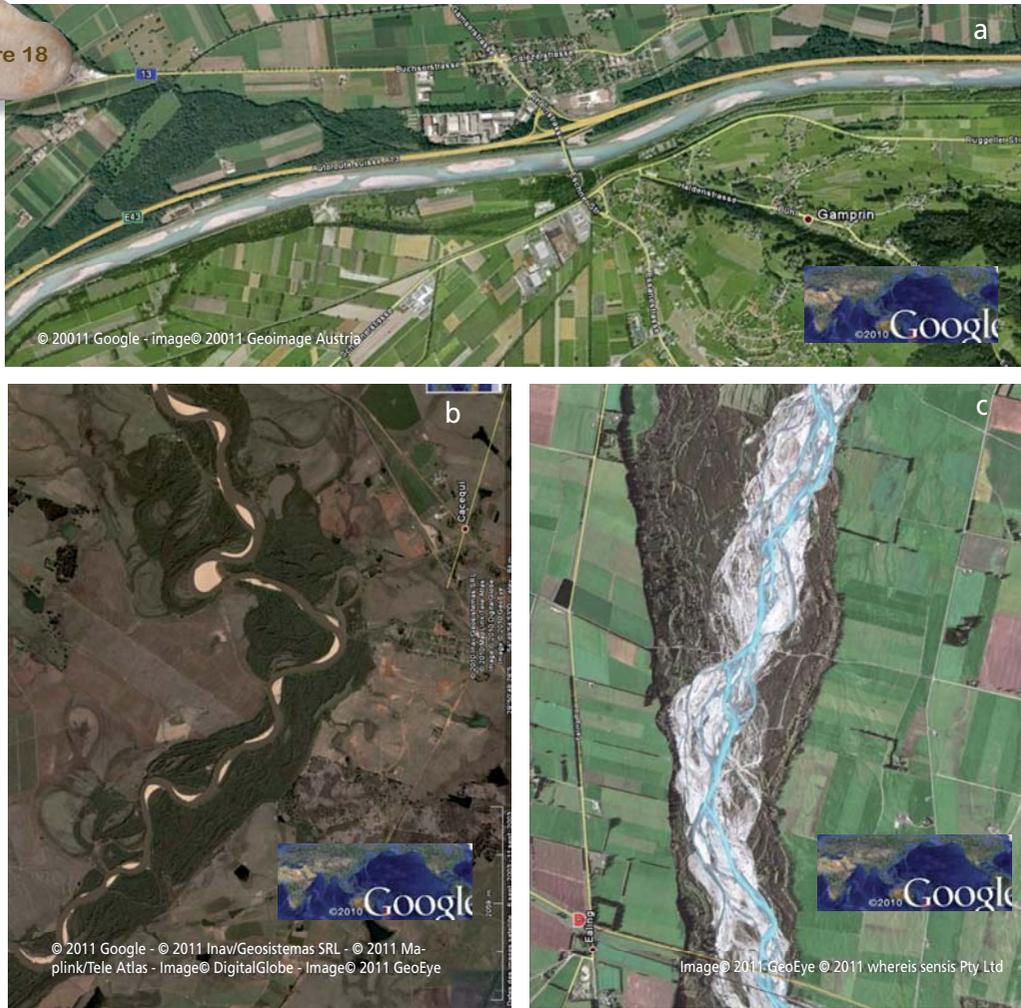
a- b © J.R. Malavoi

Les microformes alluviales : les rides (ripples).

La répartition spatiale des macroformes en transit le long de l'axe fluvial se fait généralement sous forme de bancs alternés. Si les berges ne sont pas stabilisées par des ouvrages de protection, ces bancs alternés se transforment progressivement en sinuosités, voire en méandres. Si les berges sont stables, les bancs alternés restent en l'état. Enfin, si le transport solide est très important et les berges érodables, on observe le développement d'un tressage dans un lit large et peu profond.



Figure 18



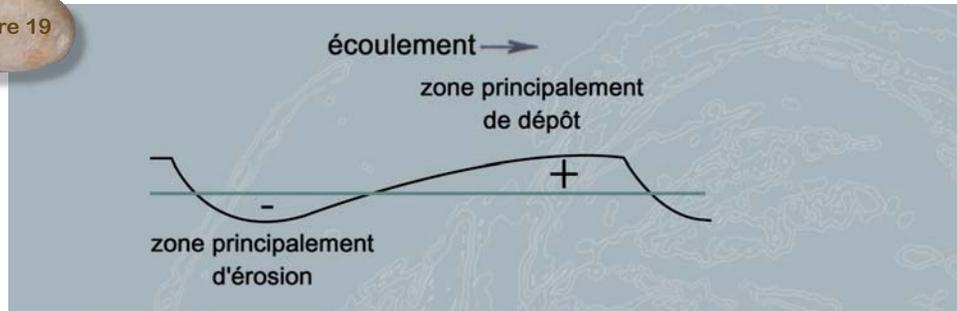
Répartition des macroformes alluviales a) sous forme de bancs alternés si les berges sont protégées, b) sous forme de bancs alternés transformés en bancs de convexité si les berges sont érodables, c) sous forme de bancs coalescents si les apports sont très importants et les berges non cohésives (tressage).

■ Mode de propagation de la charge de fond

Le principe théorique de migration des macroformes (dunes ou bancs) est présenté sur la figure 19.

Dans un contexte d'équilibre dynamique, la dune se propage vers l'aval par érosion de son talus amont, migration des grains ainsi érodés sur « le dos » de la forme, puis glissement de ceux-ci en « avalanche » sur le front raide situé en aval. La contre-pente et le front aval raide, rappelant la forme des dunes éoliennes, sont liés à la rugosité globale du lit qui freine le transit de la dune et provoque cet effet de « compression » mécanique.

Figure 19



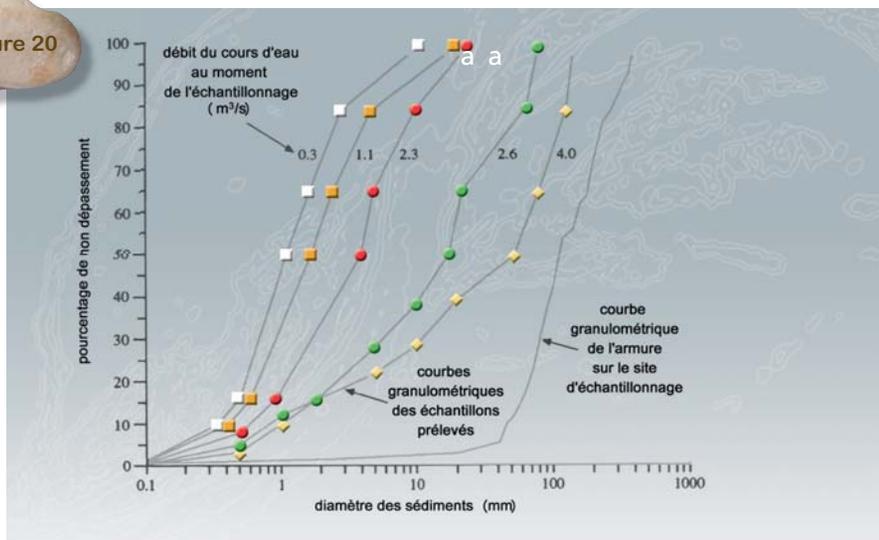
Coupe longitudinale théorique d'une dune en cours de propagation (Yalin, 2001).

■ Fractionnement de la charge de fond

Même s'il est couramment admis que, lors des crues, le transport solide par charriage concerne une grande partie de « l'éventail » sédimentaire disponible au transport, on sait que, en fonction du débit liquide, les courbes granulométriques des matériaux transportés sont différentes (on parle de « compétence » de l'écoulement, liée à la force tractrice τ).

Ce phénomène est bien illustré par la figure 20. On y observe que plus le débit (donc la force tractrice) augmente, plus la taille moyenne des matériaux transportés augmente ($D_{50} = 1 \text{ mm}$ à $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ et 50 mm à $4 \text{ m}^3/\text{s}$). L'étendue granulométrique augmente pour les mêmes raisons (plus de classes de tailles sont en mouvement). On constate aussi que, dans cet exemple, la courbe la plus grossière n'atteint pas les valeurs de la granulométrie en place (courbe la plus à droite sur la figure) qui représente la granulométrie de la couche de surface que l'on nomme **armure** (Figure 22), beaucoup plus grossière que les alluvions transportées car liée à un processus de tri sélectif. Ceci explique pourquoi, en fonction des crues et des conditions géomorpho-

Figure 20



Evolution de la granulométrie des alluvions transportées en fonction du débit (Bathurst, 1987).

logiques locales, la granulométrie des macroformes peut être différente (dans l'espace et dans le temps). On peut ainsi observer par exemple des macroformes constituées de pierres fines et graviers (nomenclature de Wentworth) en train de migrer sur des macroformes constituées de gros éléments (pierre grossières, blocs) en surface. Cela signifie que la crue précédente a eu une compétence suffisante pour transporter des pierres fines (venant de l'amont, des berges, des affluents etc.) mais insuffisante pour briser l'armure de pierres grossières de la macroforme sous-jacente (Figure 21).

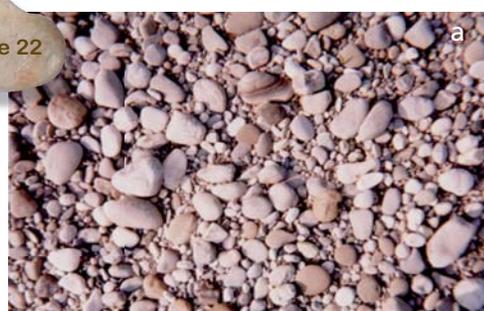
Figure 21



© N. Landon

Migration d'une dune de cailloux grossiers et fins sur une macroforme préexistante d'une granulométrie beaucoup plus grossière.

Figure 22



a-b © J.R. Malavoi

Exemples d'armure (vues en plan et en coupe). On distingue bien la granulométrie plus grossière en surface que dans l'épaisseur de la macroforme où la matrice sablo-graveleuse est très importante.

■ Vitesse de propagation de la charge de fond

Il est très difficile de mesurer, et plus encore de prédire, la vitesse de propagation de la charge alluviale de fond. Quelques données, telles que celles présentées dans le tableau 1, ont été publiées dans des revues scientifiques ou des rapports de bureaux d'étude. Il s'agit généralement de mesures de vitesses de particules élémentaires alors qu'il **importe plus, en matière de gestion des sédiments, de connaître la vitesse de propagation des macroformes.**



Tableau 1 Quelques données sur la vitesse de propagation des alluvions grossières.

Rivière	Classe granulométrique	Conditions de Q	Durée Q	Distance parcourue	Auteur	Année
Agly	galets	Q1,5 /an	1h30	120 m	BRL	1988
Agly	galets	Q2,4 /an	5h00	310 m	BRL	1988
Verdoble	galets	plusieurs crues dont Q5, Q2, Q4		850 m	Anguenot	1972
				maxi 1800 m		
				en moyenne 10 km/siècle		
Ardennes	30 à 80 mm			en moyenne 3 km/siècle	Petit	1997
Hérault	galets			20 km/siècle	Tricart et Vogt	1967
Isère	galets			10 km/siècle	Salvador	1991

Une publication de Katolikov et Kopaliani (2001), permet de compléter ces données pour ce qui concerne la propagation des bancs latéraux (*side bars*). On constate des valeurs comprises entre 50 et 500 m/an environ, ce qui est dans les ordres de grandeur du tableau 2 (3 à 20 Km/siècle).



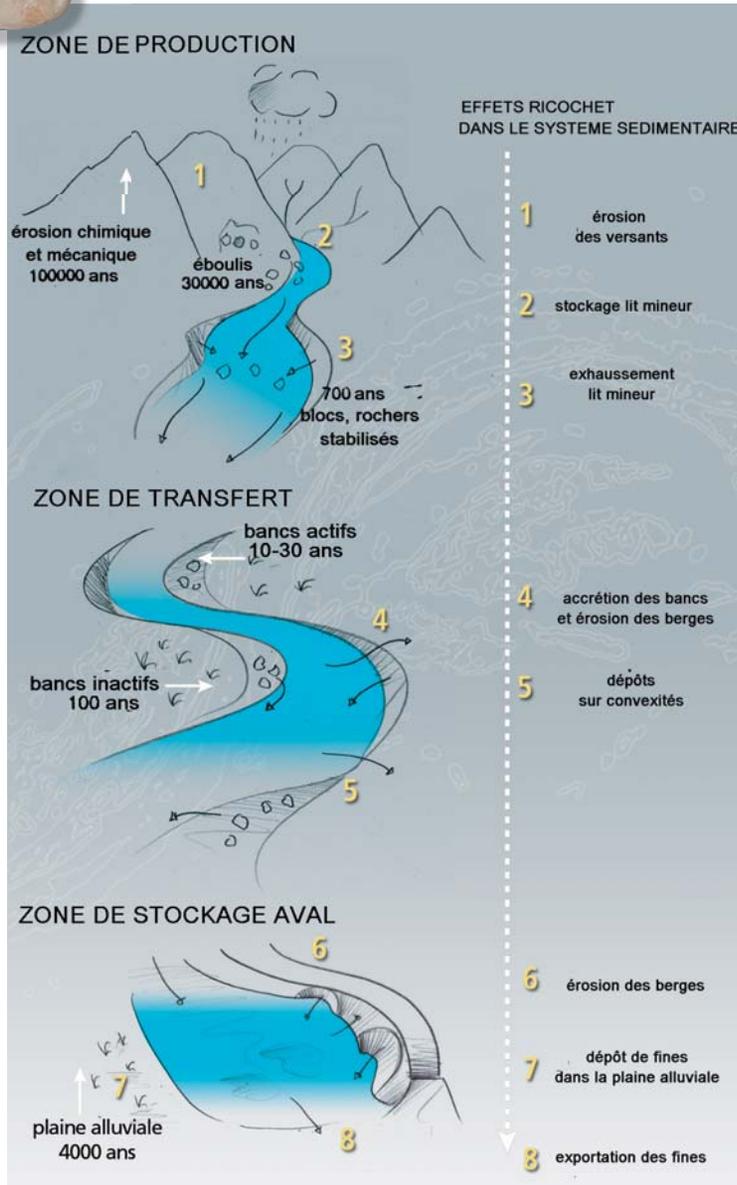
Tableau 2 Quelques données sur la vitesse de propagation des bancs latéraux (in Katolikov et Kopaliani (2001).

Rivière	Vitesse (m/an)	Auteur	Remarques
Garonne	20 - 30	Baumhartén, 1848	
Rhin	270	Popov, 1969	
Aval Strasbourg	500	Yasmund, 1930	209 bancs latéraux entre Bâle et Sonderheim
Mur (Autriche)	100 - 200 (sur 8 mois)	Eksner, 1924	Tronçon canalisé de 7 km. Longueur des bancs alternés = 5/6 fois la largeur du lit à pleins bords
Volga	100 - 200	Popov, 1969	
Amour	200 - 600	Bashkirov, 1956	
Danube	200	Polyakov, 1951	
Vistule	100	Popov, 1969	

■ Stockage temporaire de la charge de fond

La charge de fond en transit peut être plus ou moins longuement stockée lors de son transit vers l'aval. Le concept général est présenté sur la figure 23.

Figure 23



Production, transfert et stockage de la charge de fond (d'après Sear and Newson, 1993). Les chiffres de durée de stockage sont des ordres de grandeur.

Le stockage « naturel »

Le cas le plus évident de stockage naturel des alluvions en transit est celui des bancs et dunes et particulièrement des bancs de convexité.

Sur la partie active des bancs, le stockage n'est que temporaire (quelques mois ou années) et les matériaux sont fréquemment remaniés et emportés vers l'aval par les processus de transport solide évoqués ci-dessus. Sur la partie interne des bancs, la végétation se développe progressivement, au fur et à mesure que la berge concave opposée s'érode et que le méandre migre latéralement et vers l'aval. Cette végétalisation, ainsi que l'éloignement progressif de la zone à fortes vitesses, limitent les processus de transport solide. Les sédiments,

plus ou moins végétalisés, sont alors stockés (de quelques années à plusieurs dizaines d'années) jusqu'à ce que le méandre situé en amont translate vers l'aval et reprenne, par érosion latérale, les matériaux stockés (Figure 24) ou qu'il se recoupe (recouplement par déversement).

Notons que, plus la rivière est active, moins le stockage est long car la translation des méandres vers l'aval mobilise très vite, par érosion latérale, les parties de bancs qui se sont végétalisées (Figure 24 a).

Ces mêmes concepts de stockage temporaire et de plus longue durée sont applicables aux rivières en tresses où, là encore, l'effet de la végétalisation des macroformes dans les processus de stockage de longue durée est prépondérant (Figure 24 b).



Exemples de stockage naturel des alluvions grossières en transit (bancs de convexité, zones d'élargissement brutal, portion végétalisées des lits en tresses, etc.).

Le stockage « artificiel »

Il est admis que la grande majorité des barrages à long temps de séjour (généralement hauts et de volume important) bloquent intégralement et définitivement la charge solide de fond. C'est pour cette raison que l'on observe généralement une érosion progressive intense en aval de ces ouvrages. On observe aussi des stockages de plus ou moins longue durée en amont d'ouvrages de faible hauteur ainsi qu'en amont d'ouvrages de franchissement ou encore dans d'anciennes fosses d'extraction en lit mineur, voire dans des gravières en lit majeur ayant « capturé » le cours d'eau.

Il s'agit là d'un stockage temporaire dont la durée, du fait des « aménagements », dépasse largement la durée « normale » de stockage dans des conditions naturelles d'écoulement.

Le détail de ces processus d'altération du transit sédimentaire est présenté dans un autre chapitre.

Échantillonnage et mesure du transport solide

Les principes, méthodes, protocoles de mesure du transport solide et de la granulométrie des formes fluviales sont fonction des attendus de l'étude :

- s'il s'agit d'une « simple » connaissance générale des processus ou d'un diagnostic sommaire d'état du fonctionnement hydrosédimentaire, on pourra se contenter d'analyses visuelles simplifiées, de photographies, etc. ;
- si l'on a besoin d'informations plus précises, notamment pour alimenter des formules ou des modèles de transport solide impliquant des calculs basés sur des **diamètres caractéristiques**, il sera nécessaire de procéder à des mesures granulométriques en différents points du réseau hydrographique concerné ;
- si l'on souhaite une connaissance quantitative des volumes réellement transportés par un cours d'eau, notamment dans un objectif de gestion optimale du transport solide, ou de calage de formules et modèles de transports solide, il pourra être nécessaire de réaliser des échantillonnages en période de transport solide, c'est à dire en crue. On peut aussi envisager de construire des pièges à sédiments.

Il existe donc une gamme très étendue de besoins et une palette tout aussi étendue de techniques d'échantillonnage et de mesure dont le coût peut varier dans un rapport de 1 à 100.

Nous n'entrerons pas ici dans le détail de toutes les méthodes et techniques existantes mais donnerons quelques éléments permettant de faire le choix le plus approprié à l'objectif de l'étude.

■ Mesure du transport solide de fond

Les méthodes de mesure de la charge de fond sont les suivantes :

- pièges à sédiments ;
- comparaisons de mesures topo-bathymétriques ;
- chaînes d'érosion ;
- échantillonnage par préleveur de fond.

Pièges à sédiments

Le principe consiste à mesurer les dépôts sédimentaires dans un secteur dont on sait qu'il piège totalement la charge de fond. L'objectif n'est pas de caler précisément des « modèles » de transport solide car les conditions d'écoulement dans ce type de milieu sont très différentes des conditions naturelles. Par contre, ce piégeage permet de connaître les apports solides en un point, leur volume, leur granulométrie.

1- Structures existantes

Parmi les pièges « existants » (c'est à dire non créés dans un objectif de mesures), trois types sont particulièrement intéressants :

- les barrages de haute chute ;
- les anciennes fosses d'extraction larges et profondes en lit mineur ;
- les plages de dépôt à vocation de piégeage de la charge de fond dans un objectif de gestion.

Dans ces 3 cas, il suffit de réaliser un lever topo-bathymétrique régulier pour obtenir des valeurs précises des volumes de matériaux piégés. Quelques mesures granulométriques fournissent les caractéristiques des sédiments transportés (déposés).

2- Structures à construire

Le principe le plus simple est celui de la « fosse de piégeage ». On creuse dans le lit mineur une fosse d'un volume équivalent à 1 ou 2 ans d'apports solides calculés au moyen des équations « classiques », dans un secteur où le piégeage temporaire de la charge ne risque pas de générer de désordres géodynamiques. En effet, même si l'on vide régulièrement la fosse (après chaque crue par exemple), il est possible que l'érosion progressive engendrée par le piégeage se propage très vite vers l'aval, même durant l'épisode de crue. Il faut donc trouver un

site où il n'y a pas d'enjeu socio-économique majeur dans les premiers kilomètres en aval de la fosse (pont, puits de captage, digues, protections de berges protégeant des enjeux importants).

On mesure régulièrement la topographie et on cure régulièrement la fosse à sa cote d'origine. On réalise des mesures granulométriques.

Le problème est que ce type de structure laisse généralement passer une partie plus ou moins importante de la charge de fond et l'on obtient donc la fourchette basse des volumes transportés.

Comparaison de mesures topo-bathymétriques

Le principe consiste à suivre régulièrement la topographie du lit moyen d'un secteur représentatif.

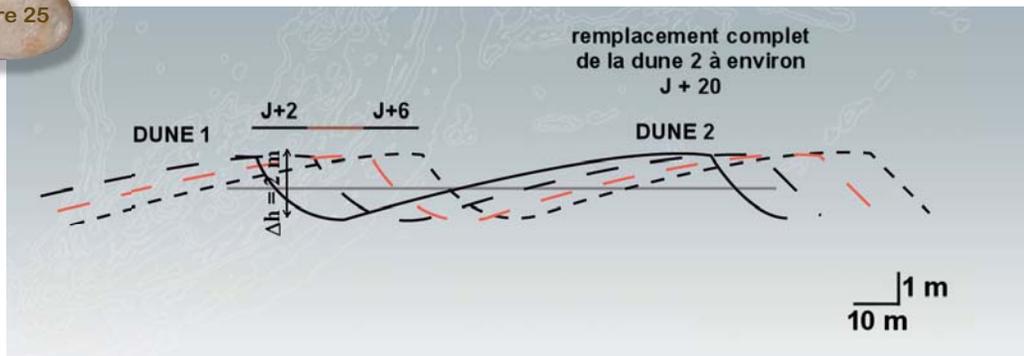
Si l'on admet comme réaliste le mode de propagation des sédiments par dune ou banc, alors le simple suivi de la propagation du front de dune et la mesure du Δh (variation de la hauteur) moyen entre la crête (front) de la dune amont et le creux du « dos » de la dune aval (s'il y en a une, ou du fond moyen du lit s'il n'y en a pas) suffit pour connaître le débit solide ou la capacité de charriage du cours d'eau dans ce secteur.

Celui-ci est en effet égal à Δh (en m) x largeur du front de dune (en m) x distance de propagation de la dune (en m) pour le pas de temps mesuré (jour, année etc.). Le débit solide est alors exprimé en $m^3/jour$, /an, etc.

Nous avons pris un exemple théorique basé sur les vitesses maximales de propagation des dunes mesurées par Babonaux sur la Loire : 10 à 11m/jour sous une vitesse moyenne d'écoulement de 1m/s. Le Δh maximal théorique entre le sommet de la dune amont et le creux de la dune aval est ici de 2 m.

Le débit solide « théorique » sur 6 jours est donc de 2 m (Δh) x 100 m (largeur du front de dune) x 60 m (distance de propagation en 6 jours) = 12 000 m^3 ou 2 000 m^3/j . Voir Figure 25.

Figure 25



Mesures topographiques permettant de suivre la propagation d'une dune et d'en déduire le débit solide.

L'idéal serait d'obtenir ces valeurs pour :

- un événement d'intensité donnée (crue annuelle, biennale, décennale etc.) ;
- une année complète

⇒ dans ce cas le problème réside dans la localisation du front de la même dune sur 1 an, étant admis que sur cette durée, une dune (voire plusieurs) peut en remplacer une autre sur le même site,

⇒ il est alors peut être plus simple et plus pertinent de mesurer la vitesse de propagation d'un front de dune pour plusieurs débits et d'extrapoler ensuite à toute l'année par la courbe des débits classés.

Chaines d'érosion

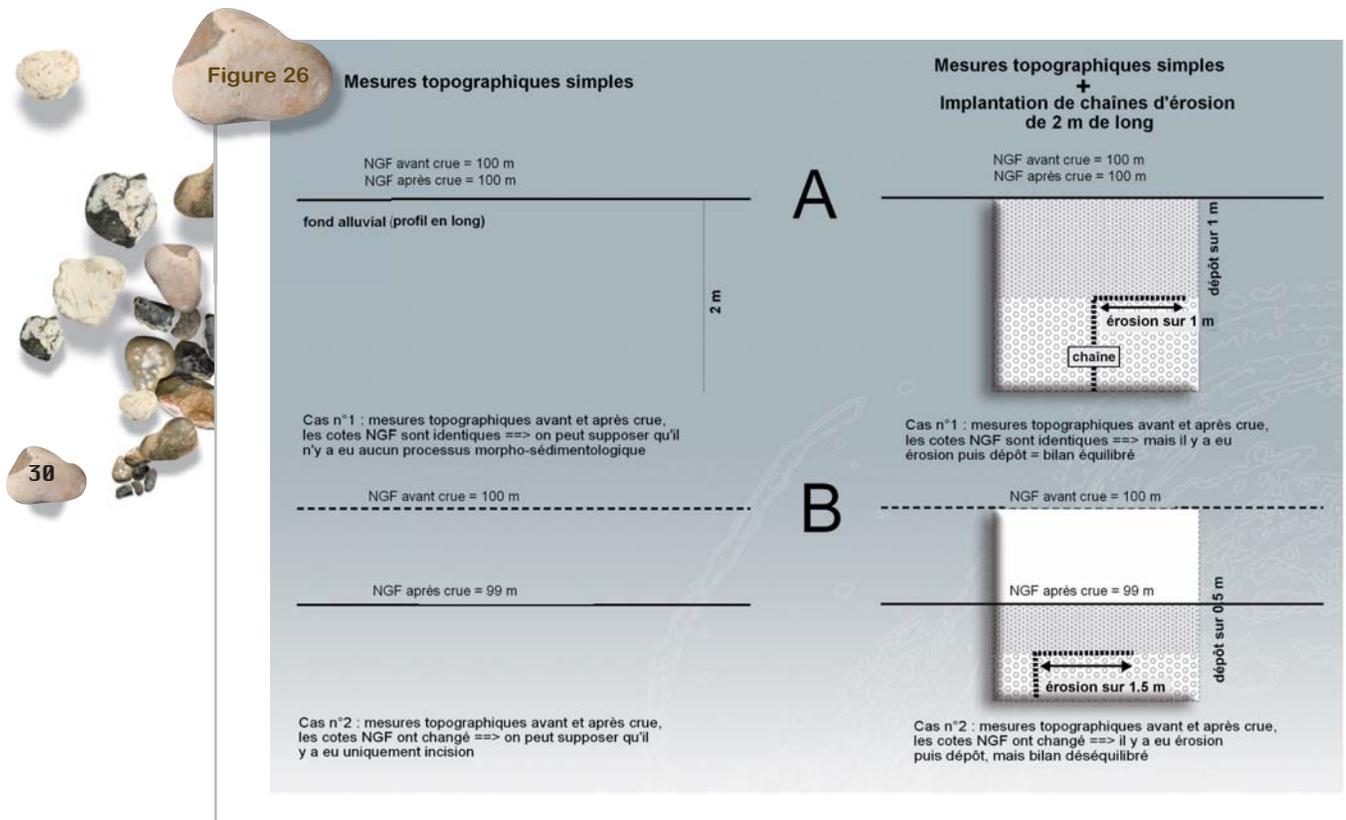
1- Principes de la méthode

Le principe consiste à faire pénétrer dans le plancher alluvial, sur environ 2 m de profondeur (il faut en fait mesurer le Δh maximal et ajouter environ 1 m), des chaînes métalliques dont les maillons font environ 1 cm de diamètre. Ces chaînes sont repérées en x,y,z (par exemple au moyen d'un GPS différentiel) puis sont relevées, en fonction de l'objet de la recherche, après une crue, n crues, une année complète etc.

Par rapport à une simple comparaison de données topographiques, cette méthode offre l'intérêt de fournir des éléments de compréhension des processus d'érosion/dépôt s'étant produits entre les deux campagnes de mesure.

La figure 26 montre qu'avec de simples mesures topographiques, on a une image tronquée des processus :

- en A, on peut imaginer, sans application de la méthode de la chaîne, qu'il n'y a eu aucun mouvement : stabilité des fonds ? Avec la chaîne, on sait que l'on a eu une érosion du fond sur 1 m et un remblaiement sur la même épaisseur. Le bilan local est toujours équilibré mais on saisit mieux les processus d'équilibrage sédimentaire ;
- en B, on sait que l'on a eu un abaissement du fond sur 1 m dans les 2 cas, mais avec la chaîne on comprend que l'incision a été plus intense que la simple différence de cote (1,5 m et non 1 m) et qu'elle a été en partie compensée par un dépôt.

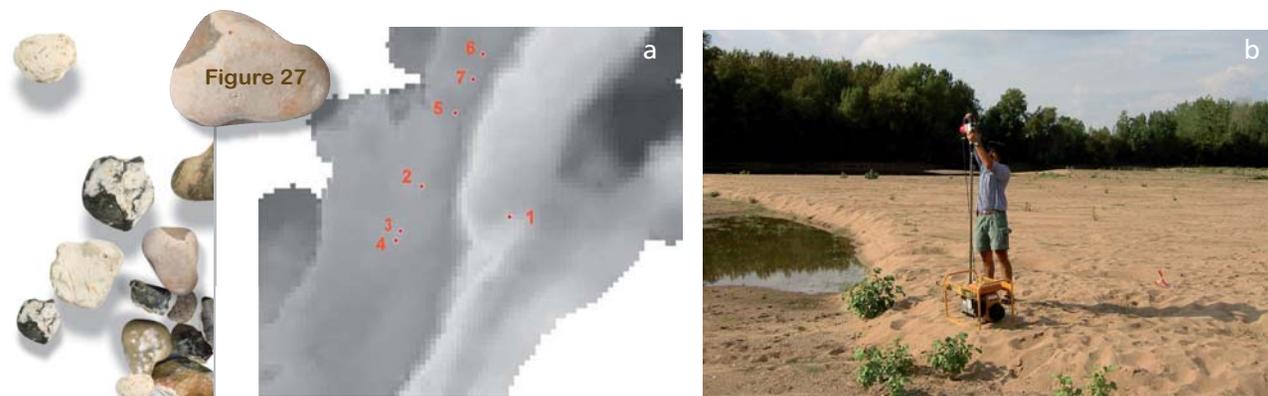


La méthode de la « chaîne d'érosion » (d'après Laronne et Carson, 1976).

2- Application au suivi de la propagation d'une dune

Si l'on reprend le même exemple que dans la figure 25 on constate que l'utilisation de chaînes d'érosion disposées dans l'axe longitudinal permet un meilleur décryptage de l'évolution (Figure 27).

La figure 27 et le tableau 3 présentent le résultat de mesures de chaînes d'érosion sur un bras secondaire de la Loire. Les chaînes ont été laissées 1 an sur site.



Exemple de mise en œuvre de chaînes d'érosion sur la Loire (a) localisation des chaînes sur un fond MNT du site (b) photo du site b (Malavoi 2003).

b © J.R. Malavoi

Tableau 3

Résultats des chaînes d'érosion à Ingrandes (Malavoi, 2003).

Numéro d'implantation	Z1 (terrain 09/02)	Z2 (terrain 09/03)	delta Z (Z2-Z1)	Z3 (coude chaîne 09/03)	épaisseur décapée (Z1-Z3)	épaisseur déposée (Z1-Z3)
1	11,37	10,77	-0,60	10,5	0,87	0,27
2	8,17	7,9	-0,27	7,17	1,00	0,73
3	8,40	8,41	0,01	7,35	1,05	1,06
4	8,16	8,57	0,41	7,52	0,64	1,05
5	8,65	8,2				
6	8,56	8,2	-0,36	7,81	0,75	0,39
7	8,36					

Au point 1 (chaîne 1) à J+1 an on mesure une altitude plus basse de 0,6 m. Mais on sait qu'il y a eu un décapage de 0,87 m et un dépôt de 0,27 m.

Au point 3 (chaîne 3) à J+1 an on mesure la même cote d'altitude mais il y a eu sensiblement 1 m d'érosion et 1 m de dépôt.

En réalité on mesure ici le **bilan sur 1 an** des processus d'érosion/dépôt mais on n'a pas le détail précis de l'évolution.

Si l'on prend la chaîne 3, il est tout à fait possible d'imaginer qu'il y ait eu 0,5 m de dépôt initial (lors d'une première crue), puis 1 m de décapage (lors d'une deuxième crue ou à la fin de la première), puis à nouveau un dépôt (lors d'un 3^{ème} événement, etc.). Pour obtenir une connaissance plus détaillée, il faudrait réaliser ces mesures après chaque crue par exemple.

Le calcul du débit solide reste le même que pour les mesures topographiques.

Le **débit solide annuel charrié** a ainsi été estimé de cette façon sur ce bras à environ **16 000 m³** : distance de progradation du front de dune sur 1 an (100 m), largeur de la dune (200 m), épaisseur moyenne active (0,8 m).

Echantillonneurs

Depuis près de 50 ans, de nombreux chercheurs ont tenté de mettre au point des échantillonneurs de charge alluviale de fond. Il en existe aujourd'hui de nombreux types.

1- Helley-Smith

Le plus connu et le plus utilisé dans le monde est le préleveur Helley-Smith dont il existe plusieurs modèles, fonction notamment de la granulométrie des sédiments à prélever et des vitesses d'écoulement.

Figure 28



a © tous droits réservés
b © J.R. Malavoi

Exemples d'échantillonneurs Helley-Smith ou dérivés.

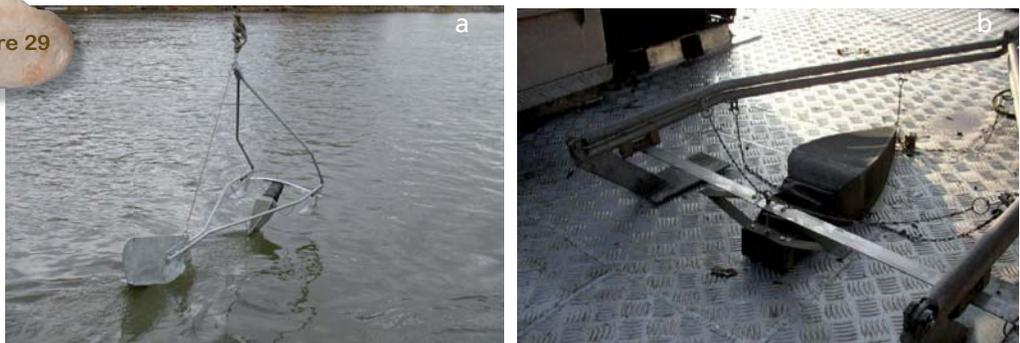
2- BTMA

Un autre préleveur est le *Bedload Transport Meter Arnhem (BTMA)* développé antérieurement à Arnhem, Pays-Bas. Ce modèle de structure plus complexe permet un atterrissage sur le fond du lit mieux maîtrisé. En effet, sa conception permet que la queue de l'appareil se pose en premier ce qui évite les phénomènes d'enfournement. Ensuite le corps de l'appareil se pose et enfin, par un jeu de lamelles métalliques, la « bouche » du préleveur se pose en douceur sur le fond pour éviter un brassage avec mise en suspension de sédiment qui pourrait perturber la mesure. Lors de la remontée de l'appareil, le processus s'inverse évitant à nouveau l'entrée intempestive de matériau dans l'appareil.

L'entrée du préleveur de 8 cm de large par 5 cm de haut en fait un appareil destiné aux **échantillons sablo-graveleux**.

32

Figure 29



a-b © J.N. Gautier

BTMA suspendu lors de mesures en Loire à Souzay-sur-Loire (49) en 2003.

3- Karolyi

Le Karolyi est un appareil développé à l'institut hongrois de Vituki et adapté au matériau plus grossier du fait de son ouverture d'environ 20 cm de large par 10 cm de haut. Son poids lui permet d'être mis en œuvre sur des cours d'eau puissants.

Figure 30



© J.N. Gautier

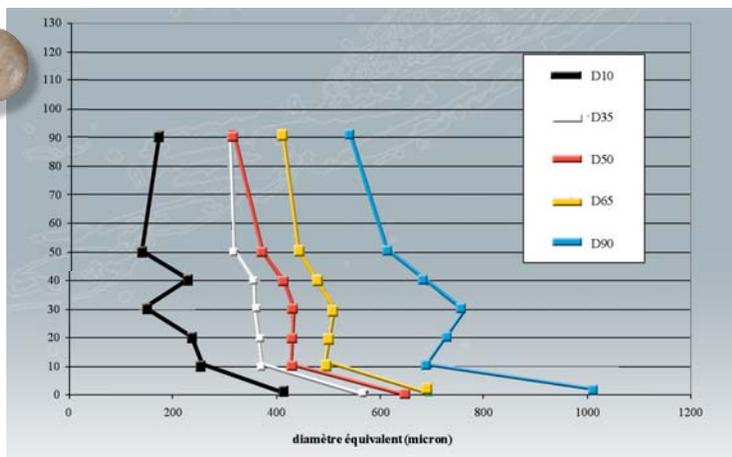
Karolyi mis en œuvre lors de mesures à Souzay-sur-Loire en 2003.

4- Bouteille de Delft

En complément des mesures du transport par charriage réalisables avec les appareils ci-dessus, il est nécessaire de mesurer le transport solide par saltation. En effet, le matériau ainsi transporté contribue par moment au transport par charriage.

La figure 31, obtenue à partir de mesures dans la Loire, met en évidence la granulométrie grossière du charriage sur le fond, une granulométrie plus ou moins homogène pour les profondeurs comprise entre 10 cm et 40 cm au dessus du fond correspondant au transport par saltation, et une granulométrie plus fine pour les mesures à 50 cm et 90 cm au-dessus du fond et correspondant à la suspension.

Figure 31



Granulométrie transportée par l'écoulement à différentes hauteurs par rapport au fond du lit mineur (Peters, 2003).

Les mesures du matériau transporté à proximité du fond peuvent être réalisées par la « bouteille de Delft sur chariot » qui permet une mesure avec une grande précision de la position au-dessus du fond. En effet, le cadre qui supporte la bouteille repose sur le fond et la hauteur de l'embout peut ainsi être réglée précisément entre 0,05m et 0,5m au dessus du fond. Il est adapté aux cours d'eau dont les alluvions sont composées de sables et graviers fins. La conception de l'appareil ne lui permet pas de prélever les matériaux plus fins que le sable (limons et argile).

Le corps de l'échantillonneur est composé d'une chambre profilée, dont l'intérieur est conçu comme un labyrinthe par lequel transite le mélange eau/sédiment. Les particules plus grosses que les limons s'y déposent suite à la diminution progressive de la puissance de l'écoulement. L'appareil est conçu de façon à ce que l'écoulement – et le transport des matériaux solides – ne soient pas perturbés à l'endroit de prélèvement de l'échantillon. Actuellement, l'échantillonneur « Bouteille de Delft » est un des seuls appareils à répondre à ces contraintes.



Figure 32

© S. Rodrigues

Bouteille de Delft sur chariot pour la mesure du transport solide à proximité du fond.

D'autres échantillonneurs existent, basés sur les mêmes objectifs : échantillonner par petites placettes des portions de la charge en transit de fond et à proximité afin de connaître les granularités du matériau transporté en lien avec les processus de transport, et si possible in fine établir des courbes $Q_s = f(Q)$.

Quel que soit le type d'échantillonneur utilisé, ce principe de mesure de la charge de fond en transit pose de nombreux problèmes :

- il est très intrusif car il modifie les conditions réelles d'écoulement et de transport ;
- seule une petite partie de l'écoulement liquide et du transport solide est échantillonnée, et le risque est grand d'avoir une vision erronée des phénomènes ; cependant, diverses expériences sur des grands fleuves du monde ont permis de vérifier que de telles mesures pouvaient être pertinentes, notamment si elles sont comprises dans un ensemble de mesures de l'évolution de la morphologie du site et des écoulements ; en effet, en répétant des mesures sur un même site ou en comparant les résultats sur différents sites le long d'un cours d'eau, les données étaient cohérentes entre elles ;
- suivant le lieu de mesure (généralement un transect perpendiculaire à l'écoulement général), on peut ne rien mesurer (par exemple sur la Loire si la mesure se fait sur une journée et que l'on est à plus de 10 m en aval du front d'une dune) ou mesurer un transport très important (si l'on est dans la zone de progradation journalière de la dune). Une bonne stratégie d'échantillonnage et un positionnement adéquat des points de mesures sont donc fondamentaux.

5- Exemples de protocole d'échantillonnage

a- 1^{er} exemple

Mesures de transport solide (sur plusieurs débits compris entre 30 et 120 % du débit de pleins bords) (Bakke *et al.*, 1999) :

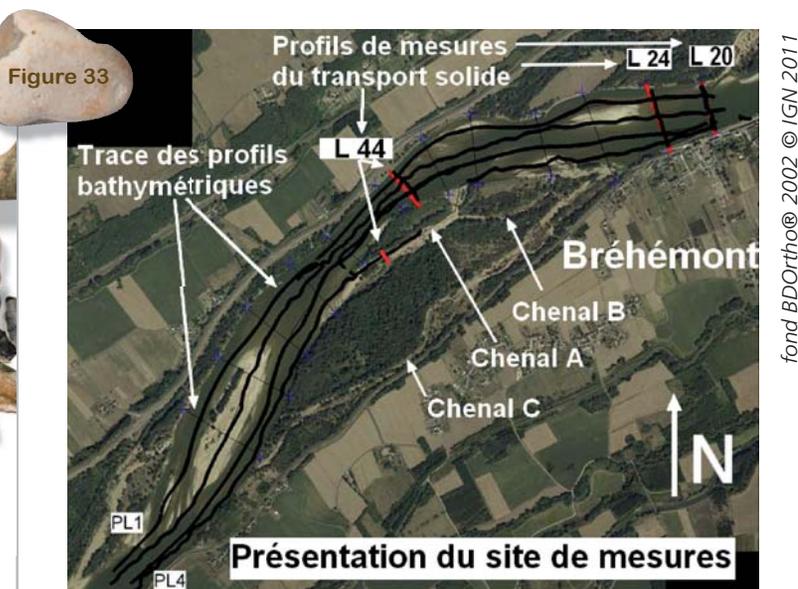
- échantillonnage du transport solide au moyen d'un échantillonneur Helley-Smith ;
- se placer dans une section rectiligne avec peu d'irrégularités de forme ;
- la portion « active » du lit mineur est divisée en n cellules homogènes et représentatives ($f(\text{largeur})$) du profil en travers, en évitant les courants de retour et les eaux mortes ;
- l'échantillonneur est placé au fond pendant 1 mn dans chaque cellule et 4 passages sont effectués sur chaque profil. La durée totale d'échantillonnage = n (cellules) x 1 mn ;
- au laboratoire, les échantillons sont séchés puis cuits à 400°C pour détruire la matière organique ; chacun est ensuite analysé individuellement avec pesage de chaque fraction granulométrique ; les mailles utilisées sont celles de Wentworth à progression géométrique de raison 2 (en mm) :

↔ 0,25 – 0,5 – 1 – 2 – 4 – 8 – 16 – 32 – 64 – 128 – 256

b- 2^{ème} exemple

En mars 2007, une campagne de mesures du transport solide de la Loire en aval de Tours (commune de Bréhémont) a eu lieu. Elle avait pour objectif d'estimer le transport solide de la charge de fond pour un certain débit et d'avoir une première indication de sa répartition au niveau d'une diffluence.

Trois sections en travers ont fait l'objet de mesures. Elles ont été choisies en fonction de la régularité de leur profil en travers, vérifié avant la mesure du transport solide par une mesure bathymétrique à l'Acoustic doppler current profiler (ADCP).



Plan de situation des profils de mesures sur la Loire à Bréhémont.

Sur chaque verticale, ont été mesurés :

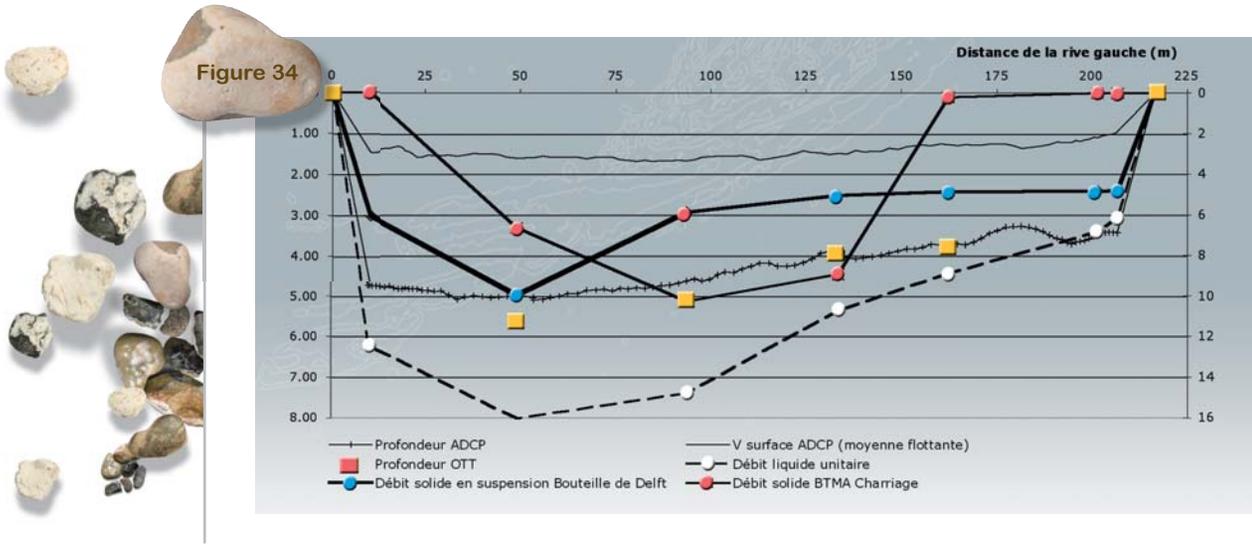
- le profil vertical des vitesses au moulinet ;
- le transport solide en suspension avec la bouteille de Delft suspendue à un câble aux mêmes profondeurs que celles du profil des vitesses. Chaque prélèvement était réalisé sur 300 secondes ;
- le transport solide à proximité du fond avec la bouteille de Delft sur chariot (ou cadre) à 10cm, 20cm, 30cm, 40cm et 50cm au-dessus du fond ; la durée de prélèvement est aussi de 300 secondes ;
- le transport solide par charriage au BTMA ; la durée de prélèvement est de 2mn en moyenne. Si le transport est fort, la durée est réduite du fait du remplissage rapide du réceptacle et inversement en cas de transport faible. 4 prélèvements étaient réalisés par verticale ;
- la granulométrie du fond, deux prélèvements au droit de chaque verticale.

Le protocole initial fixait un nombre de 8 verticales par profil en travers de 175m à 350m de large. Cependant, lors des mesures, la régularité du profil en travers et des formes fluviales (bancs,...) ont permis de réduire le nombre de verticales à 5, voire 4 le dernier jour.

Outre les mesures directement liées au transport solide, des mesures complémentaires pour connaître l'environnement hydrosédimentaire ont été menées :

- mesures à l'ADCP pour connaître le débit au moment des mesures. Ces mesures ont aussi servi à la localisation des verticales dans le profil en travers ;
- mesures bathymétriques suivant 5 profils en long et de nombreux profils en travers réalisés au sondeur monofaisceau ;
- mesures aux flotteurs pour connaître les lignes de courant ;
- mesures de la ligne d'eau sur les deux berges, et si possible dans l'axe du chenal, en de nombreux points (environ tous les 250m) afin de mesurer toutes les ruptures de pente longitudinale de la ligne d'eau ainsi que les pentes transversales.

La mise en œuvre de ce protocole, permettant une vision globale et cohérente des processus, met en évidence sur la figure 34 que la distribution transversale du charriage et de la suspension sont différentes.



Débites solides unitaires calculés à partir des verticales de mesures réparties sur la section L20 (Peters, 2003).

D'un côté, la distribution de la charge en suspension est relativement homogène sur la section et varie avec la vitesse de surface. D'un autre côté, les débits solides par charriage les plus importants sont constatés dans la partie centrale de la section. Ces données révèlent la présence d'un axe de charriage central.

Le débit liquide jaugé était de l'ordre de 1 200 m³/s et le transport solide de 1 300 m³/j, soit 0,015 m³ de sable et gravier par m³ d'eau.

L'analyse des mesures sur les 3 profils en travers (Tableau 4) montre que les taux de transport par charriage atteignent environ 20 % dans deux sections et même 40 % dans la section L20. Paradoxalement le taux de transport solide le plus élevé correspond au débit liquide le plus faible ce qui est peut-être dû à des réajustements morphologiques à la décrue ou au phénomène d'hystérèse entre le débit solide et le débit liquide.

Tableau 4

Estimation des flux solides sur la Loire lors d'une campagne de mesure du charriage et de la suspension (Peters, 2003).

Section - date	Débit liquide (m ³ /j)	Débit solide en suspension (m ³ /j)	Débit solide par charriage (m ³ /j)	Débit solide total (m ³ /j)	Pourcentage de charriage %
L24 - 08/03/07	1709	4145	862	5007	17
L44 - 09/03/07	1375	1246	243	1489	16
Chenal A - 09/03/07	51	20	40	60	66
L44 complet	1426	1266	283	1549	18
L20 - 10/03/07	1096	1295	1025	2320	44

Dans certaines conditions, il est possible de réaliser des mesures indirectes grâce à la mise en évidence de relations entre la concentration du solide et le signal produit par un appareil mesurant un phénomène lié à cette concentration. Le système le plus ancien utilise l'absorption de lumière par les solides en suspension.

D'autres techniques de mesure indirecte utilisent des rayonnements radars ou des ultrasons, ou mesurent la fréquence de vibration d'un tube dans lequel passe le fluide chargé de sédiment. L'appareil ASTM (*Acoustic sand transport meter*) est un exemple d'appareil développé pour la mesure indirecte du transport de sable par rayons ultrasoniques avec l'effet Doppler.

Une mesure indirecte peut donner lieu à des erreurs significatives lorsque la distribution granulométrique ou la composition du sédiment varient fortement dans le temps. Par contre, une méthode indirecte permet d'observer les fluctuations relatives et de trouver la valeur moyenne de la concentration en solides. Cette fluctuation de la concentration dans le temps est une cause d'incertitude lors de la mesure directe avec un échantillonneur immergé prélevant de façon quasi-instantanée un volume petit et peu représentatif, d'autant plus si les fluctuations de la concentration et de la composition du solide sont importantes. En général, la méthode indirecte est recommandée lorsque la charge sédimentaire en suspension est composée de particules très fines, des limons ou argiles (sans particules plus grossières que le limon), et lorsque la concentration en solides ne varie pas trop.

■ Mesure de la granulométrie des alluvions

Caractériser la granulométrie d'un lit fluvial est un exercice très difficile pour de nombreuses raisons :

- dans la plupart des cours d'eau et particulièrement sur les cours d'eau à charge grossière, l'étendue granulométrique des sédiments disponibles au transport, et par conséquent au dépôt, est très grande. Une des conséquences en est que les dépôts alluvionnaires ont tendance à présenter une structure verticalement stratifiée, même ceux générés par un seul épisode hydrologique (dépôts monogéniques). On distingue généralement deux « strates » majeures : l'**armure** (parfois le **pavage**) et la **sous-couche**. Il apparaît cependant que la stratification dans l'épaisseur des sédiments déposés est notablement plus complexe et qu'il **existe souvent une stratification multiple sur l'épaisseur de sédiments mis en mouvements par les crues** ;

- les unités d'érosion/transit/dépôt de la charge alluviale, que nous nommons unités morphodynamiques (chenaux principaux et chenaux secondaires, dunes, grèves et bancs divers, bourrelets de berges etc.), sont très variées. Or ces unités présentent des conditions hydrauliques (vitesse, profondeur, force tractrice, turbulence de l'écoulement) elles aussi très variées dans l'espace et dans le temps, qui permettent ou non la mobilisation, le transit ou le dépôt des différentes fractions du très large spectre granulométrique global. Il s'ensuit un « **patchwork** » granulométrique à l'échelle spatiale qui induit de grandes difficultés pour une stratification objective de l'échantillonnage ;

- enfin, la modélisation des processus d'érosion/transport/dépôt de la charge solide (de fond ou en suspension) est encore entachée d'un grand nombre de biais, liés entre autres à l'extrême sensibilité de certains paramètres impliqués dans les équations « classiques », dont par exemple le « diamètre représentatif ». Ces différents problèmes nous ont amenés à rechercher dans la bibliographie les éléments techniques permettant de les résoudre ou du moins de mieux en comprendre les causes.

Concepts d'armure et de pavage

De nombreux auteurs anglo-saxons ont depuis longtemps introduit le concept de stratification d'un lit fluvial mobile.

Ils y distinguent une **surface armurée** (avec de nombreuses manières de la nommer : *armor layer*, *armouring*, *armoured bed*, etc.) et une couche sous-jacente la **sous-couche** (*subsurface*).

Ils distinguent généralement cette couche armurée du **pavage** (qu'ils nomment *bed pavement*, *paved bed*, etc.).

La plupart des chercheurs, malgré quelques différences d'ordre terminologique, semblent d'accord aujourd'hui sur les mécanismes de formation de l'armure et du pavage : les alluvions des rivières sont généralement composées d'un matériel de granulométrie non uniforme, souvent très étendue. Quand ces sédiments sont soumis à certaines gammes de vitesses de courant, les éléments fins à moyens sont mis en mouvement tandis que les plus gros restent en place. Si cette ségrégation des particules dure assez longtemps, cela peut aboutir à la concentration d'éléments grossiers à la surface du lit.

Cette accumulation stable et protégeant temporairement les couches sous-jacentes est appelée **armure**. Poussé à l'extrême, le même processus aboutit à un **pavage**, d'une stabilité beaucoup plus durable.

Les définitions suivantes sont celles proposées par Bray et Church (1980).

■ **L'armure** : l'armure peut être définie comme une couche de surface grossière, résultat de l'exportation des éléments fins pendant et après chaque période de mouvement de tout ou partie de l'éventail granulométrique disponible au transport. Elle est donc remaniée par des phases épisodiques de transport de charge de fond au cours desquelles toutes les classes granulométriques sont actives. Pour la plupart des auteurs, le remaniement de cette couche de surface est un événement fréquent, qui se produit au moins quelques jours par an. D'autres auteurs indiquent que le débit critique de remaniement de l'armure est celui de la crue de fréquence annuelle ou biennale. En fait, il est probable que les conditions soient très variables d'un cours d'eau à un autre mais il semble communément admis que **la rupture de l'armure est un événement fréquent**.

■ **Le pavage** : les particules constituant la surface des lits pavés ne sont mises en mouvement que lors d'épisodes hydrologiques exceptionnels (très fortes crues) si toutefois elles sont encore susceptibles d'être mobilisées par le régime hydrologique actuel. Il s'agit du même processus ségrégatif que pour l'armure mais il est plus accentué en raison de conjonctures particulières :

⇒ blocage de la charge de fond par des barrages ou par des retenues naturelles (critère de Kellerhals, 1967),

⇒ réduction des débits de crue qui auraient permis le remaniement du substrat,

⇒ exhumation du fait de l'incision, d'une paléo-surface composée d'éléments dépassant la compétence actuelle de la rivière.

1- L'armure

a- Caractérisation : armure et sous-couche

Le processus d'armurage (et plus encore de pavage) aboutit à une différence de composition granulométrique entre la couche de surface, que l'on appellera « armure », et la couche sous-jacente, que l'on nommera « sous-couche ».

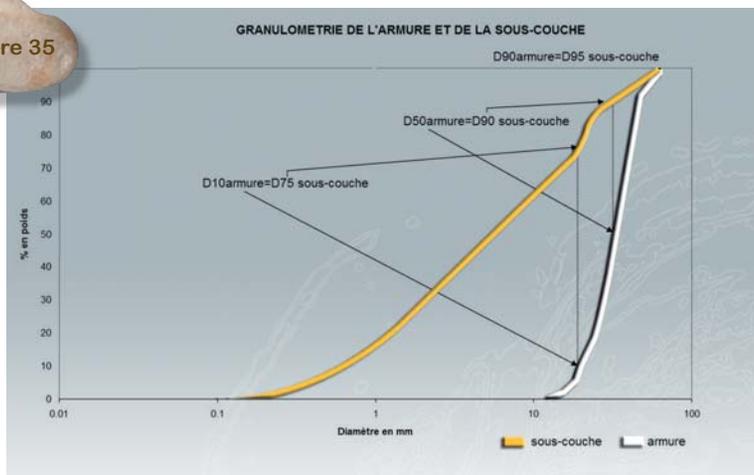
NB La plupart des auteurs considèrent que **la granulométrie de la charge de fond** (celle qui transite par charriage) **est** beaucoup plus proche de **celle de la sous-couche** que de celle de la couche d'armure.

De plus, mais nous y reviendrons, il apparaît que la granulométrie de ces deux entités est l'un des paramètres les plus sensibles de la plupart des modèles numériques de transport solide (Habersack, 1998).

De nombreux auteurs ont recherché s'il existait de fortes corrélations entre la granulométrie de l'armure et celle de la sous-couche et certains ont même avancé des coefficients tout à fait significatifs.

Ainsi Klingeman et Emmet (1982) fournissent une des premières approches de ce type et montrent que la couche d'armure présente généralement un D50 2,5 fois plus gros que celui de la sous-couche (Figure 35).

Figure 35



Courbes granulométriques « fictives » d'une couche d'armure et d'une sous-couche d'un même échantillon (d'après Klingeman et Emmet, 1982).

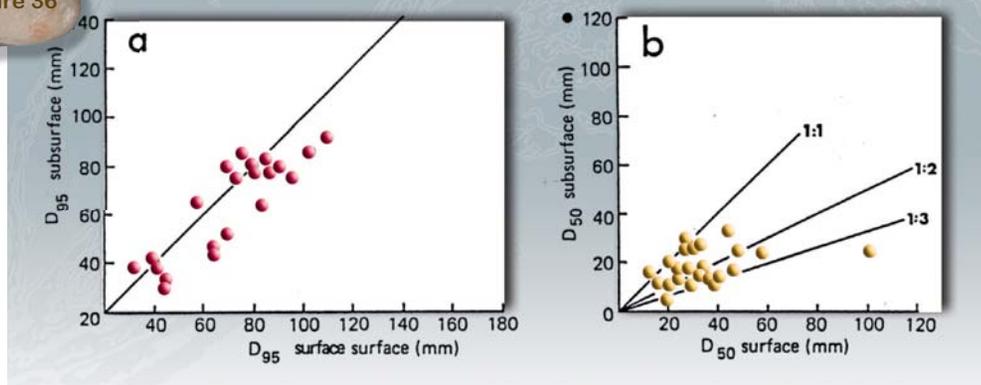
On observe sur cette même figure que le classement est bien meilleur dans l'armure, ce qui est logique car elle est générée par un processus d'élimination d'une importante fraction de la courbe totale, ce qui réduit notablement l'écart-type. Chin *et al.* (1994) démontrent que le classement « limite » d'une armure « mature » correspond à un D_{99a} / D_{50a} de l'ordre de 1,8.

Nous notons aussi plusieurs autres éléments intéressants, notamment vis à vis des problèmes liés à la prédiction de la stabilité verticale d'un lit fluvial. Il apparaît ainsi que, sur cette courbe granulométrique fictive (Figure 35), le D_{1a} (D_1 de l'armure, 1% des éléments sont de taille inférieure) est déjà de l'ordre du D_{65sc} (de la sous-couche), le D_{10a} (10 % des éléments sont de taille inférieure) atteignant le D_{75sc} et le D_{50a} correspondant au D_{90sc} . Par contre, les fractions très grossières (D_{90} et D_{95}) restent assez proches.

Hey et Thorne (1983) présentent des résultats similaires et fournissent l'équation de régression linéaire suivante : $D_{50sc} = D_{50a} \times 0,58$.

Church *et al.* (1987) à partir de données récoltées sur la Fraser en Colombie Britannique, fournissent des résultats de même type (Figure 36), et indiquent des valeurs de rapport D_{50a} / D_{50sc} allant de 1 à 3, mais globalement autour de 2.

Figure 36



Exemples de rapport entre le D_{50} de l'armure et celui de la sous-couche (Church *et al.*, 1987).

Ils soulignent aussi (Figure 36) que les D_{95} (fraction très grossière) des deux strates sont très proches, ce qui semble indiquer que l'on peut au moins approcher le D_{95} de la sous-couche, donc de la fraction la plus grossière de la charge de fond transportée, par le D_{95} de l'armure.

Malgré tout l'intérêt de ce type de démarche, les résultats obtenus, et notamment ces coefficients de passage de l'armure à la sous-couche, semblent difficilement extrapolables, compte tenu de la forte variabilité des conditions sédimentologiques, hydrauliques et hydrologiques à l'origine du processus d'armurage.

L'analyse d'autres articles confirme la difficulté d'appliquer une loi simple pour obtenir la granulométrie de la sous-couche à partir de celle de l'armure.

Ainsi, Bakke *et al.* (1999), calant le modèle de transport solide de Parker et Klingeman, fournissent les données suivantes (Tableau 5), recueillies sur 8 cours d'eau différents.

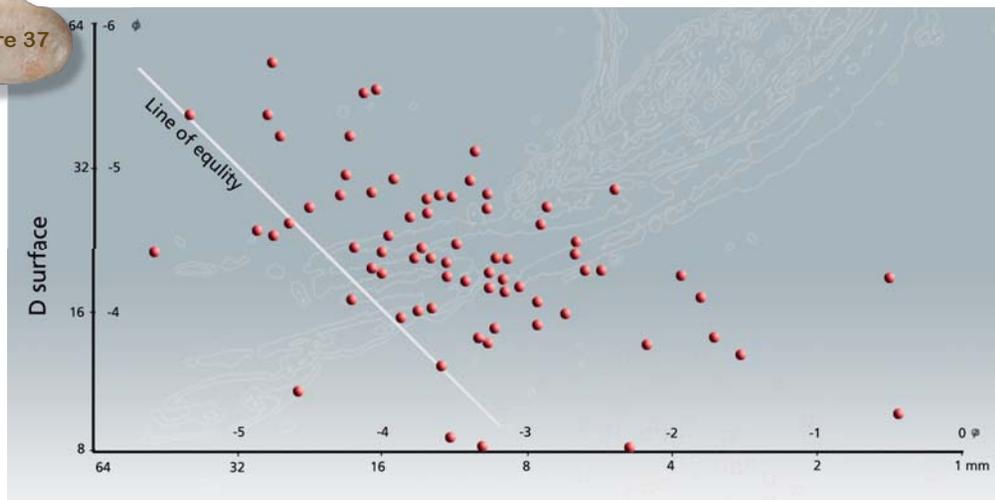


Données granulométriques de calage du modèle de Parker et Klingeman (Bakke *et al.*, 1999).

D50 sous-couche (mm)	D50 armure (mm)	rapport
20	54	2,7
23,3	68,4	2,9
10,3	71,1	6,9
17,8	39,2	2,2
19,7	87,6	4,4
17,8	154	8,7
30,2	86	2,8
9,5	32	3,4
	moyenne	4,3



L'étude fondamentale de Mosley et Tindale (1985) complète encore cette analyse (Figure 37).



Exemples de rapport entre le D50 de l'armure et celui de la sous-couche (Mosley et Tindale, 1985).

On observe ainsi qu'il n'est pas rare que le D50 de l'armure (ici $D_{surface}$) atteigne des valeurs 3 à 4 fois supérieures à celles de la sous-couche (ici D_{bulk}).

b- Développement spatial

La formation de l'armure nécessitant l'occurrence de conditions hydrodynamiques particulières, il est logique que celle-ci ne soit pas représentée sur l'ensemble du lit mineur. On l'observe donc plutôt sur les unités morphodynamiques fréquemment submergées. Cependant, certains bancs alluviaux du lit moyen, exposés assez longtemps à ces dites conditions pourront aussi exhiber une armure.

c- Interprétation

Deux niveaux d'interprétation sont envisageables :

■ macro-interprétation. Si l'on se réfère à Bray et Church (1980), le phénomène d'armure serait indicateur de lits ne présentant pas de signe d'incision actuelle, mais subissant des périodes actives, quoi qu'épisodiques, de transport de charge de fond. A notre avis, l'armure se développe aussi dans des rivières en cours d'incision mais peut effectivement à terme se transformer en pavage ;

■ micro-interprétation. C'est le problème de la **stabilité du substrat** sur lequel nous reviendrons plus en détail par la suite.

On peut néanmoins d'ores et déjà émettre quelques postulats :

■ la présence d'une couche armurée peut signifier par exemple que la rivière a connu une période plus ou moins longue de débit inférieur au seuil d'entraînement des éléments grossiers, mais supérieur au débit critique de mise en mouvement des particules les plus fines. Il sera donc sans aucun doute possible de déterminer les conditions hydrauliques moyennes en fonction notamment de la granulométrie de la couche de surface par rapport à celle de la subsurface (courbes superposées) ou par l'intermédiaire d'un ratio du type $D50a/D50sc$ (ou $D90$, $D16$ etc...) ;

■ on sait aussi que les lits armurés sont mis en mouvement par des événements hydrologiques fréquents et que cette destruction de l'armure est un épisode « normal », le problème principal étant de déterminer l'intervalle de récurrence de ce type de situation (crues annuelles à quinquennales ?). La plupart des chercheurs semblent cependant en accord sur le principe d'une crue annuelle. La mise en mouvement de la couche armurée étant liée à la force tractrice (τ) il pourra être très instructif, dans l'objectif d'une prévision de la « stabilité du substrat » de calculer le τ_{cr} des éléments grossiers de l'armure. En dessous de ce point on aura un lit en « équilibre statique conjoncturel », au-delà il n'y aura plus d'armure et toutes les classes granulométriques seront en mouvement.

d- Précautions d'échantillonnage

La granulométrie de la couche d'armure et celle de la sous-couche peuvent être notablement différentes, même s'il semble que le rapport de D50 correspondant soit en général de l'ordre de 2 à 3. Compte tenu de la **très forte sensibilité de ce D50, utilisé dans tous les modèles de transport solide**, il conviendra donc d'échantillonner l'une ou les deux entités avec la stratégie appropriée.

Par contre, si seule la connaissance de la fraction grossière du transport solide, proche de celle de la sous-couche, est recherchée pour les besoins de l'analyse, le D90 de l'armure peut être représentatif de celui de la sous-couche.

2- Le pavage

C'est sans nul doute une structure beaucoup moins fréquente que la précédente mais que l'on peut rencontrer quand certaines conditions sont réunies.

a- Caractérisation

C'est une couche superficielle définie par une population de particules de tailles très nettement supérieures à celles de la sous-couche. Un "indicateur" utile du pavage pourrait être celui de Bray et Church (1980) décrivant des galets soit décolorés, soit noircis sur leur surface exposée à l'eau (à ne pas confondre avec la

couverture de diatomées qui se développe sur les galets relativement stables et qui, après une crue ayant retourné ou transporté les éléments, se reconstitue en quelques semaines). Les lits pavés se présentent sous la forme de surfaces de pierres grossières (ou même de blocs), bien calés les uns contre les autres, n'exhibant pas d'agencement en tuiles (tuilage) mais au contraire **une imbrication plane et régulière**.

b- Mode de formation

Pour qu'un pavage se mette en place, il est nécessaire que certains paramètres soient combinés, tant au niveau du débit liquide (Q) que du débit solide (Qs) : la charge de fond doit notamment être absente ou très faible (Kellerhals 1967).

Ceci est un phénomène naturel à l'exutoire de certains lacs naturels, le même résultat étant artificiel à l'aval de la plupart des barrages hydroélectriques. Cela peut être dû aussi à la réduction de la fourniture en sédiments issue du bassin versant (reboisement, urbanisation).

Dans le cas des lacs et plus généralement des barrages, deux situations peuvent se rencontrer :

■ d'une part, un barrage stoppant la charge. Dans le cas d'ouvrages (ou de lacs) bloquant la charge de fond mais continuant à laisser passer les crues, deux processus peuvent se produire :

⇒ soit, après une plus ou moins longue phase d'incision, la mise en place rapide d'une armure puis d'un pavage qui va stabiliser verticalement le lit,

⇒ soit une première phase beaucoup plus poussée d'incision sur une certaine longueur à l'aval de l'ouvrage, jusqu'à ce que la rivière bute sur une couche profonde de granulométrie très grossière, mise en place sous des conditions hydrologiques plus puissantes, qui sont généralement, sous nos latitudes d'origine glaciaire, fluvio-glaciaire ou péri-glaciaire. On aura alors un paléo-pavage ou pavage d'exhumation. Ce processus d'exhumation pourra se développer aussi sur des rivières subissant un abaissement de leur niveau de base ;

■ d'autre part, un barrage stoppant charge solide et débits liquides. En présence d'ouvrages bloquant non seulement la charge de fond mais aussi la plupart des crues capables de mettre en mouvement l'armure originelle (c'est-à-dire existant avant la construction du barrage), on constatera aussi la formation d'un pavage (les lits court-circuités étant tout de même soumis de temps à autres à des débits assez forts). Celui-ci se développera vraisemblablement plus lentement que dans le cas précédent et sera sujet à un colmatage régulier (organique et minéral).

En réalité, c'est donc le même mécanisme de sélection hydraulique qui intervient dans le développement de l'armure et du pavage, mais si dans le premier cas la granulométrie des éléments constitutifs est à peu près toujours la même (remaniement régulier de cette couche et rajeunissement des formes sédimentaires), dans le second l'absence de fourniture en sédiments va conduire à une ségrégation de plus en plus poussée.

c- Développement spatial

Il est naturellement limité aux zones sus-citées et son extension dépend d'un certain nombre de facteurs difficiles à déterminer précisément (taille du barrage, granulométrie originelle du lit, largeur de celui-ci, pente, etc.).

d- Interprétation

Là encore, deux niveaux d'interprétation sont possibles :

■ macro interprétation. Bray et Church (1980) pensent qu'un lit pavé est indicateur d'une rivière ayant connu une longue phase d'incision ;

■ micro-interprétation. La stabilité de ce type de structure est sans aucun doute très grande, puisque seules certaines crues pourront la briser, si toutefois cela est encore possible (notamment dans le cas d'un paléo-pavage combiné à la réduction des débits).

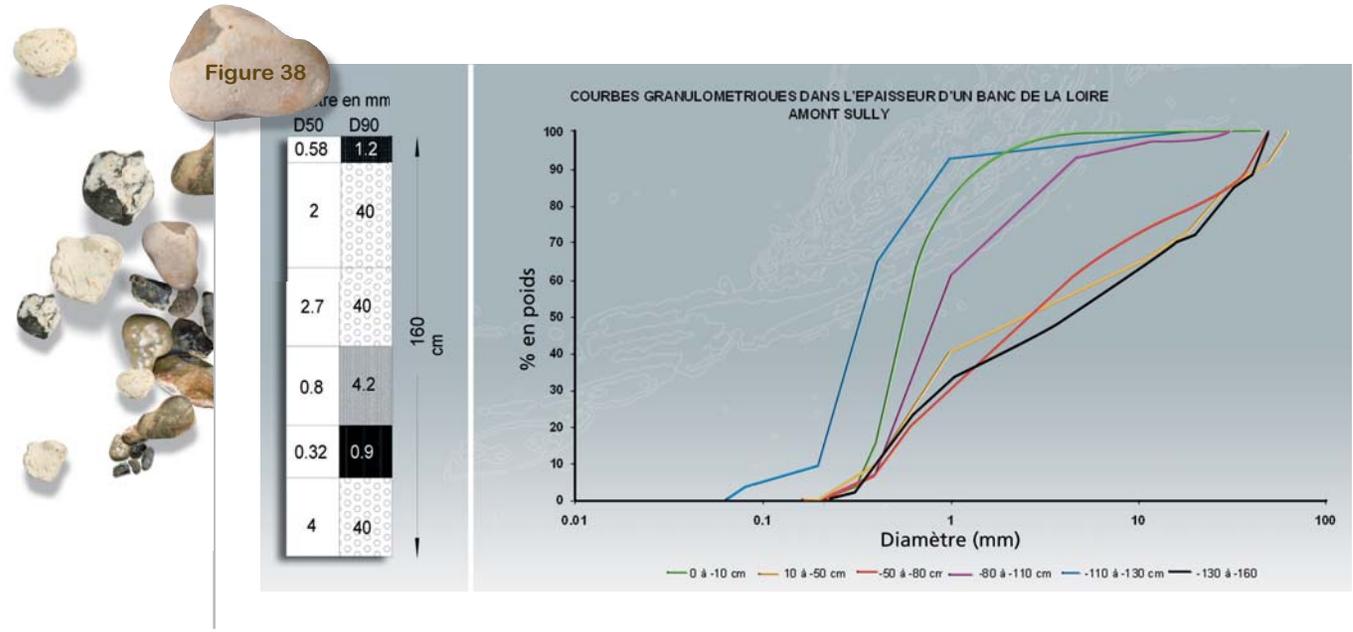
3- Une stratification plus complexe

Même si la dichotomie armure (ou pavage)/sous-couche reflète bien une partie des processus sédimentologiques, nos observations récentes nous indiquent que la réalité de ces processus d'érosion/transport/dépôt est bien plus complexe et ne se résume pas à cette simple stratification.

Ainsi, nous avons réalisé (Malavoi et Gautier, 1999, non publié), une fosse dans un banc latéral de la Loire en amont de Sully et observé la stratification verticale sur 1,6m de profondeur (cette profondeur semblait être sur ce site de l'ordre de l'épaisseur de sédiments remaniée lors d'un épisode de crue annuelle).

Six strates ont été repérées visuellement sur le terrain et un échantillon a été prélevé dans chaque strate puis analysé en laboratoire.

La stratigraphie observée est présentée de manière synthétique sur la figure 38 et le tableau 6.



Coupe dans la masse d'un banc latéral à Sully et courbes granulométriques correspondant aux différentes strates (Malavoi, Gautier, 1999 non publié).

Tableau 6

Synthèse granulométrique des échantillons prélevés dans l'épaisseur d'un banc de la Loire en amont de Sully.

strates	D10 (mm)	D50 (mm)	D90 (mm)
0 à -10 cm	0,36	0,6	1,2
-10 à -50	0,4	2,0	40,0
-50 à -80	0,42	2,7	40,0
-80 à -110	0,4	0,8	4,2
-110 à -130	0,2	0,3	0,9
-130 à -160	0,42	4,0	40,0
minimum	0,2	0,32	0,9
maximum	0,42	4	40
facteur d'écart entre min et max.	2,1	12,5	44,4

Ces résultats, certes non représentatifs car trop ponctuels, nous montrent que la simplification en 2 strates (d'ailleurs non présentes ici puisqu'il n'y a pas d'armure et même un dépôt fin sur 10 cm en surface) ne reflète pas totalement la réalité de la granulométrie d'un site ponctuel. Ainsi, s'il n'y a qu'un facteur 2 d'écart sur le D10 (la fraction fine semble assez homogène sur toute l'épaisseur), on a un facteur d'écart de 12,5 sur le D50 et de l'ordre de 45 sur le D90.

Ces éléments nous conduisent donc, outre la différenciation armure/sous-couche, à nous poser la question de l'épaisseur alluviale à échantillonner pour obtenir des mesures granulométriques fiables et utilisables dans le cadre des objectifs poursuivis par le maître d'ouvrage (simple connaissance, formules de transport, modèles numériques, etc.).

Méthode d'échantillonnage granulométrique en rivière à graviers

La principale question est la suivante : compte tenu de la très forte variabilité spatiale de la granulométrie du lit mineur sur les cours d'eau naturels, quel est le nombre de mesures granulométriques nécessaire pour obtenir une image représentative de celle-ci, notamment dans un objectif d'**alimentation de formules de transport ou de modèles numériques ?**

1- Sous-couche

Mosley et Tindale (1985) ont mesuré 86 échantillons (armure et sous-couche : poids total : 2,5 T) sur une station unique de quelques centaines de mètres de long. Les zones de prélèvement ont été identifiées sur la base de leur homogénéité de surface (couche d'armure).

Le **Dmoy de l'échantillon total** (celui que l'on cherche à approcher par la stratégie d'échantillonnage la plus appropriée) est de **10,79 mm**.

Or, sur les 86 échantillons, un seul, prélevé dans un ancien chenal de crue à sec sur une ancienne surface de banc (c'est-à-dire sur le dernier endroit que l'on aurait identifié comme « représentatif » de la station...), présente la distribution réelle de l'échantillon moyen (courbe moyenne de tous les prélèvements réunis) :

- il est donc impossible d'identifier un « site type » qui pourrait représenter la granulométrie moyenne du lit ;
- il est par conséquent dangereux de caractériser la granulométrie moyenne d'un secteur de rivière par un ou deux échantillons.

On notera aussi que même un échantillon de 854 kg prélevé sur un site présente un Dmoy de 7,96 mm (contre 10,79). Ce qui indique que **même un gros échantillon, s'il est réalisé sur un seul site, ne suffit pas pour caractériser l'ensemble de la station.**

Les auteurs constatent que si l'on agrège progressivement les valeurs des 86 échantillons (de manière aléatoire), il faut **45 échantillons (soit ici, environ 1 350 kg)** pour que Dmoy soit dans l'intervalle de 95 % de la valeur du Dmoy calculé sur les 86 échantillons.

2- Couche de surface

Nous savons que la couche de surface est généralement plus grossière que la sous-couche, même si les fractions les plus grossières de ces deux strates sont généralement identiques. C'est l'**armure**.

Malheureusement, il n'existe pas de relation nette entre la granulométrie de surface et celle de la sous-couche. Il est donc impossible d'utiliser la première pour évaluer correctement (c'est-à-dire mieux qu'à un facteur 2-3 près) la seconde.

L'analyse statistique indique que pour obtenir le Dmoy de l'armure dans un intervalle de confiance de 95 %, il faut 57 et 54 échantillons pour obtenir une valeur à ± 10 % et 13 et 14 pour obtenir ± 20 %.

Pour obtenir le Dmoy de l'armure dans un intervalle de confiance de 95 %, il faut alors 64 et 37 échantillons pour obtenir une valeur à ± 10 % et 14 et 9 pour obtenir ± 20 %.

3- Conclusion

D'après Mosley et Tindale (1985), il faudrait en théorie, pour obtenir une bonne estimation de la granulométrie de la sous couche d'une station (intervalle de 95 %, précision de ± 10 %), environ 200 échantillons de 100 kg (soit 20 tonnes !). Pour la granulométrie de surface, avec la même précision, il faudrait 64 échantillons de 120 éléments chacun.

Le protocole optimal, si l'on voulait obtenir des informations sur les deux couches, serait le suivant :

■ **prélèvement de la sous couche :**

⇒ prélever une masse telle que le D99 représente moins de 5 % de la masse totale. (Church, 1984 propose de 1 % du poids total, à 5 % si le D99 > 250 mm),

⇒ pour obtenir une précision de ± 20 % sur le Dmoy, il faut prélever environ 50 échantillons calculer les valeurs de Dmoy pour chaque échantillon plutôt que mixer un « échantillon moyen » ;

■ **prélèvement de l'armure :**

⇒ pour obtenir le Dmoy d'une surface homogène à ± 5 , ± 10 , ± 15 % il faudrait prélever respectivement 790, 207 et 97 éléments,

⇒ si l'on travaille par transect, il faut environ 12 à 14 transects et 120 éléments par transect (soit environ 1680 éléments) pour obtenir D à ± 20 % et 7680 pour l'obtenir ± 10 %.

A **ttention.** De nombreuses formules de transport solide élaborées ces dernières années, notamment celle de Recking (2010), utilisent uniquement la granulométrie de la couche d'armure et fournissent des résultats sur la capacité de charriage totale très intéressants.

4- Mesures granulométriques complémentaires de la couche d'armure

Il peut être intéressant d'obtenir des caractéristiques granulométriques de la couche d'armure dans d'autres objectifs qu'une approche purement sédimentologique.

Deux approches complémentaires peuvent par exemple être envisagées :

- une approche « typologique », permettant de caractériser un cours d'eau par sa granulométrie ;
- une approche « habitats » permettant de décrire rapidement la granulométrie des substrats supports ou abris pour les biocénoses aquatiques.

a- Approche typologique

Il est intéressant de pouvoir qualifier une rivière par sa granulométrie : rivière à sables, à graviers, à blocs etc. La méthode que nous utilisons habituellement consiste à mesurer la **granulométrie moyenne des radiers**.

Les radiers sont en effet, dans la théorie, 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.

On sait donc que l'on biaisera volontairement la connaissance de la granulométrie du cours d'eau vers les fractions grossières (d'autant plus que l'on ne mesurera que l'armure). Mais cela ne pose pas de problème si le biais est identique partout.

Le protocole et le niveau de précision souhaité sont basés sur la méthode de Wolman (1954) qui préconise le prélèvement de **100 éléments**. Cependant, Nous avons réalisé de nombreux tests statistiques qui montrent que l'on obtient une précision tout à fait satisfaisante de la granulométrie d'un échantillon avec seulement **50 éléments**.

On réalisera donc la mesure sur le radier le plus grossier de la station au moyen d'une cordelette sur laquelle on aura fait 10 nœuds tous les 30 cm. Cette **cordelette** sera lestée d'un plomb de ceinture de plongée à chaque extrémité afin d'être posée, tendue, dans l'eau. On prélèvera les éléments situés sous chaque nœud puis on reportera 10 (5) fois la corde d'environ 0,3 m sur le côté afin d'obtenir l'échantillon complet des 100 (50) éléments, que l'on mesurera avec une précision millimétrique.

On peut éventuellement réaliser les prélèvements en cheminant sur le radier, perpendiculairement à l'axe d'écoulement, et en prélevant un élément à chaque **1/10 de la largeur mouillée** (en vérifiant que cette distance est supérieure ou égale à la granulométrie mobile naturelle la plus grossière du radier, valeur qui doit être la distance minimale à respecter).

NB La mesure de la granulométrie de surface des radiers présente aussi un intérêt en termes de connaissance des processus de mobilisation du substrat alluvial. Couplée à la puissance spécifique, elle permet de connaître la fréquence minimale de mise en mouvement des matériaux du lit, habitats importants des biocénoses aquatiques et siège de processus biogéochimiques.

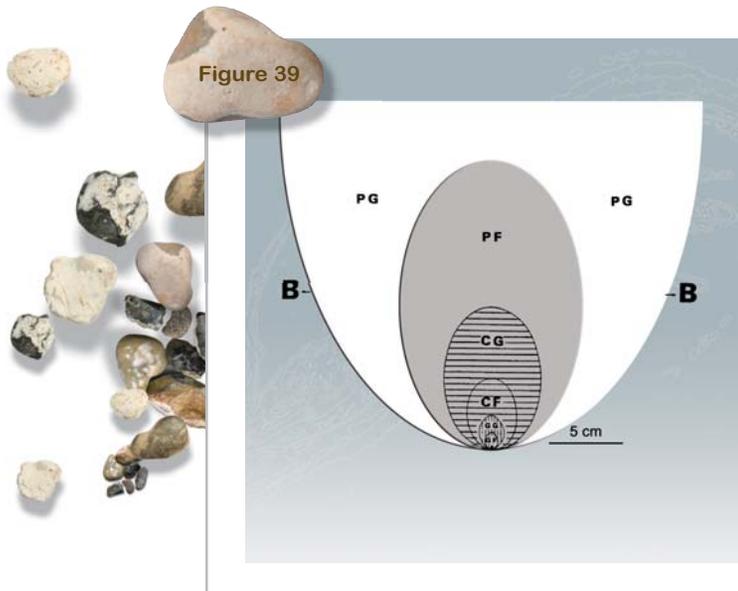
b- Approche « habitats »

La méthode proposée pour cette approche est celle utilisée dans le protocole « microhabitats » (Malavoi et Souchon, 1989). Elle permet de qualifier très rapidement le substrat alluvial d'un cours d'eau.

On observe le substrat dans un rayon de 1 m autour du point d'observation et on évalue visuellement, au moyen d'un gabarit à l'échelle, la taille des éléments (l'échelle granulométrique utilisée est celle de Wentworth modifiée).

On utilise un code en 6 caractères (Figure 39) :

- **type** : Bloc (B), Pierre (P), Caillou (C), Gravier (G), Sable (S) ;
- **et sous-type** : Fin (F) ou Grossier (G) (sauf pour les Blocs).



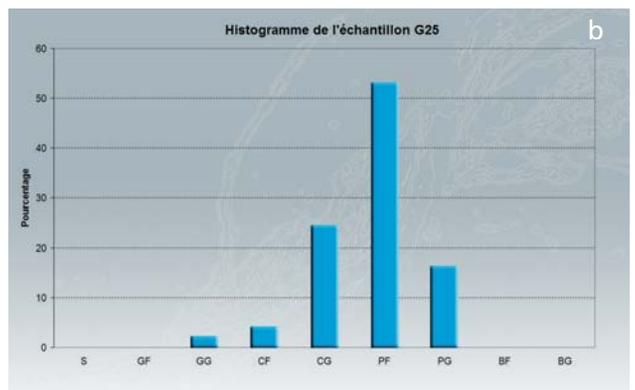
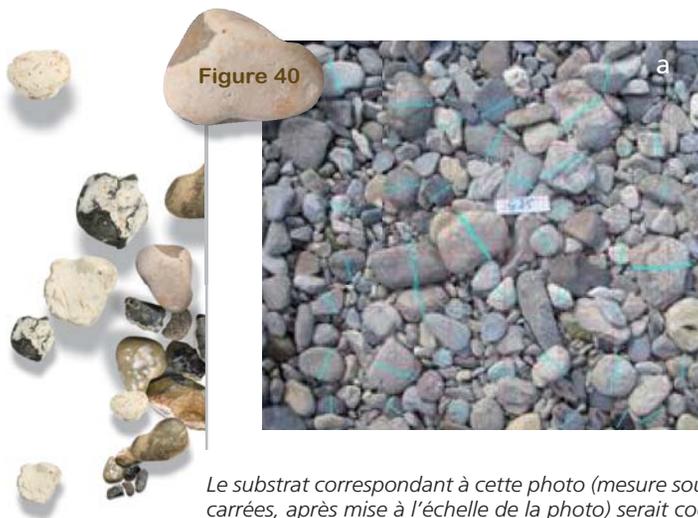
Type Granulométrique	Taille (mm)	Code microhabitats
Rocher ou Dalle	> 1024	R ou D
Bloc	256-1024	B
Pierre Grossière	128-256	PG
Pierre Fine	64-128	PF
Caillou Grossier	32-64	CG
Caillou Fin	16-32	CF
Gravier Grossier	8-16	GG
Gravier Fin	2-8	GF
Sable Grossier	0.5-2	SG
Sable Fin	0.0625-0.5	SF
Limon	3.9-62.5µ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

Echelle granulométrique utilisée et gabarit pour les évaluations granulométriques visuelles (Malavoi, Souchon, 1989). **Attention** de bien mettre le gabarit à la bonne échelle avant de l'emmener sur le terrain...

46

Les deux premiers caractères indiquent la classe granulométrique la plus grossière (ex. : PG dans l'exemple ci-dessous) à condition que ce type occupe au moins 10 % de la surface observée.

Les deux autres indiquent la classe dominante en surface occupée (ex. : PF), le substrat dominant pouvant aussi être le plus grossier (ex. : PGPG). Les deux derniers caractères sont utilisés si deux classes dominantes apparaissent (cas le plus fréquent) (ex. : PGPF CG ci-dessous).



Le substrat correspondant à cette photo (mesure sous SIG de 49 éléments échantillonnés sur une grille virtuelle à mailles carrées, après mise à l'échelle de la photo) serait codé visuellement – PGPF CG.

NB notons que la méthode photographique verticale est très efficace pour réaliser des mesures granulométriques de l'armure sur les bancs exondés. Elle ne peut toutefois pas être mise en œuvre correctement sur des radiers submergés pour des raisons de réflectance liée à la lame d'eau, même en utilisant des filtres polarisants. Il existe aussi des développements méthodologiques récents (Dugdale *et al.*, 2010) qui indiquent la possibilité de réaliser ce type de mesures (avec toutefois une moindre précision) à partir de photos haute résolution prises lors de survols à basse altitude.

Modélisation du transport solide

On considèrera dans cette partie la modélisation du transport solide au sens large, c'est-à-dire les méthodes et outils disponibles pour évaluer les flux sédimentaires transportés par les cours d'eau mais aussi leurs conséquences morphologiques.

Il est très important de rappeler qu'il n'existe pas à ce jour d'outil universel et infallible : chaque situation est unique et nécessite la mise en œuvre d'une panoplie d'outils et de méthodes adaptés.

Une des grandes difficultés associée à l'évaluation du transport solide en rivière, est que, contrairement à l'étude des autres composantes physiques (hydrologie, hydraulique), il n'existe que très rarement, pour des raisons de coûts notamment, des mesures précises de terrain permettant de « caler » puis de valider les résultats des calculs.

Cela ne signifie pas qu'il n'existe pas de données de validation. Les données historiques (relevés des grandes forces hydrauliques, témoignages...), les rapports d'étude, les photographies aériennes, les stockages de sédiments dans les plages de dépôts, les volumes de curages, les volumes extraits dans les gravières... sont autant de sources indirectes qui peuvent être exploitées pour estimer les volumes d'alluvions transportés par les cours d'eau.

La multiplicité des situations rencontrées sur le terrain, la diversité des outils disponibles, la rareté et la difficulté d'exploitation des données font que **la modélisation du transport solide en rivière nécessite un haut niveau d'expertise.**

Cependant, chaque acteur impliqué de près ou de loin dans la gestion des cours d'eau peut trouver sa place dans cette expertise, à condition de garder à l'esprit certains grands principes exposés ci-après, et surtout, de toujours savoir remettre en question, d'un côté les « croyances » et de l'autre, « l'infaillibilité des modèles », la vérité se situant quelque part entre les deux. On entend par « croyances » les inquiétudes souvent exprimées par les riverains et qui peuvent parfois influencer un diagnostic : par exemple l'apparition de nombreux bancs de graviers peut être interprétée par les riverains comme un excès d'apport sédimentaire motivant une demande de curage, alors qu'en réalité elle peut tout autant résulter d'un abaissement de la ligne d'eau accompagnant un enfoncement du lit, conséquences d'un déficit sédimentaire, ou refléter simplement l'avancée naturelle d'un front sédimentaire.

Les deux grands principes que l'on pourrait suggérer pour réaliser une étude objective du transport solide d'un cours d'eau sont :

- toujours respecter une hiérarchisation dans les outils et méthodes à mettre en œuvre. La hiérarchisation des outils implique, par exemple, que construire un modèle numérique d'un cours d'eau n'a aucun sens si un diagnostic préalable n'a pas déjà été posé, permettant de comprendre, même de façon approximative, le fonctionnement de ce dernier et ses éventuels déséquilibres ;
- toujours s'interroger sur les échelles pertinentes (de temps et d'espace). Le questionnement sur les échelles est essentiel car un problème plus ou moins local (de la traversée d'un village au tronçon homogène de rivière) pourra dans certains cas nécessiter une réponse globale (à l'échelle du cours d'eau). L'échelle jugée la plus pertinente conditionnera donc fortement le type d'outils à mettre en œuvre.

■ Hiérarchisation des outils et méthodes

On utilise très largement le terme « modélisation » lorsqu'on étudie le transport solide. Cependant derrière ce terme générique se cachent une multitude d'outils. Une des définitions proposée par Le Petit Larousse pour le mot « modèle » nous semble intéressante dans le contexte de l'analyse du transport solide : « *Structure formalisée utilisée pour rendre compte d'un ensemble de phénomènes qui possèdent entre eux certaines relations* ».

Un « modèle » peut donc se décliner sous plusieurs formes, allant de la plus simple (basée sur le « bon sens ») à la plus complexe (mettant en œuvre les dernières avancées en calcul numérique et en informatique).

Par ordre de complexité de mise en œuvre (et donc de coût...), on retiendra la hiérarchisation suivante.

Le principe d'équilibre dynamique

L'état de fonctionnement moyen d'un tronçon de cours d'eau peut être caractérisé par un débit liquide par unité de largeur q , un débit solide Q_s , une pente J et un diamètre caractéristique de sédiment D . Si un de ces paramètres est modifié durablement (comme par exemple lors de la création de digues), la simple utilisation de la balance de Lane permet de prévoir, et ce en dehors de tout calcul, dans quel sens évoluera le système. Malgré sa grande simplicité, ce « modèle » de fonctionnement est souvent suffisant pour solutionner de nombreux problèmes.

Les formules de transport solide

Les formules de transport sont assez simples d'utilisation et permettent de donner sommairement une première estimation du débit solide moyen correspondant à un débit liquide donné, pour un tronçon de rivière homogène en granulométrie et en pente. L'interprétation des résultats de ce type de calcul doit cependant se faire à la lumière d'un diagnostic préalable de fonctionnement hydrosédimentaire global.

En effet, les formules ont été établies pour des tronçons de cours d'eau « à l'équilibre » et peuvent considérablement surestimer le transport en situation de déséquilibre (par exemple en cas de rupture du transit sédimentaire).

Les codes numériques adossés à des formules de transport solide

Les codes numériques permettent d'appliquer les formules de transport non plus à un tronçon considéré comme homogène et pour un débit fixe, mais à des géométries complexes et des hydrogrammes de crue.

Les codes (ou modèles) numériques sont tout sauf des outils « presse bouton » et la mise en œuvre de ce type de modèle nécessite des compétences sérieuses en hydraulique (et parfois en informatique).

Ils nécessitent, au même titre que les « simples » formules, d'avoir au préalable déjà bien analysé le fonctionnement du cours d'eau. Ils doivent alors être considérés comme des outils d'aide à la décision.

NB Certains modèles numériques sont dits « morphodynamiques » car ils permettent de prédire l'évolution de la morphologie du lit associée au transport de sédiments, voire même de prédire l'évolution de la granulométrie au gré des transports successifs, sur de longues échelles de temps.

Les formules de transport et les codes numériques sont appliqués en considérant le cours d'eau dans sa dimension principale, à savoir dans le sens **amont ->aval**, en négligeant ce qui se passe latéralement et dans la dimension verticale. Ces modèles, dits « **monodimensionnels** », sont en général suffisants pour traiter des problèmes à l'échelle de tronçons de cours d'eau.

Les modèles numériques et les capacités de calcul actuels permettent aujourd'hui de traiter des cas de plus en plus complexes, en prenant en compte les écoulements amont/aval mais aussi latéralement (la dimension verticale de l'écoulement étant généralement « moyennée »). Ces modèles dits « **bidimensionnels** » sont utilisés lorsque la morphologie du lit s'écarte du chenal unique et que la mobilité en plan doit être prise en compte.

Les modèles physiques

Parfois le lit du cours d'eau est sollicité dans ses trois dimensions (par exemple en cas d'affouillements du lit au droit d'un ouvrage, voire en section courante) et dans ce cas on a recours à la **modélisation physique**. Les modèles physiques sont coûteux à mettre en œuvre et nécessitent un vrai savoir faire. En particulier il est très difficile de respecter des lois d'échelles (ou de similitude) garantissant que ce qui est observé en laboratoire se reproduira dans les mêmes proportions sur le terrain.

On limite en général leur utilisation aux écoulements complexes (confluences, présence d'ouvrages) ou lorsqu'il existe des enjeux économiques forts.

■ Choix des échelles pertinentes

Réaliser une bonne évaluation du transport solide d'un cours d'eau peut nécessiter de considérer ce dernier dans son intégralité et sur des périodes longues, même si l'on est amené à se questionner sur une problématique *a priori* locale et de court terme.

Il est donc important de commencer l'étude par la détermination des échelles spatiales et temporelles les plus pertinentes pour atteindre l'objectif fixé.

Les échelles spatiales et temporelles

Le transport sédimentaire affecte la morphologie du cours d'eau à différentes échelles de temps et d'espace. On peut identifier trois échelles de « déformation » du lit liées au transport solide :

■ le transport de sédiments, que ce soit sur des lits plats ou en présence de dunes, se produit toujours sous forme d'une couche fine correspondant à la mise en mouvement de la couche superficielle du lit. L'épaisseur correspondante est appelée « **couche active** ». Les mesures disponibles à ce jour (que ce soit à l'aide de chaînes enterrées ou de traceurs magnétiques) tendent à indiquer que cette épaisseur ne dépasse que rarement 2 fois le diamètre des grains les plus grossiers (D90) dans les rivières à graviers. Ce ratio pourra être bien supérieur pour les rivières à sables. Le concept de couche active est surtout utilisé en modélisation numérique pour matérialiser un compartiment d'échange entre le lit au repos et les sédiments en mouvement dans l'écoulement ;

■ sous cette couche d'échange superficielle se trouve un stock sédimentaire qui peut ou non être soumis à des **érosions** et **dépôts**, du fait du caractère transitoire des crues et de la disponibilité sédimentaire. Les déformations résultantes de la topographie du lit vont se manifester localement de façon plus ou moins forte et variable dans le temps et l'espace. Dans certains cas très précis (affouillement au pied d'un seuil par exemple) des abaques (disponibles dans les ouvrages spécialisés) ont été produits pour prédire l'épaisseur maximum des érosions. Toutefois la diversité des scénarios possibles rend difficile l'établissement d'une loi universelle d'affouillement, bien qu'il y ait eu des tentatives de formulations :

⇒ pour les rivières à sable : $e = 0.1q^{0.5}$ (Leopold et al. 1966)

⇒ pour les rivières à graviers : $e = 0.043q^{0.27}$ (Carling 1987)

Où e est l'épaisseur mobilisée (m) et q le débit unitaire ($m^3/s/m$)

Ce type de formule est donné à titre indicatif et doit être utilisé avec prudence. Dans certains cas complexes, la modélisation numérique peut être une alternative intéressante ;

■ un troisième type de déformation est lié à la propagation d'ondes sédimentaires (macroformes de type dunes/bancs, voir chapitres précédents). Ces ondes peuvent parfois atteindre plusieurs mètres de hauteur et fortement réduire la capacité d'écoulement lorsqu'elles se stockent temporairement sous un ouvrage. Elles se propagent lentement et leur déplacement est relativement prévisible si l'on met en place une surveillance appropriée (capteurs, photos aériennes, mesures topographiques).

NB Selon les échelles de temps et d'espace considérées, l'expression « couche active » pourra également être utilisée pour désigner l'épaisseur totale de lit concernée par les érosions-dépôts ou par le passage d'ondes sédimentaires (Parker 2009).

Les trois types de déformations décrits plus haut font partie de la « vie normale » d'une rivière (on parle parfois de « respiration » du lit), qu'il faudra distinguer des sur-érosions et sur-dépôts résultants de déséquilibres hydromorphologiques.

La démarche commune à toutes les études de transport solide consiste, qu'elles passent par des approches sommaires ou des modèles complexes, à rechercher les indices permettant de savoir si la rivière est en équilibre morphodynamique ou en déséquilibre.

Attention. Un déséquilibre peut avoir une origine parfois très éloignée du lieu d'observation et peut se manifester sur des échelles de temps bien supérieures à celle de l'événement (la crue), avec parfois des conséquences dramatiques pour les écosystèmes et les ouvrages.

Une autre difficulté, et non des moindres, réside dans la **définition même de l'équilibre**.

Les temps d'ajustement de la pente d'équilibre

Nous avons vu que les cours d'eau sont des systèmes ouverts, qui fonctionnent en « équilibre dynamique » selon les fluctuations spatio-temporelles de deux variables de contrôle majeures :

- le débit liquide (Q) ;
- le débit solide (Qs).

Une troisième variable de contrôle conditionne les processus morphodynamiques, mais elle n'est pas fluctuante à notre échelle de temps :

- la pente de la vallée (Jv).

Cela signifie que les caractéristiques géométriques en plan (taux de sinuosité, tresses), en long (pente) et en travers (forme des sections) du cours d'eau (que l'on nomme variables de réponse) s'ajustent en permanence, par des processus d'érosion/dépôt, aux valeurs de Q et Qs entrant, sur la base d'une pente de vallée fixe à notre échelle de temps.

On peut donc postuler que la **pente d'équilibre d'un cours d'eau** est établie sur des valeurs moyennes de Q-Qs et oscille doucement autour d'une valeur moyenne selon les fluctuations de forte période de retour (1 à 5 ans) de ces deux paramètres. La pente d'équilibre serait alors celle permettant le transfert vers l'aval, sans déformation majeure de la géométrie du lit sur le long terme, des Q et Qs imposés par l'amont.

On peut alors affirmer :

- qu'il n'existe pas **une** pente d'équilibre mais **une gamme** de pentes d'équilibre dynamique, établie autour d'une valeur moyenne ;
- que même cette gamme de pentes d'équilibre n'est « valable » que si l'on travaille sur un pas de temps court (100 à 200 ans par exemple). En effet, plus le pas de temps est long, plus les valeurs de Q et Qs peuvent fluctuer fortement (voir, dans un autre chapitre, le paragraphe sur le petit âge glaciaire). On estimera donc, pour simplifier, que les entrées de Q et Qs sont fluctuantes, mais dans de faibles valeurs autour de conditions moyennes.

Débit de crue et débit morphogène

Le choix des échelles pertinentes concerne également les débits. Débit morphogène et débits extrêmes sont très différents.

Le débit morphogène est celui qui façonne le lit au gré des crues successives. On estime qu'il se rapproche

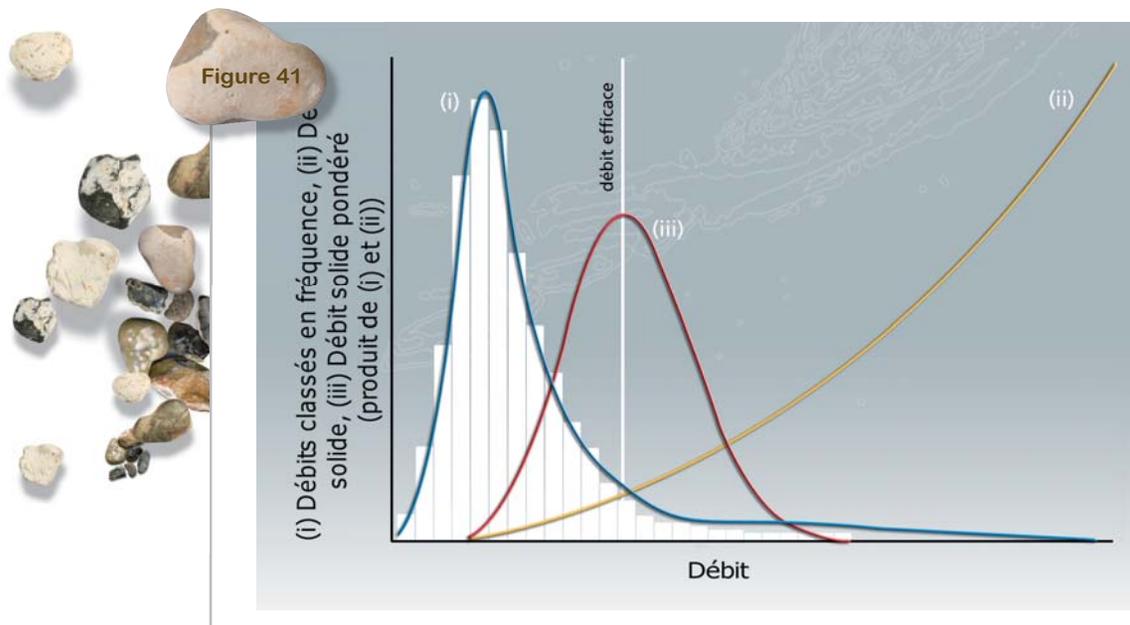
de la crue journalière de fréquence annuelle à biennale, qui correspond généralement aussi à un écoulement « à pleins bords ».

Les événements plus rares (Q20, Q100 ou supérieur) peuvent quant à eux provoquer de fortes perturbations de la géométrie en plan, en long, et en travers du cours d'eau à l'occasion d'une seule crue. Mais ces perturbations sont souvent localisées et temporaires, le lit se réajustant plus ou moins vite par la suite, sous l'effet des débits morphogènes moyens.

On distinguera deux types d'études de transport solide parmi les plus fréquentes :

- des études dont l'objectif est de comprendre l'évolution morphologique du lit à moyen et long terme, et dans ce cas, il faut identifier le **débit morphogène** ;
- des études dont l'objectif est la mise en sécurité d'un ouvrage ou d'une « zone à risques » face aux crues extrêmes et dans ce cas on s'intéressera aux crues rares.

Quel est le débit morphogène ? On peut trouver des éléments de réponse par un calcul du débit « effectif », c'est-à-dire celui qui transporte le plus de sédiments au cours d'une année hydrologique normale (Wolman et Miller 1960). Ce calcul est illustré sur la figure 41. La courbe (ii) est une courbe de tarage donnant le débit solide (mesuré ou calculé) en fonction du débit liquide pour le cours d'eau considéré.



Modèle de calcul quantité-fréquence du transport sédimentaire (figure extraite de 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 $(iii) = (i) \times (ii)$ et donne une distribution en fréquence du transport de sédiments.

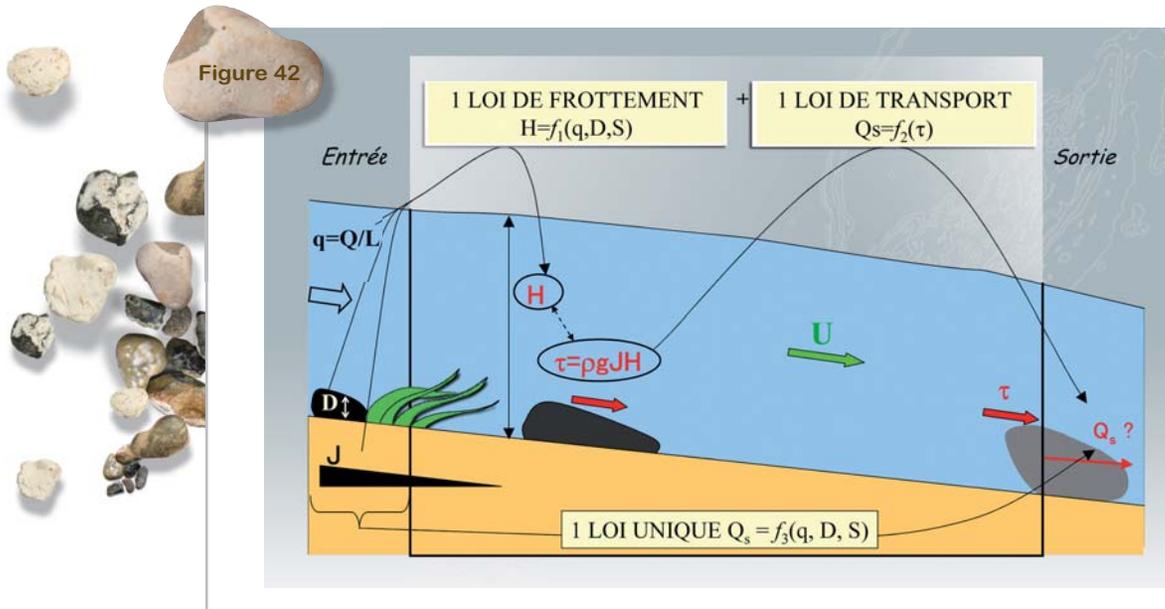
La courbe (i) est la courbe des débits classés en fréquence. Croisée avec la courbe (ii), elle indique que les **débits les plus fréquents ne transportent pas de sédiment**. La courbe (iii) qui est le produit des deux précédentes donne une distribution en fréquence des débits solides transportés. Elle permet de constater que le débit qui transporte statistiquement le plus de sédiment (en cumulé sur une année hydrologique) n'est pas parmi les crues les plus extrêmes (à droite sur la courbe (i)). Les différentes études ont montré qu'il s'agit plutôt du **débit de plein bord** (Andrews 1980 ; Andrews et Nankervis 1995 ; Carling 1988 ; Emmett et Wolman 2001 ; Knighton 1998), qui correspond en général aux crues de fréquence 1 à 2 ans (Barry et al. 2008).

■ Utilisation des formules de transport

Les grandes étapes

La modélisation du transport solide est schématisée sur la figure 42.

Les quatre principaux paramètres sont ceux représentés sur la balance de Lane : deux termes expriment la puissance de l'écoulement (Q et J) et deux termes expriment le taux de travail effectué (D et Qs) (La balance de Lane exprime un principe bien connu de la mécanique qui est que la puissance dissipée est égale au taux de travail effectué, à un facteur d'efficacité près).



Schématisation des étapes de calcul du transport solide.

52

L'objectif est de calculer un des paramètres connaissant les trois autres. En général on recherche Qs connaissant Q, D et J. Mais on peut aussi calculer la pente d'équilibre J à partir de Q, Qs et D.

Certaines formules permettent de calculer directement le débit solide à partir de Q, J et D, mais la plupart des approches nécessitent un calcul intermédiaire de la contrainte (Force ramenée à l'unité de surface, en N/m² ou Kg/m/s²) (ou force tractrice) τ qui s'exerce sur les grains.

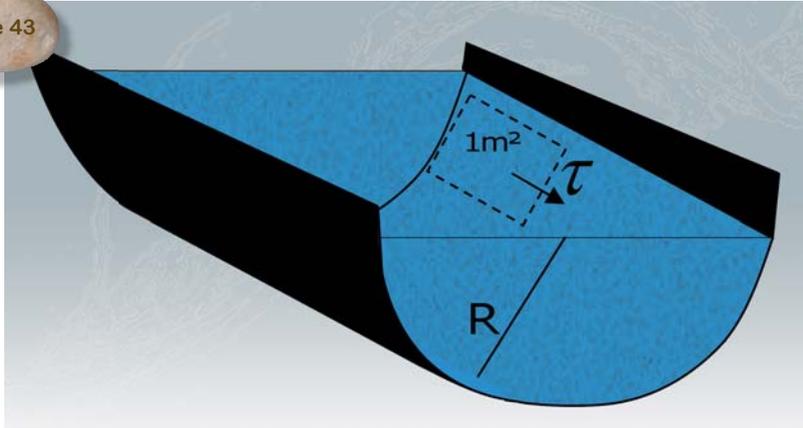
Rappel. La puissance en mécanique est le produit de la force par la vitesse, on montre que ramenée à l'écoulement elle se calcule par le produit pente x débit x poids volumique de l'eau. Elle est fonction des conditions hydrologiques et de la morphologie générale (pente et forme de la vallée) et locale (style fluvial) du cours d'eau. Sa variabilité est donc à la fois spatiale (morphologie différente selon les tronçons de rivière) et temporelle (notamment sur le court terme par le biais des crues).

- la puissance brute (Ω) est calculée comme suit : $\Omega = \gamma QJ$ (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), J la pente de la ligne d'énergie en m/m, l la largeur du lit pour le débit utilisé (m)

Figure 43



Représentation schématique d'une section d'écoulement.

La contrainte ou force tractrice

Pour une pente d'écoulement donnée J (en m/m) et en régime uniforme, la force tractrice est directement proportionnelle à la hauteur de l'écoulement h (en m) et s'écrit :

$$\tau = \rho ghJ \quad (1)$$

Avec τ en N/m² (la pente de l'écoulement J est souvent assimilée à la pente du lit).

Soit la hauteur d'écoulement est disponible (mesures à une échelle par exemple) soit il faut la calculer connaissant Q , J et D . On utilise pour cela une loi de frottement, la plus connue et la plus utilisée étant celle de Manning-Strickler :

$$Q = KLh^{5/3}J^{1/2} \quad (2)$$

Où K est le **coefficient de rugosité** de Manning-Strickler. Ce coefficient dépend essentiellement de la granulométrie du lit, mais sa valeur peut également être fortement influencée par la présence de dunes ou par tout autre obstacle (qu'il soit naturel ou non) à l'écoulement.

- La valeur de K peut être déduite d'abaques ou être calée par une étude hydraulique et des mesures de terrain. Sa détermination reste dans tous les cas très délicate (on verra par la suite qu'il existe des formules de transport n'incluant pas ce paramètre).

- La hauteur d'eau h peut parfois être difficilement mesurable dans les sections étroites et irrégulières et elle est généralement remplacée par le rayon hydraulique R défini par $R = S / P$, où S est la surface mouillée (surface occupée par l'écoulement sur une section donnée) et P est le périmètre mouillé (longueur définie par la zone de contact entre le liquide et le lit). Pour une section rectangulaire de largeur L , le rayon hydraulique est donné par $R = hL / (2h + L)$.

Le critère de Shields

Lorsque l'on connaît la contrainte qui s'exerce sur le fond, la deuxième étape consiste à vérifier si elle est capable de mettre en mouvement les sédiments présents. Pour cela Shields (1936) a proposé d'utiliser une grandeur adimensionnelle τ^* obtenue à partir du ratio entre les forces motrices (contrainte exercée τ x la surface de la particule) et les forces stabilisatrices (poids de la particule) :

$$\tau^* = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)D} \approx \frac{hJ}{1.65D} \quad (3)$$

Où g est l'accélération de la gravité, ρ_s et ρ sont respectivement les densités du sédiment et de l'eau, et D est le diamètre de la particule. Shields a montré qu'un grain soumis à un écoulement (Écoulements turbulents rugueux, ce qui est le cas des écoulements en rivière) était mis en mouvement lorsque τ^* dépassait une **valeur critique τ^*c** .

Cette relation très simple est probablement une des plus utilisées dans l'étude du transport solide. **Il n'existe cependant pas de consensus en ce qui concerne la valeur de τ^*c** . Des valeurs comprises entre **0,03 et 0,06** ont été proposées depuis les travaux de Shields. Il semblerait que 0,03 soit bien adapté aux rivières à sable avec des pentes très faibles, et qu'une valeur de l'ordre de 0,045 serait plus adaptée aux rivières à graviers (Recking, 2009).

Les formules de transport

Pour finir, on peut calculer le flux transporté à l'aide d'une formule de transport. Des dizaines de formules ont été proposées depuis un peu plus d'un siècle de recherche active sur ce sujet, chacune d'entre elles ayant été établie pour des conditions hydrauliques bien particulières. Quinze formules usuelles sont présentées en annexe. Seuls leurs domaines de validité sont présentés ci-après.

1- Les formules utilisant la contrainte

La plupart des formules proposent un calcul à partir de l'excès de contrainte ($\tau^* - \tau^*c$) plutôt que la contrainte seule, en faisant l'hypothèse que le transport solide est un phénomène à seuil, comme l'avait suggéré Shields. Certaines de ces formules sont présentées dans le Tableau 7.



Principales caractéristiques des formules de transport utilisant la contrainte.

Formule	Calculs intermédiaires	Données nécessaires	Conditions expérimentales et domaine de validité
Meyer-Peter et Mueller (1948)	τ^* , K, Kr	U, R, D50, D90, J, L	Données de laboratoire 0,4 < J < 2,4 %, 0,4 < D < 29 mm
Engelund et Hansen (1967)	τ^* , f	R, U, D50, J, L	- Transport total (charriage + suspension) - Laboratoire, lit à sable, transport important, lits plats et dunes, 0,15 < D < 1,6mm, Pentes faibles
Ackers et White (1973)		Q, U, D35, H, J, L	Transport solide total, Données de laboratoire, pour des Fr < 0,8 (rivières de plaine), 0,4 < D < 14
Parker (1979)	τ^*	R, D50, J, L	Données de labo et de terrain
Mizuyama (1977)	τ^* , τ^*c	R, D50, J, L	Laboratoire, fortes pentes
Smart et Jaeggi (1983)	τ^* , τ^*c , f	R, D30, D50, D90, J, L	Données de laboratoire 3 < J < 20 %, 2 < D < 10,5 mm
Recking et al (2008)	τ^* , τ^*c	Q, D50, D84, J, L	Données de laboratoire, 0,1 % < J < 20 %, 0,4 < D < 44 mm
Van Rijn (1984)	U*	U, R, D50, D90, J, L	Semi-empirique, Validé pour des sables.

Une des grandes difficultés d'utilisation de ce type de formule est qu'il faut au préalable calculer des paramètres intermédiaires, et en particulier la contrainte, ce qui nécessite de connaître le rayon hydraulique R.

Le rayon hydraulique (ou la hauteur d'eau) associé à un écoulement traduit la résistance que le lit oppose à cet écoulement, pour un débit et une pente donnés. On comprendra aisément que, toutes choses étant égales par ailleurs, un lit localement entravé par un obstacle (dunes, embâcle...) produira une hauteur d'eau supérieure à celle produite par les seuls sédiments reposant sur le même lit, non obstrué. Donc si une telle mesure de hauteur d'eau est intégralement appliquée (via le calcul de la contrainte) aux grains posés à la surface du lit, cela conduira inévitablement à une surestimation de la force appliquée à ces derniers, et donc du débit solide transporté.

Pour palier cette difficulté, plusieurs solutions ont été proposées. Par exemple, la formule de Meyer-Peter et Mueller intègre une correction de la contrainte à partir d'un ratio entre le coefficient de rugosité totale du lit (K) et le coefficient de rugosité des grains seuls (K'). Cependant elle est très délicate à utiliser car la détermination de K' et K n'est pas triviale et nécessite de bien connaître l'hydraulique de la section.

Une solution souvent retenue et proposée par Einstein et Barbarossa (1952) consiste à considérer qu'une décomposition linéaire est possible entre les différentes formes de résistance à l'écoulement dans le calcul du rayon hydraulique total ($R_{total} = R_{grains} + R_{formes \text{ du lit}}$), et à utiliser une loi de frottement établie pour des écoulements sur lits plats et sans obstacles (généralement établies en laboratoire) pour calculer le rayon hydraulique associé à la résistance des grains. La valeur de R_{grain} ainsi obtenue peut être utilisée pour le calcul de la contrainte τ (Eq.1) à utiliser dans les formules de transport.

De nombreuses formules ont été proposées pour modéliser R_{grain} (qu'on appellera R par la suite) et une forme dérivée de la loi logarithmique de paroi est généralement utilisée. En faisant l'hypothèse d'une section d'écoulement rectangulaire (ce qui permet d'écrire $R = HL / (2H + L)$), elle s'écrit:

$$\frac{Q(L - 2R)}{R L^2 \sqrt{gRJ}} = 6.25 + 5.75 \log\left(\frac{R}{D}\right) \quad (4)$$

On considère généralement $D = D50$ pour les rivières à sable (Keulegan 1938) et $D = 3,5 D84$ pour les rivières à graviers (Hey 1979). L'inconvénient de cette équation est que le calcul de R nécessite une approche itérative.

2- Les formules utilisant le débit

Etant donné la difficulté liée au calcul de la contrainte, plusieurs auteurs ont recherché une relation empirique donnant directement le débit solide Q_s en fonction du débit liquide total Q ou spécifique $q = Q / L$. Ces formules sont très simples à utiliser et ne nécessitent aucune itération.



Tableau 8

Principales caractéristiques des formules de transport testées utilisant le débit.

Formule	Calculs intermédiaires	Données nécessaires	Conditions expérimentales et Domaine de validité
Schoklitsch (1962)	qc	Q, D40, J, L	Ajustement de données de laboratoire et terrain, $J < 1 \%$ (a priori D40 réfère à la granulométrie de subsurface (Bathurst 2007))
Rickenmann (1991)	qc	Q, D30, D90, J, L	Laboratoire, $0,0004 < J < 0,2$, $0,4 < D < 10 \text{ mm}$
Sogreah (1991)	Qc	Q, D30, D50, D90, J, L	Ajustement données de Laboratoire, à partir de la formule de Smart et Jaeggi avec l'hypothèse $L / H = 18$, $0,25 < J < 20 \%$
Lefort (2007)	Plusieurs paramètres	Q, Dm, J, L	Transport par charriage + suspension Ajustement de données de laboratoire et de terrain, $0,1 < D < 55 \text{ mm}$, $J < 20 \%$

3- Autres formules

Bagnold (1980) a proposé une formule basée sur la notion de puissance disponible (B étant la largeur mouillée (m) et U la vitesse moyenne (m/s)):

$$\omega = \frac{\rho g Q J}{L} = \tau U \quad (5)$$

Sur le même principe Yang (1972) a défini la puissance unitaire comme étant le produit de la pente par la vitesse de l'écoulement et a utilisé ce paramètre pour établir plusieurs équations de transport dont une spécifique pour le transport par charriage (Yang 1984).

Einstein (1937) a développé une fonction de probabilité pour décrire le charriage. Le calcul du transport avec cette méthode nécessite cependant plusieurs abaques et n'est pas aisée. Sur la base de ces résultats Brown (1950) a proposé une équation de charriage.



Tableau 9

Formules de transport utilisant la puissance de l'écoulement ou probabilistes.

Formule	Calculs intermédiaires	Données nécessaires	Conditions expérimentales et Domaine de validité
Bagnold (1980)	$\Omega, \omega c$	q, H, J, Dm, L	Laboratoire, D = 1,1 mm
Yang (1984)	U*, Ucr	Q,U, J, D50, L	Données de laboratoire, 2 < D < 7 mm
Einstein (1950); Brown (1950)	τ^*	R, D50, J	Laboratoire, sables et graviers 0,3 < D < 29 mm

Ces formules posent le même problème que les formules utilisant la contrainte puisqu'une connaissance préalable des paramètres hydrauliques est nécessaire (U, H).

Précision des formules de transport

1- Critères d'évaluation

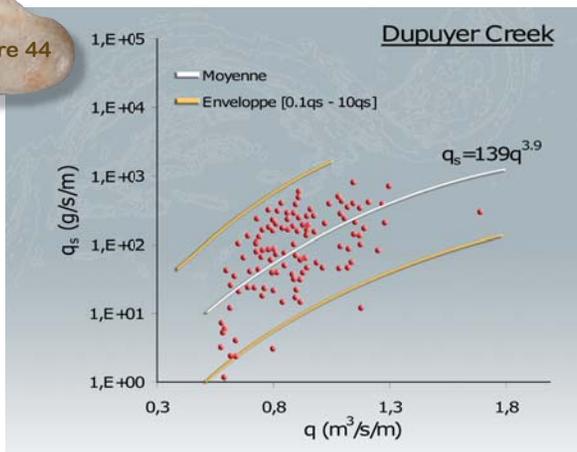
56

Les mesures réalisées tant sur le terrain qu'en laboratoire ont montré que pour une condition hydraulique donnée, le transport solide n'est pas constant, mais fluctue en permanence dans le temps, parfois de plusieurs ordres de grandeurs (Figure 44). Ces fluctuations sont soit instantanées (phénomènes de tri granulométrique), soit événementielles (phénomènes d'hystérésis, c'est-à-dire de décalage par rapport à l'hydrogramme de crue), soit saisonnières (phénomènes de recharge et de déstockage du lit).

Dans le meilleur des cas on peut donc espérer que les formules prédisent une moyenne autour de laquelle le transport solide va considérablement fluctuer, même à l'occasion d'un seul événement hydrologique.



Figure 44



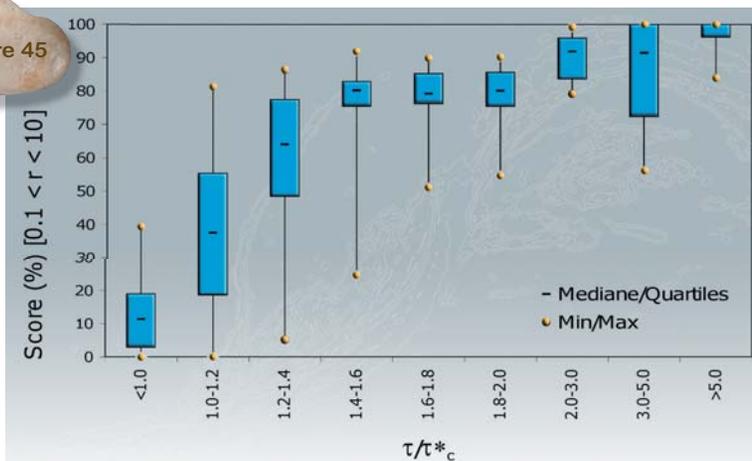
Mesure du charriage sur Dupuyer Creek (Whitaker et Potts, 2007). La figure fait clairement apparaître que plusieurs débits solides peuvent être rattachés à une même valeur du débit liquide, et ce, dans un rapport de 0,1 à 10.

C'est pourquoi le critère utilisé pour l'évaluation de la validité des formules est le pourcentage (score) de points de cet échantillon dont le ratio r [Débit solide calculé / Débit solide mesuré] est compris dans un intervalle donné. Par exemple un score de 80 % affiché pour l'intervalle $[0,1-10]$ signifie que 80 % des prédictions sont correctes à plus ou moins 10 fois la valeur calculée. Cet intervalle (deux ordres de grandeur) peut paraître large, mais il est compatible avec les fluctuations naturelles du charriage (Figure 44) et les incertitudes associées aux mesures.

2- Limites d'utilisation des formules

Les formules présentées ci-dessus ont été testées à l'occasion d'un projet financé par le Pôle Grenoblois des Risques Naturels (Programme 2008) sur des jeux de données de **transport solide mesuré** : 1317 mesures en laboratoire et 6 920 mesures de terrain (mesures instantanées au « Helley-Smith » ou piège à sédiments). Les résultats des tests sur **matériaux uniformes** sont présentés sur la figure 45. Plutôt que donner le score obtenu par chaque formule, on a représenté, pour chaque condition hydraulique (représenté ici par le rapport de contrainte τ^* / τ^*_c), un score médian associé de ses quartiles (25 % et 75 %), du minimum et du maximum. Les scores sont globalement bons (supérieurs à 80 %) et restent élevés (jusqu'à 70 %) lorsqu'on considère un intervalle plus restreint ($0,2 < r < 5$). Ces bons scores (relatifs) s'expliquent en grande partie par le fait que ces données ont été très largement utilisées pour l'établissement de la plupart des formules.

Cependant on constate qu'ils se détériorent rapidement lorsque le rapport τ^* / τ^*_c est inférieur à 1,2, ou autrement dit, lorsque l'on se rapproche des conditions de début de mise en mouvement des sédiments. Ceci s'explique par les incertitudes sur la valeur de la contrainte critique τ^*_c . Cette incertitude explique également les scores affichés pour $\tau^* / \tau^*_c < 1$ (du transport solide continue à exister même lorsque le seuil de mise en mouvement est supposé ne pas être dépassé).

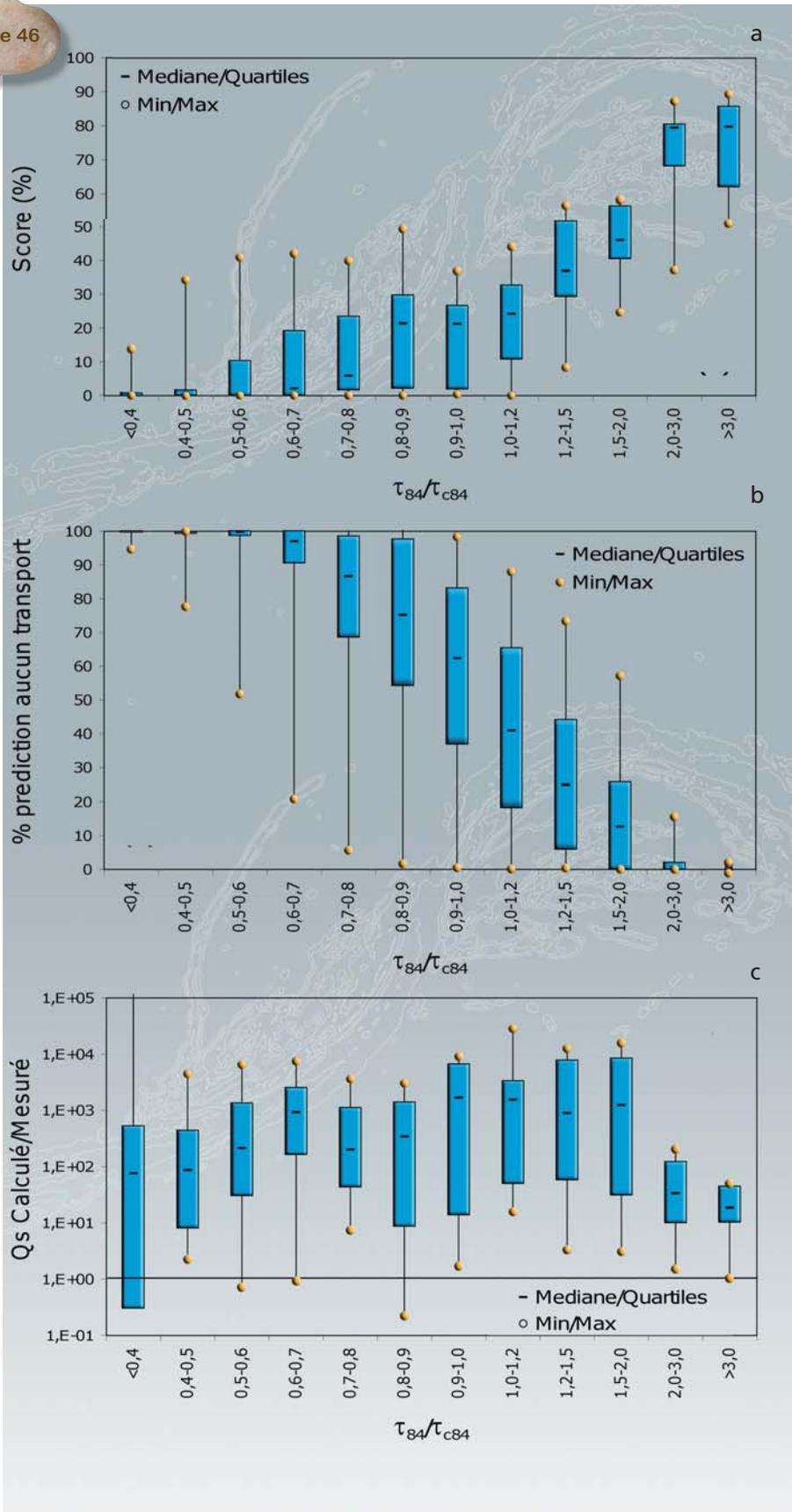


Scores (% de valeurs vérifiant $0,1 < r < 10$) obtenus par l'ensemble des modèles testés sur les mesures de laboratoire.

Un protocole similaire a été utilisé pour tester l'efficacité des formules sur les données de terrain. Cependant, contrairement aux matériaux uniformes de laboratoires, les granulométries sont étendues et une des difficultés a consisté à choisir un diamètre représentatif pour caractériser le sédiment dans le calcul du nombre de Shields (Eq.3). Comme bien souvent le transport se produit alors que les éléments les plus grossiers de surface sont immobiles, les résultats ont été analysés en fonction de la mobilité du diamètre D_{84} . Le nombre de Shields associé peut être estimé par la formule suivante (Recking 2009) :

$$\tau^*_{c84} = (1.32J + 0.037) \left(\frac{D_{84}}{D_{50}} \right)^{-0.93} \quad (6)$$

Figure 46



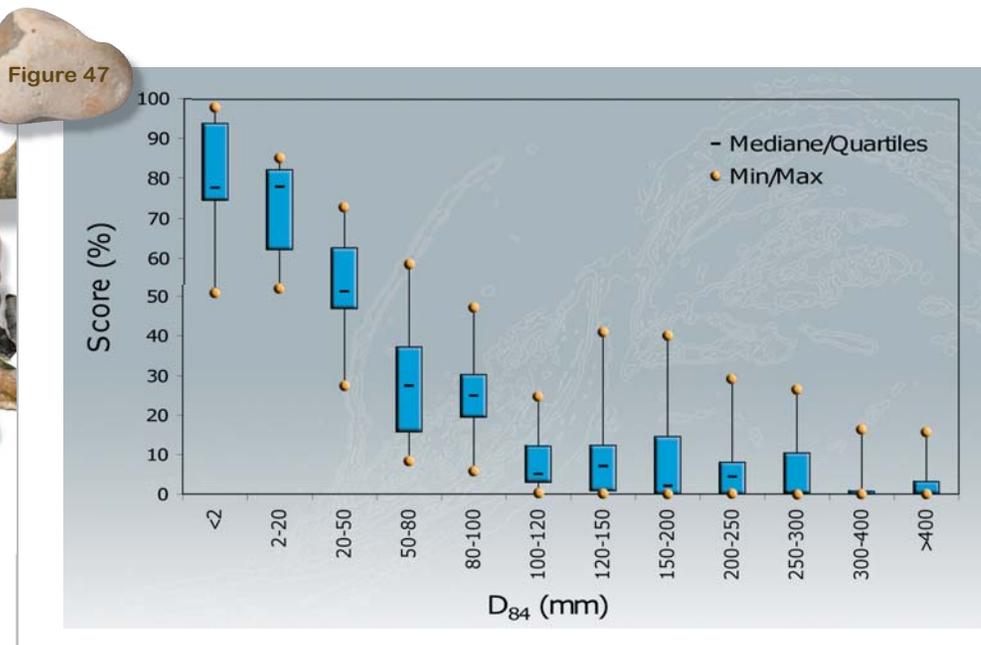
Scores obtenus par les différents modèles testés sur les mesures de terrain (6 920 valeurs).

Les résultats des tests sont présentés sur la figure 46a. Ils montrent que **la performance des modèles est globalement très faible tant que le rapport τ_{84} / τ_{c84} est inférieur à 1,2** (autrement dit, tant que les gros éléments structurants de la surface du lit ne sont pas pleinement mobiles). Les formules présentent des scores élevés uniquement lorsque les contraintes sont deux fois supérieures aux contraintes de mise en mouvement du diamètre D84.

Ce résultat rappelle celui obtenu avec les matériaux uniformes. Cependant il n'est pas anodin puisque beaucoup de cours d'eau ayant un écrêtage de leurs crues à partir du débit de pleins bords, **les contraintes de cisaillement réelles τ ne dépassent que très rarement de plus de 1,2 fois la valeur de la contrainte critique τ_c au cours d'une année hydrologique normale** (Andrews 1983 ; Mueller *et al.* 2005 ; Parker 1978 ; Parker *et al.* 2007 ; Ryan *et al.* 2002).

Une analyse en détail des résultats montre que les faibles scores au voisinage des conditions de début de mouvement sont soit dus à la prédiction d'un débit solide nul alors qu'il ne l'est pas (Figure 46b), soit à une surestimation du débit solide qui peut alors atteindre plusieurs ordres de grandeur (Figure 46c).

Une autre limitation apparaît lorsque les scores sont présentés en fonction du diamètre D84 (Figure 47).



Scores obtenus par les différents modèles testés sur les mesures de terrain (6 920 valeurs), en fonction du diamètre D84 de surface.

Les scores deviennent très faibles lorsque le diamètre D84 de la surface du lit dépasse 50 mm. Une analyse détaillée des données montre que cela est dû à la fois à la perte d'efficacité des échantillonneurs de terrain lorsque les diamètres deviennent importants (d'où une mauvaise qualité des données utilisées pour la comparaison), mais aussi à des effets de masquage et surexposition mal (voire pas du tout) pris en compte dans les formules : le transport est souvent constitué de sédiments fins dont la mobilité est réduite, car ils sont « protégés » de l'écoulement principal par les gros éléments structurant la surface du lit, la plupart du temps immobiles.

Une dernière limitation est liée aux pentes fortes (supérieures à 1 %) où les effets de masquage (Recking 2010) et les contraintes de début de transport (Recking 2009) sont plus importants.

Ainsi la plupart des formules donne des scores très honorables lorsqu'elles sont utilisées pour calculer du transport de sable ou de graviers fins sur des pentes faibles. En torrents et rivières de piémonts, les conditions d'écoulement se font souvent au voisinage du début de transport et elles doivent être utilisées avec beaucoup de précaution, si possible après confrontation à quelques mesures de transport réalisées sur le site d'étude.

3- Quelques avancées récentes

Les limitations des formules sont liées essentiellement aux incertitudes sur la valeur de la contrainte critique de mise en mouvement τ^*c , et sur les corrections de contrainte nécessaires pour tenir compte des effets de masquage et surexposition.

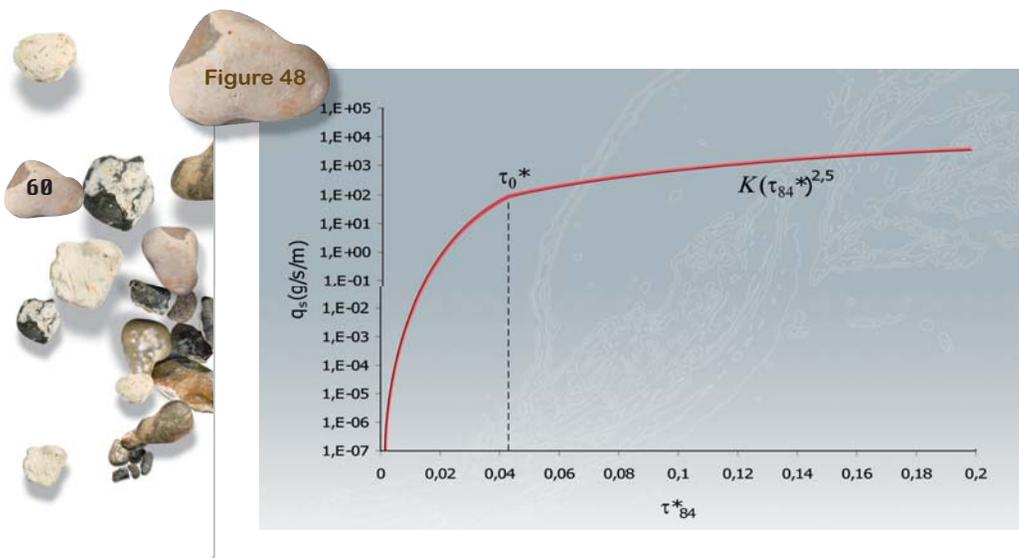
Pour palier à ces limitations, certains auteurs (Parker *et al.* 1982; Wilcock et Crowe 2003) ont proposé des formules de transport solide calculant non plus un débit solide moyen, mais un débit solide pour chaque diamètre en présence. Ces modèles ne sont plus de simples formules mais des algorithmes assez compliqués à utiliser, et surtout nécessitent de connaître la courbe granulométrique complète soit de la surface du lit, soit de la sous-couche (les deux variantes ayant été proposées). Par conséquent ils sont relativement peu utilisés en ingénierie. De plus, les tests réalisés ont montré qu'ils n'étaient véritablement fiables qu'avec un calage de certains paramètres sur des mesures de terrain.

Une nouvelle formule a été développée dans le cadre d'un programme de recherche financé conjointement par le Pôle grenoblois des risques naturels et l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR GESTRANS). L'originalité de cette approche a consisté à donner une place centrale au diamètre D84 du fait de son importance reconnue pour l'hydraulique (et donc la contrainte) et la mobilité des sédiments du lit. Les nombres de Shields τ^*84 et τ^*84c sont donc calculés pour ce diamètre (Eq.3 et 6). Les détails concernant le développement de cette formule ont été publiés par ailleurs (Recking 2010).

Les données nécessaires au calcul sont le débit Q (ou le rayon hydraulique), la largeur du lit L, la pente du lit J, les diamètres D50 et D84 mesurés par la méthode de comptage visuelle de Wolman, non tronquée. La formule de transport s'écrit :

$$q_s [g/s/m] = \frac{K \tau_{84}^{*2,5}}{1 + \left(\frac{\tau_0^*}{\tau_{84}^*}\right)^4} \quad (7)$$

La forme générale du modèle est présentée sur la figure 48.



Modèle de transport solide avec une partie asymptotique et une décroissance en zéro conditionnée par la valeur de τ_0^* (Recking 2010).

Le terme K impose l'intensité du transport aux fortes valeurs (lorsque « tout bouge ») alors que la valeur de la contrainte τ_0^* est responsable de la décroissance plus ou moins rapide de la courbe en fonction de la perte de mobilité des diamètres en présence, lorsque la contrainte se rapproche de zéro (ce terme dépend de la contrainte critique et de l'importance des effets de masquage). K et τ_0^* peuvent être calés sur des mesures de terrain (lorsqu'elles existent) pour le site d'étude mais ces termes ont également été modélisés :

$$K = 14 \rho_s \sqrt{g(s-1)D_{84}^3} \quad (8)$$

$$\tau_0^* = (5J + 0,06) \left(\frac{D_{84}}{D_{50}}\right)^{4,4\sqrt{J}-1,5}$$

Avec $\rho_s \approx 2\,650\,000\text{ g/m}^3$ et $s = \rho_s / \rho \approx 2,65$ pour les matériaux naturels. La modélisation de K et τ_0^* s'est faite en plusieurs étapes et repose sur :

- l'hypothèse que le comportement asymptotique du transport de sédiment sur le terrain (loin du début de mouvement, lorsque tous les diamètres sont en mouvement) pouvait être calqué sur les mesures de laboratoire (Recking *et al.* 2008) ;
- une évolution de la mobilité sédimentaire (i.e du D_{84}) avec la pente (Recking 2009) ;
- une analyse des faibles transports (mesures réalisées sur 33 cours d'eau de l'Idaho (King *et al.* 2004)) en fonction des effets de masquage (considérés à travers le rapport D_{84} / D_{50}) et de la mobilité du D_{84} (Recking 2010).

Lorsque D_{84} / D_{50} est inconnu il peut être remplacé par 2,1 (valeur statistiquement représentative). La contrainte τ^*_{84} doit impérativement être calculée pour le diamètre D_{84} (ou 2,1 D_{50}) à partir de l'Eq.3. Le rayon hydraulique mesuré R peut être utilisé, mais son utilisation est délicate car ce paramètre est difficile à mesurer pour une section quelconque, et aussi parce qu'il doit être corrigé pour les rivières à sable pour ne tenir compte que de la résistance de grain (voir discussions au paragraphe précédent).

Une autre approche proposée ici consiste à calculer τ^*_{84} directement à partir du débit unitaire q ($\text{m}^3/\text{s/m}$), (Tableau 10).

Tableau 10

Méthode de calcul de la contrainte à partir du débit.

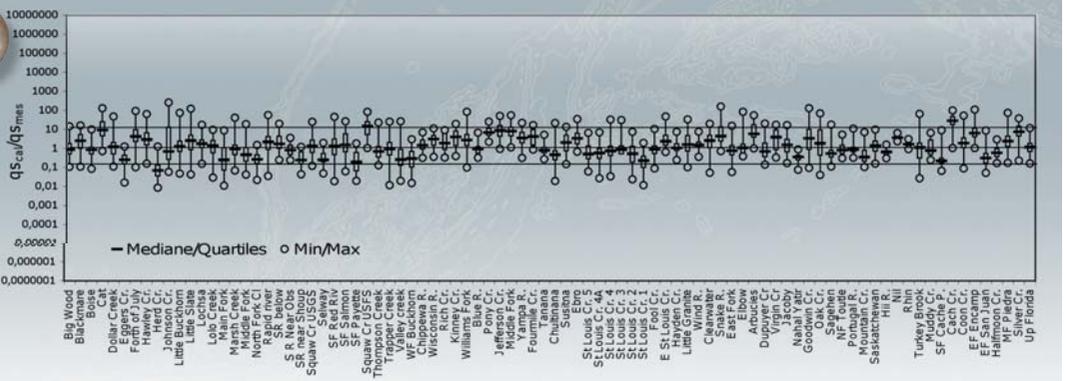
$\tau^*_{84} = \frac{J}{1.65 D_{84} [2/L + \alpha (gJ)^\beta q^\gamma D_{84}^\zeta]}$	α	β	γ	ζ
$q < 100\sqrt{gJ D_{84}^3}$ (\approx « pentes fortes »)	1,6	0,23	-0,46	-0,32
$q > 100\sqrt{gJ D_{84}^3}$ (\approx « pentes faibles »)	3,2	0,30	-0,61	-0,09

Cette formulation est dérivée d'une méthode originale de calcul de la vitesse (Rickenmann et Recking 2011) et ne nécessite aucune correction particulière (pour tenir compte des résistances de forme par exemple). Une application numérique de cette méthode de calcul du transport solide est présentée au chapitre suivant.

La figure 49 compare cette nouvelle formule avec les mesures de transport solide en milieu naturel (7660 mesures sur 89 cours d'eau). Trente trois cours d'eau (données USDA United state department of agriculture, à gauche sur la figure) ont servi à construire le modèle et les 56 autres (publications USGS United state geological survey, USFS United state forest service et autres, à droite sur la figure) ont été utilisés comme sites tests (« blind test »).

On peut constater que pour tous les cours d'eau, la médiane et les quartiles sont dans l'intervalle [0,1-10], ce qui est en accord avec les fluctuations naturelles associées au charriage (Figure 44) et les incertitudes sur les mesures (de la largeur participant réellement au transport, de l'hydraulique, et du débit solide).

Figure 49

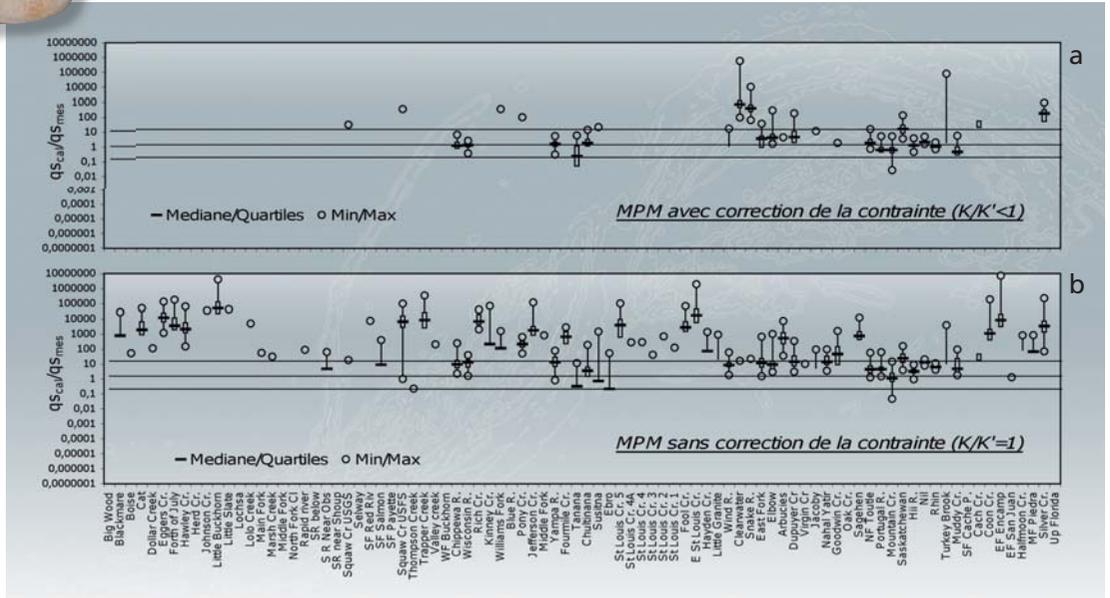


Les (a) et (b) dans les légendes du livre sont réservées Comparaison de la nouvelle formule avec les débits solides mesurés sur 89 cours d'eau : 33 dans l'Idaho (à gauche) et 56 autres cours d'eau (à droite, Blind test).

À titre de comparaison, la figure 50 présente les mêmes calculs réalisés avec la formule de Meyer-Peter & Mueller (probablement la plus utilisée en ingénierie) considérée avec et sans correction de la contrainte (via le coefficient K / K'). Les débits solides calculés sont soit nuls soit largement surestimés, excepté pour quelques cas (rivières à sable et à graviers fins) ou la condition $\tau^* / \tau^*c \gg 2$ est vérifiée. Il est difficile à ce stade d'être affirmatif sur les limites d'utilisation de la nouvelle formule. Le « blind test » réalisé sur une large gamme de pentes ($0,0002 < J \text{ (m/m)} < 0,07$), de diamètres ($0,9 < D \text{ (mm)} < 558$) de largeurs ($0,3 < L \text{ (m)} < 200$) et de contraintes ($0,06 < \tau84^*/\tau^*c84 < 41$) n'a pas montré de limitations particulières, et les scores de 86 %, 72 % et 38 % ont été obtenus lorsque $r = q_{\text{scal}} / q_{\text{smes}}$ est considéré dans les intervalles $[0,1-10]$, $[0,2-5]$ et $[0,5-2]$.



Figure 50



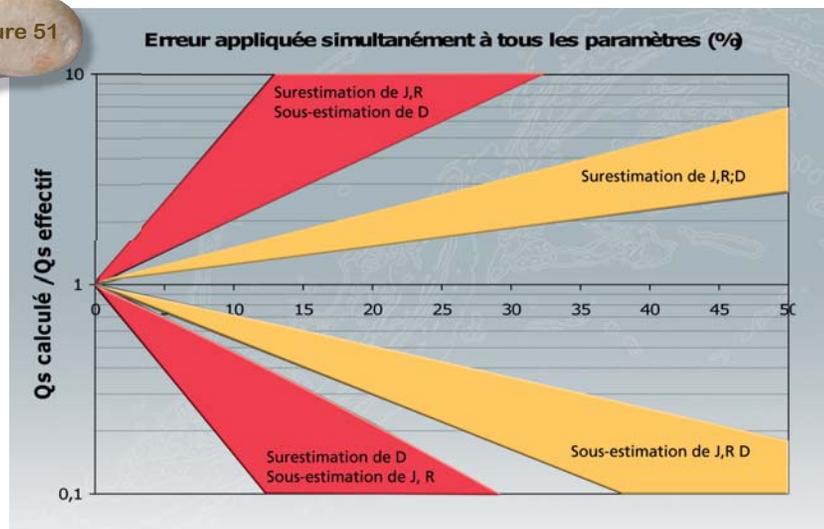
Comparaison de la formule de Meyer-Peter & Mueller (considérée avec et sans correction de la contrainte) avec les débits solides mesurés sur 89 cours d'eau (a) 33 dans l'Idaho et (b) 56 autres cours d'eau (utilisés en « blind test »).

Cependant, les expressions de K et $\tau0^*$ ont été proposées pour le cas général et ne seront peut-être pas valides dans certaines situations particulières, comme par exemple aux très fortes pentes ($> 5\%$) où le charriage présente de nombreuses spécificités qui ne pourront être abordées dans le cadre de cet ouvrage. Une solution, lorsque c'est possible, consistera à caler $\tau0^*$ à partir de quelques mesures de terrain.

Sensibilité des formules aux données d'entrée

En considérant que l'équation présentée ci-dessus est suffisamment représentative de la charge solide susceptible d'être transporté en moyenne par un cours d'eau, on peut tester sa sensibilité aux différents paramètres utilisés dans le calcul du nombre de Shields (diamètre, pente, rayon hydraulique). Etant donné que dans la pratique non pas un mais tous les paramètres seront vraisemblablement entachés d'une erreur, on a considéré sur la figure 51 les effets combinés de ces erreurs sur les résultats escomptés.

Figure 51



Effet combiné des erreurs sur le calcul du débit solide. Quatre enveloppes sont représentées selon que les paramètres sont surestimés ou sous-estimés, mais aussi selon que les effets de ces erreurs se cumulent ou se neutralisent.

Les erreurs (données en % sur l'axe des abscisses) sont appliquées soit positivement soit négativement à chaque paramètre R, J, D. Le diamètre d'une part, la pente et le rayon hydraulique d'autre part, agissent de façon antagoniste dans le nombre de Shields si l'erreur est comptée de façon identique sur chaque paramètre. L'enveloppe des erreurs induites sur le débit solide calculé est alors minimisée (en orange sur la figure). Par contre si l'erreur associée au diamètre et aux autres paramètres évolue inversement, il n'y a plus compensation mais cumul des effets sur le calcul du transport (enveloppe rouge sur la figure 51).

Ces enveloppes sont données pour illustrer la forte sensibilité des formules, mais le calcul d'incertitude doit être réalisé au cas par cas. Il faut garder à l'esprit que du fait des nombreuses incertitudes inhérentes à la définition des paramètres d'entrée (diamètres des grains, largeur active de transport, débit, pente), une erreur dans un rapport de 1 à 2, voire de 1 à 5, peut être considérée comme très raisonnable pour le calcul du transport solide moyen.

De l'utilité des formules de transport

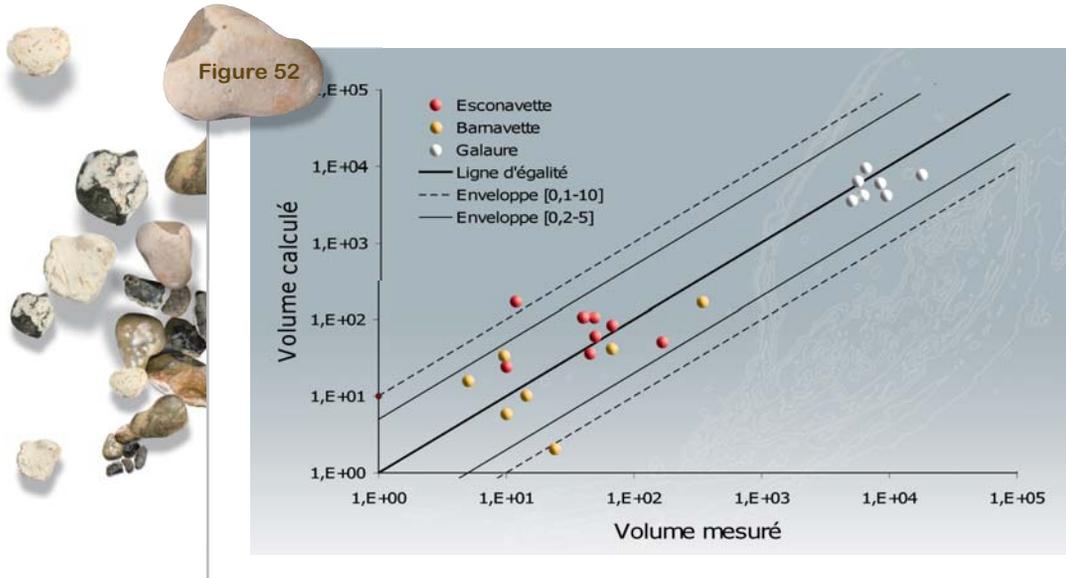
Etant donné leur degré de précision et leur grande sensibilité aux paramètres d'entrée, quelle peut être l'utilité des formules de transport ?

Pour essayer de répondre à cette question, nous avons testé l'aptitude des formules présentées au paragraphe précédent à reproduire des bilans sédimentaires (programme PGRN 2008, Pôle Grenoblois d'études et des recherches pour la prévention des Risques Naturels, en collaboration avec le service RTM 38). Pour cela des volumes mesurés (remplissage de fosses d'extraction ou volumes de curage) sur trois cours d'eau (la Barnavette, l'Esconavette et la Galaure) ont été comparés aux volumes simulés à partir d'une connaissance des chroniques hydrologiques, des pentes et des granulométries de surface (déterminée par la méthode Wolman). Les valeurs mesurées sont des cumuls à l'échelle de la crue pour la Barnavette et Esconavette (Liebault et Laronne 2008) ou à l'échelle interannuelle pour la Galaure (curages de la Compagnie Nationale du Rhône à la confluence avec le Rhône). Ce sont donc des moyennes qui « lissent » les fluctuations naturelles et instantanées du transport (Figure 52), permettant ainsi une comparaison directe avec les moyennes calculées.

Le principe a consisté à décomposer les hydrogrammes de crue en pas de temps égaux (30 minutes pour la Barnavette et l'Esconavette et 1 jour pour la Galaure), à calculer le débit solide associé au débit liquide pour chaque pas de temps, et enfin à cumuler les résultats pour tous les pas de temps. Pour ces trois cours d'eau

alpins très encaissés l'essentiel du transport est assuré par des contraintes fortes (avec un rapport τ^*84 / τ^*c84 toujours supérieur à 1,5) favorables aux calculs. Les résultats obtenus avec l'ensemble des formules ont été très contrastés, mais globalement les limitations mises en évidence pour les mesures de débit solide instantané (voir paragraphe précédent) ont été retrouvées, avec une surestimation des volumes transportés par l'Esconavette (pente 2,4 % et diamètre D84 de 80 mm) pour pratiquement toutes les formules.

La figure 52 présente le résultat des calculs effectués avec la formule présentée au paragraphe précédent (Recking 2010). La plupart des volumes mesurés ont correctement été prédits dans une fourchette de 1 à 10, voire même de 1 à 5, y compris pour l'Esconavette (les ratios des volumes totaux calculés et mesurés pour la Barnavette, l'Esconavette et la Galaure sont, respectivement 0,6, 1,4 et 0,7), ce qui peut être considéré comme très satisfaisant étant donné les incertitudes liées aux mesures et aux données d'entrée.



Bilans en volume calculés pour trois cours d'eau alpins avec la formule de transport (Recking 2010).

En fonction des données mesurées disponibles, les formules de transport pourront aussi être « ajustées » (calage) pour coller au mieux aux spécificités du site étudié (mais il est préférable dans la mesure du possible de récolter l'avis d'un spécialiste).

■ Prévoir l'évolution morphologique des cours d'eau

Comment définir un état d'équilibre dynamique, et quelles sont les oscillations prévisibles autour de la valeur d'équilibre « moyen » ?

Méthodes comparatives et principe d'équilibre

Avant de procéder à un quelconque calcul, il est très important de commencer par déterminer les caractéristiques géométriques naturelles du cours d'eau (plan, long, travers), avant aménagements éventuels ou sur un cours d'eau de même type non perturbé. Ces données pourront servir de référence.

Par ailleurs de nombreux signes sur le terrain permettent de juger de la dynamique d'un cours d'eau et de son état par rapport à l'équilibre (cf chapitres précédents et suivants). Une érosion localisée ne permet aucune conclusion. Par contre de nombreux indices d'incision présents sur un linéaire important indiquent probablement un enfoncement généralisé du lit, et donc un déficit sédimentaire par rapport à un état antérieur, ou un processus d'érosion régressive.

Les équations dites « du régime »

Des équations ont été produites pour tenter de définir la « géométrie d'équilibre » d'un cours d'eau. Les premières études sur les concepts de géométrie d'équilibre ou de « régime » ont été menées en Inde et au Pakistan entre la fin du XIX^e siècle et les années 30, par des ingénieurs anglais cherchant à construire des canaux les plus stables possibles afin de limiter les coûts de maintenance. Ils ont analysé les caractéristiques géométriques, hydrologiques et sédimentologiques de canaux déjà construits et ont retenu les valeurs des canaux les plus stables, c'est-à-dire ceux qui évacuaient vers l'aval les Q et Qs imposés, sans déformation majeure de leur lit (notion d'équilibre dynamique).

Ils en ont déduit les premières lois empiriques des canaux en équilibre dynamique, dites lois ou « équations de régime ».

Par la suite, la même démarche a été appliquée par d'autres chercheurs sur des rivières naturelles et des modèles physiques (années 1950 à 90).

De nombreuses équations ont ainsi été élaborées qui permettent d'approcher les valeurs « d'équilibre » de largeur, profondeur, pente en fonction de deux variables majeures : le débit de pleins bords Qb et la granulométrie du lit. Les équations données ci-après (Parker *et al.* 2007) proviennent de l'ajustement de données recueillies sur 72 cours d'eau couvrant une large gamme de pente (0,003 % à 3 %), de largeur et de D50. Tous les paramètres sont adimensionnalisés de la façon suivante (l'indice b désignant le « plein bord »):

$$\hat{Q} = \frac{Q_b}{\sqrt{gD_{50}D_{50}^2}}; \quad \hat{L} = \frac{L_b}{D_{50}}; \quad \hat{H} = \frac{H_b}{D_{50}}$$
$$\hat{H} = \begin{cases} 0.368\hat{Q}^{0.405} & \text{lits de graviers} \\ 3.01\hat{Q}^{0.321} & \text{lits sableux} \end{cases} \quad (9)$$

$$\hat{L} = \begin{cases} 4.87\hat{Q}^{0.461} & \text{lits de graviers} \\ 0.274\hat{Q}^{0.565} & \text{lits sableux} \end{cases} \quad (10)$$

$$J = \begin{cases} 0.0976\hat{Q}^{-0.341} & \text{lits de graviers} \\ 6.42\hat{Q}^{-0.397} & \text{lits sableux} \end{cases} \quad (11)$$

Ces équations donnent des résultats intéressants pour la largeur (qui s'ajuste généralement plus vite que la pente si les berges sont érodables) et la profondeur, mais restent peu précises pour la pente, les données disponibles étant réparties dans un rapport de 1 à 10 autour de la droite d'ajustement.

Plus précisément, le rapport des valeurs mesurées et calculées est compris dans une fourchette allant de 1 à 3 pour ce qui concerne la largeur et la hauteur et de 1 à 15 pour la pente.

Ce type de formule peut être utilisé, mais avec vigilance et modestie, pour vérifier si une section d'écoulement correspond sensiblement à sa valeur d'équilibre ou pour prédéfinir approximativement une section de projet. Elles devront être utilisées avec encore plus de prudence pour définir une **pente d'équilibre**.

La pente de non transport

Les équations du régime présentées au paragraphe précédent donnent le profil d'équilibre atteint par un cours d'eau transitant vers l'aval les débits Q et Qs imposés.

Mais dans certains cas il peut y avoir tarissement de la source sédimentaire Qs (en aval d'une extraction ou d'un barrage par exemple). A débit liquide inchangé, le cours d'eau va alors naturellement éroder son lit conformément au principe d'équilibre, jusqu'à atteindre une nouvelle pente en dessous de laquelle plus aucun sédiment (d'une certaine taille, aux choix de l'expérimentateur...) ne pourra être mis en mouvement par les débits considérés (étant admis que les berges sont fixées car sinon elles participent aux apports solides et Qs devient alors > 0).

Cette nouvelle pente de « non transport » J_{NT} peut se calculer facilement en considérant que pour la hauteur d'eau de plein bord, la contrainte τ exercée sur le fond coïncidera avec la contrainte critique τ_c de mise en mouvement des sédiments en présence.

En combinant les équations de Manning-Strickler (Eq.2) et de Shields (Eq.3) on obtient la relation suivante (on fait ici l'hypothèse d'un tronçon homogène où seule la rugosité de fond – sédiments– s'oppose à l'écoulement et est prise en compte dans le coefficient de Strickler K), où $q = Q / L$ est le débit spécifique en $m^3/s/m$, pour un matériau naturel de densité $\rho_s = 2650 \text{ Kg/m}^3$:

$$J_{NT} = \left(\frac{K}{q} \right)^{6/7} (1.65 D_{50} \tau_c^*)^{10/7} \quad (12)$$

Avec $\tau_c^* = 0,03$ pour les rivières à sable et $0,045$ pour les rivières à graviers.

NB La formule est ici présentée avec le diamètre médian D_{50} de la granulométrie du lit, mais les mécanismes en jeu sont complexes et ce diamètre doit être adapté au cas par cas. Par exemple si l'érosion de la couche de surface met à jour des couches sous-jacentes à granulométrie plus fine, le diamètre caractéristique sera surestimé, ainsi que la pente finale après érosion. Inversement si un pavage se met en place avant que ne soit atteinte la pente de non transport calculée pour le diamètre considéré, la pente finale sera sous-estimée.

Utilisation des formules de transport

Si les apports solides sont non nuls, la même démarche peut être utilisée pour calculer la nouvelle pente d'équilibre du lit après un aménagement, mais en utilisant cette fois une formule de transport.

On peut par exemple s'interroger sur les conséquences de l'endiguement d'un tronçon homogène dont les caractéristiques sont les suivantes : Largeur 10 m, débit morphogène $2 \text{ m}^3/s$, pente 1 %, D_{50} 12 mm. Si ce tronçon est considéré à l'équilibre (par connaissance historique du site, inspection de terrain, ou par application d'une des méthodes déjà citées), on peut estimer le débit solide moyen transporté avec une formule appropriée. Considérons la formule présentée au paragraphe précédent (Recking, 2010). Le calcul (en prenant $D_{84}=2,1D_{50}$) donne un débit solide moyen égal à 500 g/s .

Si l'endiguement prévoit de réduire la largeur du lit à 5 m, alors le débit unitaire passerait de $0,2$ à $0,4 \text{ m}^3/s/m$, et, pour une pente de 1 %, la formule indique une nouvelle capacité de transport de 1370 g/s (soit trois fois plus). Si on considère que le flux qui provient de l'amont reste lui inchangé (soit 500 g/s), on constate qu'il y aura déficit d'apport depuis l'amont après aménagement par rapport à la nouvelle capacité de transport. Par conséquent l'écoulement se chargera directement dans le lit, produisant une érosion du fond. La formule de transport indique que la nouvelle pente qui permettra le transit des apports amont est $0,63 \%$.

Cet exemple très simple peut être appliqué à de nombreuses situations pour évaluer les grandes tendances évolutives de tronçons à géométrie homogène. Cependant, dès que l'on considère un très long linéaire, avec des tronçons à sections moyennes et pentes variables, la modélisation numérique est recommandée.

Par ailleurs, comme les résultats des formules sont utilisés en relatif et non en absolu, l'utilisation de ces dernières est moins contraignante que, par exemple, pour calculer un bilan sédimentaire. Pour le cas considéré ci-dessus, la formule de Rickenmann donnerait par exemple, les mêmes variations de pente mais avec des débits solides très différents.

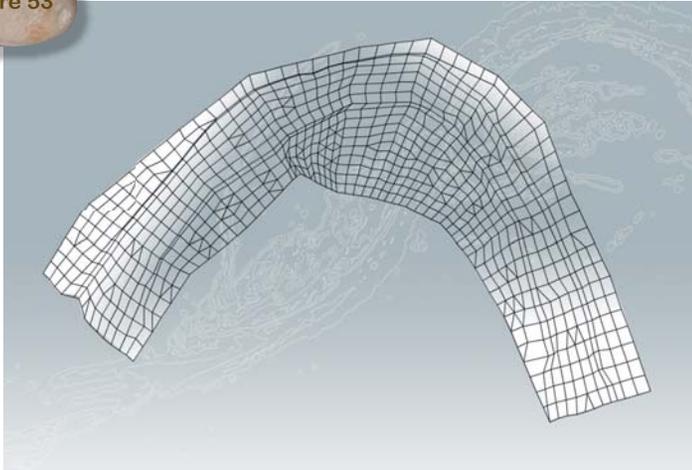
Modélisation numérique

Le tronçon considéré doit d'abord être discrétisé en un maillage régulier à partir de sections en travers judicieusement choisies. Il n'est pas nécessaire de multiplier le nombre de sections à l'infini. Ces dernières doivent au minimum rendre compte des changements brusques de géométrie et des singularités (ouvrages), les segments homogènes pouvant ensuite être interpolés entre chacune de ces sections clés.

Sur la base de ce maillage, les modèles (ou codes) numériques résolvent de proche en proche les équations de l'hydraulique (équations de Barre de Saint-Venant associées à une loi de frottement) et du transport (équation d'Exner associée à une formule de transport). Pour chaque pas de temps (celui choisi pour propager



Figure 53



Exemples de maillages 2D de l'Aveyron (A. Paquier comm.pers.).

l'hydrogramme) et d'espace (celui choisi pour le maillage), les codes calculent les valeurs des caractéristiques hydrauliques (vitesse, hauteur, contrainte au fond) et une valeur du transport solide associé. C'est la différence entre ce qui sort d'une maille et la capacité de transport de la maille suivante qui détermine s'il y a dépôt ou érosion dans cette dernière.

Certains codes fonctionnent à géométrie fixe et ne font que transiter une charge solide. Leur intérêt est donc très limité pour déterminer l'évolution morphologique d'un cours d'eau.

Cependant la plupart des codes développés aujourd'hui sont capables de modifier la géométrie du lit en fonction du transport solide calculé à chaque pas de temps. Les codes les plus élaborés permettent même un calcul différencié pour chaque classe granulométrique et proposent un calcul de l'évolution de la granulométrie du lit. Néanmoins plus un code est sophistiqué et plus il est **gourmand en données d'entrée et de calage**.

Les codes nécessitent de définir des conditions aux limites :

- un hydrogramme de crue ;
- un apport solide en entrée ;
- et dans le cas d'un écoulement fluvial avec contrôle aval, une loi hauteur débit imposée à la section aval.

La principale difficulté consiste en général à définir l'apport solide provenant de l'amont. Dans le meilleur des cas on disposera de mesures de terrain pour le site étudié. Une autre alternative consiste à considérer qu'en amont de la zone d'étude, la rivière fonctionne à l'équilibre et à utiliser une formule de transport appropriée pour estimer un apport depuis un tronçon amont fictif (Ferguson et Church 2009).

Les modèles monodimensionnels sont en général suffisants pour traiter l'évolution du profil en long lorsqu'on a à traiter un cours d'eau à chenal unique peu dynamique en plan. Lorsque la dynamique latérale est forte on peut être amené à utiliser des codes bidimensionnels.

Cependant quel que soit le type de calcul, on comprend bien, avec ce que nous avons vu précédemment, que les modèles ne sont pas des outils « presse bouton ». Leur mise en œuvre nécessite un haut niveau d'expertise et surtout, une parfaite connaissance préalable du fonctionnement hydromorphologique du cours d'eau étudié. Un modèle numérique construit de façon pertinente et avec des données de qualité, peut alors être un puissant outil prospectif.

Ce type d'outil a été utilisé pour reproduire de nombreuses situations telles que l'évolution d'un pavage, l'affinement de la granulométrie vers l'aval, le recouplement de méandres, l'érosion des matériaux issus d'un glissement de terrain, les conséquences de l'enlèvement d'un barrage, ou encore l'évolution à court terme (20 ans) du profil topographique et granulométrique.

Une synthèse intéressante sur l'utilisation des codes numériques 1D a été proposée par (Ferguson et Church 2009).



Synthèse : quelle méthode utiliser en fonction des objectifs de l'étude ?

Ne pas restreindre un outil à une situation donnée et montrer qu'il existe une panoplie d'outils qui peuvent être mis en œuvre pour chaque situation (unique) rencontrée sur le terrain, a été l'objectif de ce chapitre.

On peut néanmoins présenter quelques exemples de mise en œuvre de ces différents outils en fonction de quelques objectifs d'étude (Résumé en Tableau 11).

Détermination d'une érosion progressive en aval d'un barrage

En piégeant les sédiments provenant de l'amont, les barrages créent une rupture du transit sédimentaire qui peut affecter durablement la pente d'équilibre. En effet, lors des forts événements hydrologiques le barrage fonctionnera par surverse. La puissance disponible (produit de la pente par le débit) ne sera alors plus compensée par un apport de sédiments depuis l'amont, et la fourniture sédimentaire se fera directement au détriment du stock disponible dans le lit en aval de l'ouvrage (érosion).

La nouvelle pente pourra être estimée à partir de la pente de non transport calculée à partir d'un débit morphogène (qui devra dans ce cas tenir compte des modalités de gestion des surverses). Mais cette pente pourra aussi être conditionnée par les opérations de chasse permettant une restitution épisodique de la charge stockée en amont du barrage : en fonction de l'intensité (en débit) et de la fréquence des opérations, ces chasses auront un impact plus ou moins fort sur la morphologie du lit. Une modélisation numérique est recommandée pour optimiser l'efficacité des chasses.

Détermination d'une érosion régressive en amont d'un seuil que l'on va supprimer

Considérons un tronçon de rivière dont la cote aval est calée par un seuil et que ce tronçon fonctionne à l'équilibre (l'ouvrage est ancien et la morphologie du lit est stable). Quelles peuvent être les conséquences de la suppression de ce seuil ? La simple application du principe d'équilibre (balance de Lane) permet d'apporter des réponses non seulement qualitatives, mais aussi quantitatives. Au droit de la suppression de l'ouvrage, on va créer une pente localement très forte et donc une puissance (débit x pente) excessive par rapport aux apports solides provenant de l'amont. Pour compenser ce déséquilibre l'écoulement va, comme dans le cas précédent, puiser les sédiments directement dans le lit au droit de la suppression d'ouvrage. Cette érosion locale va se produire de proche en proche vers l'amont : l'érosion est dite « régressive ». La progression vers l'amont de ce front érosif n'a aucune raison de s'arrêter tant qu'il ne rencontrera pas un point dur (seuil naturel ou non) ou que la pente n'aura pas atteint sa valeur d'équilibre. Sur le long terme, ce tronçon retrouvera sa pente initiale (car le tronçon était supposé fonctionner à l'équilibre), mais il sera fortement abaissé, son nouveau niveau de calage étant la cote du lit en aval de l'ouvrage avant suppression. Les conséquences sont donc potentiellement désastreuses, pour l'environnement, mais aussi pour les fondations d'ouvrages. Cet abaissement du lit pourra dans certains cas être atténué par l'onde sédimentaire créée par l'évacuation vers l'aval des sédiments érodés. Cette atténuation sera dans tous les cas limitée et son importance dépendra de la morphologie du lit en aval. Une modélisation numérique peut être nécessaire pour estimer l'importance et les répercussions de cette onde.

Détermination d'une pente d'équilibre par tronçon homogène

La détermination d'une pente d'équilibre est certainement un des exercices les plus délicats. Etant donné tout ce qui a été rappelé plus haut, il n'y a pas d'outils permettant de répondre de façon certaine et précise à cette question. La recherche de la pente d'équilibre pour un tronçon de rivière donné relève plus de la recherche **d'un consensus** sur le fonctionnement de ce cours d'eau. Le cas idéal est lorsqu'on a affaire à un cours d'eau dont la morphologie est connue et stable depuis plusieurs décennies, et qui pourra être considéré comme fonctionnant à l'équilibre. Dans le cas contraire, il est important de replacer le cours d'eau dans une

dynamique (érosion ou aggradation) par une analyse des **informations historiques** disponibles (topographie, volumes curés etc.). Pour finir connaissant les débits et le transport solide, on peut inverser l'utilisation des **formules de transport** pour en déduire une pente d'équilibre. Les débits peuvent être connus aux stations hydrométriques, ou par une étude hydrologique appropriée, mais le transport solide est rarement connu (sauf en cas de campagne de mesure spécifique ou lorsque des volumes de curage sont disponibles). Une façon de procéder consiste à isoler le tronçon d'étude, et de considérer un tronçon amont (caractérisé par des grandeurs moyennes représentatives de la rivière en amont du secteur d'étude) comme fonctionnant à l'équilibre sur le court et moyen terme. L'application d'une formule de transport adaptée à ce tronçon amont permet alors de déterminer un apport solide moyen qui alimente le tronçon d'étude (Ferguson et Church 2009).

Calcul localisé d'un volume de curage au droit d'une zone à risque inondation (traversée urbaine par exemple)

On trouvera autant de situations pouvant générer des dépôts sédimentaires à l'origine d'aggravation des inondations que de combinaisons possibles entre les différentes formes de dynamique sédimentaire, de profil du lit (courbure, pente...) et d'aménagement de cours d'eau (calibrage de section, ouvrages en travers, etc...). Il ne peut y avoir de réponse unique à cette question.

La première question qu'il faut se poser est de savoir si le dépôt correspond à un épiphénomène ou s'il est la conséquence du transit sédimentaire du cours d'eau fonctionnant à l'équilibre :

- dans le premier cas (dépôt favorisé par un encombrement temporaire du cours d'eau (embâcle de bois), par des travaux, etc.), un curage localisé n'aura pas de conséquences sur le profil d'équilibre ;
- en revanche, s'il s'agit de dépôts récurrents au même endroit, il pourra s'agir soit des conséquences des conditions hydrodynamiques trop faibles liées à une géométrie artificielle du lit (sur-élargissement lié à un recalibrage, amont d'un seuil, d'un pont), soit à l'avancée et au stockage transitoire de la charge sédimentaire sous forme d'ondes (dunes...). Ce type de dépôt participe au transit normal de la charge solide et le curage devra être répété dans le temps, ce qui pourra avoir des conséquences sur le long terme immédiatement en aval de la zone concernée. Pour les secteurs véritablement à problème, la solution consisterait alors soit à réinjecter les matériaux curés, soit à effectuer des travaux pour redynamiser le transit sédimentaire sur la zone concernée. Cette dernière solution suppose une optimisation des sections d'écoulement par une étude fine de l'hydrodynamique (**modélisation numérique**). C'est souvent une **étude économique** qui permettra de choisir entre l'une ou l'autre des solutions.

Tableau 11

Tableau de synthèse de l'utilité potentielle des différents outils en fonction des objectifs de l'étude.

	Approche géomorphologique ⁽¹⁾	Formules de transport	Modèles numériques	Modèles numériques 2D ou 3D	Modèles physiques
Evaluation globale du transport solide échelle bassin	***	*			
Evaluation globale du transport solide échelle tronçon	***	**	*		
Recherche pente d'équilibre ou de non transport échelle tronçon ou multi-tronçons	***	***	**		
Recherche pente d'équilibre ou de non transport échelle tronçon ou multi-tronçons	***	***	**		
Dimensionnement de curages localisés	***	*	*	*	
Plan de gestion	***	***	*		
Expertise d'un évènement extrême	***	***	**	**	
Recalibrage de géométrie	***	***	**		
Dimensionnement de pont sur rivière à fort transport solide	***	**	**	**	**
Effet d'ouvrages localisés	***	**	**	**	**

* intéressant (à décider au cas par cas)
 ** utile (à décider au cas par cas)
 *** indispensable

(1) Compréhension de la dynamique sédimentaire sur la base de topographie, photographies, mesures d'extraction, témoignages



Transport solide grossier & fonctionnement écologique

Les alluvions grossières transportées par les cours d'eau, qu'elles soient submergées ou exondées selon les débits, sont essentielles au bon fonctionnement des biocénoses tant aquatiques que terrestres (celles vivant notamment sur les bancs alluviaux exondés une partie de l'année. On parle de **biocénose ripariales**).

Dans la relation à la biologie, il faut distinguer plusieurs fonctions du substrat :

- une fonction de **lieu de vie** où les organismes aquatiques et ripariaux utilisent les interstices et la porosité des sédiments comme habitat ;
- une fonction de **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 ;
- une fonction d'abri vis-à-vis des conditions hydrauliques et des prédateurs.

Chacune de ces fonctions biologiques est liée aux caractéristiques particulières du sédiment (granulométrie, porosité, conductivité hydraulique, mobilité) et aux conditions hydrodynamiques qui prévalent à sa surface (vitesse d'écoulement et hauteur d'eau).

Il faut noter enfin que c'est à la surface (biofilm) et au sein même du substrat submergé que se déroulent la très grande majorité des processus biologiques de dégradation de la matière organique et donc des **cycles biogéochimiques** qui y sont associés (cycle de l'azote et du phosphore notamment). Le substrat alluvial submergé est donc un **élément important des processus d'auto-épuration** dans les cours d'eau.

Biocénoses aquatiques

■ Les sédiments grossiers : lieu de vie de la faune aquatique

Les substrats de fond des cours d'eau constituent, avec les supports végétaux et les débris ligneux, un lieu de vie pour de très nombreuses espèces composant les biocénoses aquatiques (Cummins et Lauff, 1969, Gregory, 2007).

La très grande majorité des larves d'invertébrés vivent enfouies dans le sédiment. C'est le cas aussi d'un certain nombre de mollusques notamment les bivalves tels que les unio ou les anodontes. On y trouve aussi certains stades de développement (œufs et larves notamment) de plusieurs espèces de poissons (truites, saumons, lamproies).

Tous ces animaux 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.

Au sein de la faune benthique, on distingue celle utilisant la couche superficielle du substrat (les 20-30 premiers centimètres) et celle capable de coloniser des couches plus profondes ou des zones alluvionnaires à sous écoulements de nappe (zones dites hyporhéiques). Beaucoup d'espèces vivant dans ce dernier type de milieu sont d'ailleurs capables de se développer sans écoulement superficiel et supportent même des phases de dessiccation temporaires (Standford et Ward, 1988 ; Tabacchi, 2006).

Notons que la faune de surface est numériquement plus abondante que celle des couches plus profondes avec des valeurs de densités pouvant être 100 fois supérieures (Strommer et Smock, 2006).



Figure 54



a-b © G. Archambaud

Exemple d'invertébrés aquatiques (*simulidae*) vivant sur (a), et sous (b) les éléments grossiers du substrat de l'armure.

Parmi les espèces composant cette faune benthique, il faut différencier celles qui utilisent les interstices existants entre les fractions grossières du substrat et celles enfouies directement dans des fractions plus fines (sables, vases, dépôts organiques). En effet, si toutes les fractions granulométriques sont susceptibles d'être utilisées, ce sont en général les substrats alluviaux constitués de fractions d'un diamètre supérieur à 2 cm qui constituent l'**habitat le plus biogène** pour la faune (Willians et Mundie, 1978; Jowett *et al.*, 1991). En général, les plus fortes diversités sont observées dans des sédiments d'un diamètre moyen proche de 4-5 cm (Evrard et Micha, 1995).

Chez les mollusques, certains stades colonisent des substrats plus ou moins grossiers. Les larves de **moule perlière** ou d'**Unio crassus** s'enfouissent ainsi dans des granulométries de graviers et sables grossiers (Moog *et al.*, 1998 ; Hastie *et al.*, 2001).



Figure 55



a © flickr -b © M. Holmen

(a) moule perlière sur son substrat de pierres et cailloux, (b) *Ancylus fluviatilis*.

Les surfaces occupées par des substrats alluviaux de granulométrie et de nature variées sont donc un facteur clé du fonctionnement biologique du cours d'eau via notamment sa capacité d'accueil pour la faune aquatique. La « qualité » du sédiment, qui peut être exprimée en termes de porosité (volume des interstices) et/ou de conductivité hydraulique (capacité du sédiment à laisser transiter les flux d'eau) est également un facteur déterminant pour le développement de la faune benthique et la réalisation des processus biologiques auxquels elle participe (dégradation de la matière organique et cycles biogéochimiques associés).

L'importance du volume des interstices favorise le piégeage de matières végétales et de détritiques qui constituent la base de la chaîne alimentaire et assurent ainsi une colonisation et un développement optimal de certaines larves d'invertébrés aquatiques, notamment les déchetteurs (Peckarsky, 1980).

Au sein même de ce substrat alluvial, selon les caractéristiques hydrauliques de la couche limite (vitesse d'écoulement) ou les conditions physico-chimiques, les larves vont migrer plus ou moins profondément dans le sédiment (Dole-Olivier *et al.*, 1997). Plus l'épaisseur du substrat alluvial est importante, plus les possibilités de refuge sont élevées et plus la faune d'invertébrés est capable de résister à une modification brutale des caractéristiques environnementales. La présence d'alluvions grossières assure donc une **meilleure résilience** à la faune benthique, notamment après les épisodes de crue.

Ces épisodes peuvent remanier plus ou moins fortement les alluvions sur une épaisseur variable. Différentes études ont permis de démontrer que **les plus fortes diversités d'invertébrés étaient observées dans des tronçons où le substrat alluvial présentait une mobilité moyenne. Les faibles mobilités (souvent sous forme de pavage)** liées à l'absence de crue et/ou de transit de sédiments grossiers sont très souvent associées à de faibles porosités et des conditions physicochimiques dégradées (faiblesse des teneurs en oxygène). Elles conduisent à des densités et des diversités de faune benthique relativement faibles (Fowler et Death, 2001). Les très fortes mobilités, liées à des substrats de taille très inférieure à la capacité de transport du cours d'eau ou à des transports solides très intenses, sont elles aussi peu biogènes (cas des rivières en tresses notamment).

De nombreuses espèces animales et végétales doivent se fixer sur un support pour assurer leur développement. La composition granulométrique du substrat et les caractéristiques de l'écoulement à sa surface constituent des éléments essentiels d'habitabilité pour ces espèces.

Parmi les larves d'invertébrés, on distingue les espèces se fixant à la surface des fractions granulométriques grossières et celles accrochées sur la face inférieure. Très souvent, les espèces se fixant sur la face exposée au courant appartiennent au groupe fonctionnel des collecteurs-filtreurs qui capturent et décomposent les particules fines de matière organique présentes dans l'eau. C'est le cas des larves de diptères de la famille des Simuliidae (Figure 54 a) et des trichoptères de la famille des Hydropsychidae. Certaines espèces comme celles de la famille des Ecdyonuridae (Statzner et Holl, 1982 et 1989) présentent des adaptations morphologiques aux conditions de fortes vitesses rencontrées, mais la présence d'une forte diversité topographique des fonds créée par l'agencement de différentes fractions granulométriques grossières favorise le développement de ces espèces.

Un certain nombre de mollusques vivent également fixés sur les substrats grossiers. Il s'agit principalement des gastéropodes dont l'activité de broutage de la couverture algale nécessite une fixation sur ces substrats. *Ancylus fluviatilis* par exemple (Figure 55 b) se fixe sur des substrats grossiers dans des conditions d'écoulement relativement turbulent.

Le dernier groupe utilisant les substrats comme support de fixation sont les végétaux supérieurs parmi lesquels on trouve les macrophytes, les hélophytes, certaines espèces terrestres ainsi que les arbres et arbustes.

La majorité des espèces de macrophytes de nos cours d'eau affectionnent les granulométries fines et meubles (vase, sable). Toutefois, certaines espèces des zones lotiques présentent des capacités de colonisation très larges, notamment sur les dépôts alluvionnaires de graviers (cas de certains potamots ou de la renouëlle flottante). La fontinelle (*Fontinalis antipyretica*) constitue sûrement l'une des espèces les plus adaptées à la colonisation des substrats grossiers des zones à fort courant. Il faut également noter que les végétaux, par leurs capacités de piégeage des matières en suspension, vont modifier la composition granulométrique et la structure des sédiments sur lesquels ils se sont fixés initialement.

■ Les sédiments grossiers : support de ponte

Ce sont principalement les poissons qui utilisent les sédiments comme support de ponte (Mann, 1996). Certaines espèces vont enfouir leurs œufs en construisant des structures particulières par déplacement des matériaux (nids ou frayères). On peut citer les salmonidés, le **barbeau** commun et méridional, le **toxostome**, le **blageon**, les **lamproies**, etc.

Figure 56



a- b -c © Ecogea
d © L. Perrin

(a) chevesne sur une frayère dans un radier, (b) lamproie de Planer sur sa frayère, (c) chabot sur site de ponte, (d) truite fario en pleine reproduction.

D'autres viennent simplement déposer ces œufs sur les substrats (**vandoise**, **vairon**, **goujon**, **chabot**, **loche**...) qui y adhèrent grâce à leur capacité de fixation. D'autres encore, comme la **grande alose**, se regroupent la nuit sur des frayères situées en amont de radiers constitués d'alluvions grossières et libèrent œufs et sperme lors de leur spectaculaire parade nuptiale. Ceux-ci dérivent ensemble dans l'écoulement et se déposent progressivement dans les interstices entre les sédiments grossiers du radier aval.

Sur les 80 espèces de notre faune piscicole, 25 utilisent des substrats minéraux pour leur reproduction (Keith et Allardi, 2001).

Le diamètre des alluvions utilisées varie du sable pour le goujon aux galets de 15-20 cm pour la lamproie marine. Toutefois, beaucoup d'espèces utilisent des diamètres médians variant entre 1 et 5 cm, ce qui correspond à des alluvions facilement mobilisables.

Comme pour les larves d'invertébrés, deux critères essentiels vont influencer le potentiel de reproduction des espèces :

- les surfaces de sédiments disponibles et leur répartition spatiale ;
- la qualité de ces sédiments (mobilité et porosité notamment).

En termes de surface, nous ne disposons de données quantitatives que pour les salmonidés. L'importance de l'activité de reproduction de la **truite** commune, évaluée au moyen du nombre de nids comptabilisés, est ainsi fortement corrélée à la surface de zones de graviers et cailloux fins (diamètre 1 à 5 cm) disponibles dans un tronçon de rivière (Delacoste, 1995 ; Delacoste *et al.*, 1995). Cette relation est de type logarithmique. Au delà de 5 % de surface occupée par les zones de granulométrie appropriée, le nombre de nids évolue très peu. **En revanche, entre 0,5 et 1 % de la surface occupée par cette classe d'alluvions, le nombre de nids peut être multiplié par un facteur trois.**

Les conditions hydrauliques qui règnent sur ces zones sont très importantes pour leur utilisation potentielle comme zones de fraie. Les vitesses du courant doivent en effet rester compatibles avec les capacités de nage des espèces ce qui correspond très souvent à des valeurs inférieures à 50 cm/s, sauf pour le saumon atlantique et la lamproie marine qui sont capables d'utiliser des zones où les vitesses sont de l'ordre de 70 à 80 cm/s. Il est important que le cours d'eau puisse offrir différents types de dépôts alluvionnaires, sous différentes conditions hydrauliques, afin de garantir une diversité de choix aux espèces utilisatrices selon les conditions hydrologiques.

En fonction de la morphologie du cours d'eau et de son débit lors de la période de reproduction, les salmonidés pourront utiliser les zones de transition entre mouille et radier, les zones de dépôts de bordure, les banc de convexité ou l'aval de blocs (dépôts de traînée) et même les chenaux secondaires dans les rivières à tresses. Il faut donc toujours analyser le potentiel de zones de reproduction au travers des surfaces de granulométrie adaptée mais aussi de leur organisation spatiale qui dépendra beaucoup de la morphologie du lit et de la variabilité hydrologique.

D'un point de vue qualitatif, la granulométrie des alluvions doit permettre le creusement du nid par le poisson. Le pavage ou la présence d'une armure colmatée va limiter les possibilités de mise en mouvement des matériaux et donc la construction du nid. Inversement, des observations ont permis de constater que les salmonidés colonisaient peu les substrats trop mobiles.

Les alluvions doivent aussi présenter une porosité satisfaisante afin d'assurer une bonne circulation des écoulements interstitiels garantissant l'oxygénation des œufs et l'évacuation des déchets azotés. Cette porosité est très liée à la quantité de sédiments fins présents dans les zones de graviers et de petits galets. Des teneurs en particules fines (diamètre < 2 mm) supérieures à 30 % dans le nid conduisent à une mortalité quasi totale des œufs. Au-delà de 10 %, la moitié des œufs meurent dans une frayère de truites.

■ Les sédiments grossiers : abris hydrauliques

La dernière fonction biologique des sédiments grossiers est liée à leur rugosité qui permet de modifier les conditions hydrauliques dans la zone de contact et assure ainsi des abris hydrauliques pour la faune aquatique évoluant près du fond.

Cette zone de contact est essentielle pour de nombreuses espèces qui bénéficient des conditions hydrauliques turbulentes pour se déplacer, se nourrir ou échanger des composés chimiques avec la colonne d'eau (Vogel 1981, Koehl 1984) tout en étant protégées des fortes vitesses par la rugosité hydraulique de la couche limite.

Le **chabot** ou encore l'**apron** du **Rhône** sont des espèces de poissons qui évoluent quasiment toujours au ras du fond, en s'abritant dans les interstices existants entre les cailloux et les pierres grossières. De même, les jeunes stades de salmonidés utilisent beaucoup les cailloux et pierres (nomenclature de Wentworth) comme abris hydrauliques leur permettant de vivre dans des zones lotiques (radiers et plats courants) et de s'y alimenter (notamment sur la dérive d'invertébrés), tout en étant relativement protégés des fortes vitesses par la taille des sédiments derrière lesquels ils peuvent s'abriter.

Biocénoses terrestres (biocénoses des grèves)

■ Faune

Les bancs d'alluvions grossières (du sable aux blocs) exondés une partie de l'année servent d'habitat à de nombreux animaux. Le terme de **grève** est généralement employé dans les publications des biologistes et écologues pour désigner ces dépôts sédimentaires mobiles exondés.

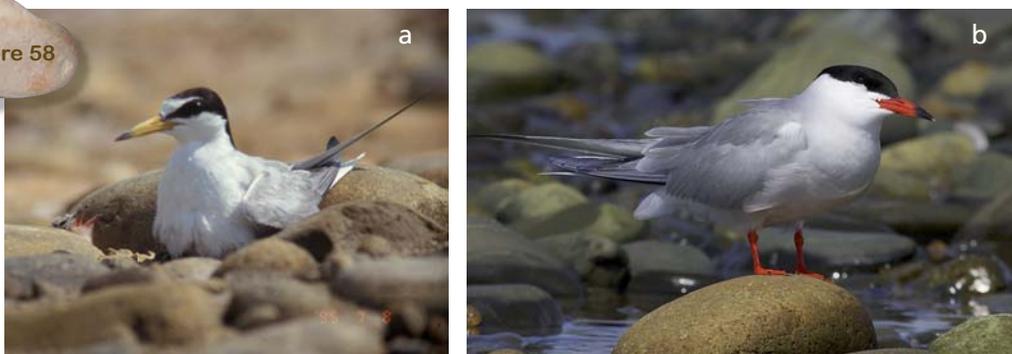
Parmi les vertébrés supérieurs qui affectionnent les grèves, on peut citer certains oiseaux qui en font leur habitat de reproduction privilégié, dont des espèces protégées au niveau européen (**oedicnème criard**, **sterne naine** et **sterne pierregarin**, **pipit rousseline**). Certains limicoles comme le **petit gravelot** ou le **chevalier guignette** par exemple y pondent leurs œufs au printemps, au milieu des galets fluviaux avec lesquels il se confondent, de même que les poussins qui sont ainsi protégés des prédateurs.

Figure 57



(a) petit gravelot et (b) nid et poussin.

Figure 58



(a) sterne naine (et son poussin) et (b) sterne pierregarin.

Certains insectes sont aussi inféodés à ces milieux alluviaux mobiles, comme le **forficule des galets**, géant des perce-oreilles qui atteint presque 3 cm de long et occupe les plages de galets au bord des cours d'eau. Si l'**oedipode turquoise** et l'**oedipode rouge**, deux espèces de criquets, sont encore bien représentées, l'**oedipode des salines**, qui occupe le même milieu que la petite massette (voir plus bas) a très fortement régressé du fait des aménagements de cours d'eau qui ont altéré le fonctionnement hydrosédimentaire.

a © F. Damiani
b © tous droits réservés

a- b © tous droits réservés



Figure 59



(a) oedipode turquoise et (b) oedipode des salines.

a © P. Dubois - b © Konig Photo

Chez les libellules, le **gomphe à pattes jaunes** et le **gomphe serpent** apprécient les cours d'eau bien oxygénés à fond sableux ou graveleux indispensable à leur stade larvaire.



Figure 60



(a) gomphe serpent et (b) gomphe à pattes jaunes.

a © J.M. Lett - b © C. Fischer

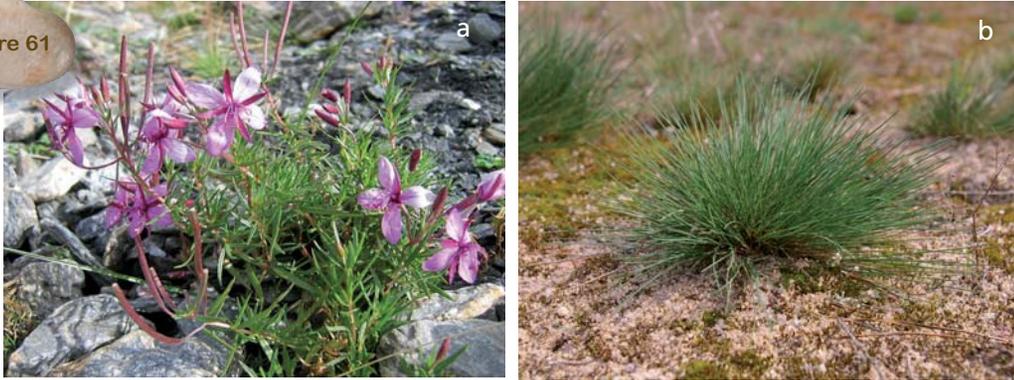
■ Flore

Lorsque les dépôts alluvionnaires subissent d'assez longues périodes d'exondation, on observe leur colonisation rapide par des végétaux terrestres herbacés ou non. Parmi ceux-ci on trouve des espèces pionnières comme les **renouées** ou les **chénopodes**.

Ces milieux constituent des habitats remarquables et susceptibles d'accueillir des espèces protégées parmi lesquelles on peut citer le **Trèfle des graviers**. On y trouvera aussi l'**argousier**, capable de fixer l'azote par ses racines et le saule faux-daphné, aux racines vigoureuses qui peuvent résister à la puissante dynamique des rivières en tresses. Le **petite massette**, qui s'installe sur les bancs de sable temporaires, est devenue très rare du fait de la réduction de son habitat alluvial mobile et se trouve sur la liste rouge française. De belles stations existent encore sur les lits en tresses des rivières du bassin de la Durance (réserve naturelle du Bas-Drac par exemple).

L'**épilobe de Fleischer**, qui s'installe lui aussi sur les alluvions grossières des torrents, a même donné son nom à un habitat correspondant aux alluvions torrentielles (*Epilobion fleischeri* (Code Corine 24.221 et 24.222, Cahiers d'Habitat Natura 2000) pouvant être recensé au titre des ZNIEFF de type I (cas du petit Buech ou celui de Haute Durance). Dans les zones alluviales de la Loire et de l'Allier, l'**épervière de la Loire** (*Hieracium peleterianum*), endémique, accompagne la **corynéphore**, une graminée formant de véritables pelouses sur les plages sableuses.

Figure 61



(a) l'épilobe de Fleischer et (b) le corynéphore.

a- b © Tous droits réservés

Ces espèces assurent souvent les premiers stades de colonisation avant l'implantation des arbres et arbustes parmi lesquels on compte essentiellement des espèces de saule. Dans certaines régions, ces habitats sont désignés par des termes locaux tels que les saligues de l'Adour et des Gaves, les ramières de la Drôme, de l'Ariège ou de la Garonne, les brotteaux et vorgines du Rhône et de l'Ain, etc.

Attention. Ces habitats particuliers sont également un lieu privilégié de développement d'espèces végétales invasives affectionnant les milieux fréquemment remaniés (buddleia, balsamines notamment celle de l'Himalaya, renouées dont celle du Japon, amброisie, herbe de la Pampa). Ces espèces à développement rapide et envahissant vont limiter le développement des végétaux endémiques.

Processus physico-chimiques

Si l'étude des processus biologiques et biochimiques contribuant à « l'auto-épuraton » des rivières est encore très largement du domaine de la recherche, il semble aujourd'hui admis que la présence d'un substrat alluvial grossier, d'une épaisseur suffisante et présentant une granulométrie variée (y compris au niveau du colmatage interstitiel) est l'un des éléments majeurs de ces processus.

Garantir la présence d'un substrat alluvial dans les lits mineur et moyen des cours d'eau serait donc un atout pour **préserver une bonne qualité d'eau**.

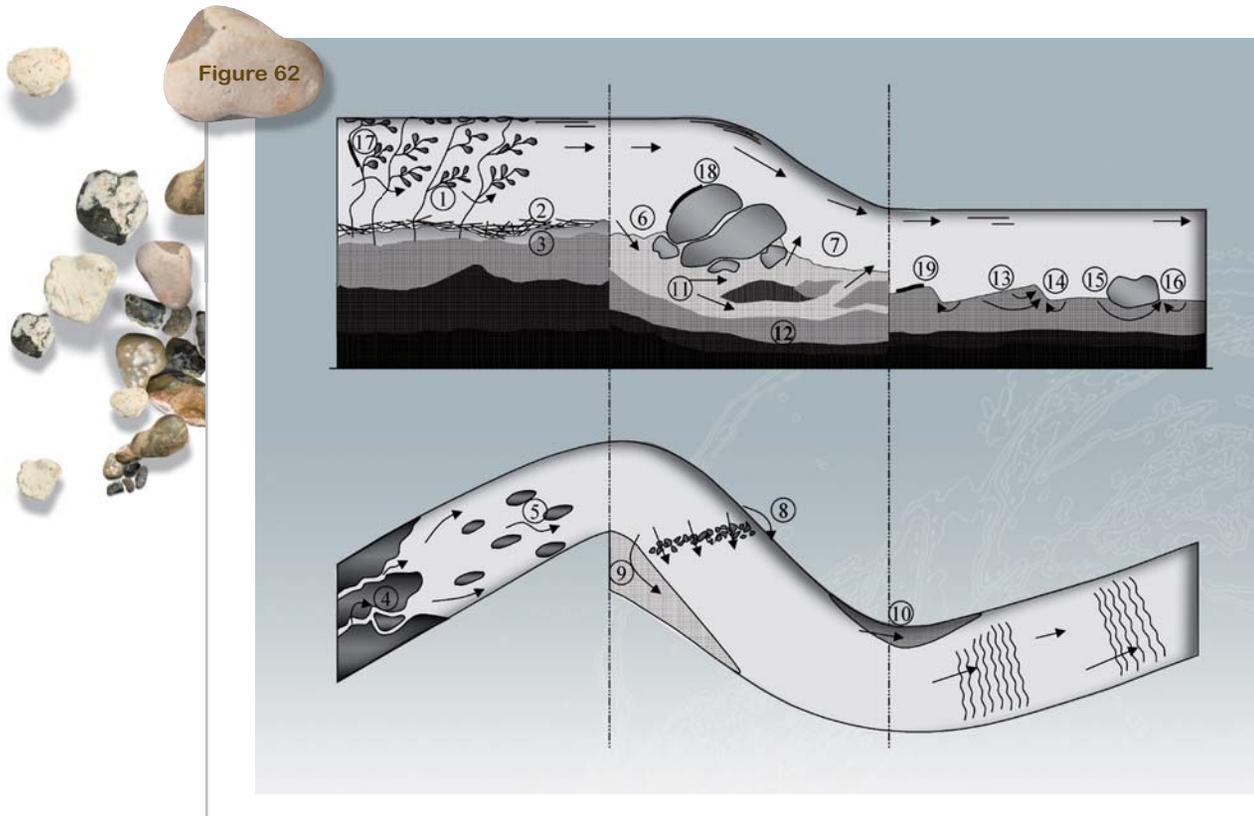
■ Les processus d'épuration dans les substrats alluviaux immergés

Les cours d'eau sont capables de métaboliser une partie des éléments qui proviennent du bassin versant, dans la mesure où la charge n'outrepasse pas leurs capacités intrinsèques. Ce processus auto-épuratoire met en œuvre différents sous-processus qui font intervenir les organismes présents dans le cours d'eau.

Végétaux, biofilms, bactéries vont prélever les nutriments présents dans le milieu (azote et phosphore en particulier) et les utiliser dans leur métabolisme. Les capacités d'autoépuration d'un cours d'eau vont donc dépendre de la présence de tels organismes. Une diversité d'habitats favorable à l'installation d'organismes différents pourra être bénéfique pour ces processus métaboliques. De plus, la circulation de l'eau est influencée par la nature et la diversité des substrats rencontrés dans le cours d'eau.

Si l'on détaille la figure 62, on observe que le passage de l'eau dans des zones à macrophytes ou à embâcles ralentit le flux (1) permet le dépôt et l'accumulation de matière organique nécessaire aux métabolismes bactériens (2 et 3) et favorise l'élimination d'azote sous forme gazeuse par dénitrification. Les **substrats grossiers** que l'on trouve par exemple sur des faciès d'écoulement nommés radiers, provoquent des phénomènes d'infiltration (6, 11, 13, 15) et permettent le piégeage à plus ou moins long terme du phosphore en particulier. Les **bancs alluviaux** (9 et 10) sont également un lieu d'échange important et permettent le développement d'une végétation temporaire utilisant les nutriments et limitant ainsi leur accès au cours d'eau.

Le biofilm (voir plus loin) qui se développe sur différents substrats (17, 18, 19) est également susceptible de métaboliser les nutriments, voire de faciliter la dénitrification.



Représentation schématique des principaux processus d'échange dans un cours d'eau (d'après Birgand et al. 2007).

78

Cependant, ces processus de dénitrification, piégeage du phosphore, interception des polluants, etc. sont reliés les uns aux autres et les conditions favorables à un processus peuvent être préjudiciables à un autre. Par exemple, le manque d'oxygène qui favorise la dénitrification provoque une libération du phosphore piégé dans les sédiments.

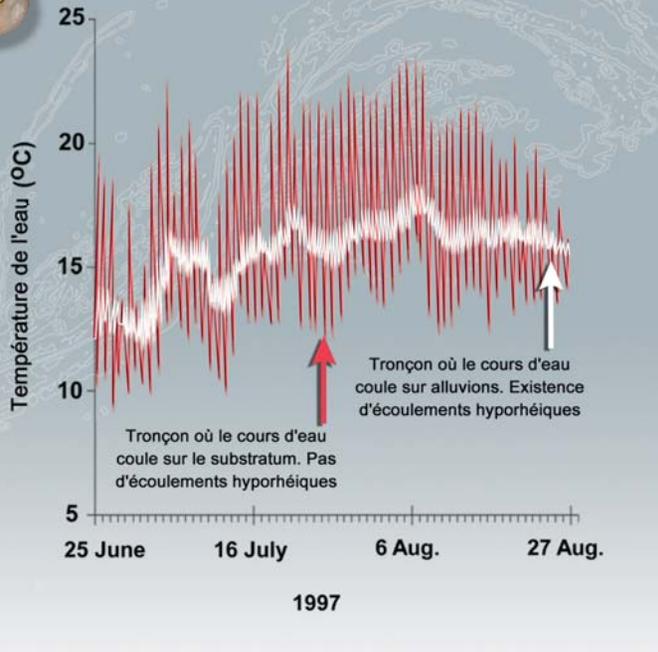
Les connaissances actuelles permettent donc de penser qu'une diversité de substrats et de conditions d'écoulement est favorable aux différents processus d'autoépuration. Il faut cependant approfondir les connaissances sur les capacités des cours d'eau à réduire la charge en nutriments à l'échelle des bassins versants, tout en développant les méthodes pour réduire les apports afin de ne pas les dépasser.

■ Le rôle des alluvions du lit mineur dans la thermie de l'eau

Si la connaissance du rôle du substrat alluvial dans les processus d'auto-épuration est encore du domaine de la recherche, il semble aujourd'hui relativement admis qu'il joue un rôle assez net dans la thermie de l'eau. Ainsi Burkholder (2007), (Figure 63) montre l'effet de la présence d'un substrat alluvial sur la température estivale d'un petit cours d'eau.

Celle-ci a été mesurée sur deux secteurs du même cours d'eau : l'un disposant d'un substrat alluvial et de faciès (radiers/mouilles) permettant le développement d'un écoulement hyporhéique, l'autre coulant directement sur le substratum rocheux. La différence de température moyenne mais surtout d'**amplitude journalière** est flagrante.

Figure 63



Exemple montrant le rôle de la présence d'un substrat alluvial dans la thermie de l'eau (Burkholder, 2007).

■ Le biofilm

Les substrats grossiers constituent un support indispensable à la fixation et au développement du biofilm, structure mucilagineuse constituée d'un assemblage complexe de plusieurs espèces de bactéries, d'algues (vertes, bleues, diatomées...) et de champignons filamenteux.

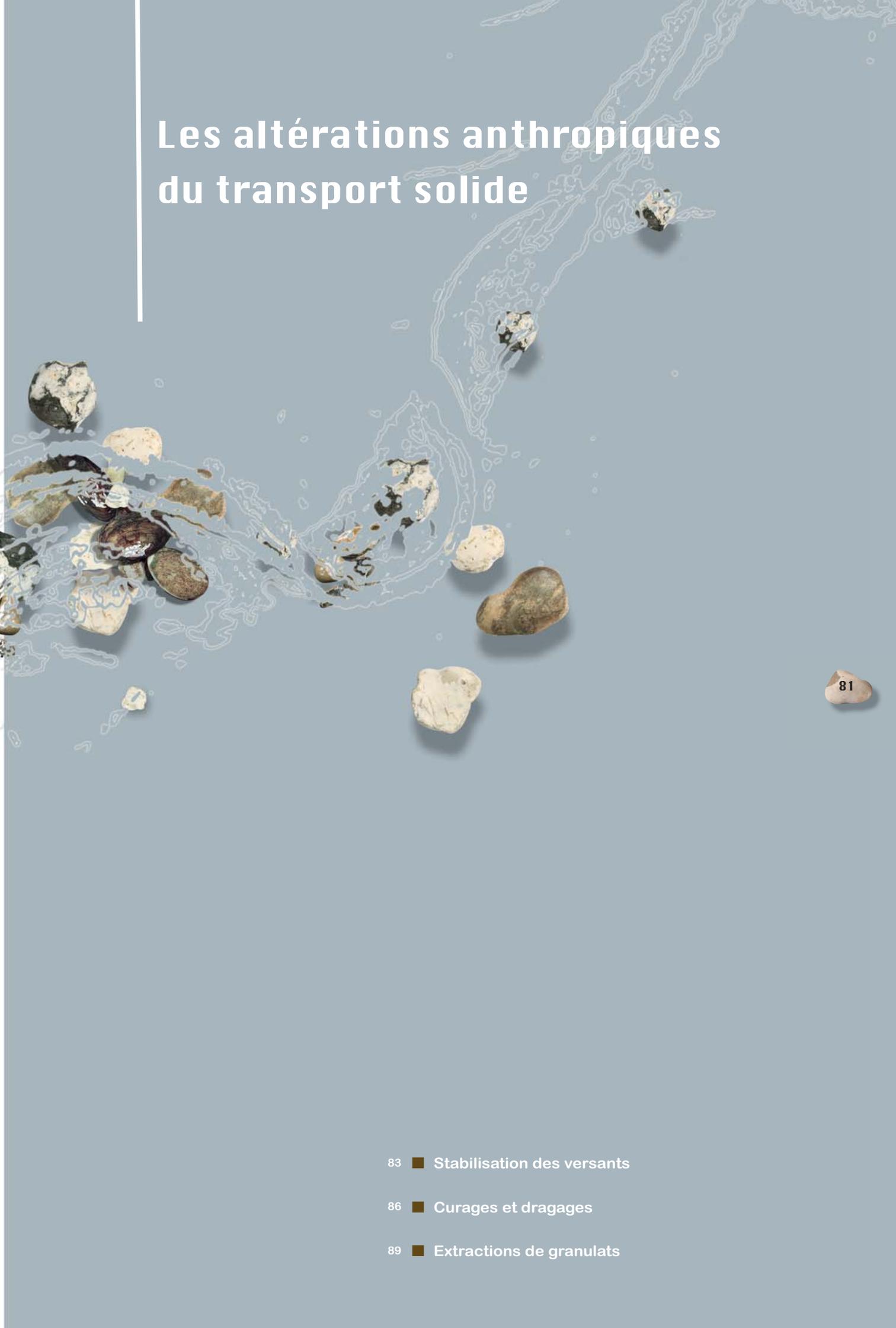
Ce biofilm est essentiel à la dégradation de la matière organique, à la consommation des composés azotés et phosphorés et à la production de matière végétale. Le biofilm ne présente pas de préférence particulière en terme de substrats. Ce sont essentiellement les conditions hydrauliques qui font varier sa composition spécifique. C'est cependant la composition du substrat, et notamment l'agencement des fractions granulométriques, qui, en assurant une plus ou moins forte hétérogénéité, va conditionner la capacité de développement du biofilm et sa capacité de consommation de matière organique et de fertilisants

Cardinale et al., (2002) ont comparé des radiers de granulométrie médiane équivalente (55 mm) mais dont l'hétérogénéité était différente (rapport D84/D50 variant de 1,6 à 2,3). Les radiers les plus hétérogènes (rapport D84/D50 élevé) présentaient des activités biologiques (respiration) 25 à 30 % supérieures à celles observées sur les radiers plus homogènes.

Les alluvions grossières offrent, du fait de l'hétérogénéité des substrats qu'elles composent sous l'effet des processus de transport solide, des surfaces de contact plus importantes que les substrats lisses (affleurements du substratum sous forme de dalles par exemple). Cela garantit à la fois des capacités supérieures de fixation du biofilm et des conditions de turbulence accrue, favorisant les échanges et les flux de composés chimiques.



Les altérations anthropiques du transport solide



83 ■ Stabilisation des versants

86 ■ Curages et dragages

89 ■ Extractions de granulats



Depuis l'effondrement spectaculaire du Pont Wilson à Tours en 1978, qui a agi comme un révélateur des impacts hydromorphologiques des extractions de granulats, de nombreuses études ont été consacrées à l'évaluation des effets directs et indirects sur les cours d'eau, de la réduction drastique de la charge alluviale grossière depuis la fin du XIX^e siècle et de l'incision généralisée des lits fluviaux qui en a résulté.

Le constat est que cette diminution de la charge solide et cette incision sont dues principalement aux extractions de granulats en lit mineur, mais que de nombreux autres facteurs, naturels (réchauffement climatique depuis la fin du petit âge glaciaire) ou anthropiques (déprise agropastorale, stabilisation volontaire des versants, curages et dragages, barrages et seuils), y ont aussi contribué, avec une intensité variable selon les régions et les types de cours d'eau.

Les impacts les plus connus de ces processus d'incision liés aux altérations du transport solide sont :

- l'abaissement des nappes phréatiques alluviales et ses effets indirects comme l'assèchement des écosystèmes riverains et la réduction d'une ressource en eau potable peu coûteuse et de qualité, le déchaussement d'ouvrages d'art (ponts, digues, protections de berges etc.) ;
- une érosion accrue des berges non protégées par des cours d'eau cherchant à compenser le déficit de charge solide par une recharge sédimentaire latérale et une réduction de la pente via l'augmentation de la sinuosité ;
- une modification de la nature des fonds voire une mise à nu du substratum rocheux, avec des répercussions sur les biocénoses aquatiques et ripariales (se développant sur les bancs alluviaux mobiles), dont le substrat alluvial constitue un habitat privilégié.

Nous présentons quelques éléments de synthèse des impacts de diverses interventions anthropiques sur le transport sédimentaire de fond. Avant cela, une introduction sur la modification naturelle du climat au milieu du XIX^e siècle permettra de mieux cerner le contexte climatique dans lequel ont eu lieu ces interventions.

Un facteur naturel : la fin du petit âge glaciaire

Le petit âge glaciaire (PAG) correspond à un refroidissement climatique modéré (moins 1°C en moyenne annuelle) mentionné par de nombreux historiens depuis la fin des années 60 (notamment E. Leroy-Ladurie, 1967). On estime qu'il a duré de 1350 à 1850 environ, avec un paroxysme de froid du XVI^e au XVIII^e siècle. Cet épisode climatique froid succédait à un épisode chaud ayant duré lui aussi cinq siècles (de 800 à 1300) : l'optimum climatique médiéval. Cette faible réduction des températures moyennes fut suffisante pour provoquer, en simplifiant, des hivers rigoureux et des étés pluvieux. Les premiers empêchant le développement de la végétation en haute montagne et favorisant ainsi l'érodabilité des versants, les seconds permettant un accroissement de cette érosion et par conséquent une forte production externe de charge solide grossière. Ce petit âge glaciaire est aussi marqué par l'avancée des glaciers alpins (provoquant l'évacuation de nombreux villages) et de la banquise Nord Atlantique. On pense que la production accrue de charge solide grossière durant cette période climatique a pu favoriser le développement d'un linéaire important de rivières en tresses, qui ne le sont plus aujourd'hui.

Attention. Le rôle du seul climat reste à tempérer puisqu'à la même période climatique a correspondu aussi un fort accroissement démographique en zone de montagne, entraînant des défrichements soutenus et un surpâturage intensif eux aussi à l'origine d'une accentuation de la production sédimentaire externe (voir ci-après).

Stabilisation des versants

L'une des sources majeures d'apports solides grossiers à un réseau hydrographique est (était...) le **stock sédimentaire produit à l'échelle des versants par les processus d'érosion du substratum rocheux**. Ces produits de l'érosion sont ensuite transférés aux cours d'eau par des processus primaires (talus d'éboulis, glissements de terrain, colluvionnement en général) puis secondaires (transfert de ces matériaux aux cours d'eau principaux par le petit chevelu hydrographique).

De nombreuses activités humaines ont, volontairement ou non, fortement perturbé ces processus d'érosion et de transfert.

Stabilisation volontariste des versants

Dès le milieu du XIX^e siècle, l'Etat a initié une politique volontariste de stabilisation des versants dans tous les massifs montagneux de France. L'objectif principal était de lutter contre les risques d'inondation et de laves torrentielles dans les villes et villages situés à l'exutoire des bassins versants instables et très productifs en charge solide.

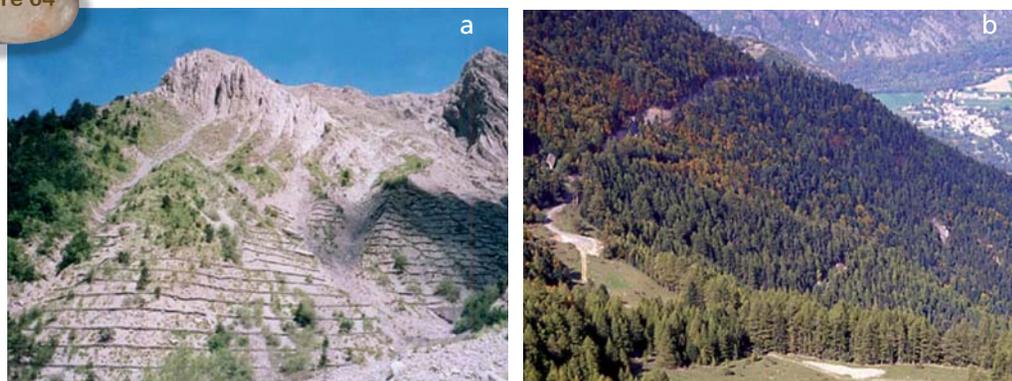
On sait aujourd'hui que cette instabilité était en grande partie liée à un **déboisement volontaire par les populations rurales** en très forte expansion démographique depuis le XIV^{ème} ou le XV^e siècle (vente de bois d'œuvre, de construction, de chauffage et défrichement d'alpages), accompagné d'un **surpâturage intensif**. C'est le service RTM (Restauration des terrains en montagne) créé par les lois de 1860-1864-1882 qui a été et est encore aujourd'hui, avec l'Office national des forêts, chargé de cette mission de stabilisation des versants.

Les lois dites RTM avaient défini des « périmètres RTM », zones expropriables par l'État, sur lesquelles ont été implantés, au fil du XIX^{ème} et du XX^e siècle, des boisements de stabilisation et des ouvrages de protection contre l'érosion et le ravinement.

Même si on est loin des objectifs de la loi de 1860, les périmètres RTM définis après 1882 ont permis de « traiter » plus de 300 000 ha et environ 100 000 ouvrages ont été réalisés sur près de 1 500 torrents.

83

Figure 64



(a) système de stabilisation des versants permettant à terme de planter des essences forestières stabilisatrices des sols (RTM 38). (b) Forêt de protection plantée mi-XIX^{ème} afin de protéger les villages contre les crues et les laves torrentielles.

Seuils de stabilisation et de piégeage de la charge solide

Outre les boisements, visant à bloquer les processus érosifs « à la source », les services RTM ont implanté des milliers d'ouvrages de type « seuil » (Figure 65), initialement en bois, en pierres sèches puis en béton.



Figure 65



a-b © J.R. Malavoi

Seuils de stabilisation torrentielle et de piégeage (on parle parfois de plage de dépôt) de la charge grossière.

Si les techniques ont pu évoluer (Tableau 12), l'objectif était double et il le reste :

- canaliser les torrents dans une emprise limitant leur capacité afin de circonscrire l'érosion des pieds de versant en cours de stabilisation et de réduire les risques dans les traversées des villages et hameaux ;
- bloquer les sédiments le plus en amont possible pour éviter que leur apport, souvent brutal et massif (à l'occasion des orages estivaux notamment), ne vienne réduire la section d'écoulement des cours d'eau dans la traversée des zones urbanisées et provoquer des inondations catastrophiques.

Après la 1^{ère} puis la 2^{ème} guerre mondiale, les finances publiques ne permettent plus de continuer au même rythme les programmes de stabilisation.

Seuls 11 (sur 26 initialement) départements de haute montagne, où s'exerce « une érosion active et à haut risque », sont aujourd'hui couverts par un service RTM : Haute-Savoie, Savoie, Isère, Hautes-Alpes, Alpes-de-Haute-Provence et Alpes-Maritimes, Pyrénées-Orientales, Ariège, Haute-Garonne, Hautes-Pyrénées et Pyrénées-Atlantiques. Dans les départements où l'érosion est moins active, « la gestion normale des peuplements constitués » est confiée à ONF au titre des forêts domaniales.

Cette politique intensive de stabilisation s'est traduite très rapidement par une réduction brutale des apports solides externes (dont l'excès était, nous l'avons vu, lui aussi en grande partie d'origine anthropique...). De nombreux torrents et cours d'eau de montagne à forte charge alluviale, qui développaient souvent un style fluvial en tresses, ont commencé à s'inciser dans leurs alluvions et le tressage a peu à peu disparu au profit d'un lit à chenal unique, plus étroit et plus profond.

Ce déficit de charge s'est propagé au fil des décennies vers l'aval des bassins versants, entraînant une érosion progressive dans le stock alluvial qui s'était constitué au fil des siècles de « production intense » (XV^{ème}-XIX^{ème}). Outre des métamorphoses fluviales (notamment passage du tressage au lit unique), le déclin rapide des apports sédimentaires externes s'est combiné aux effets des interventions anthropiques du XX^e siècle (barrages hydro-électriques dans les vallées intramontagnardes, curages et extractions massives plus à aval), pour entraîner au final une **incision généralisée des lits fluviaux**.

Déprise agro-pastorale

Sensiblement sur la même période, soit depuis le milieu du XIX^e siècle jusqu'à nos jours avec une accélération à l'entre deux guerres, a été constatée en France une spectaculaire déprise agro-pastorale. En zone de montagne, cette déprise s'est traduite rapidement par une expansion des espèces arbustives et arborées (aulne vert, érable sycomore, frênes, pin, chêne vert, etc.) sur les pelouses subalpines ayant subi une forte pression pastorale durant la longue période précédente.

Cette revégétalisation naturelle des versants autrefois sur-pâturés, favorisée par le réchauffement climatique, contribue à leur protection contre l'érosion et à la réduction de la production primaire de charge alluviale de fond.



Tableau 12

Principales techniques utilisées par les services de RTM pour stabiliser les torrents
(d'après Bernard, 1927, et Mougin, 1931, in Landon, 1999).

Types	Sous-types	Usage	Description sommaire
Barrages	En maçonnerie de mortier	Sert de base à la correction du torrent. Doit résister aux plus fortes crues que rien n'atténue puisque c'est le premier ouvrage	Hauteur supérieure à 2 m Épaisseur d'au moins 0,8 m au couronnement. Protégé par un contre-barrage, un radier de blocs retenu par des pieux de mélèzes
	En pierre sèche	Quand la pression n'est pas trop importante à l'amont (ravins et partie haute des torrents)	Entre 2 et 4 m de hauteur (h). En blocs de grandes dimensions. Épaisseur au couronnement : $b = 1/2h$
	En maçonnerie mixte	Indifféremment. Limite les dépenses	Base et couronnement en béton. Corps en pierres sèches
	En béton	Manque de matériaux grossiers et présence de graviers	Pas d'indication de dimension mais les contacts avec les berges instables sont en coins maçonnés
	De retenue	Lutter contre les effets du charriage des torrents glaciaires et à clappes dans les plaines	Barrages et réservoirs de grande dimension, capables d'emmagasiner de grands volumes de matériaux. Nécessite un site favorable
	Rustiques	Correction des petits ravins	Hauteur maximum : 2 m 50 et épaisseur au couronnement : 0,8 m. Parfois enterrés, ils constituent des seuils. En pierres sèches. Les atterrissements sont plantés de bois blancs dès qu'ils se forment
	En mottes de gazon	Correction des petits ravins	Utilisation de plaques de gazon bien tassées mélangées avec des assises de pierres sèches
Epis	En mur de pierres sèches ou en pieux garni de pierres.	Protection des berges	Murs encastrés profondément dans les berges, inclinés vers l'amont quand les berges sont résistantes
Place de dépôt		Pallie l'absence d'un site favorable à un barrage de retenue	Sur les cônes de déjection, zone d'élargissement protégée par des levés de berges protégées par des perrés, endigué à l'amont et à l'aval
Canaux de dérivation	A ciel ouvert ou en tunnel	Présence d'une rive rocheuse et d'une rive très instable	Canal ou tunnel creusé dans la berge rocheuse jusqu'en amont de la zone instable et construction d'un barrage de dérivation
Drainage		Lutter contre le fluage ou le foudage des versants détremés	Etablissement d'un réseau de fossés et de drains collecteurs
Canalisation		Eviter la divagation des eaux ou laves sur les cônes de déjection	Canal maçonné à pente régulière, parois lisses et le plus rectiligne possible
Clayonnage et fascinage		Pallie l'absence de pierres sèches pour construire des barrages rustiques ou seuils	Techniques végétales combinant pilots plantés et tressages de branches vivantes qu'on atterit de terre à l'amont, protégées de pierres plates, pour favoriser l'enracinement
Garnissages		Ravins secs	Le lit est recouvert de branches coupées et fixées par des traverses, elles-mêmes fixées par des piquets
Murettes horizontales		Installation de la végétation sur les versants nus et décapés	Murs en pierres sèches horizontaux ou petits clayonnages de 20 à 30 cm de haut garnis en amont de boutures.
Enrochement		Protection de berge ou de barrage contre l'affouillement	Réalisé en déplaçant les blocs du lit vers les berges ou en utilisant, à défaut, des clayonnages
Rigoles pavées		Protection des ravins à forte pente	Le lit est entièrement pavé en pierre sèche pour éviter toute érosion

Curages et dragages

Les curages et les dragages sont deux méthodes anciennes et assez similaires de gestion des alluvions en transit dans un cours d'eau, un canal ou un plan d'eau. Elles s'appliquent tant aux sédiments fins qu'aux matériaux grossiers.

Attention. Il ne s'agit pas, même si le résultat est parfois identique, d'extractions de matériaux à vocation commerciale qui seront traitées plus loin.

Plus que sur les techniques mises en œuvre, parfois assez proches, c'est sur les objectifs visés que les curages et dragages peuvent être différenciés.

Les **curages** ont pour objectif principal l'élimination d'une partie plus ou moins importante des dépôts sédimentaires dans le lit mineur et la bande active d'un cours d'eau (ou d'un canal) afin de :

- restaurer (ou augmenter) la capacité d'écoulement du cours d'eau vis à vis des crues ;
- réduire l'intensité des processus d'érosion latérale au droit des bancs alluviaux (notamment les bancs médians et les bancs de convexité).

Les **dragages** ont plutôt pour vocation le maintien :

- d'un usage de navigation, en garantissant un tirant d'eau et une largeur suffisante pour le passage des bateaux (s'applique en rivière, canal, zone portuaire) ;
- d'un usage hydroélectrique, d'irrigation ou d'alimentation en eau potable, en garantissant un volume de retenue suffisant par rapport à l'usage (s'applique en retenue artificielle).

La réglementation concernant ces méthodes de gestion a beaucoup évolué au cours des dernières décennies et est aujourd'hui plus contraignante qu'il y a une vingtaine d'années (chapitre suivant). On peut cependant considérer que les cours d'eau français ont connu plus de 50 ans de curages parfois très intensifs et souvent assimilables à des extractions (les matériaux de curages étaient généralement extraits, soit pour les vendre, soit pour les valoriser autrement comme le remblaiement de chemins ruraux, la construction de petites digues en « merlons » le long des terrains agricoles inondables). Ces opérations ont pu conduire à des déficits sédimentaires importants et à la mise en route de processus d'incision, par voie régressive ou progressive.

Avant le durcissement de la réglementation, on sait que la grande majorité des travaux de curage sur les cours d'eau non domaniaux était réalisée « gratuitement » (pour le riverain ou la commune qui le souhaitaient) par des entreprises de travaux publics qui se payaient sur la revente ou l'utilisation des produits de curage, d'où de très nombreux abus. La seule différence entre les curages et les extractions de matériaux portait essentiellement sur les procédures d'autorisation (Figure 66).

86

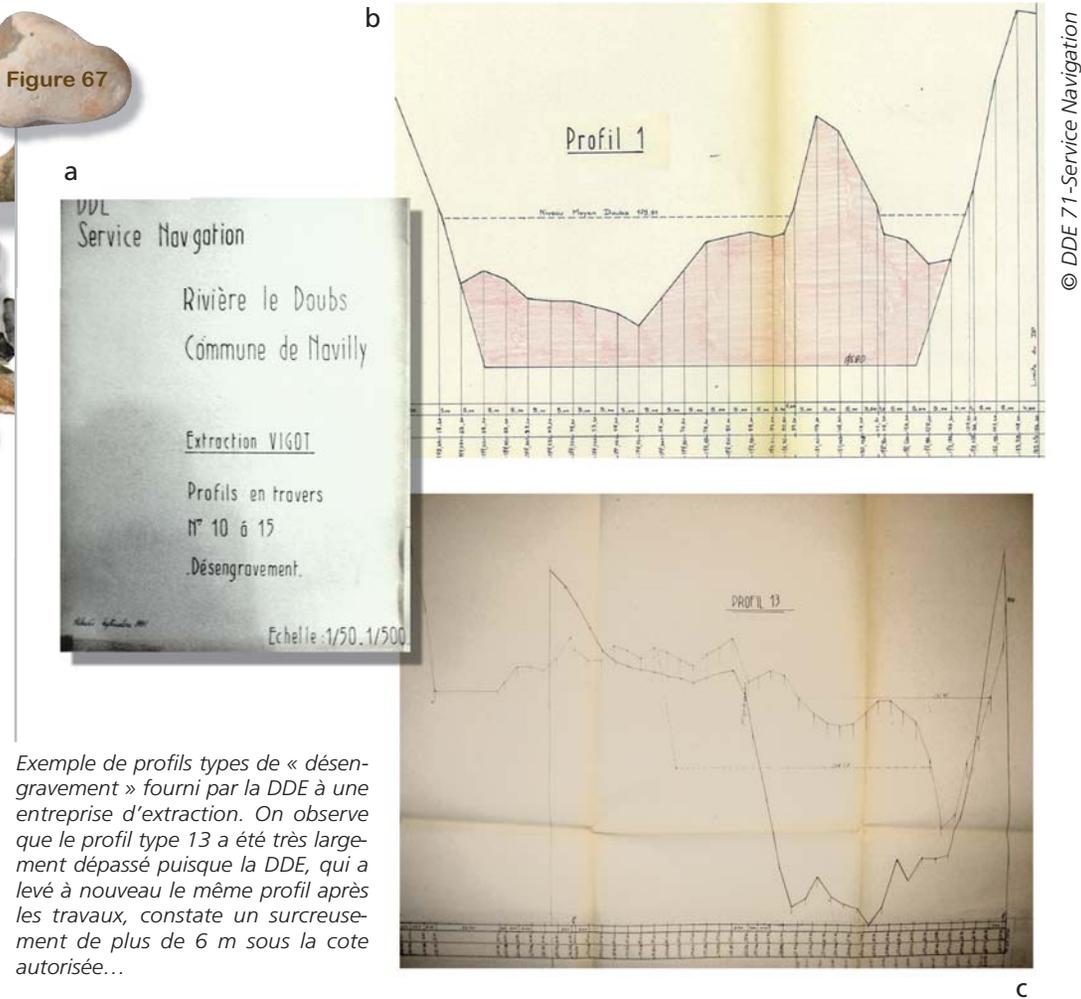
Figure 66



(a) curage d'entretien sur l'Ognon, (b) extraction commerciale sur le Tarn dans les années 80. La différence n'est pas flagrante...

Le phénomène « d'abus de curage » (ou de curage abusif...) a été particulièrement fort sur les cours d'eau sablo-graveleux de taille moyenne à grande, notamment sur les cours d'eau domaniaux où l'Etat, pour assurer son obligation de maintien « du libre écoulement des eaux », délégait cette tâche d'entretien à des entreprises d'extraction, qui avaient elles aussi tendance à se rémunérer largement sur les matériaux extraits... avec des abus parfois spectaculaires (Figure 67) ! Notons que les volumes de désengrèvement (rappel, ce ne sont pas des extractions commerciales), même respectés, sont énormes.

Il est malheureusement impossible de disposer de statistiques fiables sur les curages (cours d'eau touchés, fréquences, volumes curés, etc.). De même, leurs impacts en termes de dysfonctionnement hydromorphologique et écologique sont assez difficiles à identifier et surtout à dissocier d'autres altérations (extractions de granulats et barrages notamment).



Exemple de profils types de « désengrèvement » fourni par la DDE à une entreprise d'extraction. On observe que le profil type 13 a été très largement dépassé puisque la DDE, qui a levé à nouveau le même profil après les travaux, constate un surcreusement de plus de 6 m sous la cote autorisée...

Pour ce qui concerne les dragages d'entretien des voies navigables, les travaux mis en œuvre ont souvent été beaucoup plus lourds que ceux des curages en raison de moyens financiers plus élevés des services gestionnaires et des usagers (compagnies de navigation commerciale, ports autonomes).



Figure 68

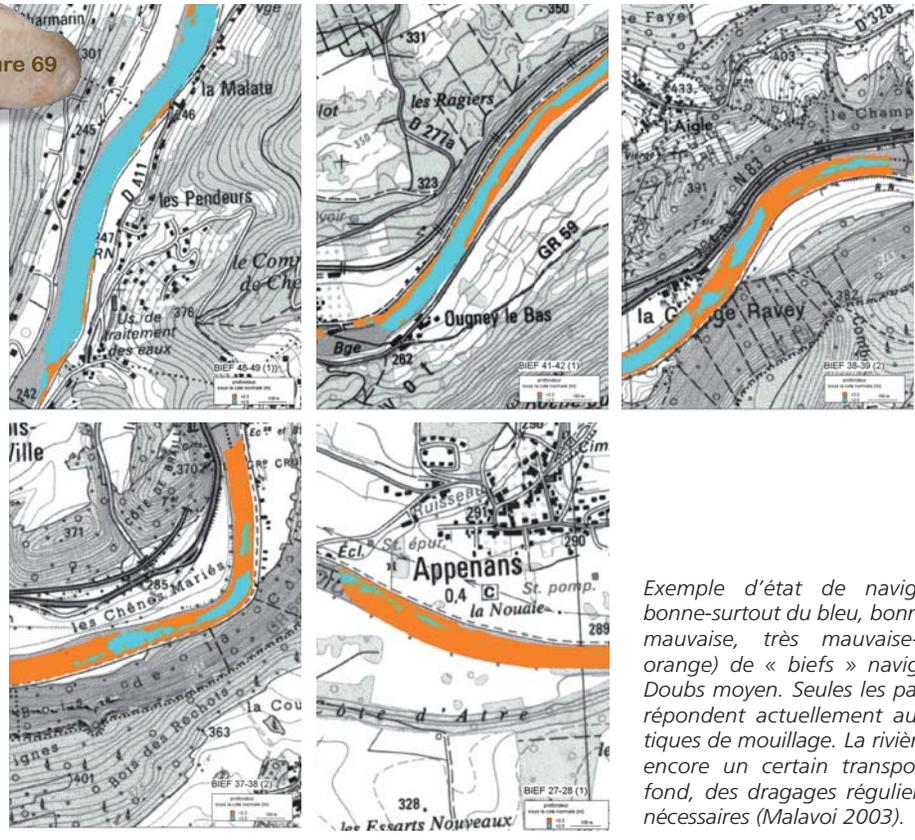


a © <http://bordabord.org/>
b © tous droits réservés

Exemples de dragages d'entretien des voies navigables.

Ce fut le cas notamment dans certains estuaires comme celui de la Loire, où le principe d'aménagement consista à favoriser par creusement du lit, dragages intensifs (prélèvement de plus de 400 Mm³ de sables en aval de Nantes) et ouvrages divers (épis d'auto-curage du lit navigable), la progression de l'onde de marée à l'intérieur des terres pour aider les navires à remonter jusqu'aux installations portuaires de Nantes (2,5 m d'incision du lit mineur à Nantes, plus de 8 m à St Nazaire).
Sur les grands cours d'eau navigables, hors parties estuariennes, les dragages étaient et sont toujours réalisés régulièrement pour **garantir le mouillage** des bateaux.
Ainsi, sur le Doubs navigable, les caractéristiques principales du chenal navigable que VNF (Voies navigables de France) est chargé d'entretenir sont : largeur du plafond = 20 m et mouillage = 2,50 m par rapport à l'étiage – conditions de navigation valables pour un bateau au gabarit Freycinet). Les images de la figure 69 présentent cinq situations de navigabilité.

Figure 69



© fond scan25 © IGN 2011

Exemple d'état de navigabilité (très bonne-surtout du bleu, bonne, moyenne, mauvaise-surtout du orange) de « biefs » navigables sur le Doubs moyen. Seules les parties en bleu répondent actuellement aux caractéristiques de mouillage. La rivière présentant encore un certain transport solide de fond, des dragages réguliers sont donc nécessaires (Malavoï 2003).

Comme pour les curages, les matériaux de dragage sont le plus souvent extraits et valorisés, si leur qualité (granulométrie et qualité chimique) le permet, ce qui contribue au déficit sédimentaire global des cours d'eau.

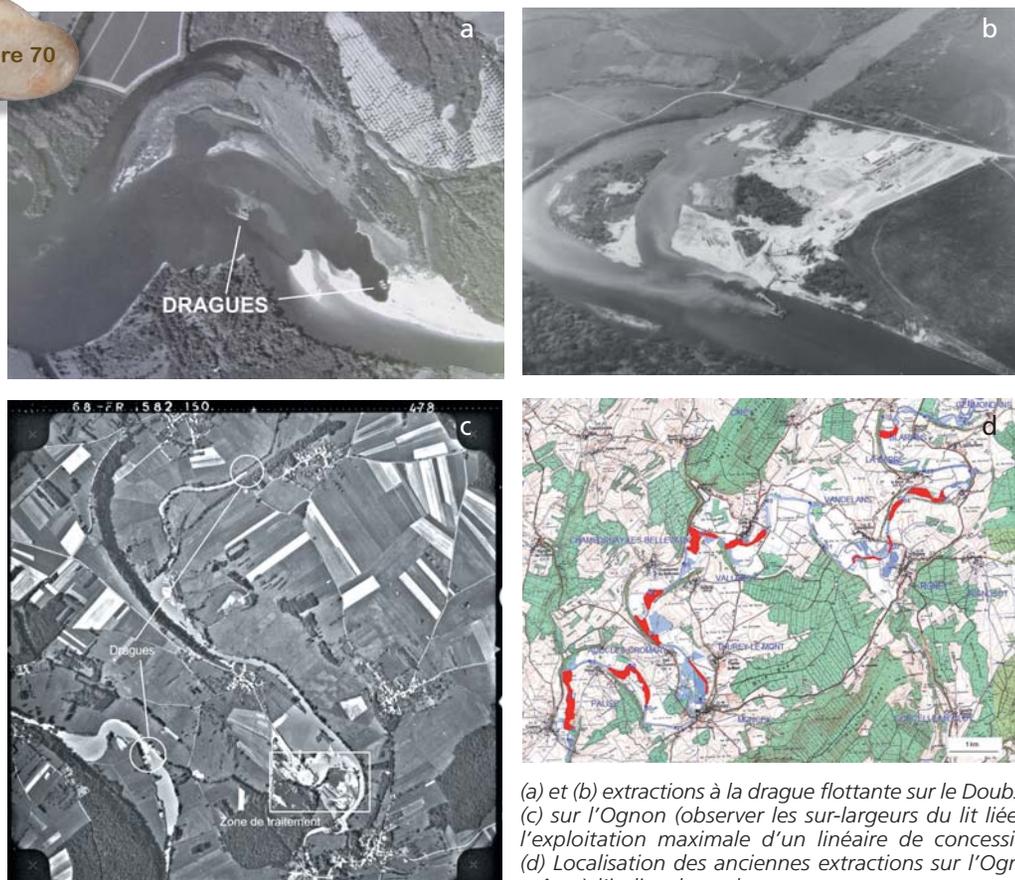
Extractions de granulats

L'essor de l'extraction en lit mineur

L'extraction massive de matériaux alluvionnaires dans le lit mineur des cours d'eau est une pratique ancienne puisqu'on peut la repérer dès la deuxième moitié du XIX^e siècle dans les textes (Bravard et Malavoi, 2000). Elle concernait historiquement des volumes relativement faibles, même si parfois ceux-ci pouvaient atteindre plusieurs millions de m³ pour la construction de digues ou de remblais de ligne de chemin de fer (Drôme par exemple). Les sites étaient de plus relativement dispersés du fait des modalités techniques du prélèvement (même si les premières dragues apparaissent à la fin du XIX^e siècle sur certains cours d'eau). Dans un **contexte de forte production de sédiments** et de fort charriage, ces volumes restaient « anecdotiques »... Après 1945, la forte croissance, le besoin de reconstruction et le développement de la technologie du béton, ainsi que la politique de développement du réseau routier et ferré, ont accru de manière inconsiderée les prélèvements dans la plupart des cours d'eau à charge alluviale grossière (des sables aux blocs). Cette accélération s'est particulièrement fait sentir à proximité des agglomérations, fortes consommatrices de béton et le long des vallées majeures comme par exemple celles du Rhône, de la Seine ou du Rhin. La mécanisation des techniques d'extraction a bien évidemment accéléré le processus.

Les autorisations d'extractions étaient souvent données sous forme d'un **linéaire de concession** qui était exploité différemment selon le type de cours d'eau (dragues flottantes sur les cours d'eau profonds ou dans les retenues de seuils, pelleuseuses sur les cours d'eau moins profonds). Une profondeur ou un volume maximal d'extraction était souvent donné... mais très rarement respecté. Dans le cadre de certaines concessions où seul un linéaire de concession était donné, les entreprises de granulats exploitaient aussi généralement les alluvions du lit majeur le long de la concession, d'où d'importantes sur-largeurs sur les rivières concernées (Figure 70).

Figure 70



(a) et (b) extractions à la drague flottante sur le Doubs et (c) sur l'Ognon (observer les sur-largeurs du lit liées à l'exploitation maximale d'un linéaire de concession) (d) Localisation des anciennes extractions sur l'Ognon grâce à l'indice de sur-largeur.

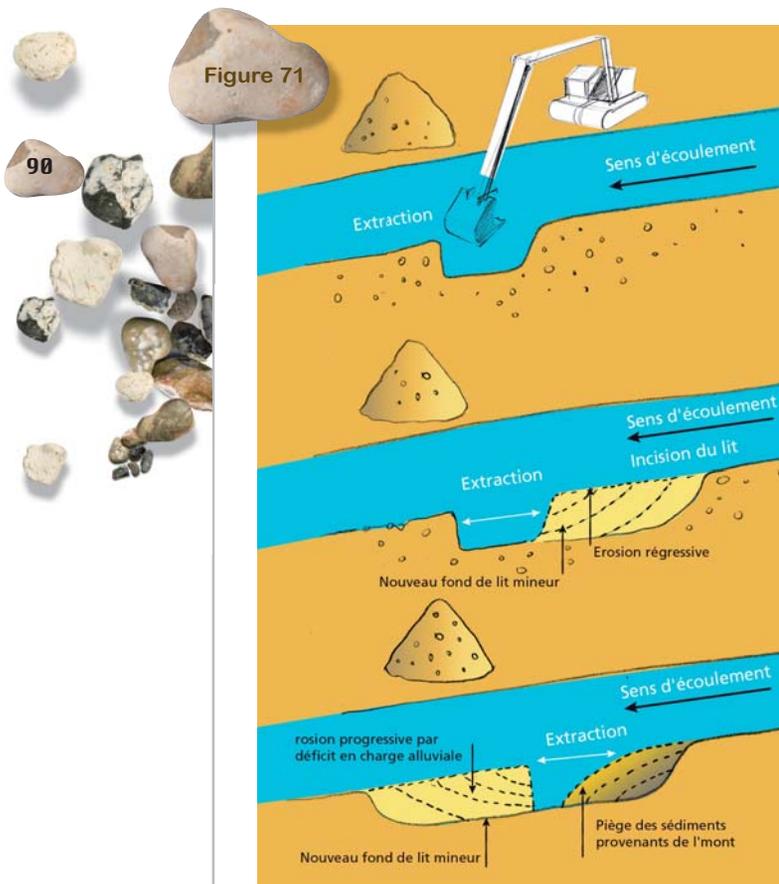
Les impacts hydromorphologiques d'une extraction, même localisée, sont aujourd'hui bien connus (Figure 71) :

■ **incision** locale du lit mineur liée au prélèvement direct sur la zone de concession. On sait par exemple que sur l'Ognon (Franche-Comté), les entreprises d'extraction exploitaient toute l'épaisseur du gisement alluvial à la drague flottante (dans les retenues de seuils de moulins) et descendaient sensiblement à **moins 7m sous le plancher alluvial** ;

■ **érosion régressive** se propageant depuis le site d'extraction vers l'amont par un phénomène de **grignotage du talus amont de l'exploitation** (souvent une vaste fosse où venaient régulièrement se piéger les matériaux en transit) jusqu'à l'obtention d'une nouvelle pente d'équilibre. Ce type d'érosion a pu se propager sur une distance variable vers l'amont en fonction de la pente locale du lit, de la taille de l'extraction, du type d'exploitation (quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres) etc. ;

■ **érosion progressive**, se propageant depuis le site d'extraction vers l'aval, en raison du **déficit en charge alluviale** provoqué par le brusque piégeage, pendant la saison hivernale durant laquelle l'exploitation était généralement stoppée en raison de débits trop élevés, d'une grande part de la charge solide en charriage. A débit égal, la rivière transportant moins de matériaux dissipe son énergie excédentaire en remobilisant une charge de substitution, en aval de l'exploitation, et ce en théorie, jusqu'à obtenir un débit solide égal à sa capacité de transport où à aboutir à une nouvelle capacité de transport adaptée à sa charge alluviale (par réduction de sa pente notamment). Cette recharge en sédiments se fait en premier lieu au détriment de la partie du lit la plus « érodable » le fond du lit en général (forces tractrices plus élevées) mais aussi les berges selon les cas (fonction de la granulométrie du fond ou des berges, de la présence de végétation ou de structures empêchant l'érosion latérale etc.).

Les concessions d'exploitation étant souvent nombreuses le long d'un même cours d'eau, les incisions locales liées au prélèvement direct des matériaux et celles générées par les érosions régressive et progressive se sont traduites par une **incision généralisée des lits fluviaux**.



Exemple d'impacts hydromorphologiques d'une extraction localisée.

La Loire et l'Allier (Figure 72), la Garonne, le Rhône, la Saône, l'Isère, l'Arve, le Fier, la Drôme, etc., comptent parmi les rivières les plus touchées par le phénomène. Mais de plus petites rivières ont aussi été largement exploitées (Tarn, Ognon, Azergues, etc.). La cause en est sans doute le fait que l'importance des apports solides constatée au XIX^e siècle était censée garantir le renouvellement à l'infini de la ressource (« la rivière fabrique des granulats » disaient les extracteurs...).

Cette mauvaise évaluation du bilan sédimentaire (par ignorance ou de manière délibérée), ainsi que la volonté explicite de mettre hors d'eau certaines plaines alluviales en misant sur l'enfoncement provoqué des cours d'eau ont joué en faveur du mécanisme.



(a) vue du lit mineur de la Loire dans le bassin du Forez (secteur du pont de Rivas) (b) l'Allier en grande Limagne (secteur de Pont du Château). La couche alluviale superficielle a disparu du fait des extractions en lit mineur et le substratum oligocène marneux apparaît sur des linéaires importants (plusieurs dizaines de km). Les biocénoses aquatiques ont quasiment disparu.

Le report des extractions vers le lit majeur

À la fin des années 70, devant l'importance des premiers impacts officiellement constatés des extractions en lit mineur (affouillement de ponts et de digues notamment), l'Etat demande aux exploitants de granulats de reporter leur activité en lit majeur (avec une définition tellement floue du lit majeur que la plupart se sont simplement déplacés un peu plus loin dans le lit moyen, dans les convexités de méandres où le matériau était abondant, bien classé et presque aussi bien lavé qu'en lit mineur...).

Certaines vallées comme la Drôme, l'Allier, la Loire forézienne, la Moselle ou l'Arve, sont aujourd'hui bordées d'un chapelet de gravières en eau. Dans certains cas, l'endiguement de rivières incisées a permis de réaliser des extractions à sec et de construire des plates-formes d'activités riveraines du cours d'eau. C'est le cas du Fier en aval de Thônes.

Les carrières alluvionnaires installées en lit majeur à proximité immédiate de cours d'eau à dynamique active, bien que moins pénalisantes que celles qui existaient en lit mineur, induisent néanmoins trois grands types de risques géodynamiques :

- disparition irréversible du stock alluvial indispensable à l'équilibre sédimentaire ;
- risque de piégeage de la charge alluviale grossière en cas de capture du cours d'eau ;
- travaux connexes qui aggravent les processus d'incision.

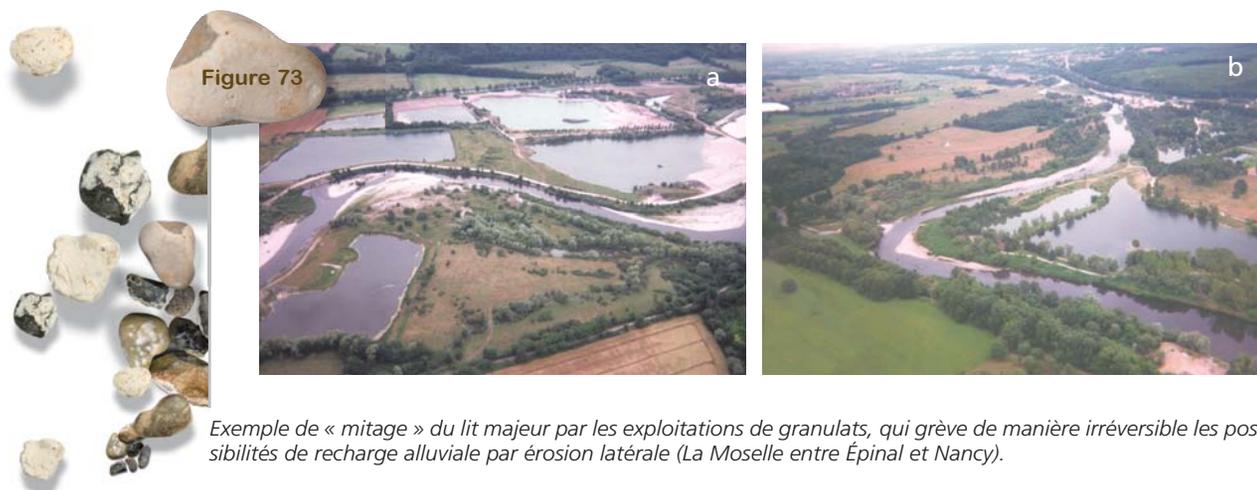
Il est donc souhaitable d'éviter leur implantation dans l'espace de mobilité où l'on doit laisser la rivière évoluer naturellement.

■ Disparition irréversible d'un stock alluvial nécessaire à l'équilibre morphologique

La plupart des cours d'eau à dynamique active, qui ont souvent été les plus exploités par les extractions en lit mineur, ont plus que jamais aujourd'hui besoin de se recharger en sédiments par érosion latérale afin d'équilibrer leur « balance morphodynamique ». Le remplacement de ce stock alluvial du lit majeur par les « vides » que

représentent les gravières en fin d'exploitation (Figure 73) conduit à une impossibilité pour ces cours d'eau, déjà souvent déficitaires en charge grossière, d'assurer leur équilibre géodynamique. S'ensuivent alors des processus de recharge par érosion verticale, qui se traduisent par les mêmes impacts que ceux liés aux extractions en lit mineur : enfoncement accéléré du lit mineur et de la nappe alluviale et réduction de la ressource en eau, déchaussement des ouvrages d'art (ponts, digues), assèchement des écosystèmes rivulaires.

Cette disparition du stock alluvial est irréversible à notre échelle de temps.



Exemple de « mitage » du lit majeur par les exploitations de granulats, qui grève de manière irréversible les possibilités de recharge alluviale par érosion latérale (La Moselle entre Épinal et Nancy).

■ Risque de piégeage de la charge de fond

Le second « risque » géomorphologique engendré par des gravières dans l'espace de liberté est essentiellement lié aux **gravières volumineuses et profondes qui peuvent piéger une grande partie de la charge solide en charriage** si elles capturent le cours d'eau à l'occasion d'une crue (Figure 74). Ce piégeage peut alors générer une érosion progressive (érosion verticale se propageant de l'amont vers l'aval), le cours d'eau cherchant à se « re-saturer » en sédiments après l'abandon de sa charge grossière. Ce processus peut conduire à des impacts identiques à ceux provoqués par les exploitations en lit mineur.



Captures de cours d'eau (a) la Dore et (b) l'Allier, par des gravières à proximité du lit actif et piégeage de la charge alluviale de fond, indispensable à l'équilibre dynamique.

■ Effets des travaux connexes

De nombreuses gravières ont pu être exploitées en bordure de rivières à dynamique active grâce à divers travaux sur les lits mineurs permettant une exploitation sans « risques » hydraulique majeurs pour les exploitants. Ces travaux sont de plusieurs types :

- rectification puis endiguement pour accroître la « surface alluviale exploitable » (Figure 75). Ces travaux ont généralement conduit à une aggravation de l'incision des lits mineurs du fait de l'augmentation des puissances

érosives liées à la rectification (augmentation de la pente) et à l'endiguement (augmentation des débits « de pleins bords ») ;

■ protection des gravières par des enrochements, ce qui a pour effet positif de réduire le risque de piégeage de la charge de fond mais pour effet négatif d'augmenter, au moins ponctuellement, les affouillements.

Figure 75



a - b © J.R. Malavoi

Deux exemples de rectification et d'endiguement pour permettre une exploitation plus importante (en surface) et plus sécurisée des alluvions du lit majeur en bordure de cours d'eau à dynamique active (La Moselle en aval d'Epinal, La Garonne à St Gaudens).

Quelques chiffres

Les tonnages ou les volumes extraits n'ont pas vraiment de sens géomorphologique. Il faudrait pouvoir les comparer avec les apports solides, potentiels ou réels, ce qui est toujours très délicat. Les hauteurs d'incision sont plus explicites...

Voici ci-dessous quelques données quantitatives (voir notamment le tableau 13) concernant les volumes ou tonnages extraits sur certains cours d'eau français et les incisions corrélatives observées :

■ Bassin de la Loire

⇒ Loire : on estime à environ 100 millions de tonnes la quantité de sable extraite de la Loire en région Centre entre 1950 et 1992. Les apports solides estimés sur la même période sont de l'ordre de 40 MT (1 MT / an environ). Parallèlement, le lit moyen s'est enfoncé d'environ 2 m sur le même linéaire ;

■ Bassin de la Garonne

⇒ Garonne : 1 à 3 m d'incision sur la Garonne amont (Sogreah, 2007) et affleurement généralisé du substratum molassique. Moins 2 m entre Toulouse et la confluence avec le Tarn ;

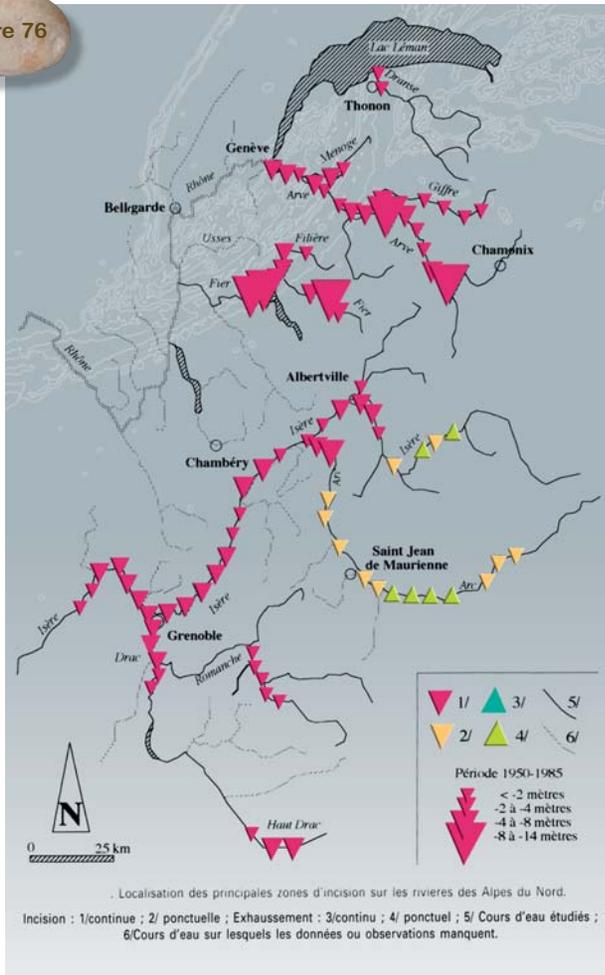
■ Bassin du Rhône

⇒ Ardèche : le volume extrait pendant 20 ans dans l'Ardèche à l'aval de Ruoms a été évalué à 4 millions de m³ (Mm³), alors que dans le même temps l'apport (estimé) à la rivière a été de l'ordre de 1,5 Mm³ (avec une variation annuelle de 15 000 à 115 000 m³ par an). (Sogreah, 1993). Dans le même temps, le lit mineur s'est enfoncé d'environ 1 m (Piegay et Landon, 1994),

⇒ Drôme : on estime à près de 10 Mm³ le volume « perdu » par la rivière Drôme entre les années 1930 et 1990 dont 80 % par extractions et curages. Cela se traduit par une incision généralisée de 2 à 5 m. Alors que le bassin versant exporte naturellement en moyenne 35 000 m³ /an, on a extrait jusqu'à 250 000 m³ /an. Avec une production actuelle du réseau secondaire de l'ordre de 25 000 m³ /an, le déficit du bilan sédimentaire reste d'actualité même si les extractions ont cessé,

⇒ Rivières des Alpes du Nord (Peiry et al., 1994, Figure 76) : incision de 12 m sur l'Arve au Fayet et 10 m dans la plaine de Cluses (15 Mm³ extraits sur l'Arve depuis 1950), moins 8 m sur le Fier supérieur et moins 14 m aux environs d'Annecy, moins 3 m sur les 15 dernier km du Drac.

Figure 76



Les zones d'incision sur les rivières des Alpes du Nord (Peiry et al., 1994).

Légende Tableau 13
 Li = Longueur de cours d'eau incisée ;
 Vr = Valeur record ;
 ↓ = diminution
 (1) Bilan du volume total de matériaux disparus par incision, ou * estimation des volumes extraits (période de référence : 1950-1985) ;
 (2) Quantité extraite + destockage induit (d'après Blanc et al, 1989)
 Qs = flux solide et Ql = flux liquide ;
 P.A.G. = petit âge glaciaire ;
 RTM = travaux du service de Restauration des terrains de montagne.
 CS = Charge solide ;
 CSPE = Charge solide potentiellement érodable.
 S = Pente du lit,
 Ω = Puissance hydraulique.

Tableau 13

L'incision des affluents du Haut-Rhône français et des rivières des Alpes du nord (Landon 1999 et 2007, synthèse d'après les travaux de Link, 1970, Peiry, 1988, 1989, Blanc et al., 1989, Bravard et al., 1989, 1990, Bravard, 1991b, Peiry et al., 1994, Piégay, 1995.).

Constat					Causes				
Li	Période d'incision	Vr	Volume(1)	↓ de Qs et Ql	Endiguement	Périm.	Barrages	Extraction	
km	la + active	m	perdu	post-P.A.G.	Long. Import.	RTM	Dérivation	lit mineur	
Arve	50	post 1950	12	41 Mt(2)	déterminé	oui	oui	oui	
Fier	30	post 1950	14	2 Mm ³	probable	oui	dès 1909	oui	
Ain	51	post. 1850	5,5	?	déterminé	faible	dès 1930	oui	
Drac inf.	15	post 1950	4	10 Mm ^{3*}	probable	oui	oui	oui	
Drac sup.	?	post 1970	4	5,5 Mm ^{3*}	probable		dès 1931	oui	
Arc aval	10	post 1970		?	probable	oui	dès 1950	oui	
Giffre	12	post 1970	6,5	5 Mm ^{3*}	probable	oui	oui	oui	
Romanche	15	post 1970		?	probable	oui	dès 1907	oui	
Isère	80	post 1950		9 Mm ^{3*}	déterminé	oui	oui	dès 1900	oui
Effets induits				capacité du cours d'eau	↓ recharge latérale = ↓CS	↓ de CSPE	↓ transit CS	↓ = CS, ↑ S, ↑ de Ω	

Seuils et barrages

Généralités

Il existe deux grands types d'ouvrages transversaux sur les cours d'eau, ponts mis à part : les seuils et les barrages (Figure 77).

Les seuils en rivière sont des ouvrages, fixes ou mobiles, qui barrent tout ou partie du lit mineur d'un cours d'eau (définition du SANDRE, 2008). Ils sont généralement d'une hauteur inférieure à 5 m (soit la hauteur de berges des plus grands cours d'eau) et leur nombre en France est estimé actuellement à plus de 60 000. Probablement plus de 70 % de ces ouvrages, dont la vocation initiale était l'utilisation de la force hydraulique pour des moulins à farine, des forges, ou la dérivation pour l'irrigation gravitaire, ont aujourd'hui perdu cet usage économique.

Contrairement aux seuils, les **barrages** obstruent une grande partie du fond de vallée, soit bien plus que le simple lit mineur. Ces ouvrages de forte hauteur, presque toujours supérieure à 5 m, sont environ 700 sur le territoire national.

Figure 77



a-b © J.R. Malavoi

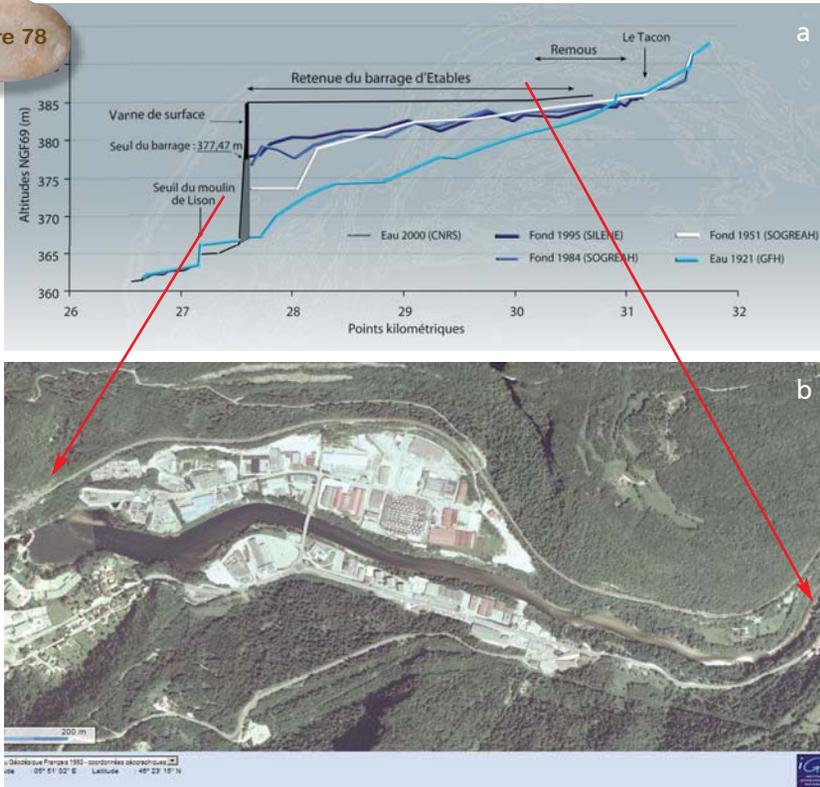
(a) un exemple de seuil et (b) de barrage.

La grande majorité des ouvrages transversaux, quel que soit le type de cours d'eau, bloque une fraction importante, voire la totalité, de la charge alluviale grossière de fond (Figure 78).

Cet effet de piégeage perdure en général jusqu'à ce que l'ouvrage soit plein et devienne plus ou moins « transparent » au transport solide, c'est-à-dire que ce dernier passe intégralement par dessus la crête.

Néanmoins, lorsque le réservoir est plein la pente résultante est, pendant un certain temps au moins, plus faible que la pente initiale. Les conditions de transfert de la charge de fond ne sont donc pas aussi efficaces qu'avant l'aménagement.

Figure 78



© fond Géoportail © IGN 2011

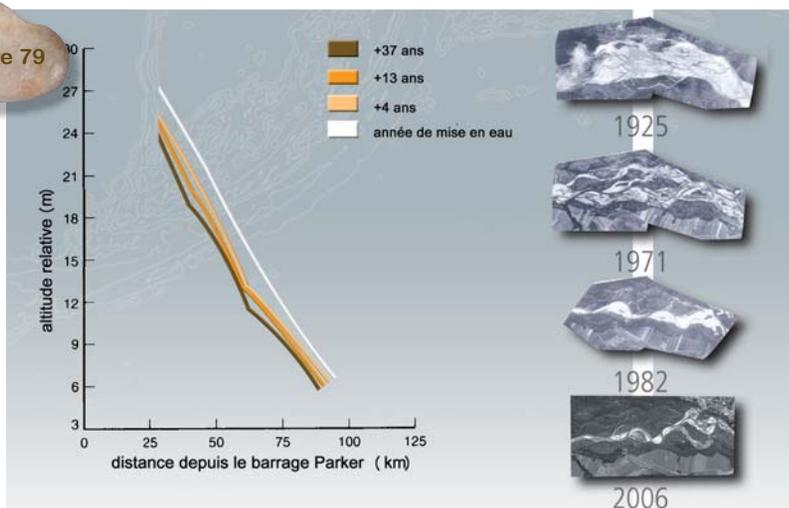
(a) évolution du remplissage du réservoir du barrage d'Étable (Saint-Claude – Jura) entre 1932 (année de mise en service) et 2000 (Landon *et al.* 2000), (b) photographie aérienne d'une partie de la retenue. On y distingue bien le remous solide.

Ces alluvions grossières vont manquer à l'aval, entraînant une **érosion progressive** (Figure 79), une incision du lit mineur et, au mieux un pavage du lit, au pire la disparition à plus ou moins long terme du substrat alluvial en aval de l'ouvrage.

Couplée à cette **érosion progressive**, on observe aussi parfois de véritables métamorphoses fluviales, comme celle de l'Isar en Allemagne, passé d'un large tressage à un méandrage actif à la suite de la construction du barrage de Sylvenstein à la fin des années 50.

Ces phénomènes sont plus marqués dans les cours d'eau à dynamique active et à forte puissance.

Figure 79



(a) profil en long du Colorado en aval du barrage Parker; immédiatement après la construction, puis 4, 13 et 37 ans après. On observe une érosion progressive de moins 3 m en aval immédiat et qui atteint encore moins 1,5 m plus de 70 km en aval ! (Williams et Wolman, 1984) (b) métamorphose fluviale de l'Isar à Ascholding suite à la construction du barrage de Sylvenstein en 1959 (Wagner A, Wagner I., 2002).

Notons que les barrages, contrairement aux seuils, peuvent aussi avoir une influence indirecte sur le transport solide via les modifications parfois importantes qu'ils induisent sur le régime des crues. C'est le cas notamment de certains ouvrages à vocations multiples qui cumulent à un objectif de production hydroélectrique un objectif de rétention des crues ou un objectif de soutien d'étiage (par exemple Serre-Ponçon sur la Durance ou Vouglans sur l'Ain). Ces ouvrages réduisent la fréquence des crues morphogènes à leur aval, ce qui peut provoquer des accumulations sédimentaires, notamment à la confluence de tributaires à fort transport solide, le cours d'eau n'ayant plus ou trop rarement la capacité à évacuer les apports solides.

Si les impacts des barrages sur le transport solide sont aujourd'hui bien documentés, les effets des « simples » seuils sont moins connus.

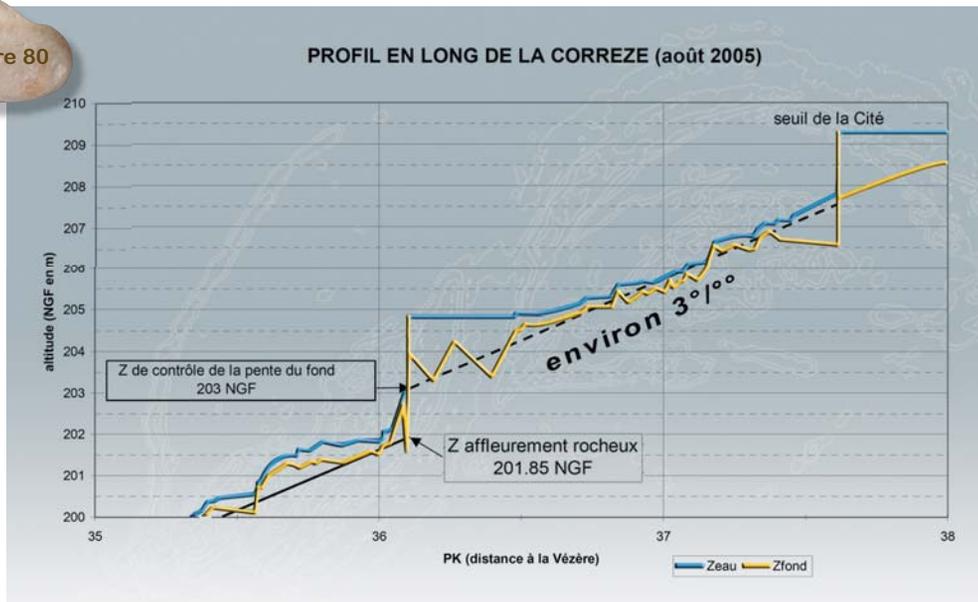
Dans les régions à fort transport solide de fond, les seuils peuvent se remplir assez rapidement et devenir **en partie transparents** lorsque le remous solide atteint la crête du seuil (voir plus loin la méthode d'estimation visuelle de la transparence au débit solide).

Toutefois, malgré cette **transparence relative**, le piégeage d'une partie importante de la charge grossière se poursuit généralement par **remous solide régressif**, remous qui peut se propager très loin en amont de l'ouvrage.

On voit ainsi sur la figure 80 le remous solide régressif qui s'est créé au fil des siècles en amont du seuil de Souilhac, sur la Corrèze à Tulle. Ce seuil, probablement antérieur à 1700, s'est peu à peu rempli d'alluvions grossières jusqu'à ce que la pente amont atteigne un nouveau profil d'équilibre.

On notera que ce remous solide, dont la pente est sensiblement identique à la pente aval du seuil (0,003), s'étend sur au moins 5 km. Sur ce remous solide en cours de formation, de nouveaux seuils ont été construits au XIX^{ème} et au XX^{ème} siècles. On peut donc considérer que, même s'il arrive occasionnellement que quelques alluvions grossières franchissent la crête du seuil, l'effet de piégeage d'une partie importante de la charge perdue (d'autant que de nouveaux seuils sont aujourd'hui présents).

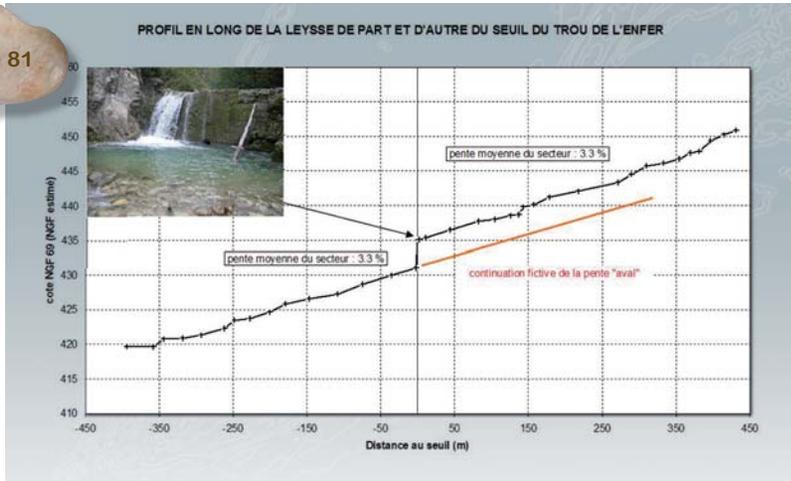
Figure 80



Le remous solide régressif qui s'est créé au fil des siècles en amont du seuil de Souilhac, sur la Corrèze à Tulle. Ce seuil, probablement antérieur à 1700, s'est peu à peu rempli d'alluvions grossières jusqu'à ce que la pente amont atteigne un nouveau profil d'équilibre.

Sur la figure 81 au contraire, on constate qu'un nouveau profil d'équilibre du fond s'est établi au fil des décennies en amont du seuil. Le remous liquide initial (retenue du seuil) devait mesurer une centaine de mètres. Le remous solide réel (que l'on peut traduire en volume **minimal** d'alluvions grossières piégées par le seuil) remonte sur plus de 450 m. On peut considérer que ce seuil est aujourd'hui transparent vis à vis de la charge de fond.

Figure 81



Remous solide en amont d'un seuil sur un cours d'eau de montagne. La pente d'équilibre est la même de part et d'autre de l'ouvrage, mais 4 m plus « haut » en amont du seuil.

Il existe actuellement peu de données quantitatives sur les impacts des seuils sur le transport solide de fond. Les exemples présentés ici n'ont pour objectif que de montrer que l'effet de « piégeage » de la charge de fond nécessite, pour être correctement évalué, de connaître l'effet remous solide, ce qui oblige à disposer de relevés topographiques assez précis en amont de l'ouvrage (et en aval pour identifier et quantifier d'éventuelles incisions).

On peut synthétiser les éléments de connaissances des impacts des seuils et barrages sur le transport solide en trois points :

- les barrages ont des impacts majeurs sur le piégeage de la charge de fond, sauf s'ils sont équipés de dispositifs efficaces permettant le transit régulier de cette charge (passes de dégrèvement fonctionnelles, dispositifs de dérivation) ;
- les seuils peuvent avoir des impacts forts, mais très variables selon :
 - ⇒ leur ancienneté,
 - ⇒ leur hauteur,
 - ⇒ les apports solides provenant de l'amont.

Ces impacts sont liés notamment à l'établissement progressif d'une nouvelle pente d'équilibre à leur amont, qui peut se révéler un processus de piégeage plus efficace que la retenue de l'ouvrage elle-même.

- La suppression totale ou partielle de l'un ou l'autre type d'ouvrage se traduira très probablement par un apport brutal et massif de matériaux en aval : ceux qui seront générés par l'érosion régressive dans le remous solide de l'ouvrage, cette érosion régressive pouvant se propager très au delà du remous liquide et risquant de menacer certains biens et usages établis sur le linéaire de ce remous solide : ponts, protections de berges, digues etc.

Évaluation de l'effet de piégeage d'un seuil sur la charge de fond

Il est possible à partir d'une analyse de la BD ORTHO® ou du Géoportail de l'IGN d'évaluer sommairement l'impact probable d'un seuil ou d'une série de seuils sur le transport solide de la charge de fond.

■ Cartographie des bancs alluviaux

La présence d'une certaine superficie de bancs alluviaux dans le tronçon situé en aval d'un seuil peut être un indicateur intéressant de la capacité de franchissement de l'ouvrage par les alluvions grossières provenant de l'amont.

Si absence d'alluvions

S'il n'existe aucune trace d'apports solides en aval du seuil (vérifier que l'on n'est pas dans le remous d'un seuil situé en aval...), dans un sous-tronçon où il n'y a ni apports d'affluents, ni apports par érosion de berge (voir plus loin), il convient d'abord de vérifier s'il en existe à l'amont :

- s'il en existe, on peut alors admettre l'effet piégeant de l'ouvrage ;
- s'il n'en existe pas (Figure 82 et 83), le seuil n'est probablement pas « piégeant » mais il faut vérifier la cause de l'absence d'alluvions grossières en amont,
 - ⇒ absence « typologique » : on est dans un bassin naturellement peu productif en sédiments grossiers,
 - ⇒ absence liée à d'autres seuils ou barrages en amont, anciennes extractions, etc.

Figure 82



fond Géoportail © IGN 2011

Exemple d'absence d'alluvions visibles en aval d'un seuil (seuil de Souilhac à Tulle présenté plus haut).

Figure 83



fond Géoportail © IGN 2011

Exemple d'absence d'alluvions visibles en aval d'un seuil (seuil de Rosières). On distingue bien les affleurements rocheux (strates bien visibles).

Si présence d'alluvions

La présence d'alluvions en aval d'un seuil ne signifie pas pour autant qu'il y ait transparence de l'ouvrage.

1- Transparence ou reprise du stock par érosion

Sur la figure 84, on observe un tronçon de cours d'eau situé en aval d'un seuil de prise d'eau de moulin. En admettant que l'on soit sur un cours d'eau naturellement à « apports solides moyens » (approche typologique initiale), la présence de bancs alluviaux en aval de l'ouvrage indique qu'il y a un transport solide non négligeable. Il n'est cependant pas possible sur la base de la photographie aérienne, de savoir s'il s'agit d'un transport solide qui franchit le seuil ou d'une charge alluviale provenant :

- de la reprise d'un stock alluvial fossile par érosion latérale (dans la plaine holocène) ;
- de la reprise du stock en lit mineur par érosion du fond (érosion progressive).

Plusieurs types d'analyses complémentaires permettraient de lever le doute :

- une étude diachronique sur 20 ans (comparaison de tracés anciens) ;
- une comparaison de profils en long et/ou en travers pour vérifier s'il existe une incision du lit mineur ;
- une visite sur site pour vérifier s'il existe bien des zones d'érosion latérale active.

En l'espèce, il s'agit d'une transparence relative et essentiellement d'une reprise du stock fossile holocène par érosion latérale.



Figure 84



fond Géoportail © IGN 2011

Vue d'un tronçon de rivière en aval d'un seuil. Les alluvions visibles proviennent essentiellement d'une recharge locale par érosion latérale.

2- Transparence partielle

Même si l'on est certain que les alluvions proviennent bien de l'amont du seuil, il est souvent difficile d'estimer s'il s'agit d'une transparence totale ou partielle.

En effet, une partie des alluvions peut franchir le seuil (souvent une fraction « fine » de la charge grossière, dont les plus gros éléments sont piégés très en amont) tandis que le piégeage continue dans le remous solide qui est en train de se constituer en amont, parfois sur de longues distances.

La transparence partielle peut s'effectuer si :

- le seuil est assez bas et n'a que peu d'effet de modification de la charge en crue (seuil fortement noyé), dans un contexte de cours d'eau à assez forte puissance et charge alluviale importante ;
- le seuil est assez ancien et le cours d'eau a une charge solide importante, une partie des alluvions peut atteindre la crête de l'ouvrage et la franchir, même si par ailleurs le piégeage d'une partie de la charge grossière dans le remous solide continue ;
- le cours d'eau a une très forte puissance capable de mobiliser les matériaux grossiers en crue, même dans l'emprise d'une retenue de seuil ;
- l'ouvrage de retenue présente un fonctionnement qui permet le transit occasionnel des alluvions dans la retenue (abaissement de la retenue en crue + ouvrage de dégrèvement) (probablement le cas dans exemple de la figure 85).

100

Figure 85



fond Géoportail © IGN 2011

Barrage piégeant probablement une partie de la charge de fond mais n'ayant pas d'effet visible (à vérifier par des analyses plus poussées du profil en long) sur la réduction des apports en aval (existence d'ouvrages de dégrèvement fonctionnels ?).

NB Il est utopique, sans une étude de transport solide complexe, de déterminer le pourcentage de la charge totale naturelle du cours d'eau qui franchit l'ouvrage. Par ailleurs, il est possible que certains ouvrages piègent temporairement la charge grossière et la relarguent en partie à l'occasion d'opérations particulières (chasses, transparences). Il est donc nécessaire de connaître les consignes de fonctionnement de l'ouvrage et leur historique. Ainsi (Figure 86), le barrage de Jons sur le Rhône avait un effet piégeant important (avec toutefois des périodes, espacées, de relargage) jusque dans les années 90. Depuis plus de 15 ans, les nouvelles consignes de gestion obligent à ouvrir les vannes de fond dès que les débits atteignent les valeurs critiques de charriage dans le canal de Miribel. L'ouvrage est devenu transparent.

Figure 86



fond Géoportail © IGN 2011

Le barrage de Jons sur le Rhône (le canal de Miribel), aujourd'hui transparent vis à vis de la charge de fond du fait d'une modification des consignes d'ouverture des vannes.

3- Transparence totale

Certains ouvrages ne présentent quasiment pas (ou plus) d'effet de piégeage des alluvions. Les conditions de transparence totale sont les mêmes que pour la transparence partielle mais plus accentuées :

- le seuil est bas et n'a que peu d'effet de modification de la charge en crue (seuil fortement noyé), dans un contexte de cours d'eau à assez forte puissance et charge alluviale importante (Figure 87) ;

101

Figure 87



fond Géoportail © IGN 2011

Exemple d'ouvrage transparent vis à vis du transport solide.

- le seuil est ancien sur un cours d'eau à fort transport solide. Il arrive dans certains cas que le profil en long amont soit complètement ajusté (voir exemple de la Leysse plus haut) et que la charge franchisse intégralement l'ouvrage, même s'il fait plusieurs mètres de haut ;
- le cours d'eau est très puissant et est capable en crue, de transporter la charge de fond dans l'emprise d'une retenue de faible profondeur (Figure 88).



Succession de seuils sur l'Ardèche. En raison de la forte puissance du cours d'eau il ne semble pas y avoir de piégeage majeur en amont des ouvrages.

■ Mesures directes du piégeage

On a vu que l'effet de piégeage ne peut s'évaluer objectivement uniquement sur la base d'une simple estimation visuelle du remplissage sédimentaire de la retenue au droit de la crête de l'ouvrage, particulièrement sur les rivières à transports solide important et sur les ouvrages anciens. Malgré un seuil qui semble « rempli », le piégeage par remous solide peut être présent et important.

Néanmoins, la « visualisation » de ce remplissage peut déjà donner des éléments sommaires de connaissance. L'idéal cependant est de réaliser un profil en long du fond du lit mineur de part et d'autre de l'ouvrage pour déterminer :

- la pente naturelle d'équilibre du fond en aval (si tant est qu'elle soit naturelle compte tenu de l'effet de piégeage de l'ouvrage...). Nous estimons que le profil aval doit a minima être **relevé sur une longueur de 50 fois la largeur du cours d'eau à pleins bords** (attention, il s'agit de la largeur naturelle et non de la sur-largeur que l'on trouve généralement au droit d'un seuil), sauf si on est dans la retenue d'un seuil situé plus en aval ;
- la pente du fond en amont pour vérifier l'existence et l'importance d'un remous solide et éventuellement l'atteinte d'un profil permettant la transparence réelle du transport solide ;
- le profil amont doit a minima être relevé sur une longueur de l'ordre de 50 fois la largeur (si possible plutôt 100 fois). Si sur ce linéaire, il apparaît qu'un remous solide se développe, il peut être utile lors d'une phase d'étude complémentaire, de rechercher la limite amont du remous solide (notamment pour évaluer l'emprise de l'érosion régressive et les volumes susceptibles d'être mobilisés en cas d'effacement) ;
- à ce profil amont devraient si possible être couplées des mesures de la granulométrie du lit selon un protocole d'échantillonnage adapté.

■ Estimation du remplissage de la retenue en quatre classes

La méthode d'évaluation sommaire que nous proposons consiste à remonter à pied le long du remous de l'ouvrage (liquide ou solide) sur une longueur d'au moins 20 fois la largeur du lit à pleins bords et à déterminer le remplissage de la retenue en quatre classes.

NB Cette approche est surtout intéressante pour les petits cours d'eau ou les cours d'eau sous forêt que l'on n'aura pas pu analyser sur photographie aérienne.

Niveau 1. Ouvrage plein

On visualise bien le nouveau fond du lit mais il est perché, sensiblement de la hauteur du seuil (Figure 89). Il n'y a plus ou presque de retenue liquide. On retrouve les faciès d'écoulements naturels. On peut estimer une quasi transparence de l'ouvrage (hors effet de continuation du piégeage en amont du remous solide, cf. plus haut).

Figure 89



a-b-c © J.R. Malavoi

Exemples d'ouvrages pleins (remplissage de niveau 1).

Niveau 2. Ouvrage en partie plein

Il y a encore un remous liquide mais des bancs alluviaux grossiers (composés de charge de fond) affleurent souvent au dessus de la cote du plan d'eau ou sont visibles très légèrement en dessous, immédiatement en amont de l'ouvrage (dans une emprise de l'ordre de une largeur de lit à pleins bords). On peut estimer que ces ouvrages sont **en partie transparents** à un certain volume et une certaine fraction granulométrique d'alluvions provenant de l'amont (Figure 90).

Attention. On trouve souvent un placage d'alluvions grossières immédiatement le long de l'ouvrage en amont immédiat de celui-ci (voir Figure 91d), cela ne signifie pas pour autant que la retenue est remplie.

Figure 90



a © J.R. Malavoi
b © tous droits réservés

Exemples d'ouvrages en partie pleins (niveau 2).

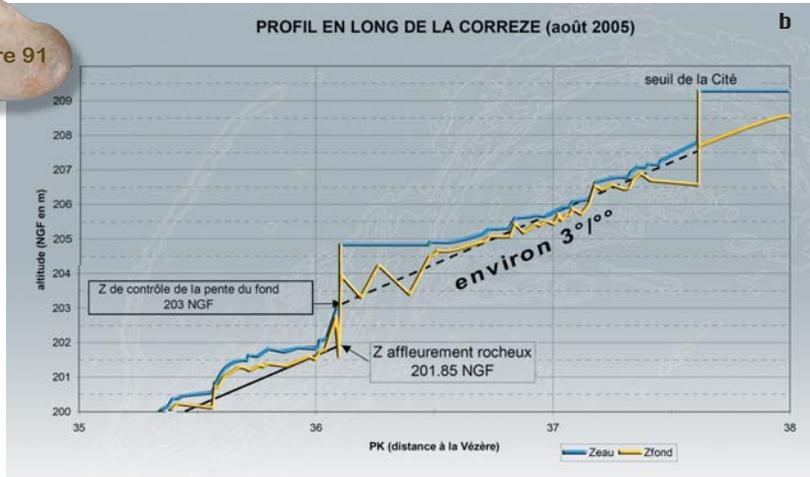
Niveau 3. Ouvrage en cours de remplissage

On observe des dépôts alluviaux grossiers dans l'emprise du plan d'eau mais ils sont presque tous sous la cote de ligne d'eau de la retenue et il subsiste une hauteur d'eau importante. Certains dépôts, en queue de retenue, peuvent éventuellement émerger.

Attention. Il peut arriver de constater un placage d'alluvions grossières immédiatement au niveau de l'ouvrage. **Ces ouvrages sont actuellement piégeants pour la charge de fond**, même si une fraction fine peut transiter (sables, graviers)



Figure 91



a - c © J.R. Malavoï

104



Exemples d'ouvrages piégeants, en cours de remplissage (niveau 3). (a et b) seuil de Souilhac et (c et d) seuil de BWA sur la Corrèze à Tulle et profils en long de part et d'autre des ouvrages (ligne d'eau et fond du talweg). On note une légère remontée du fond en amont immédiat des ouvrages qui pourtant toujours très piégeants (sauf celui de BWA qui vient d'être effacé...).

Niveau 4. Ouvrage presque vide

On n'observe pas ou très peu de dépôts de charge de fond dans le remous hydraulique de l'ouvrage (Figure 92). Deux hypothèses sont alors envisageables :

- ces ouvrages ne sont pas piégeants, c'est parfois le cas sur les cours d'eau très puissants (exemple de l'Ardèche plus haut) ou sur les ouvrages disposant de dispositifs de dégrèvement fonctionnels ;
- ces ouvrages sont potentiellement piégeants, mais il n'existe pas ou peu d'apports solides... (c'est facile à vérifier).

Figure 92



a - b © J.R. Malavoi

Exemples d'ouvrages presque vides de sédiments grossiers (niveau 4).

■ Une option : le survol aérien à basse altitude

Un survol à basse altitude (200 m/sol) en ULM ou hélicoptère avec prises de vue photo et vidéo permet de visiter un linéaire important en quelques heures et de réaliser l'analyse des images au bureau (Figure 93).

Figure 93



a © J.R. Malavoi
b fond Géoportail © IGN 2011

(a) photo basse altitude et (b) orthophoto (remplissage de niveau 3).

Attention. Ces mesures « minimales » ne permettent pas de garantir la fiabilité du diagnostic d'interruption totale ou partielle du transport solide de fond, notamment pour les retenues de classe de remplissage 3. Pour les classes 1 et surtout 2, un profil en long permettrait de vérifier la longueur et la pente du remous solide amont et d'améliorer l'évaluation de la transparence.

Autres types d'ouvrages potentiellement piégeants

Il existe certains types particuliers d'ouvrages installés dans le lit mineur des cours d'eau qui ont pour effet, de par la modification majeure des conditions d'écoulement qu'ils induisent, un piégeage plus ou moins important et durable de la charge alluviale en transit (sédiments grossiers et sédiments fins).

Au premier rang d'entre eux on peut citer les **épîs** qui selon leur objectif comme l'entretien d'un chenal de navigation (Figure 94), le piégeage volontaire des alluvions pour gagner des terres cultivables (Figure 95 a), la protection contre l'érosion des berges (Figure 95 b) et donc leur forme et leur position, ont des effets plus ou moins forts et durables sur le transport solide, notamment grossier.

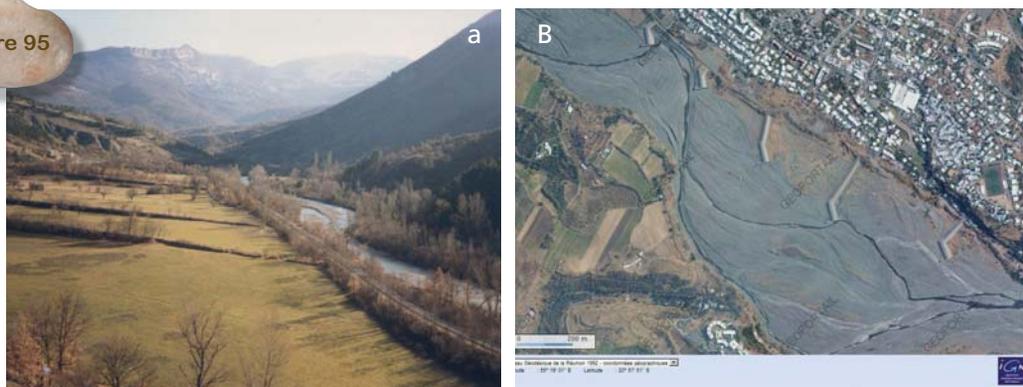
Figure 94



(a) épîs de navigation (ouvrages perpendiculaires à l'écoulement) sur la Loire à Ingrandes, (b) Dhuis et chevrettes (ouvrages de navigation plus ou moins parallèles à l'écoulement) sur la Loire à Orléans.

a- b- Fond Géoportail © IGN 2011

Figure 95



a) épîs construits au XIX^e siècle dans le lit mineur d'une rivière en tresse pour piéger les alluvions (grossières au début puis fines ensuite) et gagner de l'espace cultivable. Un remblai supportant une voie ferrée a été construit par la suite le long du bord interne de ces épîs.

a © J.R. Malavoï
b- Fond Géoportail © IGN 2011



Protection des berges

La production externe de sédiments grossiers s'étant progressivement tarie au fil des XIX et XX^e siècles, les barrages, les curages et les extractions ayant fortement perturbé le stock alluvial en lit mineur et son transit vers l'aval, seule la production interne, par reprise du stock alluvial du lit majeur holocène et des terrasses plus anciennes, permettrait aujourd'hui de garantir l'équilibre géodynamique (et donc écologique) des cours d'eau.

La reprise de ce stock quaternaire par le biais des processus d'érosion latérale réinjecte en effet dans le cours d'eau, un volume de sédiments qui va immédiatement participer à l'équilibrage de la balance géodynamique, particulièrement s'il est d'une texture correspondant à la charge de fond.

On sait par exemple que l'érosion latérale dans les vals libres de la Loire et de l'Allier leur injecte chaque année : pour la Loire environ 300 à 400 000 m³ de matériaux gravelo-sableux, pour l'Allier le chiffre dépasse le million de m³ (Malavoi, 2002).

Or, la protection des berges contre l'érosion latérale, dont l'emprise linéaire s'est fortement accrue au cours de la seconde moitié du XX^e siècle, vient fortement perturber cette potentialité de rééquilibrage sédimentaire.

Même s'il n'existe pas à ce jour de statistiques fiables sur le linéaire de cours d'eau dont les berges sont actuellement artificiellement stabilisées, le phénomène est suffisamment important pour faire craindre une impossibilité pour de très nombreuses rivières, de rééquilibrer leur charge solide par le biais de ces processus. Quelle que soit la technique utilisée, de la plus « lourde » (béton, palplanches, enrochements) à la plus « douce » (génie végétal) (Figure 96, page suivante), la protection des berges contre les processus d'érosion latérale, qu'elle soit justifiée ou non, empêchera totalement toute recharge sédimentaire.

Le concept d'**espace de liberté ou de mobilité**, né dans les années 1980, était en grande partie sous tendu par ce constat et la nécessité de garantir l'équilibre sédimentaire des cours d'eau actif en préservant cette capacité d'érosion.



Figure 96



a- b- d © J.R. Malavoi
c © Onema 06
e- f © N. Landon

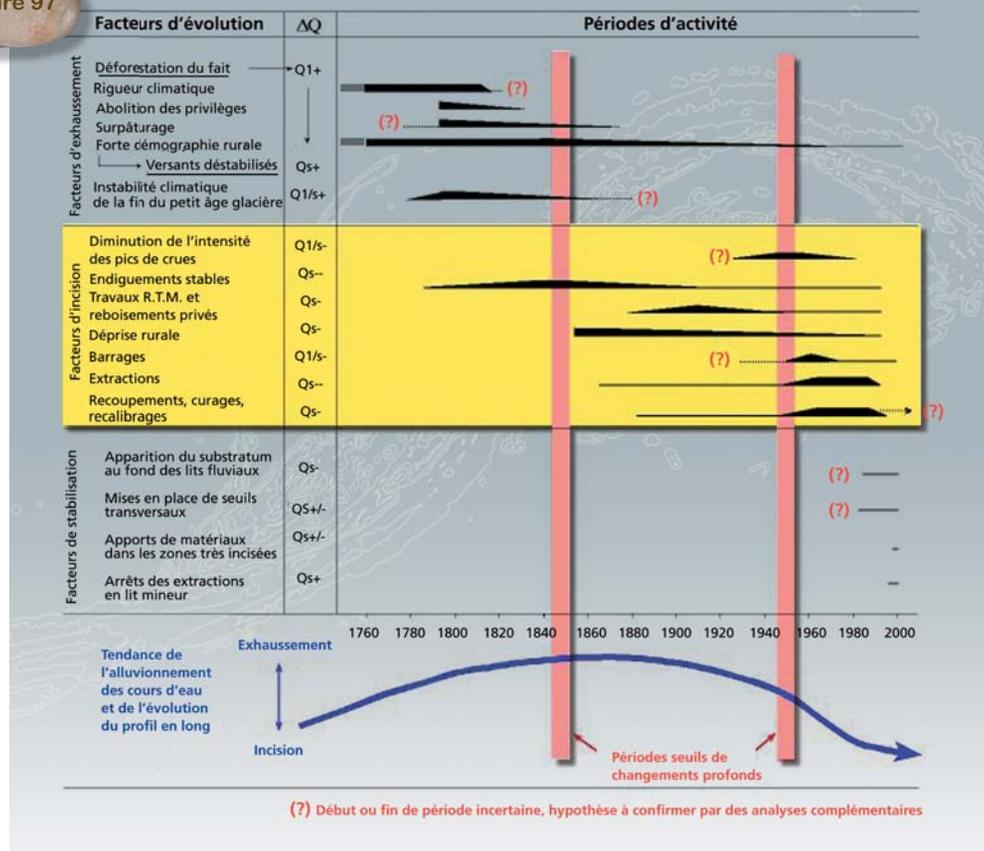
Quelques exemples de techniques de protection des berges contre l'érosion latérale.



Effets cumulatifs et impacts multiscales

Depuis le XIX^e siècle, la plupart des cours d'eau occidentaux ont été soumis à plusieurs facteurs influençant le contrôle des débits liquide et solide. De façon concomitante ou se succédant les uns aux autres (Figure 97), ces facteurs ont eu pour conséquence de favoriser plutôt l'exhaussement des fonds alluvionnaires au cours du XIX^e, puis au contraire de favoriser l'incision et parfois la disparition des alluvions au profit d'un fond rocheux.

Figure 97



Essai de synthèse chronologique des causes de l'évolution des débits solides et liquides des affluents du Rhône moyen depuis le XVIII^e siècle (Landon, 1999).

Cette tendance à l'incision de nombreux cours d'eau s'accompagne généralement d'impacts multiples et variés pouvant intéresser l'ensemble des compartiments emboîtés constituant l'hydrosystème (Tableau 14, page suivante).



Synthèse des conséquences induites par l'incision rapide des cours d'eau (Landon, 2007).

Espaces	Phénomènes observés
Bande active	Abaissement de la ligne d'eau d'étiage, du fait de l'abaissement des nappes d'accompagnement, pouvant poser des problèmes d'eutrophisation et, par conséquent, des impacts hydro-biologiques
	Augmentation de la capacité hydraulique du lit mineur par effet de chenalisation 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
	Variation de la granulométrie par apparition d'un pavage ou par colmatage entraînant une modification des habitats de la faune aquatique
	Diminution de la capacité d'auto-épuration des cours d'eau par disparition des alluvions au profit du substratum rocheux
	Diminution des migrations latérales lorsque le cours d'eau s'enfonce dans le substratum sous-jacent
	Déstabilisation des ouvrages transversaux (ponts, seuils, barrages) par affouillement du fait de l'érosion régressive ou progressive
	Déstabilisation des traversées sous-fluviales (pipelines et conduites diverses)
	Nécessité d'implanter des seuils pour stabiliser le profil en long et les ouvrages existants
	Multiplication des obstacles aux migrations de certaines espèces de poissons (seuils naturels ou artificiels infranchissables)
	Remontée des bouchons vaseux et des fronts de salinité dans les estuaires, augmentation des marnages
Berges	Augmentation des phénomènes d'érosion de berges
	Déstabilisation de la végétation rivulaire par affouillement des systèmes racinaires
	Déstabilisation des protections de berge
	Déconnexion des prises d'eau
	Modification de la granulométrie par apparition de paléo-dépôts
	Diminution des échanges nappes-rivières par mise à nu du substratum rocheux
Milieux annexes	Déconnexion et assèchement des chenaux secondaires ou des anciens méandres
	Diminution de l'inondabilité nécessaire pour l'évolution, le rajeunissement et la reproduction des espèces alluviales
	Diminution du rôle de refuge lors des crues de faibles fréquences de retour
	Disparition de zones de fraie et de nidification
	Vieillessement et extension de la végétation par diminution des phases de destructions dues aux crues de faibles fréquences de retour
	Modification de la forêt alluviale, passage plus ou moins progressif à des espèces à bois durs
Plaine alluviale du lit majeur	Abaissement du niveau des nappes phréatiques
	Assèchement des canaux par déconnexion des prises d'eau qui se retrouvent perchées, et par drainage de la nappe qui s'enfonce
	Contamination des nappes par remontées des biseaux salés dans les estuaires
	Diminution de l'inondabilité par augmentation de la capacité hydraulique du lit
	Changement d'usage de la plaine alluviale moins soumise au risque d'inondation (construction d'habitations et de zones industrielles, modification des types de cultures)
Bassin versant	Augmentation des coûts d'entretien des ouvrages pour les communautés riveraines et des coûts d'exploitation de la ressource en eau qui doit être diversifiée
	Extension du phénomène par érosion régressive des affluents
	Modification du style fluvial et des paysages des vallées alluviales se traduisant notamment par la chenalisation des cours d'eau

Droit applicable au transport sédimentaire



- 111 ■ Droit applicable au retrait des sédiments de cours d'eau
- 118 ■ Droit applicable à la préservation ou à la création de zones de mobilité
- 119 ■ Droit applicable au transport suffisant des sédiments
- 122 ■ Éléments pour l'aide à l'interprétation des termes ou concepts juridiques intégrant le transport solide

Petit rappel de la hiérarchie de la valeur juridique des textes

Voici un petit rappel de la hiérarchie de la valeur juridique des textes cités dans cet ouvrage :

■ la **directive européenne** ne s'applique pas directement dans le droit des états membres. Elle doit être transposée au niveau hiérarchique suffisant pour pouvoir être appliquée. En général, en France les transpositions se font à travers une loi ;

■ la hiérarchie des **normes françaises** est la suivante de la plus élevée à la moins élevée :

- ⇒ le bloc de constitutionalité (constitution de 1958, préambule de 1946, déclaration des droits de l'homme et du citoyen de 1789, charte de l'environnement, principes fondamentaux reconnus par les lois de la République, etc.),
- ⇒ les traités et conventions internationaux,
- ⇒ la loi (éventuellement codifiée dans la partie L des Codes),
- ⇒ les principes généraux du droit (jurisprudence),
- ⇒ le règlement (décret en Conseil des ministres ou en Conseil d'État ou décrets simples, arrêtés ministériels ou préfectoraux, éventuellement codifiés dans les parties R et D des codes). Les éventuelles annexes (tableaux, nomenclatures) ont la même valeur que le décret ou l'arrêté lui-même,
- ⇒ l'acte administratif (circulaire, directives, instructions).



Droit applicable au retrait des sédiments de cours d'eau

Peut-on retirer des sédiments des rivières ?

Il n'existe pas d'interdiction absolue et l'enlèvement des atterrissements est l'un des moyens indiqués par la loi au propriétaire riverain pour assurer son obligation d'entretien régulier (L. 215-14 CE). Des opérations de curage peuvent également être entreprises par les collectivités territoriales lorsque la nécessité en est établie par le plan de gestion qu'elles devront constituer à l'échelle d'une unité hydrographique cohérente si elles se regroupent pour prendre en charge l'entretien de cours d'eau. Des prescriptions relatives aux opérations prévues dans le plan de gestion et établies au titre de la police de l'eau permettent d'adapter la réponse à chaque situation.

Cependant, d'une manière générale il vaut mieux éviter de retirer les sédiments du lit mineur en raison de l'importance de préserver voire de rétablir le mécanisme naturel du transport solide.

En aucun cas le retrait de sédiments issus d'atterrissements ne doit être systématisé.

La formation d'un ou plusieurs atterrissements **n'est pas un indice de dysfonctionnement** du cours d'eau. Il s'agit au contraire le plus souvent du signe d'un bon fonctionnement hydrosédimentaire ou du rétablissement d'un fonctionnement normal. Elle ne justifie donc pas systématiquement une intervention car elle ne représente pas systématiquement un danger.

Les zones d'érosion et de dépôt dans un cours d'eau peuvent changer dans le temps. Il est donc indispensable d'établir un diagnostic de fonctionnement du transport solide sur plusieurs années et à une échelle hydrographique cohérente, pour justifier que l'atterrissement en question reflète un dysfonctionnement et/ou génère un risque auquel il faut remédier en intervenant.

Par ailleurs, il existe plusieurs types de sédiments et leur gestion, qui peut aller jusqu'au retrait, dépendra beaucoup de leur valeur et de leur rôle dans la préservation des milieux aquatiques. Celui-ci peut en effet parfois être négatif, par exemple lorsqu'il s'agit d'un excès de **fines** (sédiments fins, des argiles aux limons, voire aux sables fins) issues d'une érosion des sols agricoles et qui colmatent les fonds alluviaux grossiers des cours d'eau.

L'encadrement juridique des retraits de sédiments d'un cours d'eau

■ Distinction entre extractions de carrières et retraits dans le cadre d'un curage d'entretien

Il convient de faire une distinction entre retrait dans le cadre de l'entretien et extractions à but commercial. Les extractions de matériaux à but commercial, non justifiées dans le cadre de l'entretien de cours d'eau, correspondent à une activité de carrière qui est interdite dans le lit mineur et l'espace de mobilité des cours d'eau par l'**arrêté du 22 septembre 1994** relatif aux carrières, modifié par l'**arrêté du 24 janvier 2001**. Cette activité a pour but d'extraire les matériaux des cours d'eau en tant que matière première industrielle. Elle est déconnectée de la problématique d'entretien des cours d'eau et de préservation des écosystèmes aquatiques. Les conséquences catastrophiques de plusieurs décennies d'extraction intensive (abaissement

du lit mineur de plusieurs mètres, accentuation de l'érosion, incision du lit, abaissement des nappes, accélération des crues, pertes d'habitats et de fonctionnalités des milieux aquatiques) ont justifié l'interdiction établie en 1994 et renforcée en 2001.

En revanche, déplacer ou retirer des matériaux dans le cadre d'un curage nécessaire à l'entretien du cours d'eau a toujours été et est toujours possible.

Cette distinction était déjà prévue dans l'arrêté du 22 septembre 1994 qui exclut les dragages d'entretien de l'activité de carrière. Elle a été réaffirmée dans l'**arrêté du 30 mai 2008** fixant les prescriptions générales relatives aux opérations d'entretien de cours d'eau soumises à déclaration ou à autorisation.

■ Définition et objectifs du curage

Le curage est une opération de mobilisation des sédiments qui peut consister à les remettre simplement en suspension, à les retirer pour les remettre ailleurs dans le lit mineur ou à les retirer définitivement du lit mineur. Cette opération de curage, pour être autorisée, doit répondre aux objectifs mentionnés au II de l'article **L.215-15 du Code de l'environnement (CE)**. Les deux premiers relèvent de la restauration de cours d'eau, le troisième relève d'une nécessité dans le cadre de travaux relatifs à un ouvrage ou un aménagement dans le lit du cours d'eau :

- remédier à un dysfonctionnement du transport naturel sédimentaire de nature à remettre en cause les usages visés au II de l'article **L.211-1**, à empêcher le libre écoulement des eaux ou à nuire au bon fonctionnement des milieux aquatiques ;
- lutter contre l'eutrophisation ;
- aménager une portion de cours d'eau, canal ou plan d'eau en vue de créer ou de rétablir un ouvrage ou de faire un aménagement.

■ Qui peut faire ces retraits et dans quelles conditions ?

Le riverain

Il est, sur les cours d'eau non domaniaux, le seul chargé d'une **obligation légale d'entretien** des cours d'eau en application de l'article L.215-14 CE.

« Sans préjudice des articles 556 et 557 du code civil et des chapitres Ier, II, IV, VI et VII du présent titre, le propriétaire riverain est tenu à un entretien régulier du cours d'eau. L'entretien régulier a pour objet de maintenir le cours d'eau dans son profil d'équilibre, de permettre l'écoulement naturel des eaux et de contribuer à son bon état écologique ou, le cas échéant, à son bon potentiel écologique, notamment par enlèvement des embâcles, débris et atterrissements, flottants ou non, par élagage ou recépage de la végétation des rives ». Un décret en Conseil d'Etat détermine les conditions d'application du présent article. Cet article précise également dans quelles conditions le riverain peut remplir cette obligation. Parmi celles-ci, l'opération de curage n'apparaît pas explicitement. Il est question d'**enlèvement des atterrissements**.

Attention. Le concept de **curage « vieux fond-vieux bords »** a disparu de la réglementation depuis 2006, et a été remplacé par le concept de « **profil d'équilibre** ».

En échange de cette obligation légale d'entretien du lit mineur des cours d'eau, la loi (**L215-2 CE**) permet au propriétaire riverain d'y prendre tous les produits naturels et d'en extraire de la vase, du sable et des pierres à condition de ne pas modifier le régime des eaux et d'en effectuer l'entretien conformément à l'article **L. 215-14**.

Les conditions d'entretien, et notamment de retrait d'atterrissements, sont en outre complétées par l'article R. 215-2 qui insiste très fortement sur le **caractère modéré, localisé et non systématique des opérations éventuelles de déplacement ou de retrait d'atterrissements**.

L'entretien devant être réalisé par le riverain est cadré, à travers l'article **L.215-14 CE**, par les objectifs de la directive cadre sur l'eau (DCE) et par l'énumération des actions réalisables.

Le riverain n'est pas censé réaliser des opérations de curage de grande ampleur. L'enlèvement des sables et pierres doit être compris comme un avantage pour un usage personnel et domestique (amendement d'un potager familial par exemple) en échange de la charge d'entretien.

Par ailleurs, l'enlèvement des atterrissements ne signifie pas systématiquement le retrait du lit mineur des sédiments les constituant mais peut se limiter à des actions sur ces atterrissements pour que leur « enlèvement » soit réalisé de manière naturelle par les crues.

L'article **L.216-1 CE** prévoit des sanctions **administratives** applicables en cas de **méconnaissance** de l'article **L.215-14**. Il s'agit de mise en demeure de faire, de consignation possible des sommes nécessaires au respect de la mise en demeure, de travaux d'office, etc.

Le terme méconnaissance permet de considérer que, non seulement une absence totale ou un manque d'entretien est sanctionnable, mais aussi que la réalisation d'un entretien qui ne respecte pas les objectifs et les moyens que la loi impose pour cet entretien l'est aussi.

Si les méthodes employées se révèlent incompatibles avec ces objectifs, une mise en demeure peut être établie contre le riverain. Son objet peut être d'exiger le retour des sédiments retirés en quantité injustifiée et le rétablissement, dans la mesure du possible, de la diversité de faciès d'écoulement du lit et des berges, de revégétaliser une rive coupée trop ras, etc.

Le législateur considère que le **riverain n'est pas censé mal entretenir son cours d'eau** à partir du moment où il l'entretient. Le risque est surtout qu'il ne l'entretienne pas du tout. Néanmoins, les conditions posées par l'article **L.215-14 CE** sont suffisamment explicites pour qu'il ne soit pas nécessaire d'ajouter des prescriptions particulières au titre de la police.

D'une manière générale, ces conditions **excluent implicitement l'utilisation par le riverain d'engins mécaniques de type pelleuse** pour répondre à son obligation d'entretien ou pour exercer son droit de « prélèvement » à usage domestique des produits du lit.

En effet, en raison du manque de contrôle des prélèvements effectués à l'aide de ces engins et de l'agressivité de ces méthodes sur les milieux aquatiques, les **conditions de contribution au bon état écologique**, qui implique la préservation de ces milieux, ne peuvent pas être respectées. Il en est de même pour le principe de non modification du profil d'équilibre ou du régime des eaux.

Cette « interdiction » implicite ne peut cependant pas s'appliquer strictement au **curage des « fines »** (sédiments fins : argiles, limons, sables fins) issues de l'érosion des sols agricoles. En effet, les problèmes d'obstruction du lit et de colmatage des fonds par les fines, proviennent en majeure partie du mode de culture des sols dont le riverain n'est pas toujours lui-même responsable, ou pas en totalité.

NB On observe parfois un colmatage important sur les petits cours d'eau bordés de prairies pâturées. C'est le piétinement des vaches lorsqu'elles descendent dans la rivière pour y boire qui génère ces excès de sédiments fins.

En l'absence de traitement du problème de gestion des terres à l'échelle du bassin versant, qui dépasse très largement la problématique de l'entretien du lit mineur des cours d'eau, il est impératif que le riverain puisse satisfaire à son obligation d'assurer l'écoulement naturel des eaux et de contribuer au bon état écologique du cours d'eau. A défaut de technique alternative pour le traitement de ces fines dans le lit mineur, dont le volume peut être conséquent notamment lorsque la propriété porte sur un linéaire important, il ne peut pas être interdit à un riverain, agriculteur par exemple, d'utiliser ses machines agricoles pour retirer ces fines.

Des indications peuvent lui être données sur la fréquence souhaitable de ce type d'intervention et sur les précautions à prendre le cas échéant si des enjeux « milieux » existent.

Aucune sanction **pénale** n'est prévue pour l'absence ou le mauvais entretien par le riverain.

Différentes actions peuvent être menées pour cadrer l'action du riverain : communication, pédagogie, rappel à la loi, guides d'entretien pour les riverains, aide technique pour déterminer de la nécessité d'agir et les moyens adéquats, remise « au goût du jour » des règlements anciens de cours d'eau...

Les collectivités territoriales

Le droit applicable à la gestion des cours d'eau par les collectivités s'est développé de manière importante dans les 20 dernières années avec une première étape en 1992 et une seconde en 2006.

La **loi sur l'eau de 1992** a effectivement donné la possibilité aux collectivités ou à leurs groupements de prendre en charge de manière volontaire, après Déclaration d'Intérêt Général (DIG), l'entretien d'une section de cours d'eau, à la place du riverain (**L.211-7 CE**).

La collectivité ou le groupement peut décider de financer cet entretien, et c'est pourquoi l'intérêt général de l'intervention publique doit être déclarée préalablement afin de justifier un financement sur fonds publics sur des terrains privés et à la place des propriétaires.

La collectivité ou le groupement peut également décider de faire participer au financement de ces interventions les personnes qui les ont rendues nécessaires ou qui y trouvent intérêt (**L.151-36 et L.151-37 du code rural** auxquels le **L.211-7** renvoie).

La loi sur l'eau et les milieux aquatiques (**LEMA**) de 2006 a ajouté à cette obligation de DIG, des obligations à respecter lorsque les collectivités interviennent de manière groupée sur les cours d'eau.

L'article **L.215-15 CE** impose en effet aux collectivités qui veulent se regrouper pour prendre en charge l'entretien d'un cours d'eau, de le faire de manière à couvrir la bonne échelle d'intervention (au minimum une **section hydrographique cohérente**), sur la base d'un plan de gestion préalable. Ce plan de gestion doit comporter un diagnostic de fonctionnement, notamment sédimentaire, du cours d'eau, réalisé conformément aux dispositions de l'arrêté du 30 mai 2008 relatif aux prescriptions générales applicables à l'entretien de cours d'eau, et autorisé au titre de la police de l'eau pour une durée d'au minimum 5 ans (**R.215-5 CE**).

Ce plan de gestion peut comprendre une **phase de restauration du cours d'eau** prévoyant éventuellement une opération de curage, lorsqu'il y a lieu de rattraper l'absence d'entretien régulier par les riverains.

Il peut faire l'objet d'adaptations, dans la durée d'autorisation, nécessitées par des événements hydrauliques particuliers (crues), pour garantir la sécurité de la navigation non motorisée ou pour tenir compte de la mise en place d'un plan d'action et de prévention des inondations.

Ces adaptations peuvent prévoir d'autres opérations de curage si nécessaire. Elles sont dans tous les cas approuvées par l'autorité administrative. La loi ne précise pas de procédure pour cette approbation qui peut donc être très simple (échanges et/ou réunions entre le maître d'ouvrage et le service de police) et relativement rapide.

Cet article n'oblige pas les collectivités à se regrouper pour intervenir, c'est pourquoi la possibilité subsiste pour une commune, d'intervenir seule sur la portion de cours d'eau qui traverse son territoire, sous réserve d'une DIG (Déclaration d'intérêt général).

Néanmoins, l'esprit de la LEMA à travers l'article **L.215-15** est d'inciter la prise en charge de l'entretien par un groupement de collectivités à la bonne échelle hydrographique, pour pouvoir mettre en place un plan de gestion prenant en compte le fonctionnement global d'un cours d'eau et éviter les interventions ponctuelles et dispersées ne répondant pas à un diagnostic pertinent.

Aussi, si une collectivité peut légalement intervenir de manière isolée, l'intérêt général de son intervention sera beaucoup plus difficile à démontrer sans diagnostic à la bonne échelle du problème qu'elle est censée résoudre.

Progressivement, les collectivités devraient donc être incitées à se regrouper pour prendre en charge correctement l'entretien d'un cours d'eau.

Les autres intervenants possibles : État ou voies navigables de France (VNF), associations syndicales de propriétaires

L'article **L.215-15 CE** ne se limite pas aux opérations groupées des collectivités territoriales. En effet, par commodité, les paragraphes précédents se limitent à expliquer les nouvelles obligations dans le cadre d'intervention des collectivités, principaux maîtres d'ouvrage, mais le **L.215-15 CE** traite des opérations groupées « en général ». Sont donc également concernées par les mêmes obligations, les opérations réalisées par un groupement de propriétaires (association syndicale).

Par ailleurs, l'article **R.215-4 CE** prévoit l'application des obligations liées aux opérations groupées au sens du **L.215-15**, aux interventions de l'État ou de VNF sur leur domaine respectif, dès lors qu'elles concernent une échelle hydrographique cohérente. L'article **L. 2124-11 du code général de la propriété des personnes publiques** soumet le propriétaire du domaine public fluvial aux mêmes obligations et conditions de réalisation de l'entretien que celles définies aux articles **L.215-14** ou du **L.215-15 CE**.

Pour respecter leur obligation d'entretien, l'État et VNF, ainsi que les collectivités propriétaires d'un domaine public fluvial (DPF), peuvent donc agir en tant que « propriétaire riverain » pour certaines opérations localisées et ponctuelles mais doivent établir un plan de gestion dès lors qu'ils organisent leur intervention d'entretien à une plus grande échelle.



Droit applicable à la préservation ou à la création de zones de mobilité

Tout comme dans le lit mineur, **les carrières sont interdites dans l'espace de mobilité des cours d'eau.**

L'espace de mobilité n'est pas explicitement visé par les règles relatives à l'entretien de cours d'eau par le riverain, qui se limite au lit mineur.

En revanche, dans le cadre d'un plan de gestion pour une opération groupée d'entretien, l'aspect « espace de mobilité » peut tout à fait être traité. Des servitudes peuvent notamment être mises en place en application du **L.211-12** du code de l'environnement, pour **préservé certains secteurs contre la protection et la fixation du lit mineur** voire pour **supprimer des protections ou des points de fixation existants.**

L'objet de ces servitudes prévoit la création ou la restauration de zones de mobilité du lit pour préserver ou restaurer les caractères hydrologique et géomorphologique du cours d'eau (possibilité d'érosion de berge pour reprise de charge solide). **L'article L.211-12** précise que dans les zones de servitudes, dont le périmètre est délimité par arrêté préfectoral pris après enquête publique menée conformément au code de l'expropriation, certains travaux peuvent être interdits ou soumis à autorisation préalable par ce même arrêté (**L.211-12-V**). Celui-ci peut également imposer la suppression, la modification ou l'instauration de certains éléments existants ou manquants faisant obstacle à l'objet de la servitude (**L.211-12-VI**).

Donc, la mise en place de la servitude est un préalable à toute action que le maître d'ouvrage voudrait imposer.

Des mesures peuvent être mises en œuvre sur une base conventionnelle ou volontaire, mais lorsqu'il s'agit d'une intervention sur un ensemble hydrographique, dans le cadre d'un plan de gestion (L.215-15) ou d'une DIG (L211-7), il est préférable d'instaurer une servitude plus pérenne qu'une convention.

Par exemple, si la restauration de la mobilité du cours d'eau nécessite la destruction de digues de protection existantes, **seule la mise en place d'une servitude en application du L.211-12 peut justifier et imposer cette opération qui serait très difficile à réaliser de manière amiable.** L'instauration d'une servitude permet de mieux cadrer également l'indemnisation des préjudices subis par le propriétaire des terrains concernés (**L.211-12-VIII**) et donne au propriétaire la possibilité de demander le rachat des parcelles les plus impactées (**L.211-12-X**).

Ces servitudes peuvent être mises en place en dehors de tout plan de gestion au titre de l'entretien groupé des cours d'eau. Il est cependant préférable, dès lors qu'un groupement de collectivités prend en charge l'entretien et la restauration d'un cours d'eau, qu'il soit également en charge de la préservation ou la restauration de son caractère géomorphologique. Il faudrait en outre que les études préalables à l'élaboration du plan de gestion, notamment dans sa partie « diagnostic sédimentaire », soient l'occasion d'étudier la nécessité de mettre en place des servitudes de zones de mobilité.

Droit applicable au transport suffisant des sédiments

La directive cadre européenne sur l'eau (DCE) de 2000 a pour objectif l'atteinte du bon état (ou du bon potentiel) des cours d'eau en 2015, sauf exceptions ou reports d'échéance dûment justifiés.

Le bon état comprend un **bon état chimique** et un **bon état écologique**. La qualité de ce dernier est évaluée à partir de paramètres biologiques de composition et d'abondance de la flore aquatique et de la faune benthique invertébrée, ainsi que de composition, d'abondance et de structure d'âge de l'ichtyofaune.

La DCE intègre l'**hydromorphologie** en tant que soutien aux éléments de qualité biologique sur lesquels est évalué le bon état. Les états des lieux réalisés en 2004 par les districts des agences de l'eau, indiquent ainsi que plus de 50 % des masses d'eau risquent de ne pas atteindre le bon état écologique en raison, notamment, d'un **mauvais fonctionnement hydromorphologique** lié en particulier aux lourds travaux de chenalisation qu'elles ont subis.

Un mauvais fonctionnement hydrosédimentaire est l'une des causes majeures des dysfonctionnements hydromorphologiques et écologiques constatés.

Notons par ailleurs que les éléments de qualité hydromorphologique (régime hydrologique, continuité de la rivière et conditions morphologiques) sont pris directement en compte pour l'évaluation du très bon état (TBE).

NB En droit français, la notion de continuité de la rivière est couverte par l'expression « continuité écologique » qui est assurée par :

- la libre circulation non perturbée des organismes aquatiques ;
- le transport suffisant des sédiments, dont des propositions d'évaluation sont présentées dans l'encadré en fin de chapitre.

La DCE impose aux Etats membres une obligation de résultat. Si le bon état (ou le bon potentiel) est compromis par un problème de continuité de la rivière, il est nécessaire d'agir (sauf justification d'une dérogation d'objectif). Cependant, les possibilités d'intervention sont différentes s'il s'agit de cours d'eau classés actuellement ou après révision des classements, d'un ouvrage existant ayant une autorisation en cours ou d'un renouvellement, d'un projet de création d'un nouvel ouvrage. Les possibilités de prescrire des modalités de gestion des sédiments, des actions particulières ou des aménagements dépendent également des dispositions du schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) et d'un éventuel schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE).

Droit applicable actuellement pour la prescription d'aménagements ou de modifications d'exploitation sur un ouvrage existant avant échéance de son autorisation ou concession

■ Sur les cours d'eau classés actuellement

Les classements en vigueur au titre de l'article 2 de la loi du 16 octobre 1919 (« rivières réservées ») qui interdisent la construction de toute nouvelle centrale hydroélectrique, ou au titre de l'article L.432-6 CE qui impose l'aménagement de passes à poissons sur les ouvrages neufs et dans les 5 ans après la prise d'un

arrêté fixant les espèces cibles, pour les ouvrages existants, n'imposent **aucune obligation particulière en matière de transport sédimentaire**.

■ SAGE : L.212-5-1 CE

Les SAGE sont depuis la LEMA du 30 décembre 2006 des outils permettant d'imposer aux ouvrages existants des modalités de gestion, en particulier d'ouverture régulière de vannes, pour améliorer le transport naturel des sédiments et assurer la continuité écologique.

■ En l'absence de dispositions dans un SAGE

Dans l'état existant du droit, à défaut d'obligation à travers le règlement d'un SAGE, la question de la **continuité du transport sédimentaire** ne peut être vue qu'au cas par cas dans le cadre des demandes de création d'ouvrage ou de renouvellement d'autorisation ou de concession, en tenant compte des orientations et recommandations du SDAGE.

L'étude d'impact ou d'incidences sur l'eau et les milieux aquatiques se devra de traiter la question du transport sédimentaire et de démontrer que toutes les mesures sont prises pour assurer au mieux ce transport en fonction de l'enjeu qu'il représente sur la section de cours d'eau concernée, voire sur l'ensemble du bassin impacté.

Les prescriptions établies dans l'arrêté d'autorisation ou le cahier des charges et le règlement d'eau de la concession imposeront les modes d'exploitation, les actions ou les aménagements adéquats.

Néanmoins, il est toujours possible d'établir des **prescriptions additionnelles** sur une autorisation en cours, en application de la règle générale de police de l'eau inscrite à l'article **R.214-17 CE**, qui s'avèreraient nécessaires en matière de transport sédimentaire, et ce quel que soit le statut du cours d'eau.

Cet article donne en effet compétence au préfet pour émettre des arrêtés complémentaires fixant toutes les prescriptions additionnelles que la protection des éléments de la gestion équilibrée de l'eau rend nécessaires.

Afin d'évaluer si des prescriptions additionnelles sont bien justifiées, le préfet peut demander des compléments d'information ou la mise à jour des informations sur les incidences de l'ouvrage qui n'auraient pas été traitées dans le dossier initial de demande d'autorisation ou pour lesquelles les exigences légales se sont renforcées. Le préfet peut également s'appuyer, pour justifier ces prescriptions, sur les conclusions d'une étude complémentaire réalisée par un tiers.

Des actions amiables peuvent également aboutir à des améliorations d'exploitation des ouvrages existants en matière de transport des sédiments, en particulier si des collectivités locales se sont investies dans la gestion de cours d'eau et portent une action collective à l'échelle d'un cours d'eau et non ouvrage par ouvrage.

Droit applicable à l'avenir après révision des classements pour la prescription d'aménagements ou de modifications d'exploitation sur un ouvrage existant avant échéance de son autorisation ou concession

Le classement en **liste 2** en application de l'article **L.214-17 CE** est le seul à mentionner l'enjeu du **transport suffisant des sédiments**.

Des prescriptions particulières pourront être établies sur les ouvrages présents sur les cours d'eau classés dans cette liste afin qu'ils assurent ce transport suffisant, dans les cinq ans après le classement.

Aucune définition juridique n'existe pour déterminer le caractère suffisant du transport assuré. Plusieurs interprétations peuvent être données (voir encadré en fin de chapitre) et il est nécessaire de bien cadrer cette notion afin de réduire le risque de contentieux dans un sens comme dans l'autre.

Dans la plupart des cas, le classement d'un cours d'eau sera justifié en premier lieu par des considérations

relatives à la circulation des espèces. L'exigence du transport suffisant des sédiments viendra s'y ajouter ou non. Cependant **sur certaines sections de cours d'eau, l'enjeu du transport sédimentaire pourra à lui seul justifier un classement.**

Le terme suffisant sous-entend deux enjeux :

- il est nécessaire de maintenir un certain niveau de transport sédimentaire pour empêcher des dysfonctionnements hydromorphologiques et écologiques de survenir ;
- il y a déjà un dysfonctionnement en termes d'équilibre sédimentaire et il est indispensable de le résorber ou en tout cas de le réduire par des modalités d'exploitation ou par des interventions sur des ouvrages ou structures perturbant ce transport sédimentaire « suffisant ».

Dans les deux cas, l'objectif majeur, au titre de la DCE, est de jouer sur un des éléments de qualité hydromorphologique afin de maintenir ou de restaurer le bon état écologique du cours d'eau.

Rappelons que les éléments de qualité morphologique sont déclinés en trois éléments : régime hydrologique (quantité et dynamique du débit, modification des crues et des étiages) ; continuité écologique (présence d'obstacle au transit des organismes aquatiques et des sédiments) ; et conditions morphologiques (largeur, profondeur, faciès, structure des rives).

Attention. Les sédiments dont il est nécessaire d'assurer un transport suffisant, sont ceux garantissant :

- le maintien de l'équilibre géodynamique du cours d'eau ;
- la diversification des habitats et des faciès du lit mineur ;
- les processus d'autoépuration.

Autrement dit, il s'agit des sédiments grossiers, des sables moyens aux blocs.

Le classement au titre du transport suffisant des sédiments n'est donc pas l'outil adéquat pour le **transport des sédiments fins**. Au contraire, un relargage trop systématique ou trop brutal de ces sédiments fins, parfois surabondants du fait de l'érosion excessive des sols agricoles ou de la nature géologique des bassins versants, pourrait être pénalisant pour les biocénoses.

Sur un cours d'eau classé en **liste 1** en application de l'article **L.214-17**, le renouvellement des autorisations et concessions des ouvrages existants est subordonné à l'établissement de prescriptions permettant d'assurer la continuité écologique dans ses deux éléments (circulation des espèces et transport des sédiments) de manière compatible avec les objectifs du classement du cours d'eau (garantir la préservation des migrateurs amphihalins, du rôle de réservoir biologique ou du très bon état).

Les autres possibilités actuelles de prescriptions (SAGE, délivrance ou renouvellement de titre, R. 214-17 CE, conventionnel) demeureront identiques sur les cours d'eau non classés après la révision des classements.



Éléments pour l'aide à l'interprétation des termes ou concepts juridiques intégrant le transport solide

Concepts liés à l'écoulement des eaux

Le législateur fait référence à une notion générale relative à la non **perturbation du régime des eaux**.

Cette notion apparaît sous différentes dénominations dans le code de l'environnement, mais vise bien un même objectif : il s'agit de garantir qu'il n'y ait pas de perturbation majeure (dans l'espace et/ou dans le temps) du régime des eaux, en évitant la formation de bouchon hydraulique par exemple, tout en respectant au maximum le bon fonctionnement écologique du cours d'eau, c'est-à-dire en assurant autant que possible le transport et le dépôt de sédiment.

Les paragraphes ci-dessous présentent plus en détail trois articles qui font explicitement référence à cette notion.

■ « ne pas modifier le régime des eaux » (L215.2 CE)

Contexte de la phrase

« Chaque riverain a le droit de prendre, dans la partie du lit qui lui appartient, tous les produits naturels et d'en extraire de la vase, du sable et des pierres, à la **condition de ne pas modifier le régime des eaux** et d'en exécuter l'entretien conformément à l'article L. 215-14. »

Interprétation

Cette expression est très ancienne. Elle était couramment utilisée dans les textes relatifs à la police des eaux et des cours d'eau du XIX^e siècle (par exemple la **loi du 8 avril 1898 sur le régime des eaux**). Cette police avait des préoccupations essentiellement relatives à la sécurité et la salubrité publiques (prévention des inondations, alimentation en eau potable etc.). Les connaissances en matière de fonctionnement hydromorphologique des rivières étaient modestes...

Le « régime des eaux » au XIX^e siècle couvrait essentiellement les notions de quantité et de vitesses d'écoulement des eaux.

Cette expression ancienne doit être comprise aujourd'hui d'une manière globale, en tenant compte de l'évolution des connaissances et de la législation sur l'eau et les milieux aquatiques, depuis le XIX^e siècle. Elle recouvre les notions de régime hydrologique (augmentation des débits de crue, d'étiage, etc.), de type d'écoulement (régime uniforme, graduellement varié, etc.) et du régime général des cours d'eau.

Cet article vise à donner des droits au riverain, du même ordre que le droit de pêche gratuit, en « compensation » de l'obligation d'entretien qui lui a été imposée par la **loi de 1898** en même temps qu'elle lui donnait la propriété des cours d'eau non domaniaux.

La condition « de ne pas modifier le régime des eaux » a l'objectif clair de limiter le droit de « prélèvement » des richesses du cours d'eau à titre privé, et de respecter l'intérêt général qui impose de ne pas avoir d'impact notable sur la gestion équilibrée de l'eau : sécurité publique, prévention des inondations, salubrité, alimentation en eau potable (AEP), préservation des milieux aquatiques et zones humides ainsi que les autres usages anthropiques de l'eau.

Au regard de l'aspect sédimentaire et hydromorphologique, ces prélèvements ne doivent pas avoir d'impact sur le mécanisme de transport solide, ni sur la morphologie du lit et la diversité des faciès d'écoulement.

En conséquence, les prélèvements ne peuvent répondre qu'à un usage domestique limité à de très faibles quantités (prélèvement < 100 m³ par an), interdisant notamment l'usage d'engins mécaniques.

■ « empêcher le libre écoulement des eaux » (L215-15)

Contexte de la phrase

« Le recours au curage doit alors être limité aux objectifs suivants : remédier à un dysfonctionnement du **transport naturel des sédiments de nature à remettre en cause les usages visés au II de l'article L. 211-1, à empêcher le libre écoulement des eaux** ou à nuire au bon fonctionnement des milieux aquatiques permettre l'écoulement naturel des eaux ».

Garantir le libre écoulement des eaux est l'objectif historique de base de la police de l'eau et des obligations d'entretien des cours d'eau.

Interprétation

Il s'agirait donc de limiter les opérations de curage aux cas où les apports solides en un ou plusieurs points du réseau hydrographique sont de nature à réduire la capacité d'écoulement du débit :

- soit du **débit naturel théorique de pleins bords** si l'on est en zone sans enjeu socio-économique majeur (il faut alors qu'une étude hydromorphologique puisse préciser s'il s'agit de la crue annuelle, biennale etc., en fonction du type de cours d'eau). Dans ce cas, on peut admettre le concept d'équilibre dynamique (revoir la « balance de Lane ») qui veut l'on ait naturellement des périodes d'excédent sédimentaire favorisant l'exhaussement du lit et des périodes de déficit, qui entraînent inversement l'incision et l'augmentation de la débitance ;
- soit du **débit de projet** (fixé dans un cadre réglementaire ou non) si l'on est en présence d'une portion chenalisée de cours d'eau en zone à enjeux (en traversée urbaine par exemple). Dans ce cas, on doit fixer une valeur seuil à partir de laquelle la réduction de la capacité d'écoulement peut se traduire par des dommages aux biens ou aux usages. Il est difficile de donner une valeur générale, et une modélisation hydraulique simple est souhaitable au cas par cas pour déterminer la « section type » à garantir.

NB On peut imaginer entrer dans ce détail pour un plan de gestion pour l'entretien groupé mais pas pour cadrer l'obligation d'entretien qui incombe au riverain.

Attention. On insistera ici sur l'importance de n'agir qu'en cas de « dysfonctionnement » du transport solide. Il faudrait donc attendre au moins 3-4 ans avant de pouvoir dire si les dépôts demeurent sur place et augmentent au lieu de repartir, ou au moins démontrer qu'ils se fixent anormalement. On doit aussi rappeler l'importance de chercher, si possible, à **remédier au dysfonctionnement en jouant sur sa cause et non en corrigeant les effets**.

■ « permettre l'écoulement naturel des eaux » (L215-14)

Contexte de la phrase

« Sans préjudice des articles 556 et 557 du code civil et des chapitres Ier, II, IV, VI et VII du présent titre, le propriétaire riverain est tenu à un entretien régulier du cours d'eau. L'entretien régulier a pour objet de maintenir le cours d'eau dans son profil d'équilibre, de **permettre l'écoulement naturel des eaux** et de contribuer à son bon état écologique ou, le cas échéant, à son bon potentiel écologique, notamment par enlèvement des embâcles, débris et atterrissements, flottants ou non, par élagage ou recépage de la végétation des rives. »

Interprétation

Le riverain ne doit pas avoir besoin de faire une étude hydromorphologique pour assurer son obligation d'entretien régulier.

L'écoulement naturel des eaux, sur une rivière en bon état et présentant un bon fonctionnement hydromorphologique, se fait généralement dans un lit mineur **naturellement** occupé par des macroformes sédimentaires (les bancs alluviaux) traduisant le transport et le dépôt des sédiments en transit.

On peut cependant admettre que temporairement et occasionnellement, des macroformes sédimentaires d'une superficie et d'un volume largement supérieur à la moyenne puissent générer une réduction locale de la capacité d'écoulement du lit mineur (même si cet écoulement reste naturel). En zone à enjeux, cette réduction de débitance peut aggraver la fréquence des inondations et l'intensité des érosions latérales et le riverain peut alors être fondé à assurer son obligation d'entretien.

Attention. On touche ici à la limite de l'exercice. Il est en effet difficile de découper l'interprétation des obligations d'entretien par le riverain. L'article dans son ensemble doit être interprété (quelle gestion des embâcles ? Quel cadre pour l'enlèvement des atterrissements ? Etc.) et l'interprétation de l'écoulement naturel des eaux ne peut se faire qu'au regard de l'ensemble de la phrase. On est là dans le **principe général** : le riverain doit veiller, sur sa propriété, à ce que des bouchons hydrauliques ne se forment pas (amas démesuré de sédiments, embâcles importants).

Concepts liés plus précisément au transport solide

■ « Remédier à un dysfonctionnement du transport naturel des sédiments de nature à remettre en cause les usages visés au II de l'article L. 211-1 » (L215-15)

Contexte de la phrase

« Le plan de gestion mentionné au I peut comprendre une phase de restauration prévoyant des interventions ponctuelles telles que le curage, si l'entretien visé à l'article L. 215-14 n'a pas été réalisé ou si celle-ci est nécessaire pour assurer la sécurisation des cours d'eau de montagne. Le recours au curage doit alors être limité aux objectifs suivants :

- remédier à un **dysfonctionnement du transport naturel des sédiments** de nature à remettre en cause les usages visés au II de l'article L. 211-1, à empêcher le libre écoulement des eaux ou à nuire au bon fonctionnement des milieux aquatiques. »

II - du L. 211-1 : « La gestion équilibrée doit permettre en priorité de satisfaire les exigences de la santé, de la salubrité publique, de la sécurité civile et de l'alimentation en eau potable de la population. Elle doit également permettre de satisfaire ou concilier, lors des différents usages, activités ou travaux, les exigences :

- 1- de la vie biologique du milieu récepteur, et spécialement de la faune piscicole et conchylicole ;
- 2- de la conservation et du libre écoulement des eaux et de la protection contre les inondations ;
- 3- de l'agriculture, des pêches et des cultures marines, de la pêche en eau douce, de l'industrie, de la production d'énergie, en particulier pour assurer la sécurité du système électrique, des transports, du tourisme, de la protection des sites, des loisirs et des sports nautiques ainsi que de toutes autres activités humaines légalement exercées.»

Interprétation

Il y a **transport naturel des sédiments** lorsque les sédiments (on peut aussi parler d'alluvions ou de charge solide) provenant de l'amont d'une portion de cours d'eau transitent régulièrement vers l'aval, au rythme des événements naturels capables de les transporter (les crues). On parle de bilan sédimentaire équilibré.

Attention. En hydromorphologie, l'équilibre d'un bilan sédimentaire ne se juge pas sur un événement (une crue) mais sur une certaine durée (cinq ans par exemple) permettant de lisser les événements hydrologiques. Il peut effectivement arriver qu'une crue apporte une quantité importante d'alluvions que la rivière n'a pas la capacité immédiate de transporter vers l'aval pour des raisons naturelles (les apports dépassent temporairement la capacité de charriage naturelle) ou artificielle (le lit a été sur-élargi, un seuil ou un pont a été construit en aval, etc.). S'il n'y a pas d'enjeux humains ou économiques, le bilan s'équilibrera tout seul sur une certaine durée. S'il existe des enjeux, il faut pouvoir gérer cet excédent temporaire pour limiter les risques d'inondation ou d'érosion.

On peut considérer qu'il y a un **dysfonctionnement du transport naturel des sédiments** lorsque l'on est confronté à l'un des phénomènes décrits ci-après :

■ **il arrive moins de sédiments de l'amont qu'il n'en part vers l'aval (déstockage de charge de fond sur le site)**. Cela se traduit alors par un déficit et une érosion dite « progressive » (c'est à dire se propageant de l'amont vers l'aval). Les causes de ce dysfonctionnement sont multiples (on ne parlera pas des modifications à l'échelle du bassin versant liées à la réduction des apports de charge de fond sous l'effet de la reforestation, des travaux RTM, etc.) :

⇒ modification des apports solides : par exemple, piégeage à long terme des sédiments en amont du site par un barrage, un seuil, une ancienne fosse d'extraction,

⇒ modification locale de la géométrie du lit comme, par exemple, le piégeage à plus court terme en amont du site au droit de sur-élargissements du lit (liés à des recalibrages par exemple) ou d'ouvrages de franchissement ;

■ **il arrive plus de sédiments de l'amont qu'il n'en part vers l'aval (stockage de tout ou partie des sédiments sur le site)**. C'est à ce type de dysfonctionnement que pourraient a priori être associées des opérations de curage, s'il existe des enjeux à préserver contre les risques d'inondation ou d'érosion liés au stockage inhabituel de la charge de fond. Ce type de dysfonctionnement peut avoir plusieurs origines :

⇒ modification des apports solides comme, par exemple, des apports exceptionnels externes (via un affluent) ou internes (fortes érosions de berges en amont, propagation rapide d'une masse sédimentaire importante stockée en amont) dépassant la capacité naturelle de transport du site,

⇒ modification locale de la géométrie du lit comme, par exemple, une modification anthropique des caractéristiques géométriques en long et/ou en travers du site (sur-élargissement qui favorise le dépôt de la charge de fond, construction d'un seuil en aval qui génère un remous solide vers l'amont, construction d'un pont qui provoque souvent un piégeage temporaire des sédiments du fait de la présence des piles ou d'un sur-élargissement volontaire du lit mineur au droit de l'ouvrage, etc.),

⇒ modification du régime des crues comme, par exemple, le régime artificiel en aval d'un barrage de retenue (moindre fréquence, durée, intensité des crues) qui ne permet plus le transfert immédiat vers l'aval de la totalité des alluvions provenant de l'amont.

■ « assurer le transport suffisant des sédiments » (L214-17)

Contexte de la phrase

« 2° Une liste de cours d'eau, parties de cours d'eau ou canaux dans lesquels il est nécessaire d'**assurer le transport suffisant des sédiments** et la circulation des poissons migrateurs. Tout ouvrage doit y être géré, entretenu et équipé selon des règles définies par l'autorité administrative, en concertation avec le propriétaire ou, à défaut, l'exploitant. »

Interprétation

Cet article est l'un des rares qui, au lieu de faire référence à la continuité écologique (comme le 1° du même article), précise les deux composantes de cette continuité : le transport des sédiments et la circulation des espèces.

Il s'agit de la volonté du législateur d'insister sur le fait que les deux dimensions sont à prendre en compte pour garantir le bon fonctionnement des cours d'eau, mettant bien en évidence la différence avec les classements actuels de cours d'eau qui n'imposent une obligation que vis à vis de la circulation des poissons. S'agissant d'une notion nouvelle au moment de la préparation de la loi, à savoir, une obligation de réduction de l'impact d'ouvrages existants alors que les solutions techniques de correction sont mal connues, l'expression « transport suffisant » a été choisie par précaution. Il faut en comprendre que l'exigence de l'administration ne doit pas être le transit ou le rétablissement total du transport sédimentaire, mais doit viser le meilleur niveau de transit ou de rétablissement de ce transit, en tenant compte des besoins et enjeux de rééquilibrage sédimentaire, de la faisabilité technique et du coût de la mesure.

Cette précaution n'est pas exclusive de la règle imposant de tenir compte des meilleures techniques disponibles au moment de la décision (le niveau de « suffisance » peut donc être amené à augmenter à l'occasion de gros travaux ou du renouvellement des autorisations ou concessions si les techniques se sont améliorées) car la réduction la plus grande possible des impacts doit toujours être recherchée.

NB A la fin de ce chapitre, l'encadré « Qu'est-ce que le transport suffisant des sédiments ? » présente de manière détaillée notre proposition d'interprétation.

■ « bon déroulement du transport naturel des sédiments » (R214-1, 3.1.1.0)

Contexte de la phrase

« Au sens de la présente rubrique, la continuité écologique des cours d'eau se définit par la libre circulation des espèces biologiques et par le **bon déroulement du transport naturel des sédiments** ».

Interprétation

L'expression est différente de celle employée à l'article L.214-17 où il question de « transport suffisant des sédiments ». Cette différence n'a pas un impact juridique fondamental et s'explique par le fait que la rubrique (créée avant le texte du L.214-17) vise à soumettre à autorisation ou déclaration au titre de la loi sur l'eau, des **ouvrages ayant un impact sur la continuité écologique**. Il est donc normal que la rubrique reprenne la définition officielle (celle de la DCE) de cette continuité.

La rubrique 3.1.1.0. fixe par des seuils de hauteur de chute (> 50 cm et entre 20 et 50 cm) l'importance de l'impact qui mérite d'être soumis à la police de l'eau, et donc à l'étude des corrections et compensations nécessaires de l'impact qui peut, le cas échéant, aboutir au rejet du projet impactant. Le caractère « suffisant » de la correction de l'impact sur le bon déroulement du transport naturel, voire la nécessité de refuser l'autorisation en raison de l'impossibilité de corriger suffisamment cet impact, doit être évalué lors de l'instruction de l'étude d'impact par l'administration selon les mêmes principes que ceux exposés au paragraphe « assurer le transport suffisant des sédiments ».

■ « enlèvement des atterrissements » (L215-14)

Contexte de la phrase

« Le propriétaire riverain est tenu à un entretien régulier du cours d'eau. L'entretien régulier a pour objet de maintenir le cours d'eau dans son profil d'équilibre, de permettre l'écoulement naturel des eaux et de contribuer à son bon état écologique ou, le cas échéant, à son bon potentiel écologique, notamment par enlèvement des embâcles, débris et **atterrissements** ».

Interprétation

Il s'agit de définir le terme d'atterrissement et indirectement celui d'enlèvement.

Un atterrissement est un dépôt de tout ou partie de la charge alluviale en transit dans le lit mineur d'un cours

d'eau. Cela peut être un dépôt de sédiments grossiers ou de sédiments fins.

Lorsqu'il s'agit de sédiments grossiers (des sables aux blocs) ces dépôts prennent généralement la forme de macroformes sédimentaires nommées **bancs** ou **dunes** (revoir le premier chapitre) :

- **l'enlèvement** de ce type d'atterrissement peut, dans la théorie, se traduire par l'enlèvement de toute la macroforme sédimentaire, ce qui serait une hérésie et aurait des impacts hydromorphologiques et écologiques importants. Il s'agirait alors d'identifier le niveau de base ou de référence topographique (par exemple le fond moyen du talweg au droit de la macroforme) et d'enlever toute la masse qui dépasserait ce niveau ;

- de manière plus objective et éventuellement plus tolérable du point de vue du fonctionnement du cours d'eau, cet **enlèvement** ne devrait concerner que la partie de l'atterrissement pouvant éventuellement poser un problème en termes d'**écoulement naturel des eaux c'est-à-dire qui s'est définitivement fixée et réduit la capacité d'écoulement du lit mineur**.

Lorsqu'il s'agit de sédiments fins (limons, argiles, « vase »), la sédimentation se fait de manière plus homogène sans qu'il soit toujours possible de discerner des formes sédimentaires :

- l'enlèvement de ce type d'atterrissement est moins pénalisant que celui concernant la charge grossière. Dans ce cas, l'**enlèvement** peut concerner quelques dizaines de cm d'épaisseur (à définir au cas par cas) ;

- il peut même être bénéfique s'il s'agit d'enlever des sédiments fins recouvrant ou colmatant de manière excessive les substrats alluviaux grossiers du cours d'eau (souvent pour des raisons non naturelles, par exemple, excédent de « fines » liées à l'érosion des sols agricoles, élargissement du lit en raison de recalibrages, dépôt de sédiments fins dans le remous hydraulique d'un seuil, etc.). Dans ce cas, l'**enlèvement** peut concerner toute l'épaisseur de fines, jusqu'à la surface du substrat grossier.

■ « curage » (L215-15)

Contexte de la phrase

« II.-Le plan de gestion mentionné au I peut comprendre une phase de restauration prévoyant des interventions ponctuelles telles que le **curage**, si l'entretien visé à l'article L. 215-14 n'a pas été réalisé ou si celle-ci est nécessaire pour assurer la sécurisation des cours d'eau de montagne. Le recours au **curage** doit alors être limité aux objectifs suivants : remédier à un dysfonctionnement du transport naturel des sédiments de nature à remettre en cause les usages visés au II de l'article L. 211-1 à empêcher le libre écoulement des eaux ou à nuire au bon fonctionnement des milieux aquatiques ».

Interprétation

Le curage peut être défini de la même manière que l'enlèvement d'atterrissements avec des préconisations différentes selon que l'on aura à traiter des alluvions grossières ou fines.

Concepts liés à la géométrie du lit mineur : profils en long et en travers

■ « maintenir le cours d'eau dans son profil d'équilibre (L215-14) »

Contexte de la phrase

« Sans préjudice des articles 556 et 557 du code civil et des chapitres Ier, II, IV, VI et VII du présent titre, le propriétaire riverain est tenu à un entretien régulier du cours d'eau. L'entretien régulier a pour objet de **maintenir le cours d'eau dans son profil d'équilibre**, de permettre l'écoulement naturel des eaux et de contribuer à son bon état écologique ou, le cas échéant, à son bon potentiel écologique ».

Interprétation

Le concept de profil d'équilibre d'un cours d'eau existe depuis des décennies en géologie et en géographie physique et concerne essentiellement le **profil en long**. Dans l'esprit du texte, le terme de **géométrie d'équilibre** (comprenant le profil en long et le profil en travers) eut été plus approprié.

A l'échelle de milliers, voire de millions d'années, l'ajustement du profil en long global d'un cours d'eau se traduit par une forme concave caractéristique, souvent nommée profil d'équilibre. Cette forme est le **résultat de l'équilibre dynamique entre les processus d'érosion/dépôt** autour des conditions moyennes des variables de contrôle qui ont prévalu jusqu'à ce jour.

NB Un profil en long, même « d'équilibre », peut ne pas être totalement « lisse » (comme celui de la Loire ou de la Seine) et présenter des variations parfois brutales, liées par exemple à des changements géologiques ou des accidents tectoniques.

L'**ajustement global** du profil en long d'un cours d'eau se fait généralement par rapport à un « niveau de base » ou « niveau de contrôle aval » qui peut être le niveau de la mer pour les fleuves ou la cote altitudinale du cours d'eau récepteur pour leurs affluents.

Les **ajustements locaux**, à l'échelle de tronçons géomorphologiques par exemple, peuvent **se faire sur des points de contrôle plus localisés** : un seuil naturel ou artificiel, un brusque rétrécissement ou élargissement de la vallée, le cône alluvial d'un affluent.

Si le niveau de base descend ou monte, pour des raisons naturelles ou anthropiques, le profil en long s'ajuste plus ou moins rapidement par **incision**. On parle alors d'**érosion régressive** (un nouveau profil en long s'établit à une altitude inférieure à partir du niveau de base imposé et se raccorde au profil primitif par une rupture de pente qui recule vers l'amont) ou d'**exhaussement** (généralement **progressif** : le cours d'eau remblaie son chenal pour rattraper le niveau imposé).

On comprend alors qu'un **profil d'équilibre**, surtout lorsqu'il est analysé à l'échelle locale, ce qui est le cas dans l'esprit du texte analysé ici, peut présenter des caractéristiques de forme et de cote d'altitude très variables en fonction des fluctuations des paramètres de contrôle (notamment débit liquide et débit solide).

Nous considérons donc que la seule action du propriétaire riverain vis à vis de son obligation de maintien du cours d'eau dans son **profil d'équilibre** consiste à éviter les exhaussements et incisions dépassant les fluctuations naturelles de la cote du cours d'eau sous l'effet de la variabilité des paramètres de contrôle.

Le **profil d'équilibre** devrait donc être préalablement défini (par calcul) avec ses fourchettes hautes et basses de fluctuations naturelles dynamiques de cote.

Attention. Il ne s'agit pas pour le propriétaire riverain de créer une géométrie en travers et/ou en long qui empêche tout dépôt ou toute érosion de la charge alluviale en transit. Il s'agit de préserver les caractéristiques géométriques (c'est-à-dire profil en long, largeur et profondeur à pleins bords) naturelles qui garantissent sur le moyen terme, un **bilan sédimentaire équilibré**.

Par conséquent, le riverain devrait rarement avoir à enlever des sédiments, l'essentiel de son devoir d'entretien devant surtout consister en une surveillance des atterrissements, une action « légère » permettant le cas échéant de les maintenir mobilisables par les crues et en une information de l'administration qui permettrait de mieux définir la nécessité éventuelle d'une intervention et son ampleur.

■ « **modifier le profil en long ou le profil en travers du lit mineur d'un cours d'eau** » (R214-1, 3.1.2.0)

Contexte de la phrase

« 3. 1. 2. 0. Installations, ouvrages, travaux ou activités conduisant à **modifier le profil en long ou le profil en travers du lit mineur d'un cours d'eau**, à l'exclusion de ceux visés à la rubrique 3. 1. 4. 0, ou conduisant à la dérivation d'un cours d'eau ».

Interprétation

Indépendamment des fluctuations naturelles des variables de contrôle (débit liquide et débit solide notamment) qui peuvent se traduire par des modifications naturelles du profil en long ou en travers, quasiment toute intervention humaine sur un cours d'eau peut avoir pour effet une modification de ces caractéristiques géométriques.

Il importe donc de définir un « **seuil de modification tolérable** », tant du point de vue hydromorphologique qu'écologique.

Du point de vue hydromorphologique, la modification de ces caractéristiques géométriques ne doit pas se traduire par une augmentation des forces tractrices en crue pouvant engendrer des **processus d'incision**, *in situ*, régressive ou progressive :

- cette force tractrice critique peut être déterminée par calcul au cas par cas ;
- on peut aussi se baser sur l'évolution du débit de pleins bords en estimant qu'une augmentation supérieure à 10 % de la capacité d'écoulement à pleins bords peut engendrer un risque d'activation de processus d'incision.

Du point de vue écologique (hors aspect concernant la modification des faciès naturels ou la perturbation des caractéristiques du substrat alluvial), ces modifications géométriques ne doivent pas se traduire par une **réduction notable de la capacité d'accueil** du cours d'eau pour la faune aquatique, **particulièrement en étiage** :

- en régime hydrologique naturel, le seuil de réduction tolérable de la capacité d'accueil d'étiage peut être estimé à 20 % ;
- en régime de débit réservé, il semble pertinent de ne pas accepter plus de 10 % de réduction.



Qu'est-ce que le transport suffisant des sédiments ?

D'un point de vue technique, deux approches permettent de définir ce que peut être le **transport suffisant** des sédiments : l'approche hydromorphologique et l'approche écologique.

Approche hydromorphologique

Dans des conditions naturelles relativement constantes, les rivières tendent à établir une combinaison « dynamiquement stable » entre deux types de variables :

■ des **variables de « contrôle »** qui jouent à l'échelle du bassin versant (débit liquide et débit solide) ou de la vallée (pente et largeur de la vallée, nature des alluvions du fond de vallée, etc.). Les variables de contrôle s'imposent directement à la rivière et contrôlent son évolution physique. Parmi ces variables de contrôle, **deux sont fondamentales** et régissent en grande partie la dynamique fluviale, et par ricochet, la **dynamique écologique** :

⇒ Le débit liquide (noté Q) qui, couplé à la pente, donne au cours d'eau sa puissance,

⇒ Le débit solide (Q_s), particulièrement la **charge alluviale de fond composée de sédiments grossiers**.

Notons que c'est aussi cette charge alluviale grossière (des sables aux blocs) qui, lorsqu'elle se dépose, constitue le fond du lit mineur des cours d'eau et donc **l'habitat majeur de la plupart des biocénoses aquatiques et ripariales** (se développant sur les bancs alluviaux exondés une partie de l'année) ;

■ des **variables de « réponse »** qui jouent à l'échelle du tronçon de cours d'eau (largeur, profondeur, sinuosité du lit, pente locale, etc.). Les variables de réponse permettent à la rivière de s'ajuster aux mutations des variables de contrôle, lorsque celles-ci se produisent.

Attention. Nous estimons que le concept de **transport suffisant des sédiments** doit être appliqué à la charge grossière (ou charge de fond) et **ne concerne a priori pas la charge fine** (ou charge en suspension) même si celle-ci peut être naturellement présente en forte quantité dans le cours d'eau si la géologie du bassin versant s'y prête.

Dans la théorie géomorphologique, le transport de cette charge de fond est considéré comme **suffisant** si le bilan sédimentaire entre l'amont et l'aval d'un site (portion restreinte d'un cours d'eau ou tronçon géomorphologique homogène selon les cas) est équilibré, c'est-à-dire qu'il arrive de l'amont autant de sédiments que la capacité de charriage naturelle du site est capable d'en évacuer vers l'aval.

S'il en arrive plus, il y a stockage plus ou moins temporaire de sédiments et généralement exhaussement du lit (d'où parfois une augmentation temporaire de la fréquence et de la durée des inondations).

S'il en arrive moins, il y a déstockage sédimentaire et généralement **incision du lit mineur** (principalement par érosion dite « progressive », c'est à dire se propageant de l'amont vers l'aval). Cette incision se traduit par des **effets extrêmement négatifs** tant d'un point de vue hydromorphologique (déchaussement de pont, de pieds de digues, de protections de berges), qu'hydrogéologique (affaissement de la nappe d'accompagnement et difficulté d'alimentation en eau), et **écologique** (disparition ou forte réduction des superficies et de l'épaisseur des substrats alluviaux au profit du substratum rocheux peu biogène, développement d'un « pavage » lui aussi peu biogène, assèchement des zones humides alluviales et des bras morts, etc.).

Attention. En hydromorphologie, l'équilibre d'un bilan sédimentaire ne se juge pas sur un événement (une crue) mais sur une certaine durée permettant de lisser les événements hydrologiques.

Le **transport des sédiments** peut donc être considéré comme **suffisant** si, sur une durée permettant de lisser les fluctuations hydrologiques (*a minima* 2 à 3 ans, si possible 3 à 5 ans), les apports de charge de fond (sédiments grossiers) provenant de l'amont du site (c.a.d. du **tronçon géomorphologique homogène**)



compensent les exportations vers l'aval. L'objectif est donc de **garantir le bilan sédimentaire équilibré du tronçon géomorphologique**, tant en volume qu'en nature des alluvions transportées (il ne s'agit pas de remplacer des exportations de galets et graviers par des apports de sable).

Nous voyons que cette première approche hydromorphologique peut déjà se traduire en effets écologiques par le biais de l'habitat des biocénoses aquatique et ripariale, qui est principalement alluvial.

Approche écologique

L'approche écologique du concept de transport suffisant des sédiments peut elle même être abordée sous plusieurs angles, du plus large au plus restrictif : écologie fonctionnelle globale, écologie des biocénoses aquatiques, écologie d'une phase de développement d'une ou plusieurs espèces (généralement la reproduction), et enfin qualité physico-chimique des eaux.

Approche écologique fonctionnelle globale

Le **transport suffisant des sédiments** doit permettre de préserver le fonctionnement de l'hydrosystème fluvial en général, du lit mineur au lit majeur et aux annexes hydrauliques. Il s'agit donc d'éviter les impacts listés dans l'approche hydromorphologique et liés principalement à l'incision du lit : disparition ou réduction de la superficie ou de l'épaisseur du substrat alluvial, déconnexion entre le lit mineur et la ripisylve, déconnexion entre le lit mineur et le lit majeur et les annexes hydrauliques, affaissement de la nappe d'accompagnement et assèchement des milieux humides annexes, etc.

Ce premier niveau d'approche écologique se traduit par la même définition du **transport suffisant des sédiments** que celle proposée par l'approche hydromorphologique : garantir un bilan sédimentaire équilibré.

Approche écologie des biocénoses aquatiques

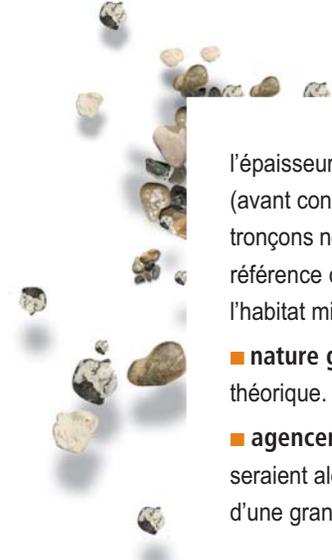
Il s'agit d'une restriction du concept. Le transport suffisant de sédiments doit permettre de garantir la vie des biocénoses aquatiques (poissons, invertébrés, végétaux) inféodées à un habitat sur substrat alluvial.

On peut alors considérer que le transport suffisant des sédiments est assuré lorsque le site considéré (c.a.d. le tronçon géomorphologique homogène) conserve sur le long terme une superficie, une épaisseur, une nature granulométrique et un agencement de substrat alluvial, suffisants pour garantir la vie de toutes les espèces des biocénoses aquatiques théoriques du tronçon considéré.

NB Indépendamment des apports de sédiments, ces surfaces alluviales doivent être agencées en **faciès d'écoulement naturels** qui outre le substrat, sont caractérisées par des hauteurs d'eau, des vitesses, des profils en travers et en long particuliers. Cet agencement en faciès naturel dépend lui même des apports de sédiments mais aussi des débits morphogènes, de la sinuosité du lit (faible hétérogénéité de faciès sur les rivières rectifiées), de sa géométrie (faible hétérogénéité de faciès sur les rivières recalibrées) et de sa capacité à éroder ses berges et son lit.

Les données scientifiques actuelles ne permettent pas de définir précisément ces valeurs de superficie, épaisseur etc. On peut néanmoins proposer des ordres de grandeur :

- **superficie de substrat alluvial dans le lit mineur.** On prendra comme référence, soit la superficie naturelle avant aménagement (avant construction d'un barrage, avant extractions de granulats), soit la superficie observable sur des tronçons (ou sur d'autres cours d'eau appartenant au même type hydromorphologique) non affectés par des dysfonctionnements du transit sédimentaire. En l'absence de l'une ou de l'autre référence on estimera en dernier recours **cette superficie minimale à 50 % de la superficie du lit mineur ;**
- **épaisseur du substrat alluvial.** Si l'on s'intéresse à toutes les biocénoses aquatiques, il est nécessaire de garantir l'ensemble des habitats alluviaux qui leur sont nécessaires et qui est notamment conditionné par



l'épaisseur de sédiment disponible. On prendra comme référence, l'épaisseur naturelle avant aménagement (avant construction d'un barrage, avant extractions de granulats), ou l'épaisseur naturelle observable sur des tronçons non affectés par des dysfonctionnements du transit sédimentaire. En l'absence de l'une ou de l'autre référence on estimera en dernier recours cette épaisseur **minimale moyenne à 20 cm** (si l'on veut garantir l'habitat minimal d'interface) et à **40 cm** si l'on souhaite un minimum de fonctionnement hyporhéique ;

■ **nature granulométrique.** Là encore la référence à un tronçon non altéré sera préférable à une approche théorique. En l'absence de référence, on établira une courbe granulométrique théorique ;

■ **agencement des particules du substrat.** Il faut absolument garantir le non pavage des alluvions, qui seraient alors peu ou non utilisables par les biocénoses. Cela implique donc un apport suffisant de matériaux d'une granulométrie adaptée à leur transit régulier.

Approche particulière concernant les zones de reproduction

Le niveau le plus restrictif du concept de **transport suffisant des sédiments** correspond à la garantie de **préservation des zones de reproductions (frayères)** d'une ou plusieurs espèces cibles du cours d'eau concerné.

On peut alors considérer que le **transport suffisant des sédiments** est assuré lorsque le site considéré (c.a.d. le tronçon géomorphologique homogène) conserve sur le long terme une **superficie**, une **épaisseur**, une **nature granulométrique** et un **agencement** du substrat alluvial suffisantes pour **garantir la reproduction d'une ou plusieurs espèces cibles** du tronçon considéré.

Il s'agit alors de définir ces paramètres pour chaque espèce cible ou cortège d'espèces cibles : truite fario, saumon atlantique, alose, etc.

Approche physico-chimique

Il semble qu'une certaine superficie/épaisseur de substrat alluvial, agencé en alternances de faciès d'écoulement de type « radiers/mouilles », soit indispensable à **une bonne autoépuration naturelle des eaux**, grâce entre autres aux échanges entre l'eau de surface et l'eau interstitielle (dans la zone hyporhéique). Il apparaît en effet dans plusieurs publications récentes, que cette zone hyporhéique peut dans certaines configurations être un puits de phosphates et de carbone organique dissous et que la dénitrification dans les sédiments peut entraîner des pertes rapides en nitrates.

Restent à déterminer les valeurs de superficie/épaisseur/nature granulométrique/agencement des alluvions pour que ces processus soient efficaces.

Attention. Le transport suffisant des sédiments doit *a priori*, si l'on veut atteindre ou conserver le bon état écologique, être garanti sur tous les cours d'eau. Il est cependant possible de prioriser la mise en œuvre du concept (quelle que soit l'approche ayant permis sa définition) sur les cours d'eau subissant des dysfonctionnements sédimentaires et particulièrement une réduction des apports solides, sous l'effet :

- de modifications sur le bassin versant (travaux de stabilisation de versants et de torrents, revégétalisation naturelle) ;
- de perturbations du transit par des barrages ou des seuils ;
- d'extractions de granulats en lit mineur.

Orientations générales de gestion et de restauration

133

134 ■ Contexte général

135 ■ Restauration de la production primaire

135 ■ Préservation du stock alluvial en lit majeur
et de l'érosion latérale

137 ■ Préservation de la continuité de la charge de fond



Contexte général

Si la présentation des diverses sources d'altération du transport solide peut être individualisée, il semble plus pertinent de proposer des remèdes génériques à ces altérations, basés sur trois types d'actions :

- préservation/restauration de la production primaire ;
- préservation/restauration du stock alluvial en lit majeur et des processus d'érosion latérale ;
- préservation/restauration de la continuité de la charge de fond.

Ces trois types d'actions peuvent être proposés indépendamment les uns des autres ou conjointement, selon la nature et l'ampleur des dysfonctionnements hydrosédimentaires identifiés à l'échelle d'un bassin versant.

La mise en œuvre de telles solutions, souvent coûteuses et parfois traumatisantes pour les populations riveraines, doit être précédée d'une analyse complète du cours d'eau et de son bassin versant permettant, entre autres, de répondre aux questions suivantes (liste non exhaustive) :

- quel est le fonctionnement hydrosédimentaire naturel du cours d'eau et de son bassin dans le contexte géoclimatique actuel ?
- quels sont les dysfonctionnements hydrosédimentaires observés actuellement ?
- quels sont les enjeux menacés par ces dysfonctionnements : humains, socio-économiques, environnementaux ?
- quel fonctionnement veut-on restaurer et pour quelle raison (si possible, raisonner directement en débit solide annuel ou autre unité de mesure) ?
- quelle est la probabilité de réussite et de pérennité des interventions proposées ?
- quels sont les coûts et les gains potentiels (tant financiers qu'environnementaux) ?
- etc.

Restauration de la production primaire

Vis-à-vis de ce premier type de solution, l'une des questions de fond qui se pose est la suivante : est-ce que la forte production sédimentaire primaire observée en France à la moitié du XIX^e siècle, à l'aube des premiers grands projets de stabilisation des versants, était naturelle ou d'origine anthropique ? :

- si elle était naturelle, il paraît pertinent de chercher à la restaurer, en remettant par exemple en question l'existence de certains ouvrages de stabilisation de versants ou de torrents ;
- si elle était d'origine principalement anthropique (surpâturage et défrichements intensifs en zone de montagne depuis le XIV^e siècle), pourquoi ne pas accepter la recolonisation forestière naturelle et la réduction concomitante des apports de charge grossière ?

Il apparaît en effet que de nombreux cours d'eau qui étaient fortement chargés en sédiments grossiers au XIX^e siècle, sont aujourd'hui très déficitaires et généralement fortement incisés, notamment sous l'effet des extractions massives de granulats depuis les années 1950. De plus, les conditions climatiques ont évolué de façon significative (pour des raisons naturelles et anthropiques) ce qui laisse supposer un impossible retour à d'hypothétiques conditions de référence.

Même s'ils n'ont fait parfois que s'inciser dans les abondants dépôts alluvionnaires générés lors des siècles précédents, il n'en reste pas moins que des écosystèmes intéressants (rivières en tresses par exemple) et un certain nombre d'usages (alimentation en eau potable, moulins, etc.) et d'infrastructures (ponts, routes, digues, etc.) s'étaient construits et développés autour de ces caractéristiques géodynamiques et que l'incision contemporaine les remet drastiquement en cause.

La restauration d'une production primaire importante, par suppression volontaire de diverses structures de stabilisation des versants pourrait être, à l'échelle de certains bassins, une solution intéressante. **La simple préservation des zones actuelles de production est déjà un objectif majeur.**

Préservation du stock alluvial en lit majeur et de l'érosion latérale

La deuxième famille de solutions vise à préserver le stock alluvial des lits majeurs et des terrasses quaternaires, puis à le rendre disponible aux cours d'eau par le biais de l'érosion latérale.

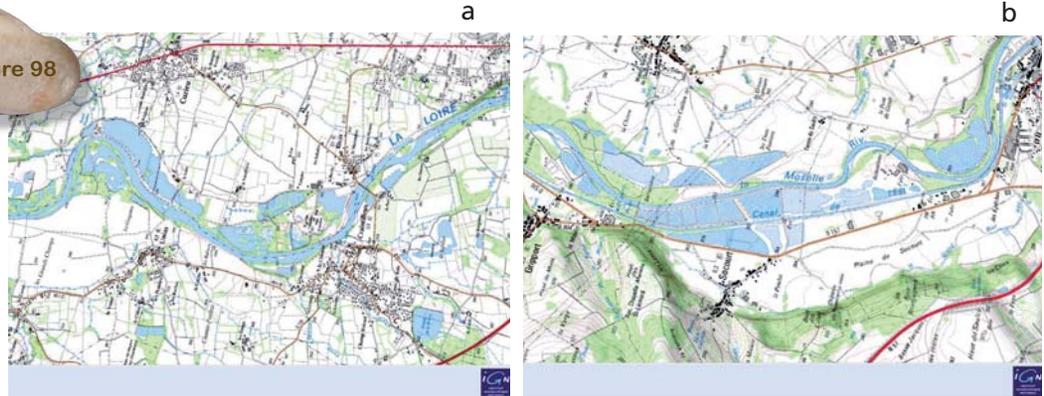
Préserver le stock alluvial

Il s'agit avant tout d'**empêcher la disparition de ce stock alluvial**. Les menaces principales sont, nous l'avons vu, les exploitations de granulats en lit majeur car les demandes d'alluvions fluviales sont toujours très fortes en France (près de 40 % de la production totale de granulats soit environ 170 M de T/an), notamment pour la fabrication du béton hydraulique.

Lorsqu'elles ont lieu, ces extractions oblitèrent de manière irréversible les possibilités de recharge sédimentaire du cours d'eau par érosion latérale (Figure 98).



Figure 98



Disparition irréversible d'une source potentielle de recharge sédimentaire (a) la Loire à Feurs et (b) la Moselle à Charmes.

a- b- Fond Géoportail. ©IGN 2011

Divers textes de portée réglementaire variable ont été établis depuis plus de 15 ans pour enrayer ce phénomène et notamment l'arrêté ministériel de janvier 2001 qui interdit les exploitations de granulats dans les **espaces de mobilité** des rivières.

Le seul problème est que les études permettant de cartographier ces espaces de mobilité et d'y interdire toute nouvelle extraction sont principalement payées par les pétitionnaires. Il n'y a donc pas lieu d'être surpris par le nombre important d'abus et de cartographies d'espace de mobilité totalement insuffisants.

Garantir la disponibilité de ce stock

Même s'il est physiquement préservé, ce qui est déjà un objectif de gestion ambitieux, le stock alluvial du lit majeur et des terrasses n'en est pas pour autant toujours disponible.

Le potentiel de ces espaces en termes de ressources a toujours poussé l'Homme à tenter d'empêcher ou de réduire l'intensité des processus d'érosion latérale (objectif souvent combiné à celui de la lutte contre les inondations). Cette volonté de protection s'est traduite, nous l'avons vu, par des dizaines de milliers de kilomètres de protections de berges de tous types.

Si certains usages doivent sans aucun doute être protégés (zones d'urbanisation dense, infrastructures de transport majeures, ouvrages de franchissement), il peut être envisagé, dans un souci de meilleure gestion, voire de restauration, des cours d'eau, d'accepter l'érosion de certains terrains.

Le concept d'**espace de mobilité** a été développé en ce sens à la fin des années 1980 et formalisé peu à peu dans divers documents administratifs et juridique, dont les schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE), l'arrêté de 2001 précédemment cité et la loi Risque de 2003.

Ce concept est simple : pour garantir l'équilibre géodynamique des cours d'eau à dynamique active, éviter leur incision et préserver ainsi les divers usages qui leur sont associés (stabilité de la nappe phréatique pour l'AEP (alimentation en eau potable), non déstabilisation des ouvrages d'art ou des digues, préservation des écosystèmes alluviaux) il est nécessaire d'accepter que les rivières érodent régulièrement une partie de leur lit majeur.

Il est donc fondamental, pour les rivières potentiellement encore actives présentant un stock alluvionnaire en lit majeur et qui ont été fortement impactées par les extractions et les grands barrages, d'envisager aujourd'hui de :

- cartographier leurs espaces de mobilité ;
- y empêcher toute nouvelle protection contre l'érosion et tout nouvel usage qui pourrait à terme nécessiter une protection (urbanisation, station de pompage, route, etc.) ;
- et si possible, remettre en question certaines protections existantes et les usages qui leur sont associés, particulièrement si ce mode de gestion est le seul qui puisse garantir le retour (ou la préservation) d'un bon fonctionnement.

La loi Risques de 2003 est l'un des outils permettant de mener à bien ce type de démarche.



Préservation de la continuité de la charge de fond

Le dernier type de préconisation consiste à **garantir la continuité sédimentaire de l'amont vers l'aval** et préserver ainsi l'équilibre géodynamique à l'échelle d'un bassin, ou a minima d'un tronçon de rivière.

Quatre types d'interventions humaines ou d'infrastructures anthropiques peuvent avoir un effet « bloquant » sur la charge alluviale de fond en transit :

- les curages et dragages ;
- les barrages et les seuils ;
- certaines anciennes extractions en lit mineur et certaines extractions en lit majeur ;
- enfin, dans une moindre mesure, certains anciens ponts présentant des arches à section réduite (voir plus loin).

Curages et dragages

Ces deux types d'opération, encore très courants aujourd'hui, peuvent être très pénalisants dans la mesure où la technique la plus fréquemment utilisée actuellement consiste à **extraire définitivement les produits de curage ou de dragage**.

Si ces opérations sont nombreuses et fréquentes sur un cours d'eau, elles finissent par générer les mêmes impacts que les anciennes extractions commerciales en lit mineur (incision par érosion régressive et progressive).

Si ces opérations sont justifiées (à vérifier au cas par cas par une étude appropriée : une méthode d'évaluation des risques et des enjeux est présentée au chapitre suivant), les solutions techniques que nous préconisons actuellement consistent à laisser au maximum la charge solide dans le cours d'eau.

Sans entrer dans le détail de l'analyse risques/enjeux, **une règle simple de gestion** peut être proposée :

- lorsque les dépôts d'alluvions génèrent localement un désordre hydraulique important ou une forte probabilité de désordre hydraulique (risque d'aggravation des inondations en traversée de village par forte réduction de la capacité d'écoulement en crue, problèmes de navigation, engorgement de ponts, etc.), il peut être envisagé d'intervenir sur les dépôts par curage ou dragage si des solutions alternatives ne paraissent pas suffisantes ;
- lorsque les alluvionnements ne génèrent pas de désordre hydraulique, il ne faut surtout pas les enlever. Leur transit vers l'aval se fera progressivement, au rythme des crues, et participera ainsi à l'équilibre dynamique de la rivière.

Deux grandes familles de techniques de gestion des matériaux de curage/dragage sont envisageables et mises en œuvres sur certains bassins depuis quelques années :

- le déplacement des matériaux de curage ou dragage vers un autre site, si possible peu éloigné du site à traiter ;
- le réagencement des matériaux sur le site même afin de limiter les effets négatifs des dépôts, tout en permettant leur transport naturel vers l'aval. Cela permet de réduire les coûts financiers et écologiques tout en améliorant le fonctionnement hydrosédimentaire des tronçons situés à l'aval.

■ Transfert des alluvions vers l'aval

Le transfert artificiel des sédiments vers l'aval en cas d'alluvionnement « générateur de désordres » est une solution intéressante. Cette méthode pose cependant **trois types de problèmes** :

■ elle a un coût financier plus élevé que les anciennes méthodes (entreprises de travaux publics enlevant les alluvions et se rémunérant en partie sur le stock, enlèvement aux frais de la municipalité et redépôt sur des chemins ruraux etc...). Le coût moyen d'enlèvement/transfert des matériaux est à ce jour de l'ordre de 4 à 8 € HT le m³ pour un transfert dans un rayon de 10 km. Au delà, il faut compter environ 2,5 € HT de plus par tranche de 5 km ;

■ elle a un « bilan carbone » qui peut être élevé et faire perdre une partie du bénéfice écologique global de l'opération ;

■ elle pose un problème « psycho-sociologique » dans la mesure où les riverains d'un cours d'eau, souvent demandeurs des curages, ont beaucoup de mal à accepter que l'on vienne déposer « chez eux » des alluvions de l'amont. Il s'agira donc au cas par cas de trouver des sites de dépôts qui ne génèrent pas de réaction forte de la part des riverains :

⇒ toujours en zone rurale et jamais en amont immédiat (< 1 km) d'un village (si le cours d'eau traverse le village) ou d'un pont à arches étroites,

⇒ jamais en amont immédiat ou à l'intérieur d'une ancienne fosse d'extraction en lit mineur (sauf si lune étude fait apparaître l'intérêt de cette action),

⇒ en évitant si possible les queues de retenues de barrages ou de seuils.

Le site idéal est donc en zone rurale, le plus loin possible en amont des villages traversés par le cours d'eau ou si possible en aval (Figure 99), en section naturelle d'écoulement (c'est-à-dire hors retenue de barrage ou d'ancienne extraction).

Le mode opératoire des dépôts consiste à régaler si possible le volume sur toute la largeur du lit mineur et sur une distance permettant de limiter l'épaisseur moyenne du dépôt à une réduction de la section inférieure à 10 %.

Figure 99



(a) dépôt des matériaux curés le long d'une berge en aval du site à enjeux, afin de favoriser leur reprise par l'écoulement à la prochaine crue, (b) et (c) méthodes plus expéditives.

a © J.R. Malavoi
b-c © C. Le Bras

■ Réagencement sur place

Cette solution présente l'avantage de réduire notablement les coûts d'intervention, le bilan carbone et les « risques de non acceptation du projet ».

Elle consiste à redistribuer les alluvions au sein même du site à enjeux dans l'objectif de réduire leurs impacts éventuels.

On peut ainsi aplanir un banc de convexité trop épais, en régalant le volume du banc sur un linéaire plus important afin de répartir la réduction de section. On peut aussi, tout en aplanissant, déplacer les matériaux d'une convexité vers une concavité, ce qui présente l'avantage supplémentaire de protéger temporairement la berge contre l'érosion (mais l'inconvénient de « boucher » une mouille de concavité intéressante pour la faune piscicole).

Dans le cas de l'entretien d'un chenal de navigation, on peut déplacer les matériaux curés dans l'emprise du chenal navigable puis les redéposer en lit mineur au sein même du bief, le plus loin possible du chenal navigable, sur les marges du lit ou dans des fosses profondes (anciennes extractions par exemple) s'il en existe dans les biefs.

Ré-agencer les sédiments curés sous forme de risberme en pied de berges peut permettre de surcroit le développement d'une végétation d'hélophytes. Ce type de gestion a été préconisé pour l'entretien du Doubs navigable (Malavoi 2003).

Que ce soit pour les curages ou les dragages, l'inconvénient principal de la technique de réagencement sur site est qu'elle nécessite généralement un entretien plus fréquent dans la mesure où les crues engendrent des mouvements de matériaux au sein du bief. Les travaux risquent aussi de modifier localement mais temporairement les habitats piscicoles et notamment certaines frayères ou certaines zones d'abris (mouilles).

Il est possible également de favoriser le déplacement des matériaux en remodelant les dépôts après avoir pratiqué si besoin, selon l'importance de la végétation ripariale, un essartage avec dessouchage et un griffage du banc pour déstructurer le dépôt. L'intervention la plus poussée consiste à façonner un chenal ou tranchée de remobilisation favorisant la formation d'une sinuosité avec une concavité abrupte sur laquelle on dépose les matériaux issus du curage par creusement de la tranchée (Figure 100).

Figure 100



Tranchées réalisées sur la Drôme sur des tronçons à méandre libre (a) (1997) et contraint par des digues (b) (2003).

■ Cas particulier des ponts

Plus que la forme des ponts, leur tirant d'air ou le nombre et la forme de leurs piles, le problème des ouvrages de franchissement vis à vis du transport solide est que leurs constructeurs, avec une logique hydraulique tout à fait pertinente, on souvent cherché à compenser l'emprise des structures (piles, culées) par un élargissement du lit, afin de conserver la même section d'écoulement en crue.

Si cela fonctionne bien sur les rivières peu chargées en sédiments grossiers, cela n'est plus le cas sur celles à fort transport solide de fond. L'élargissement, souvent brutal de la section, se traduit presque systématiquement par un alluvionnement en raison de la chute rapide des forces tractrices. La perte de charge locale liée à la présence de l'ouvrage va dans le même sens.

On se retrouve alors avec un alluvionnement fort, qui se répète à chaque crue même si l'on extrait régulièrement les matériaux (Figure 101).



Exemple de pont bloquant plus ou moins temporairement le transport solide. C'est souvent l'élargissement du lit plus que l'ouvrage lui-même qui est la cause du sur-alluvionnement (surtout au droit de convexités de méandres...).

Barrages et seuils

■ Préconisations générales pour la gestion des barrages

Barrages non équipés d'ouvrages de dégrèvement

En plus des barrages non équipés d'ouvrages de dégrèvement, ces préconisations concernent aussi les barrages dont les ouvrages de dégrèvement fonctionnent mal ou sont sous dimensionnés, ou dont les retenues sont trop longues, trop volumineuses, trop larges pour que transport de fond puisse atteindre les ouvrages de dégrèvement.

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

- soit on détruit l'ouvrage (on parle de dérasement ou d'effacement) et le transport solide peut alors reprendre de manière naturelle, après une période d'ajustement plus ou moins longue ;
- soit on transfère à pas de temps plus ou moins régulier les alluvions de l'amont vers l'aval de l'obstacle (méthode qui a été appliquée sur un certain nombre de sites aux USA ainsi que sur le Rhin) ;
- 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).

1- Effacement de l'ouvrage

C'est probablement la **méthode la plus efficace**, qui de surcroît résout en général l'ensemble des effets négatifs engendrés par la présence de barrages (franchissabilité, réchauffement de l'eau, aggravation de l'eutrophisation, etc.).

Le principe est simple : on supprime intégralement l'ouvrage, en gardant éventuellement un radier de fond pour éviter une érosion régressive provenant de l'aval.

Dès que le barrage (ou le seuil puisque cette technique est aussi utilisées pour ces ouvrages) est supprimé, commence alors un processus d'érosion régressive dans le remous solide qui s'est constitué au fil du temps en amont de l'ouvrage.

Attention. Ce remous solide peut remonter très au delà du remous liquide, parfois sur des kilomètres. L'érosion régressive qui va s'y propager peut donc être spectaculaire et engendrer un certain nombre de désordres, notamment si des usages se sont établis sur la base de la cote altitudinale de ce remous solide artificiel (ponts,

puits de captage, digues etc.). Il est toutefois possible, lors d'une étude préalable bien conduite, d'identifier ce type de risque, d'anticiper les processus et éventuellement de les bloquer (avec des micro-seuils par exemple) si des enjeux importants sont menacés.

Les alluvions déstockées par cette érosion régressive sont alors transportées vers l'aval, ce qui génère dans la plupart des cas des **afflux importants de sédiments** qui peuvent être dommageables à certains usages : réduction de la capacité d'écoulement en zone urbaine ou au droit des ponts, bouchage de certains exutoire de drains, de réseaux d'eaux usées (qui refoulent alors dans les maisons...) etc. Là encore, l'étude préalable doit permettre d'anticiper et prévenir ce type de dommages.

Indépendamment de ces usages socio-économiques qui peuvent être temporairement perturbés, on observe parfois des dommages aux écosystèmes aquatiques et rivulaires. C'est le cas notamment lorsque d'importants volumes de sédiments fins à moyens (sables grossiers compris) sont relargués. Les dépôts vont fossiliser les substrats grossiers existants en aval, parfois sur de longues distances et y compris dans les zones à courant rapide (radiers, plats courants) réduisant fortement leur habitabilité. Cette situation de sur-alluvionnement fin n'est généralement que temporaire, si les débits naturels du cours d'eau sont préservés (et non dans le cas de débit influencés). Elle peut néanmoins avoir des conséquences sur la dynamique des populations pendant plusieurs années. Il est parfois envisageable (mais notablement plus coûteux...) de récupérer la fraction fine stockée dans le barrage et de l'évacuer en décharge.

NB Il est important aussi de vérifier que les sédiments qui vont être remobilisés ne présentent pas une mauvaise qualité physico-chimique et notamment une imprégnation par les métaux lourds ou autres substances nocives non transformables par le milieu naturel.

Figure 102



Exemple de dérusement d'un ouvrage. Noter la disparition du banc de convexité présent dans l'ancienne retenue à droite sur la photo.

2- Transfert de sédiments

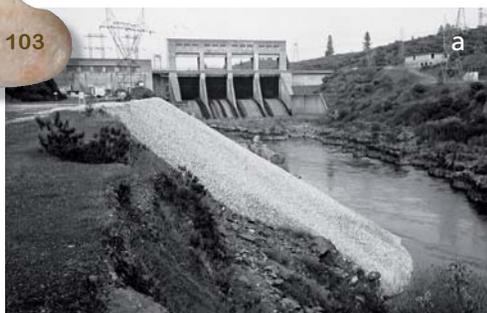
L'apport artificiel de gravier propice à la création de frayères a été utilisé dès le milieu des années 70 par les biologistes comme un moyen d'atténuer la pénurie de graviers, et donc d'habitats favorables à la reproduction du saumon, en aval des barrages hydroélectriques (synthèse dans Bunte *et al.*, 2004).

Si l'objectif initial des premières expérimentations réalisées en Californie (Figure 103) était uniquement piscicole, les ambitions se sont diversifiées progressivement pour viser une restauration fonctionnelle plus globale des tronçons impactés.

Plusieurs méthodes d'amélioration des habitats (notamment de reproduction) ont été testées (restauration morphologique, création et stabilisation de radiers, etc.) mais la méthode la plus élémentaire est ce que les américains nomment « *Passive gravel augmentation* » : le principe, très simple, consiste 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 sous formes d'habitats naturels.



Figure 103



(a) transfert des alluvions en aval du barrage Keswick, Sacramento River, California (1997).

(b) http://www.trrp.net/implementation/sediment_management.htm#cs

Le problème principal identifié est que les graviers ainsi réinjectés sont assez vite exportés en aval, particulièrement si le cours d'eau s'est fortement incisé, créant ainsi des capacités accrues de transport solide devant être sans cesse compensées comme c'est le cas sur le Rhin aval (Figure 104).

142

Figure 104



Transfert des alluvions extraites en lit majeur (a et b) et « clapping » (c) sur les tronçons identifiés comme déficitaire par bathymétrie en temps réel (d) sur le Rhin en aval du barrage d'Iffensheim.

a © Kondolf
b © tous droits réservés

a-b-c-d © N. Landon

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 fonctionnement hydromorphologique (et écologique) équilibré ;
- plus faibles si l'on vise une « simple » restauration de zones de fraie et de croissance. Dans ce cas, les études préalables doivent être suffisamment précises, notamment en termes de modélisation hydraulique, pour identifier les sites de dépôt qui soient à la fois utilisables par les poissons et permettent une certaine pérennité du dépôt.

3- Acceptation du piégeage

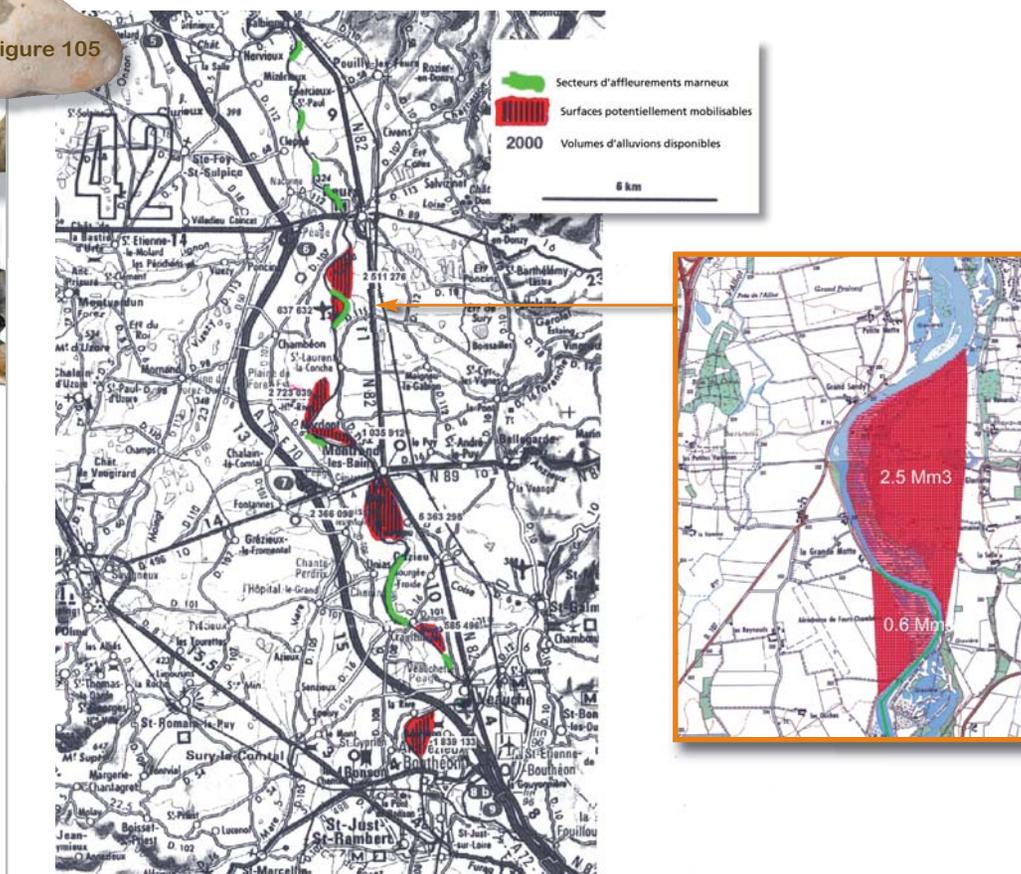
Si pour des raisons techniques ou financières, le transfert d'alluvions n'est pas envisageable, il est nécessaire de trouver des solutions de restauration du transport solide par recharge alluviale en aval de l'ouvrage impactant, le plus près possible du pied de l'ouvrage.

La détermination d'un **espace de mobilité** peut s'avérer la solution la plus pérenne et la plus intéressante. Dans ce cas précis, il peut être intéressant de réaliser une démarche plus « ciblée » que pour la détermination « classique » d'un espace de mobilité.

Il s'agit alors d'identifier précisément les sites potentiels de recharge alluviale par érosion latérale, d'obtenir leur maîtrise foncière et d'y activer ou réactiver les processus d'érosion.

Ce type d'étude a été réalisé sur la Loire en aval du barrage de Grangent (Malavoi et al., 2002, Figure 105) et les terrains identifiés sont en cours d'acquisition foncière par la collectivité (Conseil général 42 en l'occurrence).

Figure 105



Cartographie des zones potentielles de recharge alluviale par érosion latérale sur la Loire en aval du barrage de Grangent. Les volumes indiqués sont des estimations de volumes totaux d'alluvions mobilisables sur le long terme (Malavoi et al., 2002).

Barrages équipés d'ouvrages de dégrèvement

La plupart des ouvrages 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 ;
 - et/ou éviter l'engravement 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.

Plusieurs techniques peuvent être mises en œuvre :

- les vidanges ;
- les chasses ;
- les transparences.

1- Les vidanges

Les éléments présentés ci après sont largement inspirés du rapport du groupe de travail « Petite hydroélectricité et environnement », ministère chargé de l'écologie, D4E, 2002), (voir encadré).

Sur le principe, **une vidange de plan d'eau n'a pas pour objectif premier d'évacuer les sédiments**. Elle a pour but de vider totalement le barrage afin d'effectuer le contrôle ou l'entretien des parties habituellement immergées (exemple : vidanges décennales). Les vidanges sont généralement réalisées en période de faible débit, principalement à l'étiage du cours d'eau et en dehors des périodes de crue pour des raisons de sécurité. Par ailleurs, la capacité de la vanne de vidange est souvent un facteur limitant.

Lors de vidanges, il convient d'éviter au maximum le déstockage des sédiments et des vases en pratiquant un abaissement très lent du niveau du plan d'eau. Qualitativement, les risques associés sont :

- transfert de sédiments fins à l'aval immédiat qui entraîne un colmatage des fonds, préjudiciable aux macroinvertébrés et aux poissons ;
- dégradation de la qualité de l'eau pouvant aboutir à de possibles mortalités piscicoles dans la retenue ou au passage du barrage.

La vidange proprement dite peut durer quelques jours à quelques semaines, la période d'à-sec étant fonction des travaux à réaliser. Les opérations font l'objet de suivis physico-chimiques et biologiques. Les vidanges sont d'autant moins traumatisantes que des chasses hydrauliques sont régulièrement pratiquées.

2- Les chasses

Les opérations de chasse sont effectuées en vue d'évacuer les matériaux accumulés en amont des barrages afin notamment :

- de reconstituer le volume utile de la retenue ;
- de limiter l'engravement pouvant menacer le bon fonctionnement des ouvrages ;
- de minimiser les risques d'entraînement de ces matériaux lors des vidanges de contrôle ;
- de dégager le lit des cours d'eau en aval lorsque les modifications du régime hydrologique perturbent les conditions de transport solide ;
- de limiter les risques d'inondation potentiels liés à l'exhaussement du lit en queue de retenue ;
- dans certains cas, de transiter les chasses des aménagements amont.

Ces opérations se déroulent en période de hautes eaux lors de crues naturelles ou à l'occasion de lâcher d'eau depuis les retenues situées en amont.

Le principe d'une chasse consiste à abaisser le plan d'eau en période de crue ou de très hautes eaux, afin de rétablir le libre écoulement des eaux dans la retenue et à rendre le barrage « transparent ».

Poirel (2001) distingue les **chasses de prise d'eau** et les **chasses de hautes eaux** :

■ les chasses de prises d'eau sont des opérations d'entretien assez fréquentes qui ont pour but l'évacuation, par voie hydraulique, des matériaux déposés à l'amont des ouvrages (grilles, organes d'exploitation et/ou de sécurité) en automatique total ou avec une intervention manuelle minimale. Ces chasses assurent, en règle générale, l'évacuation des matériaux par le seul volume de la retenue ;

■ les chasses en période de hautes eaux, peuvent être définies comme un événement d'exploitation à caractère répétitif et/ou aléatoire (conditions de débit) consistant à abaisser la retenue pour faire transiter vers l'aval les dépôts. Ces chasses utilisent la période de hautes eaux pour faire transiter les sédiments afin de limiter l'engravement excessif des retenues pouvant menacer le bon fonctionnement des ouvrages (prises usinières, évacuateur de crues, vidanges de fond), et préserver la capacité des retenues. Dans certains cas, elles permettent aussi de réduire le risque d'inondation en queue de retenue.

Ces opérations sont conditionnées par un abaissement du plan d'eau relativement rapide provoquant soit un arrachement dynamique des sédiments déposés avec une dilution importante, soit un transit des matières en suspension (MES) au droit du barrage (évacuation des flux sédimentaires entrants), soit un courant de densité en fond de retenue. Cet abaissement rapide et la nécessité de revenir en exploitation normale en quelques heures après la chasse impose un ratio volume vidangeable sur débit moyen assez faible (de l'ordre de 24 heures) ainsi qu'une forte capacité d'évacuation par les vannes de fond. Ces opérations sont donc plus particulièrement **adaptées aux retenues de faible temps de séjour**. Dans le cas où un ou plusieurs aménagements sont situés dans la zone d'influence d'un ouvrage amont faisant l'objet de chasses et afin de limiter les phénomènes de redépôt dans les retenues aval, il est possible de réaliser des chasses en série (Poirel, 2001).

3- Les transparences

Afin de rétablir le transport solide des rivières, le premier SDAGE Adour-Garonne recommande que soit mise en place au droit des barrages EDF, là où cela est techniquement possible, une gestion par « transparence » (Cavitte et Maurel, 2003). Les « transparences » consistent à abaisser le plan d'eau d'une retenue en période de crue afin de laisser transiter les sédiments par les vannes de fond et rétablir le transport solide en aval. L'ouvrage devient alors « transparent » par rapport au débit solide. Une « transparence » n'est pas une vidange mais se rapproche techniquement du concept de **chasse**.

Rapport du groupe de travail Petite hydroélectricité et environnement (Ministère chargé de l'écologie, D4E, 2002) - extraits -

Au plan réglementaire, chasses et vidanges ne sont pas jusqu'à ce jour considérées de façon identique. Les vidanges de barrage doivent faire l'objet d'une autorisation loi sur l'eau, accordée après enquête publique, valable 2 ans pour les barrages de plus de 10 m de hauteur ou 5 millions de m³ et 30 ans pour les autres barrages. Les chasses ou vidanges en période de crue, en vertu des circulaires interministérielles des 9 novembre 1993 et 6 mars 1996 ne sont pas considérées comme des vidanges et doivent seulement être autorisées par arrêté préfectoral après consultation des services de l'Etat et avis du conseil départemental d'hygiène mais sans enquête publique.

Cette interprétation de la notion de chasse fait actuellement l'objet de contentieux. De façon générale, il apparaît que la notion même de vidange n'est pas clairement définie. Dans tous les cas, lorsque l'arrêté préfectoral d'autorisation prévoit les conditions de vidange ou de chasse, le règlement d'eau des usines hydroélectriques vaut autorisation pour l'ensemble de ces opérations. Dans le cas contraire, un arrêté complémentaire après avis du conseil départemental d'hygiène et le cas échéant après enquête publique, approuvant le mode opératoire (fréquence, durée et intensité de la chasse...) doit être pris. Pour les autorisations nouvelles, les procédures de chasse et de vidange doivent être décrites dans le document d'incidences et consignées ou annexées au règlement d'eau.

4- Les principaux impacts des chasses et transparence

La plupart des opérations de « chasse » réalisées par les gestionnaires de barrages ont pour objectif (et pour résultats) d'évacuer principalement les sédiments fins. Or la continuité du transit sédimentaire visée par la nouvelle réglementation (DCE et LEMA) vise surtout le transport de la charge de fond, élément essentiel du bon fonctionnement hydromorphologique et écologique des cours d'eau. C'est donc cette charge là dont il s'agit d'assurer la continuité, et ce, dans de bonnes conditions.

Les effets des chasses de sédiments fins étant relativement bien connus (colmatage des substrats et parfois atteinte de conditions létales pour les poissons), nous nous attacherons ici à décrire essentiellement les impacts d'opérations visant principalement à assurer la continuité de la charge de fond.

Le suivi d'opérations de chasses (transparences) réalisées ces dernières années montre en effet un certain nombre de problèmes :

- redépôt rapide et brutal des alluvions évacuées et homogénéité des faciès ainsi créés ;
- colmatage par les sables.

5- Les mesures réductrices

Les mesures susceptibles de réduire l'impact des opérations de chasse et transparences concernent essentiellement leurs modalités de réalisation. Nous présentons ci-après quelques propositions qui mériteraient des opérations pilotes et un suivi scientifique rigoureux pour évaluer leur faisabilité et leur efficacité :

- un des facteurs clef 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**. En effet, l'un des principaux impacts constatés est le redépôt brutal et massif des alluvions sur une très courte distance en aval de l'ouvrage. Le maintien de l'ouverture des vannes pendant toute la durée de la crue et de la décrue devrait permettre de mieux répartir les sédiments sur le tronçon aval.

NB Les règlements actuels de chasse 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 matériaux fins.

- 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 + surdébit lié à la vidange concomitante du plan d'eau). C'est donc bien au moment de la conception de l'ouvrage que doit être prise en compte la gestion du transport sédimentaire.

■ Préconisations générales pour la gestion des seuils

Les seuils en rivières ont une influence importante sur le transport solide de fond, même si une relative « transparence » de l'ouvrage peut être atteinte au bout de quelques années ou décennies (en fonction des apports amont). L'effet bloquant des ouvrages est dû non au volume de la retenue (sauf sur les cours d'eau à faible puissance et à faible transport solide) mais au blocage des alluvions sur un point de contrôle aval, le seuil, et à l'exhaussement régressif qui s'ensuit. Le « remous solide » qui se crée en amont peut atteindre des longueurs, donc des volumes significatifs.

Trois familles de solutions se dessinent :

- destruction de l'ouvrage par **dérasement** (destruction totale appelée aussi « **effacement** »), ou simple **arusement** (destruction partielle par abaissement 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 toutes les fonctionnalités du cours d'eau, y compris la continuité sédimentaire ;
- transfert des matériaux de l'amont vers l'aval du seuil ;
- acceptation du piégeage et recherche de solutions alternatives en aval (espace de mobilité).

Les avantages et inconvénients de ces méthodes sont décrits au paragraphe concernant les barrages.

Il faut toutefois insister sur le fait que, contrairement aux barrages, sur lesquels ce type d'opération ne sera

qu'anecdotique, l'arasement (destruction partielle) ou le dérèglement des seuils peut devenir une solution mise en œuvre en routine dans les prochaines décennies (elle est inscrite dans certains SDAGE).

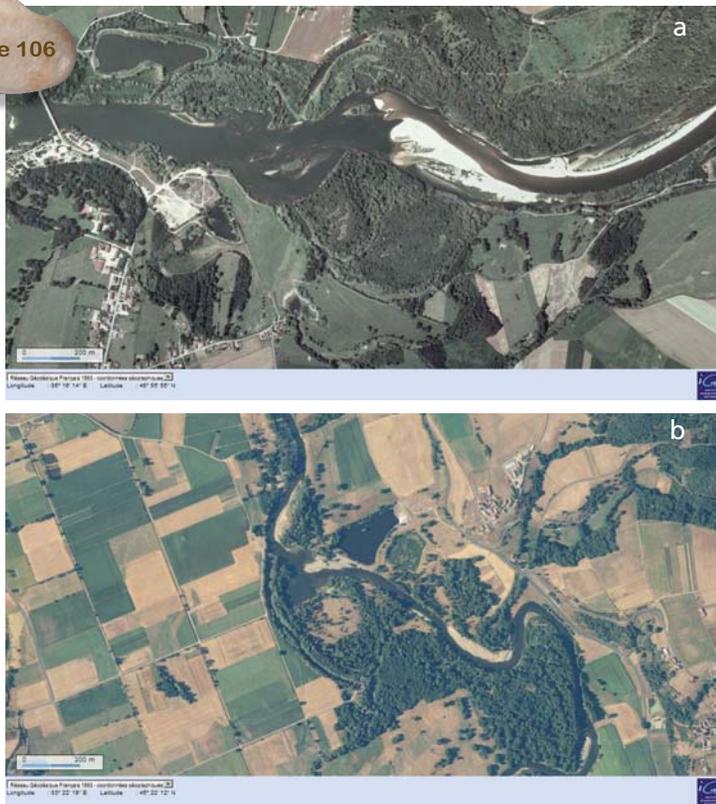
Il est donc important de développer une méthodologie permettant :

- de réaliser un Etat initial correct, identifiant clairement les dysfonctionnements induits selon des échelles emboîtées : celle de l'ouvrage concerné, celle du tronçon homogène et celle du bassin versant ;
- d'identifier les désordres éventuels que pourrait engendrer le dérèglement :
 - ⇒ longueur du remous solide et usages implantés sur la cote de ce remous,
 - ⇒ risques de dégradation et solutions éventuelles de limitation de ces risques (rampes sous-fluviales, stabilisation préventive de berges menacées, etc.),
 - ⇒ risques de sur-alluvionnement en aval, enjeux éventuellement concernés et mesures de réduction.

Extractions lit mineur/lit majeur

Les anciennes extractions en lit mineur et certaines extractions en lit majeur sont (ou peuvent devenir) des zones de piégeage importantes de la charge de fond en transit (Figure 106).

Figure 106



a- b- Fond Géoportail ©IGN 2011

Exemple de piégeage de la charge de fond (a) dans une ancienne fosse d'extraction en lit mineur et (b) dans une ancienne fosse d'extraction en lit majeur ayant capturé le cours d'eau.

■ Extractions en lit mineur

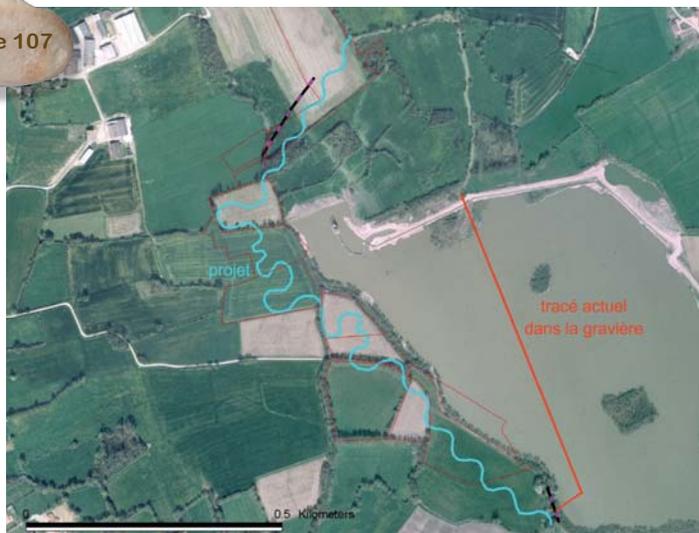
Pour les anciennes fosses d'extraction de grand volume, il n'existe que peu de solutions :

- attendre le remplissage et la transparence de la fosse ;
- réduire la sur-largeur au moyen de techniques de restauration de type épis ou déflecteurs etc. ;
- court-circuiter la fosse en créant un nouveau cours d'eau comme par exemple la réalisation en cours sur la Veyle, (Malavoi et Epteau (2003), Malavoi et Biotec (2005), Figure 107.

Les mêmes préconisations peuvent être proposées pour les gravières en lit majeur ayant déjà capturé le cours d'eau.



Figure 107



Création d'un nouveau cours d'eau de 2 km en dehors d'une exploitation de granulats (la Veyle, Malavoi, Epteau, 2003, Malavoi, Biotec, 2005).

■ Gravières en lit majeur

Pour les gravières en lit majeur, souvent à l'origine de captures des cours d'eau adjacents (Figure 108), deux orientations de gestion peuvent être proposées, en dehors de la nécessité de **ne plus autoriser leur création dans les espaces de mobilité potentielle des cours d'eau à dynamique active**.

■ acception de la capture :

- ⇒ si les gravières sont de faible volume et engendrent un risque de volume sédimentaire piégeable inférieur à 2 ans d'apports solides,
- ⇒ et si, au delà de la gravière, des potentialités de recharge alluviale par érosion latérale en lit majeur existent ;

■ protection maximale contre le risque de capture sur les gravières de fort volume (volume piégeable supérieur à 2-3 ans d'apports) présentant un risque de capture important (notamment dans les convexités de méandres). Nécessité de mettre en œuvre des protections de berges solides en amont de la gravière, avec éventuellement un déversoir calé à une cote très supérieure à celle du fond du cours d'eau en amont (pour éviter le transit sédimentaire).

148

Figure 108



Deux exemples de gravières en lit majeur susceptibles de capturer le cours d'eau. (a) gravières de petit volume avec de fortes potentialités de recharge alluviale au delà (on peut laisser la capture se faire et définir un espace de mobilité) (b) gravière de volume important et sans possibilité de recharge alluviale. Il faut protéger contre le risque de capture.



Éléments d'aide à l'élaboration d'un plan de gestion du transport solide

149

150 ■ Concepts

153 ■ Étapes de mise en œuvre

Concepts

Les concepts et principes méthodologiques présentés dans ce chapitre peuvent, entre autres, être appliqués à la mise en œuvre d'un plan de gestion au titre du L215-15 Code de l'environnement (CE) et c'est cette approche qui sera particulièrement développée.

Il ne s'agit en aucun cas d'obligations mais de **simples préconisations**.

Niveau d'étude et d'action : l'unité hydrographique cohérente

■ Contexte de la phrase dans le L 215-15 CE

« I.-Les opérations groupées d'entretien régulier d'un cours d'eau, canal ou plan d'eau et celles qu'imposent en montagne la sécurisation des torrents sont menées dans le cadre d'un plan de gestion établi à l'échelle d'une **unité hydrographique cohérente** ».

■ Qu'est ce qu'une unité hydrographique cohérente (UHC) ?

Il est très difficile de définir de manière générale l'emprise spatiale cohérente pour établir un plan de gestion d'entretien régulier de l'ensemble des cours d'eau français. Le législateur a essentiellement voulu exprimer, par cette notion d'unité hydrographique cohérente (**UHC**), le fait que la prise en charge collective de la gestion d'un cours d'eau n'a de sens que si le linéaire concerné permet une étude pertinente du fonctionnement du cours d'eau et de ses éventuels dysfonctionnements et de leurs causes, permettant de déterminer les interventions adéquates.

Le législateur a donc souhaité **empêcher toute gestion localisée** sans vision globale du fonctionnement du cours d'eau.

L'évaluation par l'administration du respect de cette obligation d'échelle hydrographique cohérente doit se faire de manière pragmatique en tenant compte des différentes unités de cohérence possibles exposées ci-dessous, de la liberté des collectivités territoriales de se regrouper ou non et de l'intérêt de la prise en charge collective de l'entretien d'un cours d'eau même si le niveau de l'unité hydrographique prise en charge n'est pas la plus grande.

Quelques exemples de « bonnes » échelles spatiales sont présentés ci-dessous :

■ **l'unité hydrographique cohérente** pour un **cours d'eau de montagne** déficitaire en charge de fond sous l'effet combiné des boisements RTM, des seuils de stabilisation torrentielle, des extractions de granulats, des barrages hydroélectriques sera l'ensemble de son bassin versant et de son réseau hydrographique ;

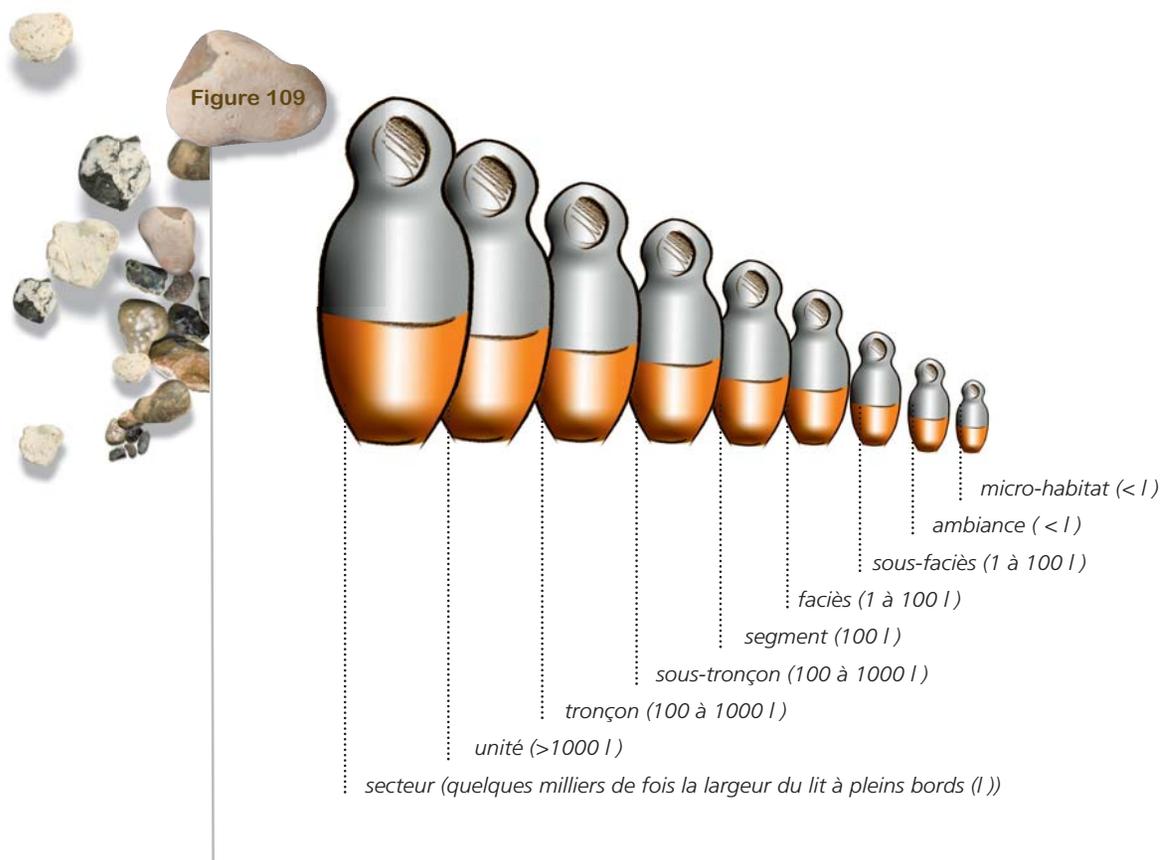
■ **l'unité hydrographique cohérente** pour un **cours d'eau de plaine** à faible charge solide pourra être un tronçon géomorphologique homogène (quelques kilomètres) ou une succession de tronçons dans une **unité** (au sens typologique présenté au paragraphe ci-dessous) géomorphologique homogène (quelques dizaines de kilomètres), comprenant éventuellement les affluents qui s'y jettent.

Il semble donc nécessaire de définir au cas par cas ces **unités hydrographiques cohérentes**.

Attention. *A minima*, cette unité hydrographique cohérente devrait consister en une succession de tronçons géomorphologiques homogènes situés dans la même unité géomorphologique homogène correspondant sensiblement à la même hydroécocorégion de niveau II (HER2). Dans l'idéal, pour des cours d'eau de taille moyenne (quelques dizaines à une centaine de km), l'ensemble du cours d'eau devrait être analysé.

■ Les entités de sectorisation des cours d'eau

Nous distinguons habituellement **neuf entités emboîtées** (Malavoi et Area, 2000) présentant, chacune à leur échelle, une homogénéité des processus géomorphologiques et des processus écologiques qui leurs sont corrélés (Figure 109).



L'emboîtement des entités hydromorphologiques au sein d'un bassin hydrographique.

NB : Sur les petits cours d'eau (rang inférieur à 3), le niveau d'emboîtement commence généralement au tronçon (Malavoi et Area, 2000).

Un **tronçon géomorphologique homogène** présente des caractéristiques homogènes de :

- largeur du fond de vallée ;
- pente de la vallée ;
- rang hydrographique de Strahler.

Tel qu'identifié par les critères exposés ci-dessus, un tronçon géomorphologique homogène doit donc en théorie, selon les lois de l'hydromorphologie fluviale, présenter des caractéristiques hydromorphologiques homogènes : géométrie (largeur, profondeur), pente (profil en long), style fluvial, séquence de faciès etc.

NB Le découpage de 225 000 km de cours d'eau français en tronçons homogènes a été réalisé par le Cemagref en 2008 (Valette *et al.*, 2008) sur la base des trois paramètres de contrôle présentés ci-dessus et est disponible sous forme de couche SIG.

Principes généraux de gestion envisagés

Il est largement admis par la communauté technique et scientifique que, l'enlèvement définitif des alluvions grossières d'une rivière, tel qu'il se pratiquait dans le cadre des extractions commerciales du passé, ou tel qu'il se pratique encore à l'occasion de certains curages « intensifs » du lit mineur, est néfaste au bon fonctionnement du cours d'eau et de ses annexes, tant du point de vue hydromorphologique, qu'hydraulique, hydrogéologique ou écologique.

Il est clair cependant que l'**excédent** ou plutôt le **dépôt temporaire** d'alluvions grossières en transit au droit de certains secteurs à **enjeux socio-économiques forts** (zones urbanisées notamment), peut engendrer ponctuellement des problèmes importants (inondations, érosions).

Il est avéré aussi que le **déficit** (souvent durable, voire définitif) d'alluvions grossières dans le lit mineur d'un cours d'eau, se traduisant généralement par une **incision** plus ou moins étendue du lit mineur, a souvent des conséquences très négatives sur d'**autres enjeux importants** : affaissement du toit de la nappe phréatique d'accompagnement et risque de ne **pas satisfaire les divers besoins en eau** de certaines communes (alimentation des populations, des industries et des réseaux d'irrigation), **déchaussements d'ouvrages de génie civil** (seuils, ponts, murs de soutènement et protections de berges, digues, etc.) coûteux à reconstruire, restaurer ou protéger, **assèchement des annexes hydrauliques et des milieux naturels humides** du lit majeur.

La méthodologie proposée pour établir un plan de gestion des alluvions à l'échelle d'une unité hydrographique cohérente repose donc sur **quatre axes principaux** :

- proposer des méthodes pour identifier les secteurs du cours d'eau où certains types d'enjeux socio-économiques sont menacés ou perturbés par les processus de transport solide, notamment par le **stockage temporaire** des alluvions sous forme de bancs en dynamique d'exhaussement, pouvant localement aggraver les risques d'inondation voire d'érosion latérale ;
- proposer des méthodes pour identifier les secteurs du cours d'eau où d'autres types d'enjeux sont menacés par le **déficit d'apports solides** (et l'incision du lit qui lui est généralement corrélée), qu'il sera alors parfois nécessaire de restaurer ;
- proposer des approches permettant de confronter pertinemment ces deux grandes familles d'enjeux, aux principes de gestion parfois contradictoires vis à vis du transport solide ;
- préconiser des modes de gestion du « transport solide » préservant au maximum les milieux aquatiques et rivulaires, dans l'esprit de la mise en œuvre de la DCE et des SDAGE :
 - ⇒ en limitant les opérations de gestion des sédiments (curages, arasement, régalaage, etc.) à des secteurs clés,
 - ⇒ en limitant les volumes prélevés et les surfaces touchées,
 - ⇒ en évitant d'intervenir sur des habitats aquatiques importants du point de vue fonctionnel (frayères par exemple),
 - ⇒ en réinjectant autant que possible les alluvions prélevées en d'autres points du cours d'eau où leur présence et leur transit ne présentera pas d'impact négatif majeur, voire améliorera le fonctionnement,
 - ⇒ en restaurant le transport solide lorsque son déficit avéré génère des dysfonctionnements pour certains enjeux.

Étapes de mise en œuvre

Le cas général présenté ici est celui des rivières à chenal unique et à charge alluviale modérée permettant d'identifier des bancs **individuels**. Le cas des rivières en tresses ou à très forte charge alluviale sur lesquelles il n'est souvent pas possible d'isoler les bancs individuels, sera traité séparément pour certains aspects.

Diagnostic global du fonctionnement hydrosédimentaire

■ Les apports solides

Identification des apports solides externes (primaires et secondaires)

Cette identification peut se faire en deux phases :

■ apports primaires

⇒ localisation des zones d'apports (cônes torrentiels, tabliers d'éboulis, etc.) potentiellement érodables par le cours d'eau principal et ses affluents (c'est à dire inclus dans la zone de mobilité actuelle du cours d'eau),

⇒ évaluation des volumes injectés annuellement et de leur granulométrie moyenne ;

■ apports secondaires via les affluents. Evaluation des apports moyens annuels des affluents et de leur granulométrie au droit des confluences avec le cours d'eau principal.

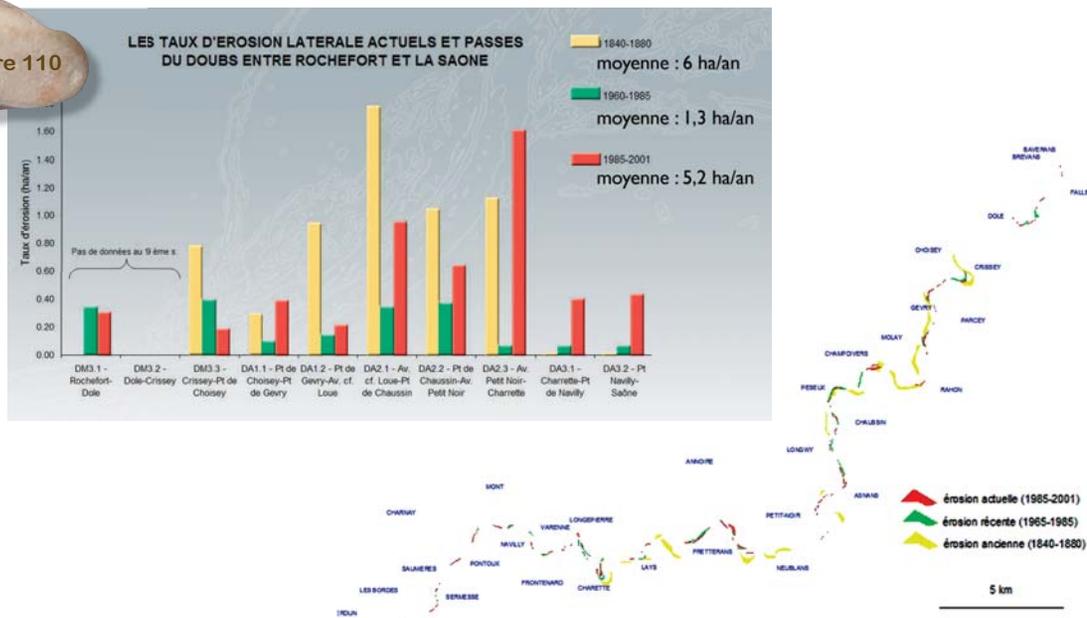
Identification des apports solides internes

1- Zones d'érosion latérale actuelles et potentielles et volumes injectés ou injectables

Approche quantitative

On peut détecter les zones d'érosion latérale, récentes ou plus anciennes, par analyse diachronique (comparaison de cartes, de photographies aériennes, de données topobathymétriques), Figure 110.

Figure 110

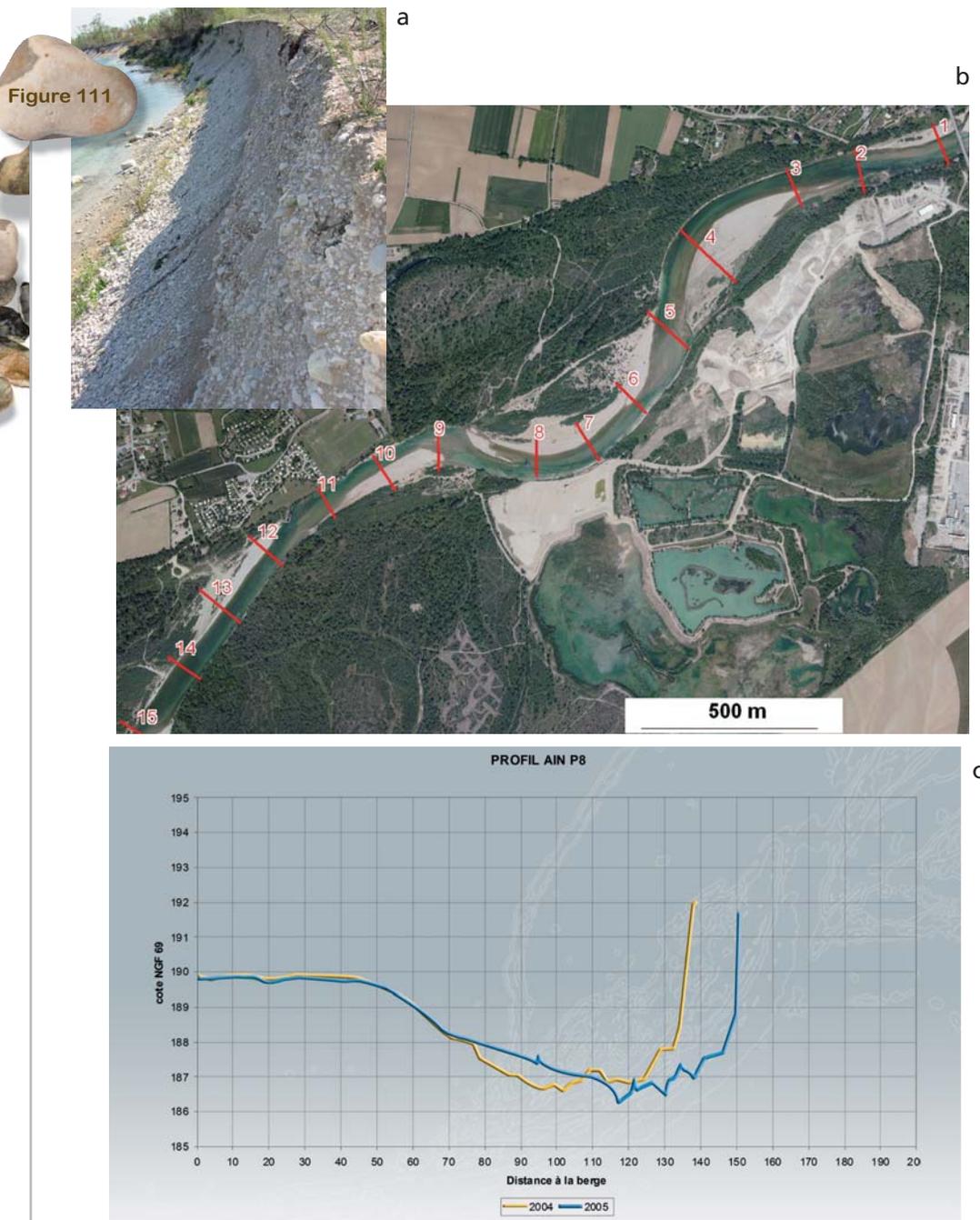


Superficies érodées le long du Doubs aval. Résultat de l'analyse diachronique de divers documents (cartes, photographies aériennes) numérisés. On obtient ensuite des taux d'érosion annuels, qui peuvent être moyennés par tronçon homogène par exemple (histogramme) (Malavoi, 2004).

Cette méthode, permet d'obtenir des superficies érodées annuellement. Il suffit alors de mesurer sur le terrain les hauteurs moyennes des berges concernées pour obtenir une estimation des volumes érodés et de la charge ainsi fournie au cours d'eau. Une analyse de la stratification des berges permet ensuite d'évaluer la part de ce volume qui constituera réellement le « charriage » et celle qui constituera plutôt la suspension.

Pour obtenir une meilleure évaluation des volumes en jeu, des données topographiques peuvent être très utiles. Ainsi, ci-dessous les volumes injectés dans la rivière d'Ain entre 2004 et 2005 par l'érosion de la concavité située au droit des profils 5 à 8 ont été évalués à : 600 m (longueur de la zone érodée) x 12 m (recul moyen de la berge) x 5 m (hauteur de la berge par rapport au fond du talweg) = **36 000 m³** (Figure 111).

La granulométrie de la berge permet d'estimer que plus de 50 % de ce volume est d'une granulométrie supérieure au sable et donc susceptible de participer à la **charge de fond**.



a © tous droits réservés
b- Fond BD ORTHO © 2002. © IGN 2011

Mesures topographiques au droit d'une sinuosité active de l'Ain, permettant de connaître précisément les volumes sédimentaires injectés (Malavoi, 2006). Le graphe (c) présente une coupe de la berge au droit des profils 6 à 8.

Mesures qualitatives

Sur les petites rivières sur lesquelles les mesures diachroniques sont difficiles à réaliser (tracé insuffisamment précis ou visible), ou dans le cadre d'études ne disposant pas de moyens financiers pour réaliser des mesures topographiques, une estimation sommaire basée sur les mêmes principes peut être réalisée : estimation des taux annuels d'érosion (enquêtes auprès des riverains, plantation de « piquets d'érosion » et relevement post-crue), mesures des hauteurs de berges, évaluation du pourcentage d'alluvions pouvant participer à la charge de fond.

2- Stock en lit mineur : localisation des masses alluviales dans le cours principal

Cette dernière étape d'évaluation des apports solides doit permettre de localiser de manière précise et quasi exhaustive, les zones de stockage des masses alluviales en transit. Ce travail doit être effectué sur l'ensemble du cours d'eau principal, les affluents productifs en charge solide ayant été décrits lors de l'étape précédente.

Attention. Outre l'aspect « diagnostic du fonctionnement hydrosédimentaire », cette étape de localisation des bancs est l'**outil essentiel du plan de gestion**.

A chaque banc seront en effet associées, dans une base de données sous SIG, de nombreuses informations sur leur volume, leur nature, les désordres éventuels générés, les enjeux concernés, etc.

Deux méthodes de prospection peuvent être proposées :

■ les macroformes (bancs) peuvent être identifiées à partir de la BD ortho® au pixel 0,5 m. Trois biais entachent cependant cette méthode d'une assez forte incertitude :

⇒ le débit lors des prises de vue de l'IGN qui, s'il est élevé, peut masquer la présence de bancs alluviaux et s'il est très bas peut exagérer leur densité. Il faudrait, dans l'absolu, réaliser cette étude pour un débit équivalent sur tous les cours d'eau (débit moyen mensuel sec interannuel par exemple),

⇒ la présence de végétation riveraine qui masque parfois tout ou partie du cours d'eau. La méthode fonctionne bien dans les régions où les ripisylves ont été supprimées... ce qui peut avoir des incidences sur le transport solide que l'on observe,

⇒ la présence de remous de seuils ou barrages, pouvant eux aussi masquer des bancs existants qui sont submergés (mais qui sont alors aussi en grande partie piégés) ;

■ les macroformes peuvent être localisées par prospection directe (à pied ou en bateau) :

⇒ l'inconvénient majeur est le temps nécessaire à une telle approche,

⇒ l'avantage est une meilleure quantification des volumes en jeu.

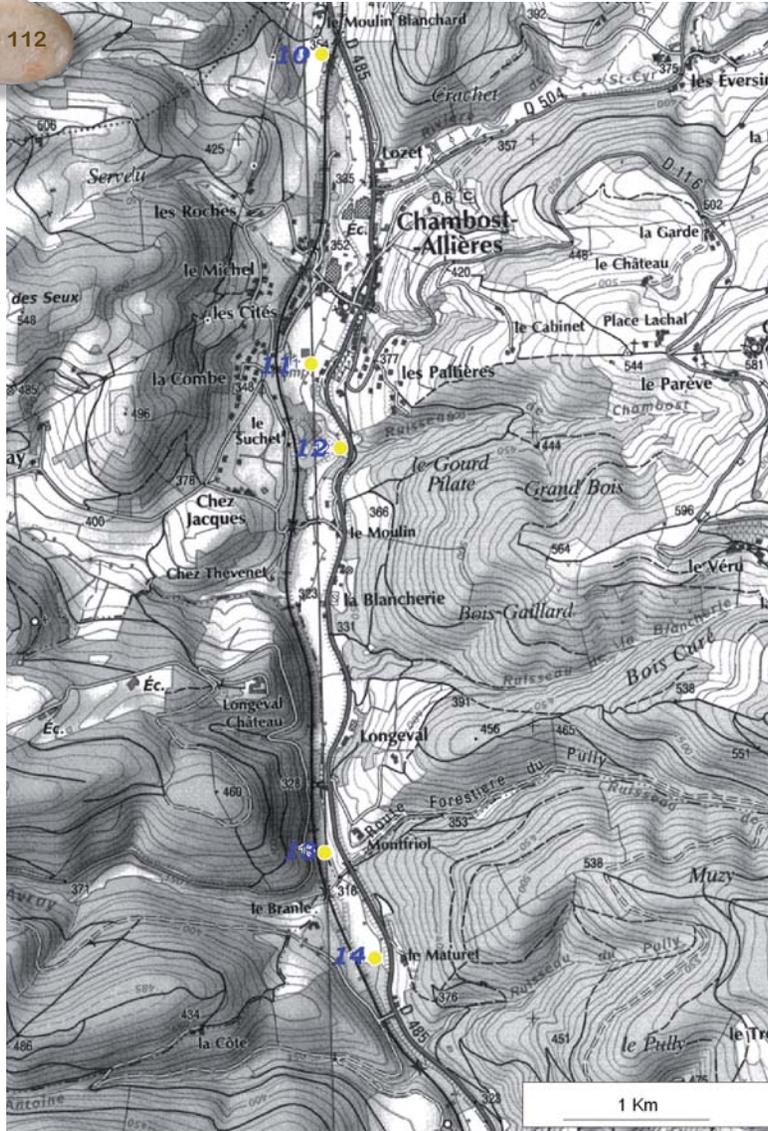
Les bancs doivent être géoréférencés sous SIG. Chacun doit être numéroté et être intégré à une base de données spatialisées où apparaissent notamment les volumes des bancs, les enjeux concernés et leur niveau hiérarchique (paragraphe suivant), la nature des risques (érosion, inondation, autre) et leur niveau d'aléa.

Deux niveaux de précision peuvent être utilisés, le premier, plus simple à mettre en œuvre, fournissant déjà une information :

- un point par macroforme alluviale. Prenons l'exemple sur l'Azergues (Figure 112).



Figure 112



a- fond IGN SCAN25 © IGN 2011
b- © J.R. Malavoi

156



a

b

Exemple de rendu de la localisation des masses alluviales stockées. 1 banc = 1 point. Chaque banc est numéroté (Malavoi, Gadiollet, 2008).

■ Digitalisation plus précise des masses alluviales. Cette approche plus fine permet de mieux quantifier les processus (superficies des macroformes). Prenons l'exemple sur l'Armançon (Figure 113).

Figure 113



Fond BD ORTHO © 2002. © IGN 2011

Exemple de digitalisation des bancs alluviaux (L'Armançon). Les chiffres en bleu sont les distances en Km par rapport à la confluence avec l'Yonne (Malavoi, 2006).

Une **évaluation même sommaire du volume de chaque banc** (épaisseur moyenne du banc par rapport au fond moyen x superficie) est un élément important de l'analyse et des préconisations futures. Elle permet notamment d'identifier les macroformes les plus importantes, susceptibles de générer localement ou suite à leur progression vers l'aval, des risques d'obstruction partielle du lit mineur avec les conséquences que cela peut avoir.

Synthèse des apports solides

L'approche quantitative permettant d'identifier les apports externes et internes peut être appréciée en fonction de la surface et du processus mais également en fonction du degré de connexion au cours d'eau ainsi qu'en fonction de la « productivité » de la forme (souvent liés au degré de végétalisation de la berge ou de la surface érodée) (Figure 114).

Figure 114

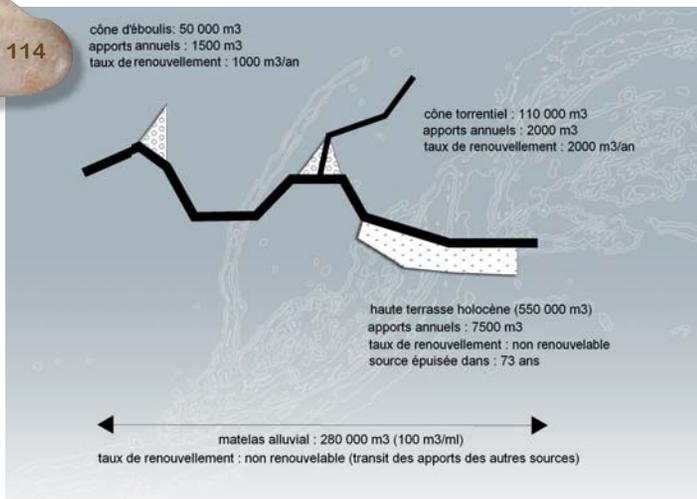


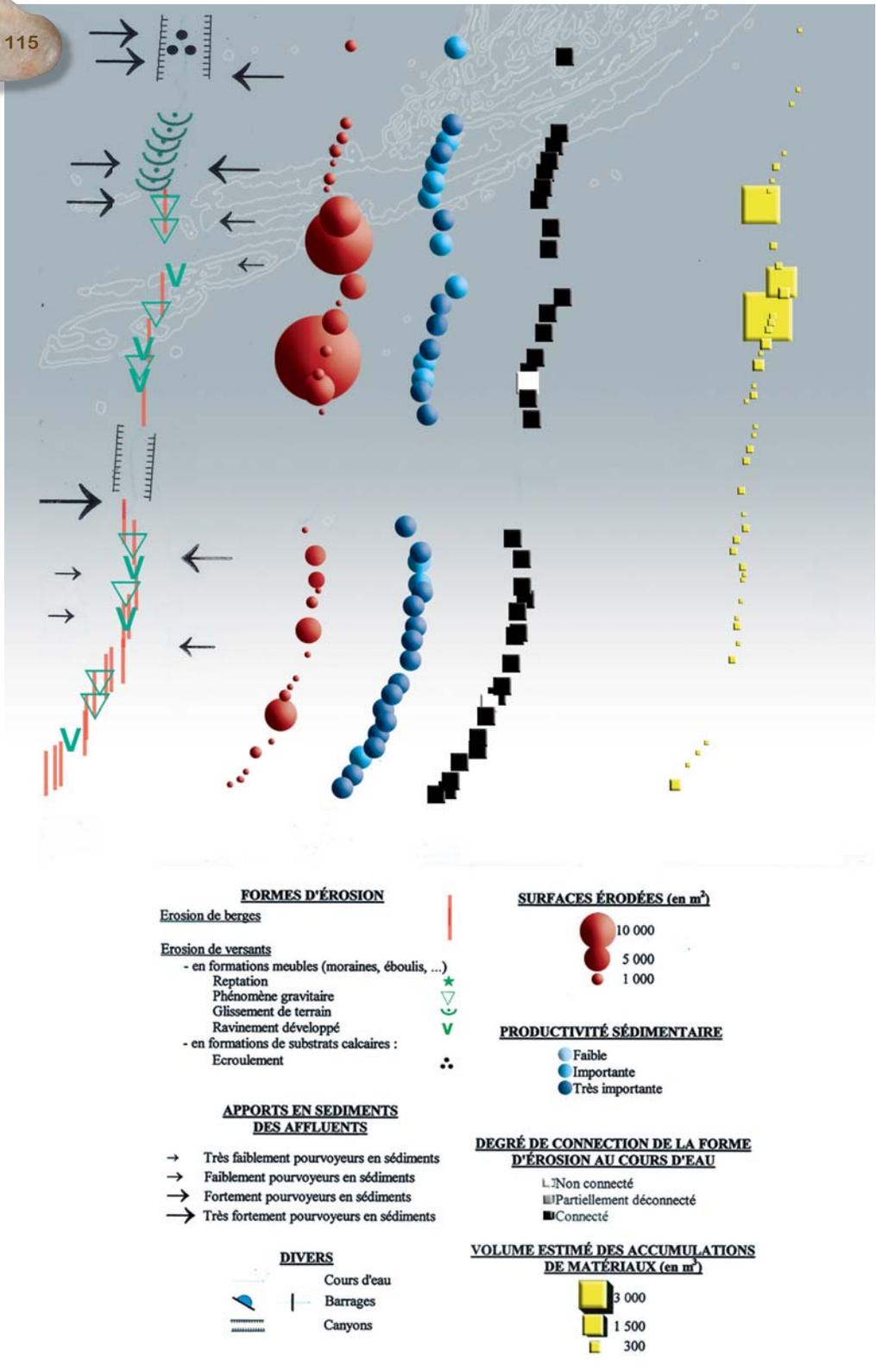
Schéma conceptuel d'évaluation des apports solides externes et internes à un tronçon de cours d'eau. Le stock en lit mineur est figuré de manière simplifiée (épaisseur du matelas alluvial traduite en volume).

Ce type de carte peut-être réalisé sous SIG afin d'établir des corrélations spatiales entre zones de production et transit de la charge.

Cette approche a été privilégiée lors de l'étude de certains cours d'eau alpins et pré-alpins comme la Bienne (Jura), le Chéran (Savoie), l'Albarine (Ain) ou encore le Bez (Drôme) (Figure 115).



Figure 115

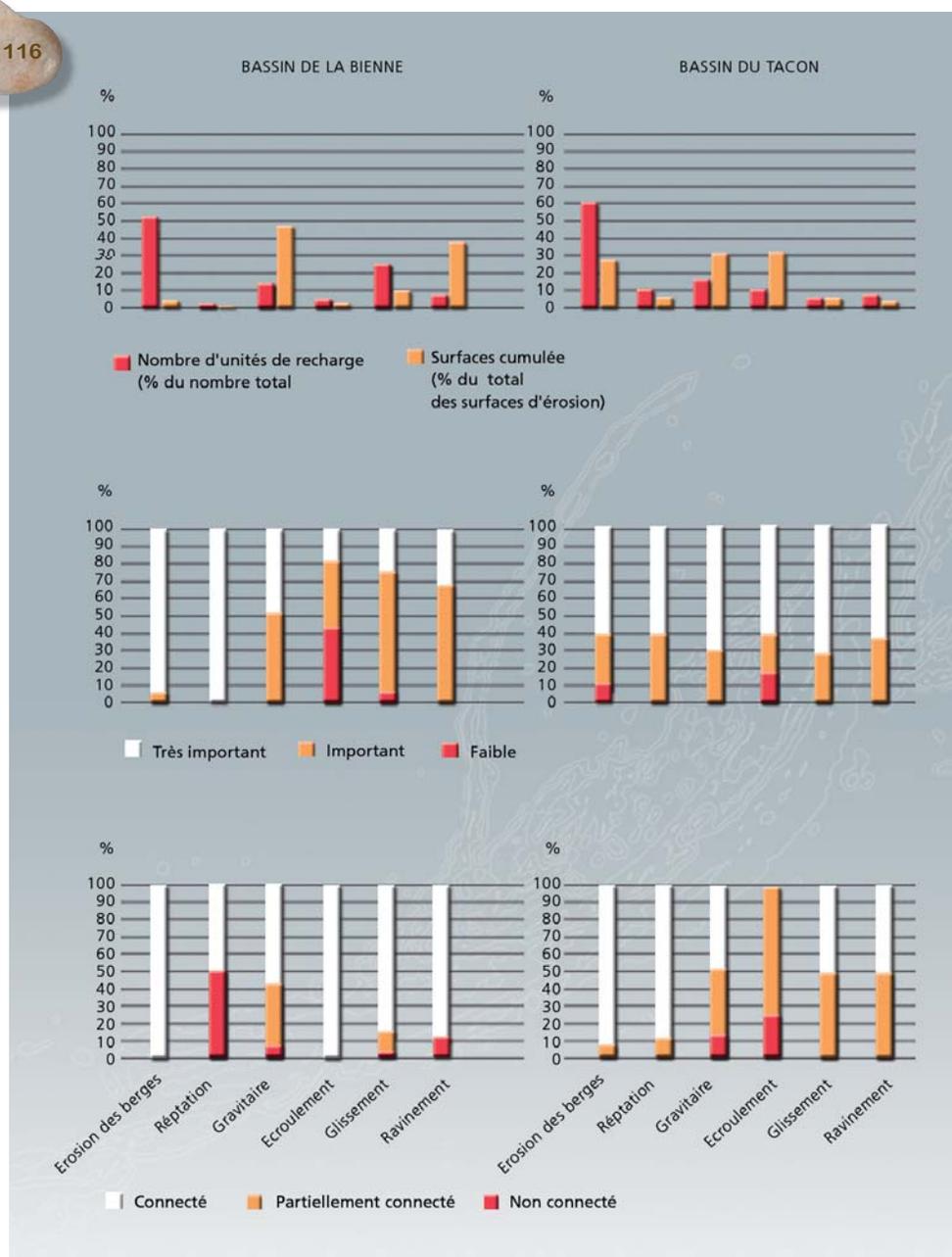


Exemple de cartographie établie lors d'un diagnostic hydro-géomorphologique dans le bassin de la Bienne, affluent jurassien de l'Ain, sur près de 150 km de cours d'eau comprenant le cours principal et ses affluents pérennes (Landon et al., 2000).

La principale difficulté rencontrée sur ces cours d'eau montagnards est le degré d'encaissement combiné parfois au degré de recouvrement par la canopée empêchant une mise en œuvre « efficace » d'approches par analyse d'images ou utilisation de la BD ORTHO®.

Dans ces cas la prospection de terrain reste le moyen le plus efficace pour collecter l'information. A raison de 3 à 6 km/jour de prospection, il est illusoire d'envisager d'utiliser cette méthode pour des bassins versants dépassant quelques centaines de km². Néanmoins, il peut-être utile de l'utiliser pour de grands bassins homogènes afin d'établir un diagnostic précis sur une partie du bassin extrapolable par la suite à l'ensemble. L'intérêt de ce type de démarche est qu'elle permet une approche fine de la dynamique de recharge sédimentaire. Ainsi, pour la Bienne, plusieurs bilans ont pu être établis par sous bassins et pour le bassin dans son ensemble, après détermination de la productivité des différents processus d'érosion (Figure 116).

Figure 116



Caractéristiques de la recharge sédimentaire de la Bienne et du Tacon, son affluent principal (Landon et al., 2000).



Bilan de la recharge sédimentaire du bassin de la Bienne en amont et en aval du barrage d'Etables (Saint-Claude – Jura) (extrait de Landon et al., 2000).

	Berges	Reptation	Gravitaire	Écroulement	Glissement	Ravinement	Affluents	Total
Production moyenne								
Tacon	14	0	1121	0	261	877	927	3200
Affluents du Tacon	7	5	769	0	75	673	533	2062
Evalude	3	0	126	0	3	168	240	539
Abîme	0	13	96	0	0	0	67	176
Affluents Bienne amont	3	0	44	0	3	0	707	757
Bienne amont	10	1	285	2	51	14	553	916
Total	37	20	2442	2	393	1732	3027	7651
Charge de fond	5	3	366	2	59	260	454	1149
Charge fine	31	17	2075	0	334	1473	2573	6502

Production à l'aval du barrage (en m³/an)

	Berges	Reptation	Gravitaire	Écroulement	Glissement	Ravinement	Total
Production moyenne	102	50	508	9	9	0	678
Charge de fond	15	8	76	9	1	0	109
Charge fine	871	43	432	0	8	0	569

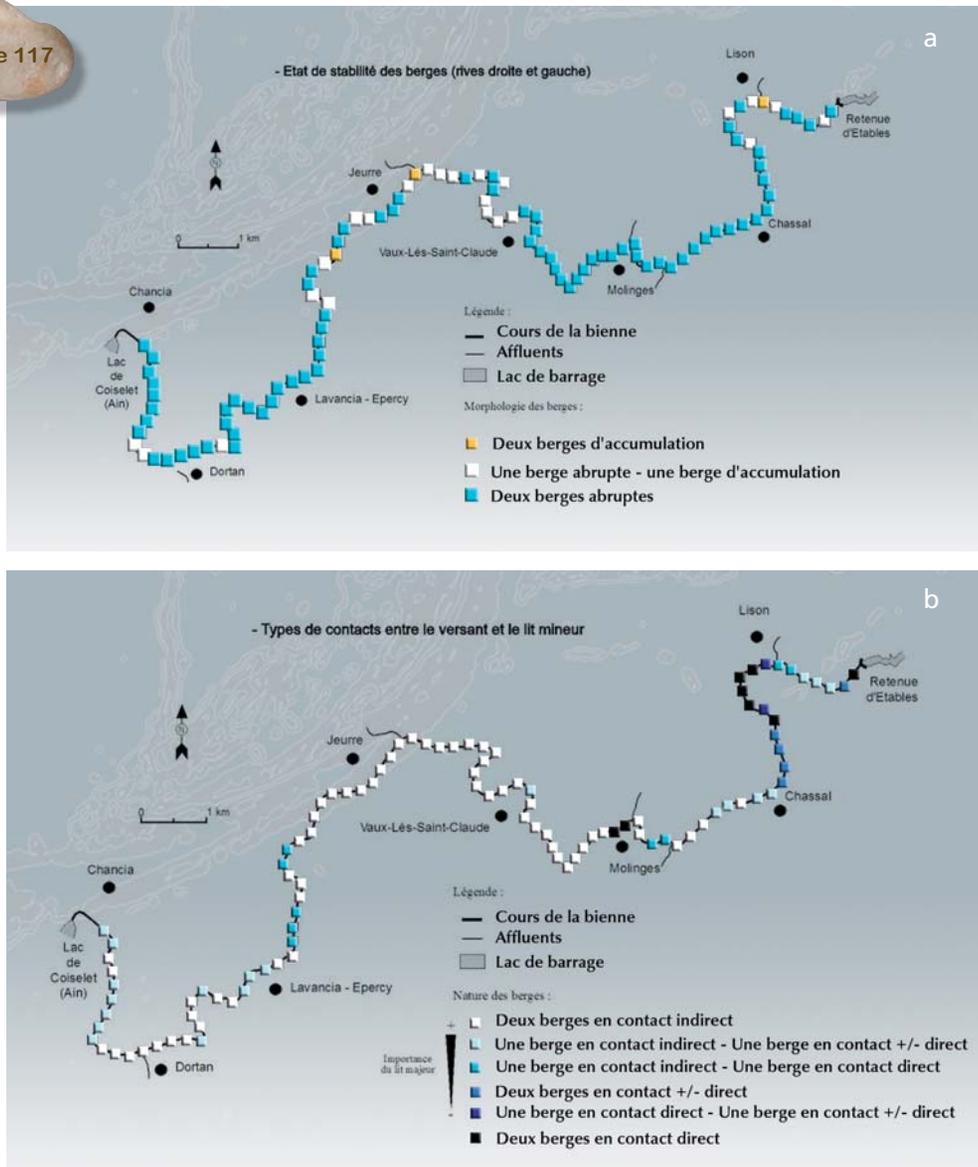
Par ailleurs pour les cours d'eau aux fonds de vallées plus larges, l'utilisation des images aériennes peut être complétée par l'analyse d'images obliques contiguës des berges et des versants réalisées par un photographe à partir d'un survol du cours d'eau.

Expérimentée sur l'Ain, la Drôme et l'Eygues, cette technique permet de gagner beaucoup de temps de terrain pour les bassins plus grands, de l'ordre de plusieurs milliers de km² (1 à 2 jours de vol pour 100 km de cours d'eau photographiés en rives droite et gauche. Il faut bien entendu ensuite exploiter les clichés...).

Le travail de cartographie étant plus délicat, il est alors possible de travailler par analyse synthétique par segment de 500 m ou par transect tous les 500 m.

Il peut être intéressant de descendre à un pas de 250 m si le cours d'eau n'excède pas quelques dizaines de kilomètres (Figure 117).

Figure 117



Exemples de cartographie synthétique par segment de 250 m sur la basse Bièvre (Landon et al., 1998).

■ Les dysfonctionnements hydrosédimentaires

Qualification et quantification des pressions/altérations

La base de données SYRAH (Onema/Cemagref) apporte un certain nombre d'informations sur les risques d'altération du transport solide à l'échelle d'un tronçon de rivière, voire d'une masse d'eau :

- barrages de haute chute ;
- seuils (mais tous les seuils, RTM notamment, ne sont pas renseignés) ;
- anciennes extractions en lit mineur (pour les plus importantes) ;
- extractions actuelles en lit majeur.

Elle peut être complétée par :

- localisation précise des sources d'altération qui n'existeraient pas dans SYRAH (seuils RTM, anciennes extractions non référencées, boisements RTM, etc.) ;
- volumes extraits par les carrières si l'information est disponible (voir auprès des services de l'Etat, Drire notamment (chiffres officiels à prendre comme fourchette basse)) ;
- volumes piégés derrière les ouvrages (nécessite des mesures topographiques) ;
- etc.

Identification des processus d'incision/exhaussement

Le texte qui suit est repris en partie de Malavoi et Bravard, 2010.

Les données topographiques sont un élément essentiel du diagnostic hydromorphologique pour identifier, voire quantifier, les processus d'incision ou d'exhaussement. Malheureusement, les données topographiques anciennes sont moins fréquentes, moins homogènes à l'échelle nationale et moins facilement disponibles que celles concernant le tracé en plan (cartes anciennes).

Si l'on trouve des données topographiques historiques (profils en long, en travers, semis de points), il est alors extrêmement intéressant d'en récolter de nouvelles afin de qualifier et éventuellement quantifier l'évolution topographique du cours d'eau, tant à l'échelle globale que locale.

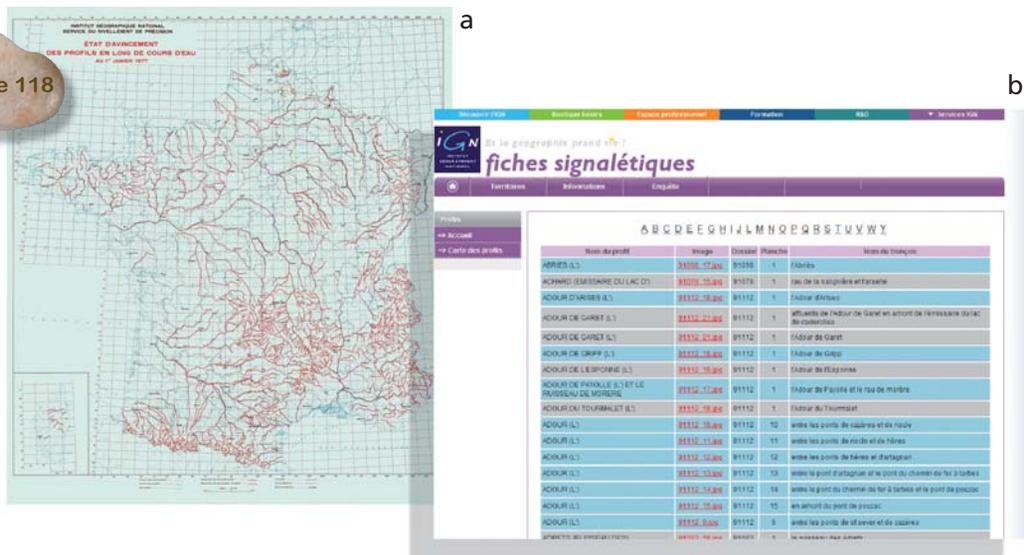
Attention. D'un point de vue pratique, notamment pour le maître d'ouvrage, il est important de toujours prévoir un budget topographique assez conséquent. L'idéal, qui est rarement atteint, notamment pour des raisons de procédure de marchés publics, est que la topographie soit découplée de l'étude hydromorphologique et que les besoins en topographie ne soient déterminés que lorsque l'étude est déjà assez avancée. Un marché adapté aux besoins est alors passé avec un prestataire géomètre.

1- Profils en long : les profils des grandes forces hydrauliques

Un levé du profil en long d'un certain nombre de cours d'eau a été réalisé initialement par le service du nivellement général de la France (futur IGN) pour le service des grandes forces hydrauliques. Les rivières étudiées sont en effet principalement celles qui pouvaient présenter un intérêt en termes de développement de l'hydroélectricité. On trouve la carte de France des cours d'eau levés et l'accès aux profils en long (Figure 118) sur le site de l'IGN (http://geodesie.ign.fr/fiches/index.php?module=e&action=e_profils).

162

Figure 118

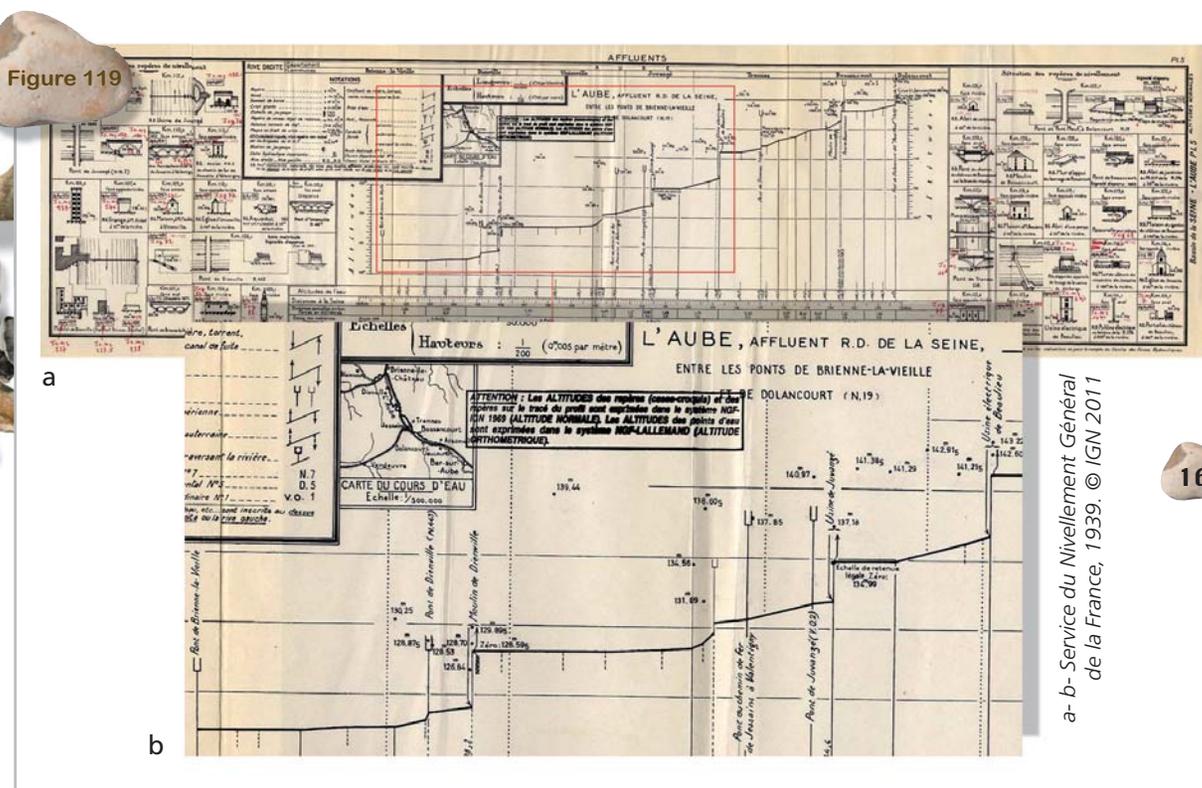


Carte des cours d'eau levés au 1/01/1977 et site d'accès aux fichiers de profils (profils au format jpg).

Les premiers profils datent sensiblement d'immédiatement avant la première guerre mondiale et les derniers de la fin des années 70.

L'inconvénient principal de ces profils est qu'il s'agit de **levés de la ligne d'eau** et non du fond. Par ailleurs, pour les profils les plus anciens, il est très difficile et souvent impossible de connaître le débit d'observation. Seule la date des relevés (3^e ligne en partant du bas sur la figure 119) peut permettre de savoir si l'on est plutôt en étiage ou en eaux moyennes. Néanmoins, notamment pour les cours d'eau de montagne, les levés ne pouvant se faire que par cheminement dans le lit des cours d'eau, la ligne d'eau levée est souvent proche de l'étiage. Il faut également noter que le service des Grandes Forces Hydrauliques était en charge du recensement du potentiel énergétique des cours d'eau à forte pente. Généralement, des études hydrologiques ont été menées conjointement aux levés topographiques. Il existe des fascicules accompagnant les profils. Ils sont cependant difficiles à trouver et non disponibles sur le site de l'IGN.

Outre le fait d'être, pour la plupart des cours d'eau français, le premier profil topographique levé et recalé dans un système de nivellement général (système Lallemand ou orthométrique précédent le système actuel IGN69), l'un des intérêts majeurs de ces documents est qu'ils permettent de connaître l'emplacement des seuils, leur cote de retenue et donc leur hauteur de chute, la longueur des remous liquides et l'usage de ces seuils (moulins, forges, papeteries etc.).



Exemple de profil en long. Vue générale et zoom (Attention cotes orthométriques).

Attention. Les cotes données sur ces profils sont généralement des cotes **NGF Lallemand Orthométriques** et non NGF IGN69 Normales. La correction des cotes orthométriques en cotes NGF69 se fait par **addition d'une valeur** de l'ordre de quelques cm (par exemple en région Aquitaine) à plusieurs dizaines de cm (Nord, plus de 60 cm).

$$Z \text{ NGF69} = Z \text{ Ortho} + \Delta Z$$

L'IGN fournit les valeurs correctives sur son site Internet, par carte au 1 : 50 000 (Figure 120). Sur l'exemple ci-dessus il faut ainsi ajouter 0,34 m (carte n°2917, Figure 120) aux cotes fournies sur le profil. La crête du seuil est donc à 128.54 NGF69 et non 128.2.

Figure 120

	60	60	61															
2103	2203	2303	2403	2503														
63	63	61	60	62														
2104	2204	2304	2404	2504														
64	62	62	60	60														
2105	2205	2305	2405	2505	2605													
64	61	59	58	58	59													
2106	2206	2306	2406	2506	2606	2706	2806											
61	59	58	58	57	57	59	60											
2007	2107	2207	2307	2407	2507	2607	2707	2807		3007								
50	54	54	58	60	58	56	57	58		45								
2008	2108	2208	2308	2408	2508	2608	2708	2808	2908	3008								
47	48	55	58	58	56	55	55	52	47	45								
2009	2109	2209	2309	2409	2509	2609	2709	2809	2909	3009	3109							
45	47	55	56	54	53	55	51	46	45	44	43							
2010	2110	2210	2310	2410	2510	2610	2710	2810	2910	3010	3110	3210	3310					
43	46	52	55	52	52	53	47	45	44	44	43	42	42					
2011	2111	2211	2311	2411	2511	2611	2711	2811	2911	3011	3111	3211	3311					
36	42	47	46	49	50	49	45	44	44	43	42	42	42					
2012	2112	2212	2312	2412	2512	2612	2712	2812	2912	3012	3112	3212	3312					
35	40	45	44	47	48	42	43	43	43	44	42	42	41					
2013	2113	2213	2313	2413	2513	2613	2713	2813	2913	3013	3113	3213	3313					
34	37	38	39	40	43	36	37	40	42	41	42	42	40					
2014	2114	2214	2314	2414	2514	2614	2714	2814	2914	3014	3114	3214	3314					
34	33	34	34	36	38	34	37	39	41	38	40	41	40					
2015	2115	2215	2315	2415	2515	2615	2715	2815	2915	3015	3115	3215	3315					
35	30	31	33	34	32	36	37	38	37	36	37	37	38					
2016	2116	2216	2316	2416	2516	2616	2716	2816	2916	3016	3116	3216	3316					
31	30	32	31	33	34	32	33	37	36	34	35	36	35					
2017	2117	2217	2317	2417	2517	2617	2717	2817	2917	3017	3117	3217	3317					
32	30	30	29	29	30	31	33	34	34	36	33	35	34					
2018	2118	2218	2318	2418	2518	2618	2718	2818	2918	3018	3118	3218	3318					
31	29	29	30	28	30	31	34	34	34	34	38	34	32					

© IGN 2011

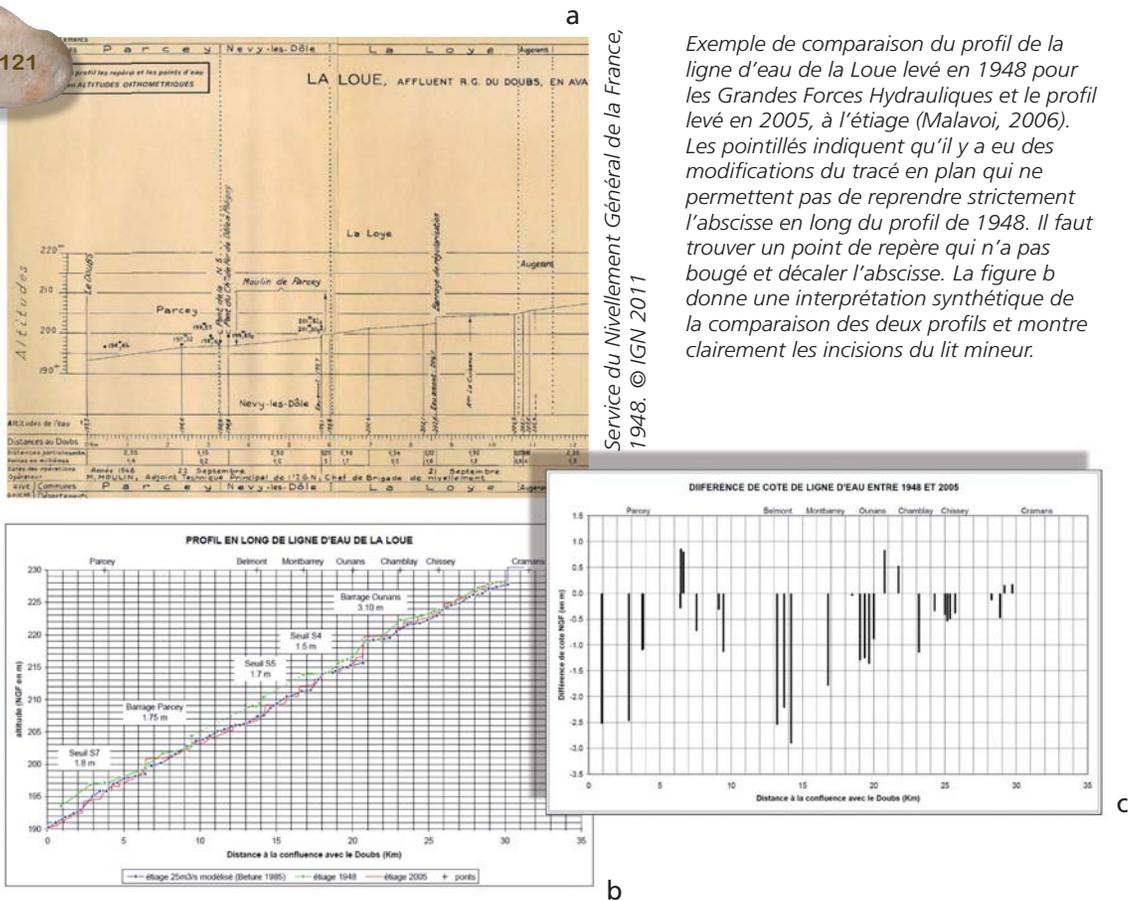
Exemple de tableau de correction des cotes orthométriques pour la zone Nord Picardie. On ajoute à la cote orthométrique la valeur donnée sous le numéro de carte (cm).

Malgré les imperfections de ces profils (uniquement les lignes d'eau et souvent méconnaissance du débit d'observation), il peut être intéressant de les utiliser comme références et de lever à nouveau un profil complet ou partiel du cours d'eau. Toutefois, les incertitudes sur les débits lors des levés initiaux se traduisent par une difficulté importante pour déterminer et surtout quantifier d'éventuelles incisions ou exhaussements, sauf lorsque les différences sont très fortes (plusieurs mètres).

On peut néanmoins commencer à distinguer un signal lorsque la différence est de l'ordre de 0,5 à 1 m. Attention aussi aux abscisses en long ou PK (Points Kilométriques) qui peuvent être une source d'erreur importante sur les cours d'eau mobiles (ou artificiellement rectifiés). Le rescindement ou le développement de méandres peut faire perdre ou gagner des centaines de mètres voire des kilomètres de linéaire.

Il faut donc contrôler, avant l'utilisation des données issues de profils levés à des dates différentes, la distance entre points parfaitement identifiables aux différentes dates (ouvrages d'art par exemple). En cas de distances différentes, il faut rechercher la cause. On peut par exemple utiliser les photographies aériennes de l'IGN dont les premières missions remontent, pour certains départements, aux années 1930, de manière à identifier les changements de tracé en plan du cours d'eau (Figure121).

Figure 121



Service du Nivellement Général de la France, 1948. © IGN 2011

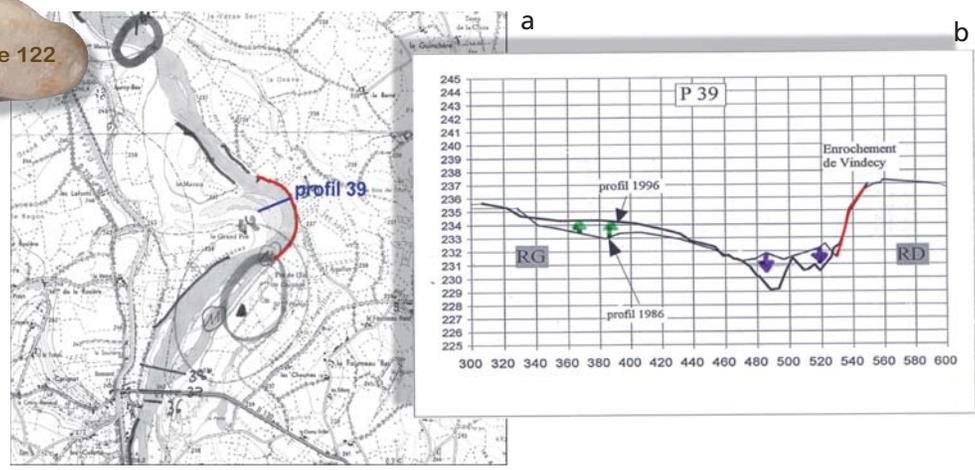
Exemple de comparaison du profil de la ligne d'eau de la Loue levé en 1948 pour les Grandes Forces Hydrauliques et le profil levé en 2005, à l'étiage (Malavoi, 2006). Les pointillés indiquent qu'il y a eu des modifications du tracé en plan qui ne permettent pas de reprendre strictement l'abscisse en long du profil de 1948. Il faut trouver un point de repère qui n'a pas bougé et décaler l'abscisse. La figure b donne une interprétation synthétique de la comparaison des deux profils et montre clairement les incisions du lit mineur.

2- Profils en travers

Contrairement aux autres documents tels que cartes et profils en long, il n'existe pas de levés de profils en travers à l'échelle nationale. On en trouve cependant sur la plupart des cours d'eau navigables, dont le lit (et son entretien) appartiennent à l'Etat (domaine public fluvial ou DPF) jusqu'au niveau du « plein bord » (*plenissimum flumen*). On les trouve dans les archives des services de l'Etat ou aux archives départementales s'ils sont antérieurs à 1940. La direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement de la région Centre fournit un accès à différents profils en long et en travers numérisés sur son site Internet. On peut aussi trouver des profils anciens de travaux ou d'avant-projets de travaux ou au droit d'extractions en lit mineur.

S'ils sont bien repérés sur carte, ces profils peuvent être levés à nouveau et permettre une interprétation précise de l'évolution verticale d'une portion de cours d'eau (Figure 122, Figure 123).

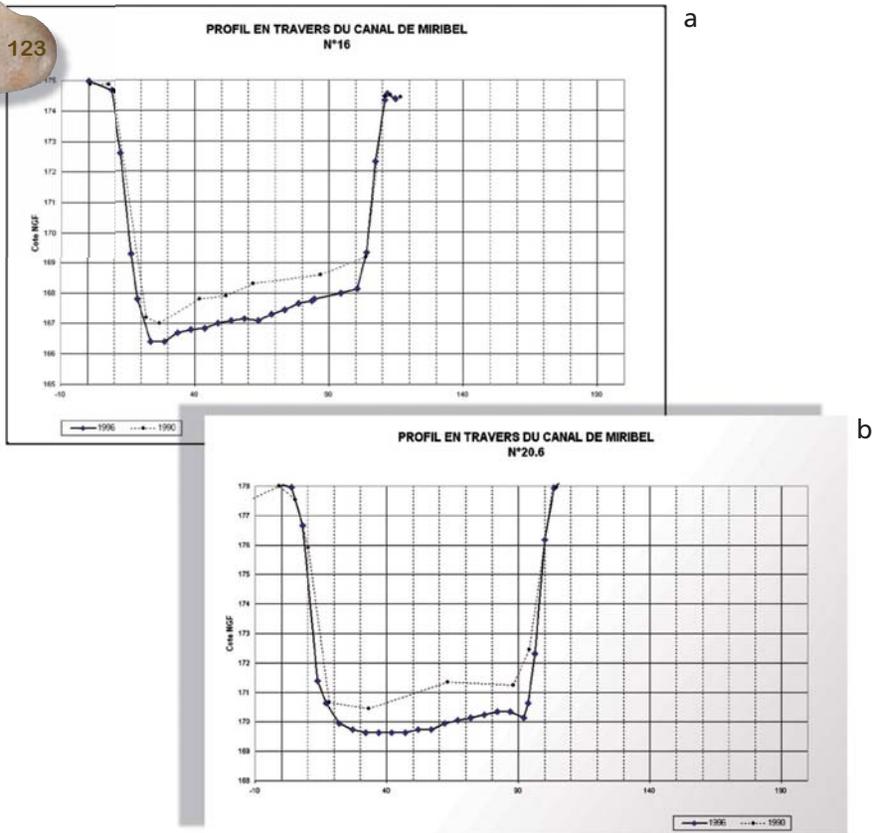
Figure 122



a- Fond SCAN 25®. © IGN 2010

Exemple de comparaison de profils en travers sur la Loire à 10 ans d'intervalle (Malavoi, 1996). On constate une incision localisée dans la concavité, liée en grande partie à la présence de l'enrochement

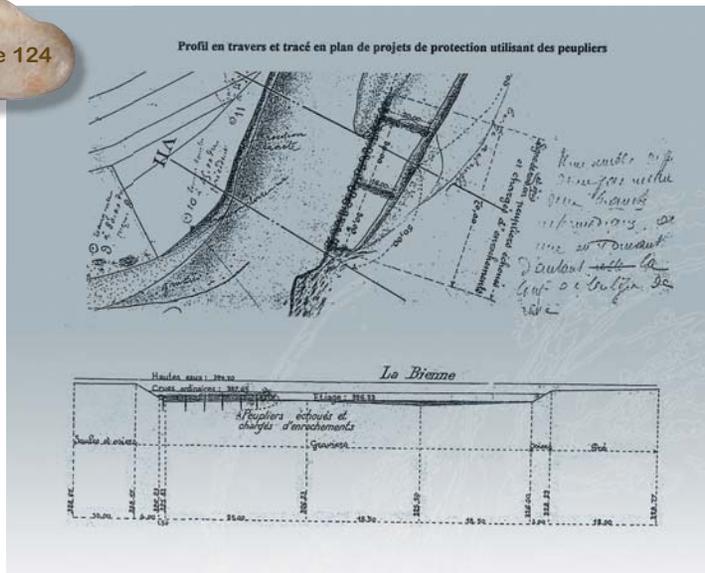
Figure 123



Exemple de comparaison de profils en travers sur le canal de Miribel (Malavoi, 2000). On observe une incision d'un mètre en 6 ans.

On notera enfin qu'il est possible de trouver des plans et profils anciens, notamment sur les grands cours d'eau ou sur certains petits cours ayant l'objet de travaux hydrauliques à des fins agricoles, de navigation ou encore de stabilisation par les services de restauration des terrains en montagne (RTM) ou par les compagnies ferroviaires (Figure 124). Il faut donc systématiquement consulter les archives départementales et/ou nationales voire celles de la SNCF.

Figure 124



© Archives de l'Ain

Plan et profils en travers d'ouvrages et de section du lit de la basse Bienne extraits d'un rapport des Eaux et Forêts de 1904 sur lesquels on retrouve des cotes altitudinales recalées dans le système orthométriques (dans Landon et al., 2000).

3- Observations de terrain

Analyse de la géométrie hydraulique

Un faible rapport largeur/profondeur (ratio l/p) à pleins bords (< 3 par exemple) peut faire suspecter une incision, même si ces valeurs existent naturellement dans certaines conditions (chenaux à lit unique et à berges très cohésives). Des mesures topographiques sommaires peuvent suffire mais nécessitent par contre une connaissance de la typologie du cours d'eau (quel est le l/p de référence).

Détection d'un pavage

Le pavage du lit (alluvions très grossières formant peu à peu une couche de surface non mobile et difficilement utilisable par la faune aquatique) peut être un indicateur intéressant d'incision. C'est souvent le cas en aval des grands barrages.

Le problème est qu'il n'existe pas de méthode normalisée permettant de détecter un « pavage ». Quelques indices peuvent cependant être proposés :

- indice granulométrique. Si le D50 de la couche d'armure (couche de surface) est d'une valeur 5 fois supérieure à celui de la sous-couche, on commence à suspecter un pavage ;
- indice hydraulique. Si le D50 de la couche d'armure dépasse la capacité de mobilisation pour un débit de pleins bords (τ critique) ;
- indice diatomée. S'il existe sur la surface des alluvions en fond de lit une couche épaisse et ancienne de couverture biologique (méthode d'évaluation restant à développer) ;
- indice hydrobiologique. Types de peuplements et/ou de densité associés au pavage (méthode d'évaluation à développer).

Affleurement du substratum

La disparition (ou la forte réduction de l'épaisseur) de la couche alluviale et l'apparition fréquente du substratum rocheux résistant peut aussi être un indicateur utile (Figure 125).

Attention. Toutefois, de nombreux cours d'eau coulent naturellement (ou en tout cas depuis très longtemps) sur leur substratum.

Figure 125



© N. Landon

Affleurement du substratum et creusement actif dans les formations molassiques de la Limone, Drôme des collines. On note la présence d'alluvions en transit à gauche de la photo.

Apparition de terrasses récentes

L'apparition de modelés topographiques de type basse terrasse est le signe de l'ajustement géomorphologique de la bande active qui se contracte en réponse à la diminution des apports de charge solide (Figure 126).

Cette contraction peut s'accompagner d'une colonisation par les végétaux ligneux qui pourront permettre de dater l'âge de la terrasse par dendrochronologie (comptage des cernes) si celle-ci n'a pas fait l'objet de coupe d'entretien. L'analyse des photographies aériennes permet de s'assurer de la présence de la végétation mais il faut s'assurer aussi sur le terrain de l'absence de souche ou/et enquêter auprès des propriétaires riverains.

Figure 126



© N. Landon

Emboîtement de terrasses dans la plaine de Recoubéau (haute Drôme) correspondant à l'incision au cours du XX^e siècle, confirmée par les analyses topographiques, les profils en long et la contraction de la bande active.

Affaissement de la nappe d'accompagnement

L'affaissement de la nappe alluviale d'accompagnement (eaux souterraines contenues dans l'aquifère de la plaine alluviale) est un indice d'incision. Sa caractérisation nécessite de disposer de mesures piézométriques et de données historiques sur les niveaux, des indices d'assèchement de zones humides inféodées à une nappe haute, ainsi que des indices de modification des communautés végétales d'accompagnement (par ex. forte mortalité de la forêt alluviale au profit des espèces à bois dur des versants).

Déchaussement d'ouvrages divers

Attention. Un système racinaire apparent et sous-cavé n'est pas systématiquement un indicateur d'incision, ce peut n'être qu'une « simple » érosion latérale.

La seule conclusion que l'on peut éventuellement tirer d'une telle observation (Figure 127) c'est que la matrice dans laquelle était inclus le système racinaire a disparu. De même une pile ou une culée de pont renforcée par des palplanches et du béton n'indique pas toujours une incision généralisée : ce type d'obstacle à l'écoulement se traduit souvent par un affouillement localisé qui peut nécessiter à terme un renforcement. La présence d'un seuil immédiatement en aval ou sous un pont peut par contre faire suspecter une incision plus générale, et notamment un processus d'érosion régressive (voir plus loin).

Par ailleurs, si incision il y a, elle peut n'être que très localisée. Il faut donc recenser un certain nombre d'indices d'incision sur le linéaire pour en déduire l'existence d'un processus d'incision généralisé, qui est l'information que l'on recherche (Figure 128).

Figure 127



a- b © J.R. Malavoi

L'apparition du chevelu racinaire, voire la chute d'arbres en bordure de cours d'eau peut indiquer une incision du lit mineur (c'est le cas en (a), suite à la disparition d'un seuil de moulin). Il peut aussi ne refléter qu'un processus d'érosion latérale (b). Mais, si l'on ne connaît pas l'histoire récente du cours d'eau, il est impossible de faire la distinction.

Figure 128



a- b- c © J.R. Malavoi

Quelques indices d'incision. (a) encaissement du lit dans ses propres alluvions récentes. (b) renforcement important de piles de pont. (c) apparition des alluvions sous le niveau de fondation d'ouvrages. Ici un mur de soutènement routier.

Un bon indicateur indirect est la présence d'un seuil (en enrochements le plus souvent) dont la vocation est manifestement la stabilisation du lit (pas de dérivation vers un moulin, vers un canal d'irrigation etc.). Ces ouvrages sont souvent situés en aval immédiat de ponts (Figure 129).



Figure 129



a © N. Landon
b © J.R. Malavoi

(a) seuils de stabilisation en aval d'un pont. (b) seuil de stabilisation en section courante.

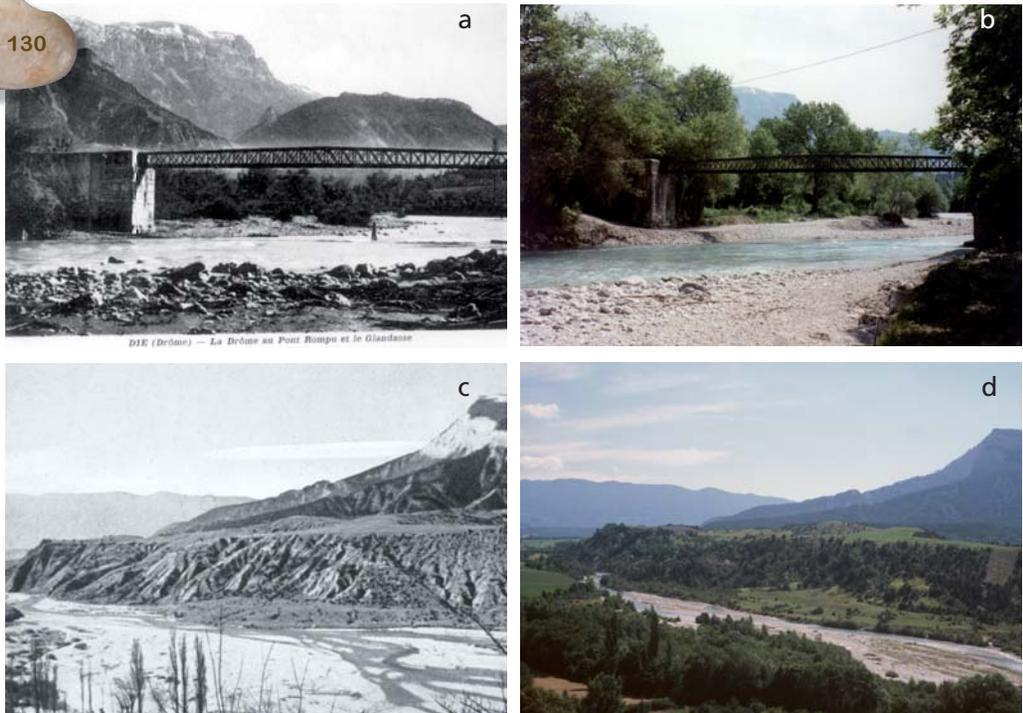
NB D'une manière générale, hors méthodes quantitatives fiables (comparaison de données topo-bathymétriques) un diagnostic d'incision repose sur le cumul de plusieurs indices convergents sur un linéaire suffisamment long.

L'analyse diachronique de photographies ou cartes postales peut être révélatrice de cette dynamique (Figure 130)



170

Figure 130



a-c © tous droits réservés
b-d © N. Landon.

Analyse diachronique de photos prises à environ 100 ans d'intervalle. Entre (a) et (b), incision de 1 m à 1,5 m (banc nettement marqué en forme de basse terrasse visible du côté de la culée du pont à gauche et végétalisé par des ligneux âgés). Pour (c) et (d), l'incision est moins nette sur le cliché récent car la prise de vue est éloignée des berges formées par incision au cours du 20^e siècle, mais la contraction de la bande active est remarquable tout comme le reboisement des ravines de versant... (dans Landon, 1999).

■ Synthèse du fonctionnement

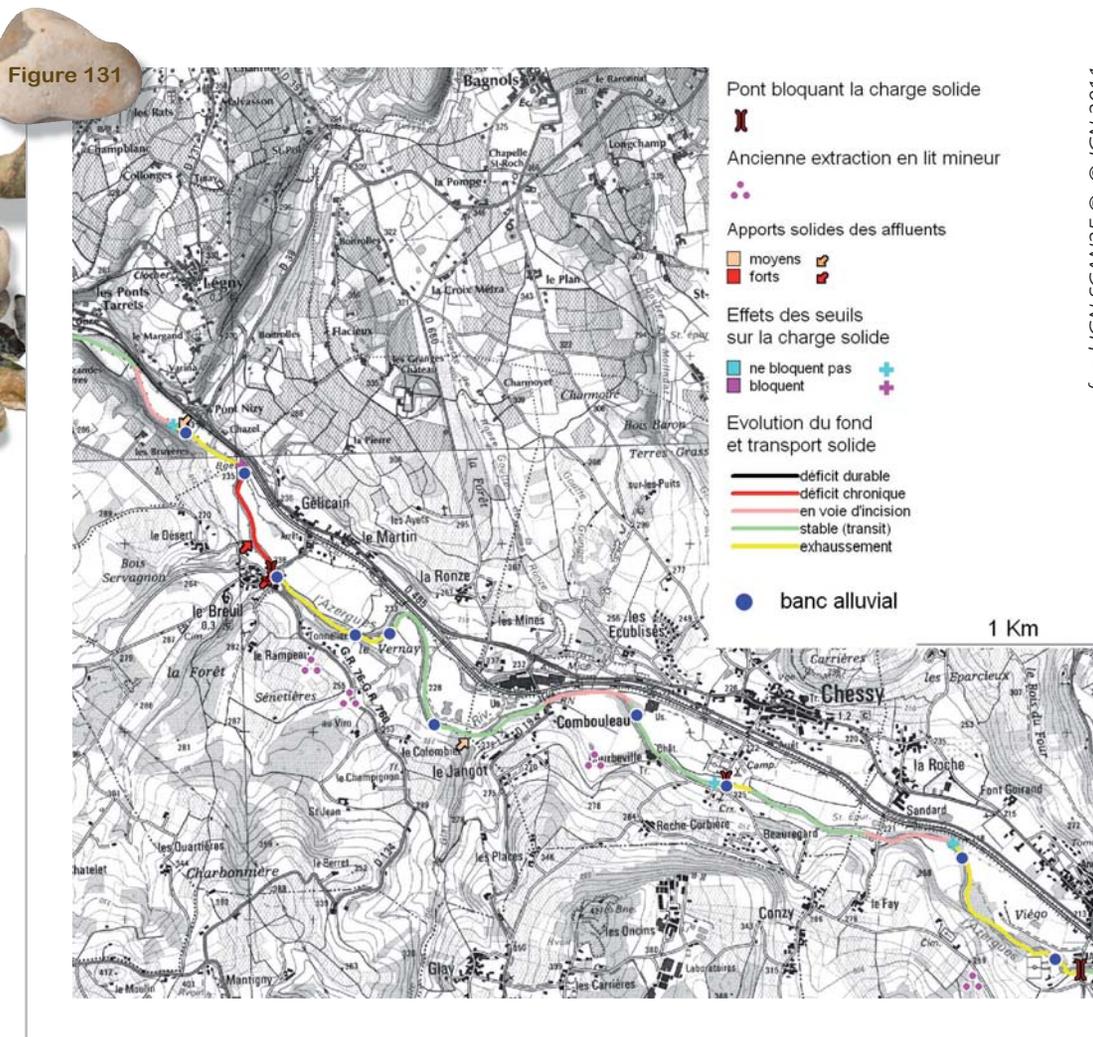
Une carte de synthèse doit faire apparaître les éléments du fonctionnement hydrosédimentaire de l'UHC concernée. Par exemple :

- la dynamique des tronçons ou sous-tronçons de cours d'eau vis à vis des processus d'incision/exhaussement avec, par exemple, les classes suivantes : déficit durable - déficit chronique - en voie d'incision - stable - exhaussement ;
- les ouvrages transversaux (pont et seuils), avec indication de leur état de dégradation (ruiné ou non) et de leur incidence estimée sur le transport solide (cf. chapitre concernant les altérations du transport solide) ;
- les apports sédimentaires des affluents (forts/faibles ou données plus quantitatives) ;
- les anciennes extractions en lit mineur (localisation et si possible volumes extraits).

On pourra y ajouter des informations complémentaires susceptibles de jouer un rôle vis à vis du fonctionnement hydrosédimentaire :

- les verrous rocheux ;
- les gravières en lit majeur.

La figure 131 présente un exemple de cartographie simplifiée (Malavoi et Gadiollet, 2008).



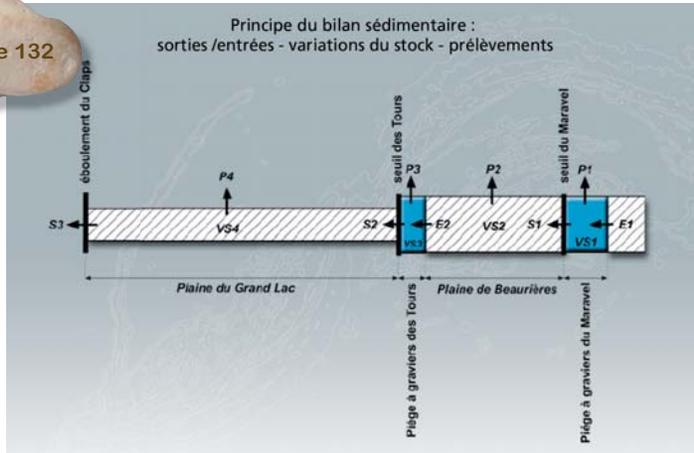
Exemple de cartographie simplifiée du fonctionnement hydrosédimentaire d'une portion de l'Azergues (Malavoi, Gadiollet, 2008). Chaque point représente un banc alluvial.

■ Option : Bilan sédimentaire

Un bilan sédimentaire peut être réalisé de manière optionnelle.

A l'échelle d'un tronçon, le principe général est le suivant : les volumes de matériaux en transit dans le lit sont en équilibre avec les phénomènes d'engravement ou d'incision qui se produisent sur un intervalle de temps donné (Figure 132). Si nous considérons un tronçon de rivière, le débit solide en sortie correspond au débit solide d'entrée auquel on soustrait la variation du stock et les éventuels prélèvements anthropiques sur la période considérée.

Figure 132



Principe du bilan sédimentaire à l'échelle du tronçon (Liébault et al., 2002).

Les variations du stock sédimentaire par compartiments entre deux dates (S) peuvent être calculées à partir de la formule suivante :

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \Delta z_i L_i \quad (13)$$

avec W_i : largeur moyenne du cours d'eau dans le tronçon i (en m), Δz_i : variation altitudinale moyenne du tronçon i sur la période (en m), L_i : longueur du tronçon i (longueur constante de 50 m)

Malgré les imperfections des modèles et des formules de transport solide, il semble également envisageable de réaliser une approche semi-quantitative en confrontant les volumes d'apports estimés (en entrée et au sein de chaque tronçon) aux capacités de charriage théoriques par tronçon (ou sous-tronçon) homogène.

Un bilan sommaire par tronçon ou sous tronçon homogène peut alors être évalué (Figure 133).

172

Figure 133

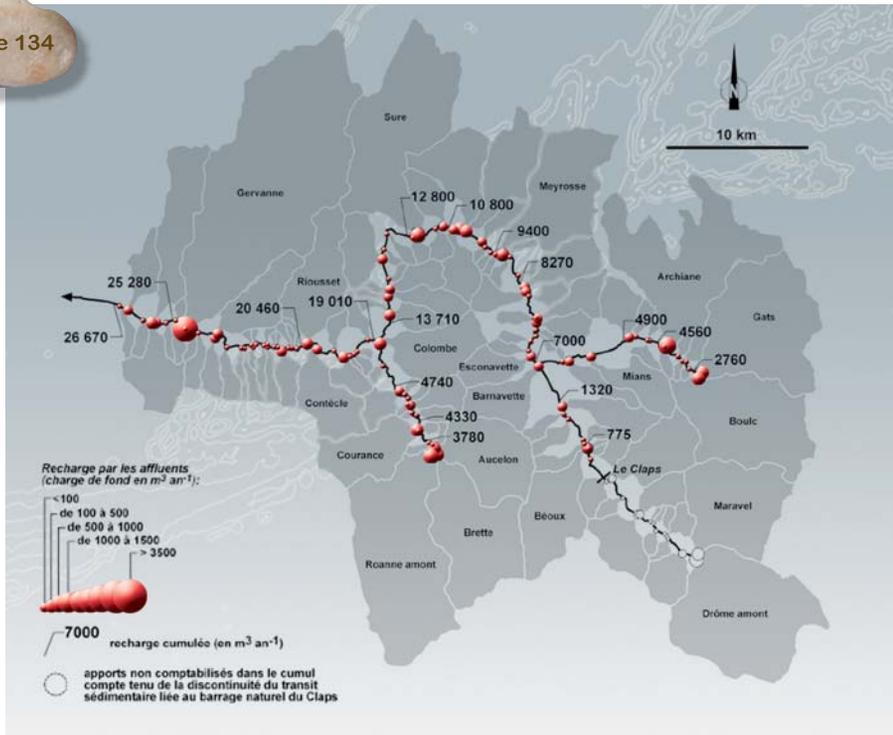


Exemple de cartographie simplifiée d'un bilan sédimentaire à l'échelle d'une UHC.

L'idéal, mais sans doute le plus difficile à approcher, est d'établir un réel bilan sédimentaire à l'échelle du bassin versant tenant compte des apports externes de production primaire (versant) et des apports internes (déstockage alluvionnaire) le tout mis en « balance » avec les sorties à l'exutoire.

Peu de bilans sont aujourd'hui satisfaisants à cette échelle mais certaines tentatives intégrant diverses méthodes de quantification (calcul de transport solide, observation in situ des modalités de transferts, piégeage de sédiments) sont proches d'un résultat probant (Figure 134 et Figure 135).

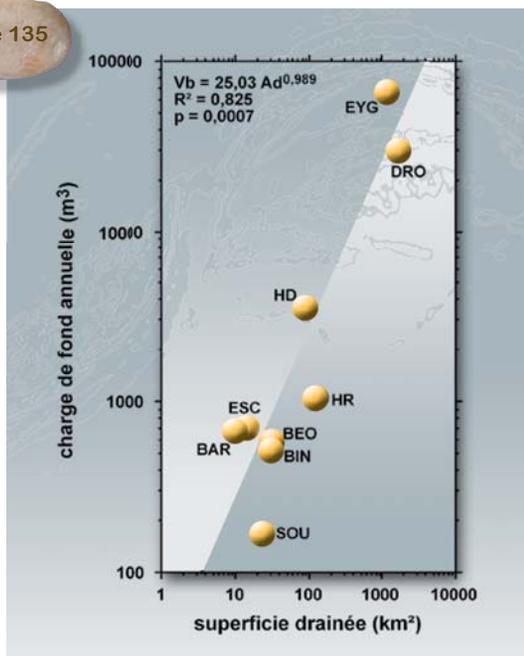
Figure 134



Estimation de la recharge sédimentaire de la rivière Drôme en amont de Crest par ses affluents, fondée sur la relation empirique entre la superficie drainée et le charriage annuel ci-dessous (Liébault, 2003).

173

Figure 135



Relation entre le charriage annuel et la superficie drainée pour quelques bassins versants des Préalpes drômoises (Liébault, 2003).

Couplées à un piège à sédiments à l'exutoire du bassin, ces données de recharge du bassin versant permettent d'établir un bilan assez clair de la situation de la Drôme. Environ 40 000 m³ de matériaux sortent du bassin alors que le bassin versant produit via les affluents 27 000 m³ ; le résultat est donc déficitaire de 13 000 m³.

NB L'incision peut ici être considérée comme irréversible si les modalités de recharge n'évoluent pas.

■ Synthèse : les étapes d'un plan de gestion du transport solide

Une proposition synthétique des différentes étapes de travail pouvant être suivies dans le cadre de l'élaboration d'un plan de gestion est présentée dans le tableau 16.

Tableau 16

Proposition d'un schéma de synthèse des étapes à suivre dans le cadre de l'élaboration d'un plan de gestion du transport solide.

	Phases	Livrables
Phase de diagnostic sédimentaire	Quelles sont les échelles de gestion ?	Détermination des unités cohérentes de gestion (UHC)
	Quels sont les apports solides ?	
	Quels sont les dysfonctionnements hydrosédimentaires ?	
		Synthèse du fonctionnement par UHC et par BV
Phase de diagnostic des enjeux	Quels sont les enjeux de gestion par UHC ?	
	Quelles sont les grandes orientations de gestion par UHC ?	Elaboration de cartes de synthèse par UHC
	Quantification et qualification plus fine des enjeux par site	Approche qualitative des caractéristiques physiques (section, cote de profil en long) qui sont nécessaires au bon fonctionnement des enjeux structurants
	Elaboration des aléas et des modalités de gestion par site en fonction des enjeux sélectionnés	
Phase de diagnostic des enjeux	Détermination des profils au droit des sites d'intervention et des modalités de gestion	Profils ou section par site avec ses modalités de gestion
	Compilation des modalités de gestion par site par UHC et rebouclage en inter UHC	Plan de gestion finalisé

■ Grandes orientations de gestion par unité hydrographique cohérente (UHC)

Au terme de l'étape diagnostique, il est possible de proposer de grandes orientations de gestion par UHC.

Il s'agit de mettre en évidence et de confronter à l'échelle des tronçons de l'UHC :

- les enjeux socio-économiques concernés par d'éventuels risques liés au transport solide (inondation, érosion). Ces enjeux sont généralement menacés par un excédent (ou considéré comme tel), souvent temporaire et localisé, de charge alluviale grossière ;
- les autres enjeux pouvant être influencés par le transport solide. Ces enjeux sont souvent menacés par le déficit chronique en charge alluviale grossière et l'incision du lit mineur qui lui est corrélée ;
- les éléments de fonctionnement/dysfonctionnement hydrosédimentaire.

Il s'agit, ensuite de déterminer les **grandes orientations de gestion** résultant du croisement de ces trois éléments. Ces grandes orientations s'appuieront sur les préconisations présentées précédemment.

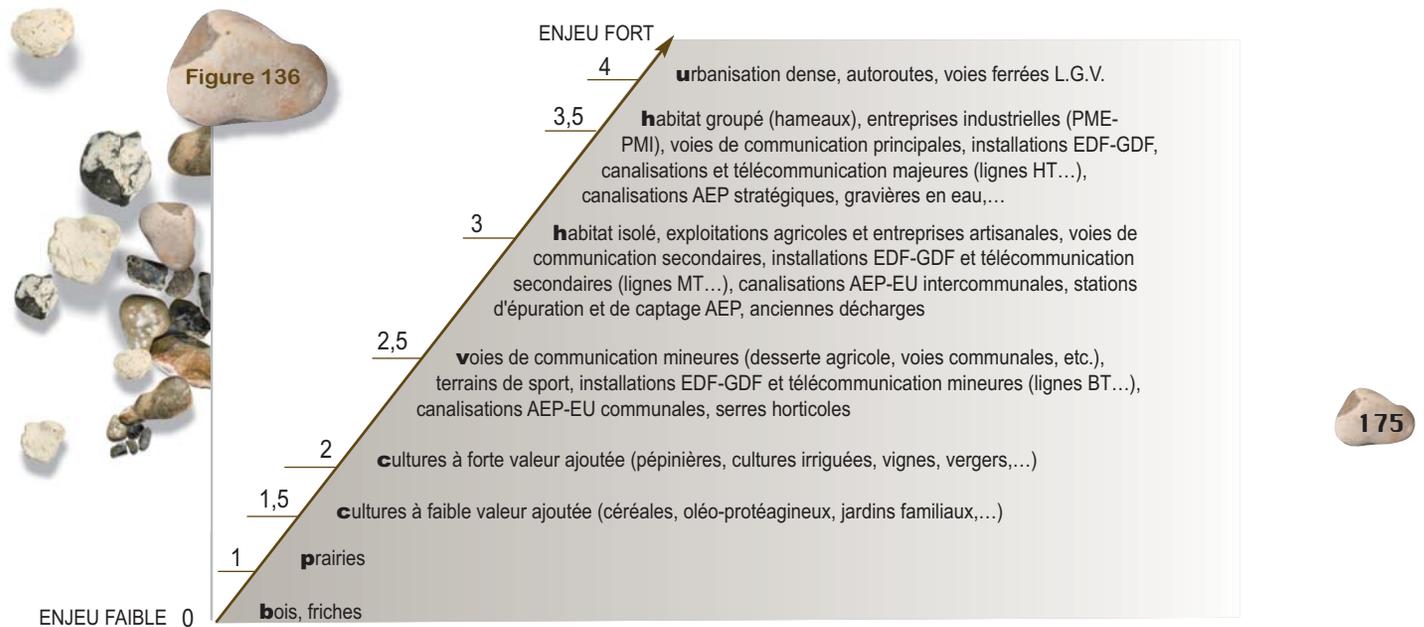
■ Enjeux socio-économiques menacés par des aléas inondation/érosion liés au transport solide

L'enjeu est la valeur matérielle ou morale du bien à protéger. Si la protection des vies humaines constitue un enjeu majeur évident et immédiatement perceptible, l'appréciation des enjeux socio-économiques est plus complexe et plus subjective. Le principe de base de l'appréciation de l'enjeu repose sur quelques questions simples :

- dans quelle mesure les travaux envisagés valent-ils la peine d'être réalisés ?
- le coût des travaux envisagés est-il en rapport avec le bien à protéger ?
- les enjeux à protéger justifient-ils d'éventuels impacts sur le fonctionnement hydromorphologique, écologique, hydrogéologique, etc. des cours d'eau (voir ci-dessous l'intégration de ces autres enjeux dans l'élaboration du plan de gestion).

Nous proposons ici une **grille d'évaluation sommaire de l'enjeu** de divers types d'occupation des sols en bordure de rivière susceptibles d'être menacés par les processus géodynamiques et hydrauliques liés au transport solide. Les enjeux sont classés du plus faible au plus fort niveau (Figure 136).

Cette grille ne prétend pas être exhaustive et n'est en aucun cas une « règle stricte de détermination d'un enjeu ». Elle se veut plutôt une base de travail et de réflexion pour les gestionnaires.



Exemple de grille de détermination du niveau d'enjeu socio-économique susceptible d'être menacé par des risques d'inondation/érosion liés au transport solide.

■ Les autres enjeux à prendre en compte

D'autres enjeux, présentant parfois aussi une valeur « économique » forte, sont concernés par la dynamique du transport solide et il est indispensable d'en tenir compte dans l'élaboration du plan de gestion. Ces enjeux peuvent, au delà d'un plan de gestion au titre du L215-15 CE, nécessiter des actions de **restauration du transport solide** :

- l'alimentation en eau potable. Dans les secteurs où les puits de captage se situent dans la nappe d'accompagnement, l'incision du lit mineur, généralement liée à des altérations du transport solide, il peut se traduire par des problèmes de **baisse de productivité** des captages et par voie de conséquence, par des difficultés d'alimentation en eau potable des communes desservies ;

■ les ouvrages d'art (ponts, digues, protections de berges diverses, murs de soutènement de quai etc.). Tous ces enjeux peuvent être menacés par les processus d'incision liés aux dysfonctionnements hydrosédimentaires. On peut aussi citer les risques de cavitation des turbines des usines et des microcentrales et les problèmes de passage des écluses par manque de tirant d'eau. Le coût de protection ou de réparation de ces ouvrages en cas d'affouillement est souvent élevé ;

■ les milieux naturels

⇒ du lit mineur. La disparition ou la forte réduction des substrats alluviaux grossiers a des répercussions directes sur les biocénoses aquatiques, tant du point de vue qualitatif (perte de biodiversité) que quantitatif (perte de biomasse),

⇒ du lit majeur. L'incision des cours d'eau générée par la plupart des altérations du transport solide se traduit souvent par un assèchement des zones humides du lit majeur et une déconnexion du lit mineur vis à vis de ses annexes (adoux, bras morts, etc.).

■ Exemple de carte de synthèse

La figure 137 n'est qu'un exemple de carte permettant de synthétiser à l'échelle d'une UHC (soit généralement plusieurs tronçons, voire l'ensemble du cours d'eau), à la fois les éléments de diagnostic hydrosédimentaire, les enjeux concernés et les grandes orientations de gestion préconisées.

Tous ces éléments et particulièrement les grandes orientations doivent être développés dans le rapport d'accompagnement.

Détermination plus fine des enjeux, des aléas et des besoins d'intervention

Une fois l'approche globale réalisée et les grandes orientations de gestion déterminées par tronçon d'UHC, il convient de descendre à un niveau plus local, afin de déterminer les types d'action localisée les plus pertinents.

Chaque banc repéré est identifié et numéroté dans une base de données SIG.

Pour les rivières en tresses sur lesquelles les bancs ne peuvent pas être individualisés, seront identifiés des zones d'alluvionnement au droit de secteurs à enjeux.

■ Détermination de la nécessité d'intervenir sur les bancs alluviaux (atterrissements)

Détermination fine des enjeux socio-économiques menacés par des aléas inondation/érosion liés au transport solide

Pour chaque banc identifié seront déterminés les enjeux menacés et leur niveau d'enjeu (revoir Figure 136).

Détermination fine des aléas

L'aléa est le potentiel de destruction (principalement à l'occasion des crues) en un point donné.

On caractérise généralement deux principaux types d'aléas liés à la présence de bancs alluviaux : l'aléa inondation et l'aléa érosion.

On peut y ajouter 3 types d'aléas beaucoup moins fréquents :

■ l'obstruction d'ouvrages de petite dimension (type buse ou dallot), qui rejoint l'aléa inondation lorsque cette obstruction génère ou aggrave les inondations ;

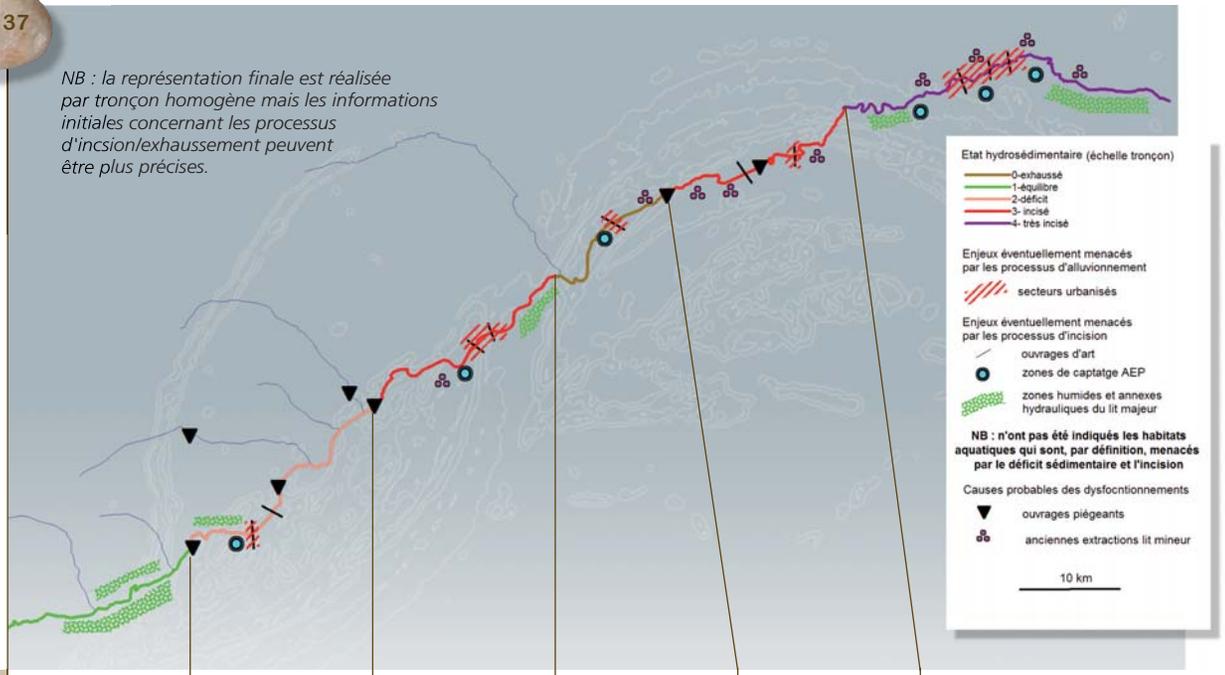
■ l'engravement des terrains par déversement des alluvions dans le lit majeur. Aléa peu « grave » mais qui peut poser certains problèmes, notamment s'il se produit sur des terrains agricoles ;

■ la capture de la rivière par une gravière sous l'effet de la présence de bancs alluviaux.

Le concept d'aléa renvoie à des notions de fréquence du phénomène (crue décennale, centennale) et d'intensité du phénomène pour une fréquence donnée (hauteur de submersion, vitesse de l'eau, taux d'érosion latérale, etc.).

Figure 137

NB : la représentation finale est réalisée par tronçon homogène mais les informations initiales concernant les processus d'incision/exhaussement peuvent être plus précises.



Numéro de tronçon (T)	4	5	6	7	8	9
Enjeux menacés par alluvionnement		traversée urbaine	traversée urbaine	traversée urbaine	traversée urbaine + habitation localisée	traversée urbaine
Enjeux menacés par déficit/incision		puits AEP 500 hab - petite ZH	puits AEP 1000 hab - ZH - ponts		ponts - digue du village	puits AEP 5000 hab - ponts - digues - protections de berges - Zones humides et annexes hydrauliques
Bilan sédimentaire	Asa = 8-10000 m ³ Asi = 8-9000 m ³ Cc = 10-20000 m ³	Asa = 5-6000 m ³ Asi = 3-4000 m ³ Cc = 10-20000 m ³ bilan négatif	Asa = < 1000 m ³ Asi = 7-8000 m ³ Cc = 10-20000 m ³ bilan très négatif	Asa = 8-10000 m ³ Asi = 2-3000 m ³ Cc = 5-10000 m ³ bilan positif	Asa = <1000 m ³ Asi = 5 + 4000 m ³ Cc = 5-10000 m ³ bilan très négatif	Asa = 3-5000 m ³ Asi = 6-8000 m ³ Cc = 10-20000 m ³ bilan très négatif
Etat hydrosédimentaire	bilan équilibré	déficit manifeste. pas d'incision notable actuellement mais probable à court terme	incision marquée (1 m en 20 ans)	léger exhaussement (0.3 m en 20 ans)	incision marquée (1 m en 20 ans)	incision marquée (2 m en 20 ans)
Fonctionnement écologique	Equilibre	Pas de dysfonctionnement notable	déficit en habitats sur substrat alluviaux grossiers - assèchement ZH aval en cours	Pas de dysfonctionnement notable	déficit en habitats sur sédiments grossiers - déficit en zones de reproduction sur substrats alluviaux grossiers	déficit en habitats sur sédiments grossiers - déficit en zones de reproduction sur substrats alluviaux grossiers - assèchement ZH amont - déconnexion annexes hydrauliques
Causes dysfonctionnements	Equilibre	1 ouvrage piégeant en amont du T - 1 petit seuil piégeant au milieu du T - 1 seuil piégeant sur 1 affluent - 2 ponts sous dimensionnés favorisant l'alluvionnement localisé	ouvrage piégeant en fin de T amont-ouvrage piégeant sur affluents - anciennes extractions	exhaussement dû à l'érosion progressive du T amont - apports dernier affluent RG - remous solide du seuil aval	ouvrage piégeant en fin de T amont-ouvrage piégeant en milieu de T - anciennes extractions	déficit cumulé des tronçons amont - nombreuses anciennes extractions en lit mineur
ORIENTATIONS DE GESTION	préservation Qs	Curage au droit des ouvrages de franchissement (ou redimensionnement) et réinjection dans le T en aval du seuil - dérasement éventuel du ouvrage amont	gestion de l'ouvrage pour améliorer transit sédimentaire - espace de mobilité - traitement localisé des atterrissements au droit des zones à enjeux	effacement du seuil aval - curages localisés au droit des zones à enjeux - réinjection dans T aval	effacement ouvrage amont - espace de mobilité	restaurer transit sédimentaire amont - espace de mobilité

Exemple de carte de synthèse par tronçon d'une unité hydrographique cohérente (UHC). Sont représentés les éléments de diagnostic hydrosédimentaire et écologique, les enjeux concernés et les grandes orientations de gestion préconisées.

La circulaire interministérielle du 24 janvier 1994 précise que l'événement de référence à retenir pour le « zonage » des aléas inondation est la plus forte crue connue ou, si celle-ci est inférieure à la crue centennale, cette dernière. Les niveaux d'aléa sont alors déterminés en fonction de l'intensité des paramètres physiques de l'inondation de référence, qui se traduisent en termes de dommages aux biens et de gravité pour les personnes (« *Guide méthodologique des plans de prévention des risques inondation* », 1999).

1- Aléa inondation

Le concept et l'appréciation de cet aléa sont plus « normalisés » que pour l'érosion :

■ l'aléa inondation est généralement apprécié sur la base du couple hauteur d'eau/vitesse en un point de la zone inondable, pour la crue de référence (Tableau 17). On y intègre parfois la durée de submersion ;

Tableau 17 Tableau de détermination de l'aléa inondation

Hauteur d'eau	Vitesse faible	Vitesse moyenne	Vitesse forte
< 0,5 m	Faible	Moyen	Fort
0,5 à 1 m	Moyen	Moyen	Fort
> 1 m	Fort	Fort	Fort

■ lorsque la connaissance des vitesses n'est pas possible, on base l'évaluation de l'aléa uniquement sur les hauteurs d'eau (Tableau 18).

Tableau 18 Qualification des aléas inondation en fonction de la hauteur d'eau

Hauteur d'eau	Aléa
< 1 m	Faible à moyen
> 1 m	Fort

2- Aléa érosion

L'aléa érosion s'apprécie principalement sur la base du taux d'érosion latérale (mesuré généralement en mètres, perpendiculairement à l'axe du cours d'eau) dans un secteur donné.

A titre d'exemple, on sait que l'Ain dans sa basse vallée érode en moyenne 3-4 m de berge par an au droit de ses méandres « libres » quand la Saône érode difficilement 1 m par siècle. On conçoit bien qu'il n'y a pas la même urgence à protéger une maison située à 10 m du lit de la Saône ou du lit de l'Ain.

Cependant la connaissance de valeurs moyennes de cet aléa n'est pas complètement suffisante car il s'agit là d'un « aléa en crues moyennes », qui ne représente pas forcément le potentiel d'érosion en crue décennale ou centennale. Ainsi l'Ain est capable d'éroder 20 m de berges en une seule crue quinquennale. Par référence au système utilisé pour l'aléa inondation, l'appréciation de l'aléa érosion en un point devrait donc en principe être basée sur les valeurs des taux d'érosion pour la crue de référence, notamment au droit d'enjeux forts.

3- Concepts proposés dans le cadre d'un plan de gestion

Devront être définies pour chaque site (c'est à dire chaque banc alluvial) trois classes d'aléa :

- **classe 1** = aléa faible ;
- **classe 2** = aléa moyen ;
- **classe 3** = aléa fort.

Cette analyse simplifiée des aléas permet de replacer l'appréciation du niveau d'urgence de travaux de gestion des bancs alluviaux dans un contexte d'évaluation de l'intensité du « risque » ; le risque étant le croisement de l'enjeu et de l'aléa, c'est-à-dire la présence d'un enjeu dans la zone d'aléa.

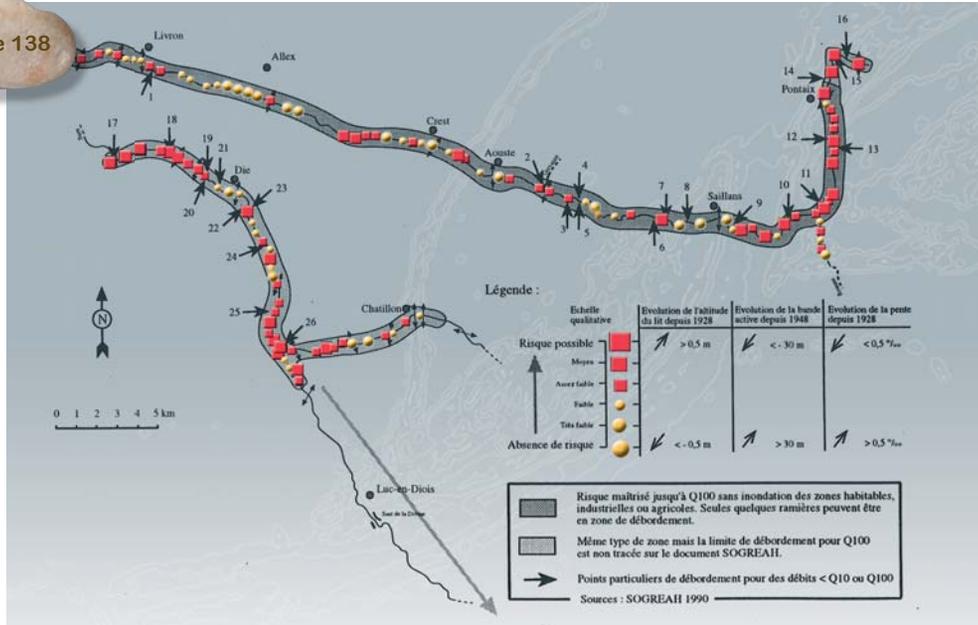
Par exemple pour un fort aléa d'érosion (10 m lors d'une crue rare) :

■ le risque est faible si l'enjeu (par ex. une maison) est à 100 m de la berge, et ne nécessitera donc pas nécessairement une intervention « d'urgence » ;

■ si la maison est à 10 m, l'aléa fort en crue rare fera courir un risque fort et il y aura urgence à intervenir.

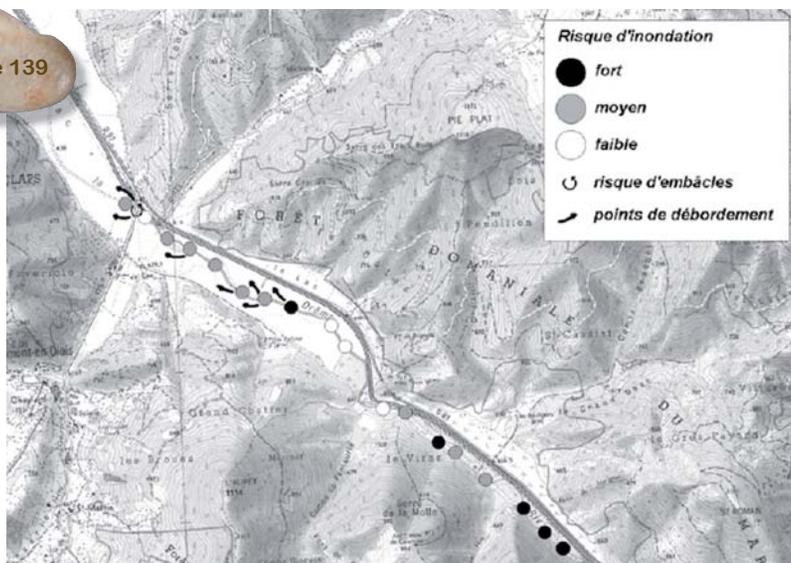
Cette analyse peut également permettre d'apprécier le « degré d'acceptabilité » d'un tronçon vis-à-vis d'un exhaussement pouvant se produire en cas de restauration du profil en long (Figure 138 et Figure 139).

Figure 138



Appréciation du potentiel de débordement lié aux changements géomorphologique de la Drôme au cours du XX^e siècle (Landon et al., 1995).

Figure 139



Autre exemple d'évaluation ponctuelle du risque d'inondation à partir de simulations hydrauliques stationnelles, les objectifs de protection définis en concertation avec les acteurs concernés sont, respectivement pour les terres agricoles et la route départementale, Q2 et Q10 (Plaine de Beauverrière, Haute Drôme, Liébault et al., 2002). Autant dans un souci d'économie des deniers publics que de protection de l'environnement, la ligne de conduite principale sera d'intervenir le moins possible. Toutefois, lorsque cela s'avèrera nécessaire (dysfonctionnement avéré mettant en péril des biens ou personnes), une intervention sur les dépôts sédimentaires en lit mineur (atterrissements) pourra être programmée.

Il est possible de proposer une approche synthétique reposant sur trois **niveaux de nécessité d'intervention**, qui seront déterminés au cas par cas sur la base du **croisement niveau d'enjeu/niveau d'aléa** (Tableau 19).



Exemple de grille de détermination.

Enjeu	Aléa faible	Aléa moyen	Aléa fort
4	3	2	1
3,5	3	2	1
3	3	2	1
2,5	3	2	2
2	3	3	2
1,5	3	3	2
1	3	3	3
0	3	3	3

Le niveau 1 nécessitera une intervention, probablement relativement rapide. Sur les sites concernés, il ne sera pas nécessaire de reposer la question de la nécessité ou non d'intervention à court terme.

Le niveau 2 nécessitera une intervention dès qu'un **seuil d'alerte prédéfini** sera atteint. Ce seuil d'alerte sera estimé visuellement sur la base de critères hydromorphologiques simples.

Le niveau 3 ne nécessitera pas d'intervention à court ou moyen terme, sauf si l'augmentation de l'aléa, suite à une crue par exemple, le fait basculer dans la classe de priorité supérieure (niveau 2). Ces bancs resteront donc « à surveiller ».

La base de données finale « bancs »

Cette base de données SIG recense tous les bancs alluviaux identifiés sur l'UHC étudiée, chacun étant repéré par un numéro.

Pour chaque banc sont, si possible, renseignés les champs suivants (Tableau 20) :

- commune(s) ;
- lieu-dit (localisation) ;
- origine du dépôt. Par exemple cône de déjection, secteur de divagation latérale du lit, dépôt au sortir d'une section contrainte par des remblais ou des gorges, remous solide causé par la présence d'un seuil ou d'un pont en aval, etc. ;
- volume estimatif. Superficie du banc x sa hauteur moyenne par rapport au fond moyen du site ;
- enjeu. Nature précise de(s) l'enjeu(x) comme boisement, jardins, installations sportives, prairie, champs captants AEP, etc. ;
- niveau d'enjeu. Le niveau d'enjeu tel que défini dans la grille, de 0 (nul) à 4 (très fort) par pas de 0,5 ;
- nature de l'aléa. érosion, inondation, autre ;
- intensité de l'aléa. fort, moyen, faible ;
- priorité d'intervention. De 1 à 3 ;
- mode d'intervention envisagé. Par exemple (non exhaustif) : curage avec réinjection des matériaux en aval, protection berge en génie végétal (si le banc génère une érosion), redistribution des matériaux sur site au sein du lit mineur, etc.

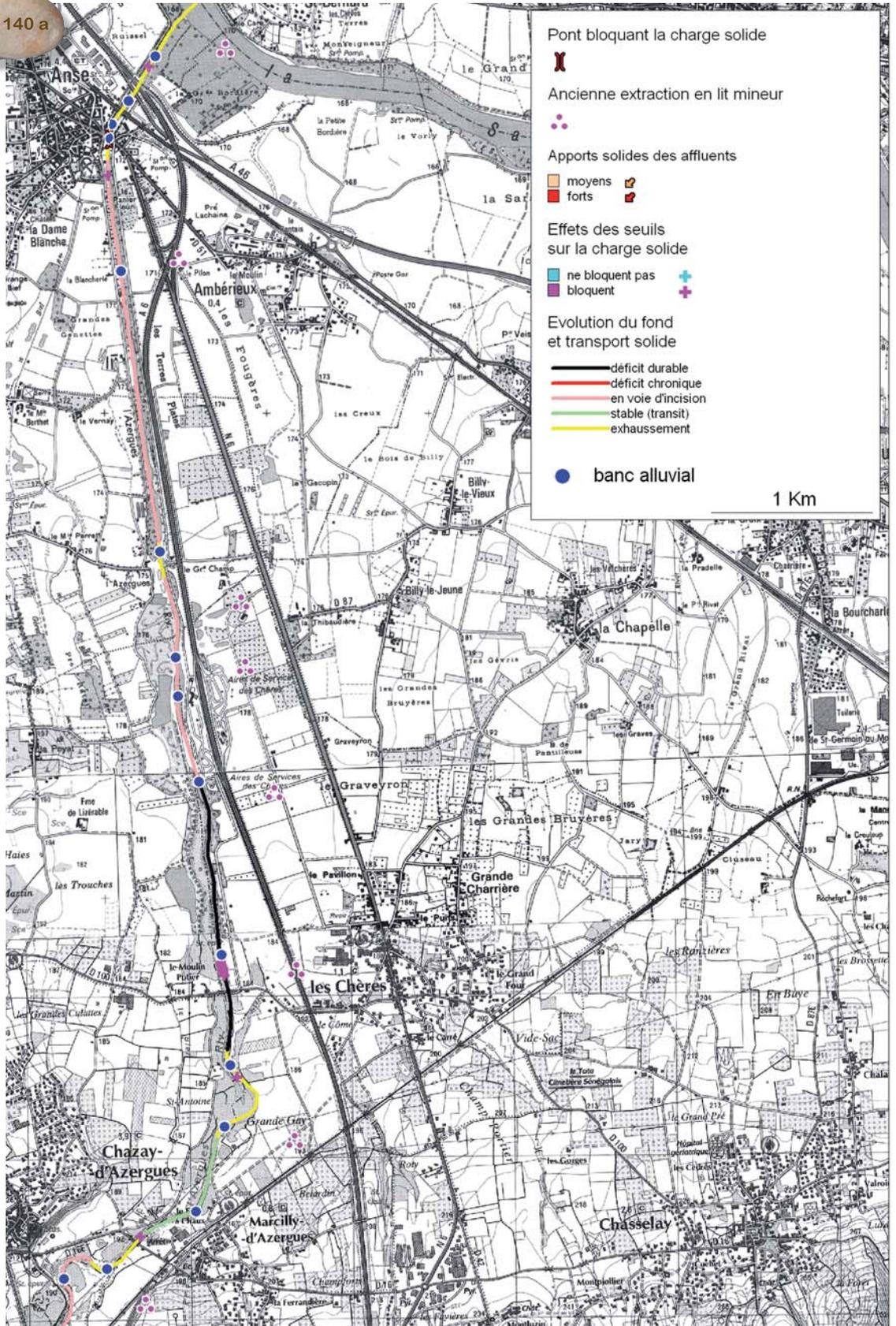


Exemple de données à renseigner pour chaque banc (base de données Excel et Mapinfo) (Exemple de l'Azergues, Malavoï, Gadiollet, 2008).

N° carte	N° banc	Commune(s)	Lieu-dit - (localisation)	Origine	volume	enjeu	niveau - enjeu	Nature - aléa	Intensité - Aléa	Mode - interv	Mode - interv
8				convexité de sinuosité	2000-5000	friches	0	érosion	faible	3	redistribution des matériaux au sein du lit mineur
8				convexité de sinuosité	2000-5000	boisements, friches	0	érosion	faible	3	redistribution des matériaux au sein du lit mineur
8				point d'inflexion de la pente en amont barrage de Morancé	1000-2000	boisements	0	érosion	faible	3	redistribution des matériaux au sein du lit mineur
8				remous fosse de dissipation en aval seuil	500-1000	boisements	0	érosion	faible	3	redistribution des matériaux au sein du lit mineur
9				remous fosse de dissipation en aval seuil - érosion latérale	250-500	boisements, step communale des Chères	3	érosion	moyen	2	redistribution des matériaux au sein du lit mineur
9				remous fosse de dissipation en aval seuil	250-500	boisements, voie communale	2,5	érosion	faible	3	redistribution des matériaux au sein du lit mineur
9				secteur de divagation latérale du lit	500-1000	ancienne gravière en eau	3,5	capture rivière	fort	1	arasement / réinjection en aval
9				secteur de divagation latérale du lit	2000-5000	voie communale, desserte agricole	2,5	érosion	moyen	2	redistribution des matériaux au sein du lit mineur
9				secteur de divagation latérale du lit	2000-5000	Habitation en RG, voie communale et autoroute A6 en RD	4	érosion / inondation	fort	1	arasement / réinjection en amont / redistribution des matériaux au sein du lit mineur
9				divagation latérale du lit	1000-2000	levée endiguement, voie communale, terres labourables	2,5	érosion	fort	1	redistribution des matériaux au sein du lit mineur
9				petites arches du pont	250-500	zone urbaine inondable	4	inondation	fort	1	curage / extraction des matériaux
9				remous en aval du pont	1000-2000	zone urbaine inondable, voiries	4	inondation	fort	1	arasement / extraction des matériaux
9				remous en aval du pont	1000-2000	zone urbaine inondable, voiries	4	inondation	fort	1	arasement / extraction des matériaux
9				remous de la Saône	> 5000	chemin piétonnier en rive gauche, prairie	1,5	érosion	moyen	2	redistribution des matériaux au sein du lit mineur

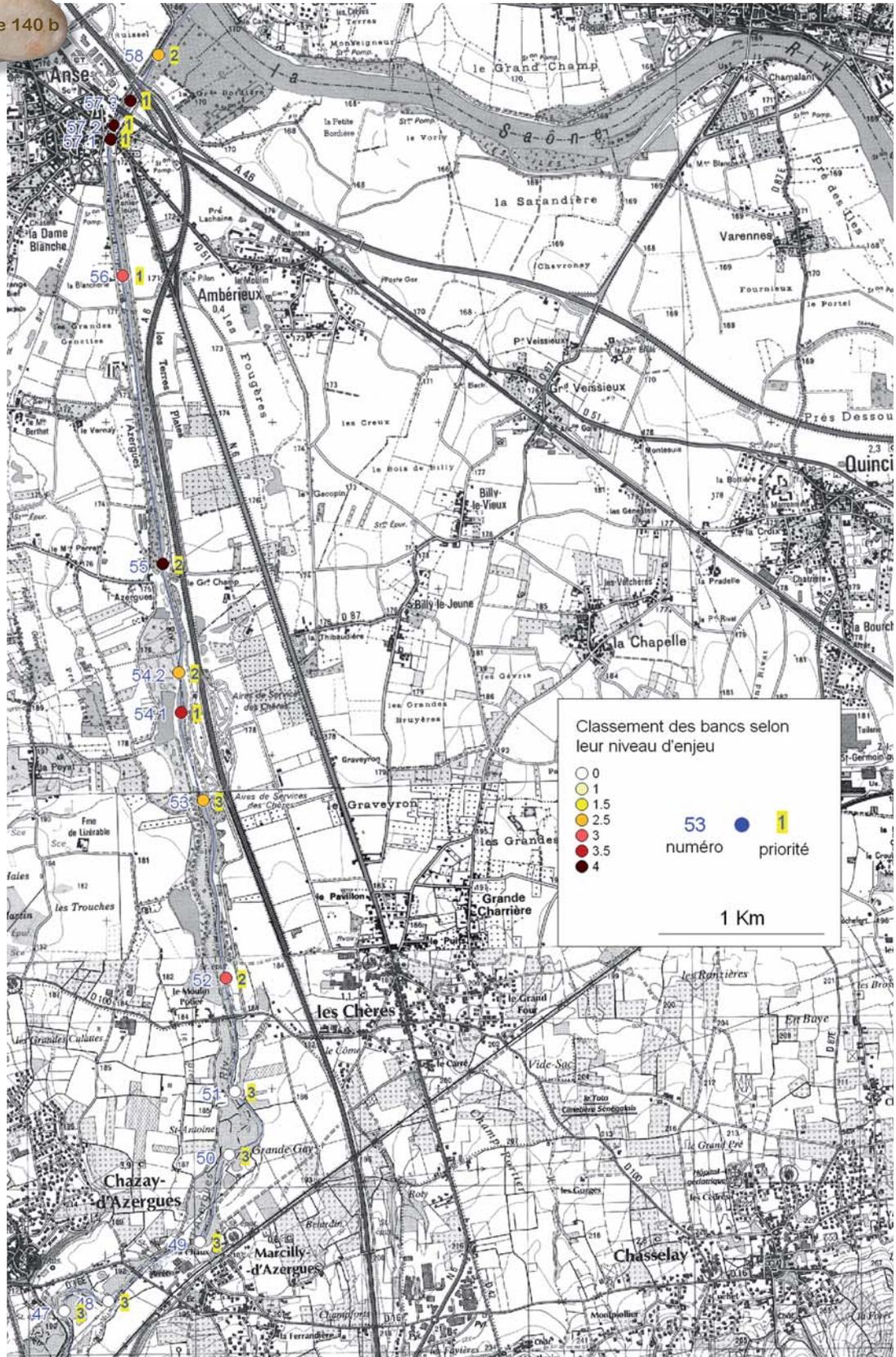
Attention. Cette base de données sera évolutive car les macroformes migrent, disparaissent et apparaissent. Une mise à jour doit donc être réalisée à un pas de temps compatible avec les enjeux, les risques et les connaissances que l'on a du transport solide. Un état des lieux rapide peut, par exemple, être réalisé après chaque crue de fréquence au moins biennale (positionnement GPS du centre de gravité des bancs, évaluation sommaire du volume, évaluation sommaire de l'atteinte d'une cote d'alerte si celle-ci a été déterminée (voir plus loin), évaluation de la nécessité d'intervention sur la végétation). Un état des lieux précis peut être réalisé après chaque crue de fréquence au moins décennale (positionnement GPS du centre de gravité des bancs, profils en travers pour vérifier précisément l'état par rapport à une cote d'alerte, etc.).

Figure 140 a



Exemple de cartographie croisant (a) les données de fonctionnement et (b) les enjeux « menacés » par la présence de bancs alluviaux (atterrissements), et le niveau de priorité de traitement.

Figure 140 b



■ Les autres enjeux

Nous avons vu que les autres enjeux concernés par le transport solide sont généralement menacés par des **déficits sédimentaires** et leur traduction sous forme de **processus d'incision** et de **disparition du substrat alluvial** (habitat des biocénoses).

Ces dysfonctionnements, contrairement à la gestion ponctuelle des bancs pouvant localement générer des risques d'inondations ou d'érosion latérale, doivent être traités a minima à l'échelle globale des tronçons.

Des actions locales de « sauvegarde », en attendant l'efficacité des mesures plus globales, peuvent toutefois être préconisées au droit de certains enjeux menacés à court terme :

- renforcement de piles et culées de pont (Figure 141) ;
- renforcement de pieds de digues ou de protections de berges ;
- implantation de rampe sous fluviales de stabilisation en aval de ponts ou de zones de captage ;
- recharge active.



a) travaux d'urgence (1995) suivis des travaux de reconstruction (b) du seuil du pont d'Allex-Grâne sur la Drôme.

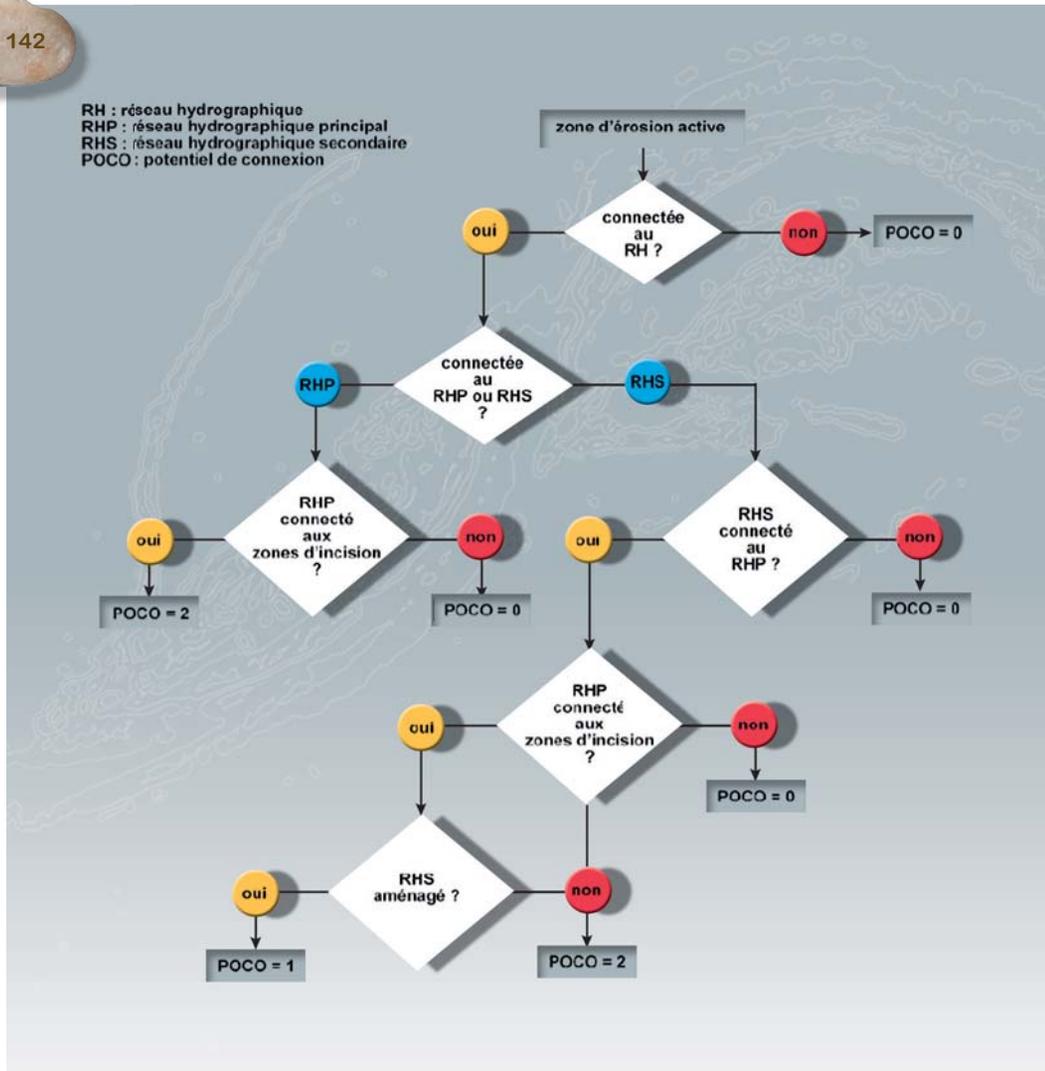
Il peut parfois être nécessaire d'envisager la recharge active via l'érosion des versants ; il convient alors de bien prendre en compte les différents enjeux en plus des paramètres physiques comme la présence de surfaces d'érosion intéressantes pour la charge de fond et la connexion au réseau hydrographique.

Liébault et al. (2002 et 2010) proposent une démarche pouvant déboucher sur une cartographie des surfaces résiduelles intéressantes (Figure 142, Figure 143 et Figure 144) à partir d'un indice de potentiel de recharge (PR) :

$$\text{PR} = \text{PC (potentiel de connexion)} \times \text{PL (potentiel lithologique)} \times \text{PP (potentiel de proximité)}$$

Dans cette démarche, le potentiel de proximité intègre les enjeux pouvant être sensibles aux exhaussements.

Figure 142



Protocole de détermination du potentiel de connexion entre les zones d'érosion de versant et les zones d'incision du cours principal (Liébault, 2003).

Figure 143

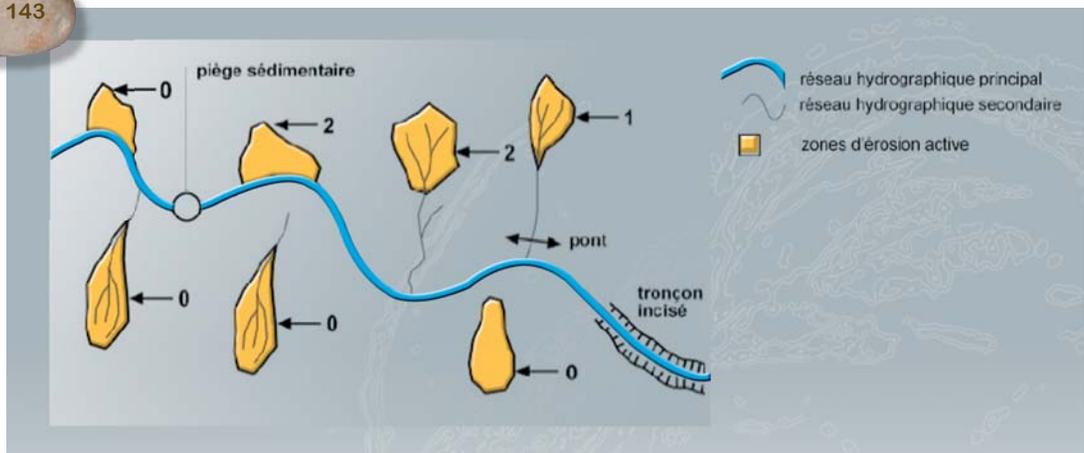
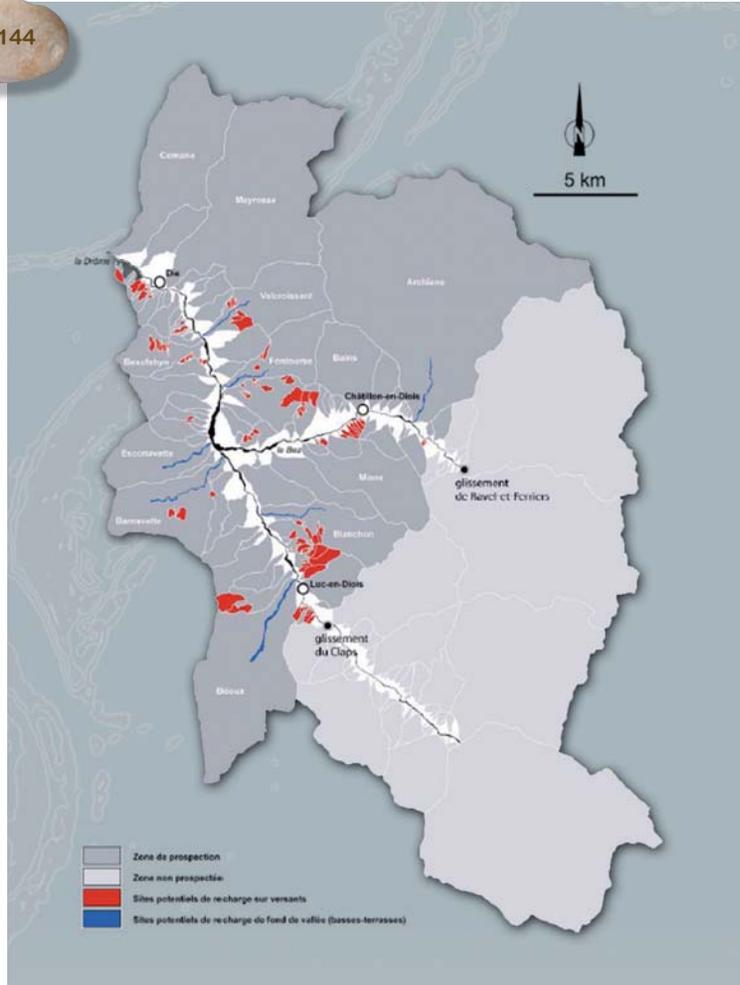


Schéma théorique du protocole de détermination du potentiel de connexion (Liébault, 2003).

Figure 144



Sites potentiels de recharge sédimentaire du bassin versant de la Drôme en amont de Die (Liébault, 2006).

Modes de gestion des atterrissements

Nous détaillerons ici les modes de gestion proposés pour les sites où ont été identifiés des enjeux et des aléas érosion/inondation justifiant une intervention à court ou moyen terme sur les atterrissements (niveaux 1 et 2 du Tableau 19).

Avant la mise en œuvre de cette phase, il importe de rechercher s'il n'existe pas de solutions alternatives à des mesures de terrassement sur les atterrissements :

- réduction de la vulnérabilité des enjeux éventuellement menacés ;
- modification des ouvrages bloquants si ceux-ci sont à l'origine du problème (élargissement de pont, ponceau, buse ; effacement partiel ou total d'un seuil générant un remous solide important ; élimination d'embâcles, etc.) ;
- interventions plus en amont : création de plages de dépôt en amont des zones à risques (attention toutefois aux risques de déficit sédimentaire en aval) ;
- protection de berges : si les atterrissements génèrent ou aggravent des processus d'érosion latérale au droit de sites à enjeux ;
- etc.

Attention. Sont présentées ici des méthodes et **principes de curage** ou d'**entretien des atterrissements**. Il ne s'agit en **aucun cas** de préconisations de **principes de recalibrage** (création, par terrassements intensifs, d'une nouvelle section d'écoulement), qui relèvent d'une toute autre approche.

La combinaison entre le stade d'évolution de l'atterrissement et celui du bilan sédimentaire du bassin versant nous conduit à envisager plusieurs scénarios possibles (Tableau 21).

Concernant le stade de végétalisation de l'atterrissement, trois situations sont possibles :

- stade A. Le dépôt est nu, du fait de la genèse récente de la forme ou de la remobilisation fréquente, par les crues, des matériaux le constituant ;
- stade B. Le dépôt commence à être colonisé par la végétation ;
- stade C. Le dépôt est franchement boisé, stabilisé, voire même en cours d'exhaussement par piégeage des matériaux apportés par les crues (« effet de peigne »).

Concernant le bilan sédimentaire du tronçon, là encore, trois états peuvent apparaître :

- état 1. Le bilan sédimentaire est positif et, dans ce cas là, son profil en long a plutôt tendance à s'exhausser ;
- état 2. Le bilan sédimentaire est stable et les entrées d'alluvions sont équivalentes à celles qui sortent du bassin versant ;
- état 3. Le bilan sédimentaire est déficitaire et son profil en long présente une incision plus ou moins forte. Dans tous les cas il convient d'adopter un mode de gestion permettant le suivi et le constat objectif avant toute intervention de prélèvements.



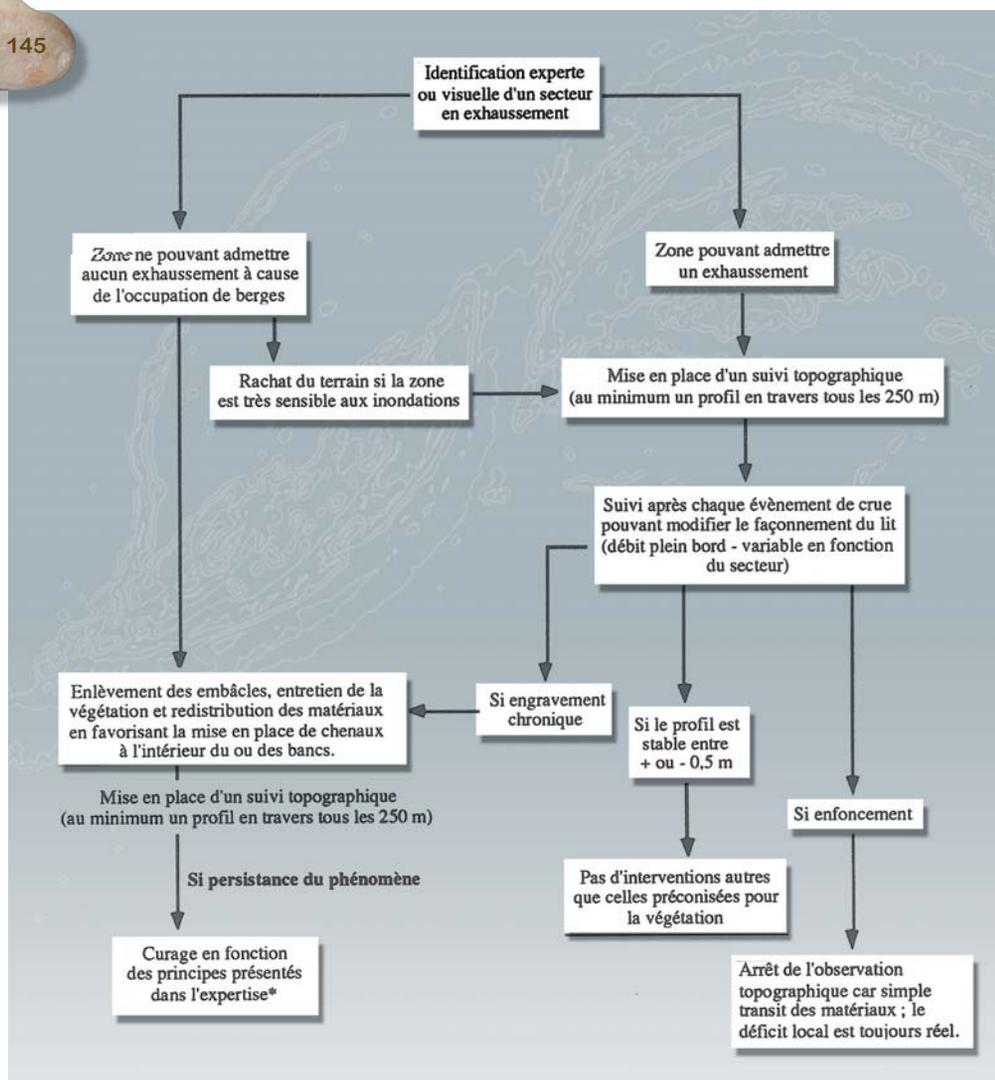
Tableau 21

Mode de gestion de gestion des atterrissements en fonction du bilan sédimentaire du cours d'eau ou du tronçon pris en compte (d'après CFPF, 1998 et Landon, 1999).

		Etat du bilan sédimentaire du cours d'eau		
		1 - Positif	2 - Stable	3 - Déficitaire
Stade de végétalisation de l'atterrissement	A Nu	Enlèvement des matériaux possible sous certaines conditions : 1. l'atterrissement doit être chronique et présenter un risque déterminant pour les riverains (inondation, érosion de berges) 2. la globalité des prélèvements effectués sur l'ensemble du cours d'eau ne doit pas créer un bilan sédimentaire négatif	L'enlèvement des matériaux doit rester une solution exceptionnelle pour ne pas déséquilibrer le bilan sédimentaire. Remaniement pour favoriser la remise en mouvement et atténuer l'inondabilité.	Aucun prélèvement de matériaux. Remaniement pour favoriser leur remise en mouvement et atténuer l'inondabilité. Si prélèvement alors transfert des matériaux vers un tronçon très incisé.
	B Végétalisé	3. le curage réalisé localement doit être effectué en limitant les impacts négatifs sur l'hydrosystème, ses milieux annexes et les ouvrages d'arts 4. l'enlèvement de la végétation et des embâcles	L'enlèvement des matériaux doit rester une solution exceptionnelle. Enlèvement d'une partie de la végétation pour réaliser un chenal de crue qui favorisera un fonctionnement et une régénérescence naturelle	Aucun prélèvement de matériaux. Enlèvement d'une partie de la végétation pour réaliser un chenal de crue. Si prélèvement d'alluvions alors transfert vers un tronçon très incisé.
	C Boisé	doit être une solution exceptionnelle. Un entretien régulier, préventif et sectorisé est souhaitable.	des milieux. Remaniement des matériaux pour favoriser la remise en mouvement et atténuer l'inondabilité.	Certains embâcles peuvent être remaniés pour favoriser l'entrée du flux dans le nouveau chenal.

Nous avons proposé, dans le cadre de la gestion des atterrissements de la Drôme, le protocole présenté sur la Figure 145.

Figure 145



Protocole concernant le suivi des secteurs présentant un exhaussement susceptible d'entraîner une augmentation des risques lié au débordement (Landon, 1999).

■ Détermination des profils au droit des sites d'intervention

Quatre types de profils seront déterminés pour tous les sites où des processus hydrosédimentaires menacent à court terme des enjeux forts :

- des **profils (ou sections) limites** qui fixeront les cotes (ou sections d'écoulement) à ne pas dépasser pour garantir l'objectif de protection des enjeux identifiés ;
- des **profils (ou sections) d'alerte** qui fixeront les cotes (ou sections d'écoulement) à partir desquelles une intervention pourra être réalisée sur les atterrissements concernés, afin justement de ne pas atteindre ces valeurs limites ;
- des **profils (ou sections) à atteindre** qui donneront les caractéristiques des travaux à réaliser. Avec une option « profil de sécurité » pour les rivières à fort transport solide ;
- et enfin, des **cotes de préservation** seront déterminées qui donneront les valeurs de cotes en dessous desquelles il ne faudra pas descendre pour préserver les éventuels autres enjeux de la zone concernée.

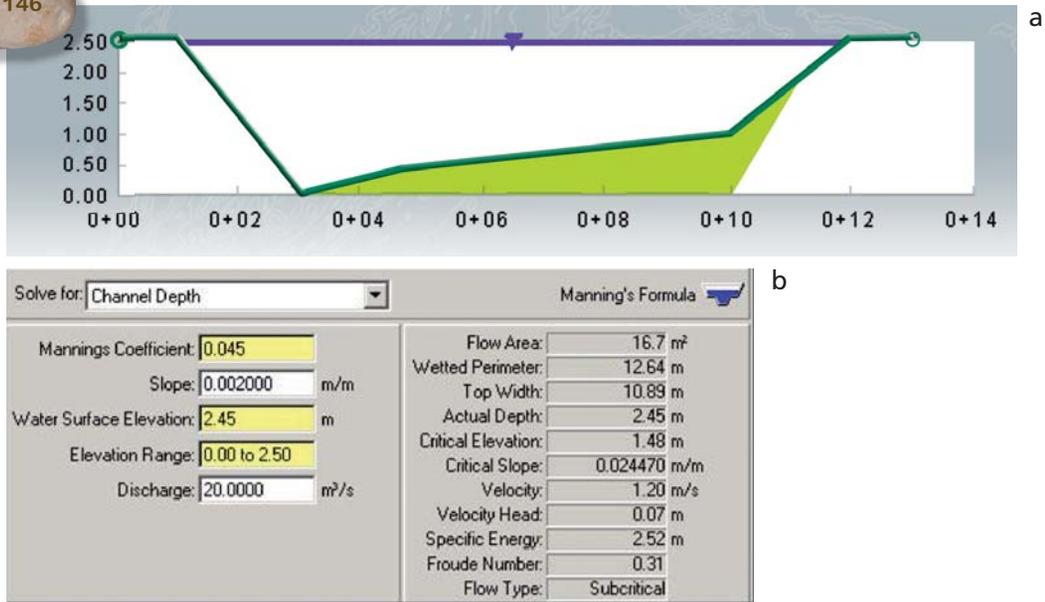
Protocole minimal

On calculera la section nécessaire à l'évacuation de la crue de projet sur l'ensemble du linéaire concerné par l'aléa inondation et particulièrement au droit du (des) banc(s) alluvial(aux) identifié(s) comme problématique(s). Cette approche sera donc réalisée a minima sur **un profil type au droit de l'atterrissement concerné** au moyen de la formule de Manning ou en utilisant un logiciel hydraulique simple.

1- Détermination de la section limite

Pour le cas fictif présenté (traversée de village), le débit de projet est de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondant à Q50ans. Il apparaît par calcul hydraulique simple que la section limite d'écoulement est de l'ordre de $16,7 \text{ m}^2$. Elle est atteinte pour le type de configuration de la Figure 146, caractérisée par la présence d'un banc latéral.

Figure 146



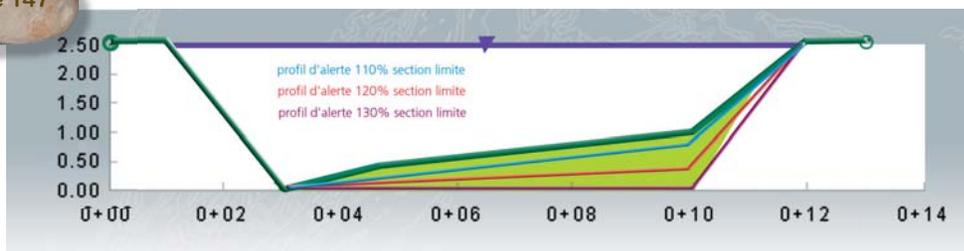
Exemple de calcul hydraulique simple (ici au moyen du logiciel Flowmaster ©) au droit d'un profil en travers type.

2- Choix du profil ou de la section d'alerte

La question est plus complexe qu'il n'y paraît :

- attendons-nous d'avoir atteint la section limite d'écoulement pour intervenir ? Dans ce cas la section limite est une **section d'alerte** ;
- le problème est que si une crue survient entre le moment du constat d'atteinte de la section limite et la réalisation des travaux, il y a risque d'inondation ;
- intervenons-nous avant, dès qu'un certain pourcentage de réduction de la section est atteint ? C'est la solution idéale mais il faudrait, pour ne pas surestimer la nécessité d'intervenir, avoir une assez bonne connaissance des apports solides au droit du site et des probabilités d'alluvionnement en crue moyenne et rare. En l'absence de données ou en cas de forte incertitude sur les « apports solides » et « risques d'alluvionnement », on peut proposer une méthode simpliste basée sur un l'évaluation de l'atteinte d'un certain **pourcentage de la section limite**. Dans l'exemple de la figure 147, trois sections d'alerte à **110 %, 120 % et 130 % de la section limite** (ou du débit capable limite) sont présentées. Si 110 % semble un peu juste pour garantir l'absence de risque (sauf si l'on sait que les apports, même en crue rare, sont modestes), 130 % correspond ici à une section trapézoïdale très pénalisante du point de vue du fonctionnement écologique d'un cours d'eau. Un choix médian peut être un bon compromis.

Figure 147



Exemple de diverses possibilités de choix d'un profil d'alerte. Le choix le plus pertinent n'est possible que si l'on possède une bonne connaissance des apports solides moyens en ce point et des probabilités d'alluvionnement en période de crue.

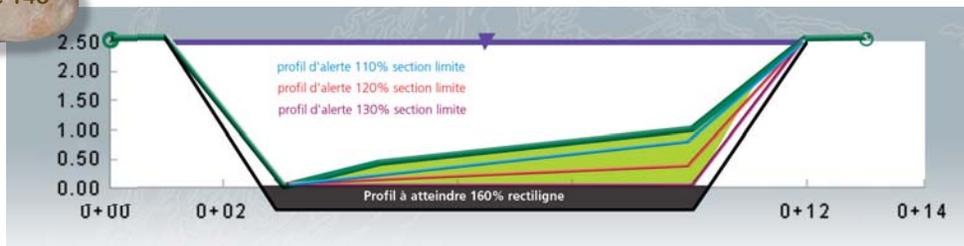
3- Choix du profil ou de la section à atteindre

Il s'agit en fait de définir l'ampleur des terrassements à entreprendre sur le site d'atterrissement. Là encore plusieurs possibilités sont offertes :

- recherche d'une sécurité minimale. On peut attendre le profil d'alerte à 110 % de la section limite et curer le lit jusqu'à l'atteinte d'une section correspondant à 120 % ;
- recherche d'une sécurité moyenne. La section d'alerte est à 120 % et le curage jusqu'à la section correspondant à 130 % ;
- recherche d'une sécurité maximale. Elle peut éventuellement se justifier sur les rivières à fort transport solide, notamment en crue rare. On vise alors une marge de sécurité de 50 à 60 % (Figure 148).

Attention. Ce dernier type de profil s'apparente plus à un **recalibrage** qu'à un curage ou une gestion d'atterrissement.

Figure 148



Exemple de diverses possibilités de choix d'un profil à atteindre. Cela peut être l'un des profils d'alerte précédents ou la recherche d'une forte marge de sécurité, notamment sur les cours d'eau à charge solide importante et aux apports difficilement prévisibles.

4- Détermination des cotes de préservation

Cette dernière phase nécessite d'identifier les enjeux, considérés comme au moins aussi importants que ceux liés aux risques érosion/inondation, et qui pourraient être menacés en cas de travaux sur les atterrissements. Ce pourrait être le cas, par exemple, d'un ouvrage d'art (pont, digue, mur de soutènement) situé en amont ou en aval de la zone à traiter, pouvant être déchaussé par un processus d'érosion régressive ou progressive provenant de la zone curée. Ce pourrait être le cas aussi des autres enjeux liés à un niveau de nappe haute (captages AEP en nappe, zones humides et annexes hydrauliques du lit majeur).

Outre la connaissance des enjeux éventuellement concernés, cette étape nécessite une évaluation des **cotes limites** en dessous desquelles il serait souhaitable de ne pas descendre :

- au droit des travaux ;
- dans l'emprise d'érosion régressive ou progressive qui pourrait être générée par les travaux.

Cela implique donc une connaissance des **cote limites pour chaque enjeu** (elles ne seront pas les mêmes pour l'AEP, les milieux naturels et les ouvrages d'art), qui peuvent être évaluées sommairement ou par des études plus approfondies (études géotechniques sur les ouvrages, étude ou modélisation des relations nappe/rivière, étude écologique des zones humides et de leurs exigences hydrologiques, etc.).

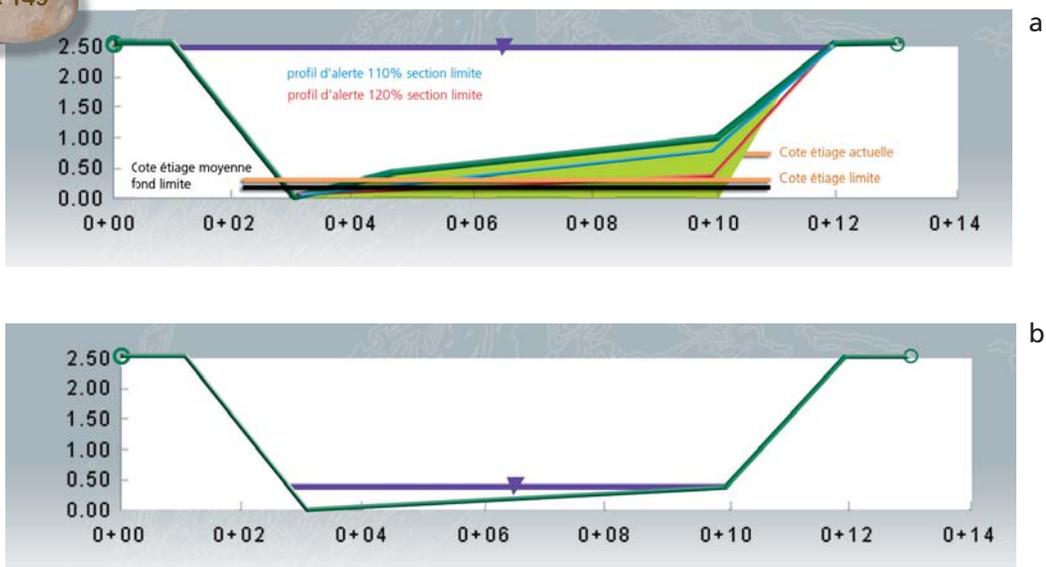
Cela implique aussi, ce qui est plus complexe, une **évaluation des risques d'incision par érosion régressive ou progressive** :

- linéaire concerné (vers l'amont et vers l'aval) ;
- niveaux d'incision probable.

Ce niveau de connaissance ne peut être atteint qu'au moyen d'une étude nécessitant une forte expertise et éventuellement la mise en œuvre d'un modèle de transport solide.

Bien réalisée cette analyse peut conduire à des profils du type présenté sur la figure 149.

Figure 149



Exemple de figure représentant un profil type : profil d'alerte à 110 % de la section limite de pleins bords, profil à atteindre à 120 %, qui correspond au maintien d'une cote limite d'étiage (déterminée pour les enjeux AEP et milieux humides liés à la nappe alluviale) et les cotes limites du fond (pour limiter les risques d'affouillement des ouvrages situés dans l'emprise d'impact des travaux). La figure b présente la cote d'étiage calculée pour le profil à atteindre.

NB A une simple évaluation d'une cote limite d'étiage peut éventuellement être associée aussi une profondeur limite, qui permet d'intégrer localement la notion d'habitat aquatique et de formuler des préconisations en termes de **forme de la section à atteindre** : par exemple le maintien d'un talweg d'étiage un peu plus profond ou simplement d'une **section dissymétrique**.

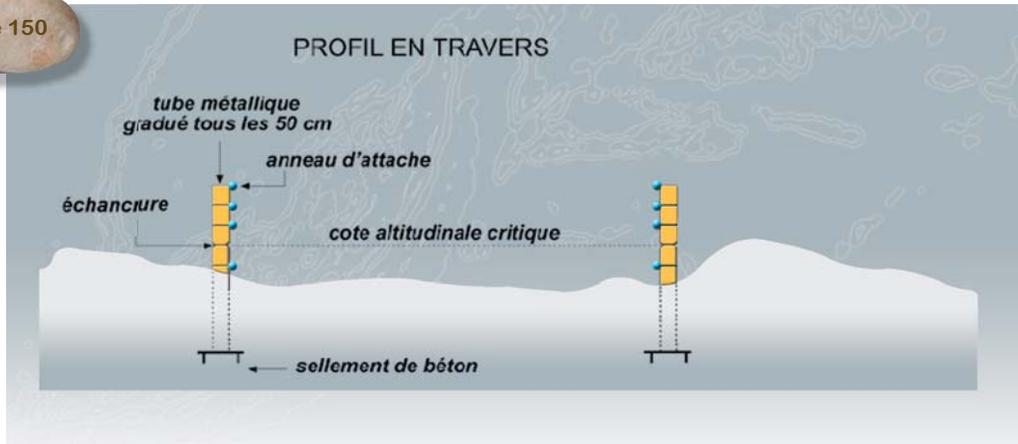
Protocole optimal

Dans la mesure du possible, une **modélisation hydraulique simple** (modèle filaire monodimensionnel) permettra d'améliorer la connaissance des écoulements sur l'ensemble du linéaire concerné par les problématiques d'érosion/inondation qui n'est que partiellement rendue par un calcul « à la section ».

La mise en œuvre de ce type de modèle, qui nécessitera des levés topographiques plus nombreux qu'un ou deux profils types au droit du banc à traiter, permettra éventuellement l'exploitation d'un modèle numérique de transport solide.

Dans les secteurs à enjeux, il est possible d'envisager une surveillance tenant compte des différentes cotes sans avoir recours au levé topographique (coûteux) mais en utilisant des repères visuels (Figure 150)

Figure 150



Dispositif de suivi topographique proposé pour des plages de dépôt sur la haute Drôme (Liébault et al., 2002).

■ Modes d'intervention possible

Une fois les différents profils et cotes déterminés, et s'il n'existe pas de solution alternative, différents modes d'intervention sur les atterrissements concernés sont envisageables pour atteindre les profils déterminés.

Ils sont présentés ci-après du moins au plus pénalisant :

■ dévégétalisation des bancs sur lesquels la végétation :

- ⇒ réduit notablement la section d'écoulement,
- ⇒ empêche la remobilisation des matériaux et leur transit vers l'aval ; cette dévégétalisation ne doit pas se réduire à une coupe des ligneux mais doit s'accompagner d'un dessouchage et d'une scarification du banc afin de faciliter le remaniement du dépôt par les crues ;

■ curage des matériaux et régilage sur place sur une longueur et une épaisseur permettant d'atteindre les sections d'écoulement appropriées :

- ⇒ impact, plus ou moins temporaire, sur les habitats aquatiques de la zone concernée (éviter de toucher aux frayères actives ou potentielles) ;

■ curage des matériaux et régilage sur place avec éventuellement redépôt partiel le long de la rive concave érodée si, l'érosion latérale est le problème principal :

- ⇒ cela peut se traduire par la disparition, provisoire, d'un faciès de type mouille généralement présent en lit mineur dans les concavités) ;

■ création de chenaux préférentiels d'écoulement dans les bancs épais et redépôt des matériaux sur place ; cette méthode permet la reprise de matériaux parfois figés tout en réduisant les pressions hydrauliques (et donc les processus d'érosion) sur la rive opposée au banc (Figure 151) :

- ⇒ l'impact se fait sentir surtout au niveau des milieux naturels du lit moyen (grèves) ;

■ curage des matériaux et retrait du lit, si possible avec redépôt en aval dans une zone incisée :

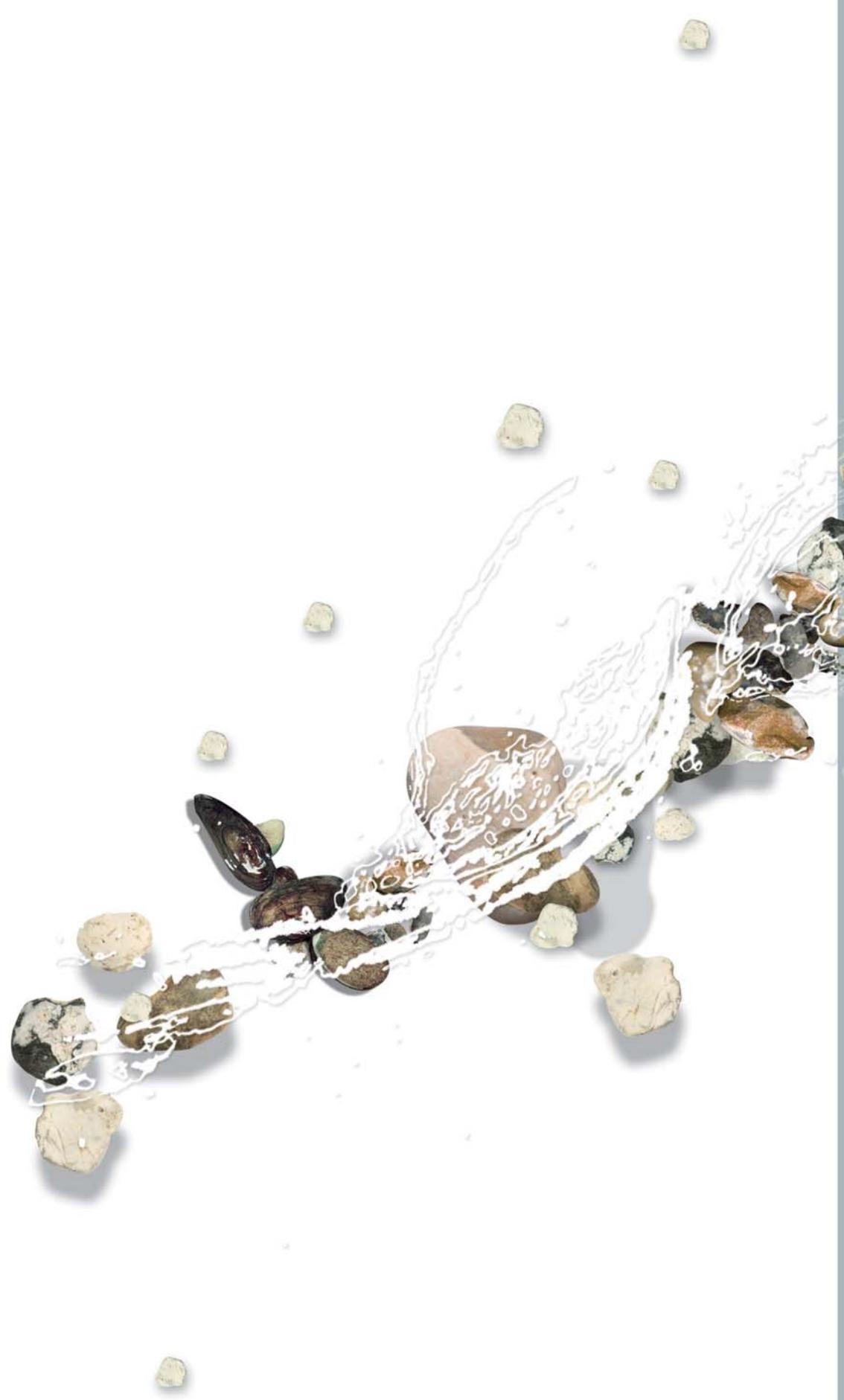
- ⇒ **attention** toutefois au bilan écologique global et notamment au bilan **carbone** ; un camion moyen peut transporter environ 10 m³ de granulats,
- ⇒ régilage sur place (impact, plus ou moins temporaire, sur les habitats aquatiques de la zone de dépôt (éviter de toucher aux frayères actives ou potentielles),
- ⇒ redépôt en cordon le long de la rive afin que le cours d'eau réalise lui-même le travail de réinjection des matériaux.

Figure 151

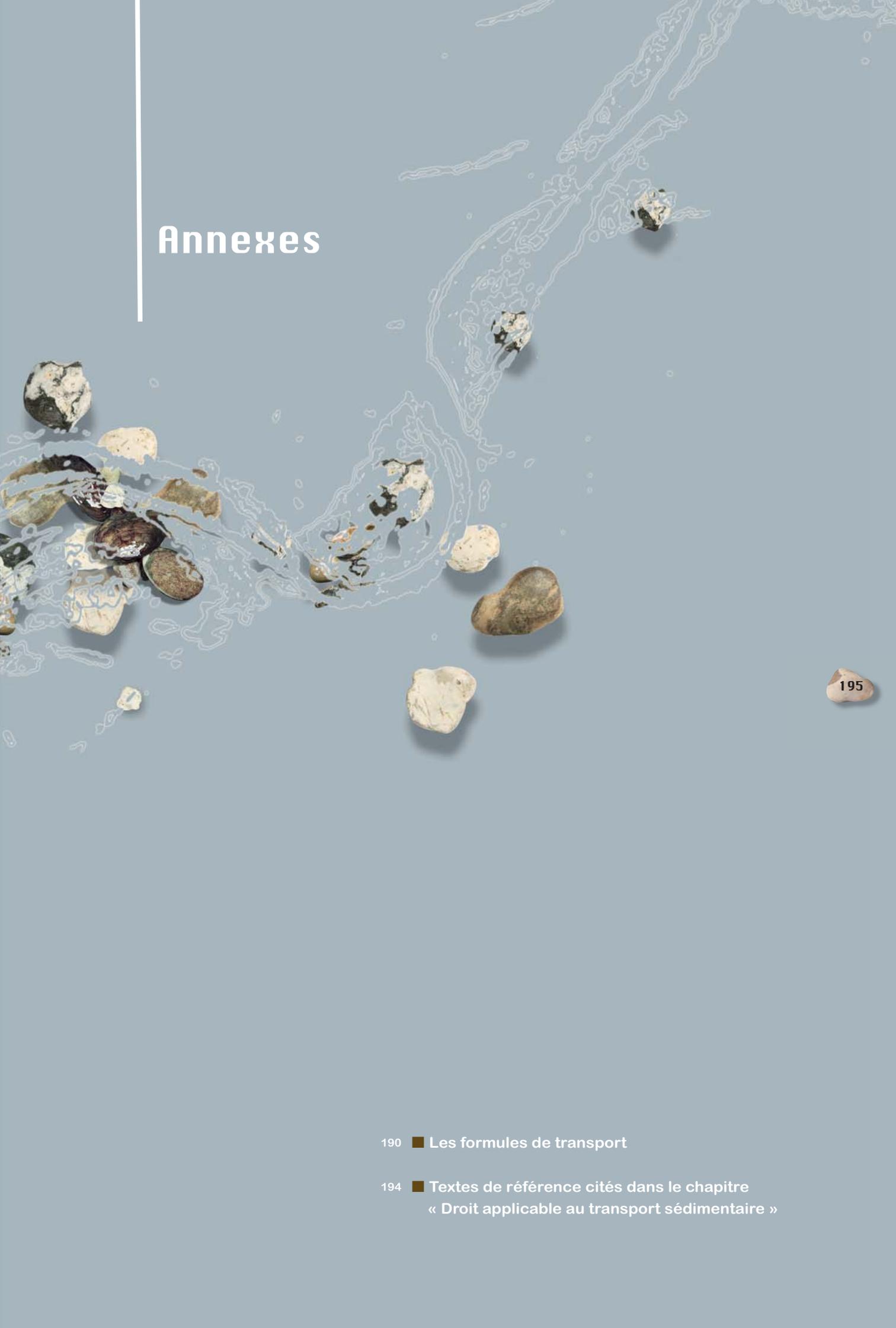


© J.R. Malavoi

Exemple de chenal de crue au sein d'un banc alluvial massif. Les matériaux curés sont laissés sur place et repris au fil des crues.



Annexes



190 ■ Les formules de transport

194 ■ Textes de référence cités dans le chapitre
« Droit applicable au transport sédimentaire »

Les formules de transport

Ackers et White [1973]

$$q_{st} [m^3 / s / m] = 0.025 \frac{q D_{35}}{H} \left[\frac{F_{gr}}{0.17} - 1 \right]^{1.5}$$

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{g(s-1)D_{35}}} \left[\frac{10U}{\sqrt{D_{35}}} \right]$$

Cette formule s'applique pour des nombre de Froude $Fr < 0,8$, c'est à dire plutôt pour des rivières de plaine [Bathurst, et al., 1987]

Bagnold [1980]

$$q_s [m^3 / s / m] = \frac{q_b^*}{\rho_s - \rho} \left[\frac{\omega - \omega_c}{(\omega - \omega_c)^*} \right]^{3/2} \left(\frac{H}{H^*} \right)^{-2/3} \left(\frac{D_m}{D^*} \right)^{-0.5}$$

avec H la hauteur d'eau, ω et ω_c respectivement la puissance hydraulique et la puissance hydraulique critique du flux :

$$\omega = \rho g s U = \rho g s$$

Le terme de gravité g a été exclu de cette définition par Bagnold. La puissance critique est donnée par la relation :

$$\omega_c = 290 D^{3/2} \log \left(12 \frac{H}{D} \right)$$

Le signe * désigne les valeurs numériques standards issues de l'expérimentation et utilisées pour rendre adimensionnels les termes de l'équation. Les valeurs proposées par Bagnold sont :

$q_s^* = 0,1 \text{ kg.m-1s-1}$, $(\omega - \omega_c)^* = 0,5 \text{ kg.m-1s-1}$, $H^* = 0,1 \text{ m}$ et $D^* = 0,0011 \text{ m}$.

Einstein Brown [1950]

Proposé par Brown (1950) à partir d'un lissage de l'abaque d'Einstein (1950)

$$q_s [m^3 / s / m] = \sqrt{g(s-1)D^3} \left[\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{g(s-1)D^3} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{g(s-1)D^3}} \right] f(\theta)$$

$$f(\theta) = 2.15 \theta^{0.25} \quad \text{si } \theta < 0,18$$

$$f(\theta) = 100 \quad \text{si } \theta > 0,18$$

est la viscosité cinématique du fluide (10-6 m²/s à 20°C)

Engelund et Hansen [1967]

Equation déduite du concept de puissance de l'écoulement de Bagnold [1966] et du principe de similarité :

$$q_v [m^3/s/m] = \frac{0.1}{f} \sqrt{g(s-1)} D_{50}^3 \theta^{5/3}$$

Le facteur de rugosité f étant défini par $f = 2gRS/U^2$

Lefort-Sogreah [1991]

Formule simplifiée permettant un calcul du débit solide apparent (tenant compte des vides) total à partir du débit total Q en considérant un ratio largeur du lit sur hauteur d'eau constant : $B/H=18$.

$$Q_{v,apparent} [m^3/s] = Q^{4/5} \left(\frac{d_{50}}{d_{90}} \right)^{22} S^{1.5} \left[1 - \left(\frac{Q_c}{Q} \right)^{0.572} \right]$$

avec :

$$Q_c = 0.0776 \sqrt{g D_m^5} \frac{(s-1)^{8/3}}{S_0^{13/6}} (1-1.2S)^{8/3}$$

Meyer-Peter et Mueller [1948]

$$q_v [m^3/s/m] = 8 \sqrt{g(s-1)} D_{50}^3 \left(\frac{K}{K'} \right)^{3/2} \left(\theta - 0.047 \right)^{3/2}$$

avec $\rho_s = 2650 \text{ kg.m}^{-3}$, $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ et $s = 2.65$. Le ratio K/K' est le ratio entre le coefficient de Strickler de l'écoulement K et le Strickler du grain K' , et permet de corriger la contrainte totale pour ne tenir compte que de la contrainte appliquée au grain. Le terme K est donné par $K = U/S^{1/2} R^{2/3}$ et le terme K' est calculé avec l'équation de Strickler [1923]: $K' = 26/D^{901/6}$.

Mizuyama [1977]

$$q_v [m^3/s/m] = \sqrt{g(s-1)} D_{50}^3 \left[\frac{12 - 24\sqrt{S}}{\cos(\text{atan}(S))} \theta^{(1.5-\sqrt{S})} \left(1 - \alpha^2 \frac{\theta_c}{\theta} \right) \left(1 - \alpha \sqrt{\frac{\theta_c}{\theta}} \right) \right]$$

avec :

$$\alpha = \frac{0.05 - 0.25S}{1 - 1.625S}$$

$$\theta_c = 0.04 \times 10^{-17.5S}$$

$$\theta = \frac{R S}{D_{50} (s-1)}$$

Parker [1979]

$$q_c [m^3/s/m] = 11.2 \sqrt{g(s-1)} D_{50}^2 \frac{(U - U_c)^{2.5}}{U_c^2}$$

Recking et al. [2008]

$$q_c [m^3/s/m] = 15.6 \sqrt{g(s-1)} D_{50}^2 (\theta - \theta_c)^2 \quad \text{si } \theta < 0.655 \theta_c^{0.7}$$

$$q_c [m^3/s/m] = 12 \sqrt{g(s-1)} D_{50}^2 \theta^{2.7} \quad \text{si } \theta > 0.655 \theta_c^{0.7}$$

avec $\theta_c = 0.135 S^{0.26}$

$$\theta = \frac{R - S}{D_{50} (s - 1)}$$

R étant calculé par itération avec :

$$\frac{Q(L-2R)}{R L^2 \sqrt{gRS}} = 6.25 + 5.75 \log \left(\frac{R}{\alpha_{RL} \alpha_{BR} D_{84}} \right)$$

où $\alpha_{BR} = 7 S^{0.65} \frac{R}{D_{50}}$ avec $1 \leq \alpha_{RL} \leq 3,5$

$\alpha_{BR} = 7 S^{0.65} \frac{R}{D_{50}}$ avec $1 < \alpha_{BR} \leq 2,6$

Rickenmann [1990]

$$q_c [m^3/s/m] = 1.5 (q - q_c) S^{1.2} \quad \text{pour } 0,0004 < S < 0,2$$

$$q_c [m^3/s/m] = \frac{12.6 (D_{50})^{2.2}}{(s-1)^{0.2} (D_{50})} (q - q_c) S^{1.2} \quad \text{pour } 0,03 < S < 0,2 \text{ (spécifique fortes pentes)}$$

Avec $q_c = 0.055 (s-1)^{0.7} g^{0.5} D_{50}^{1.5} S^{1.2}$

L'auteur propose (D90/D30)0,2 égale 1,05 si inconnu.

Schoklitsch [1962]

$$q_c [m^3/s/m] = \frac{2.5}{\rho_s / \rho} S^{3/2} (q - q_c)$$

Avec $q_c = 0.26 (s-1)^{5/3} \frac{D_{40}^{3/2}}{S^{7/6}}$

Généralement utilisé avec D50 de la surface du lit alors que la formule aurait été établie pour le D40 de la sous-couche d'après Bathurst [2007]

Smart et Jaeggi [1983]

$$q_c [m^3/s/m] = 4 \sqrt{g(s-1)} D_{50}^2 (d_m/d_{50})^{0.2} S^{0.5} \frac{U}{s^*} \theta^{2.5} (\theta - \theta_c)$$

avec $\frac{U}{s^*} = 2.5 \left[-\exp(-0.05 Z_m / S^{0.5}) \right]^{0.5} \ln(8.2 Z_m)$ avec $Z90=R/d90$

$$\theta_c(S) = 0.05 \cos(\arctg(S)) \left(\frac{S}{\tan \phi} \right)$$

$\phi = 35^\circ$ soit $35 \cdot 2\pi/360 = 0,61$ rd

Van Rijn[1984]

Développement semi-empirique, pour le charriage de matériaux vérifiant $D < 2 \text{ mm}$

$$q_s = 0.053 \sqrt{s-1} D_{50}^{2.5} \frac{T^{2.1}}{D_c^{0.5}}$$

avec:

$$D_* = D_{50} \left[\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{1/3}$$

$$T = \frac{u_*'^2 - u_{c*}'^2}{u_{c*}'^2}$$

$$u_*' = \sqrt{\frac{U}{18 \log \left(\frac{4R}{D_{90}} \right)}}$$

Avec les coefficients α et β déduits de la courbe de Shields :

D^*	α	β
$D^* < 4$	0,24	-1
$4 < D^* < 10$	0,14	-0,64
$10 < D^* < 20$	0,04	-0,10
$20 < D^* < 150$	0,013	0,29
$150 < D^*$	0,055	0

Yang [1984]

Equation adimensionnelle pour les graviers. La concentration C (en g/m^3) est donnée par :

$$\log C_g = 0.68 + 0.633 \log \left(\frac{w D_{50}}{\nu} \right) + 4.876 \log \left(\frac{u_*'}{w} \right) + 2.784 + 0.303 \log \left(\frac{w D_{50}}{\nu} \right) + 0.282 \log \left(\frac{u_*'}{w} \right) \left[\log \left(\frac{U_*'}{u_*'} \frac{U_*'}{w} \right) \right]$$

Avec respectivement w la vitesse de chute et u_*' la vitesse de frottement :

$$w = \sqrt{\frac{g(s-1)D_{50}^3}{C_d}}$$

$$u_*' = \tau/\rho = \sqrt{g\delta^3}$$

Par ailleurs les critères de début de mouvement définis par Yang (1973) sont tel que :

$$\frac{U_*'}{w} = \frac{2.5}{\log \left(\frac{u_*' D_{50}}{\nu} \right) - 0.66} \quad \text{pour} \quad 1.2 < \frac{u_*' D_{50}}{\nu} < 70$$

$$\frac{U_*'}{w} = 2.05 \quad \text{pour} \quad 70 < \frac{u_*' D_{50}}{\nu}$$

Textes de référence cités dans le chapitre « Droit applicable au transport sédimentaire »

Textes relatifs à l'entretien, au curage, retraits de sédiments et profil du cours d'eau

■ Niveau législatif :

L211-7 du code de l'environnement

I. - Les collectivités territoriales et leurs groupements ainsi que les syndicats mixtes créés en application de l'article L. 5721-2 du code général des collectivités territoriales **sont habilités à utiliser les articles L. 151-36 à L. 151-40 du code rural pour entreprendre l'étude, l'exécution et l'exploitation de tous travaux, actions, ouvrages ou installations présentant un caractère d'intérêt général** ou d'urgence, dans le cadre du schéma d'aménagement et de gestion des eaux s'il existe, et visant :

1° **l'aménagement d'un bassin** ou d'une fraction de bassin hydrographique ;

2° **l'entretien et l'aménagement d'un cours d'eau**, canal, lac ou plan d'eau, y compris les accès à ce cours d'eau, à ce canal, à ce lac ou à ce plan d'eau ;

(...)

L151-36 du code rural

Les départements, les communes ainsi que les groupements de ces collectivités et les syndicats mixtes créés en application de l'article L. 5721-2 du code général des collectivités territoriales peuvent prescrire ou exécuter les travaux entrant dans les catégories ci-dessous définies, lorsqu'ils présentent, du point de vue agricole ou forestier, un caractère d'intérêt général ou d'urgence :

(...)

Les personnes morales mentionnées au premier alinéa prennent en charge les travaux qu'elles ont prescrits ou exécutés. Elles peuvent toutefois, dans les conditions prévues à l'article L. 151-37, faire **participer aux dépenses de premier établissement, d'entretien et d'exploitation des ouvrages les personnes qui ont rendu les travaux nécessaires ou qui y trouvent intérêt.**

Lorsque le montant de la participation aux travaux est supérieur au tiers de la valeur avant travaux du bien immobilier qui en bénéficie, le propriétaire peut exiger de la personne morale qu'elle acquière son bien dans un délai de deux ans à compter du jour de la demande. A défaut d'accord amiable sur le prix à l'expiration du délai, le juge de l'expropriation, saisi par le propriétaire ou la personne morale, prononce le transfert de propriété et fixe le prix du bien.

L151-37 du code rural

Le programme des travaux à réaliser est arrêté par la ou les personnes morales concernées. Il prévoit la **répartition des dépenses** de premier établissement, d'exploitation et d'entretien des ouvrages entre la ou les personnes morales et les personnes mentionnées à l'article L. 151-36. **Les bases générales de cette répartition sont fixées compte tenu de la mesure dans laquelle chacune a rendu les travaux**

nécessaires ou y trouve un intérêt. Le programme définit, en outre, les modalités de l'entretien ou de l'exploitation des ouvrages qui peuvent être confiés à une association syndicale autorisée à créer. Le programme des travaux est soumis à enquête publique par le préfet, selon une procédure prévue par décret en Conseil d'État.

L'enquête publique mentionnée à l'alinéa précédent vaut enquête préalable à la déclaration d'utilité publique des opérations, acquisitions ou expropriations éventuellement nécessaires à la réalisation des travaux.

Le caractère d'intérêt général ou d'urgence des travaux ainsi que, s'il y a lieu, l'utilité publique des opérations, acquisitions ou expropriations nécessaires à leur réalisation sont prononcés par arrêté ministériel ou par arrêté préfectoral.

Toutefois, l'exécution des travaux est dispensée d'enquête publique lorsqu'ils sont nécessaires pour faire face à des situations de péril imminent, qu'ils n'entraînent aucune expropriation et que le maître d'ouvrage ne prévoit pas de demander de participation financière aux personnes intéressées. Il est cependant procédé comme indiqué à l'article 3 de la loi du 29 décembre 1892 sur les dommages causés à la propriété privée par l'exécution des travaux publics.

Sont également dispensés d'enquête publique, sous réserve qu'ils n'entraînent aucune expropriation et que le maître d'ouvrage ne prévoit pas de demander une participation financière aux personnes intéressées, les travaux portant sur un cours d'eau couvert par un schéma mentionné à l'article L. 212-3 du code de l'environnement, directement liés à une inondation déclarée catastrophe naturelle en application de l'article L. 125-1 du code des assurances, réalisés dans les trois ans qui suivent celle-ci et visant à rétablir le cours d'eau dans ses caractéristiques naturelles.

Les dépenses relatives à la mise en oeuvre de cette procédure sont à la charge de la ou des collectivités qui en ont pris l'initiative.

L151-37 -1 du code rural

Il peut être institué une servitude de passage permettant l'exécution des travaux ainsi que l'exploitation et l'entretien des ouvrages. Le projet d'institution de servitude est soumis à une enquête publique. L'enquête mentionnée à l'article L. 151-37 peut en tenir lieu. Les propriétaires ou occupants des terrains grevés de cette servitude de passage ont droit à une indemnité proportionnée au dommage qu'ils subissent, calculée en tenant compte des avantages que peuvent leur procurer l'exécution des travaux et l'existence des ouvrages ou installations pour lesquels cette servitude a été instituée. Les contestations relatives à cette indemnité sont jugées comme en matière d'expropriation pour cause d'utilité publique.

L151-38 du code rural

Les départements, les communes ainsi que les groupements de ces collectivités et les syndicats mixtes créés en application de l'article L. 5721-2 du code général des collectivités territoriales sont, ainsi que leurs concessionnaires, investis, pour la réalisation des travaux, de tous les droits et servitudes dont disposent les associations syndicales autorisées.

Le recouvrement des cotisations des intéressés est effectué comme en matière de contributions directes.

Lorsqu'il s'agit d'un des aménagements mentionnés aux 1° et 2° du I de l'article L. 211-7 du code de l'environnement, il peut être procédé à l'expropriation des droits d'eau, exercés ou non, des propriétaires riverains, à l'exclusion de ceux qui sont exercés dans le cadre de concessions de forces hydrauliques, en application de la loi du 16 octobre 1919 relative à l'utilisation de l'énergie hydraulique.

(...)

L215-1 du code de l'environnement

Issu de la loi du 8 avril 1898 sur le régime des eaux

Les riverains n'ont le droit d'user de l'eau courante qui borde ou qui traverse leurs héritages que **dans les limites déterminées par la loi**. Ils sont tenus de se conformer, dans l'exercice de ce droit, **aux dispositions des règlements et des autorisations** émanant de l'administration.

L215-2 du code de l'environnement

Issu de la loi du 8 avril 1898 sur le régime des eaux

Modifié par Loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006 - art. 8 JORF 31 décembre 2006

Le lit des cours d'eau non domaniaux appartient aux propriétaires des deux rives.

Si les deux rives appartiennent à des propriétaires différents, chacun d'eux a la propriété de la moitié du lit, suivant une ligne que l'on suppose tracée au milieu du cours d'eau, sauf titre ou prescription contraire.

Chaque riverain a le droit de prendre, **dans la partie du lit qui lui appartient**, tous les produits naturels et d'en extraire de la vase, du sable et des pierres, **à la condition de** ne pas modifier le régime des eaux et **d'en exécuter** l'entretien conformément à l'article L. 215-14.

Sont et demeurent réservés les droits acquis par les riverains ou autres intéressés sur les parties des cours d'eau qui servent de voie d'exploitation pour la desserte de leurs fonds.

L215-14 du code de l'environnement

Issu de la loi du 8 avril 1898 sur le régime des eaux

Modifié par Loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006 - art. 8 JORF 31 décembre 2006

Sans préjudice des articles 556 et 557 du code civil et des chapitres Ier, II, IV, VI et VII du présent titre, le propriétaire riverain est tenu à un entretien régulier du cours d'eau. **L'entretien régulier** a pour objet de maintenir le cours d'eau dans son **profil d'équilibre**, de permettre **l'écoulement naturel des eaux** et de contribuer à son bon état écologique ou, le cas échéant, à son bon potentiel écologique, notamment par **enlèvement des embâcles, débris et atterrissements**, flottants ou non, par élagage ou recépage de la végétation des rives. Un décret en Conseil d'État détermine les conditions d'application du présent article.

L215-15 du code de l'environnement

Créé par Loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006 - art. 8 JORF 31 décembre 2006

I.-Les opérations groupées d'entretien régulier d'un cours d'eau, canal ou plan d'eau et celles qu'impose en montagne la sécurisation des torrents sont menées dans le cadre d'un plan de gestion établi à l'échelle d'une **unité hydrographique cohérente** et compatible avec les objectifs du schéma d'aménagement et de gestion des eaux lorsqu'il existe. L'autorisation d'exécution de ce plan de gestion au titre des articles L. 214-1 à L. 214-6 a une validité pluriannuelle.

Lorsque les collectivités territoriales, leurs groupements ou les syndicats mixtes créés en application de l'article L. 5721-2 du code général des collectivités territoriales prennent en charge cet entretien groupé en application de l'article L. 211-7 du présent code, l'enquête publique prévue pour la déclaration d'intérêt général est menée conjointement avec celle prévue à l'article L. 214-4. La déclaration d'intérêt général a, dans ce cas, une durée de validité de cinq ans renouvelable.

Le plan de gestion peut faire l'objet d'adaptations, en particulier pour prendre en compte des interventions ponctuelles non prévisibles rendues nécessaires à la suite d'une crue ou de tout autre événement naturel majeur et des interventions destinées à garantir la sécurité des engins nautiques non motorisés ainsi que toute opération s'intégrant dans un plan d'action et de prévention des inondations. Ces adaptations sont approuvées par l'autorité administrative.

II.-Le plan de gestion mentionné au I peut comprendre une phase de restauration prévoyant des interventions ponctuelles telles que le curage, si l'entretien visé à l'article L. 215-14 n'a pas été réalisé ou si celle-ci est nécessaire pour assurer la sécurisation des cours d'eau de montagne. Le **recours au curage doit alors être limité aux objectifs suivants** :

- remédier à un **dysfonctionnement du transport naturel des sédiments** de nature à remettre en cause les usages visés au II de l'article L. 211-1, à empêcher le libre écoulement des eaux ou à nuire au bon fonctionnement des milieux aquatiques ;
- lutter contre l'eutrophisation ;
- aménager une portion de cours d'eau, canal ou plan d'eau en vue de créer ou de rétablir un ouvrage ou de faire un aménagement.

Le dépôt ou l'épandage des produits de curage est subordonné à l'évaluation de leur innocuité vis-à-vis de la protection des sols et des eaux.

III.-Un décret en Conseil d'État détermine les conditions d'application du présent article.

L2124-11 du code général de la propriété des personnes publiques

L'entretien, tel que défini aux articles L. 215-14 et L. 215-15 du code de l'environnement, des **cours d'eau domaniaux** et de leurs dépendances est à la charge de la personne publique propriétaire du domaine public fluvial. Toutefois, les personnes qui ont rendu les travaux nécessaires ou y trouvent intérêt peuvent être appelées à contribuer au financement de leur entretien.

De même, les propriétaires de moulins ou d'usines qui ont rendu les travaux nécessaires ou qui trouvent intérêt aux travaux d'entretien ou de réparation des ouvrages de navigation, de levées, barrages, pertuis, écluses peuvent être appelés à contribuer à leur financement.

A défaut d'accord sur le montant de la participation mentionnée aux deux alinéas précédents, il est fait application des dispositions de l'article L. 211-7 du code de l'environnement.

■ Niveau réglementaire

R214-1 du code de l'environnement

Annexe : nomenclature IOTA :

3. 1. 2. 0. Installations, ouvrages, travaux ou activités conduisant à modifier **le profil en long ou le profil en travers du lit mineur** d'un cours d'eau, à l'exclusion de ceux visés à la rubrique 3. 1. 4. 0, ou conduisant à la dérivation d'un cours d'eau.

3. 2. 1. 0. Entretien de cours d'eau ou de canaux, à l'exclusion de l'entretien visé à l'article L. 215-14 réalisé par le propriétaire riverain, du maintien et du rétablissement des caractéristiques des chenaux de navigation, des dragages visés à la rubrique 4. 1. 3. 0 et de l'entretien des ouvrages visés à la rubrique 2. 1. 5. 0, le volume des sédiments extraits étant au cours d'une année :

1° Supérieur à 2 000 m³ (A) ;

2° Inférieur ou égal à 2 000 m³ dont la teneur des sédiments extraits est supérieure ou égale au niveau de référence S1 (A) ;

3° Inférieur ou égal à 2 000 m³ dont la teneur des sédiments extraits est inférieure au niveau de référence S1 (D). L'autorisation est valable pour une durée qui ne peut être supérieure à dix ans. L'autorisation prend également en compte les éventuels sous-produits et leur devenir.

R215-2 du code de l'environnement

Créé par Décret n°2007-1760 du 14 décembre 2007 - art. 7

L'entretien régulier du cours d'eau auquel est tenu le propriétaire en vertu de l'article L. 215-14 est assuré par le seul recours à l'une ou plusieurs des opérations prévues par ledit article et au faucardage localisé ainsi qu'aux anciens règlements et usages locaux relatifs à l'entretien des milieux aquatiques qui satisfont aux conditions prévues par l'article L. 215-15-1, et sous réserve que le déplacement ou l'enlèvement localisé de sédiments auquel il est le cas échéant procédé n'ait pas pour effet de modifier sensiblement le profil en long et en travers du lit mineur.

R215-3 du code de l'environnement

Créé par Décret n°2007-1760 du 14 décembre 2007 - art. 7

Les opérations groupées d'entretien régulier prévues par l'article L. 215-15 ont en outre pour objet de maintenir, le cas échéant, l'usage particulier des cours d'eau, canaux ou plans d'eau.

R215-4 du code de l'environnement

Créé par Décret n°2007-1760 du 14 décembre 2007 - art. 7

Toute opération d'entretien régulier à l'échelle d'une unité hydrographique cohérente projetée par l'État et ses établissements publics doit être effectuée selon les modalités prévues pour les opérations groupées par l'article L. 215-15.

R215-5 du code de l'environnement

Créé par Décret n°2007-1760 du 14 décembre 2007 - art. 7

L'autorisation pluriannuelle d'exécution du plan de gestion établi pour une opération groupée d'entretien, prévue par l'article L. 215-15, est accordée par le préfet pour cinq ans au moins.

Arrêté du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières (modifié par l'arrêté du 24 janvier 2001).

Art.1 :

Le présent arrêté fixe les prescriptions applicables aux exploitations de carrières (rubrique 2510 de la Nomenclature des installations classées) - à l'exception des opérations de dragage des cours d'eau et des plans d'eau et des affouillements du sol - et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières (broyage, concassage, criblage, nettoyage, etc., opérations correspondant à la rubrique 2515 de la Nomenclature des installations classées) qui sont implantées dans une carrière ou en dehors et qui relèvent du régime de l'autorisation.

L'arrêté d'autorisation peut fixer, en tant que de besoin, des dispositions plus contraignantes que celles prescrites ci-après.

(...)

Art. 11 :

11.2. Extraction en nappe alluviale :

I. - Les extractions de matériaux dans le lit mineur des cours d'eau et dans les plans d'eau traversés par des cours d'eau sont interdites.

Le lit mineur d'un cours d'eau est l'espace d'écoulement des eaux formé d'un chenal unique ou de plusieurs bras et de bancs de sables ou galets, recouvert par les eaux coulant à pleins bords avant débordement.

Si des extractions sont nécessaires à l'entretien dûment justifié ou à l'aménagement d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau, elles sont alors considérées comme un dragage.

II. - Les exploitations de carrières en nappe alluviale dans le lit majeur ne doivent pas créer de risque de déplacement du lit mineur, faire obstacle à l'écoulement des eaux superficielles ou aggraver les inondations.

Les exploitations de carrières de granulats sont interdites dans l'espace de mobilité du cours d'eau.

L'espace de mobilité du cours d'eau est défini comme l'espace du lit majeur à l'intérieur duquel le lit mineur peut se déplacer. L'espace de mobilité est évalué par l'étude d'impact en tenant compte de la connaissance de l'évolution historique du cours d'eau et de la présence des ouvrages et aménagements significatifs, à l'exception des ouvrages et aménagements à caractère provisoire, faisant obstacle à la mobilité du lit mineur. Cette évaluation de l'espace de mobilité est conduite sur un secteur représentatif du fonctionnement géomorphologique du cours d'eau en amont et en aval du site de la carrière, sur une longueur minimale totale de 5 kilomètres.

L'arrêté d'autorisation fixe la distance minimale séparant les limites de l'extraction des limites du lit mineur des cours d'eau ou des plans d'eau traversés par un cours d'eau. Cette distance doit garantir la stabilité des berges. Elle ne peut être inférieure à 50 mètres vis-à-vis des cours d'eau ayant un lit mineur d'au moins 7,50 mètres de largeur. Elle ne peut être inférieure à 10 mètres vis-à-vis des autres cours d'eau.

(...)

Arrêté du 30 mai 2008 fixant les prescriptions générales applicables aux opérations d'entretien de cours d'eau ou canaux soumis à autorisation ou à déclaration.

(...)

Article 3

Les **extractions de matériaux dans le lit mineur** ou dans l'espace de mobilité des cours d'eau ainsi que dans les plans d'eau traversés par des cours d'eau **sont interdites.**

Seuls **peuvent être effectués les retraits ou déplacements de matériaux liés au curage** d'un cours d'eau ou plan d'eau traversé par un cours d'eau répondant aux objectifs et aux conditions de réalisation fixés par le présent arrêté.

Le terme curage couvre toute opération en milieu aquatique impliquant la mobilisation de matériaux, même d'origine végétale, dans un canal ou dans le lit mineur ou l'espace de mobilité d'un cours d'eau.

Le lit mineur d'un cours d'eau est l'espace recouvert par les eaux coulant à pleins bords avant débordement. L'espace de mobilité du cours d'eau est défini comme l'espace du lit majeur à l'intérieur duquel le lit mineur peut se déplacer.

Article 4

Le programme intégré dans le dossier d'autorisation ou déclaration définit les interventions prévues sur la base d'un **diagnostic de l'état initial des milieux et d'un bilan sédimentaire** faisant ressortir les déséquilibres, en référence à l'objectif de bon état ou de bon potentiel fixé pour l'unité hydrographique concernée.

Cet état initial des lieux comporte :

- un report des principales zones de frayères
- un descriptif de la situation hydrobiologique, biologique et chimique
- une description hydromorphologique du secteur comprenant une délimitation des principales zones d'érosion et de dépôt de sédiments
- un descriptif des désordres apparents et de leurs causes, notamment dans le fonctionnement hydromorphologique du cours d'eau.

(...)

Textes relatifs à la préservation de la mobilité de cours d'eau

■ Niveau législatif

L211-12 du code de l'environnement

I. - Des **servitudes d'utilité publique** peuvent être instituées à la demande de l'État, des collectivités territoriales ou de leurs groupements sur des terrains riverains d'un cours d'eau ou de la dérivation d'un cours d'eau, ou situés dans leur bassin versant, ou dans une zone estuarienne.

II. - Ces servitudes peuvent avoir un ou plusieurs des objets suivants :

(...)

2° **Créer ou restaurer des zones de mobilité du lit mineur** d'un cours d'eau en amont des zones urbanisées dans des zones dites "zones de mobilité d'un cours d'eau", afin de préserver ou de restaurer ses caractères hydrologiques et géomorphologiques essentiels ;

(...)

II. - Les zones soumises aux servitudes visées aux 1° et 2° du II sont délimitées par arrêté préfectoral. Celui-ci est pris après enquête publique menée conformément au code de l'expropriation pour cause d'utilité publique. Les zones soumises aux servitudes visées au 3° du II sont délimitées conformément à l'article L. 212-5-1.

(...)

V. - Dans les zones de mobilité d'un cours d'eau mentionnées au 2° du II, ne peuvent être réalisés les travaux de protection des berges, remblais, endiguements et affouillements, les constructions ou installations et, d'une manière générale, tous les travaux ou ouvrages susceptibles de faire obstacle au déplacement naturel du cours d'eau. A cet effet, l'arrêté préfectoral peut soumettre à déclaration préalable, auprès des autorités compétentes en matière d'urbanisme, les travaux qui, en raison de leur nature, de leur importance ou de leur localisation, sont susceptibles de faire obstacle au déplacement naturel du cours d'eau et n'entrent pas dans le champ d'application des autorisations ou déclarations instituées par le code de l'urbanisme.

L'arrêté préfectoral peut également soumettre à **déclaration préalable les ouvrages** qui, en raison de leur nature, de leur importance ou de leur localisation, sont **susceptibles de faire obstacle au déplacement** naturel du cours d'eau et n'entrent pas dans le champ d'application des autorisations ou déclarations instituées par le code de l'urbanisme. Le préfet peut, par décision motivée, dans un délai de deux mois à compter de la réception de la déclaration, s'opposer à la réalisation de ces ouvrages ou prescrire les travaux nécessaires. Les travaux de réalisation de ces ouvrages ne peuvent commencer avant l'expiration de ce délai.

206

Pour les travaux visés au premier alinéa du présent V, ainsi que pour les travaux et ouvrages soumis à une autorisation ou à une déclaration instituée par le code de l'urbanisme et qui sont susceptibles, en raison de leur nature, de leur importance ou de leur localisation, de faire obstacle au déplacement naturel du cours d'eau, l'autorité compétente pour statuer en matière d'urbanisme recueille l'accord du préfet qui dispose d'un délai de deux mois à compter de la réception de la déclaration ou de la demande d'autorisation pour s'opposer à l'exécution des travaux ou prescrire les modifications nécessaires. Les travaux ne peuvent commencer avant l'expiration de ce délai.

(...)

VI. - L'arrêté préfectoral peut identifier, le cas échéant, les éléments existants ou manquants faisant obstacle à l'objet de la servitude, dont la suppression, la modification ou l'instauration est rendue obligatoire. La charge financière des travaux et l'indemnisation du préjudice pouvant résulter de ces derniers incombent à la collectivité qui a demandé l'institution de la servitude. Toutefois, si lesdits éléments appartiennent à l'État ou à ses établissements publics, la charge des travaux incombe à celui-ci.

(...)

VIII. - L'instauration des servitudes mentionnées au I ouvre droit à indemnités pour les propriétaires de terrains des zones grevées lorsqu'elles créent un préjudice matériel, direct et certain. Ces indemnités sont à la charge de la collectivité qui a demandé l'institution de la servitude. Elles sont fixées, à défaut d'accord amiable, par le juge de l'expropriation compétent dans le département.

(...)

X. - Pour une période de dix ans à compter de la date de publication de l'arrêté préfectoral constatant l'achèvement des travaux mentionnés au VI ou, si de tels travaux ne sont pas nécessaires, à compter de la date de publication de l'arrêté préfectoral instituant une ou plusieurs des servitudes mentionnées au I, le propriétaire d'une parcelle de terrain grevée par une de ces servitudes peut en requérir l'acquisition partielle ou totale par la collectivité qui a demandé l'institution de la servitude. Ce droit de délaissement s'exerce dans les conditions prévues aux articles L. 230-1 et suivants du code de l'urbanisme. Le propriétaire peut, dans le même temps, requérir l'acquisition partielle ou totale d'autres parcelles de terrain si l'existence de la servitude compromet leur exploitation ou leur usage dans des conditions similaires à celles existant avant l'institution de la servitude.

Textes relatifs au transport des sédiments

■ Niveau législatif

L212-5-1 du code de l'environnement

I. - Le schéma d'aménagement et de gestion des eaux comporte un plan d'aménagement et de gestion durable de la ressource en eau et des milieux aquatiques définissant les conditions de réalisation des objectifs mentionnés à l'article L. 212-3, notamment en évaluant les moyens financiers nécessaires à la mise en oeuvre du schéma.

Ce **plan** peut aussi :

(...)

2° Etablir un **inventaire des ouvrages hydrauliques** susceptibles de perturber de façon notable les milieux aquatiques et **prévoir des actions permettant d'améliorer le transport des sédiments** et de réduire l'envasement des cours d'eau et des canaux, en tenant compte des usages économiques de ces ouvrages ;

(...)

II. - Le schéma comporte également un **règlement** qui peut :

(...)

3° Indiquer, **parmi les ouvrages hydrauliques** fonctionnant au fil de l'eau figurant à l'inventaire prévu au 2° du I, ceux qui sont soumis, sauf raisons d'intérêt général, à une **obligation d'ouverture régulière de leurs vannages afin d'améliorer le transport naturel des sédiments et d'assurer la continuité écologique**.

L214-17 du code de l'environnement

1° Une liste de cours d'eau, parties de cours d'eau ou canaux parmi ceux qui sont en très bon état écologique ou identifiés par les schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux comme jouant le rôle de réservoir biologique nécessaire au maintien ou à l'atteinte du bon état écologique des cours d'eau d'un bassin versant ou dans lesquels une protection complète des poissons migrateurs vivant alternativement en eau douce et en eau salée est nécessaire, sur lesquels **aucune autorisation** ou concession ne peut être accordée pour **la construction de nouveaux ouvrages s'ils constituent un obstacle à la continuité écologique**.

(...)

2° Une liste de cours d'eau, parties de cours d'eau ou canaux dans lesquels il est **nécessaire d'assurer le transport suffisant des sédiments** et la circulation des poissons migrateurs. Tout ouvrage doit y être géré, entretenu et équipé selon des règles définies par l'autorité administrative, en concertation avec le propriétaire ou, à défaut, l'exploitant.

■ Niveau réglementaire

R214-1 du code de l'environnement

ANNEXE : nomenclature IOTA :

3. 1. 1. 0. Installations, ouvrages, remblais et épis, dans le lit mineur d'un cours d'eau, constituant : 1° Un obstacle à l'écoulement des crues (A) ; 2° Un obstacle à la continuité écologique : a) entraînant une différence de

niveau supérieure à 50 cm, pour le débit moyen annuel de la ligne d'eau entre l'amont et l'aval de l'ouvrage ou l'installation (A) ; b) entraînant une différence de niveau supérieure à 20 cm mais inférieure à 50 cm, pour le débit moyen annuel de la ligne d'eau entre l'amont et l'aval de l'ouvrage ou l'installation (D).

Au sens de la présente rubrique, la continuité écologique des cours d'eau se définit par la libre circulation des espèces biologiques et par le **bon déroulement du transport naturel des sédiments**.

R214-109 du code de l'environnement

Constitue un obstacle à la continuité écologique, au sens du 1° du I de l'article L. 214-17 et de l'article R. 214-1, l'ouvrage entrant dans l'un des cas suivants :

- 1° Il ne permet pas la libre circulation des espèces biologiques, notamment parce qu'il perturbe significativement leur accès aux zones indispensables à leur reproduction, leur croissance, leur alimentation ou leur abri ;
- 2° Il empêche le bon déroulement du transport naturel des sédiments ;
- 3° Il interrompt les connexions latérales avec les réservoirs biologiques ;
- 4° Il affecte substantiellement l'hydrologie des réservoirs biologiques.

DCE Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau

■ **ANNEXE V**

1. État des eaux de surface

1.1. Éléments de qualité pour la classification de l'état écologique

1.1.1. Rivières

Paramètres biologiques :

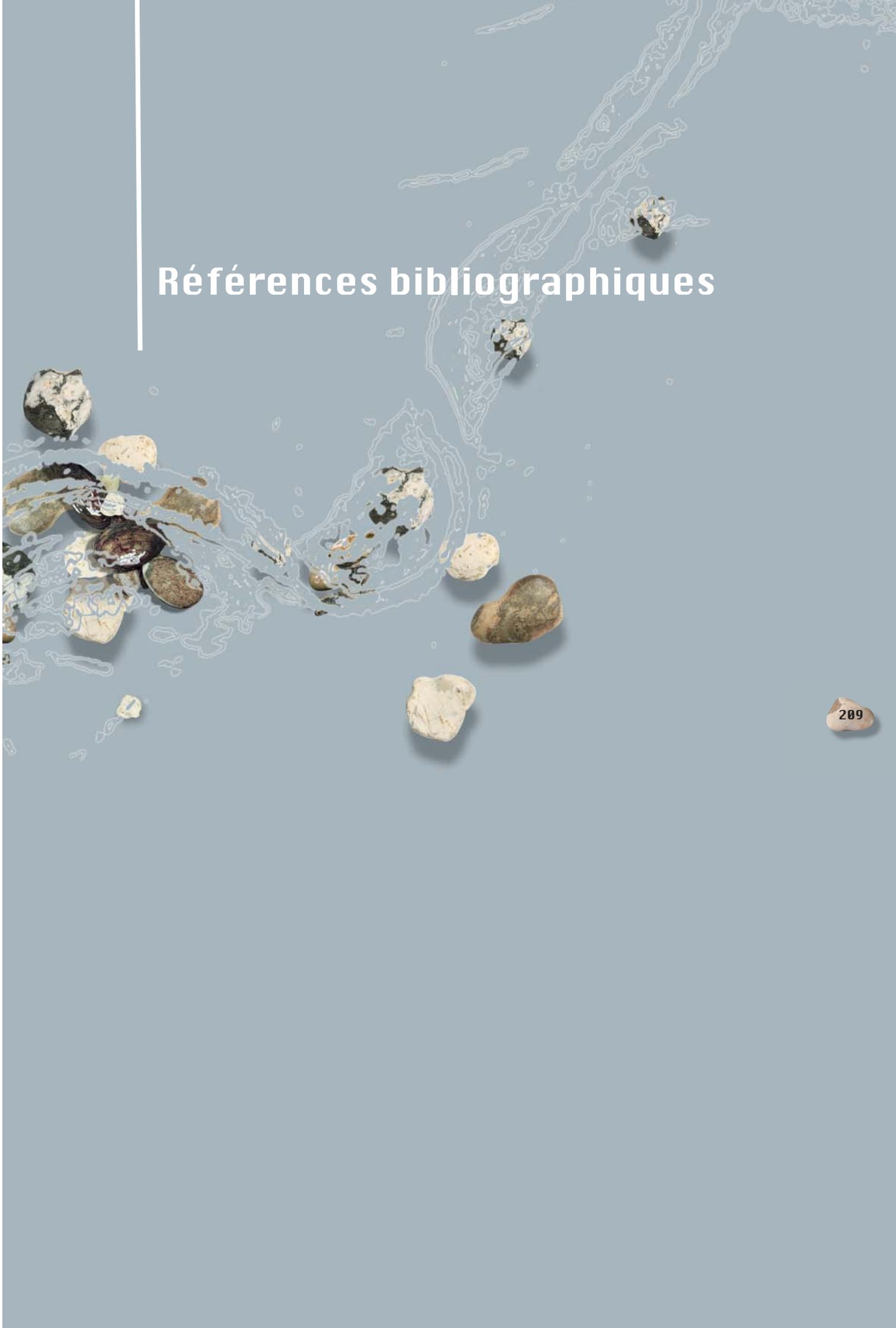
- composition et abondance de la flore aquatique,
- composition et abondance de la faune benthique invertébrée,
- composition, abondance et structure de l'âge de l'ichtyofaune.

Paramètres hydromorphologiques soutenant les paramètres biologiques :

- régime hydrologique,
- quantité et dynamique du débit d'eau,
- connexion aux masses d'eau souterraine,
- continuité de la rivière,
- conditions morphologiques:
 - variation de la profondeur et de la largeur de la rivière,
 - structure et substrat du lit,
 - structure de la rive.

Paramètres chimiques et physico-chimiques soutenant les paramètres biologiques

- Paramètres généraux :
 - température de l'eau
 - bilan d'oxygène
 - salinité
 - état d'acidification
 - concentration en nutriments
 - polluants spécifiques
 - pollution par toutes substances prioritaires recensées comme étant déversées dans la masse d'eau
 - pollution par d'autres substances recensées comme étant déversées en quantités significatives dans la masse d'eau



Références bibliographiques

- Ackers P., White W.R. 1973** : Sediment transport; new approach and analysis. *J. Hydraul. Div.* 99, 2041–2060.
- Andrews E.D., 1980** : Effective and Bankfull Discharge in the Yampa River Basin, Colorado and Wyoming. *Journal of Hydrology* 46, 311–330.
- Andrews E.D., 1983** : Entrainment of gravel from naturally sorted riverbed material. *Geological Society of America Bulletin* 94, 1225–1231.
- Andrews E.D., Nankervis J.M., 1995** : Effective discharge and the design of channel maintenance flows for gravel-bed rivers, Natural and Anthropogenic influences in fluvial geomorphology. *AGU Monograph Series* 89, Washington, D.C., 151–164.
- Bagnold R.A., 1980** : An empirical correlation of bedload transport rates in flumes and natural rivers. *Proc. R. Soc. Lond.* A372, 453–473.
- Bakke P.D., Basdekas P.O., Dawdy D.R., Klingeman P.C., 1999** : Calibrated Parker/Klingeman Model for Gravel Transport. *J. Hydraul. Eng.* 125, 657–660.
- Barry J.J., Buffington J.M., Goodwin P., King J.G., Emmett W.W., 2008** : Performance of bedload transport equations relative to geomorphic significance: predicting discharge and its transport rate. *J. Hydraul. Eng.* 134, 601–615.
- Bathurst J.C., 2007** : Effect of coarse surface layer on bed-load transport. *J. Hydraul. Eng.* 133, 1192–1205.
- Bernard C., 1927** : Cours de restauration des montagnes. Ecole Nationale des Eaux et Forêts, Manuscrit, 788 p.
- Blanc X., Pinteur F., Sanchis T., 1989** : Conséquences de l'enfoncement du lit de l'Arve sur les berges et les ouvrages. Bilan général des transports solides sur le cours d'eau. *La Houille Blanche* 3-4, 226–230.
- Bournaud M., 1983** : Le courant, facteur écologique et éthologique de la vie aquatique. *Hydrobiologia* 21, 125–165.
- Bravard J.P., Malavoi J.R., 2000** : Les carrières et l'espace de liberté des cours d'eau. In *Carrières, biodiversité et fonctionnement des hydrosystèmes*, Buchet et Chastel.
- Bravard J.-P., Malavoi J.R., Amoros C., 1989** : L'Ain, ou la difficulté de gérer une rivière en cours de métamorphose. Actes de la journée d'étude « Rivières en crise : Saône, Ain, Durance », 57–71.
- Bravard J.-P., Peiry J.-L., Landon N., Franc O., Large J.-L., 1990** : La basse vallée de l'Ain : étude géomorphologique. Rapport, Laboratoire de Géographie de l'Université Jean Moulin Lyon III, PIREN-CNRS – Agence de l'Eau R.M.C., 113 p.
- Bray D.I., Church M., 1980** : Armored versus paved gravel beds. *J. Hydraul. Div.* 106, 1937–1940.
- Brown C.B., 1950** : Sediment transportation. In Rouse H. (éd.), *Engineering Hydraulics*, New York, Wiley, 769–857.
- Bunte K., 2004** : Gravel mitigation and augmentation below hydroelectric dams: A geomorphological perspective. Report to the Stream Systems Technology Center, USDA Forest Service, United States Department of Agriculture, Fort Collins.
- Burkholde B.K., 2007** : Influence of Hyporheic Flow and Geomorphology on Temperature of a Large, Gravel-bed River, Clackamas River, Oregon, USA. Thesis, Oregon State University.
- Cardinale B.J., Palmer M.A., Swan C.M., Brooks S., LeRoy Poff N., 2002** : The influence of substrate heterogeneity on biofilm metabolism in a stream ecosystem. *Ecology* 83, 412–422.
- Carling P.A., 1987** : Bed stability in gravel streams, with reference to stream regulation and ecology. In Richard K. (éd.), *River Channels: Environment and Process*, Basil Blackwell, Oxford, pp. 321–347.
- Carling P.A., 1988** : The concept of dominant discharge applied to two gravel-bed streams in relation to channel stability thresholds. *Earth Surface Processes and Landforms* 13, 355–367.
- Cavitte J.P., Maurel F., 2003** : SDAGE Adour-Garonne et hydroélectricité. *La Houille Blanche* 2, 51–54.
- CFPF (Centre de Formation Professionnelle Forestière), 1998** : Topoguide Berges et Rivières. Collection Entretien et Restaurer les Rivières en Rhône-Alpes, 27 p. + 9 fiches techniques.
- Chin C.O., Melville B.W., Raudkivi A.J., 1994** : Streambed armouring. *J. Hydraul. Eng.* 120, 899–918.
- Church M., McLean D.G., Wolcott J.F., 1987** : River bed gravels: sampling and analysis. In Thorne C.R., Bathurst J.C., Hey R.D. (éds.), *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*, Wiley, Chichester, pp. 43–88.

- Couvert B., Lefebvre B., Lefort Ph., Morin E., 1991** : Etude générale sur les seuils de correction torrentielle et les plages de dépôts. *La Houille Blanche* 6, 449–456.
- Cummins K.W., Lauff G.H., 1969** : The influence of substrate particle size on the microdistribution of stream macrobenthos. *Hydrobiologia* 34, 145–181.
- Delacoste M., 1995** : Analyse de la variabilité spatiale de la reproduction de la truite commune (*Salmo trutta L.*). Etude à l'échelle du micro et du macrohabitat dans 6 rivières des Pyrénées centrales. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 127 p.
- Delacoste M., Baran P., Lascaux J.M., Segura G., Belaud A., 1995** : Capacité de la méthode des microhabitats à prédire l'habitat de reproduction de la truite commune. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 337-339, 345–353.
- Dole-Olivier M.J., Marmonier P., Befy J.L., 1997** : Response of invertebrates to lotic disturbance: is the hyporheic zone a patchy refugium? *Freshwater Biology* 37/2, 257–276.
- Dugdale S.J., Carbonneau P.E., Campbell D., 2010** : Aerial photosieving of exposed gravel bars for the rapid calibration of airborne grain size maps. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 627–639.
- Einstein H.A., 1937 : Bed load transport as a probability problem. Thesis, Federal Institute of Technology, Zurich.
- Einstein H.A., 1950** : The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. United States Department of Agriculture – Soil Conservation Service, Washington.
- Einstein H.A., Barbarossa N.L., 1952** : River Channel Roughness. American Society of Civil Engineers, Paper n° 2528, pp. 1121–1146.
- Emmett W.W., Wolman M.G., 2001** : Effective discharge and gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 1369–1380.
- Engelund F., Hansen E., 1967** : A monograph on sediment transport in alluvial streams. Technical University of Denmark.
- Evrard M., Micha J.-C., 1995** : Relation entre la diversité du substrat et la diversité faunistique dans un bief belge de la rivière Meuse. *Annlis Limnol.* 31, 93–103.
- Ferguson R., Church M., 2009** : A critical perspective on 1-D modeling of river processes: Gravel load and aggradation in lower Fraser River. *Water Resour. Res.* 45, W11424.
- Fowler R.T., Death R.G., 2001** : The effect of environmental stability on hyporheic community structure. *Hydrobiologia* 445, 85–95.
- Gautier J.N., 2008** : Transport solide en Loire moyenne lors des crues ; justification des mesures in situ et quantification. *La Houille Blanche* 5, 71–78.
- Gregory M.B., 2007** : Microhabitat preferences by aquatic invertebrates. Influence bioassessment metrics in piedmont streams of Georgia and Alabama. Proceedings of the 2005 Georgia Water Resources Conference, University of Georgia, Hatcher K.J. (éd.), Institute of Ecology, The University of Georgia, Athens, Georgia.
- Habersack H., 1998** : Numerical sediment transport models : theoretical and practical aspects. *IAHS Publ.* 249, 299–308.
- Hastie L.C., Boon P.J., Young M.R., Way S., 2001** : The effects of a major flood on an endangered freshwater mussel population. *Biological Conservation* 98, 107–115.
- Hey R.D., 1979** : Flow resistance in gravel bed rivers. *J. Hydraul. Div.* 105, 365–379.
- Hey R.D., Thorne C.R., 1983** : Accuracy of Surface Samples from Gravel Bed Material. *J. Hydraul. Eng.* 109, 842–851.
- Hjulström F., 1935** : Studies in the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris. *Bull. Geol. Inst. Uppsala* 25, 221–527.
- Hynes H.B.N., 1970** : The ecology of running waters. Liverpool University Press, 555 p.
- Jowett I.G., Richardson J., Biggs B.J., Hickey C.W., Quinn J.M., 1991** : Microhabitat preferences of benthic invertebrates and the development of generalised Deleatidium spp. Habitat suitability curves, applied to four New Zealand rivers. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 25, 187–199.
- Katolikov V.M., Kopaliani Z.D., 2001** : Side Bars in River Channels: the Conditions of Formation and Dynamics. *Water Resources* 28, 528–534.
- Keith P., Allardi J., 2001** : Atlas des poissons d'eau douce de France. *Patrimoines Naturels* 47, 387 p.
- Kellerhals R., 1967** : Stable Channels with Gravel-Paved Beds, *Journal of Waterways and Harbors Division.* American Society of Civil Engineers, p. 63–84.

Keulegan G.B., 1938 : Laws of turbulent flow in open channels. *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 21, Research Paper 1151, 707–741.

King J.G., Emmett W.W., Whiting P., Kenworthy S.T., Barry J.J., 2004 : Sediment transport data and related information for selected coarse-bed streams and rivers in Idaho (<http://www.fs.fed.us/rm/boise/research/watershed/BAT/>).

Klingeman P.C., Emmett W.W., 1982 : Gravel bed load transport processes. In Hey R.D., Barthurst J.C., Thorne C.R. (éds.), *Gravel bed rivers*, Wiley, Chichester, 875 p.

Knighton A.D., 1998 : *Fluvial forms and processes: a new perspective*, Oxford University Press, New York.

Koehl M.A.R., 1984 : How do benthic organisms withstand moving water? *Am. Zool.* 24, 57–70.

Landon N., 1999 : L'évolution contemporaine du profil en long des affluents du Rhône moyen, constat régional et analyse d'un hydrosystème complexe, la Drôme. Thèse de doctorat en Géographie et Aménagement du Territoire, Université Paris IV-Sorbonne, Paris, 545 p.

Landon N., 2007 : Du constat d'enfoncement du lit fluvial aux actions de recharge sédimentaire : quelles solutions pour une gestion raisonnée de nos cours d'eau ? In *Outils de gestion de l'eau en territoire de montagne et alternatives*, Ouvrage collectif publié dans le cadre du Projet Interreg Aqua, pp. 28–39.

Landon N., Piégay H., Bravard J.-P., 1995 : Etude du fonctionnement physique de la Drôme. Rapport d'expertise pour le compte du Syndicat Mixte d'Aménagement de la Drôme et de la Commission Locale de l'Eau du SAGE de la rivière Drôme et de son bassin versant, 117 p.

Landon N., Bravard J.-P., Franceschi C., 1998 : Etude du fonctionnement physique de la basse vallée de la Bienne (Jura). Rapport d'expertise pour le compte du P.N.R. du Haut-Jura, 99 p.

Landon N., Bravard J.-P., Leméhauté N., 1999 : Etude des processus de recharge sédimentaire du bassin versant de la Bienne (Jura), du transit de la charge de fond et de l'impact des aménagements sur celui-ci. Rapport d'expertise pour le compte du P.N.R. du Haut-Jura, 183 p.

Lane E.W., 1955 : The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *Proceedings, American Society of Civil Engineers*, N° 745.

Laronne J.B., Carson M.A., 1976 : Interrelationships between Bed Morphology and Bed-Material Transport for a Small, Gravel-Bed Channel. *Sedimentology* 23, 67–85.

Lefort P., 2007 : Une formule semi-empirique pour le transport solide des rivières et des torrents. *Transport solide et gestion des sédiments en milieu naturel et urbain*, Lyon.

Leopold L.B., Emmett W.W., Myrick R.M., 1966 : Channel and Hillslope Processes in a Semiarid Area, New Mexico. *U.S. Geological Survey Professional Paper* 352-G, 193–252.

Le Roy Ladurie E., 1967 : *Histoire du climat depuis l'an mil*. Paris, Flammarion, Nouvelle Bibliothèque scientifique.

Liébault F., 2003 : Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massifs du Diois et des Baronnies). Thèse de doctorat en Géographie, Aménagement et Urbanisme, Université Lumière-Lyon 2, 358 p.

Liébault F., 2006 : Recharge sédimentaire expérimentale, modélisation du charriage et analyse prospective (bassin versant de la Drôme). Rapport d'expertise CNRS-Cemagref-ONF réalisé pour le compte de la Communauté des Communes du Val de Drôme, programme LIFE03/ENV/S/000601 « Eau et forêts », 61 p.

Liébault F., Laronne J.B., 2008 : Evaluation of bedload yield in gravel-bed rivers using scour chains and painted tracers: the case of the Esconavette Torrent (Southern French Prealps). *Geodinamica Acta* 21, 23–34.

Liébault F., Clément P., Piégay H., 2001 : Analyse Géomorphologique de la Recharge Sédimentaire des Bassins Versants de la Drôme, de L'Eygues et du Roubion. Rapport CNRS-ONF pour le compte de la DDAF26 et Agence de l'EAU RMC, 133 p.

Liébault F., Landon N., Piégay H., Zahnd E., 2002 : Plan de gestion des atterrissements alluvionnaires de la Haute-Drôme. Rapport d'expertise CNRS-ONF pour le compte de la Communauté de Communes du Diois, 72 p.

Link A., 1970 : Speicherseen der Alpen – Bassins d'accumulations des Alpes. *Cours d'eau et énergie* 9, 252–358.

Malavoi J.R., 2003 : Etude du transport solide du Doubs entre Voujeaucourt et Dole. Programme d'aménagement, d'entretien et de suivi. Rapport Technique. VNF.

Malavoi J.R., 2004 : Etude géomorphologique du Doubs aval. Rapport Syndicat mixte Saône et Doubs.

Malavoi J.R., 2006 : Etude hydromorphologique du Rhône en amont de Lyon, du PK 34.2 AU PK 5.7. Rapport Grand Lyon.

- Malavoi J.R., 2006** : Etude géomorphologique de l'Armançon. Rapport Syndicat de l'Armançon (SIRTAVA).
- Malavoi J.R., Souchon Y., 1989** : Méthodologie de description et quantification des variables morphodynamiques d'un cours d'eau à fond caillouteux. Exemple d'une station sur la Filière (Haute-Savoie). *Revue de Géographie de Lyon* 64, 252–259.
- Malavoi J.R., AREA, 2000** : Typologie et sectorisation des cours d'eau du bassin Loire-Bretagne. Rapport Agence de l'Eau Loire-Bretagne.
- Malavoi J.R., Epteau, 2003** : Contrat de rivière Veyle. Rapport Syndicat Veyle vivante.
- Malavoi J.R., Biotec, 2005** : Etude d'avant projet du contournement de la gravière de Buellas par la Veyle. Rapport Syndicat Veyle vivante.
- Malavoi J.R., Gadiollet P., 2008** : Eléments d'élaboration d'un plan de gestion des alluvions de l'Azergues. Rapport Syndicat Mixte de Réaménagement de la Plaine des Chères et de l'Azergues.
- Malavoi J.R., Hydratec, Ledoux B., Cabinet Gay, 2002** : Etude globale de gestion des crises hydrologiques et de restauration environnementale du haut bassin de la Loire. Rapport EPALA.
- Mann R.H.K., 1996** : Environmental requirements of European non-salmonids fish in rivers. *Hydrobiologia* 323, 223–235.
- Meyer-Peter E., Mueller R., 1948** : Formulas for Bed-Load Transport. Proceedings 2nd Meeting IAHR, Stockholm, 39–64.
- Mizuyama T., 1977** : Bedload transport in steep channels. Thèse de doctorat, Kyoto University, Kyoto.
- Moog O., Nesemann H., Ofenböck T., Stunder C., 1998** : The freshwater pearl mussel in Austria: Fundamental conservation measures for an endangered species. *Vehr. Internat. Verein. Limnol.* 26, 2438–2443.
- Mosley M.P., Tindale D.S., 1985** : Sediment variability and bed material sampling in gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* 10, 465–482.
- Mougouin P., 1931** : La restauration des Alpes. Imprimerie Nationale, Paris.
- Mueller E.R., Pitlick J., Nelson J.M., 2005** : Variation in the reference Shields stress for bed load transport in gravel-bed streams and rivers. *Water Resources Research* 41, W04006.
- Parker G., 1978** : Self-formed straight rivers with equilibrium bank and mobile bed. Part 2: the gravel river. *Journal of Fluid Mechanics* 89, 127–146.
- Parker G., 1979** : Hydraulic geometry of active gravel rivers. *J. Hydraul. Div.* 105, 1185–1201.
- Parker G., 2009** : Transport of gravel and sediment mixtures. In ASCE Manual 54, Sedimentation Engineering, ASCE.
- Parker G., Klingman P.C., 1982** : On why gravel bed streams are paved. *Water Resources Research* 18, 1409–1423.
- Parker G., Klingeman P.C., McLean D.G., 1982** : Bedload and size distribution in paved gravel-bed streams. *J. Hydraul. Div.* 108, 544–571.
- Parker G., Wilcock P.R., Paola C., Dietrich W.E., Pitlick J., 2007** : Physical basis for quasi-universal relations describing bankfull Hydraulic geometry of single thread gravel-bed rivers. *Journal of Geophysical Research Earth Surface* 112, F04005.
- Peckarsky B.L., 1980** : Influence of detritus upon colonization of stream invertebrates. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37, 957–963.
- Peiry J.-L., Salvador P.-G., Nougouier F., 1994** : L'incision des rivières dans les Alpes françaises du nord : état de la question. *Revue de Géographie de Lyon* 1994/1, 47–56.
- Peters J.J., 2003** : Assistance technique au maître d'ouvrage pour la réalisation de mesures de transport solide sur la Loire à Bréhémont ; analyse des mesures.
- Piegay H., 1995** : Dynamiques et gestion de la ripisylve de cinq cours d'eau à charge grossière du bassin du Rhône (l'Ain, l'Ardèche, le Giffre, l'Ouvèze et l'Ubaye), XIXe et XXe siècles. Thèse de Géographie et d'Aménagement, Université Paris IV-Sorbonne, 529 p.
- Poirel A., 2001** : La gestion des sédiments par chasse (1) : retour d'expérience sur quelques aménagements hydrauliques alpins. *La Houille Blanche* 6/7, 55–61.
- Recking A., 2009** : Theoretical development on the effects of changing flow hydraulics on incipient bedload motion. *Water Resources Research* 45, W04401.
- Recking A., 2010** : A comparison between flume and field bedload transport data and consequences for surface based bedload transport prediction. *Water Resources Research* 46, W03518.

- Recking A., Frey P., Paquier A., Belleudy P., Champagne J.Y., 2008** : Feedback between bed load transport and flow resistance in gravel and cobble bed rivers. *Water Resources Research* 44, W05412.
- Rickenmann D., 1991** : Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. *J. Hydraul. Eng.* 117, 1419–1439.
- Rickenmann D., Recking A., 2011** : Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field dataset. *Water Resour. Res.*, sous presse.
- Ryan S.E., Porth L.S., Troendle C.A., 2002** : Defining phases of bedload transport using piecewise regression. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 971–990.
- Schoklitsch A., 1962** : *Handbuch des Wasserbaus* (in German). Springer Verlag (3rd edition), Wien.
- Sear D.A., Newson M.D., 1993** : Sediment and gravel transportation in rivers, including the use of gravel traps. Final Report n° c5/384/2, National River Authority.
- Shields A., 1936** : *Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die geschiebebewegung*. Technischen Hochschule, Berlin.
- Smart G.M., Jaeggi M.N.R., 1983** : Sediment transport on steep slopes. *Mitteilungen n° 64, Der Versuchsanstalt fuer Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidg. Techn. Hochschule Zuerich, Zurich*.
- Standford J.A., Ward J.V., 1988** : The hyporheic habitat of river ecosystems. *Nature* 335, 64–66.
- Statzner B., Holm T.F., 1982** : Morphological Adaptations of Benthic Invertebrates to Stream Flow – An Old Question Studied by Means of a New Technique (Laser Doppler Anemometry). *Oecologia* 53, 290–292.
- Statzner B., Holm T.F., 1989** : Morphological adaptation of shape to flow: microcurrents around lotic macroinvertebrates with known Reynolds numbers at quasi-natural flow conditions. *Oecologia* 78, 145–157.
- Strommer J.L., Smock L.A., 2006** : Vertical distribution and abundance of invertebrates within the sandy substrate of a low-gradient headwater stream. *Freshwater Biology* 22, 263–274.
- Thorne C.R., 1997** : Channel types and morphological classification. In Thorne C.R., Hey R.D., Newson M.D. (éds.), *Applied fluvial geomorphology for river engineering and management*, 176–222.
- Valette L., Chandesis A., Mengin N., Malavoi J.R., Souchon Y., Wasson J.G., 2008 : SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau SYRAH CE. *Principes et méthodes de la sectorisation hydromorphologique*, 27 p.
- Van Rijn L.C., 1984** : Sediment transport, Part I: Bedload transport. *J. Hydraul. Eng.* 110, 1431–1457.
- Vogel S., 1981** : *Life in moving fluids – the physical biology of flow*. Willard Grant Press, Boston, MA.
- Wagner A., Wagner I., 2002** : *Flusslandschaft Isar*, Bayerische Landesamt für Umweltschutz.
- Wilcock P.R., Crowe J.C., 2003** : Surface-based transport model for mixed-size sediment. *J. Hydraul. Eng.* 129, 120–128.
- Williams D.D., Mundie J.H., 1978** : Substrate size selection by stream invertebrates and the influence of sand. *Limnol. Oceanogr.* 23, 1030–1033.
- Williams G.P., Wolman M.G., 1984** : Downstream effects of dams on alluvial rivers. U.S. Geological Survey Professional Paper n° 1286.
- Wolman M.G., 1954** : A method of sampling coarse river-bed material. *Transactions of the American Geophysical Union* 35, 951–956.
- Wolman M.G., Miller J.P., 1960** : Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *J. of Geol.* 68, 54–74.
- Yalin M.S., da Silva A.M.F., 2001** : *Fluvial Processes*. IAHR Monograph, IAHR, Delft, The Netherlands, 197 p.
- Yang C.T., 1972** : Unit stream power and sediment transport. *J. Hydraul. Div.* 98, 1805–1826.
- Yang C.T., 1984** : Unit stream power equation for gravel. *J. Hydraul. Eng.* 110, 1783–1797.





Rédaction

Jean-René Malavoi, Claire-Cécile Garnier, Norbert Landon, Alain Recking, Philippe Baran

Edition

Véronique Barre (direction de l'action scientifique et technique de l'Onema)

Création et mise en forme graphiques

Béatrice Saurel (saurelb@free.fr)

Citation

Malavoi J.R., Garnier C.C., Landon N., Recking A., Baran P., 2011.
Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière. Onema. 216 pages

Remerciements

Nous tenons à remercier très sincèrement J.N. Gautier pour sa participation active au pilotage de ce projet et pour sa précieuse contribution au chapitre concernant les mesures de transport solide dans la Loire.

Nous remercions aussi chaleureusement P. Gadiolet du contrat de rivière Azergues pour les éléments techniques apportés ainsi que F. Oraison, du pôle Onema-Cemagref de Lyon pour sa contribution et sa relecture très attentive.

Un grand merci aussi à J. Moy du ministère chargé de l'écologie et L. Bourdin de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse pour leur large participation au pilotage de ce projet.

Enfin, un remerciement très sincère aux divers relecteurs de ce document, dont les remarques et les critiques constructives ont contribué à le rendre, nous l'espérons, plus clair et plus complet :

B. Camenen et J. Lejot du Cemagref, F. Fruchart de la Compagnie Nationale du Rhône, J.P. Bouchard, A. Poirel d'EDF ainsi que V. Nicolas de la direction scientifique et technique de l'Onema.



La collection « Comprendre pour agir »
accueille des ouvrages issus
de travaux de recherche et d'expertise
mis à la disposition des enseignants,
formateurs, étudiants, scientifiques,
ingénieurs et des gestionnaires de l'eau
et des milieux aquatiques.

Blocs, rochers, cailloux, galets, graviers, sables ou autres limons, autant d'alluvions que charrient les cours d'eau qui représentent pour l'Homme en même temps une menace et une ressource, et jouent un rôle très important dans l'histoire du cours d'eau.

Le deuxième ouvrage de la collection « Comprendre pour agir », *Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière*, s'intéresse aux alluvions grossières qui vont des sables moyens aux blocs, et transitent dans un cours d'eau au gré des crues. La majorité des chercheurs en hydromorphologie et en écologie fluviale considère que c'est le déficit chronique de cette charge alluviale de fond, souvent lié aux activités humaines telles que l'extraction des granulats, qui est à l'origine de nombreux dysfonctionnements observés aujourd'hui sur les cours d'eau français.

Les auteurs nous expliquent en quoi ces alluvions sont un élément majeur de l'équilibre hydromorphologique et écologique de la rivière. Le lecteur va ainsi comprendre comment ce transport solide, étroitement lié à la puissance de la rivière, permet d'éviter, quand il est « équilibré », de nombreux désordres hydrauliques tels que le déchaussement des ponts, des digues ou des protections de berges, ainsi que les désordres hydrogéologiques tel l'abaissement de la nappe alluviale et ses conséquences.

Ces alluvions grossières ont en outre une fonction primordiale vis-à-vis des populations aquatiques ou rivulaires. En effet, la plupart des espèces végétales ou animales de ces biocénoses sont dépendantes de ces dépôts alluvionnaires grossiers, par exemple des poissons pour leurs frayères ou des végétaux pour leur fixation. Le bon fonctionnement du transport sédimentaire est aujourd'hui inscrit comme un objectif fort dans les textes juridiques encadrant la gestion de l'eau et des milieux aquatiques.

Près de 150 photographies émaillent l'ouvrage et permettent au lecteur de retrouver des situations croisées sur le terrain ; plus de 70 schémas pédagogiques en expliquent les mécanismes.

Cet ouvrage est à la fois une synthèse de l'état de la connaissance concernant le transport solide et un guide pour aider à en améliorer la gestion qui intéressera autant les gestionnaires que les formateurs.

Jean-René Malavoï est docteur en hydromorphologie fluviale et travaille depuis plus de 25 ans sur les processus géodynamiques fluviales et leurs liens avec le fonctionnement écologique. Il est actuellement expert sur cette thématique au pôle sur l'hydro-écologie Onema-Cemagref à Lyon.

Claire-Cécile Garnier est attachée principale d'administration, adjointe au chef de bureau des milieux aquatiques de la direction de l'eau et de la biodiversité au ministère chargé de l'écologie. Elle est chargée de la réglementation relative aux cours d'eau, à leur entretien, à leur protection et à la préservation ou la restauration de leurs écosystèmes. Elle travaille sur la thématique des cours d'eau au ministère depuis 1999.

Norbert Landon est spécialiste d'hydromorphologie fluviale, maître de conférences de l'Université Lyon 2 et membre du laboratoire "Environnement-Ville-Société" (UMR 5600 du CNRS). Il est également responsable du Master "Connaissance, Gestion, Mise en valeur des Espaces Aquatiques Continentaux ».

Alain Recking est docteur en mécanique des fluides et est actuellement chercheur en hydraulique et transport solide au Cemagref de Grenoble. Il travaille particulièrement sur la modélisation du transport et les morphologies associées.

Philippe Baran est docteur en ichtyologie et travaille depuis 20 ans sur les relations entre les organismes aquatiques et leurs habitats. Particulièrement impliqué pendant 10 ans dans la gestion des cours d'eau au sein d'une délégation régionale de l'Onema, il est actuellement responsable du pôle d'Ecohydraulique Onema-Cemagref-IMFT à Toulouse.

