

**LA GESTION DES RIVIÈRES
TRANSPORT SOLIDE
ET ATTERRISSSEMENTS**



GUIDE MÉTHODOLOGIQUE

LA GESTION DES RIVIÈRES TRANSPORT SOLIDE ET ATTERRISSSEMENTS



GUIDE MÉTHODOLOGIQUE

Document réalisé par les agences de l'eau

Directeur de publication : Pierre Roussel

Agence de l'Eau réalisatrice de l'étude : agence Rhône - Méditerranée - Corse

Réalisation :

Bernard Couvert	Sogreah
Philippe Lefort	INPG Entreprise
Jean-Luc Peiry	CNRS
Philippe Belleudy	Sogreah

Comité de pilotage :

Yves Cassayre	Service RTM Haute Savoie
Michel De Touzalin	BET Yonne
Laurent Gasnier	Agence de l'Eau RMC
Michel Hersemul	Drire Rhône Alpes
Maurice Meunier	Cemagref
Joseph Rivas	Agence de l'Eau RMC
Dominique Tesseyre	Agence de l'Eau Adour Garonne
Francis Trocherie	Diren Rhône Alpes
Guy Venault	Agence de l'Eau Seine Normandie

Crédit photographique : Sogreah, Graphies, P. Lefort, J.L. Peiry

Autorisation d'utilisation de documents IGN : N° 50 - 9083

Mise en forme et infographie : Graphies, Meylan

Christian Couvert, Alexandre Kosnicarevic

Impression : Jouve, Paris

ISSN : 1161- 0425

Tiré à 5 000 exemplaires, septembre 1999



SOMMAIRE

1	INTRODUCTION : ENJEUX ET ATTENTES	4
1.1	Le contexte	4
1.2	Les principes retenus dans les SDAGE	8
1.3	La réponse aux attentes des riverains	9
1.4	La nécessité d'une approche globale du transport solide	10
1.5	L'état de la science	10
1.6	Le contenu du guide	11
2	LA DYNAMIQUE DU LIT DES RIVIÈRES	12
2.1	Le fonctionnement naturel	12
	Les mécanismes du transport	
	Les équilibres fondamentaux	
	L'origine des matériaux	
	Le profil en long des cours d'eau	
	La dynamique ordinaire et les crises	
	La réduction des apports et l'inertie du système	
	La respiration du lit, les confluences	
	Les styles fluviaux	
	La granulométrie des matériaux	
	Le rôle des sédiments fins et de la végétation	
	Le rôle du substratum dans la morphologie	
2.2	Les mécanismes de perturbation et leurs conséquences	25
	Mécanismes élémentaires d'ajustement du profil en long	
	Interactions entre transport solide et morphologie	
	Causes et conséquences des perturbations	
2.3	Interactions avec l'ensemble de l'hydrosystème	32
3	LE DIAGNOSTIC GÉOMORPHOLOGIQUE	34
3.1	L'analyse des transformations et de la réponse du milieu	34
	Repérer des tronçons homogènes	
	Déterminer le type morphologique	
	Analyser les transformations et les perturbations apportées au milieu	
	Interpréter la morphologie actuelle du lit : comprendre la réponse du cours d'eau	
	Prévoir les évolutions futures	
3.2	La logique amont - aval	40
3.3	Les enjeux	40
	Les impacts des évolutions morphologiques	
	La mise en évidence des choix de gestion	



3.4	L'analyse spécifique d'un problème d'atterrissements	44
	Bancs actifs et bancs inactifs	
	Transport actif et transport passif	
	Lit en exhaussement constant	
	Lit temporairement haut	
	Lit stable en altitude	
	Lit abaissé en voie de réengrèvement	
	Lit en cours d'abaissement ou qui va s'abaisser	
4	LA GESTION DU TRANSPORT SOLIDE	50
4.1	Définir une stratégie globale de gestion du transport solide	51
4.2	Choisir les modes d'intervention	53
	Actions globales sur les débits et le transit sédimentaire	
	Modification de la gestion des débits	
	Modification d'ouvrages et de leur gestion pour favoriser le transit des matériaux	
	Actions de maîtrise des apports solides	
	Maîtrise de la production des matériaux dans le bassin	
	Espaces de régulation des apports solides	
	Chenaux lisses	
	Plages de dépôts	
	Ouvrages de régulation du transport solide	
	Extractions de matériaux	
	Actions de remodelage de la section	
	Remodelage du lit vif	
	Curage du lit vif	
	Ouverture de terrasses basses et arasement de bancs figés	
	Actions pour accroître la mobilité du lit	
	Promotion des érosions de berges	
	Traitement des bancs ou des bras « mourants » pour accroître leur mobilité	
	Traitement de la végétation	
	Actions de lutte contre l'abaissement du lit	
	Apports mécaniques de matériaux	
	Édification de seuils de stabilisation	
	Création d'un pavage artificiel du lit	
4.3	Le suivi ultérieur	66
	Le suivi photographique	
	Le suivi topographique	
	Le suivi de la granulométrie	
	Le suivi hydrométrique	

5	LES MÉTHODES ET LES OUTILS	68
5.1	Les reconnaissances de terrain	68
5.2	Granulométrie des fonds et techniques granulométriques	68
	Variabilité spatiale de la granulométrie	
	Variabilité temporelle de la granulométrie	
	Où faire des analyses granulométriques?	
	Comment mesurer la granulométrie d'un substrat alluvial	
5.3	L'analyse des profils en long	71
5.4	Les calculs de capacité de transport	72
	Champ des formules de transport	
	Principes généraux	
	Choix du tronçon pour débiter l'analyse	
	Seuil de début de mouvement	
	Formules globales	
	Formules par unité de largeur	
	Approximation par une formule linéaire	
	Calcul du transport solide total en section quelconque (formule d'Engelund-Hansen)	
5.5	Les bilans volumétriques	78
	Volumes charriés lors d'une crue	
	Bilan volumétrique global	
	Volumes d'apports en moyenne annuelle	
	Application à la structure des pentes	
	Influence d'une perturbation	
5.6	Les modèles	82
	Les modèles physiques	
	Les modèles mathématiques	
	RÉFÉRENCES DES TEXTES RÉGLEMENTAIRES	86
	ÉLÉMENT POUR L'ÉLABORATION DU CAHIER DES CHARGES D'UNE ÉTUDE DE TRANSPORT SOLIDE	88
	BIBLIOGRAPHIE	90
	GLOSSAIRE	91





INTRODUCTION : ENJEU

1.1 LE CONTEXTE

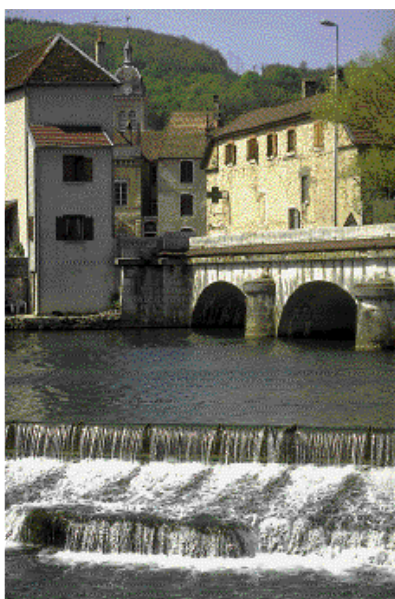
De tous temps les cours d'eau ont vu leur équilibre sédimentologique - et donc leur morphologie - modifiés par l'action de l'homme. Des défenses le long des berges ont été édifiées, afin d'empêcher la destruction des terres cultivées et parfois d'en conquérir de nouvelles.

Sur les petits cours d'eau, des curages étaient réalisés dans le but de maintenir la section à « vieux fond – vieux bords ». Les déblais étant transportés manuellement, leur dépôt se faisait au plus près, ce qui créait des digues, accroissant la capacité du chenal et donc diminuant la fréquence des inondations.

Les moulins, installés sur la plupart des cours d'eau non torrentiels, étaient alimentés par des barrages caractérisés par l'addition d'éléments de seuils, successivement construits, dégradés, reconstruits mais allongés jusqu'à ce que le rapport entre la hauteur et la longueur déversante ne crée plus de nouveaux désordres et détermine un nouvel équilibre du profil en long.

Les ouvrages de navigation, seuils fixes et même parfois barrages mobiles, ont depuis longtemps modifié le régime des transports solides, tout en nécessitant des dragages d'entretien, effectués pour maintenir la voie d'eau.

L'accroissement progressif des tonnages transportés - et donc l'exigence de tirants d'eau accrus - ont conduit à la mise en œuvre d'épis concentrant le lit mineur dans un chenal étroit et profond. Le tracé de ces épis était balancé d'une rive à l'autre suivant des règles empiriques, oubliées aujourd'hui, qui définissaient la longueur d'onde des sinuosités et la largeur du chenal.



Dès cette époque, on note un enfoncement des niveaux d'étiage et une modification de l'équilibre transversal du lit sur certains cours d'eau (comme la Loire moyenne et la basse Loire).

Une prise d'eau de moulin sur la Loue à Quingey (Doubs).

Au XIX^e siècle, de nombreux cours d'eau avaient déjà fait l'objet d'endiguements ou d'ouvrages de maîtrise des divagations.



Le Drac dans la plaine de Chabottes (1891) [carte des Ponts et Chaussées].

le confluent Isère - Arc (1889) [IGN].



Le XIX^e siècle voit se multiplier les grands endiguements de protection contre l'inondation, notamment à la suite des inondations exceptionnelles survenues alors sur la Loire (1846, 1856, 1866), sur la Saône et le Rhône (1840, 1856), sur la Garonne (1875), tous événements inégalés depuis.

Les vallées alpines et la plaine du Rhin seront elles-aussi massivement endiguées. Apparaissent alors des altérations profondes de l'équilibre longitudinal et les premières recherches sur le mécanisme du transport par charriage sur le fond.

Au cours du XX^e siècle, le développement de l'hydro-électricité va révéler peu à peu les impacts importants que provoquent les deux types d'aménagements hydrauliques :

- dans les barrages réservoirs, les alluvions fines et grossières s'accumulent rapidement, réduisant la capacité utile du réservoir et interrompant l'alluvionnement à l'aval ;
- au droit des dérivations d'eau, des perturbations plus subtiles sont apportées par la modification du régime hydrologique (dépôt des alluvions dans le lit aux points de dérivation de l'eau claire déchargée de ses apports solides par les ouvrages de prise ; érosion des fonds à la restitution de ces mêmes eaux à la rivière).

Toutefois le processus de dépôt va se trouver masqué le plus souvent par le développement des extractions de sables et graviers, conséquence de la généralisation de l'utilisation des bétons et agrégats pour la construction et des besoins de plus en plus grands en remblais et enrobés de la voirie routière moderne.

À partir de 1950 en effet, la prolifération d'engins de terrassement de plus en plus puissants va permettre une accélération du prélèvement des granulats et des sables en rivière.

La demande en matériaux va alors être satisfaite aux dépens du lit des cours d'eau, le plus souvent avec la bénédiction des riverains et de leurs élus, soucieux de limiter les risques d'inondation des lieux habités, mais aussi des terres agricoles.

Vue aérienne de la retenue de l'Escale sur la Durance [document SMAVD].

Le barrage de l'Escale, construit pour compléter l'aménagement hydroélectrique de la Durance, est aujourd'hui envasé aux trois quarts (pour une capacité initiale de 15 millions de mètres cubes).

Le bon fonctionnement de l'aménagement pourrait même être compromis. À l'aval immédiat du barrage, on observe une érosion progressive par déficit d'apports : après un léger abaissement, le lit s'est figé, en raison de la formation d'un pavage de matériaux grossiers en surface et du déficit hydrologique.

La dérivation de 250 m³/s par un canal et l'effet régulateur de la retenue de Serre-Ponçon ont divisé par dix la capacité de transport à l'aval.





Deux types d'extractions en lit mineur : à gauche, un arasement de bancs hors d'eau sur la Durance ; à droite, des dragages en souilles profondes.

C'est ainsi qu'on voit fleurir le concept d'atterrissements accusés d'obstruer toujours davantage le lit des cours d'eau, avec lesquels il convient d'alimenter la pelle mécanique d'un carrier toujours attentionné et... gratuit.

Aussi, dès 1965, apparaissent les premiers abaissements du lit, les dommages qui en sont la conséquence et donc les études et les travaux entrepris pour en limiter les effets. À cette époque affleurent déjà des substrats rocheux mis à nu ou des marnes plastiques beaucoup plus érodables, tandis que dans les plaines alluviales, les nappes phréatiques s'abaissent rapidement.



Un pont effondré à cause de l'abaissement du lit.

Mais il faut que s'effondrent plusieurs ouvrages d'art - pont Wilson à Tours sur la Loire, pont Mollard à Montmélian sur l'Isère, pont des Roards sur l'Aygues à l'amont d'Orange, pont de Velle sur la Moselle - et que s'accroissent énormément les dépenses de renforcement de fondations et construction de radiers ou de seuils de protection pour qu'un premier frein soit porté à l'extraction en rivière, avec une circulaire ministérielle de mai 1980.

Malgré tout, le combat engagé contre l'extraction des granulats et ses nuisances est resté longtemps inégal et indécis pour trois raisons :

- la réglementation des curages et des extractions n'a pas toujours été appliquée avec fermeté par l'Administration ;
- l'impact sur l'environnement de l'extraction des granulats n'est pas perçu à sa juste mesure. Il est vrai que, parfois, la dégradation du milieu physique causée par le prélèvement en rivière ou dans des bassins riverains s'accompagne d'une diversification locale des milieux. La diversité biologique peut s'en trouver, ponctuellement et momentanément, améliorée ;
- la diminution de la fréquence des inondations, conséquence de l'accroissement de la capacité du lit, est perçue comme un avantage essentiel, bien que l'on oublie que cet avantage risque parfois d'aggraver les inondations en aval, par l'accélération de la propagation de la crue et par la diminution de l'amortissement de son débit maximum.

C'est pourquoi de 1980 à 1993, l'extraction des granulats en rivière va se réduire très progressivement et dans des proportions très différentes d'un cours d'eau à l'autre.



Quoique peu explicite sur le problème particulier de l'exploitation des granulats, la « loi sur l'eau » du 3 janvier 1992 souligne que l'utilisation de l'eau doit se faire « dans le respect des équilibres naturels » et se propose d'assurer « la préservation des écosystèmes aquatiques, des sites et des zones humides ».

Les SDAGE préconisent le rétablissement d'un transit des matériaux, par une nouvelle gestion des lits et des ouvrages.

L'arrêté d'application ministériel du 22 septembre 1994 va mettre un point final à l'extraction des matériaux en rivière. Dorénavant ne subsisteront plus que des « dragages » à des fins exclusivement hydrauliques dans les secteurs où le carac-

INTRODUCTION : ENJEUX ET ATTENTES



rière indispensable de ces opérations aura été démontré... Cependant, l'article 29 de la loi 95-101 du 2 février 1995 sur le renforcement de la protection de l'environnement envisage des curages d'entretien sur les cours d'eau de montagne où l'apport solide se révèle excédentaire.

Cette prise de conscience conduit à reconsidérer totalement sur les cours d'eau les modalités de gestion du transport solide.

Avec l'apparition de nouvelles priorités dans la gestion des hydrosystèmes, l'arrêt des extractions, l'évolution des critères de financement des interventions en rivière par les organismes publics, ce sont toutes les politiques menées par les gestionnaires des cours d'eau qui sont en cours de révision.



Un milieu humide dans un ancien bras de divagation.

Sur beaucoup de rivières, le transport solide a été perturbé, mais les mécanismes morphologiques sont restés voisins des mécanismes initiaux.

Ces cours d'eau continuent de couler sur leurs propres alluvions, le régime hydrologique est peu modifié, des espaces de divagation potentiels demeurent. On peut donc s'attendre, après arrêt des extractions, à un renversement de tendance et à un réalluvionnement progressif des lits (avec une période transitoire d'« inertie »).

Mais le rythme en sera extrêmement lent :

- les extractions des années 1960 à 1985 ont représenté souvent des volumes considérables en comparaison de l'activité de la rivière ;
- les apports naturels sont loin d'être partout rétablis (ouvrages non transparents, etc.) ;
- dans certains bassins, la fourniture de matériaux a diminué de manière significative (évolution climatique séculaire, restauration des terrains en montagne, déprise rurale, etc.).

Sur d'autres cours d'eau, la dynamique fluviale a changé de manière irréversible.

Parfois, l'abaissement du lit a découvert un substratum marneux ou argileux très fragile. Il y a alors basculement vers un nouveau fonctionnement morphologique (lit étroit en canyon), totalement différent, dont les rythmes d'évolution sont souvent spectaculaires.

Ailleurs, des cours d'eau, totalement contraints (endiguements systématiques, barrages en série...) évoluent vers un équilibre morphologique différent (végétalisation du lit, tendance au développement d'un lit unique et étroit) entravé par un entretien incessant (obligation d'essartement, par exemple).

Enfin, certaines zones connaissent une réelle tendance à l'exhaussement.

Processus naturel au débouché dans une vallée principale, le phénomène est exacerbé par la réduction des espaces sur lesquels peuvent se déposer les matériaux en excès, et rendu critique par l'aménagement des abords du cours d'eau.

Un prélèvement raisonné des matériaux en excès est alors incontournable. Encore faut-il pouvoir distinguer les secteurs réellement touchés par des exhaussements et les zones où la tendance à l'exhaussement dénoncée par les riverains n'est qu'une impression qui traduit une inquiétude vis-à-vis de l'écoulement des crues. Un curage n'est pas à exclure dans ce cas, mais il faut alors clairement affirmer qu'il s'agit d'un aménagement du lit (avec ses incidences à étudier) et non d'un retour à un état naturel mythique.

Fournir les moyens de bien faire cette distinction est un des enjeux majeurs de ce guide.



Le Grand Bornand (Haute Savoie).

Lit réaménagé après la catastrophe de 1987.

1.2 LES PRINCIPES RETENUS DANS LES SDAGE

Dans chacun des six grands bassins hydrographiques, un schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) a été adopté fin 1996 en application de la « loi sur l'eau » du 3 janvier 1992. Le concept de gestion globale d'un bassin versant est au cœur des SDAGE, ainsi que le souci d'améliorer la connaissance des milieux.

La dynamique fluviale est reconnue comme une composante essentielle de l'équilibre naturel des cours d'eau.

Tous les SDAGE se préoccupent du contrôle des extractions de matériaux : interdiction en lit mineur, précaution en lit majeur pour minimiser l'atteinte aux milieux alluviaux et éviter les risques de capture de la gravière par le cours d'eau. Il en est ainsi du SDAGE Seine-Normandie.

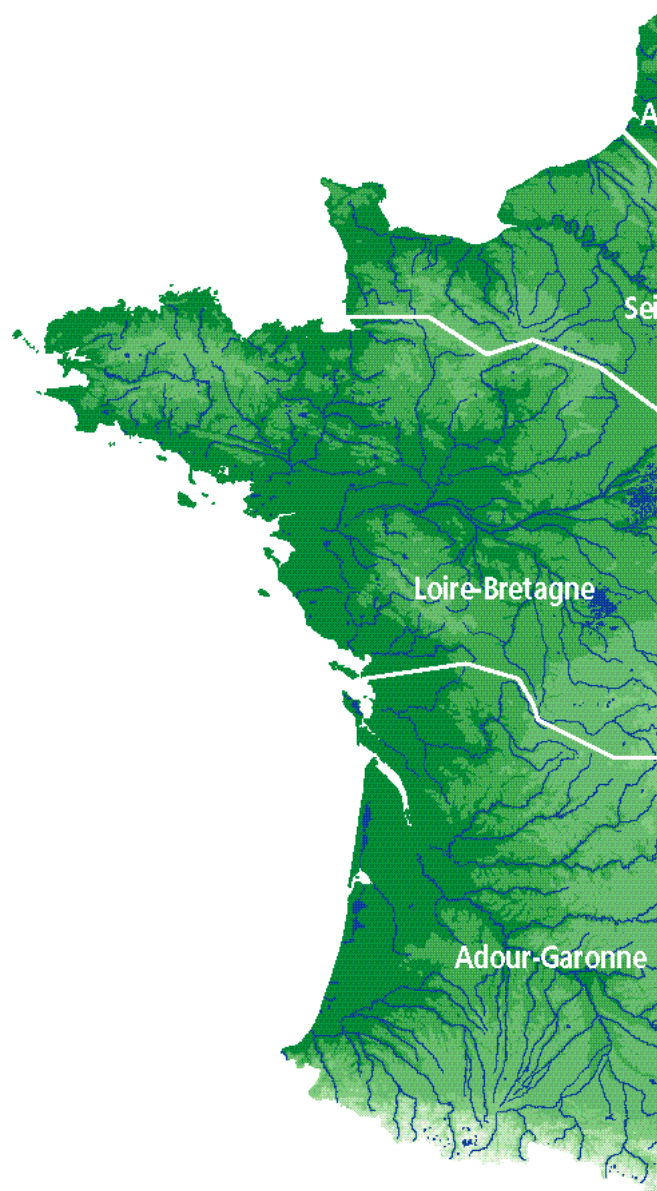
Le SDAGE Rhin-Meuse inclut la problématique des curages dans un objectif plus large de restauration et de gestion des écosystèmes aquatiques, en privilégiant l'amélioration de la connaissance de l'hydrodynamique des cours d'eau et une gestion régulière et d'ensemble respectueuse du milieu.

Le SDAGE Loire-Bretagne insiste sur l'évaluation de l'impact des ouvrages (barrages en particulier) sur les cours d'eau et sur la nécessité d'un entretien régulier du lit et des berges.

Seuls les SDAGE Rhône-Méditerranée-Corse et Adour-Garonne abordent spécifiquement la problématique des transports solides, en cherchant à conserver ou à rétablir la continuité du transit sédimentaire.

Le SDAGE Adour-Garonne recherche une régulation naturelle de la dynamique fluviale en subordonnant les curages à des nécessités de sécurité publique ou de restauration écologique, avec la volonté de maintenir le régime naturel du transport d'alluvions dans les rivières.

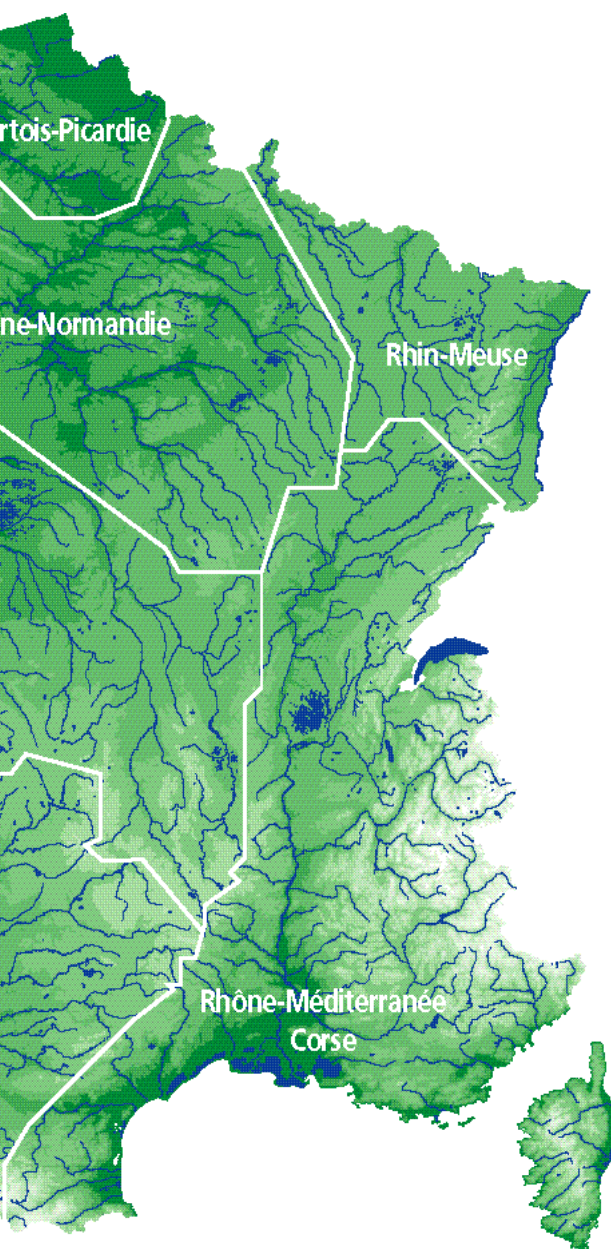
Le SDAGE Rhône-Méditerranée-Corse reconnaît la charge de fond comme une composante essentielle du fonctionnement des écosystèmes, et prévoit une lutte contre les déficits constatés. Il préconise en particulier une étude de dynamique fluviale pour tout projet d'aménagement global et pour tout nouvel ouvrage pouvant influencer sur cette dynamique. La gestion des transports solides est explicitement mentionnée dans les mesures opérationnelles de plusieurs des vingt-neuf territoires du bassin.



INTRODUCTION : ENJEUX ET ATTENTES



1.3 LA RÉPONSE AUX ATTENTES DES RIVERAINS



L'arrêt des extractions en rivière conduira à un lent réengrèvement des lits qui s'étaient abaissés lorsque demeurent des apports solides ou une recharge sédimentaire par érosion.

Cette tendance sur le long terme est ressentie confusément par les riverains (bien qu'elle demeure encore le plus souvent imperceptible), mais d'une manière d'autant plus aiguë que les crues se sont multipliées ces dernières années.

Après chaque forte crue, les riverains signalent des atterrissements, des exhaussements considérés comme préjudiciables. Et l'on entend souvent regretter le temps des extractions régulières en lit mineur. La demande d'une capacité d'écoulement maximale des lits reste forte.

Parfois, la tendance à l'exhaussement est réelle, notamment aux débouchés dans une vallée de rang supérieur (cônes de déjection torrentiels, arrivée dans la vallée du Rhône des rivières alpines, etc.).

Le plus souvent, cependant, il ne s'agit que d'une migration de bancs, dans un cycle global de transit amont-aval. On remarque le nouveau banc sans relever qu'un banc a disparu un peu plus loin. La comparaison des profils en long de différentes dates est pourtant souvent formelle : il n'y a pas d'évolution globale perceptible.

Cela met en évidence la difficulté pour les riverains d'accepter la variabilité inhérente aux processus morphologiques, quand ils ne sont pas bridés.

Favoriser un fonctionnement morphologique actif, c'est permettre au lit de changer de forme au fil du temps, c'est accepter l'idée que la rivière est un milieu dynamique. Ce fonctionnement sera parfois contradictoire avec le souci de prévoir les niveaux atteints par les crues avec précision, avec la volonté de maîtriser les débits de début de débordement, de les adapter aux enjeux.

L'acceptation de la divagation du lit se heurtera souvent au statut foncier des terres riveraines.

Ce sera un thème important dans les bassins où l'accroissement du transit des matériaux sera considéré comme un moyen majeur pour atténuer les déséquilibres du lit, et améliorer l'état des différents compartiments de l'hydrosystème. À ces inquiétudes, il faudra apporter des réponses qui restent encore souvent à inventer.

1.4 LA NÉCESSITÉ D'UNE APPROCHE GLOBALE DU TRANSPORT SOLIDE

Les demandes de curage et d'arasement de bancs, les problèmes de débordement, sont vécus d'abord comme un enjeu ponctuel.

Il importe d'élargir le champ de la réflexion à un tronçon plus large, voire à l'ensemble du bassin. En matière de transport solide, il y a en effet une logique amont - aval très forte.

 La dégradation des milieux naturels et des ressources en eau, le coût d'entretien des lits et des ouvrages, la perte de capacité des retenues, tout conduit, dans l'esprit de la Loi sur l'eau, à considérer le rétablissement du transit sédimentaire comme un objectif prioritaire sur beaucoup de cours d'eau.

Souvent en effet, la réduction ou la suppression des déséquilibres locaux au profit d'un fonctionnement d'ensemble plus cohérent devraient permettre de réduire les besoins d'aménagement des cours d'eau, tout en améliorant la qualité des milieux associés.

L'objectif affiché est là de rétablir au mieux le transport solide de la rivière, soit en favorisant le transit des apports amont, soit en acceptant des reprises d'érosion sur les berges. On rejoint alors la politique de promotion des espaces de liberté (appelés également espaces de divagation ou fuseaux de mobilité).

On ne peut cependant pas renouveler une analyse à l'échelle de l'ensemble du bassin pour traiter chaque problème ponctuel.

Il est donc nécessaire de développer un cadre de gestion du cours d'eau qui permette ensuite de traiter rapidement chaque problème ponctuel.



Anse d'érosion sur la Valserine (Ain).

Il faut savoir par ailleurs replacer le problème ponctuel dans un contexte proportionné à l'enjeu. De ce point de vue, le guide fournit le cadre dans lequel il faut analyser le projet d'intervention.

1.5 L'ÉTAT DE LA SCIENCE

La connaissance des mécanismes du transport des matériaux alluvionnaires, trop négligée au cours des trente dernières années au profit des modèles numériques d'écoulement, est indispensable à la mise en œuvre de la politique de restauration et d'entretien du lit des rivières à laquelle nous invite le législateur.

Longtemps considéré comme une ressource ou comme une gêne pour l'écoulement des crues, le matériel alluvial doit être perçu tout autrement aujourd'hui.

Dans la quasi-totalité des cours d'eau français, l'équilibre du lit n'est atteint que par une étroite relation entre la pente longitudinale de la rivière et les transports solides. Nous verrons dans ce guide que c'est le plus souvent le transport solide par charriage qui détermine l'équilibre longitudinal du lit, tandis que le transport en suspension n'intervient que sur les berges.

La morphologie des cours d'eau sauvages n'est pas monotone : elle se caractérise certes par des grandeurs géométriques moyennes, mais leur fluctuation dans le temps et l'espace, qui dépend principalement des crues, favorise la diversité des milieux.

La fixation des fonds et des berges peut alors rendre la morphologie plus monotone et supprimer des écosystèmes dont la préservation est jugée aujourd'hui indispensable.

L'étude des transports solides est aujourd'hui encore embryonnaire.

Les effets du charriage sur l'équilibre du profil en long des cours d'eau sont assez bien connus.

Les lois physiques qui quantifient le transport solide sont nombreuses, empiriques, imprécises et ne couvrent chacune que des domaines d'application limités. Aussi l'appréciation de la vitesse d'évolution d'un cours d'eau perturbé est-elle encore un exercice difficile.

Les caractères morphologiques sont déterminés par le régime des débits liquides et des transports solides, en volume et en qualité, mais on ne sait pas prévoir de façon sûre l'évolution à attendre de tel ou tel aménagement.

INTRODUCTION : ENJEUX ET ATTENTES



La Moselle près d'Épinal.

La géomorphologie fluviale, discipline naturaliste fondée sur l'observation et la mesure de terrain, apporte une contribution indispensable à la compréhension des phénomènes, mais elle n'est guère prédictive, elle non plus.

Nous verrons dans ce guide que la solution des problèmes du charriage des cours d'eau ne peut négliger ni la connaissance des rudiments de la mécanique des transports solides, ni l'interprétation des calculs hydrauliques des modèles numériques, ni les techniques de la géomorphologie fluviale.

1.6 LE CONTENU DU GUIDE

À la base de la présente démarche se trouvent deux questions particulières :

- l'interprétation du contenu de la « loi Barnier », qui prescrit des curages d'entretien sur les cours d'eau de montagne excédentaires ;
- les demandes répétées de curages émises par les riverains après chaque crue notable d'un cours d'eau : ces demandes se font sentir avec le plus d'acuité sur les cours d'eau à fort transport solide, où ce paramètre est clairement perçu comme prépondérant par tous ceux qui vivent avec la rivière.



Ces éléments conduisent à mettre au cœur du sujet **les rivières à sable, à gravier ou à blocs où les phénomènes de charriage** (transport sur le fond) **sont prépondérants**. C'est autour de ces cours d'eau que nous avons construit la trame de ce guide et choisi un certain nombre de méthodes.

Les torrents font l'objet d'une mention particulière. La dynamique du bassin torrentiel n'est pas détaillée ici : notre attention se concentrera sur le comportement des matériaux au débouché dans la vallée principale. Les phénomènes de laves torrentielles ont été également sortis du cadre de ce guide.

Les rivières de plaine répondent aux mêmes mécanismes généraux d'équilibre et de déséquilibre, et la plupart des réflexions de ce guide s'y appliqueront sans difficulté. Seules des adaptations aux outils généraux proposés sont nécessaires. Elles seront précisées au fil du texte.

Le transport des matériaux fins en suspension est pris en compte pour son rôle morphologique sur les lits majeurs des cours d'eau : colmatage des bancs, exhaussement des terrasses latérales, cohésion des berges...

En revanche, les cours d'eau à très faible pente où la suspension joue un rôle morphologique prépondérant ne sont pas traités : si l'on excepte les retenues, les canaux et les estuaires, ces cours d'eau sont rares en France et les méthodes et outils à mettre en œuvre sont trop différents. ■



Tireur de sable à Genève à la fin du XIX^e siècle.



COMPRENDRE LA DYNAMIQUE DU LIT

Ce chapitre propose un survol des principaux aspects de la dynamique fluviale et torrentielle. Nécessairement simplifié, ce parcours a été conçu dans une perspective d'application à des cas concrets. Les considérations théoriques et les questions qui relèvent encore du domaine de la recherche ne sont qu'esquissées.

L'exposé est structuré en trois parties :

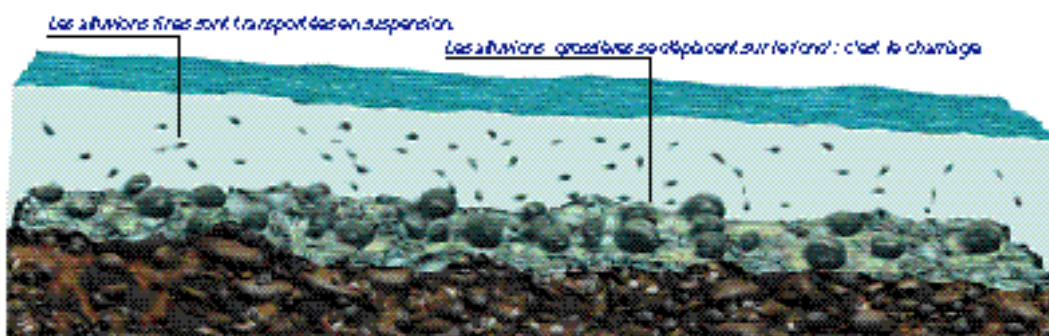
- le fonctionnement « naturel »,
- les dysfonctionnements et les perturbations,
- l'interaction entre la dynamique morphologique et l'ensemble de l'hydrosystème.

2.1 LE FONCTIONNEMENT NATUREL

■ LES MÉCANISMES DU TRANSPORT

On peut caractériser le transport des sédiments, qui s'effectue essentiellement en hautes eaux, par le mode de transport et par l'effet du transport.

Le transport des matériaux dans un cours d'eau peut s'effectuer de deux manières : par charriage ou par suspension¹.



Les mécanismes du transport solide

Le charriage est un transport sur le fond du lit, qui correspond en général aux alluvions les plus grossières, des sables jusqu'aux blocs. **La suspension est le transport « entre deux eaux »** qui concerne les particules fines (argiles, limons, parfois sables dans les rivières les plus rapides) : ce mode de transport est généré par la turbulence, qui détermine des composantes ascensionnelles de la vitesse du courant.

¹ Nous excluons de cette analyse le transport en solution qui n'intéresse pas notre sujet, sauf cas très particuliers, telle la calcification du matériau de fond.



Dans la Durance, l'équilibre du lit est déterminé par le transport par charriage. Cela n'empêche pas le transport en suspension d'y être intense. Mais les limons ainsi transportés n'interviennent pas dans l'équilibre du fond du lit. Leur concentration ne peut donc pas être déduite des caractéristiques morphologiques du lit (la Durance en crue en novembre 1994).

Il faut aussi distinguer le transport en interaction avec le lit du cours d'eau et le transport qui a lieu sans échange avec ce dernier.

Le transport sans échange majeur avec le lit concerne des alluvions plus fines que celles du fond du lit. Ces matériaux ne participent donc pas directement au fonctionnement morphologique du cours d'eau : on parlera de transport « inactif » ou « passif ».

Au contraire, le transport en interaction avec le lit concerne des matériaux d'une taille voisine de celle des matériaux du lit. Les phénomènes de dépôt et de reprise sont importants, conditionnant l'évolution mor-

phologique du lit. On dira alors que le transport est « morphogène » ou « actif ».

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, la définition basée sur l'effet ne se recoupe pas avec la définition basée sur le mode de transport.

Il peut y avoir du charriage inactif, constitué par exemple de sable sur un lit de galets. Mais plus en aval, ce sable peut devenir la composante essentielle du transport et constituer le matériau « actif ».

C'est surtout avec le transport en suspension que la distinction entre transport actif et transport passif est importante.

Dans la quasi-totalité des rivières françaises, le transport en suspension n'a aucune action directe sur l'équilibre et la morphologie du fond.

En revanche, il occasionne presque toujours un dépôt sur les bancs élevés et éloignés du courant vif, dépôt facilité par le développement en parallèle de la végétation. Ce dépôt peut être « inactif », c'est à dire ne pas causer d'interaction avec le lit vif : c'est le cas général des rivières torrentielles à lits en tresse ou à deux chenaux, principal et secondaire.

Mais ce dépôt du transport en suspension peut être « interactif », c'est à dire agir sur les paramètres du charriage de fond et donc sur la morphologie de la rivière : il s'agit alors d'une action « indirecte », toujours combinée avec l'action de la végétation. C'est le cas général des fleuves et rivières de plaine.

Enfin, et très rarement, c'est le transport en suspension qui détermine complètement et directement l'équilibre du fond et des berges de la rivière : ce mécanisme peut être observé dans les retenues hydro-électriques, dans les canaux artificiels et dans les estuaires, mais il est en métropole relativement rare dans les cours d'eau naturels.

La frontière entre « transport actif » et « transport passif » varie beaucoup selon les cours d'eau et sur un même cours d'eau.

Lorsque la rivière coule sur un substratum résistant (rocher dur affleurant, accumulations de blocs éboulés du versant...), tout le transport solide a lieu sans interaction avec le lit. Le lit n'est pas mobile.



D'une manière générale, un cours d'eau qui ne coule pas ou qui ne coule plus sur ses propres alluvions doit être analysé avec beaucoup de prudence.

■ LES ÉQUILIBRES FONDAMENTAUX

Sur un cours d'eau non perturbé, ayant librement façonné son lit, un équilibre moyen s'installe entre le débit solide, le débit liquide, la taille des matériaux et la pente ².

Sur un cours d'eau naturel, le débit liquide, le débit solide à évacuer et la taille des matériaux sont déterminés par la géographie du bassin versant. C'est donc la pente qui est le principal « paramètre de réglage » utilisé par le cours d'eau pour ajuster sa capacité de transport solide aux apports effectifs.



Une rivière à gravier divaguante, le Drac Blanc, dans les Hautes-Alpes : le transport solide par charriage est en interaction directe avec le lit. Les caractéristiques de ce transport peuvent être étudiées à partir des caractéristiques du lit (pente, forme, granulométrie). En revanche, le transport en suspension n'a pas de rôle morphologique, et son intensité dépend des conditions d'apport du bassin versant, et non du fonctionnement local du lit.



Une rivière sur fond fixe (blocage par des blocs éboulés du versant), le Guil dans la combe du Queyras (Hautes-Alpes) : le transport solide n'a guère d'interaction avec le lit (sauf pour des crues exceptionnelles). L'état du lit ne renseigne pas sur le transport réel.



Une rivière de plaine, la Charente à Tonnay-Charente : le transport en suspension acquiert un rôle morphologique de premier plan, pas toujours bien élucidé.

² On considère ici la pente générale du tronçon, après lissage des alternances seuils - mouilles.

Trois systèmes morphologiques différents avec des pentes voisines avoisinant 5 ‰.



Le Rabodeau (Vosges) dans un massif cristallin aux crues modérées. Le lit, très peu mobile, est constitué d'alluvions grossières apportées dans un contexte morphoclimatique ancien différent : la pente est héritée du passé et ne caractérise pas un équilibre dynamique. L'importance des débordements réduit l'efficacité morphologique des crues. Le faible transport solide éventuel (sables issus des affleurements gréseux du bassin) n'a pas d'interaction avec le lit. Il n'en demeure pas moins que des interventions intempestives dans le lit (rupture de l'armure de galet) peut perturber le fonctionnement morphologique du cours d'eau.



L'Ardèche dans un massif cristallin aux crues très violentes. Les apports solides sont faibles, mais la violence des crues cévenoles permet le transport de boules dépassant 300 mm.



La Bléone dans les Alpes. Le contexte géologique et climatique favorise des apports solides importants.

Les autres caractéristiques géométriques du lit peuvent également jouer, mais leur rôle est secondaire. Elles sont le plus souvent une résultante des conditions du transport solide plus qu'un paramètre explicatif, sauf lorsque la largeur du lit est artificiellement réduite.

La capacité de transport de matériaux croît quand le débit liquide et la pente augmentent, et quand la taille des matériaux diminue. Les formules de transport solide donnent une relation approximative entre ces quatre paramètres (en faisant souvent intervenir la géométrie du lit comme une donnée), et permettent de calculer une capacité de transport.

Si le transport solide a lieu en interaction avec le lit sur le tronçon concerné, la capacité de transport est voisine du transport effectif. Alors seulement, il existe un lien direct entre la granulométrie des matériaux transportés, celle des matériaux du lit et la pente. Au contraire, si le transport solide n'interagit pas avec le fond du lit, la notion de capacité de transport devient délicate à utiliser.

Si la rivière ne coule pas sur ses propres alluvions, les notions d'équilibre sédimentologique et de capacité de transport peuvent perdre leur sens. C'est notamment le cas des lits qui s'enfoncent dans des marnes ou des argiles.

■ L'ORIGINE DES MATÉRIAUX

À l'amont des bassins, la production de matériaux résulte de mécanismes variés : gel et dégel, avalanches, érosion glaciaire, glissements de terrain, ruissellement sur terrain nu. Les apports sont très variables dans le temps.

À l'exception du ruissellement, la production de matériaux ne dépend pas de la pluie et est très variable dans le temps. Aussi, dans les bassins torrentiels, il n'y a pas toujours de relation simple entre les débits liquides (liés à la pluie ou à la fonte) et les apports de matériaux.

En particulier, après une longue période sans crues importantes, les berges et le lit du torrent auront accumulé beaucoup de matériaux provenant des versants. Un événement pluvieux intense provoquera une purge du lit du torrent et des apports de matériaux très importants. Le même événement pluvieux survenant sur un bassin déjà purgé ne donnera qu'une crue d'eau claire ou peu chargée. Notons que les bassins à roches tendres (marnes, schistes...) ont généralement des apports plus réguliers.

Lorsque la vallée s'élargit et n'est plus sous l'influence des versants - en particulier sur les cônes de déjection à l'arrivée dans les vallées de rang supérieur -, les

LA DYNAMIQUE DU LIT DES RIVIÈRES



Montgenèvre (Hautes-Alpes) : à la source des matériaux...

zones de dépôt et de reprise des matériaux atténuent l'irrégularité des apports.

C'est pourquoi, sur les rivières torrentielles, débit liquide et débit solide sont beaucoup plus liés que sur les torrents.

Les stocks alluviaux disponibles dans le lit des cours d'eau sont souvent très importants par rapport aux apports annuels. Ils contribuent donc à réguler les transports.

■ LE PROFIL EN LONG DES COURS D'EAU



Toute rivière tend vers une pente qui assure le transport vers l'aval des matériaux solides provenant d'amont.

La pente est le principal paramètre de réglage d'un cours d'eau naturel pour adapter sa capacité de transport aux apports réels, en fonction des débits liquides disponibles et de la taille des matériaux à transporter.

Le profil en long des cours d'eau présente sur la plupart des cours d'eau une grande stabilité naturelle à l'échelle humaine.

Au-delà des fluctuations cycliques observées au gré des crues (mobilité des bancs, des seuils, des mouilles, « respiration du lit »), et en l'absence de perturbations d'origine humaine, on constate en général qu'il n'y a pas de variation mesurable des pentes d'un cours d'eau et de son profil en long à l'échelle du siècle. Cela ne signifie pas que tous les cours d'eau ont atteint leur équilibre. Mais les évolutions sont suffisamment lentes pour que l'on puisse admettre, en première approximation, qu'il y a continuité du transport solide comme hypothèse de travail lors du diagnostic morphologique.

Les exceptions majeures se rencontrent aux grandes ruptures de pente au débouché dans une vallée principale : cônes de

déjection torrentiel, débouché de petits cours d'eau dans une grande vallée alluviale.

En moyenne, la pente décroît d'amont en aval.

Trois causes contribuent à cette décroissance : l'usure du matériau, le tri granulométrique - les petits éléments étant transportés plus facilement et plus fréquemment que les gros - et l'accroissement des débits liquides d'amont en aval.

Souvent, les affluents d'aval apportent plus d'eau que de matériaux. Mais même avec une fourniture homogène en sédiments, la réunion de deux cours d'eau a une capacité de transport supérieure à la somme des capacités individuelles de chacun d'eux. La pente à l'aval du confluent est donc normalement plus faible que les pentes amont. Parallèlement, la fréquence du charriage croît d'amont en aval : aux torrents qui fonctionnent par crise succèdent les rivières torrentielles (actives quelques dizaines de jours par an) puis les rivières de plaine divagantes qui peuvent charrier des alluvions plus de cent jours par an.

■ LA DYNAMIQUE ORDINAIRE ET LES CRISES

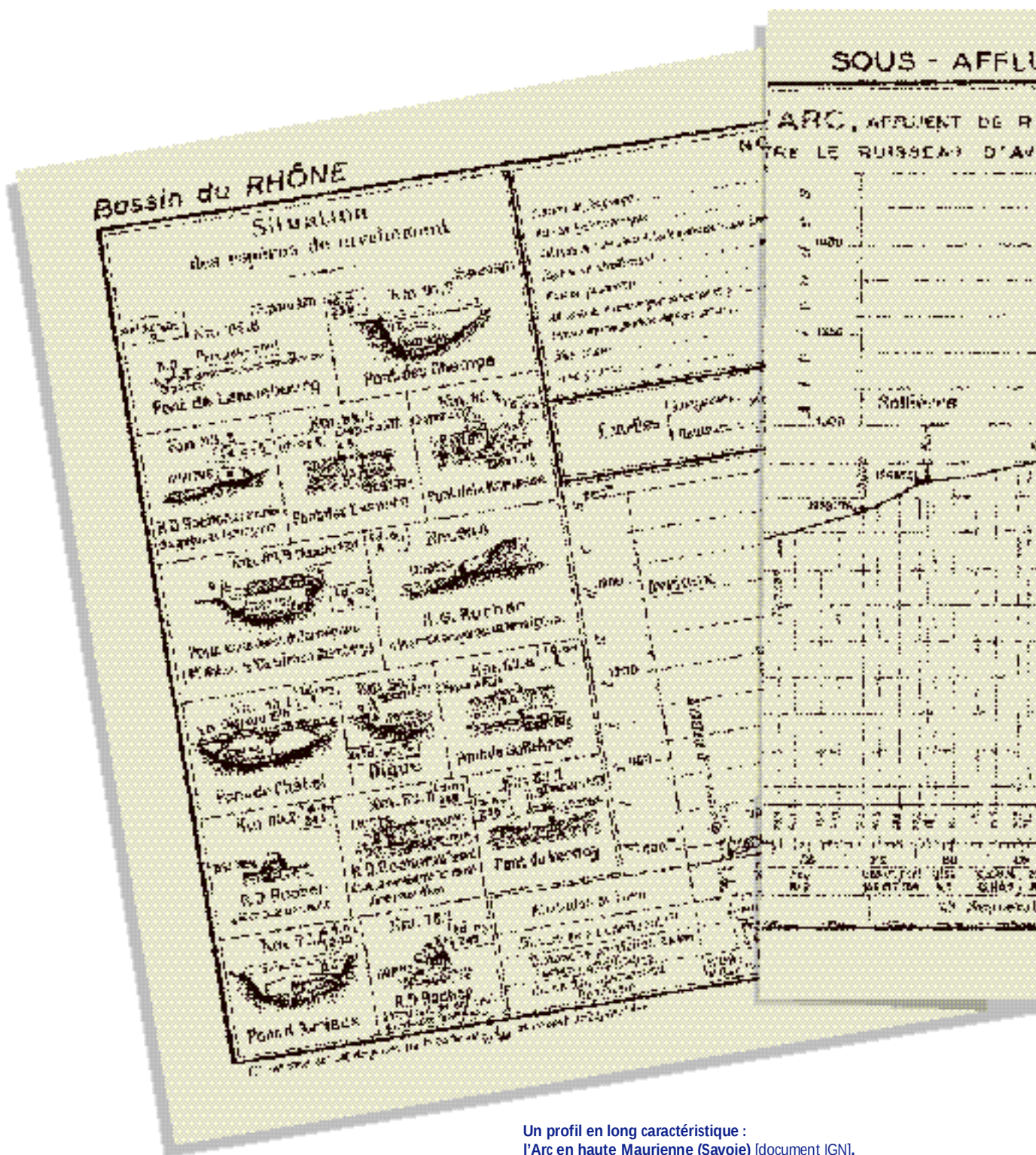
Les débits liquides et solides varient dans le temps : la morphologie du cours d'eau correspond à un équilibre moyen.

Sur les torrents, les apports liquides et solides varient brutalement : ils fonctionnent par crises. Dans les cours d'eau de vallée et de plaine, les apports sont mieux régulés et la morphologie du lit est relativement stable au cours du temps.

Sur les cours d'eau de plaine, les débits les plus efficaces d'un point de vue morphologique sont les hautes eaux annuelles. Ces débits sont qualifiés de « dominants » ou « morphogènes ».



L'alternance des seuils et des mouilles sur l'Ardèche. La plupart des cours d'eau présentent à l'étiage une succession de rapides, les « seuils », et de zones plus calmes, les « mouilles ».



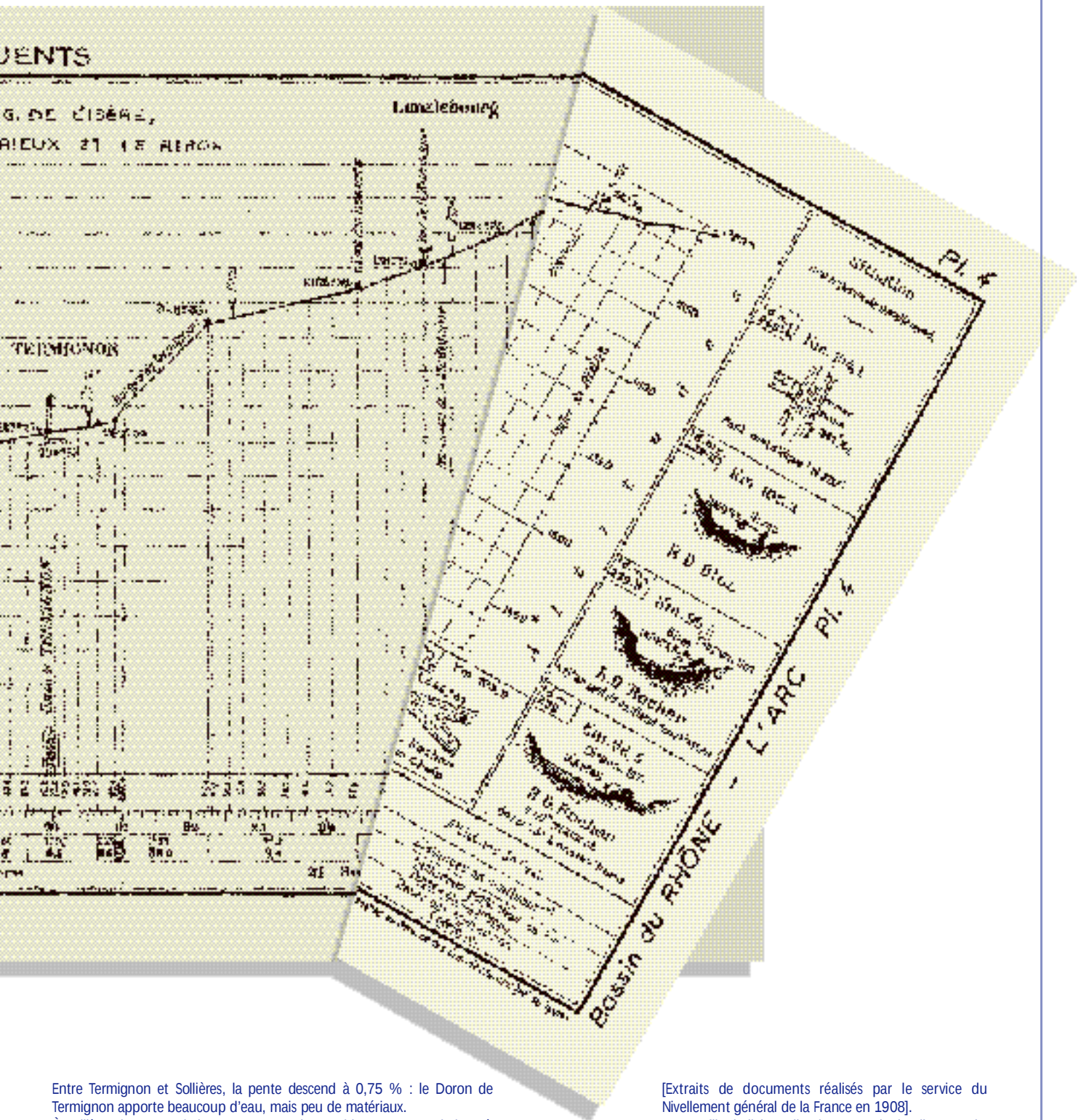
Un profil en long caractéristique :

l'Arc en haute Maurienne (Savoie) [document IGN].

À l'amont des gorges, la pente de 0,94 ‰ caractérise les conditions d'équilibre locales.

Dans les gorges rocheuses, la pente (3,8 ‰) n'est pas morphologiquement significative : la capacité de transport est énorme, mais le transport effectif est limité aux apports amont.

LA DYNAMIQUE DU LIT DES RIVIÈRES



Entre Termignon et Sollières, la pente descend à 0,75 % : le Doron de Termignon apporte beaucoup d'eau, mais peu de matériaux.

À Sollières, le torrent de l'Envers apporte de gros blocs. La pente de l'Arc à l'aval passe à 1,9 %, pour tenter de reprendre ces matériaux.

Plus en aval, le tri granulométrique a réduit la taille des matériaux. La pente retrouve une valeur plus ordinaire pour ce tronçon, voisine de 1 %.

[Extraits de documents réalisés par le service du Nivellement général de la France en 1908].

Des profils similaires, dits des Forces hydrauliques, existent sur de nombreux cours d'eau pour la période 1900-1950 et fournissent une référence souvent précieuse. Ils sont disponibles à l'Institut géographique national.



Comme beaucoup d'autres dans les Pyrénées, ce torrent de la haute vallée de l'Ariège a une activité ordinaire très faible ; le lit est fixé par des boules. Mais lors d'un événement exceptionnel, le lit peut être remanié et le torrent atteindre une saturation en transport solide.

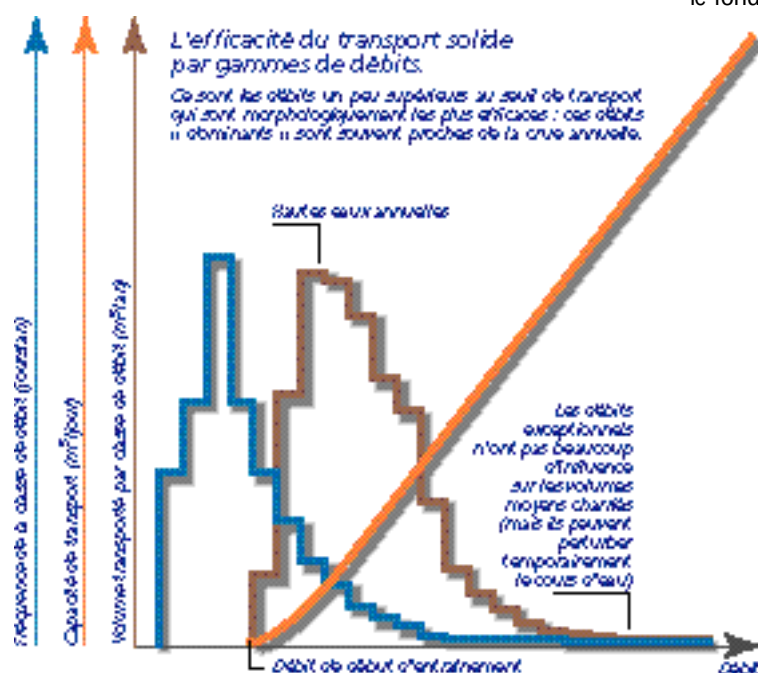
Le débit dominant est celui qui transporte le plus fort volume cumulé. C'est lui qui assure le façonnement permanent du lit (érosion à l'extérieur des coudes, déplacement de bancs...).

Les étiages et les débits moyens ne transportent pas de matériaux. En raison de leur rareté, les fortes crues ne pèsent pas beaucoup dans le bilan annuel moyen.



Mais ces crues exceptionnelles peuvent bouleverser le lit, qui se cicatrise ensuite lentement.

Ces crues exceptionnelles sont seules capables de modifier profondément la géométrie du lit, jusqu'à ouvrir de nouveaux bras. Elles peuvent également laisser des bancs importants, que les crues ordinaires auront du mal à reprendre.



■ LA RÉDUCTION DES APPORTS ET L'INERTIE DU SYSTÈME

Il semblerait qu'une tendance générale à la réduction des apports solides se fasse jour depuis un siècle. Mais cette évolution est le plus souvent masquée par les perturbations d'origine humaine, beaucoup plus importantes.

Les évolutions climatiques sur les derniers siècles et l'allègement de la pression pastorale en montagne semblent concourir à une réduction des apports de sédiments. Ces évolutions peuvent se traduire par un abaissement du lit et par un changement du style morphologique (disparition du tressage).

Mais ces évolutions, lentes, sont masquées, sur la plupart des cours d'eau, par des perturbations d'origine humaine (extractions, endiguements, modifications de l'hydrologie, interruption du transit des matériaux).

En outre, l'alternance naturelle de crises et de périodes de rémission sur certains cours d'eau peut parfois être confondue avec une tendance d'évolution plus lourde.

L'importance du stock alluvial amortit la réaction d'un cours d'eau à des changements des conditions morphologiques.

Sur de nombreux cours d'eau, le stock alluvial disponible dans la vallée est très important par rapport au transit sédimentaire annuel. Il s'ensuit que des processus d'érosion sur le fond ou sur les berges peuvent compenser rapidement un déficit d'apports solides à l'amont. Ce mécanisme donne une grande inertie au système : des évolutions sur le haut bassin mettent des décennies, voire des siècles pour se répercuter sur la basse vallée. Parfois, les endiguements et protections de berge accélèrent cette répercussion.

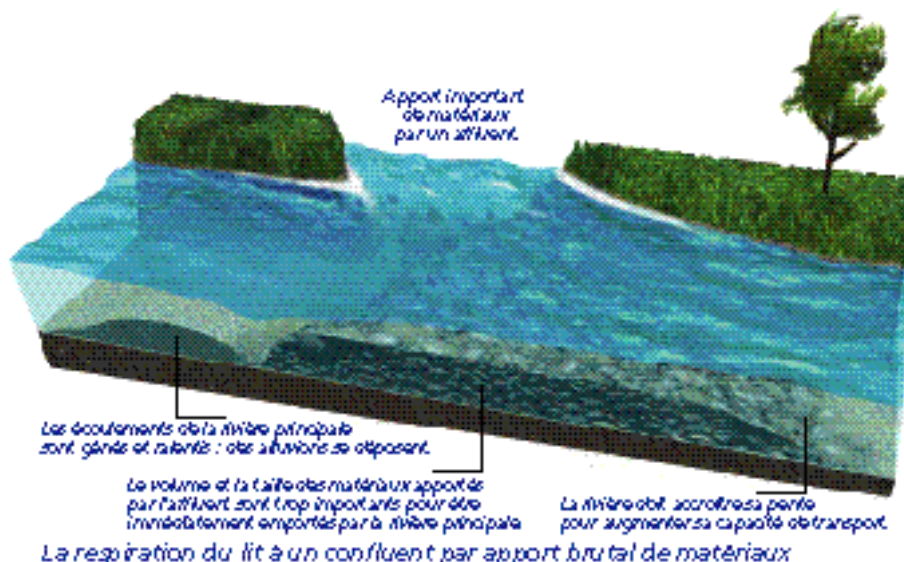
LA DYNAMIQUE DU LIT DES RIVIÈRES



■ LA RESPIRATION DU LIT, LES CONFLUENCES

La notion d'équilibre du lit n'est qu'une situation moyenne : chaque configuration de crue conduit à un état particulier du lit, remodelé par les crues suivantes.

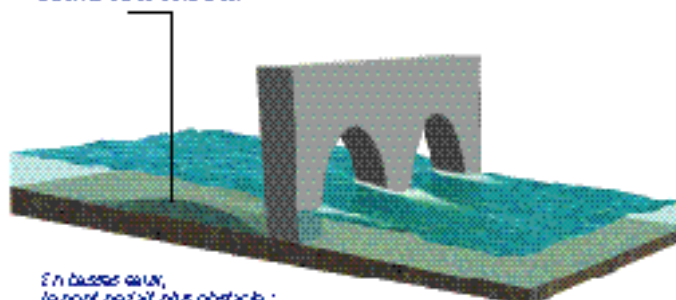
On appelle « respiration du lit » les variations du lit en altitude autour d'un niveau moyen.



La déjection d'un torrent dans une rivière : le débouché du torrent de l'Envers dans l'Arc (Savoie) après la crue de juillet 1982.

Au droit d'un confluent, les régimes respectifs d'apports liquides et solides de l'affluent et du cours d'eau principal peuvent conduire à de fortes variations du lit en altitude. C'est le cas notamment au débouché de torrents dans une rivière plus importante. Les déjections du torrent peuvent obstruer la rivière principale : il lui faudra plusieurs crues pour reprendre ces matériaux.

Le pont crée une perte de charge en crue. Les écoulements en amont du pont sont ralentis : un dépôt se forme, plus ou moins important, selon la durée de la crue.



En basses eaux, le pont ne fait plus obstacle : le dépôt est repris, faisant des bancs perchés.

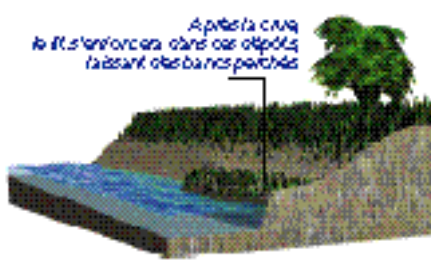
La respiration à l'amont d'un obstacle

La respiration du lit peut se produire également en amont de singularités (rétrécissements du lit, ponts, seuils...). L'effet de ces singularités varie avec le débit.

Voir fiche outil « Loi d'alignement des charges ».

Ces phénomènes de respiration, au cœur des problèmes de dynamique torrentielle, jouent un rôle essentiel de régulation du transport solide.

Les autres caractéristiques géométriques du lit (largeur, notamment) peuvent connaître également des fluctuations dans le temps. Il peut s'agir soit de tendance lourde (contraction du lit vif en cas de déficit d'apports, par exemple), soit de fluctuations normales au gré des crues (alternance de phases de végétalisation et d'érosion des bancs).



A photograph of a river flowing through a landscape. The river is in the foreground, with a small island of yellowish-brown vegetation in the middle. The banks are covered in green grass and there are trees in the background. The sky is overcast.



LA DYNAMIQUE DU LIT DES RIVIÈRES



■ LA GRANULOMÉTRIE DES MATÉRIAUX

La granulométrie des matériaux décroît d'amont en aval. Cette décroissance, contrariée ou accentuée localement par les apports des affluents, recouvre deux phénomènes : l'usure des matériaux et le tri granulométrique.

Le tri granulométrique intervient lorsque le transport solide est faible : les matériaux les plus grossiers sont alors moins déplacés que les matériaux les plus fins.



La détermination de la granulométrie caractéristique d'un tronçon de cours d'eau est un exercice délicat.

La composition des alluvions transportées varie avec le débit, les plus fines étant déplacées plus facilement. Mais la relation est rendue complexe par les phénomènes de masquage : les petites particules sont protégées par les plus grosses qui les masquent.

La granulométrie des matériaux transportés va donc varier avec le débit et diffère alors de celle présente dans le lit : elle est plus fine en général. Cette différence est modérée dans les lits très mobiles, surtout pour les lits en tresse, car c'est alors l'ensemble du stock qui est déplacé. Elle peut devenir majeure dans des cas où le lit se pave à l'aide des éléments les plus gros.

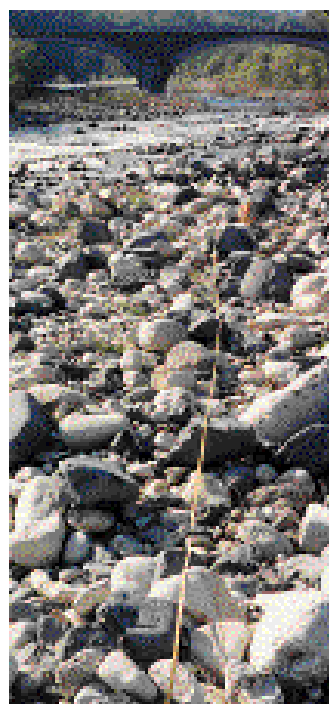
Le pavage au sens strict résulte d'un tri granulométrique. Il est provoqué le plus souvent par un déficit de l'apport solide par rapport à la potentialité de transport de la rivière.

Ainsi, le resserrement du lit, naturel ou forcé par un endiguement, accroît la capacité de transport solide aux débits où l'apport amont est faible, ce qui provoque la formation d'une carapace en surface constituée des éléments les plus gros. Au fil du temps, seules des crues de plus en plus fortes sont capables de remettre en mouvement cette armure.

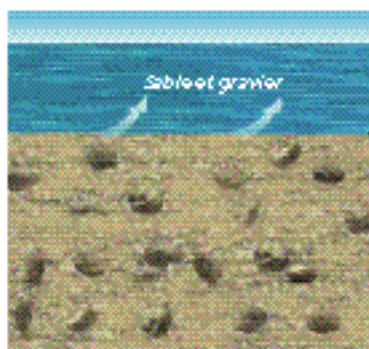
Un autre mode de pavage qui concerne tous les types de rivières se développe en aval des retenues qui stoppent le transport solide : la rivière tend à prélever les matériaux sur le stock en place, mais ce prélèvement concerne en priorité les éléments les plus fins. Le lit se pave avec la fraction grossière et ne peut se mettre en mouvement que pour des débits de plus en plus forts et de plus en plus rares. L'enfoncement du lit est alors très inférieur à celui auquel on s'attendait.

Mais la rupture du pavage peut alors avoir des conséquences morphologiques importantes, si le pavage avait entravé un abaissement du lit.

Enfin, la granulométrie des alluvions varie au sein d'un lit. Elle est maximale sur les formes de résistance (têtes de bancs, seuils). Elle décroît de la tête d'un banc en direction de la queue. Elle est plus faible dans les mouilles qui connaissent un remplissage par des alluvions plus fines en décrue.



Mesure de granulométrie de surface dans le lit de l'Ardèche.



En cas d'atavisme d'apports solides, les alluvions les plus fines sont plus facilement emportées. Le mécanisme du pavage.



Il se forme à la surface du lit une couche de protection plus grossière.



Ce « pavage » devient de moins en moins mobile, il ne peut être rompu que par une crue exceptionnelle.

■ LE RÔLE DES SÉDIMENTS FINS ET DE LA VÉGÉTATION

Sur les torrents et les rivières torrentielles, les sédiments fins ne jouent un rôle morphologique que sur les marges du lit actif, dans les espaces végétalisés.

La végétation joue un rôle de peigne et piège les sables fins et les limons. La terrasse s'exhausse ainsi. Moins submersible, la végétation s'y développe encore, et les débordements suivants y déposent davantage de sédiments plus fins. Ces terrasses ne sont reprises que par érosion latérale.

 **Sur les rivières de plaine, les sédiments fins transportés en suspension jouent un rôle important dans la formation et la résistance à l'érosion des berges.**



Érosion de berges sur la Meuse.

Les eaux fortement chargées en matières en suspension libèrent dès le début du débordement une part importante de leur charge, par chute de la vitesse : il se forme ainsi des bourrelets de berge naturels qui contribuent dans certains cas à la formation d'une « plaine en toit », où le lit majeur s'abaisse quand on s'éloigne de la rivière.

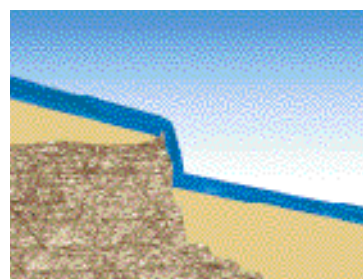
■ LE RÔLE DU SUBSTRATUM DANS LA MORPHOLOGIE

Sous le matériau alluvial, constitué de sables, de graviers ou de galets, on trouvera systématiquement un matériau différent, le plus souvent cohésif, rocheux ou détritique⁴. Il peut s'agir d'un substratum « rocheux » (au sens commun du terme), mais aussi de sédiments hérités d'un système morphoclimatique antérieur (par exemple, des argiles lacustres).

La compréhension de l'interaction entre le transport solide de surface et le mécanisme d'érosion du substratum est essentielle : une vision superficielle de cette interaction peut conduire à de grosses déconvenues.

 **Le substratum n'est pas toujours une roche dure, peu érodable.**

Selon une idée répandue, le substratum est toujours une roche dure : son affleurement détermine une discontinuité dans l'écoulement, décelable à l'œil ou en traçant le profil en long de la rivière.



Lorsque l'on pense au rôle du substratum rocheux, on imagine tout de suite les cascades ou les rapides créant une discontinuité dans le profil en long du torrent, de la rivière ou du fleuve. Dans ce cas, les matériaux transportés en amont de la « singularité » se retrouvent en aval.

Cette idée est renforcée par les résultats des sondages géotechniques destinés à la définition des fondations d'ouvrages en rivière : la recherche du « bon sol » suggère la présence d'un substratum résistant. Or, s'il est vrai que les qualités pressiométriques du substratum sont le plus souvent supérieures à celles des matériaux alluvionnaires superficiels, sa résistance à l'érosion est souvent médiocre, par exemple lorsqu'il est composé de marnes, ce qui est très fréquent.

Dans la majorité des cas, on constate que l'épaisseur des alluvions transportées par la rivière est peu variable et souvent relativement faible, le substratum étant présent à faible profondeur. Quel est alors le facteur qui détermine l'équilibre du lit alluvionnaire : la couverture alluviale ou le substratum ?



L'affleurement d'un banc calcaire sur le Verdon

⁴ On trouvera une description plus complète de la genèse des vallées alluviales dans l'ouvrage de J.P. Bravard et F. Petit, « Les cours d'eau – Dynamique du système fluvial », 1997, Armand Colin.

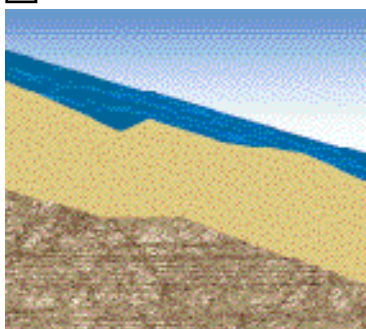
LA DYNAMIQUE DU LIT DES RIVIÈRES



Comment peut-on caractériser l'interaction entre le manteau alluvial et le substratum et quel est le rôle de chacun de ces deux matériaux dans l'équilibre morphologique de la rivière ?

Trois schémas permettent de caractériser cette interaction.

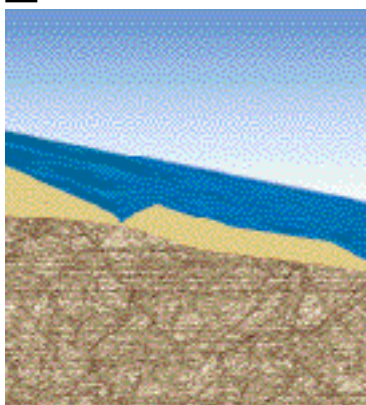
1



Dans cette structure, assez peu fréquente, la profondeur des alluvions est forte et le substratum est hors d'atteinte des variations contemporaines du lit. On a alors affaire à un lit alluvionnaire homogène : une variation importante de la cote des fonds n'introduira pas de changement qualitatif dans le processus du transport solide.

Ce schéma se rencontre le plus souvent dans les plaines de remplissage alluvial, anciennes fosses glaciaires ou dans les plaines littorales : on a alors une tendance naturelle à l'exhaussement du fond.

2



L'épaisseur des alluvions est beaucoup plus faible : le substratum affleure très localement, notamment dans les moulles, là où la profondeur d'eau est maximum, mais aussi parfois sur des seuils, en ne créant que de faibles dénivellées. Une variation faible de l'épaisseur des alluvions, causée par un curage ou une extraction, peut alors provoquer un découverture du substratum et une érosion de celui-ci.

Ce schéma est caractéristique des rivières stables ou en cours de creusement très lent. Les alluvions transportées constituent alors une « peau » protégeant le substratum de l'érosion : ce processus s'applique tout aussi bien aux substratums érodables, tels que les marnes, les argiles, les molasses et les grès tendres qu'aux roches dures.

On note souvent que les seuils de roche, quoique affleurants à l'étiage, sont suffisamment érodés pour ne plus créer, en crue, de singularité dans le profil en long de la ligne d'eau.

On peut s'étonner qu'un matériau mobile, affouillable, joue le rôle de protection des roches constituant le substratum : ce

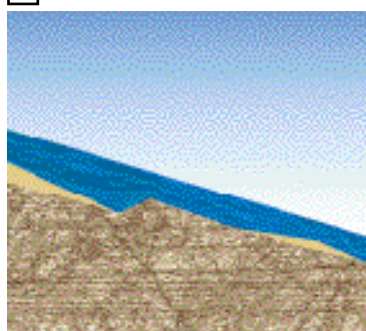
caractère de la plupart de nos rivières est lié à la capacité de renouvellement du matériau alluvial par le processus de charriage. On voit alors que, dans un grand nombre de cas, la présence du stock alluvial est indispensable à la protection des fonds des rivières.



Un curage de ces rivières ne pourra être entrepris que si l'épaisseur des alluvions et la qualité du substratum ont été très minutieusement reconnues.

Avec ce schéma, c'est encore le charriage de fond qui est le facteur essentiel de l'équilibre du lit. L'érosion du substratum ne se produit que très rarement ou très lentement, car elle est rare et très localisée.

3



Le substratum est découvert sur la majeure partie de la surface : ceci ne veut pas dire qu'il n'y a aucun charriage de fond, mais seulement que celui-ci n'est pas la cause déterminante de l'équilibre du lit. Dans ce cas, la pente ne sera pas régularisée par le charriage, mais sera fonction de la résistance de la roche à l'abrasion.

L'extraction des granulats a souvent provoqué un changement de la morphologie des cours d'eau en mettant à nu le substratum sur des linéaires importants.

On peut distinguer plusieurs sortes de substratum, en fonction de leur composition et de leur origine.

La roche en place, originelle et homogène, peut être une roche dure, peu érodable ou au contraire facilement érodable : ainsi, certains cours d'eau présentent sous le manteau alluvial un substratum sableux très sensible à l'érosion. La roche peut être d'ailleurs d'origine alluvionnaire, comme les poudingues, produits de la cimentation des galets.

Des formations détritiques, produits de l'altération de la roche originelle par l'érosion du fond du fleuve, tels que des silex ou des blocs calcaires résidus d'une roche hétérogène se rencontrent par exemple dans la vallée de la Loire.

Les produits de l'éboulement latéral des versants dans les vallées de montagne peuvent bloquer le lit. Les crues entraînent les éléments les plus fins et laissent en place les plus gros blocs, qui ne sont que faiblement ou pas du tout déplacés.

On peut associer au type précédent, les dépôts de blocs apportés dans les vallées par les laves torrentielles ou les charriages exceptionnels des torrents de versant à très forte pente

Quelques types de substratums :



©IGN - PARIS 1996

La Loire moyenne « naturelle », de Nevers à Angers, n'offrait le plus souvent que des épaisseurs d'alluvions de quelques mètres facilement mises à nu dans les mouilles ou sur des seuils peu marqués. Les ouvrages de navigation et plus encore les extractions de granulats ont accentué le découverture et l'érosion de substratums de nature géologique très variée. Or le profil en long du fleuve était auparavant d'une extrême régularité, ce qui témoigne du rôle du transport solide par charriage dans l'équilibre longitudinal de la rivière [IGN].



L'Ebron, dans l'Isère, entaille naturellement des dépôts argileux d'origine lacustre. On notera l'ancien matelas alluvial en surface.



Au confluent de l'Arve et du Giffre (Haute-Savoie), l'incision du lit dans un substrat limoneux.

(6 % à 30 %). Bien qu'à l'origine transportés par l'eau, ces matériaux n'ont pas un comportement différent des roches éboulées des versants : constitution de rapides relativement stables à l'aval des éboulements comme à l'aval des cônes de déjection des torrents affluents. Leur dépôt s'effectue par un processus de tri, la rivière torrentielle emportant en aval les matériaux les plus petits.

L'identification du substratum est souvent un préalable à tout étude de transport solide. C'est le cas lorsque des demandes de curage abaissant le lit des cours d'eau sont formulées. Mais cela peut être aussi le cas de cours d'eau encore instables et en cours d'évolution du fait d'extractions en rivière aujourd'hui arrêtées.



Les situations les plus dangereuses concernent les substratums tendres plus érodables que le matériau alluvial de surface : sables ou grès tendres. Dangereuse également est l'érosion des marnes et argiles plastiques, bien que le phénomène d'abrasion soit déjà moins brutal.

Pour les roches plus résistantes, on ne devra pas perdre de vue que leur découverture conduit comme pour les autres matériaux à une érosion qui était empêchée par la présence du manteau alluvial. Cette érosion est certes beaucoup plus lente, mais elle est tout aussi irréversible.

On se souviendra également que le découverture du substratum occasionne parfois une mise à l'air aussi dangereuse pour son intégrité que l'érosion par l'eau. **Les marnes mises à l'air lors des étiages d'été subissent une « desquamation » formant des plaquettes facilement entraînées par les premières crues d'automne.**



Ces affleurements d'argiles vertes dans le lit de la Loire, dans le Forez, ont été provoqués par les extractions en lit mineur. À l'étiage, la dessiccation favorise la fragmentation des argiles, qui sont érodées lors des crues.



Dans les Alpes du Sud, les terres noires plastiques mises à l'air perdent leurs propriétés et se décomposent en fine poussière. Sur le Fier, le découvrément, après extraction d'un seuil de roche calcaire de bonne résistance, mais gélive, a provoqué un recul rapide du seuil qui a nécessité un confortement onéreux.



En conclusion, on doit toujours se souvenir que les alluvions charriées sur le fond constituent un manteau protecteur pour le substratum, que celui-ci soit de bonne ou de mauvaise qualité : le transport des alluvions dans une rivière en équilibre garantit un renouvellement de cette protection.

2.2 LES MÉCANISMES DE PERTURBATION ET LEURS CONSÉQUENCES

La morphologie d'un cours d'eau (altitude, pente, mais aussi formes du lit) s'ajuste donc en permanence pour assurer le transport des matériaux provenant d'amont, en fonction de leur taille et de la chronique des débits liquides.



Toute perturbation, d'origine naturelle ou humaine, d'un des éléments de ce système conduit à une adaptation de la morphologie du cours d'eau aux nouvelles conditions.

Ainsi, tout prélèvement dans le lit vif, même inférieur aux apports naturels du cours d'eau, induit un déficit du transit sédimentaire : il sera compensé par une diminution du stock, c'est-à-dire par un abaissement du lit.

■ MÉCANISMES ÉLÉMENTAIRES D'AJUSTEMENT DU PROFIL EN LONG

Les phases transitoires d'ajustement du profil en long à une perturbation peuvent être ramenées à quatre types majeurs, selon qu'il y a exhaussement ou abaissement du lit, et que le processus se propage d'amont vers l'aval ou d'aval vers l'amont.

La compréhension des ajustements repose sur la relation fondamentale de l'équilibre morphologique qui lie entre eux les quatre variables : débit solide, débit liquide, pente et granulométrie.

Les perturbations humaines portent principalement sur la pente et sur les débits liquides et solides.

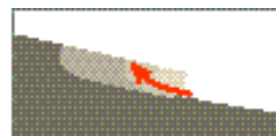
Retrouver un équilibre, c'est assurer la continuité des débits solides et liquides. Ce sont donc la pente (et les autres

aspects de la morphologie, voir ci-après) et la granulométrie des matériaux qui vont en définitive se modifier pour répondre aux perturbations.

• L'abaissement d'aval vers l'amont : l'érosion régressive

Origine : abaissement du lit en aval à la suite d'extractions, de curages ou d'endiguements, réduction de la longueur du lit par coupures de méandres.

Mécanisme : l'accroissement de la pente conduit à une augmentation de la capacité de transport, qui devient supérieure aux apports. La différence est compensée par une érosion du fond du lit et des berges. L'érosion se propage vers l'amont pour rétablir la pente d'équilibre initiale.



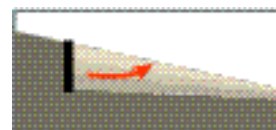
L'érosion régressive : le Suran, dans l'Ain, après ruine d'un ancien seuil.

Évolution : la propagation vers l'amont ne s'interrompt qu'à la rencontre d'un point dur (seuil, affleurement rocheux). En un point donné, le creusement du lit cesse quand la pente a retrouvé sa valeur initiale. Au terme de l'évolution, l'abaissement du lit a la même intensité sur tout le tronçon perturbé, sauf si cette érosion a mis à nu un substratum tendre : le lit peut alors s'inciser profondément, avec basculement de la pente.

• L'abaissement d'amont vers l'aval : l'érosion progressive

Origine : excédent des débits liquides par rapport aux apports solides (déficit d'apports solides, piégés dans des retenues ou des gravières ; ou bien apports d'eau claire, par exemple au retour d'un canal de dérivation).

Mécanisme : dans un premier temps, la pente dans le





L'érosion progressive : pavage du lit de la Loire à l'aval du barrage de Villereest.

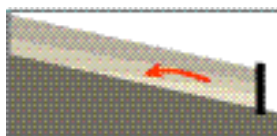
tronçon à l'aval de la perturbation tend à diminuer pour rétablir l'équilibre. Il s'ensuit un abaissement maximum à l'amont de ce tronçon. Cependant, cet abaissement s'accompagne le plus souvent d'un pavage du lit : les matériaux fins sont emportés plus facilement, laissant en surface une couche de matériaux plus grossiers, de moins en moins mobiles.

Évolution : la formation du pavage entrave l'abaissement du lit qui se fige peu à peu. Seule une crue majeure est capable de casser ce pavage, avec une reprise limitée de l'abaissement du lit.

• L'exhaussement d'aval vers l'amont

Origine : élévation du niveau en aval (barrage, seuil, alluvionnement au confluent...) ou allongement du cours d'eau (sédimentation littorale ou éloignement en plan du cours d'eau principal).

Mécanisme : fonctionnement inverse de celui de l'érosion régressive. La réduction de la pente conduit à une capacité de transport inférieure aux apports. Cette différence est compensée par un dépôt de matériaux. L'exhaussement se pro-



L'exhaussement vers l'amont : exhaussement du lit dans la queue de retenue de Castillon, sur le Verdon (Alpes-de-Haute-Provence). On notera que le seuil a disparu sous les alluvions entre 1960 et 1995.



page vers l'amont pour rétablir la pente d'équilibre initiale.

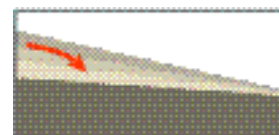
Évolution : en un point donné, l'exhaussement du lit cesse quand la pente a retrouvé sa valeur initiale. Au terme de l'évolution, l'exhaussement du lit a théoriquement la même intensité sur tout le tronçon perturbé.

• L'exhaussement d'amont vers l'aval

Origine : déficit des débits liquides par rapport aux apports solides (dérivation d'eau claire, apports excessifs de sédiments par un affluent).

Mécanisme : la pente dans le tronçon à l'aval de la perturbation tend à augmenter pour rétablir l'équilibre. Il s'ensuit un exhaussement maximum à l'amont du tronçon.

Évolution : cette évolution n'a en théorie pas de limite. Dans les faits, le gestionnaire qui est à l'origine de la perturbation est conduit à des curages réguliers du lit.



■ INTERACTIONS ENTRE TRANSPORT SOLIDE ET MORPHOLOGIE



Les perturbations des équilibres morphologiques peuvent conduire à des changements du style morphologique du cours d'eau, et vice versa. Ce changement est évident pour les rivières largement divaguantes (notamment lits en tresse) qui sont contraintes en largeur par des endiguements.

La transition tressage - méandrement est un signe caractéristique de perturbation. Le tressage est un signe d'excédent relatif de matériaux. Le méandrement traduit au contraire un certain déficit relatif. C'est ainsi que des rivières en tresse soumises à une érosion régressive (capacité de transport supérieure aux apports) peuvent développer des formes de méandres très agressifs.



LA DYNAMIQUE DU LIT DES RIVIÈRES



©IGN - PARIS 1956

Vues aériennes en 1950 et en 1996 de la Durance à l'aval de Pertuis. On assiste au passage d'un tressage actif à un méandrement peu mobile : l'interruption du transit des matériaux dans des souilles d'extraction juste en amont a favorisé l'apparition d'une érosion progressive, avec formation d'un pavage. En outre, les débits morphologiquement actifs sont devenus rares depuis l'aménagement hydroélectrique [IGN].



©IGN - PARIS 1996

Inversement, un accroissement des apports solides peut favoriser le passage d'un style à méandres à un style à tresses : le cas a été observé lors du petit âge glaciaire des XVII^e et XVIII^e siècles.



Un banc de limons au droit d'Avignon. L'interruption du transit des matériaux dans des souilles d'extraction et la réduction des débits conduisent à une transformation radicale du style morphologique : à un lit en tresse succède aujourd'hui une morphologie de rivière de plaine, à lit unique profond et relativement étroit.

Un déficit hydrologique marqué (dérivations d'eau importantes) conduit à un autre type de changement morphologique : la réduction de la fréquence des débits morphologiquement actifs favorise le colmatage des bancs par les limons et le développement de la végétation qui favorise à son tour le dépôt des limons. Le cycle conduit à un ou plusieurs bras vifs étroits et profonds entre des bancs de moins en moins mobiles et de plus en plus élevés. C'est pour entraver cette évolution que les cours d'eau dérivés doivent être régulièrement essartés.



La modification artificielle de la géométrie du lit perturbe localement les conditions du transport solide.

La géométrie du lit étant la résultante des conditions de transport solide, sa modification artificielle perturbe l'équilibre du lit. Un endiguement excessivement étroit accroît la capacité de transport : la réponse est alors une réduction de la pente et éventuellement la formation d'un pavage.

Inversement, un élargissement ou un accroissement de section par arasement de bancs réduit cette capacité de transport : une tendance au dépôt se fera jour jusqu'à ce que le lit retrouve sa morphologie initiale.

Par ailleurs, certaines formes présentent une grande constance spatiale. Par exemple, la formation de bancs à l'intérieur d'un coude est un mécanisme normal : après arasement, le banc se reformera inéluctablement. De même, lorsque le tracé d'une voie a coupé une anse d'érosion, on observe que ce point reste souvent un lieu d'attaque privilégié même lorsque la berge a été rectifiée.

Suivant les mécanismes d'ajustement du profil en long exposé plus haut, ces perturbations locales peuvent modifier la morphologie du lit au delà de la zone d'intervention.

■ CAUSES ET CONSÉQUENCES DES PERTURBATIONS

• Les barrages au fil de l'eau

Mécanismes de perturbation : les barrages mobiles au fil de l'eau et les seuils fixes des moulins ne créent qu'un remous de quelques mètres au plus, principalement en étiage. Pour les barrages mobiles, les incidences morphologiques dépendent des détails des consignes de gestion, et notamment du seuil de débit au-delà duquel le barrage est « effacé ». Pour les seuils fixes, l'incidence dépend de la perte de charge créée par l'ouvrage.



Le barrage de Séchilienne sur la Romanche (Isère).

Conséquences : le transit des matériaux de charriage reprend sur le barrage lorsque le lit s'est alluvionné sur une hauteur égale à la perte de charge observée lorsque la rivière charrie (cf. § 5.3). Tant que le transit n'a pas repris, on note une tendance à l'érosion progressive en aval. Le transport en suspension est peu affecté.

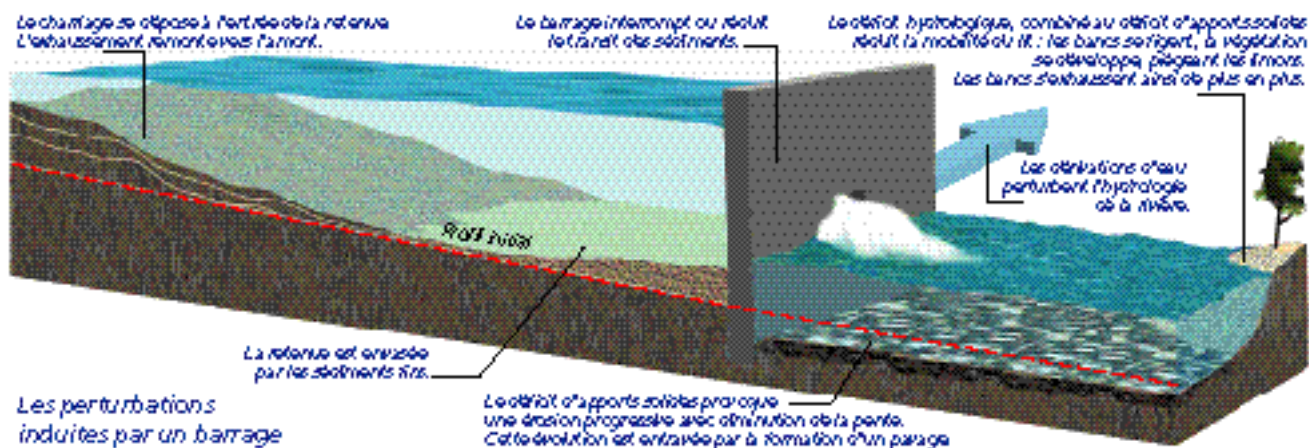
Devenir : l'abaissement du lit aval est rapidement entravé par un pavage du lit, qui conduit à un lit de moins en moins mobile.

• Les barrages réservoirs

D'autres barrages, dont les grands réservoirs, ne permettent jamais le transit des matériaux, piégés dans les retenues, tant en ce qui concerne les matériaux fins en suspension que les matériaux de charriage.

Conséquences : à l'entrée de la retenue, tendance à l'enlèvement du lit, qui remonte vers l'amont ; dans la retenue, dépôt des sédiments en suspension.

LA DYNAMIQUE DU LIT DES RIVIÈRES



À l'aval du barrage, l'absence totale et durable d'apports solides conduit à une érosion progressive du lit.

Devenir : l'exhaussement amont, inéluctable, peut nécessiter des opérations de curage répétées (ou des autorisations d'extractions). Le réservoir aura une durée de vie limitée par le colmatage de la retenue. Les chasses effectuées lors des vidanges décennales sont souvent peu efficaces et très traumatisantes pour la vie piscicole. Des ouvertures de vanne de fond lors de crues déterminées peuvent permettre le transit des matériaux sur les retenues moyennes : ce sont les opérations de « transparence ».

• Les dérivations d'eau

Dérivation d'eau claire à partir d'une prise d'eau en rivière ou d'une retenue.

Mécanisme de perturbation : la réduction des débits liquides dans le cours d'eau conduit à une réduction de sa capacité de transport solide.

Conséquences : Il y a une tendance à l'exhaussement du lit, notamment au débouché des affluents chargés (problématique de l'Arc dans la vallée de la Maurienne en Savoie).



Un lit figé sur la Durance : les dérivations d'eau ont réduit le transit de graviers d'un facteur 10. Conjuguée à un déficit d'apports solides (renforcé ici par des extractions), cette réduction de la dynamique du lit favorise une « fermeture » du lit qui peut gêner l'écoulement des crues.

Des curages d'entretien sont périodiquement nécessaires pour maintenir la capacité d'évacuation des crues.

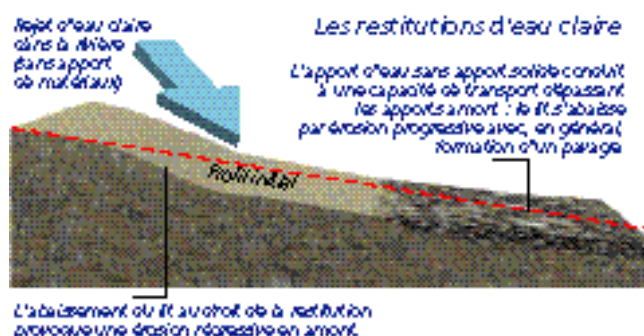
Les débits morphologiquement actifs sont moins fréquents. Le lit a tendance à se figer, avec développement de la végétation et colmatage par les fines. Des opérations d'essartement sont périodiquement nécessaires.

Devenir : les considérations économiques rendent irréversibles la plupart de ces dérivations. Il s'agit donc d'un facteur de perturbation majeur, au cœur de toute réflexion. Cela peut notamment entraver une politique de rétablissement du transport solide.

• Les restitutions d'eau claire

Les restitutions sont le retour à la rivière d'un débit dérivé bien en amont.

Mécanisme de perturbation : les restitutions d'eau claire



correspondent à des apports d'eau sans apports de matériaux (piégés en amont), et donc à un excès de capacité de transport.

Conséquences : les restitutions d'eau claire conduisent à des formes d'érosion progressive.

Devenir : le plus souvent, les évolutions du lit dues à

ces perturbations du régime hydrologique se ralentissent notamment par des phénomènes de pavage du lit. Exceptionnellement, l'exhumation de formations fines peut engendrer des abaissments catastrophiques (ex : la restitution de Pressy sur l'Arve).

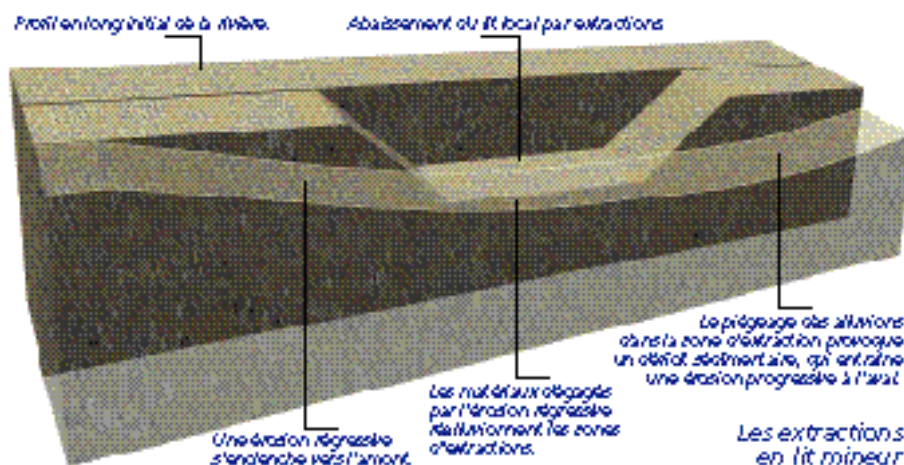
- **Les prélèvements de matériaux en lit mineur**

Ces prélèvements peuvent être soit des extractions de matériaux alluvionnaires (presque partout aujourd'hui interdites), soit des opérations de curage.



Extraction en lit mineur sur le haut Drac (Hautes-Alpes).

Mécanisme de perturbation : les prélèvements de matériaux entraînent un creusement du lit par rapport à la situation initiale. Il y a donc une zone de plus forte pente à l'amont, avec accroissement de la capacité de transport, et une zone de plus faible pente à l'aval, avec réduction, voire suppression (en cas de souilles profondes) de la capacité de transport.



Contrairement à une idée répandue, l'arasement des bancs au-dessus du niveau de la rivière à l'étiage n'est pas sans effet : si ces bancs étaient actifs (bancs non végétalisés), la rivière aura tendance, dès les premières crues, à les reconstituer pour retrouver un profil « naturel », en prélevant les matériaux sur le fond du lit. Le fond moyen du lit aura donc tendance à baisser. L'intérêt de cette technique n'est donc pas morphologique, mais écologique (éviter de travailler sous eau).

Conséquences : la forte pente amont favorise une érosion régressive qui se propage vers l'amont.

La faible pente aval favorise un réengrèvement de la zone perturbée associé à un déficit sédimentaire en aval (avec des formes d'érosion progressive).

L'exploitation intensive des granulats a conduit, sur certaines rivières, à une mise à nu du substratum, qui peut bouleverser durablement la dynamique du lit.

Devenir : en dehors des tronçons qui ont connu un bouleversement morphologique par encaissement dans un substratum tendre, la tendance générale après interruption des prélèvements est à un retour au profil en long initial, à condition qu'il demeure des apports.

Mais les volumes extraits représentent souvent plusieurs décennies, voire plusieurs siècles d'apports naturels. La perturbation ou l'interruption du transit des matériaux peut donc se faire sentir sur le long terme, même lorsque les apports naturels ont été conservés.

- **Les prélèvements de matériaux en lit majeur**

Ces prélèvements ont lieu sous forme de souilles d'extractions à l'écart du lit mineur, transformées en plan d'eau au terme de l'exploitation (ou partiellement remblayées).

Mécanisme de perturbation : ces sites d'extraction peuvent avoir une incidence morphologique s'ils sont « capturés » par le cours d'eau.

Deux modes de captures sont possibles. Dans le premier cas, la berge qui sépare le lit du plan d'eau peut être directement attaquée par érosion latérale.

Dans le second cas, le plan d'eau restant quasiment horizontal lors d'une crue débordante en raison de sa section importante, il s'ensuit une dénivellée entre le lit mineur et le plan d'eau au débordement, qui peut provoquer une érosion régressive de la berge du plan d'eau vers le lit.

LA DYNAMIQUE DU LIT DES RIVIÈRES



La Loire dans le Forez : les abords du fleuve sont mités par les extractions [IGN].

©IGN - PARIS 1995

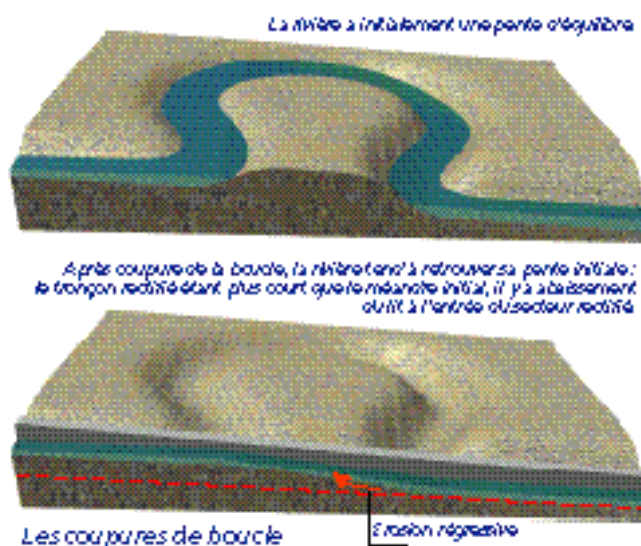
Conséquences et devenir : après capture, l'extraction en lit majeur a les mêmes conséquences morphologiques qu'une extraction en lit mineur.

• Les coupures de boucle

Il s'agit de tous les aménagements qui réduisent la longueur du lit (rectifications de sinuosités, coupure de méandre...).

Mécanisme de perturbation : la coupure de boucle réduit la longueur du lit pour une même dénivelée : la pente augmente et la capacité de transport avec, provoquant une érosion régressive pour rétablir la pente initiale.

L'abaissement du lit est à peu près égal à la dénivelée correspondant au linéaire de lit supprimé : le raccourcissement de cent mètres d'un lit à 1 % de pente provoque un abaissement de un mètre.



Devenir : poursuite de l'érosion régressive jusqu'à rétablissement de la pente initiale, avec, comme dans le cas du Jabron à Montélimar, risques de mise à nu d'un substratum affouillable.

• Les endiguements

Mécanismes de perturbation : si on restreint modérément la largeur de l'espace de divagation d'un cours d'eau, l'équilibre du lit n'est pas perturbé. En revanche, au-dessous d'une certaine largeur, que nous nommerons « seuil de confinement », la capacité de transport augmente légèrement.

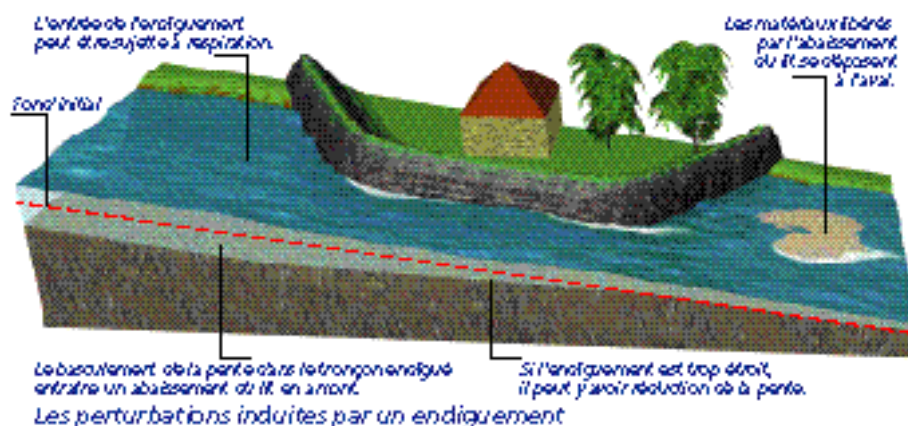
De plus, un endiguement supprime des écoulements débordants qui participaient peu à l'activité morphologique du lit, et les renvoie dans le lit mineur : la capacité de transport en est augmentée pour les crues antérieurement débordantes.

Conséquences : L'effet de cette augmentation de la capacité de transport dans le lit endigué est un creusement du lit. À l'aval de l'endiguement, lors de la mise en service de l'aménagement, le volume dégagé par l'abaissement du fond dans l'endiguement provoquera un engravement du fond et, pour les rivières de plaine, le débordement à la sortie des digues accentuera l'élévation du niveau des berges.

En amont de l'endiguement, deux tendances se contrarieront : abaissement du lit par érosion régressive et exhaussement du lit par élévation des niveaux due à l'endiguement aval. Le bilan dépend de la longueur du tronçon endigué et de l'importance du remous.

Cette analyse est mise en défaut lorsque la rivière n'était pas en équilibre : une rivière en lent exhaussement, qui déposait ses matériaux sur des surfaces importantes avant endiguement, reste incapable de transporter ses matériaux et les dépose donc dans un espace « confiné » de superficie réduite. La vitesse de sédimentation, imperceptible avec une superficie de dépôt importante, devient perceptible à l'échelle humaine et pose des problèmes d'endiguement de plus en plus insolubles. Exemple : le Pô ou le Drac à Grenoble avant les extractions.

Devenir : le profil en long tend vers un nouvel équilibre.



2.3 INTERACTIONS AVEC L'ENSEMBLE DE L'HYDROSYSTÈME

La dynamique morphologique du lit entretient des relations étroites avec les autres compartiments de l'hydrosystème.

Il ne s'agit pas ici de décrire tout le fonctionnement de l'hydrosystème. Le lecteur se reportera avec profit à divers ouvrages, notamment « Hydrosystèmes fluviaux » de C. Amoros et G.E. Petts, Masson 1993.

⚠ Les perturbations de l'équilibre morphologique peuvent donc avoir des incidences majeures sur les autres composantes. Ce sont d'ailleurs ces incidences, jugées inacceptables, qui conduisent souvent à chercher à corriger les déséquilibres.

• Interaction avec la nappe phréatique.

Les relations entre la rivière et sa nappe d'accompagnement sont souvent prépondérantes dans l'équilibre de celle-ci.

L'abaissement du lit se répercute directement sur le niveau du toit de la nappe, entraînant des pertes de ressources parfois importantes. Par ailleurs, le colmatage du lit en cas de dynamique fluviale amoindrie peut réduire les relations entre la nappe et la rivière.

Les seuils de relèvement du niveau d'étiage ont souvent un effet décevant : le colmatage par les limons du plan d'eau créé par le seuil réduit sensiblement les possibilités d'infiltration. Ce n'est que bien en amont du seuil, après réengrèvement général du lit, que le gain est sensible.

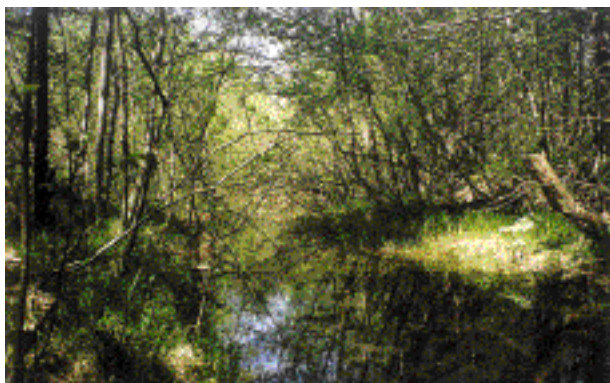
• Interaction avec le milieu naturel aquatique du lit mineur

La dépendance du milieu naturel aquatique à l'état physique du lit

est une évidence. Le fonctionnement morphologique du cours d'eau commande plusieurs paramètres clés de la qualité des milieux :

- les paramètres hydrauliques des écoulements (vitesses, hauteurs d'eau, variabilité de ces paramètres dans l'espace et dans le temps) : en relation étroite avec le style morphologique, ils en suivent les évolutions ;

LA DYNAMIQUE DU LIT DES RIVIÈRES



Un milieu alluvial.

- l'état du substrat (nature des matériaux du lit) : deux types de perturbation méritent une attention particulière. La disparition du matelas alluvial au profit d'affleurements du substratum rocheux réduit fortement les habitats de la faune aquatique et le potentiel d'auto-épuration du milieu. Le colmatage du lit et des bancs par des limons a également une influence en général déclassante.

- **Interaction avec les milieux naturels riverains.**

Les milieux alluviaux sont le produit des processus morphologiques. La dégradation de l'équilibre morphologique perturbe ces milieux par plusieurs voies qui conduisent souvent à un assèchement et à un vieillissement de ces milieux, qui se banalisent et perdent leur connexion fonctionnelle avec la rivière.

L'abaissement de la nappe qui suit un abaissement du lit provoque un assèchement des milieux alluviaux humides et une disparition des bras morts.

La réduction de la dynamique fluviale empêche un renouvellement des milieux alluviaux par érosion latérale.



Une zone fortement abaissée, avec drainage de la nappe et déconnexion des milieux alluviaux.

Le colmatage par les limons des terrasses qui ne sont plus érodées renforce la déconnexion de ces milieux.

- **Interaction avec les autres usages des cours d'eau.**

L'abaissement des lits perturbe les prises d'eau sans ouvrage : la réalisation d'un ouvrage de maintien des niveaux d'eau est rendue souvent nécessaire.

L'enfoncement des lits met en péril les ouvrages (ponts, digues, seuils...), avec des conséquences économiques souvent importantes.



ANALYSER

LE DIAGNOSTIC GÉOMORPHOLOGIQUE

Quatre étapes successives caractérisent la démarche à suivre dans le diagnostic morphologique d'un cours d'eau :

- l'analyse des transformations et de la réponse du milieu, par tronçons homogènes,
- la mise en évidence de la logique amont/aval,
- la confrontation avec les enjeux,
- l'analyse du problème particulier du curage des atterrissements, qui est à l'origine de l'élaboration de ce guide.

3.1 L'ANALYSE DES TRANSFORMATIONS ET DE LA RÉPONSE DU MILIEU

La première étape du diagnostic doit permettre de comprendre la dynamique du cours d'eau. Cette dynamique est fonction de son type morphologique et des transformations et perturbations apportées à l'hydrosystème par l'homme ou le climat.



La compréhension de la réponse du cours d'eau permettra de prévoir les évolutions futures.

■ REPÉRER DES TRONÇONS HOMOGÈNES

La mise en évidence de tronçons homogènes facilitera l'analyse des évolutions morphologiques. Cependant, cette sectorisation devra être affinée et précisée au fur et à mesure que s'élaborera le diagnostic.

■ DÉTERMINER LE TYPE MORPHOLOGIQUE

La gestion du transport solide nous amène à distinguer **trois types fondamentaux de cours d'eau**, les torrents, les rivières divagantes et les rivières de plaine **et deux types de transport solide**, le transport saturé et le transport non saturé.

• Les torrents

Caractéristiques : forte pente (supérieure à 2 ou 3 % le plus souvent) ; forte respiration du lit en altitude ; forte dépendance entre le fonctionnement du cours d'eau et l'état du bassin versant : les volumes de matériaux en jeu peuvent varier fortement en fonction de l'histoire du bassin. Il n'y a pas de relation univoque entre débit liquide et transport solide.

Type de transport : le transport est en général non saturé dans les tronçons en érosion, sous l'influence des affleurements rocheux ou détritiques ; le torrent ne coule pas seulement dans ses propres alluvions. La pente est forte et la potentialité de transport souvent supérieure aux apports.

Dans les zones en cours de sédimentation, anciens lacs glaciaires, cônes de déjection, le torrent transporte les apports précédents, mais la variabilité des apports provoquera une forte respiration du lit en altitude au cours d'une seule crue.

Conséquences pour la gestion : la gestion du lit et des apports doit intégrer l'extrême variabilité des phénomènes au cours d'une seule crue.

Les apports solides sont inférieurs à la potentialité de transport des tronçons non saturés à forte pente et égaux ou supérieurs à la potentialité de transport des tronçons saturés de plus faible pente, leur lit étant constitué par les apports.

Au cours des fortes crues, la variation des fonds est en général supérieure à la variation de la hauteur d'eau : la rétention ou le laminage du débit solide est le problème le plus fréquemment rencontré.



Le torrent de Thorens, dans la vallée de Belleville (Savoie).

• Les rivières divagantes

Caractéristiques : pentes inférieures à 3 %, mais limites très fluctuantes, en fonction du matériau et du débit. Divagation importante du lit ; grande mobilité de la position des formes fluviales. Style de lit en tresse, lit unique divagant ou méandres divagants.

Ces rivières comportent un ou plusieurs bras principaux et un ou plusieurs bancs. Pendant la durée d'une crue, la variation en plan du lit mineur est forte, mais le volume de charriage ne provoque pas de variations altimétriques notables.

On notera le cas très répandu des rivières de ce type totalement endiguées, telle l'Isère, qui ont donc perdu leur mobilité latérale.



Le Drac dans le Champsaur (Hautes-Alpes).

Conséquences pour la gestion : la quantification du transport est possible dans les rivières à graviers et galets, si l'on a une bonne connaissance de la granulométrie en masse. Le manteau alluvial naturel est en général suffisant pour observer un transport saturé, mais son épaisseur et sa qualité ont provoqué des convoitises souvent excessives. La quantification du transport est plus difficile dans les rivières à sable (telle la Loire), une fraction du transport s'effectuant en suspension.

Une logique d'ensemble du transport solide peut y être mise en place plus facilement qu'ailleurs :

- les phénomènes sont à la fois suffisamment intenses et suffisamment régulés pour se prêter à une quantification ;
- le problème du transport solide et de sa gestion est perçu par les riverains.

• Les rivières de plaine

Caractéristiques : la géométrie du lit varie lentement (quelques mètres de recul d'une berge concave au cours d'une crue). La charge en suspension provoque des dépôts sur berges et influence la largeur du lit.



Le Suran, dans l'Ain.

Les pentes sont faibles (inférieures à 3 ‰ en général). Le style est à lit unique avec un banc sur intrados et alternance seuil - mouille.

Conséquences pour la gestion : le transport solide et la logique amont - aval ne sont pas perçus par les riverains. En outre, la quantification des phénomènes est parfois plus délicate que dans le cas précédent.

Cependant les mécanismes, les équilibres fondamentaux et l'influence des perturbations ne sont pas différents de ceux observés sur les types précédents : ils sont seulement plus lents.

■ ANALYSER LES TRANSFORMATIONS ET LES PERTURBATIONS APPORTÉES AU MILIEU

Trois approches permettront de comprendre la dynamique du lit de la rivière : l'approche historique, l'analyse de l'évolution morphologique le long du cours d'eau et l'apport des calculs hydrauliques et de transport solide.

• L'approche historique pour une connaissance des transformations

Il eut été tentant de proposer dans ce guide une approche plus simple et plus conforme aux idées de l'époque, en analysant tout d'abord la dynamique naturelle, puis les perturbations apportées par l'homme à cet équilibre naturel.

Mais ce plan amène à formuler deux interrogations successives :

- à quelle date peut-on considérer que la rivière avait un équilibre naturel ? De tous temps, l'action du climat et de l'homme a provoqué des transformations et des perturbations du milieu : sans s'attarder sur le déboisement gallo-romain, on peut citer les levées de la Loire, les digues sardes sur les rivières alpines, les seuils des moulins, les ponts, les barrages, chevrettes et épis de navigation, les enrochements de protection à peine décelables aujourd'hui, car noyés dans une végétation et un système racinaire qui les a « bétonnés ». Il est bien connu d'autre part que l'entretien des cours d'eau était souvent assuré de fait par la coupe du bois, le ramassage des bois flottés ou le pacage. C'est l'après-guerre et la mécanisation qui ont conduit à abandonner cette gestion à la force des bras ;

- l'action de l'homme sur le milieu a toujours existé, même si la deuxième moitié du XX^e siècle a accéléré les perturbations et les évolutions qui en découlent. Plutôt que de rechercher les caractères d'un équilibre naturel historiquement incertain, n'est-il pas plus pertinent d'analyser d'abord les transformations et perturbations du milieu de façon à déce-

ler la réponse de la rivière à ces transformations ? La pathologie nous aidera à donner la bonne définition de la santé.

 **Plutôt qu'un état de référence, il faut chercher une dynamique de référence, c'est-à-dire une tendance évolutive générale du profil en long et du style fluvial.**

On peut rappeler la nomenclature des actions ou transformations les plus importantes ayant conduit à perturber son équilibre ou transformer sa morphologie :

Les ouvrages de protection contre l'érosion et l'inondation :

- curages des bancs et « atterrissements »,
- empiétements et remblais,
- protection des berges longitudinales,
- épis de protection et de colmatage,
- endiguements longitudinaux,
- plages de dépôt torrentielles,
- faucardages,
- nettoyage sélectif (ou non).

L'exploitation du gisement alluvial (aujourd'hui interdite) :

- extractions de matériau en surface ou en profondeur (lieux, dates et volumes extraits ou déclarés),
- seuils anti-érosion régressive,
- seuils de relèvement de la nappe.

Les ouvrages pour la production de force motrice :

- seuils fixes ou barrages mobiles des moulins : création, mode de gestion ou destruction,
- biefs de dérivation des moulins (création ou abandon),
- grands barrages de retenue (laminage des débits liquides, blocage de tous apports solides, altération de la courbe des débits classés),
- barrages de prise au fil de l'eau transparents aux apports en suspension et parfois aux matériaux de charriage,
- dérivations des débits dans les canaux industriels et restitution des eaux claires de ces canaux,
- essartements associés aux dérivations.



Le barrage de Pierre-Châtel sur le Rhône (Savoie)

Les ouvrages de navigation :

- seuils fixes et barrages mobiles,
- chevrettes et duits,
- épis de navigation,
- dragages d'entretien.

On notera que les actions transformant le milieu peuvent avoir été ou être aussi bien des constructions que des destructions d'ouvrages, des avancées des terres de culture sur la rivière ou à l'inverse des mises en friche. L'évolution de la gestion des zones humides, iscles, saligues, ramières, îlons, bras morts peut avoir influencé la morphologie de la rivière ou de ses marges.

La datation des principales actions est essentielle à la compréhension de l'évolution du lit.

• L'analyse de l'évolution morphologique

Cette analyse doit être faite dans le temps, en tenant compte des actions identifiées ci-dessus, et dans l'espace, c'est à dire en considérant la mobilité en plan et la variation en altitude.

L'évolution en plan :

Elle peut être approchée à partir des cartes anciennes ou des plans des grands fleuves ou cours d'eau domaniaux établis au XIX^e siècle ou au début du XX^e siècle.

Les limites communales sont souvent un témoignage de la position du lit à la Révolution.

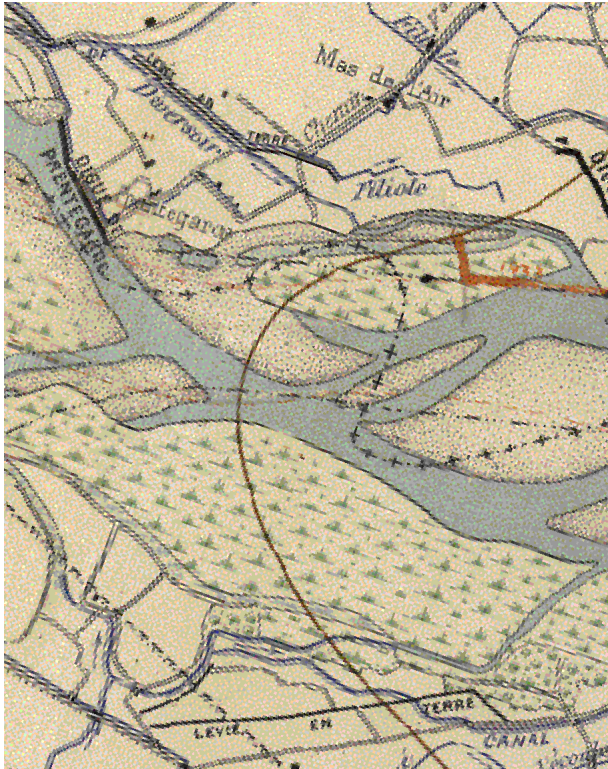
Les photographies aériennes, postérieures à 1930, rendent mieux compte des perturbations dues à l'extraction des matériaux alluvionnaires.

L'enquête de terrain est souvent utile, malgré la perte de mémoire orale observée chez les riverains au cours des vingt-cinq dernières années, du fait de la transformation des modes de vie.

Lorsqu'il peut être établi entre 1945 et 1955, l'état de référence en plan correspond souvent à une morphologie stable, les cours d'eau ayant de 1914 à 1950 subi peu d'aménagements, mais aussi parfois maints abandons.

L'analyse de l'évolution en plan va concerner :

- la variation dans le temps et le long du cours d'eau des largeurs actives du lit alluvial, sable ou gravier nu et milieux pionniers, pouvant être sollicitées par le charriage, la transformation de leur type morphologique et le déplacement en plan de la bande active ;
- la variation des largeurs des annexes fluviales, l'évolution de leur emprise, côté terre ou côté rivière, le processus de leur alluvionnement par les apports en suspension et le rôle de la rivière dans l'érosion de ces annexes et le rajeunissement du milieu ;



©IGN - PARIS 1960

La constance du système morphologique d'une rivière peu perturbée à 70 ans d'écart : la Durance en 1890 et en 1960 [documents SMAVD et IGN].

- les ouvrages de fixation ayant modifié le mécanisme de la divagation.

La variation en altitude

Si le témoignage des riverains est souvent indispensable à la compréhension de l'évolution en plan, il est souvent erroné en ce qui concerne la variation en altitude, car l'enfoncement du lit peut accroître la hauteur relative des atterrissements par rapport à l'étiage.

La quête de données concernant l'évolution du lit est parfois décevante. Les indications les plus précieuses seront obtenues à partir des éléments suivants :

- les courbes de tarage aux stations hydrométriques ;
- la lecture d'échelles d'annonce de crue ou d'échelles de navigation, corrélées aux données des stations hydrométriques. La connaissance de l'évolution des niveaux de la Loire grâce au suivi d'un réseau d'échelles et de repères remarquablement dense est un exemple qui devrait être étendu à toutes les rivières moyennes ;
- la comparaison du profil en long de l'état actuel et de profils antérieurs, notamment le profil en long des Forces hydrauliques.

Le paramètre temps n'est pas le seul à considérer dans l'analyse. La variation spatiale de la pente est essentielle. La recherche des anomalies du profil en long doit s'accompagner de la détermination des causes de ces anomalies :

- l'affleurement rocheux ou seuil artificiel,
- la présence diffuse d'un substratum dur ou de blocs détritiques résidus de silex ou roches dures après abrasion d'un seuil rocheux,
- l'incision dans un substratum érodable,
- la discontinuité granulométrique marquant l'arrêt du transport vers l'aval des matériaux grossiers, la morphologie du lit évoluant en conséquence sur une courte distance d'une structure en tresse en une structure à lit unique à pente plus faible et matériau plus fin,
- la conséquence d'une perturbation antérieure : extraction, seuil de moulin détruit, etc.,
- l'effet d'un confluent,
- l'effet d'un rétrécissement sur l'accumulation des galets en crue,
- et, en désespoir de cause, l'erreur topographique...

L'alternance seuils - mouilles n'est pas une anomalie, mais elle peut rendre difficile la perception de l'une ou l'autre des causes précédentes.

• **L'apport des calculs hydrauliques et de transport solide.**

Pour les *torrents*, le calcul hydraulique est de peu d'utilité. Les hauteurs d'eau sont faibles et évoluent en général autour de la hauteur critique. Le recours à un modèle de transport solide sans couplage avec modèle d'écoulement (cf. § 5.6) permet d'avoir une approche du transport des sédiments dans des lits réguliers ou dans les plages de dépôt.

Dans le cas des *rivières torrentielles divagantes*, la connaissance des écoulements peut permettre d'établir des bilans de transport fondés sur la potentialité de transport des zones nues du lit. Le modèle de transport simplifié permet aussi de prévoir la vitesse de variation des fonds dans le cas où l'on a sédimentation. En revanche, son utilisation est critiquable dans les cas d'érosion progressive en raison du pavage. Le modèle couplé écoulement et transport avec granulométrie étendue peut donner des résultats surtout si l'on dispose de données de calage.

Il en est de même pour les *rivières de plaine*, mais dans ce cas les calculs hydrauliques seuls apportent déjà des indications intéressantes, notamment pour l'étude de l'impact de singularités, seuils ou rétrécissements. Ainsi l'impact d'un seuil large de moulin se traduit par un déficit de transport en eaux basses et moyennes, tandis que les crues provoquent un auto curage. Dans les cours d'eau à faible débit solide, le débit pour lequel le régime d'écoulement est quasi uniforme en amont du seuil pourra être considéré comme le débit

dominant au point de vue morphologique. Il suffira alors de définir l'aménagement à ce débit pour avoir les meilleures garanties d'un bon équilibre.

L'analyse des profils en long permet de comprendre la structure des pentes initiales :

- décroissance amont - aval de la pente (tri granulométrique et usure des matériaux),
- influence des affluents (normalement : pente résultante plus faible ; pente encore plus faible si l'affluent est peu chargé ; pente plus forte à l'aval si l'affluent est très chargé).

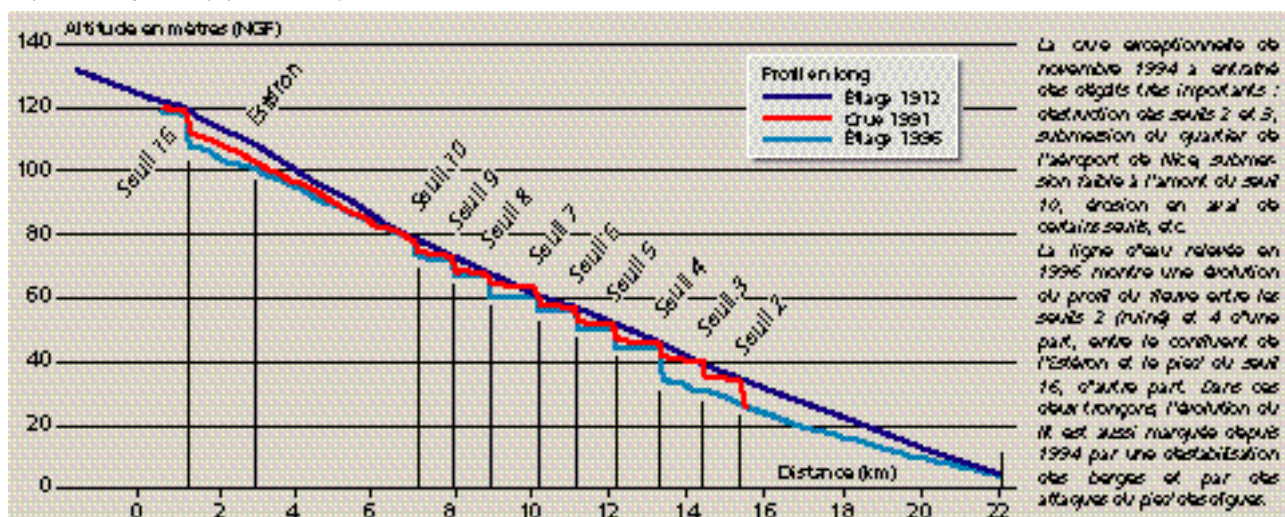
■ **INTERPRÉTER LA MORPHOLOGIE ACTUELLE DU LIT : COMPRENDRE LA RÉPONSE DU COURS D'EAU**

Le diagnostic élaboré sur le tronçon à partir de l'inventaire et de l'étude de l'impact des transformations sur le profil en long doit être confronté à l'observation de la morphologie actuelle du cours d'eau.

En particulier, lorsque le changement de style morphologique est important, on doit pouvoir y associer une tendance d'évolution actuelle :

- le passage d'un lit en tresse à des méandres divagants traduit une phase d'abaissement, ou du moins de déficit relatif en apports solides ;
- au contraire, le tressage est plutôt un indice d'une tendance à l'exhaussement ;
- la contraction du chenal, le développement de la végétation sur les zones abandonnées, le colmatage des bancs de gravier par les limons traduit une réduction conjointe des apports liquides et solides (dynamique du lit amoindrie).

Le profil en long du Var (Alpes-Maritimes).



LE DIAGNOSTIC GÉOMORPHOLOGIQUE



⚠ Attention à l'interprétation des formes d'érosion de berge : ce n'est pas systématiquement un signe de dégradation de l'état du lit ou de santé morphologique. Seule a un sens la comparaison avec un état de référence.



Érosion de berges sur la Vallière (Jura).

■ PRÉVOIR LES ÉVOLUTIONS FUTURES

Lorsque le système morphologique n'a pas changé, le lit tendra à retrouver son niveau initial au bout d'un laps de temps plus ou moins long.

Les calculs de capacité et les modèles mathématiques peuvent contribuer à préciser les rythmes d'évolution du fond (cf. chapitre 5).

Par ailleurs, les phénomènes d'abaissement ou d'exhaussement pourront encore s'amplifier dans une phase intermédiaire avant que la tendance s'inverse.

Il est donc important de préciser les rythmes d'évolution : la quantification des phénomènes, malgré toutes ses difficultés et ses incertitudes, permettra de préciser les tendances pour les stades successifs d'évolution :

- court terme : de l'ordre de 10 ans (ce qui signifie en réalité une période comprenant deux ou trois années à forte hydraulité).
- moyen terme : de l'ordre de 30 à 50 ans (échelle de temps d'une politique globale ?)
- long terme : 100 ans et plus.

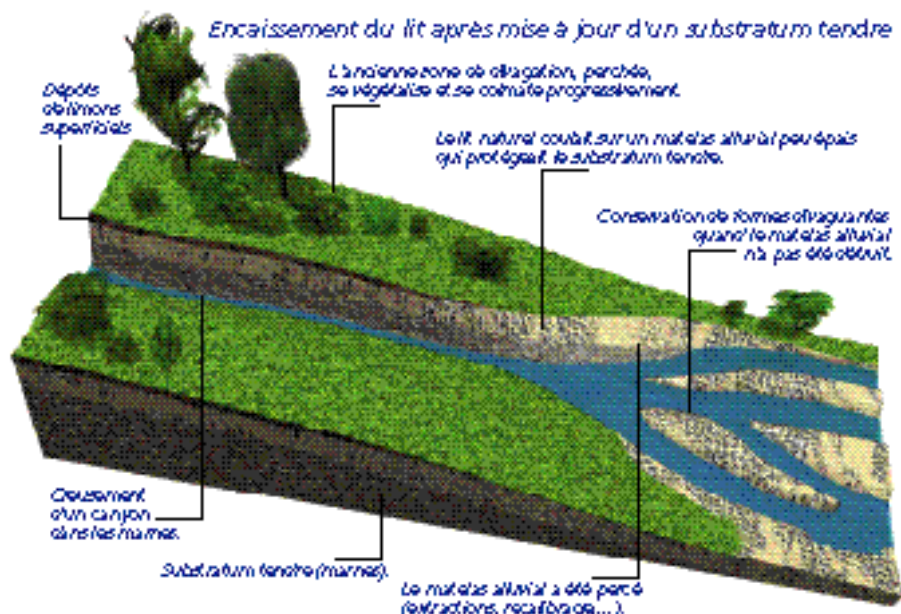
Un exemple théorique sur un cas simulé :

Soit un cours d'eau ayant pour pente moyenne 5 ‰, pour largeur 100 mètres, avec un lit constitué de matériaux d'un diamètre moyen de 50 mm et recevant chaque année 28 000 m³ d'apports solides... On y pratique une extraction de 200 000 m³ sur un kilomètre (soit un abaissement moyen de deux mètres).

Dès les premières années, plus de la moitié du surcreusement est réalluvionnée. Mais les matériaux proviennent du tronçon amont proche par érosion régressive. À l'aval, l'abaissement par érosion progressive (en l'absence de pavage) assure rapidement un retour à une charge sédimentaire presque normale. L'évolution se ralentit ensuite, et après vingt ans, le tronçon présente encore un déficit de 100 000 m³, sous forme d'un abaissement de 0,20 m réparti sur 5 km.

En vingt ans, seuls 20 % des apports se déposent dans la zone d'extraction : le transit a été réduit, mais pas totalement interrompu.

En cas de changement de système morphologique, le diagnostic est plus délicat. En particulier, lorsqu'il y a érosion d'un substratum tendre (marne, argile...), on connaît mal encore les évolutions possibles et surtout leurs rythmes. Les conséquences en sont cependant le plus souvent assez graves pour conclure à la nécessité d'interrompre cette évolution.



3.2 LA LOGIQUE AMONT - AVAL

Il convient ensuite d'analyser les interactions entre les tronçons, notamment en mettant en évidence la continuité sédimentologique ou ses interruptions :

- quelles sont les zones principales d'alimentation en matériaux ?
- quelles sont les points de rupture de la continuité sédimentologique ? Est-elle durable (délai de comblement d'une retenue ou d'une souille d'extraction, par exemple) ? Est-elle raisonnablement réversible (modification d'ouvrages...) ?
- les points de discontinuité durables non réversibles conduiront à scinder le cours d'eau en tronçons indépendants d'un point de vue morphologique ;
- quelles sont les zones qui piègent des matériaux (zones surcreusées par des extractions, tronçon à faible pente en amont d'un ouvrage) par un processus d'exhaussement ? Quelles sont celles qui peuvent contribuer à la recharge sédimentaire par un processus d'abaissement en cas de déficit ?



Cette analyse permettra de connaître les points où il faudra agir pour corriger une évolution jugée néfaste.

3.3 LES ENJEUX

■ LES IMPACTS DES ÉVOLUTIONS MORPHOLOGIQUES

L'étape précédente a permis de préciser, tronçon par tronçon, l'état actuel du lit et ses tendances d'évolution. L'étude du transport solide et de la morphologie fluviale n'est pas une fin en soi. Et le rétablissement de la continuité sédimentologique que préconisent les SDAGE ne vaut que par les avantages qu'il procure.

On devra donc mettre en évidence dans chaque tronçon caractéristique tous les problèmes liés à la situation actuelle ou future du lit, les remèdes auxquels conduisent l'examen des problèmes et les impacts des solutions préconisées ou au contraire les tendances prévisibles en l'absence d'intervention :

- risques de débordements existants ou consécutifs à une remontée du lit ;

- impact de la suppression ou de la modification des débordements sur les débits maxima en aval ;
- impact de l'abaissement des lignes d'eau sur les nappes et sur les zones humides ;
- impact de l'abaissement des fonds sur la tenue des ouvrages, ponts, seuils, protections de berge ;
- impact des dérivations et laminages des crues dans le bassin amont sur la dynamique du lit, la capacité de rajeunissement et la diversité des milieux ;
- risques d'érosions des infrastructures ;
- risques d'érosions et inondations des terres agricoles ;
- impact de la fixation des berges sur l'alluvionnement des annexes fluviales ;
- préservation ou dégradation de prises d'eau ;
- impact sur le paysage et la qualité générale de la rivière.

■ LA MISE EN ÉVIDENCE DES CHOIX DE GESTION

Le croisement des enjeux et de l'état actuel et futur du lit permettra de mettre en évidence les « conflits » d'objectif sur la gestion du transport solide.

On citera quelques exemples de conflits fréquemment rencontrés :

- le rétablissement du transit des matériaux, permettant un meilleur fonctionnement du lit à l'aval, peut nécessiter un exhaussement du lit dans un secteur sensible aux débordements ;
- le curage régulier d'un tronçon pour réduire la fréquence des débordements peut conduire à un déficit de matériaux préjudiciable à l'aval, et à une dégradation des milieux alluviaux locaux ;
- la réduction des perturbations induites par un barrage sur le transit sédimentaire se heurtera à de fortes contraintes économiques (manque à gagner sur la production électrique, perte de réserves d'eau pour l'irrigation, ...) ;
- la variabilité de l'état du lit inhérente à l'accroissement de la dynamique fluviale (c'est d'ailleurs la clé de la qualité des milieux alluviaux) peut heurter les riverains soucieux de maîtriser les niveaux de crue, notamment dans les zones endiguées urbaines ;
- l'acceptation des érosions de berge contrariera la vocation agricole des espaces riverains.

Cette démarche pourra donner lieu à une carte de synthèse du cours d'eau (voir l'exemple du haut Drac ci-après).



UN EXEMPLE : LE HAUT DRAC

L'état de référence : le haut Drac est un cours d'eau alpin très actif issu du massif de l'Oisans. Son bassin versant couvre 200 km². Les apports solides y sont de l'ordre de 50 000 m³ par an.

Les perturbations : dès le XIX^e siècle, des systèmes d'épis transversaux ont été construits pour réduire l'espace de divagation du Drac, sans cependant perturber l'équilibre morphologique général : la largeur de divagation conservée était compatible avec les conditions du transport solide initial (pente, granulométrie...).

En 1957, un barrage fixe a été construit pour assurer l'alimentation du canal de Gap (qui quitte le bassin versant) en remplacement d'une prise d'eau sommaire. Même ouvert au maximum en crue, le barrage provoque une perte de charge importante, qui conduit à un engravement en amont. Une extraction fixe (30 000 m³ par an) a été installée dans la retenue du barrage. Malgré cela, le lit amont s'est engravé au point qu'un pont a dû être reconstruit plus haut.

Notons que la dérivation d'eau (4 m³/s) réduit la capacité de transport à l'aval, mais cet effet est totalement masqué par la perturbation du transit des matériaux par le barrage.

Le barrage du canal de Gap



À l'aval, dans la plaine de Chabottes, d'importantes extractions ont conduit à un abaissement moyen du lit de deux mètres. En parallèle, un programme général d'endiguement étroit a été partiellement réalisé, sans que les seuils compensatoires prévus dans le projet initial aient été réalisés ou conservés. L'abaissement du lit en a été localement renforcé.

Ce secteur connaît en conséquence une réduction de la ressource en eau potentielle que représente la puissante nappe phréatique et une dégradation des milieux alluviaux (disparition des « adous », petits ruisseaux très riches issus de la nappe).

Plus en aval, un substratum argileux très fragile n'est protégé que par un mince matelas alluvial (à peine un mètre). La destruction de ce matelas a conduit à Saint-Bonnet à un enfouissement catastrophique du lit dans les argiles.

Les enjeux : à l'amont du barrage, l'engravement du lit fait peser une menace permanente sur les routes d'accès aux hautes vallées. Le statut juridique complexe du barrage rend difficile le financement d'une modification de l'ouvrage. À l'aval, l'état du lit conduit à des besoins importants de confortement d'ouvrages. Localement, à Pont-du-Fossé, un seuil a fixé le lit et les risques de débordement sont ponctuellement importants.

Les stratégies de gestion : le devenir du barrage du canal de Gap est au cœur de toute gestion du transport solide :

- si le barrage est maintenu en l'état, un accrois-



Épis perchés à la suite d'un abaissement du lit dans la plaine de Chabottes.

sement des prélèvements en amont est indispensable pour maîtriser l'engravement du lit. Le déficit de matériaux à l'aval sera renforcé. Plusieurs seuils de stabilisation du lit seront nécessaires, et les travaux de confortement des ouvrages importants. La dégradation du milieu alluvial se poursuivra ;

- si le barrage est aménagé pour assurer le transit des alluvions, la nécessité d'interventions mécaniques dans le lit amont s'estompera rapidement. La restauration du transit à l'aval assurera un rétablissement morphologique plus satisfaisant (restauration des milieux alluviaux, moindre besoin en confortement d'ouvrages).

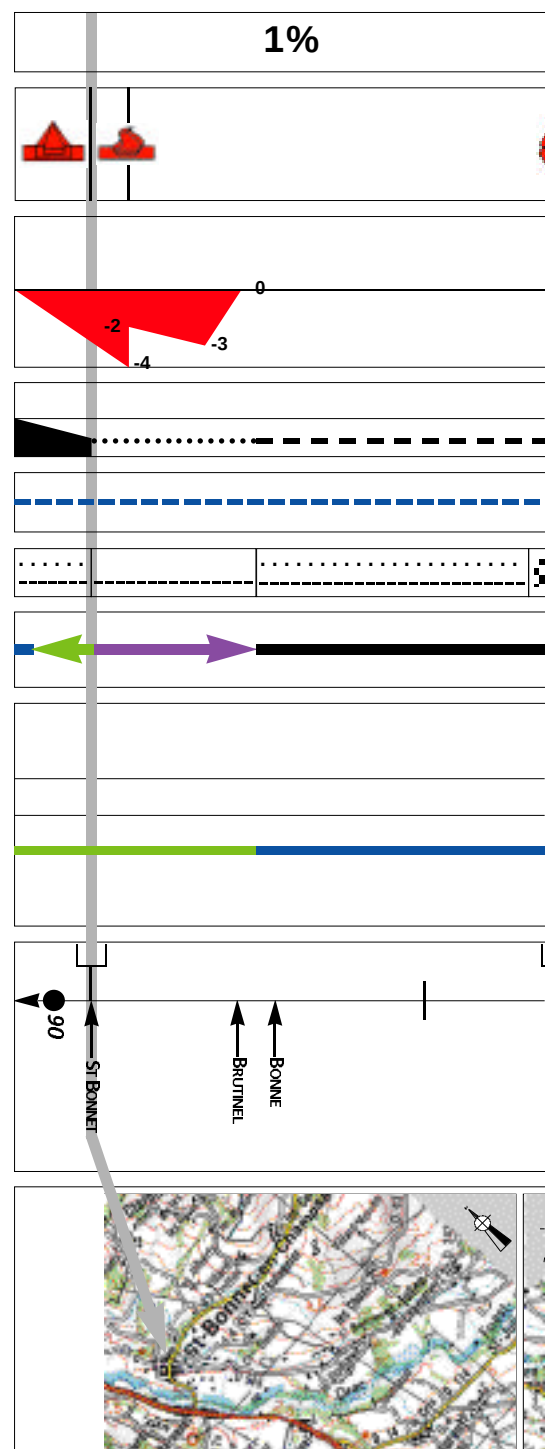
Cependant, la période transitoire sera importante. Réalisé sans précaution, l'accroissement du transit pourra conduire temporairement à des bouffées de transport solide (vidange brutale des accumulations dans la retenue) avec des exhaussements pouvant être préjudiciables. Par ailleurs, le changement de régime demandera plusieurs décennies : des seuils de stabilisation pourront être nécessaires en attendant.

L'accroissement de la variabilité du lit, lié à une plus grande dynamique, pourra accroître les risques de débordements à Pont-du-Fossé : l'abaissement du seuil sera une mesure compensatoire locale.

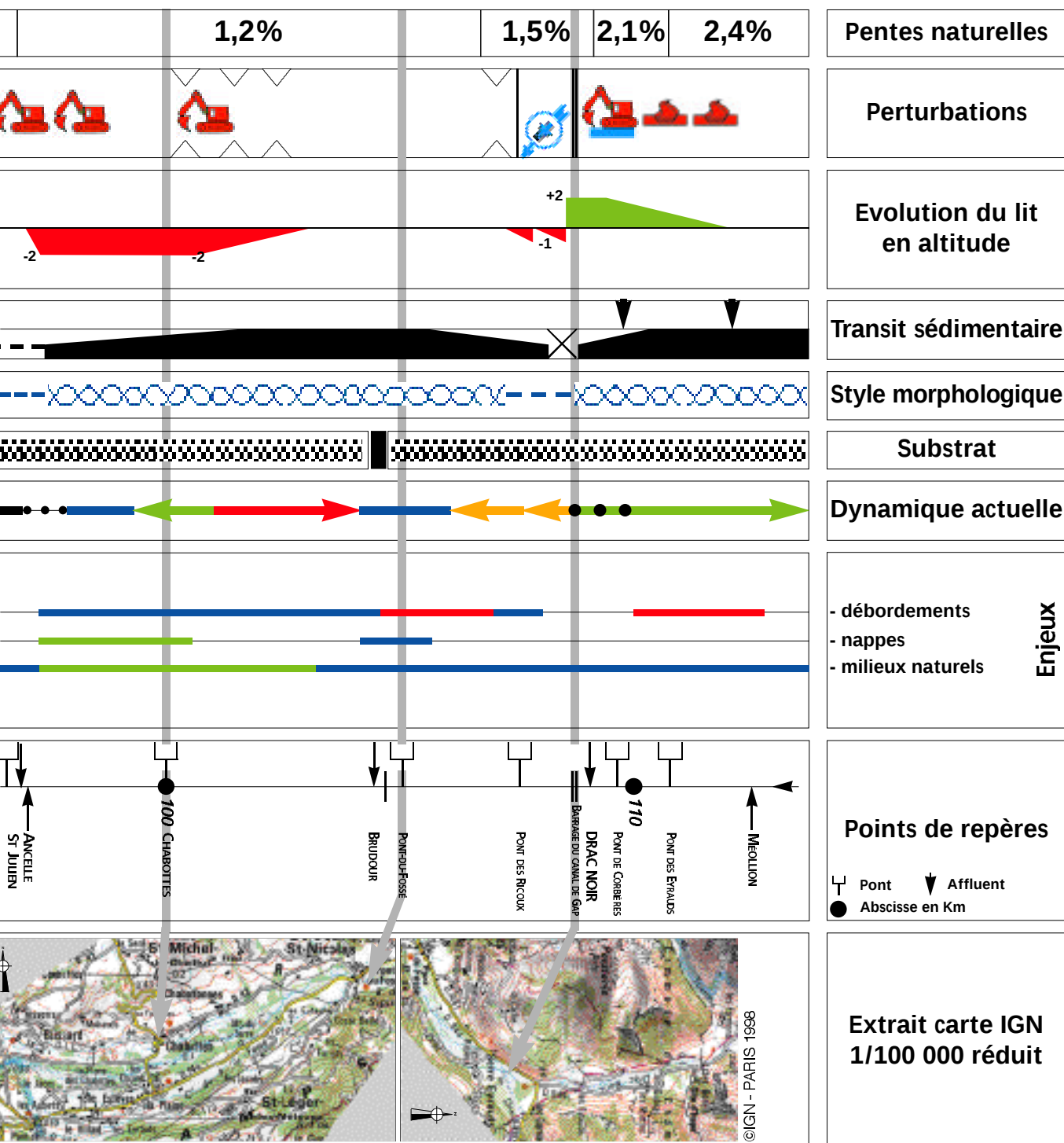
La carte de synthèse du cours d'eau met en évidence :

- la structure des pentes,
- les évolutions passées (évolution en altitude, perturbations),
- les sources de perturbation encore actives,
- la dynamique actuelle (style fluvial...),
- les évolutions futures avec la gestion actuelle du lit,
- les enjeux (pour chaque type, mention de l'évolution qui serait souhaitable : exhaussement, abaissement, stabilité)

Une schématisation linéaire du cours d'eau permettra de mettre en regard tous ces éléments de manière très lisible.



LE DIAGNOSTIC GÉOMORPHOLOGIQUE



3.4 L'ANALYSE SPÉCIFIQUE D'UN PROBLÈME D'ATTERRISSEMENTS

On désignera sous le terme général d'atterrissements des bancs d'alluvions qui paraissent anormalement développés aux riverains.

Il peut s'agir de dépôts effectivement importants, ou de bancs normaux en regard du fonctionnement du cours d'eau, ou même de bancs qui ne paraissent hauts que parce que le reste du lit est anormalement abaissé.



Les problèmes d'atterrissements recouvrent donc des situations et des attentes très diverses. Souvent posée avec acuité après de fortes crues, cette question nécessite de bien mettre en évidence la réalité des phénomènes en jeu et leur intensité.

Il faut d'abord bien préciser les attentes qui conduisent à souhaiter un traitement de ces atterrissements. Le plus souvent, deux types d'objectifs sont recherchés : l'accroissement de la capacité du lit à écouler les crues et/ou l'atténuation des érosions de berge.

■ BANCS ACTIFS ET BANCS INACTIFS



Il est fondamental de distinguer les bancs participant à l'activité morphologique du lit et ceux qui en sont exclus.

Le glissement des méandres vers l'aval, accompagné d'une érosion des rives concaves, est le principal mode d'évolution des bancs. L'érosion par la surface est secondaire, mais évite la fixation du banc par la végétation, et donc les processus d'enlèvement et d'exhaussement.

La mobilité de surface d'un banc peut être appréciée :

- *par son altitude au-dessus de l'étiage* : pour être actif, un banc doit être submergé assez fréquemment avec une hauteur d'eau suffisante. Dans le cas contraire, le banc est qualifié de « perché » : haut et peu mobile, il tendra à former une île ou une terrasse. Un banc qui n'est pas inondé par la crue annuelle tendra à se fixer ;
- *par le taux de végétation* : seule une végétation très peu dense n'entrave pas la remobilisation du banc lors d'une crue. Un boisement du banc empêchera la mobilité des alluvions (sauf par érosion latérale, bien évidemment), et favorisera au contraire son exhaussement en piégeant les sédiments fins ;

- *par sa position par rapport au bras vif* : l'érosion latérale d'un banc perché et végétalisé, assurera une recharge sédimentaire du cours d'eau.

Si le banc végétalisé n'est pas perché, un essartement, suivi éventuellement d'un traitement mécanique des alluvions (scarification, labourage : voir § 4.2), suffira à lui rendre son activité, si les conditions de transport le permettent. En revanche, si le banc est perché, le seul traitement de la végétation sera insuffisant.

L'arasement d'un banc vif conduira à un abaissement du niveau moyen du lit : il contribue au déficit sédimentologique.

L'arasement d'un banc inactif aura des effets variables selon les tronçons. Sur un tronçon de largeur normale, l'élargissement du lit réduira la capacité de transport : l'exhaussement qui en résultera créera un déficit sédimentaire. Sur un tronçon anormalement étroit (en général après un abaissement), un arasement adapté de bancs perchés favorisera le retour à une dynamique plus équilibrée.

■ TRANSPORT ACTIF ET TRANSPORT PASSIF

On a insisté dans le chapitre de présentation de la dynamique morphologique sur la distinction entre le transport solide qui a lieu en interaction avec le lit et le transport solide qui n'interfère pas avec lui. Cette distinction prendra toute son importance pour apprécier l'impact morphologique d'un banc et de son arasement éventuel.

Si le banc est constitué de matériaux similaires à ceux du lit, son arasement aura des conséquences certaines sur l'activité morphologique du cours d'eau.

Si au contraire le banc est formé de matériaux beaucoup plus fins que ceux du lit (dépôts sableux sur lit à galets, dépôts limoneux sur beaucoup de cours d'eau), leur enlèvement aura des répercussions plus limitées. Il ne s'agit cependant pas d'une opération neutre, dans la mesure où elle modifiera la géométrie du lit. Mais le curage répété de limons remplacés par de nouveaux limons n'induit pas un déficit sédimentaire morphologiquement sensible à l'aval. En revanche, il sera onéreux et répétitif.

Le diagnostic morphologique, affiné au droit du tronçon concerné, devra permettre de distinguer les tendances d'évolution du lit. Chacune d'elle conduira à des préconisations spécifiques.



■ LIT EN EXHAUSSEMENT CONSTANT

La tendance du lit à s'exhausser est permanente et durable : sauf à remettre en cause l'occupation des espaces riverains, un prélèvement régulier de matériaux est nécessaire, dont il faudra s'assurer qu'il n'est pas dommageable pour l'équilibre sédimentaire du lit du cours d'eau à l'aval.

Trois options sont possibles :

- une gestion des apports au droit des espaces menacés, par curages périodiques. Les interventions seront décidées en fonction de profils en long de référence ;
- une rétention des matériaux en amont, dans des aménagements spécifiques ;
- l'amélioration très locale des capacités de transit par artificialisation du lit dans le cas des torrents.



Une rivière alimentée par de nombreux torrents : l'Arve à Chamonix en Haute-Savoie.

Dans la vallée de Chamonix, l'Arve reçoit de nombreux torrents glaciaires qui présentent une gamme très étendue de mode de fonctionnement (laves torrentielles, apports par charriage brutaux, apports assez réguliers, ...). L'exhaussement historique du lit a été renforcé par son endiguement. Les importants débordements de la crue de 1996 sont dus avant tout à l'engrèvement du lit. Un schéma d'aménagement est actuellement à l'étude pour tenter de retenir les apports solides à l'amont des sites urbains sensibles.



L'exhaussement d'un torrent sur son cône : le Glandon en Savoie (en haut, le pont de la route départementale engravé lors de la crue de 1981 ; en bas, le confluent avec l'Arc).

Le Glandon est un cas typique de torrent endigué sur son cône de déjection (largeur moyenne : 15 m). La pente diminue progressivement de 4 % à moins de 2 %. Le torrent débouche dans l'Arc (1 % de pente).

Tant qu'il pouvait divaguer sur son cône, les dépôts avaient lieu sur de vastes zones, et les exhaussements restaient modérés. Aujourd'hui contraints en largeur, les dépôts ont pris une importance accrue. Lors de la crue de 1981, le dernier pont a été engravé presque jusqu'au tablier (2 m de dépôts). Pour un événement centennal, le pont serait totalement obstrué (engrèvement du lit de 3 à 4 m).

Le phénomène est renforcé d'une part par la dérivation d'une partie des eaux en amont, qui réduit la capacité de transport du torrent, d'autre part par les dérivations d'eau sur l'Arc lui-même, ce qui l'empêche de reprendre aisément les déjections du torrent.

La rétention des matériaux en amont sera en général préférable en domaine torrentiel, où les apports sont trop brutaux et irréguliers pour accepter qu'ils atteignent les zones sensibles avant d'intervenir. On a alors recours à des ouvrages de rétention des apports (plages de dépôt). Mais le comportement de ces ouvrages pose des problèmes délicats (voir § 4.2 « Curage » et « Plage de dépôts »).

Sur les rivières torrentielles, en revanche, les apports, plus réguliers, sont trop importants pour pouvoir être totalement stockés en amont. On cherchera donc une gestion plus modulée à proximité des zones sensibles.

Dans tous les cas, l'ouverture de terrasses basses au droit de la zone sensible amortira les phénomènes d'engrèvement et accroîtra la sécurité.



Un exhaussement en zone de plaine : le Lez à Bollène dans le Vaucluse.

La ville de Bollène a connu à l'automne 1993 une très forte crue, qui a mis en évidence la grande vulnérabilité du centre urbain. Depuis cet événement, la commune a exécuté d'importants travaux, afin de réduire les désordres dans l'avenir.

Bollène se situe au débouché de la vallée du Lez dans la vallée du Rhône. L'écoulement de la rivière s'est prolongé dans cette vallée, parallèlement au fleuve, avec une pente beaucoup plus faible que la pente amont. L'écoulement des eaux étant ralenti par la diminution de pente, la rivière a été et est incapable de transporter en aval de Bollène la totalité des sédiments venant de l'amont : ceux-ci se déposent donc et forment au débouché dans la vallée un « cône de déjection ».

Le dépôt de matériaux qui permet la formation du cône de déjection est formé des deux composantes distinctes du transport sédimentaire : d'une part les sédiments fins, sables et limons, transportés en suspension qui se déposent sur les berges lors des crues et sur les plaines lors des inondations, et, d'autre part, les galets et graviers, transportés par charriage sur le fond lors des crues, qui exhausssent le lit.

Le dépôt des sédiments a donné à la plaine de part et d'autre de la rivière une forme en toit : les terrains les plus hauts se situent donc en bordure de rivière, tandis que l'on observe loin de celle-ci des dépressions difficiles à drainer. Ainsi, à 2 km en aval de la ville, les berges du Lez sont plus élevées d'environ 2 m que les terrains appelés justement Bas Champredon situés à l'est.

Deux causes fondamentales expliquent donc l'importance des dépôts de sédiments dans la traversée urbaine de Bollène.

La cause principale du dépôt des sédiments est la décroissance de la pente du Lez à l'arrivée dans la vallée du Rhône. Ainsi la rivière voit sa pente passer de 3,5 ‰ à l'amont de la ville à moins de 2 ‰ en aval. Sans intervention humaine, l'élévation des fonds au centre de Bollène est inéluctable. La nécessité du curage est donc maximum là où les enjeux sont aussi les plus importants, c'est à dire au droit de la vieille ville.

Une deuxième cause explique l'importance et la rapidité des atterrissements survenus en aval du centre de Bollène. Il s'agit du remous créé par la largeur insuffisante du Lez en aval de la ville.

Le diagnostic conduit alors aux conclusions suivantes :

- un curage sera toujours nécessaire pour assurer à Bollène le maintien d'une capacité minimale évitant les graves débordements observés ;
- il est nécessaire de ménager une plage de dépôts en amont de la zone urbaine, de façon à prévenir toute espèce de dépôt dans la zone à protéger plutôt que de curer ces dépôts dans les zones sensibles après coup ;
- il est souhaitable d'accroître la section d'écoulement à l'aval pour favoriser le transit sédimentaire dans la ville.

■ LIT TEMPORAIREMENT « HAUT »

Le lit apparaît en position haute par rapport à des profils anciens, mais sans qu'il y ait une tendance lourde à l'exhaussement (variations autour du profil d'équilibre). Cette situation est donc provisoire : il y a « respiration verticale du lit ».

Il peut s'agir soit de simples variations aléatoires du lit autour de son profil moyen, soit de phénomènes provoqués par un élément bien déterminé : apports latéraux irréguliers, crue importante d'un affluent gênant l'écoulement du cours d'eau principal, influence d'une singularité (pont, rétrécissement, coude...).

La respiration du lit est un mode de régulation du transport solide qui assure à l'aval une relation plus régulière entre débit liquide et débit solide. Il convient donc de l'accepter aussi souvent que possible.

Par définition, cet exhaussement est naturellement réversible. Mais le délai de retour au niveau normal peut être long.

Dans certains cas, le retour à l'équilibre peut être entravé : développement de la végétation qui fige les bancs, accroissement important des débordements qui réduit les débits efficaces en lit mineur.



On cherchera le plus souvent à bien expliquer aux riverains que ces fluctuations du lit sont normales, pour éviter des interventions inutiles, et souvent nuisibles.



L'Ardèche au confluent de la Fontolière.

Lors de grande crue de 1992, un banc important s'est formé à la confluence de l'Ardèche et de la Fontolière, en raison des conditions d'écoulement particulières créées par ces débits exceptionnels. Ce banc ne pourra pas être aisément repris par les régimes ordinaires : il risque de se figer en se végétalisant.

L'arasement du banc avec dépôt des matériaux dans le lit est ici exclu : cela pourrait provoquer au début des bouffées de transport solide, alors que se trouve juste à l'aval une traversée urbaine sensible.

On s'oriente donc ici vers un arasement de la partie sommitale du banc pour lui rendre sa mobilité.

LE DIAGNOSTIC GÉOMORPHOLOGIQUE



L'élargissement de la zone de respiration pourra atténuer les variations en altitude.

Une intervention dans le lit sera envisagée dans les cas suivants :

- risques de débordements inacceptables pour la protection des biens et des personnes ;
- dépôts liés à une crue exceptionnelle : le retour à la normale peut être long, et ces dépôts ne relèvent pas du régime moyen du cours d'eau, et donc leur suppression n'affectera pas l'équilibre général du tronçon ;
- risques d'une amplification du phénomène, les dépôts favorisant des débordements qui réduisent les débits efficaces, ce qui favorisera de nouveaux dépôts ;
- risques d'une fixation des dépôts par la végétation, notamment lorsque le dépôt est perché au-dessus d'un lit d'étiage qui s'est déjà rabaissé.

■ LIT STABLE EN ALTITUDE

Il n'y a pas de variation perceptible du lit en altitude. Le sentiment des riverains d'un exhaussement est lié à la mobilité des bancs : **on remarque le banc qui s'est déposé devant soi, on ne remarque pas celui qui a disparu ailleurs**. En outre, le lit qui n'a pas bougé paraît anormalement haut par rapport aux tronçons qui ont connu des abaissements par suite d'extractions de granulats.

Le curage du lit ne serait pas alors le rétablissement d'un état antérieur à la crue, mais une mesure délibérée d'accroissement de la capacité du lit. Les incidences prévisibles sont

donc une érosion régressive vers l'amont, un déficit de matériaux à l'aval.



On cherchera en priorité des solutions alternatives au curage, sans prélèvement de matériaux (matériaux repoussés sur les bords, traitement de la végétation... (cf. § 4.2)

Pour apprécier la faisabilité d'un curage, il faudra prendre en compte le contexte global mis en évidence plus haut : le lit



La Dourbie à Massebiau dans l'Aveyron.

La Dourbie est une rivière de type cévennole, à très fortes crues, mais à transport solide moyen assez faible. La rivière présente un profil en long stable dans le temps.

Un banc s'est développé lors de la crue de 1982. Il s'est ensuite végétalisé, au point que les fortes crues récentes n'ont pas pu le remettre en mouvement : la capacité du lit en a été fortement réduite. Un entretien de la végétation aurait été nécessaire pour éviter cette fixation du banc.



Un atterrissement sur la Moselle.

Lors d'une crue récente, une anse d'érosion s'est développée, laissant au milieu du lit un banc important.

L'analyse des conditions de transport montre que ce banc ne peut pas être constitué d'apports amont : sur une pente voisine de 1 ‰, dans un lit fortement débordant où les hauteurs d'eau ne dépassent pas 1 m au-dessus du banc, les forces tractrices sont insuffisantes pour déplacer des galets donc certains dépassent 50 mm.

Il est donc certain que ces matériaux résultent non pas d'une accumulation, mais du lessivage des terrains localement érodés, avec départ de la fraction fine (limoneuse), bien apparente sur la berge érodée. Ces formations grossières ne caractérisent pas la dynamique fluviale actuelle de la Moselle, mais sont un héritage de conditions morphoclimatiques périglaciaires.

L'arasement du banc ne se justifie donc pas : il faut plutôt prévoir un remodelage du lit pour éviter le développement des anses d'érosion sur les autres berges.

aval est-il déjà déficitaire, un déficit supplémentaire est-il acceptable ? Quels sont les risques liés à une érosion régressive en amont ?

Cette appréciation peut être étayée par deux outils quantitatifs (voir chapitre 5) :

- calcul de la proportion dans laquelle sera réduite la capacité de transport dans la zone curée ;
- importance des volumes prélevés par rapport aux apports moyens : un curage représentant moins du dixième des apports annuels peut être négligeable, un curage représentant plusieurs années d'apport aura des incidences majeures...

Lorsque les atterrissements favorisent des érosions préjudiciables, le remodelage du lit sans enlèvements de matériaux paraît la solution la plus raisonnable.

En effet, l'arasement d'un banc en intérieur de coude réduira certes la sollicitation sur la berge opposée (accroissement de la section et réduction des vitesses). Mais le banc aura tendance à se reformer. Son arasement régulier aura alors les mêmes conséquences qu'une extraction de granulats, induisant un déficit du transport solide vers l'aval.

■ LIT ABAISSÉ EN PHASE DE RÉENGRAGEMENT



C'est sans doute un des enjeux majeurs de la gestion des cours d'eau : comment gérer le réengrèvement lent des zones où des extractions ont fait baisser le lit ?

Les riverains tolèrent mal un retour des inondations fréquentes, surtout quand l'abaissement du lit avait permis le développement d'activités humaines près du cours d'eau. Cette tendance est confusément perçue (« On n'aurait jamais dû arrêter les extractions »), mais le plus souvent exagérée : le rythme réel de réengrèvement est en général imperceptible.

Seul un diagnostic global peut permettre de trouver un compromis entre le rétablissement du transit des matériaux (qui impliquera un réengrèvement accompagné d'un accroissement de la fréquence des débordements) et la conservation de la capacité du lit, au risque d'entraîner un déficit durable des apports solides à l'aval.

L'abaissement du lit a souvent rendu certains bancs hauts et peu submersibles : la végétation s'y est développée, et ils sont alors soumis à un colmatage par les limons. L'ouverture de terrasses basses peut dans certains cas concilier l'accroissement de capacité du lit avec la restauration d'un meilleur fonctionnement morphologique.



L'Aygues à Orange dans le Vaucluse.

Dans la traversée endiguée d'Orange, l'enfoncement du lit de l'Aygues (de l'ordre de deux mètres) dû aux extractions en lit mineur s'est accompagné d'un rétrécissement du lit vif : certains bancs se sont retrouvés perchés. Ils se sont végétalisés, puis exhaussés par dépôts de limons. Situés à près de quatre mètres au-dessus du lit, ils ne participent plus aujourd'hui à l'écoulement des crues.

L'arasement de ces terrasses à environ 1,50 m au-dessus du fond du lit permettra non seulement de rétablir une meilleure capacité d'écoulement sans recourir à des curages dommageables pour la stabilité des digues, mais également d'améliorer le fonctionnement morphologique de la rivière.

On peut craindre cependant que l'exhaussement de ces terrasses recommence, et un entretien sera nécessaire.

■ LIT EN COURS D'ABAISSEMENT, OU QUI VA S'ABAISSE

Un curage du lit reviendra à devancer l'évolution.

La question centrale est alors de savoir si les matériaux dégagés par l'abaissement en l'absence de curage seraient bénéfiques à l'aval (compensation d'un déficit d'apport) ou plutôt nuisibles (risques d'engrèvement d'un secteur sensible).



Dans tous les cas, le diagnostic morphologique devra être relayé par un diagnostic hydraulique sur les incidences d'un accroissement de la capacité du lit sur l'écoulement des crues.

LE DIAGNOSTIC GÉOMORPHOLOGIQUE



Les méandres du Doubs en aval de Dole (1988) [IGN].



©IGN - PARIS 1988



PRÉVOIR

LA GESTION DU TRANSPORT SOLIDE

Il importe de bien exprimer les objectifs de l'intervention et de les replacer dans un contexte plus large.

Les demandes de curage et d'enlèvement des atterrissements relèvent en général de deux objectifs affichés :

- **accroître la capacité du lit pour réduire la fréquence et l'importance des débordements,**
- **atténuer les attaques d'érosion sur la berge.**



Érosion de berges sur l'Arc, dans les Bouches-du-Rhône.

Les fortes crues récentes (1993 notamment) ont conduit à de fortes demandes de curage de lit et de protection de berges. Cette érosion procède de trois causes : érosion normale en extérieur de coude (noter le banc à l'intérieur du coude), endiguement sur la rive opposée concentrant les débits, succession de crues exceptionnelles en 1993 et 1994. Ces trois causes doivent être intégrées dans tout projet d'intervention : possibilité d'une cicatrization spontanée en régime ordinaire (aidée éventuellement par des techniques douces), caractère inéluctable du mécanisme d'évolution des coudes.

Parfois, on perçoit, en parallèle, le désir sous-jacent de rassurer les riverains par des interventions dans la rivière, surtout après une forte crue.

Au débouché de beaucoup de torrents, la gestion du risque nécessite des mesures particulières de maîtrise des apports solides, conformément à la « loi Barnier ».



Le risque torrentiel : le pont du Chinaillon, en Haute-Savoie, a été submergé de matériaux en juillet 1987 : on devine à peine la rambarde...

Les cônes de déjection torrentiels méritent une mention particulière : sur ces espaces naturels d'engrèvement, les lits ont été fortement artificialisés pour permettre le développement de l'urbanisation. Les enjeux de sécurité liés au transport solide y sont maximaux.

Mais la gestion du transport solide à l'échelle du bassin recouvre d'autres enjeux :

- **un enjeu environnemental**, la qualité des milieux dépendant souvent de l'intensité des processus morphodynamiques, et des connexions entre le lit principal et les milieux latéraux ;
- **un enjeu économique**, les travaux de confortement imposés par les déséquilibres du lit étant souvent onéreux ;



Le pont des Mollettes sur l'Isère. L'ouvrage, fortement affouilli en 1979, s'est effondré en 1981. La multiplication de ce type d'accidents a mis en évidence le coût économique d'une absence de gestion du transport solide des cours d'eau.

- **un enjeu paysager**, les interventions incessantes dans le lit pouvant durablement les défigurer ;

- **un enjeu de ressource en eau** (abaissement de la nappe, intensité des relations nappe-rivière selon l'état du fond et des berges, fonctionnement des prises d'eau) ;

- un enjeu sur les usages de la rivière et de ses abords (loisirs, hydroélectricité...).

Il apparaît là clairement l'intérêt de replacer le problème local dans un contexte plus global.

L'incidence d'une opération locale sera différente selon les enjeux sur les autres tronçons : à l'aval, les apports sont-ils gravement déficitaires (déchaussement de digues, drainage de la nappe, etc.) ou bien au contraire excédentaires (queue de retenue d'un barrage, rupture de pente, etc.) ? À l'amont, une certaine érosion régressive ou latérale est-elle possible ? acceptable ?

La modification de la gestion du transport solide à l'échelle du bassin suppose de réunir quatre conditions :

- un cadre de concertation (contrat de rivière, SAGE...) pour trancher les « conflits » mis en évidence par le diagnostic morphologique, c'est-à-dire pour établir des priorités entre la maîtrise des débordements, la protection des nappes, la préservation des milieux naturels liés à la rivière..., puis pour modifier en conséquence les pratiques et les usages ;
- des moyens financiers pour modifier certains ouvrages ;
- une politique foncière cohérente avec la politique d'aménagement envisagée ;
- une structure capable de mener les opérations d'entretien nécessaires.

Il faut le plus souvent trouver un juste compromis entre la nécessité de résoudre des problèmes ponctuels sans tout bloquer en l'attente de la mise en place - incertaine - d'une politique globale, sans pour autant aggraver l'état du système et empêcher la mise en œuvre ultérieure de cette politique globale.

4.1 DÉFINIR UNE STRATÉGIE GLOBALE DE GESTION DU TRANSPORT SOLIDE

À partir du diagnostic géomorphologique, après avoir tranché les alternatives de gestion en fonction des priorités définies à l'échelle du bassin, la stratégie de gestion du transport solide retenue sera traduite par les éléments suivants :

- Des consignes de gestion et/ou d'aménagement des ouvrages existants.

Ces consignes seront destinées, le plus souvent, à réduire les perturbations du transit des matériaux.

D'une part, elles prévoiront la réduction des dénivelées produites par l'ouvrage lors du passage des débits morphologiquement actifs (abaissement de la crête d'un seuil, aménagement de nouvelles ouvertures dans un barrage, consignes d'ouverture complète des vannes...).

D'autre part, elles porteront sur un accroissement des débits morphologiquement actifs, dans des limites économiques raisonnables.

- Un programme de construction de nouveaux ouvrages

Ce programme déterminera les ouvrages nécessaires (seuils pour bloquer une érosion régressive dommageable, ouvrages de contrôle de plage de dépôt en cas d'apports excédentaires...). Il devra préciser les priorités de réalisation.

Certaines actions seront mises en attente d'une évolution constatée du lit. La définition d'un profil en long « d'alerte » (voir plus loin) fournira un critère objectif de mise en œuvre des actions programmées.

- La sélection de zones privilégiées de régulation des apports, de stockage des excédents et de recharge sédimentaire par érosion.

Il s'agit d'une gestion de l'espace riverain : ces différentes fonctions seront assurées par des espaces de divagation privilégiés, conservés précieusement ou restaurés.

L'occupation de ces espaces devra être adaptée à leur nouveau rôle.

Il sera donc souvent nécessaire de prévoir soit des acquisitions foncières, soit des procédures d'indemnisation.

• La définition d'un objectif de profil en long

La définition d'un objectif de profil en long sera la traduction concrète de la stratégie de gestion du transport solide retenue (Voir Chapitre 5 « Analyse des profils en long » pour le choix du profil à déterminer).

En effet, la compréhension des équilibres de l'état de référence, et des mécanismes de perturbations survenues depuis, doit conduire à des hypothèses sur les évolutions futures et sur l'impact des mesures retenues dans le cadre du plan de gestion : l'objectif de profil en long à long terme sera souvent en fait le nouveau profil d'équilibre escompté. Mais un tel profil d'équilibre peut être impossible à atteindre, notamment dans un secteur naturellement en exhaussement : le profil recherché restera alors purement théorique.

La définition de ce profil sera également un moyen d'annoncer clairement les conséquences de la politique de gestion retenue.

Ne nous leurrions pas : la morphodynamique fluviale n'est pas une science exacte. C'est pourquoi il est raisonnable de recourir soit à une enveloppe de profil en long probable, soit

à la donnée d'une plage de variation et/ou d'incertitude sur un profil en long théorique.

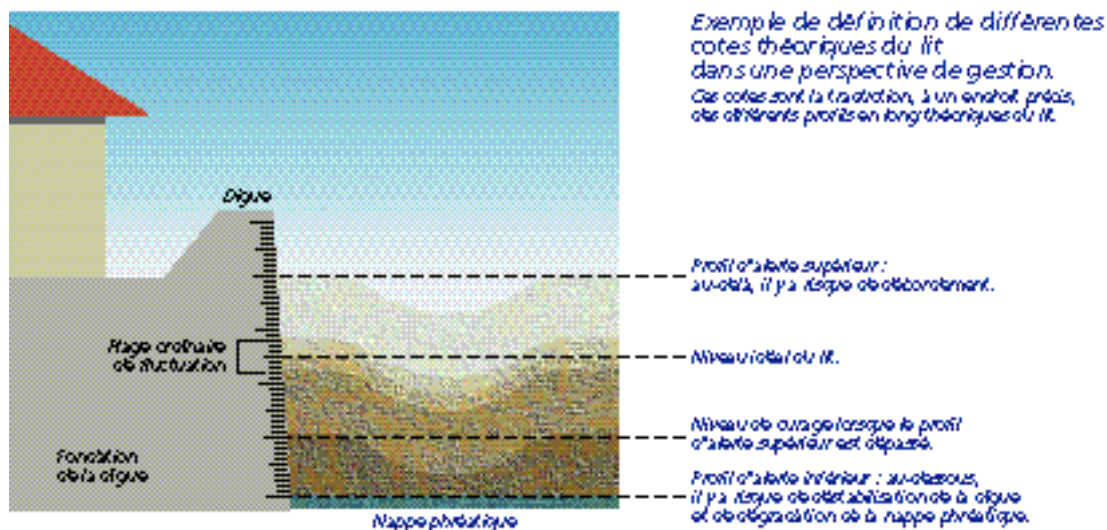
La notion d'enveloppe sera fondamentale dans les secteurs soumis à une respiration du lit.

Une composante essentielle sera la notion de délai. La définition d'un profil d'équilibre à long terme peut être vaine, si ce profil ne doit être atteint qu'au bout de quelques siècles. On pourra donc définir des objectifs de profil à court terme et à moyen terme. Ce profil en long sera un outil de base pour l'instruction des demandes d'intervention dans le lit.

Il pourra être complété par la donnée de profils « d'alerte » supérieurs et inférieurs destinés à fixer des critères d'intervention.

Le dépassement du profil d'alerte supérieur conduira à engager des opérations de curage ou d'autres actions correctives (fermeture d'un barrage, par exemple).

Un abaissement sous le profil d'alerte inférieur déclenchera la réalisation de seuils de stabilisation ou d'autres actions de stabilisation du lit.



Le profil supérieur sera défini en fonction des risques de débordement et de divagation. Il devra prendre en compte une marge pour absorber les dépôts au cours de la crue.

Le profil inférieur tiendra compte de plusieurs contraintes :

- les risques de déstabilisation des digues et ponts,
- les impacts environnementaux (drainage de la nappe, déconnexion des milieux annexes...),
- la conservation de possibilités de débordement.

LA GESTION DU TRANSPORT SOLIDE



4.2 CHOISIR LES MODES D'INTERVENTION

Le choix des modes d'action doit prendre en compte les enjeux concernés, le cadre morphologique du tronçon et les incidences potentielles de l'intervention.

Le tableau ci-dessous propose une grille d'entrée pour guider le choix des modes d'action.

Contexte d'évolution morphologique								
Fond du lit fixe	Lit peu mobile ^a	Lit mobile						Mise à nu d'un substratum tendre
Substratum dur ou matériaux immobiles	Rivière coulant sur ses propres alluvions							
Uniquement mobilité latérale	Tendance à la fixation du lit	Exhaussement	Lit temporairement haut	Lit stable	Réengrèvement d'un lit abaissé	Abaissement		
Enjeux concernés								
Milieux naturels	●	●●	●	●	●	●	●●●	●●●
Nappes	●	●	●	●	●	●	●●●	●●●
Débordement	●	●●	●●●	●●	●	●●	●	●
Erosions latérales	●●	●	●	●●	●●	●●	●●●	●
Stabilité des ouvrages	●	●	●	●	●	●●	●●●	●●●
Actions								
Gestion des débits	●	●●	●●	●	●	●	●	●
Gestion des ouvrages pour favoriser le transit	●	●●	●●	●●	●	●	●●	●●
Maîtrise de la production de matériaux dans le bassin	●	●	●●	●	●	●	●●	●●
Règles de dépôt	●	●	●●	●	●	●	●●	●●
Espaces de régulation du transport solide	●	●	●●	●●	●	●	●	●
Ouvrages de régulation du transport solide	●	●	●●	●●	●	●	●	●
Extractions de matériaux en lit mineur	●●	●●	●	●	●●	●●	●●	●●
Remodelage du lit	●	●	●	●●	●	●	●	●
Curages	●	●	●●	●	●	●	●	●
Ouverture de terrasses basses et arasement de bancs figés	●	●	●	●	●●	●●	●●	●
Promotion des érosions de berges	●	●●	●	●	●	●	●●	●
Traitement des bancs pour accroître leur mobilité	●	●●	●	●●	●	●	●	●
Traitement de la végétation	●●	●●	●	●●	●	●	●	●
Apports mécaniques de matériaux	●	●	●●	●	●	●	●●	●●
Seuils	●	●	●	●	●	●	●●	●●
Pavage artificiel	●	●	●	●	●	●	●	●●

Enjeux: ● non sensible ● peu sensible ●● moyennement sensible ●●● très sensible

Actions: ●●● très adaptée ● assez adaptée ● neutre ou sans intérêt ●● plutôt nuisible ●●● très nuisible ● adapté si précautions

^a défilé, des débits liquides et des apports solides

■ ACTIONS GLOBALES SUR LES DÉBITS ET LE TRANSIT SÉDIMENTAIRE

MODIFICATION DE LA GESTION DES DÉBITS

La rétention des eaux et leur dérivation a pu sensiblement réduire la capacité de transport solide du lit à l'aval.

La modification des consignes de gestion peut permettre d'obtenir un régime hydrologique plus conforme aux objectifs fixés sur le cours d'eau.

•Contexte d'application

Tous cours d'eau dont le débit est régulé ou dérivé partiellement.

•Modes opératoires

Les modifications peuvent porter :

- sur les débits dérivés (modulation saisonnière, par exemple),
- sur la gestion en crue de l'ouvrage,
- sur la réalisation de lâchers artificiels par manœuvre des vannes.

•Contraintes et limites

Attention à ne pas confondre la notion de débits morphologiquement efficaces avec la notion de débit réservé (d'étiage) bien connue de tous les gestionnaires de cours d'eau. Les ordres de grandeurs sont différents : les débits morphologiquement efficaces sont dix à cent fois supérieurs aux débits réservés.

La modification des débits dérivés dans un but morphologique met donc en jeu des volumes d'eau considérables, avec d'importantes conséquences économiques. La production de lâchers artificiels pose de délicats problèmes de sécurité à l'aval.

•Conception et dimensionnement

Les enjeux économiques sont suffisamment importants pour justifier des modélisations spécifiques du transport solide dans la retenue et à l'aval de l'ouvrage.

Des calculs sommaires de capacité de transport permettent d'analyser si les effets seront sensibles.

•Impacts potentiels

Impacts indirects par l'accroissement de la dynamique du lit.

MODIFICATION D'OUVRAGES ET DE LEUR GESTION POUR FAVORISER LE TRANSIT DES MATÉRIAUX

La modification d'ouvrages en rivière ou de leur gestion peut permettre d'améliorer le transit des matériaux tout en assurant leur fonction première.

•Contexte d'application

Ouvrage structurant ou influençant le profil en long et donc perturbant le transit des matériaux.

•Modes opératoires

Si les ouvrages mobiles sont suffisants pour assurer la transparence de l'ouvrage, il faut jouer sur les consignes de gestion en crue (abaissement suffisant du plan d'eau pour assurer le transit des matériaux dans la retenue).

Si l'ouvrage actuel ne permet pas cette transparence, une modification de l'ouvrage est nécessaire (aménagement de nouvelles passes...).

•Contraintes et limites

Deux contraintes majeures :

- le coût de la modification de l'ouvrage,
- les contraintes économiques de l'aménagement : son effacement en crue par abaissement du plan d'eau peut être incompatible avec sa fonction première (nécessité de maintenir la dérivation d'eau en permanence, contraintes énergétiques en cas d'aménagement hydroélectrique...).

•Conception et dimensionnement

Pour assurer le transit des matériaux, il faut assurer la plus grande transparence possible de l'ouvrage, c'est-à-dire réduire la dénivelée qu'il provoque lors de la crue.

Il faut définir le débit au-dessus duquel l'ouverture complète des vannes sera assurée. Ce débit doit être assez fréquent pour que le transit s'établisse, mais pas trop pour réduire les périodes de non fonctionnement de l'aménagement.

•Impacts potentiels

Risques d'engravement à l'aval : si le transit des matériaux est rétabli sans que l'hydrologie naturelle le soit, la capacité de transport à l'aval de l'ouvrage pourra être insuffisante : il y aura engravement du lit. Un compromis sera alors nécessaire sur l'importance du transit rétabli.

LA GESTION DU TRANSPORT SOLIDE



■ ACTIONS DE MAÎTRISE DES APPORTS SOLIDES

MAÎTRISE DE LA PRODUCTION DES MATÉRIAUX DANS LE BASSIN (REBOISEMENT...)

Mission historique des services de Restauration des terrains en montagne (RTM), la réduction des apports solides dans les bassins versants, mentionnée ici pour mémoire, est un vaste domaine qui sort du cadre de ce guide.



Travaux de lutte contre le ravinement dans les Alpes du Sud.



La modification
d'ouvrage

Le barrage
de prise d'eau
du canal de Gap
sur le Drac :
l'ajout d'une
passe mobile
permettrait
d'assurer
la continuité
du transit
sédimentaire
à travers
l'ouvrage.

ESPACES DE RÉGULATION DES APPORTS SOLIDES.

Il s'agit de zones aménagées pour favoriser une régulation du transport solide. Sont donc concernés surtout les torrents et les rivières à proximité de confluent de torrents.

• *Contexte d'application*

Torrents et confluent torrents - rivières.

• *Modes opératoires*

Dégagement d'un espace où le cours d'eau pourra librement divaguer : la régulation du transport se fera spontanément par des phases de dépôt et reprise.

• *Conception et dimensionnement*

L'espace de régulation doit d'abord être un espace fortement submersible, où les phénomènes torrentiels peuvent se développer librement. Il faut donc prévoir l'acquisition des terrains, la suppression des obstacles aux débordements et divagations

• *Impacts potentiels*

Cet aménagement va dans le sens d'une plus grande qualité du cours d'eau.

Prévoir la maîtrise des divagations à l'approche des zones vulnérables.

CHENAUX LISSES (GOULOTTES)

Dans des cas exceptionnels, lorsque la vulnérabilité des terrains riverains le justifie, l'aménagement des torrents en goulottes lisses permet d'y favoriser le transit des matériaux.

Longtemps négligé au profit des plages de dépôt total, cet aménagement ponctuel assure la continuité du transport solide. Mais on lui préférera toujours l'espace de régulation, lorsque les surfaces nécessaires peuvent être mobilisées à cet effet.

PLAGES DE DÉPÔT

Les plages de dépôt comptent parmi les ouvrages les plus utilisés en domaine torrentiel pour maîtriser les apports excessifs des torrents, à leur débouché dans la vallée principale.

Mais ce concept s'applique plus généralement à toutes les ruptures de pente, y compris sur des rivières de basse altitude.

•Contexte d'application

En domaine torrentiel, torrents à apports importants et brutaux, débouchant dans une zone sensible où le lit ne permet pas l'évacuation de ces apports.

En domaine fluvial, ruptures de pente au débouché dans une vallée principale, s'accompagnant d'une tendance générale à l'exhaussement.

•Contraintes et limites



Le piégeage généralisé des apports des torrents affluents peut conduire à un déficit notable sur la rivière principale.

Il est souvent difficile de maîtriser le taux de rétention. La plupart des ouvrages conduisent à un fonctionnement en tout ou rien qui peuvent conduire à des désordres morphologiques importants à l'aval.

•Modes opératoires

Ouvrages en travers du cours d'eau provoquant une remontée des niveaux d'eau, voire un blocage mécanique des plus gros blocs. Les corps flottants favorisent souvent, au-delà du souhaitable, le piégeage des matériaux.

Ce type d'ouvrage conduit à des dépôts permanents qui impliquent un entretien important. Ils sont donc surtout mis en œuvre sur les torrents à fonctionnement rare. Pendant la durée du remplissage de la plage, seule de l'eau claire s'écoule à l'aval, avec une forte capacité de transport qui peut déstabiliser le lit aval. Il peut être alors nécessaire de le fixer par des seuils en série.

Plage de dépôt latérale : la plage est séparée du lit par un déversoir qui ne fonctionne que pour les crues menaçantes. Le fonctionnement est plus difficile à maîtriser, mais permet d'éviter des dépôts pour les crues ordinaires. Une fois que l'eau se déverse vers la plage, la capacité de transport dans le lit principal baisse rapidement, le lit s'engrave et fini par basculer vers la plage.

Zone de dépôt sans ouvrage de contrôle aval : seule la géométrie de la plage favorise le dépôt (pente faible ou nulle, grande largeur...). Un seuil de stabilisation peut être nécessaire en amont pour éviter toute érosion régressive.



Le nant Croex, en Savoie ; vue de la plage de dépôt avant et après fonctionnement. À l'aval, la rétention des matériaux dans la plage a provoqué une forte incision du lit du torrent.

•Conception et dimensionnement

En domaine torrentiel, l'évaluation des volumes à piéger est délicate dans la mesure où les apports peuvent varier pour un même débit. L'expérience de crues antérieures est précieuse.

Le volume utile de la

plage de dépôt dépend fortement de la pente de dépôt des matériaux, souvent difficile à déterminer.

•Impacts potentiels

Déficit de transport solide à l'aval, avec même risque d'enfoncement brutal du lit.

LA GESTION DU TRANSPORT SOLIDE



OUVRAGES DE RÉGULATION DU TRANSPORT SOLIDE

(CHENAUX À BIEFS AFFOUILLABLES...)

Ouvrages mis en œuvre de longue date par les services RTM, ils permettent une respiration du lit par fluctuation de la pente sans risques de déstabilisation du lit. Ils s'appliquent donc en domaine torrentiel quand les apports naturels sont irréguliers.

•Contexte d'application

Torrents à apports irréguliers.

•Contraintes et limites

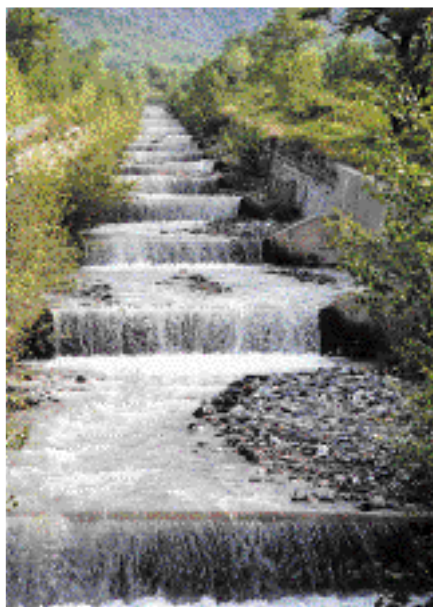
Application à des lits étroits ou endigués.

•Modes opératoires

Seuils en série.

•Conception et dimensionnement

Calage et espacement des seuils dépendent des hypothèses sur la fourchette de pentes possible,



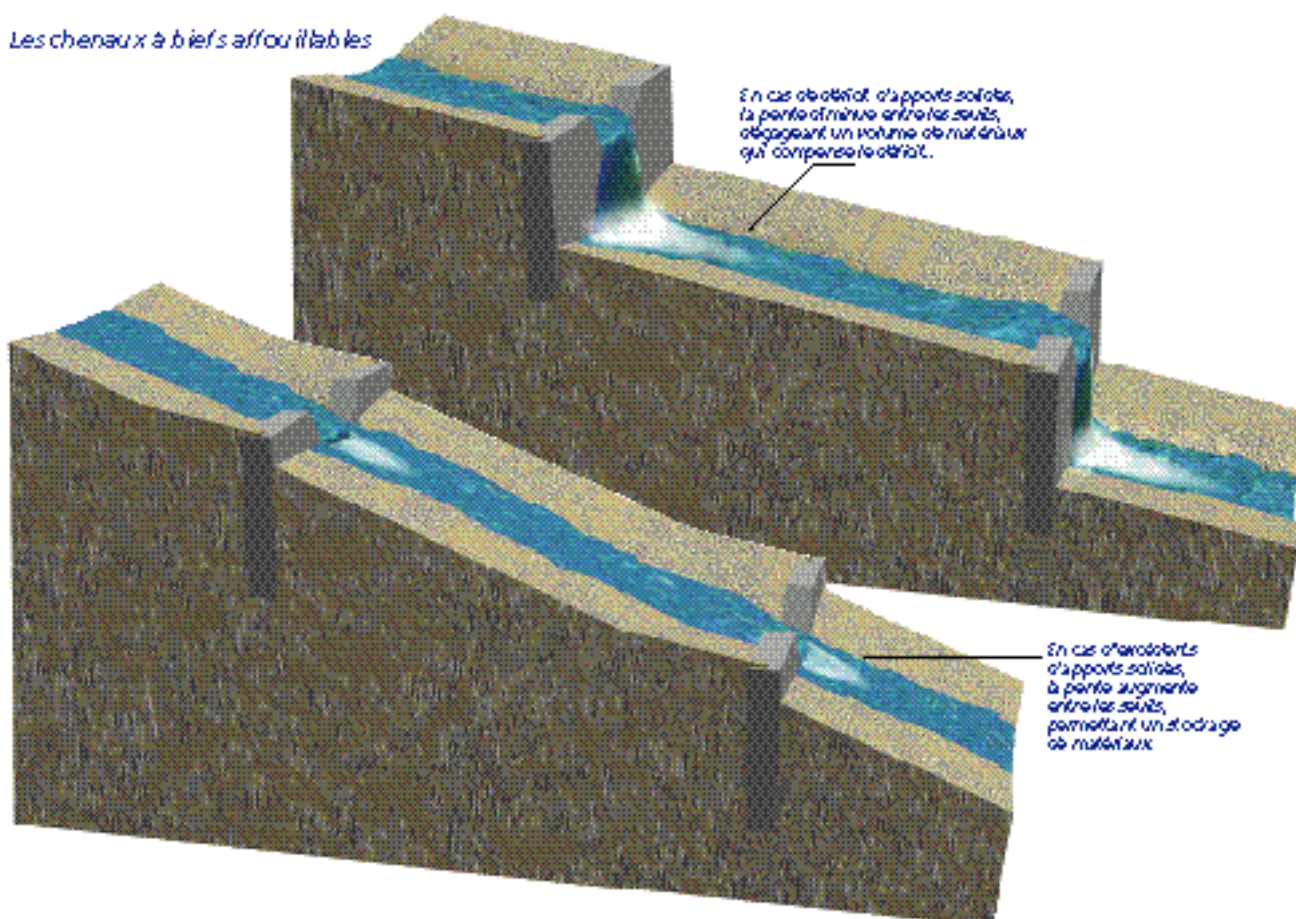
ainsi que de contraintes externes : gabarit minimum du lit à maintenir, stabilisation des versants...

•Impacts potentiels

Problème de leur franchissement par les poissons.

Le torrent de Saint-Bernard à Saint-Martin-la-Porte, en Savoie.

Les chenaux à biefs affouillables



EXTRACTIONS DE MATÉRIAUX

Aujourd'hui interdites en lit mineur dans le cas général, les extractions de matériaux (que l'on distinguera des curages par leur caractère régulier) peuvent encore être envisagées exceptionnellement.

•Contexte d'application

Depuis leur interdiction, les extractions en lit mineur ne peuvent être envisagées que dans des cas très particuliers : queue de retenue de barrages, zones d'exhaussement continu.

•Contraintes et limites



Prise en compte de la grande variabilité des apports naturels d'une année sur l'autre.

•Modes opératoires

Si possible, arasement de bancs hors d'eau pour minimiser les incidences environnementales.

•Conception et dimensionnement

Les modalités d'exploitation doivent éviter tout risque d'érosion régressive, soit en adaptant les prélèvements à l'observation des exhaussements du lit, soit en construisant à l'amont un seuil.

Les volumes extraits doivent être déterminés sur la base d'une étude sédimentaire globale de la rivière.

Un dispositif de suivi des volumes réels extraits doit être mis en place.

•Impacts potentiels

Impacts classiques des extractions (paysage, bruit, circulation des camions...).

Impacts sur la qualité de l'eau si l'exploitation a lieu en eau.

■ ACTIONS DE REMODELAGE DE LA SECTION

REMODELAGE DU LIT VIF.

Le remodelage du lit vif permettra souvent de satisfaire les attentes des riverains sans réduire le stock alluvionnaire. Il peut permettre en effet de rediriger les écoulements pour éviter une érosion de berge menaçante et faciliter l'écoulement des crues.

•Contexte d'application

Tout cours d'eau.

•Contraintes et limites

Perturbations temporaires du milieu, notamment aquatique. Efficacité souvent temporaire.

•Modes opératoires

Déplacement de l'axe du lit vif pour l'éloigner de la berge.

Abaissement de bancs trop haut par remaniement des matériaux et mise en dépôt contre la berge ou dans le lit ordinaire.

•Conception et dimensionnement

En cas de mise en dépôt contre la berge, prendre garde de ne pas favoriser un rétrécissement global du lit si ces matériaux venaient à se végétaliser.

Si des dépôts dans le lit ordinaire sont prévus, et surtout en cas de déplacement du bras vif, prévoir un batardage pour éviter de travailler en eau.

•Impacts potentiels

Les impacts potentiels restent limités à la zone remaniée.

La modification de la forme du lit pourra conduire à changer la localisation des points d'érosion. C'est d'ailleurs souvent un des buts recherchés ; mais le point d'attaque de la berge pourra se reporter ailleurs.

Les impacts sur le milieu naturel peuvent être importants (remise en suspension de fines...).

Les impacts paysagers seront temporairement forts.



CURAGES DU LIT VIF.

Les curages du lit sont fréquemment envisagés pour accroître la section du lit avec deux objectifs principaux :

- réduire les risques de débordement,
- alléger les attaques d'érosion sur les berges.

•Contexte d'application

Tout cours d'eau, sauf ceux trop déficitaires.

•Contraintes et limites

Incidences morphologiques à bien mesurer. Effet souvent temporaire.

On sera soucieux de vérifier le gain réel de l'arasement d'un banc sur les niveaux de crue si la motivation de l'opération est de réduire les débordements.

Lorsqu'il s'agit d'une opération avec valorisation des granulats, financée par la vente des granulats, attention au risque d'un dépassement des volumes autorisés.

•Modes opératoires

Le type le plus fréquent est l'arasement de bancs hors d'eau, qui limitent les impacts sur le milieu aquatique.

Les curages en eau doivent être réservés à des cas exceptionnels.

•Conception et dimensionnement

Reconnaissance du substratum si celui-ci est proche (risque de mise à nu d'un substratum très érodable).

Prise en compte d'un éventuel pavage du lit, dont la destruction pourrait déstabiliser le lit.

Volume à définir par compromis entre les objectifs recherchés et le contexte global de la rivière, notamment son équilibre sédimentaire.

Etudier la possibilité d'une mise en dépôt des matériaux prélevés sur un autre point du cours d'eau (Voir « Apports mécaniques de matériaux »).

•Impacts potentiels

En amont, une érosion régressive peut se développer. Dans un premier temps, avant que le lit soit remodelé par les crues successives, l'arasement de banc, en homogénéisant le profil en travers, réduira localement la capacité de transport. Il favorisera ainsi des dépôts locaux aux dépens du transit de matériaux à l'aval.

La modification de la forme du lit pourra conduire à changer la localisation des points d'érosion. C'est d'ailleurs souvent

un des buts recherchés ; mais le point d'attaque de la berge pourra se reporter ailleurs.

Les impacts paysagers seront temporairement forts.

Enfin, la réduction des débordements à ce niveau peut aggraver les débits de crue en aval, et donc les inondations. Mais cet effet est complexe : une réduction modérée des débordements peut avoir un impact positif sur les crues plus fortes qui restent débordantes.

OUVERTURE DE TERRASSES BASSES ET ARASEMENT DE BANCS FIGÉS.

L'ouverture de terrasses basses est une alternative séduisante aux curages du lit actif. Elle permet d'accroître la capacité du lit à écouler les crues en minimisant les incidences morphologiques néfastes (abaissement du lit, déficit du transit sédimentaire à l'aval). Elle peut parfois permettre un retour à une dynamique du lit plus satisfaisante.

•Contexte d'application

Présence de bancs perchés, inactifs (en général boisés) enserrant un lit vif étroit.

Le cas se présente en cas d'abaissement important du lit : l'ancienne zone de divagation s'est retrouvée trop perchée pour que la mobilité des alluvions soit conservée. La terrasse s'est boisée, et s'est exhaussée par dépôt de limons.

Sont concernées également les rivières à dynamique amoindrie (par déficit d'apports liquides et solides) où des bancs se forment par dépôt de limons.

•Contraintes et limites

Contraintes d'emprise : il faut d'une part prévoir l'acquisition des terrains concernés, d'autre part garantir la protection contre les érosions des zones situées en retrait.

Lourdeur de l'opération : elle suppose des travaux importants de déboisement et de terrassement.

Contraintes économiques : les matériaux à enlever sont rarement valorisables (fortes teneurs en limon). Se posera donc le problème du coût de l'opération, et celui du stockage ou du transfert des produits de l'arasement.

Risques d'un réenlimonnement de la terrasse.

•Modes opératoires

Extraction par engins mécaniques.

• Conception et dimensionnement

Le calage en altitude de la terrasse basse tiendra compte de deux contraintes :

- la terrasse doit être fréquemment submergée pour entrer pleinement dans le lit actif ;
- la terrasse ne doit pas être plus basse que les bancs ordinaires du lit vif. Dans le cas contraire, la recharge de la terrasse se ferait aux dépens de la charge sédimentaire du cours d'eau.

En définitive, on cherchera à retrouver une morphologie du lit proche de la morphologie naturelle antérieure.

En cas de dynamique fluviale amoindrie, il peut être intéressant de conserver des bourrelets entre le lit mineur et la terrasse arasée, pour limiter les dépôts de limons en régime ordinaire.

• Impacts potentiels

Destruction d'un milieu boisé, mais création d'un milieu fluvial plus dynamique.

Modification de l'orientation des bras vifs : la remise en eau de la terrasse lors des crues peut conduire à un déplacement des bras vifs, avec déplacement des attaques d'érosion préférentielles, notamment sur la rive opposée, et en aval.

Risque de réalluvionnement si l'abaissement de la terrasse donne au lit une largeur excessive

■ ACTIONS POUR ACCROÎTRE LA MOBILITÉ DU LIT

PROMOTION DES ÉROSIONS DE BERGE

Cette action s'inscrit dans un cadre plus large de restauration des « espaces de liberté des cours d'eau », qui fait l'objet d'un guide spécifique.

Dans le contexte de la gestion du transport solide des cours d'eau, la promotion des érosions de berge sera envisagée notamment pour fournir des sédiments en cas de déficit d'apports préjudiciable à l'aval.

Deux volets sont à prévoir : une politique foncière sur les berges menacées et des actions dans le lit pour favoriser l'érosion des berges.



La promotion des érosions de berge n'est favorable au transit sédimentaire que dans le contexte d'un lit déficitaire ou trop étroit.

Dans un lit en équilibre, l'érosion d'une berge s'accompagnera d'un dépôt sur la berge opposée.

• Contexte d'application

Favoriser les érosions de berge est une mesure difficile à faire accepter par les riverains. Vis-à-vis de la gestion du transport solide, elle doit être surtout envisagée en cas de déficit d'apports préjudiciable à l'aval (notamment, tronçon aval excessivement abaissé).

Dans des lits qui ont perdu leur mobilité, la fourniture de matériaux permettra au cours d'eau de réenclencher une dynamique d'érosion naturelle des berges (dépôts en intrados favorisant des érosions en extrados) dans des secteurs où la géométrie artificielle du lit en réduit la dynamique.

On pourra souvent s'appuyer sur une comparaison économique entre le coût de la protection des berges et la valeur des terres protégées.

• Contraintes et limites

Le développement des érosions de berge sera difficile à quantifier précisément : il faut donc une marge de manœuvre suffisante sur les berges pour ne pas risquer de menacer des enjeux vulnérables.

D'autre part, l'érosion des berges peut se développer parallèlement à la formation de dépôts dans le lit : le bilan sédimentaire serait alors nul (mais ce fonctionnement favorisera une plus grande diversité des milieux alluviaux). Cette action sera donc surtout envisagée dans les secteurs de largeur anormalement réduite.

LA GESTION DU TRANSPORT SOLIDE



• Modes opératoires

Définition d'une largeur érodable le long des berges, avec mise en œuvre d'une politique foncière adaptée (acquisition des terrains, ou politique de compensations en cas d'érosion de terres agricoles).

Dans le lit, diverses actions possibles :

- enlèvement de protections de berge,
- gestion du lit favorisant les écoulements vers les berges (conservation d'îles boisées, dégagement de la végétation près des berges...).

• Conception et dimensionnement

L'expertise des conditions locales sera fondamentale. La largeur de la bande érodable pourra être définie selon les principes de définition des espaces de liberté. Les modalités de gestion du lit seront expérimentées in situ.

• Impacts potentiels

- Renforcement des possibilités de divagation à l'aval ;
- accroissement des relations nappe - rivière.

TRAITEMENT DES BANCs OU DES BRAS «MOU-RANTS» POUR ACCROÎTRE LEUR MOBILITÉ (SCARIFICATION, LABOURAGE, OUVERTURE DE BRAS...)

La remobilisation de bancs figés qui ne participent plus à l'activité morphologique du lit peut répondre à trois objectifs distincts :

- rompre un cycle d'exhaussement du banc : le bras principal, étroit, tend à s'enfoncer, tandis que le banc s'exhausse inéluctablement (dépôts de limon), devenant de moins en moins érodable,
- accroître le stock sédimentaire auquel la rivière peut faire appel pour compenser un déficit,
- déplacer l'axe principal du cours d'eau pour l'éloigner d'un point d'érosion sensible.

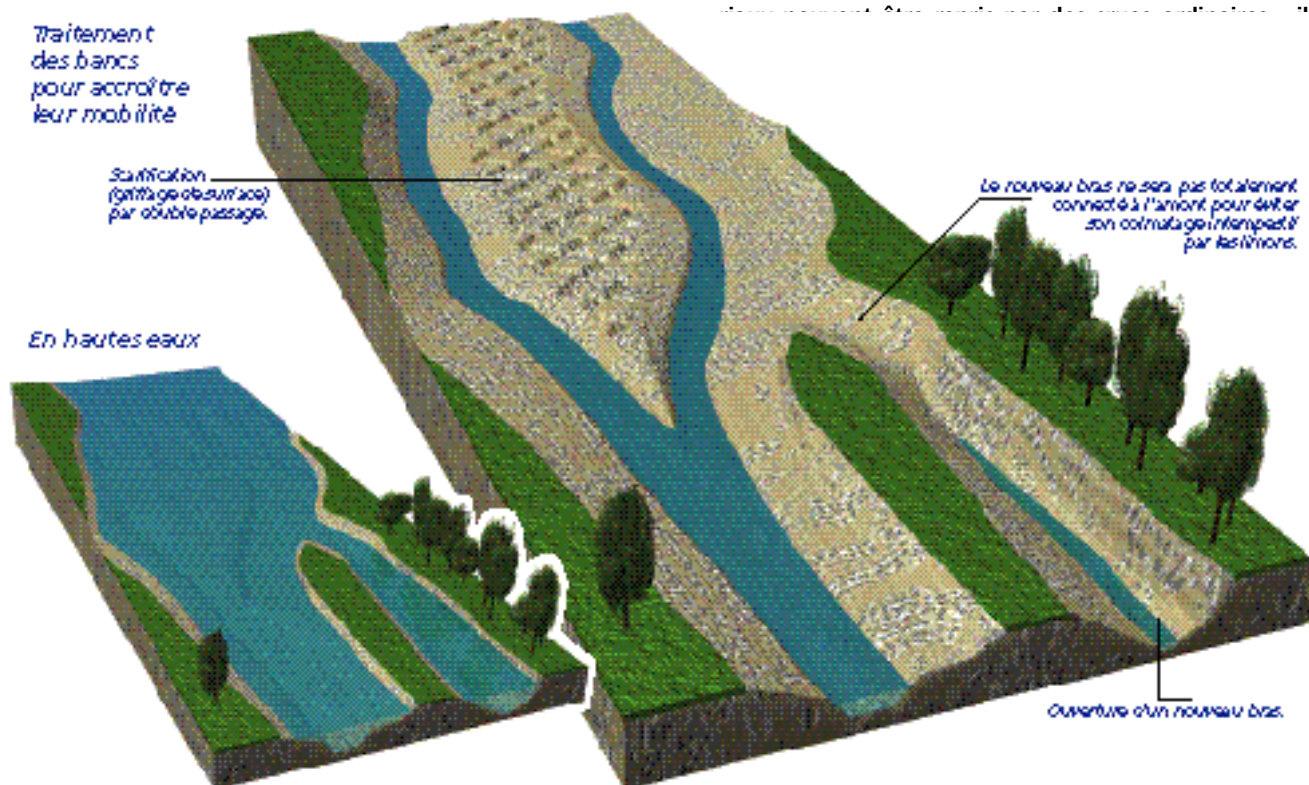
• Contexte d'application

- Bancs ou bras figés par le développement de la végétation ;
- cours d'eau en déficit hydrologique, où la fixation du lit est une tendance permanente.

• Contraintes et limites

Nécessité d'une suppression préalable de la végétation : il faut apprécier l'intérêt écologique du milieu.

Ces actions ne peuvent être efficaces que si les maté-



Le cas de la Drôme

Dans le cadre de la mise en place de son schéma de gestion des eaux (SAGE), le bassin versant de la Drôme a fait l'objet d'une investigation géomorphologique approfondie au cours de l'année 1995. L'objectif était de dresser un état du fonctionnement de la rivière et de certains de ses affluents et, au vu du diagnostic, de faire des propositions de gestion équilibrée du cours d'eau, avec un regard tout particulier sur les transports solides.

La rivière a été découpée en tronçons équidistants de 500 m et de multiples variables quantitatives et qualitatives témoignant de l'état du système ont été collectées au moyen de diverses sources (photographies aériennes verticales de l'IGN, profils en long, photographies obliques prises à basse altitude, mesures de terrain). Elles ont permis la constitution d'une volumineuse base de données permettant d'analyser l'évolution spatiale et temporelle du chenal (largeur, sinuosité, tressage, approfondissement...), des berges (nature, état de dégradation), de la végétation alluviale (surface, diversité, potentialités de rajeunissement par les processus fluviaux), du bois mort (zone de production, zone d'accumulation...), et enfin des aménagements. La plupart de ces données ont été traitées en infographie, permettant la mise en place d'un atlas cartographique de la rivière Drôme.

Du point de vue des transports solides, les investigations ont montré que les extractions et aménagements divers avaient conduit à une incision très marquée de la rivière sur la quasi-totalité de son cours (deux à trois mètres d'abaissement du lit et déstockage d'un volume de 8,13 millions de m³ entre 1928 et 1986).

Outre le diagnostic, l'un des objectifs de l'étude était de voir si la restauration du profil en long était envisageable dans les secteurs où l'inondation ne constitue pas une contrainte majeure pour les biens et les personnes. C'est pourquoi, il s'est agi de déterminer quelles sont les sources potentielles de matériaux grossiers susceptibles d'engraisser la Drôme et les volumes que cela représente. Deux types de recharge ont été envisagés : d'abord les apports des affluents torrentiels, ensuite les apports issus du déstockage de la masse alluvionnaire accumulée dans la vallée.

Les études conduites sur ces deux sources de matériaux ont donné les résultats suivants :

- sur vingt-quatre torrents susceptibles de fournir une forte charge solide à la Drôme au début du XX^e siècle, quatorze étaient encore fonctionnels en 1971 et seulement onze en 1991 présentaient une forte activité de transport solide. Il semble donc que les potentialités de recharge par les torrents soient en train de diminuer, en relation avec la réussite des opérations de restauration des terrains de montagne et la déprise rurale. L'extrapolation de mesures de transports solides faites sur deux sous-bassins de la Drôme permet d'avancer un apport annuel maximum de 30 000 m³ pour les onze torrents encore actifs ;

- l'analyse des berges a montré que seulement 26 % du linéaire subissait l'érosion et présentait donc actuellement un intérêt potentiel pour la recharge sédimentaire. Une estimation du volume annuel injecté dans le chenal par les érosions a donné la valeur de 24 000 m³ ;

- les sorties du système évaluées grâce au piège à gravier de la CNR établi au confluent du Rhône étant d'environ 35 000 m³/an, il apparaît qu'il faudra plus de 500 ans (!) pour que le profil en long se restaure naturellement (dans l'hypothèse où les termes du bilan resteraient inchangés).

Les propositions de gestion consistent donc essentiellement à « gérer la pénurie de charge ». Trois types d'actions ont été recommandées :

- des opérations ponctuelles d'entretien - curage consistant à enlever les matériaux encombrant le lit (alluvions, végétation, bois mort) afin de maintenir des conditions d'écoulement optimales. Ces opérations sont réservées aux zones particulièrement sensibles (ponts, gués, prises d'eau, seuils...) ;

- des interventions de décapage de bancs vifs dépassant la ligne de basses eaux. Une démarche particulièrement originale mise en œuvre par la MISE de la Drôme est celle du creusement de chenaux de défluviation dans les bancs gênants, afin de favoriser le transfert de l'accumulation sédimentaire. Elles sont conduites en prenant garde de décaper de manière sélective, en ouvrant un chenal sinueux profond d'environ un mètre, semblable aux chenaux naturels des rivières ; après divers essais, il s'est avéré que le maintien en tête de banc d'un seuil naturel qui n'autorise la mise en eau du chenal artificiel qu'en crue permettait sa pérennité et l'évacuation progressive de l'accumulation de gravier et ceci, sans aggraver les érosions de berge ;

- des interventions sur les atterrissements végétalisés. Il s'agit d'éliminer une partie de la végétation âgée afin de permettre le rajeunissement des espèces et la diversification des milieux. Si le lit est encore suffisamment large, un essartement partiel seulement est réalisé au contact de la bande active. Si la capacité du chenal est insuffisante, l'essartement s'accompagne de la réouverture d'un ou plusieurs bras de tressage, les matériaux étant mis en protection des berges les plus sensibles.

Références :

N. Landon, H. Piégay, et J.-P. Bravard (1995) : « Compte-rendu de la mission d'expertise réalisée sur la Drôme pour le compte du SMRD et de la CLE : propositions pour une gestion physique équilibrée de la Drôme ». Rapport d'étude de l'URA 260 CNRS, 3 vol. 105 pages + annexes + atlas de 52 planches.

N. Landon (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 géographie et aménagement, Université Paris 4 – Sorbonne, 560 p. + volume d'annexes.



La Drôme

• Modes opératoires

Essartement simple : l'essartement seul n'est efficace sur le plan morphologique que s'il s'accompagne de la suppression des souches et si le banc est assez bas pour être remobilisé.

Scarification : griffage de surface pour rompre la croûte consolidée de surface. Effectuer un double passage, l'un parallèle à l'écoulement, l'autre perpendiculaire.

Labourage : retournement de la partie supérieure du banc (sur une épaisseur de 3 à 4 fois le diamètre des matériaux les plus grossiers).

Ouverture de bras : modeler un bras vif à travers un banc, de façon que l'écoulement y soit assez rapide en crue pour entretenir et développer la mobilité du bras.

• Conception et dimensionnement

Il n'y a pas de règles bien définies. L'expérimentation sur des sites pilotes reste la procédure la plus efficace.

Sur la Drôme, les expérimentations ont mis en évidence le risque de colmatage rapide de ce bras artificiel. Solution proposée : ne pas achever l'ouverture du bras côté amont pour que les hautes eaux ordinaires ne s'y engouffrent pas.

• Impacts potentiels

Impacts paysagers, surtout en cas de renouvellement régulier de l'opération.

Impacts sur les milieux naturels : choix important de la saison d'intervention.

Réduction potentielle des apports d'arbres pouvant former embâcle à l'aval.

TRAITEMENT DE LA VÉGÉTATION

(IRRÉGULARITÉ DES ESSARTEMENTS

POUR FAVORISER L'ATTAQUE DES BERGES...)

Les modalités de gestion de la végétation peuvent favoriser une plus grande dynamique du lit, si on évite une régularité excessive des formes. Ces modalités de gestion peuvent en outre favoriser une plus grande diversité biologique.

• Contexte d'application

Rivières en tresse, rivières de régime très irrégulier.

Notamment, rivières soumises à des essartements réguliers en raison d'un déficit de débits dérivés.

• Modes opératoires

Développer une géométrie irrégulière du plan d'essartement :

- conservation d'îles au centre du lit,
- essartement préférentiel près des terrasses érodables,
- formes des îles en étrave orientées vers l'amont.

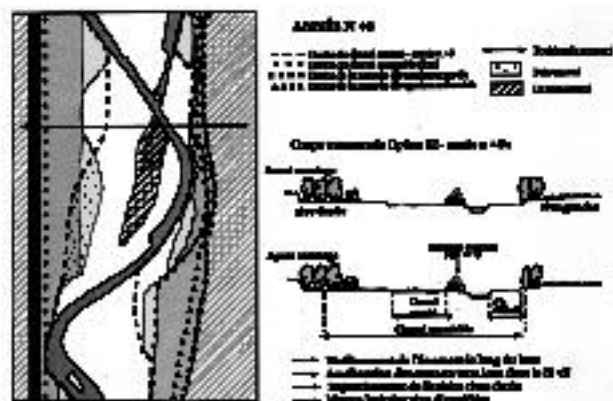
• Conception et dimensionnement

La largeur globale du chenal doit être conservée si on veut maintenir les mêmes conditions d'écoulement des crues.

Cette technique favorise la divagation du lit, et doit donc être intégrée à une réflexion sur les espaces de liberté.

• Impacts potentiels

Accroissement possible de la production de corps flottants.



Réflexions en cours sur la Durance : les méthodes d'essartement actuelles du lit tendent à fixer un chenal rectiligne. Les réflexions en cours portent sur des principes d'essartement qui permettraient d'accroître la mobilité du lit et de favoriser l'apparition de stades de végétation d'âges différents [source : Cesame/Sogreah pour SMAVD].

■ ACTIONS DE LUTTE CONTRE L'ABAISSMENT DU LIT

APPORTS MÉCANIQUES DE MATÉRIAUX

L'apport mécanique de matériaux extérieurs pour accroître la charge sédimentaire est une solution extrême, en raison de son coût et de ses impacts.

En revanche, la dépose des produits issus de curages pratiqués ailleurs sur la rivière est préconisée par exemple par le SDAGE RMC. Il n'en demeure pas moins qu'il s'agit d'une opération lourde et délicate.

•Contexte d'application

Apports extérieurs à la rivière : déficit d'apports solides prononcé.

Dépose de produits de curage : a priori tous cours d'eau, mais surtout secteurs déstabilisés.

•Contraintes et limites

Coûts et volumes en jeu : il convient d'apprécier si le gain de cette opération est significatif par rapport aux volumes sédimentaires disponibles dans le lit.

•Modes opératoires

Selon les contraintes écologiques locales, dépose en eau ou dépose des matériaux hors d'eau, mais le plus près possible du lit pour qu'ils soient facilement repris.

Éviter toute accumulation qui pourrait se végétaliser et se fixer : la surface du dépôt doit être submergée pour une crue annuelle avec une hauteur d'eau suffisante pour entraîner les matériaux. Ce critère s'avérera souvent contraignant.

On pourra envisager le dépôt des matériaux dans le lit ordinaire après dérivation temporaire des eaux.

•Impacts potentiels

- Impacts du transport (bruit, etc.) ;
- dégradation du milieu aquatique en cas de dépose en eau. Même avec une dérivation des eaux, la concentration des matières en suspension pourra être excessive lors du rétablissement des écoulements normaux ;
- impacts paysagers des dépôts ;
- risques de fluctuation du niveau du lit en cas de reprise brutale des matériaux (bouffées de transport solide).

ÉDIFICATION DE SEUILS DE STABILISATION

La construction de seuils a toujours été le remède principal contre les phénomènes d'érosion régressive.

De nouveaux principes de conception permettent aujourd'hui d'en atténuer les impacts les plus marquants, notamment les difficultés de franchissement par les poissons.

On distinguera :

- les seuils préventifs, calés au niveau du fond du lit, destinés à bloquer une évolution venant d'aval avant qu'elle ait touché la zone traitée ;
- les seuils curatifs, calés plus haut que le lit, réalisés après abaissement du lit pour retrouver un niveau antérieur jugé plus satisfaisant.

•Contexte d'application

Zone d'érosion régressive.

•Contraintes et limites

Les seuils curatifs joueront leur rôle de réengrèvement du lit en interrompant temporairement le transit des matériaux.

Ils favorisent donc un déficit à l'aval.

Ils ne peuvent être envisagés que si les apports solides sont suffisants.

•Conception et dimensionnement

Le calage du seuil doit prendre en compte la « loi d'égalité des charges » (cf. chapitre 5). Le seuil sera normalement calé pour les débits morphologiquement les plus actifs, mais un contrôle du fonctionnement de l'ouvrage à tous débits est nécessaire.

On n'entrera pas ici dans les modes de construction et leurs contraintes.

Le seuil est conçu pour rehausser les niveaux lors des crues morphologiquement actives.

En revanche, il n'y a pas de contraintes en étiage (sauf lorsque la fonction première du seuil est le soutien d'étiage pour l'alimentation de la nappe. Même dans ce cas, l'effet sera obtenu plus par le réengrèvement du lit amont que par le maintien d'un plan d'eau, souvent peu efficace sur la nappe en raison des phénomènes de colmatage).

On pourra donc envisager de conserver une fente centrale pour assurer la continuité du lit d'étiage. La fente sera suffisamment étroite pour créer une dénivelée en hautes eaux.

La réalisation de seuils multiples peut permettre de minimiser les incidences paysagères et environnementales, et le déficit sédimentaire à l'aval.



Seuils multiples sur l'Arly en Savoie.

• Impacts potentiels

- Problème de leur franchissement par les poissons ;
- impact paysager ;
- interruption temporaire du transport solide en cas de seuil curatif ;
- rehaussement des lignes d'eau de crue ;
- perturbation locale de la distribution des écoulements dans la section, qui explique la formation de bancs à l'aval des seuils.



Sur la Loire, dans le Forez, des reflexions sont en cours pour protéger les affleurements d'argile par un matelas de 30 cm de galets (de diamètre de 80 à 100 mm), issus des alluvions du fleuve

CRÉATION D'UN PAVAGE ARTIFICIEL DU LIT (MISE EN PLACE D'ALLUVIONS GROSSIÈRES)

Il s'agit d'une piste prometteuse, mais qui n'a guère été mise en œuvre jusqu'à présent. Le principe est de reconstituer un matelas alluvial d'alluvions grossières, donc peu mobiles.

Envisageable notamment lorsque un substratum tendre a été mis à jour et connaît une incision rapide, cette technique est une alternative à la construction de seuils notamment dans un contexte de déficits d'apports (qui ne permet pas d'espérer un engravement derrière des seuils).

Elle offre de sérieux avantages vis-à-vis de l'environnement aquatique : la reconstitution d'un matelas alluvial améliorera la qualité de milieu physique, appauvri par les affleurements du substratum.

• Contexte d'application

Affleurements d'un substratum tendre (marnes, argiles, ...).
Eventuellement, zone d'érosion progressive.

• Contraintes et limites

Coût et difficulté d'approvisionnement.

Attention, en cas d'érosion régressive, le pavage doit être tenu à l'aval par un ouvrage spécifique.

• Modes opératoires

Dépôt en couche mince sur l'ensemble du fond du lit par des engins.

• Conception et dimensionnement

Le matelas sera constitué de matériaux peu mobiles dans les conditions d'écoulement du lit actuel.

Des calculs d'entraînement des matériaux (cf. chapitre 5) permettront de définir le diamètre requis. Il ne nous paraît pas utile de prendre des marges de sécurité : une légère mobilité pour les plus grandes crues paraît a priori acceptable.

La fraction la plus grossière des alluvions de la rivière satisfera normalement cette condition. Les matériaux pourront être ainsi issus d'extractions en lit majeur.

Lorsque l'incision dans les marnes a créé une chute, il sera nécessaire de prévoir un blocage aval du matelas.

• Impacts potentiels

Phase de mise en œuvre : risque de rejet de matières en suspension.

4.3 LE SUIVI ULTÉRIEUR

Quel que soit le mode d'action retenu, il sera très enrichissant de mettre en place un suivi ultérieur régulier de l'évolution du lit qui permettra de traiter les problèmes futurs sur la base de données incontestables.

Cette procédure peut en outre permettre de retarder les interventions, en l'attente d'une évolution dépassant un seuil critique que l'on aura fixé. Elle permet enfin de mettre en œuvre une gestion en dehors des périodes de crise, souvent propices à des interventions intempestives.

■ SUIVI PHOTOGRAPHIQUE

Un suivi photographique d'un site sensible permettra d'accumuler des informations précieuses pour décider du traitement adéquat.

■ SUIVI TOPOGRAPHIQUE

Ce sera l'élément essentiel du suivi.

Le suivi du profil en long d'une ligne d'eau sera le meilleur indicateur de l'évolution d'ensemble d'un tronçon à condition que les levés successifs soient réalisés à des débits comparables.

Entre deux levés, la mesure du tirant d'air sous les ponts est un élément de suivi très léger, qui peut donc être répété fréquemment. Elle peut cependant être perturbée par l'effet de singularité.

Le suivi de profils en travers doit être strict : les profils seront matérialisés par des bornes. Un tel suivi peut être précieux pour apprécier l'évolution d'un banc ou la réduction de la capacité du lit. Cependant, la comparaison des profils successifs doit être interprétée avec précaution :

- il importe de comparer non pas la cote de tel ou tel banc, mais d'analyser l'évolution du fond moyen du lit vif. Cette comparaison peut être rendue délicate si la largeur du lit vif a changé entre deux levés (végétalisation de bancs ou développement d'une anse d'érosion) ;
- l'évolution du lit au niveau du profil ne préjuge pas des évolutions juste en amont ou en aval. Il peut ne s'agir que d'un déplacement d'un banc.

Parfois, un levé topographique en plan sera plus fiable, mais plus onéreux.

La fréquence du suivi dépendra du contexte morphologique. On peut proposer comme principe de base un levé tous les

cinq ans, complété par un levé après chaque crue majeure.

Il est rare en effet que des comparaisons sur un ou deux ans, en l'absence de grandes crues, mettent en évidence des évolutions significatives en regard des fluctuations normales, sauf en cas d'aménagements lourds.

■ SUIVI DE LA GRANULOMÉTRIE

Il paraît a priori séduisant de suivre la granulométrie des alluvions quand on s'attend à des évolutions (tendance au pavage, renouvellement des alluvions lors du rétablissement du transit des matériaux,...).

Cependant, la variabilité des alluvions à quelques mètres de distance est telle qu'il sera le plus souvent impossible d'attribuer des écarts de mesure à une véritable évolution de la granulométrie du lit.

Pour tenter de déceler une véritable évolution, on prendra deux précautions :

- réaliser les mesures successives non pas à un endroit fixe, mais sur un même type de forme (seuils et tête de banc sont les formes les plus adaptées pour un tel suivi) ;
- procéder à des mesures sur plusieurs stations voisines similaires, de manière à mieux distinguer les spécificités locales du contexte général de la zone d'étude.

■ SUIVI HYDROMÉTRIQUE

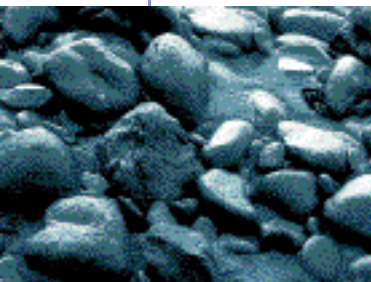
Il paraît intéressant de mesurer au terme de chaque année quelle a été son efficacité morphologique. Cela permettra d'interpréter les évolutions observées ou au contraire l'absence d'évolutions. La stabilité du lit est-elle due à un déficit hydrologique ou a-t-elle des causes plus profondes ? La forte dynamique du lit observée n'est-elle pas simplement due à une succession d'années à forte hydraulité ?

Le choix d'une formule de transport solide (voir chapitre 5 pour les formules disponibles et leurs précautions d'emploi) permettra des évaluations sommaires de la capacité de transport sur l'année, à partir de la connaissance des débits moyens journaliers.

Plus simplement, on verra qu'en première approximation, le volume charrié est proportionnel au volume d'eau écoulé au-dessus du débit d'entraînement. Une fois celui-ci estimé (voir chapitre 5), le calcul pourra être mené facilement en temps réel.

LA GESTION DU TRANSPORT SOLIDE





LES MÉTHODES ET LES

5.1 LES RECONNAISSANCES DE TERRAIN

La reconnaissance d'un cours d'eau est à la base de tout diagnostic morphologique : il ne saurait être question ici de rédiger un cours sur la « lecture » d'un paysage géomorphologique.

Cependant, il est possible de mettre en évidence quelques indices d'évolution du lit en altitude qui aideront les lecteurs à établir un diagnostic géomorphologique.

- **Indices sur les ouvrages (pont, protections, prises d'eau perchées)**

Fréquemment, l'observation de fondations de ponts, de base de digues, de protections de berges ou de prises d'eau perchées au-dessus du lit actuel permettent de quantifier assez précisément l'abaissement du lit.

- **Utilisation des plans des ouvrages anciens (ouvrages routiers et ferroviaires notamment)**

Comparaison des tirants d'air initiaux avec ceux observés aujourd'hui.

- **Niveau du lit mineur par rapport à la plaine inondable**

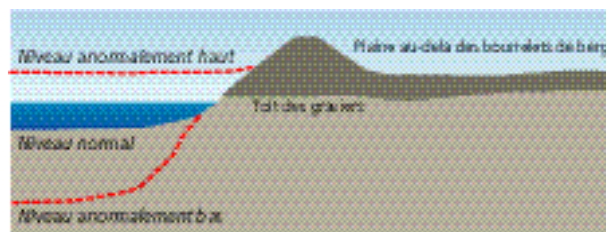
Sur les rivières de plaine, on considère souvent que le débit de plein bord est voisin de la crue de période de retour 1,5 à 2 ans (parfois jusqu'à 5 à 10 ans). Si, en l'absence d'endiguements, seules des crues rares (plus que décennales, voire centennales) sont débordantes sur le lit majeur (attention à ne pas le confondre avec des terrasses anciennes), il y a forte présomption d'un abaissement du lit.

Parallèlement, la diversité des conditions de débordement le long d'un tronçon (en l'absence toujours d'endiguements et d'ouvrages spécifiques) peut traduire des évolutions contrastées du lit en altitude.

Sur les rivières torrentielles, notamment celles à lit en tresse, cette notion de débit de plein bord n'est pas très maniable. En revanche, sur les lits en tresse non perturbés, on observe que la dénivellée entre le lit majeur et la ligne d'eau d'étiage est souvent de l'ordre de 1 à 2 m. Un écart important à cette valeur est le signe d'une évolution significative.

- **Niveau des formations grossières**

Dans la coupe de berges érodées, les graviers n'apparaissent normalement, sur une rivière non perturbée, que dans la partie inférieure de la berge (sur une hauteur de l'ordre du mètre), la partie supérieure de la berge étant formée d'allu-



vions plus fines (limons notamment). Un affleurement de graviers sur une hauteur beaucoup plus importante est souvent le signe d'un abaissement du lit.

5.2 GRANULOMÉTRIE DES FONDS ET TECHNIQUES GRANULOMÉTRIQUES

L'analyse de la granulométrie des fonds de cours d'eau pose deux problèmes majeurs : où faire la granulométrie ? Comment faire une analyse de la granulométrie ?

La réponse à la première question est complexe, car tout dépend de l'objectif poursuivi. Ce qui est par contre évident, c'est que la granulométrie d'une rivière est loin d'être une donnée uniforme non seulement dans les trois dimensions de l'espace, mais aussi dans le temps.

■ VARIABILITÉ SPATIALE DE LA GRANULOMÉTRIE

L'organisation spatiale d'un fond de rivière à charge de graviers et galets est basée sur l'alternance de seuils (zones de diffuence du courant en crue) et de mouilles (zone de convergence des flux de crue). Il existe une relation qui lie la distance entre deux seuils consécutifs (ou deux mouilles) à la largeur du chenal (distance de 5 à 7 fois la largeur moyenne du lit).

- Les **seuils** sont des formes de résistance, de granulométrie généralement plus grossière que le reste du chenal. En crue, ils sont soumis à des forces tractrices nettement moindres que les mouilles.

- Les **mouilles** concentrent une charge plus fine que les seuils, parce qu'elles sont partiellement remblayées par des matériaux fins à la décrue (graviers), puis dans les phases hydrologiques plus calmes (sédimentation de sables), en raison des faibles vitesses de courant générées par les fortes profondeurs de l'écoulement.

- Les **bancs**, formes émergées du chenal en dehors des hautes eaux et des crues, connaissent également une forte variabilité granulométrique. Les têtes de bancs, rattachées aux seuils, ont une granulométrie grossière, similaire à celle de ces derniers. La taille des éléments diminue lorsque l'on se déplace vers l'aval du banc. Les queues de bancs, formes de construction, sont les zones émergées où la granulométrie du lit est la plus fine (graviers, voire sables).



La variabilité spatiale de la granulométrie n'existe pas seulement en plan, mais également dans la composante verticale de la masse alluviale. Les phénomènes de ségrégation hydraulique à la décrue, voire l'existence d'un pavage lié à un déficit chronique de charge conduisent à ce que les alluvions de surface soient plus grossières que celles sous-jacentes. On considère généralement comme couche de surface, une tranche dont l'épaisseur est celle du plus gros grain de surface. Les différences granulométriques entre la surface et la sub-surface peuvent être importantes, la médiane d'un échantillon de surface pouvant être plus grossière d'un facteur de 2 à 3. Souvent, d'autres indices que la granulométrie permettent de supposer l'existence d'un pavage, tels la présence d'une patine sur les éléments de surface non remaniés ou le fait que le substrat soit colmaté (infiltration de sédiments fins entre les éléments grossiers renforçant la cohésion du substrat).

■ VARIABILITÉ TEMPORELLE DE LA GRANULOMÉTRIE

La granulométrie d'un cours d'eau peut varier dans le temps. Plusieurs cas de figures peuvent être envisagés :

- dans le cas d'un suivi de la granulométrie d'un site, on va

être amené à procéder à une succession d'échantillonnages espacés dans le temps. Une mauvaise solution est de choisir de se placer toujours sur le même site, sans tenir compte de la nature de la forme. Comme les formes se déplacent (les successions seuils-mouilles migrent lentement vers l'aval), des variations granulométriques d'une fois à l'autre peuvent être liées au changement de formes (variabilité interformes) et non à un changement de la granulométrie du lit ;

- dans le cas d'un abaissement du chenal et de la mise en place d'un pavage, la granulométrie du lit fluvial peut varier dans le temps assez rapidement (quelques années à quelques décennies).

■ OÙ FAIRE DES ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES ?

 D'une manière générale, il convient de toujours rattacher une analyse granulométrique à la géomorphologie, et en particulier à une forme spécifique (par exemple, le seuil, la tête de banc, la queue de banc...). Cela signifie qu'on privilégiera la forme géomorphologique au site de mesure.

Ensuite, le choix de la nature de la forme dépend des objectifs recherchés :

- si on souhaite définir la résistance potentielle du lit à l'abaissement, on prendra soin de mesurer la granulométrie de surface des formes de résistance (seuils, têtes de bancs) ;
- si on souhaite avoir une idée du degré de pavage du lit, on comparera la granulométrie du lit en surface et en sub-surface. Là encore, il n'est pas inutile de procéder à des études comparatives sur plusieurs types de formes ;
- si dans le cas d'un lit pavé, on cherche à établir quelle est la gamme granulométrique qui transite encore régulièrement, on ira se placer sur des bancs identifiés comme actifs.

Il est possible de faire des analyses granulométriques dans des coupes localisées dans les berges érodées du cours d'eau. Cependant, cela requiert la compétence d'un spécialiste en géomorphologie, puisqu'il est nécessaire d'être capable d'identifier une forme d'après sa vue en coupe. Ce type d'analyse peut présenter l'intérêt de permettre l'identification de la granulométrie des transports solides d'un cours d'eau avant une phase de pavage consécutive à un abaissement du lit, par exemple.

D'une manière générale, on a tout à gagner, même si on échantillonne sur une forme spécifique, à multiplier les analyses (par exemple trois seuils successifs), afin de vérifier la cohérence des résultats de mesure.

■ COMMENT MESURER LA GRANULOMÉTRIE D'UN SUBSTRAT ALLUVIAL ?

Il existe deux grandes familles de techniques granulométriques. La granulométrie par pesée et la granulométrie dimensionnelle. Comme on le trouve dans la bibliographie spécialisée, des passerelles ont été établies entre les deux méthodes, à des fins de comparaison.

⚠ Sauf en cas d'études de détail, des mesures par pesée après tamisage d'un échantillon prélevé dans la masse des alluvions ne sont pas nécessaires, notamment sur les rivières à galets et à blocs où le volume d'échantillonnage nécessaire rend une telle mesure très onéreuse.

Granulométrie par pesée

Très courante sur les dépôts de sables, elle est particulièrement difficile à mettre en œuvre sur les lits à charge grossière, en raison de la masse à prélever (plusieurs centaines de kilogrammes), puis de la nécessité de transporter cette masse à des fins de tamisage. Elle est donc inadaptée à un suivi fréquent et sur des sites multiples de la granulométrie. Les extracteurs de gravier, lorsqu'ils extraient encore dans le chenal (ce qui devient rare et devrait disparaître dans le futur) peuvent fournir des courbes granulométriques « moyennes ». Le problème est que l'on n'est pas capable d'identifier à quelle forme celles-ci correspondent (ni à quelle époque, les souilles d'extraction profondes extrayant dans des matériaux « hérités »). Cette technique est réservée à la collecte d'un échantillon représentatif de la **subsurface** ou de l'**ensemble de l'alluvium** (surface et subsurface confondues).

Granulométrie dimensionnelle

Il s'agit de faire la mesure d'un échantillon de cent individus (galets). Sur le terrain, on mesure pour chaque élément l'axe de la plus grande largeur (par opposition à la longueur -plus grande dimension- et à l'épaisseur -plus petite dimension-), celle qui correspondrait à la maille d'un tamis que l'élément ne parviendrait pas à franchir. Les particules inférieures à 8 mm sont exclues de l'échantillon.

La technique d'échantillonnage dépend du contexte et de la rivière étudiée :

- une première technique consiste à construire une grille de 1 m² autour d'un bâti rigide et d'établir à l'aide de ficelles un quadrillage équidistant de dix centimètres. Les cailloux à mesurer sont prélevés à chaque nœud de la grille d'échantillonnage. Lorsqu'un élément est sous deux nœuds, on le compte deux fois ;

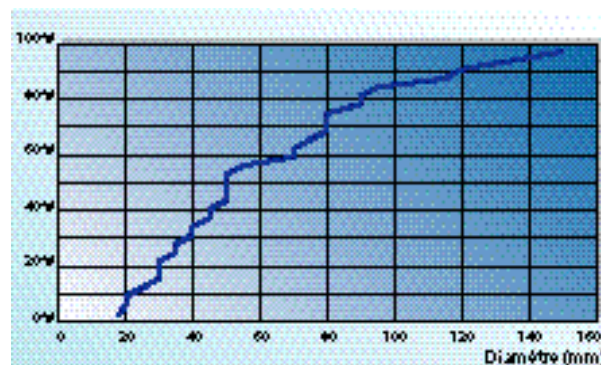
La technique granulométrique de la grille a également donné lieu au développement de méthodes photographiques, la mesure des individus étant alors faite sur photo et non plus sur le terrain. Notons cependant que ce qui apparaît sur photographie est la plus grande largeur apparente de l'élément et non sa plus grande largeur réelle ; des coefficients de correction permettant le passage de l'une à l'autre existent dans la littérature spécialisée. Cette méthode photographique est inadaptée lorsque le recouvrement des éléments est fort (en cas de tuilage par exemple). La technique de la grille fonctionne très bien lorsque la taille maximale des éléments ne dépasse pas 10 cm. Dans le cas contraire (rivières de montagne ou de piedmont), elle révèle très vite ses limites.

- une deuxième technique consiste à tendre un décimètre sur la zone à échantillonner. Cette méthode, très rapide et maniable, est adaptée aux rivières à graviers, galets et blocs. On prélève l'élément situé à la verticale du décimètre tous les 10 ou 20 cm (dans ce dernier cas, on effectuera un deuxième passage pour compléter l'échantillon). Cette technique est également particulièrement adaptée dans le cas d'un échantillonnage dans des coupes stratigraphiques.

Ces techniques sont généralement réservées à l'analyse granulométrique de la **surface** des lits alluviaux.

Le problème est ensuite l'interprétation de cette granulométrie pour des calculs de transport solide : la granulométrie de surface est différente de la granulométrie dans la masse (voir plus loin, problème du début d'entraînement).

En conclusion, il est difficile de déterminer sur un cours d'eau une granulométrie unique de référence ; on devra le plus



Courbe granulométrique.

Les diamètres mesurés sont classés par ordre croissant et reportés sur un graphique comportant en abscisse la taille des matériaux en millimètres (sur une échelle linéaire ou logarithmique) et en ordonnée la fréquence de non-dépassement. La courbe devra être ensuite lissée. Les diamètres caractéristiques se lisent immédiatement. Le diamètre moyen est simplement la moyenne des diamètres mesurés.



souvent se contenter d'une gamme granulométrique qui sera un élément de réflexion à prendre en compte dans les calculs de transport solide.

5.3 L'ANALYSE DES PROFILS EN LONG

- **Choix du profil en long et sources**

Les profils du fond du lit, rares, sont de toute façon difficilement exploitables, car ils sont très sensibles aux déplacements des formes du lit (surcreusements dans les coudes, successions seuil - mouille...).

Les profils de ligne d'eau ont le mérite de lisser les anomalies locales.

Les profils d'étiage sont les plus employés, car leur levé est aisé et directement exploitable. Les différences de débit d'une année sur l'autre altèrent peu la validité de leur comparaison (si la mesure a bien été faite en basses eaux). Cette donnée est en général amplement suffisante sur les rivières à pente moyenne ou forte (au-dessus de 4 ‰ environ).

Sur les pentes plus faibles, l'analyse des profils d'étiage est plus délicate : l'alternance seuil/mouille peut rendre les comparaisons peu précises et gêner l'analyse des pentes.

En effet, les mouilles présentent à l'étiage des pentes faibles, tandis que les seuils correspondent à des pentes plus fortes. Mais en crue, la situation s'inverse souvent : dans les mouilles, où le lit est plus étroit, la pente de l'écoulement en crue s'accroît, tandis qu'elle diminue sur les seuils plus larges.

C'est pourquoi l'étude de **lignes d'eau en hautes eaux ou en crue non débordante** est précieuse sur les rivières de plaine. L'analyse d'un profil mesuré ou calculé pour le débit morphogène est la plus pertinente pour comprendre la structure des pentes.

- **Sources pour l'état ancien du lit**

Pour la comparaison du profil en long de l'état actuel et de profils antérieurs, le plus intéressant est souvent le profil dit des Forces Hydrauliques, disponible à l'IGN sur commande, et établi sur la quasi-totalité des cours d'eau français entre 1900 et 1950 (voir exemple pages 16-17).

Certains cours d'eau disposent en outre de plans anciens de grande qualité.

Les plans d'origine d'ouvrages (ponts, notamment) peuvent apporter des informations locales précieuses.

- **Précautions d'emploi :**

Débit de la ligne d'eau

Le profil en long des Forces hydrauliques a été quelquefois levé à débit variable, ce qui nécessite, surtout pour les rivières de plaine une correction de hauteur fondée sur la connaissance du régime de la rivière ou, à défaut, de rivières voisines à la date du levé.

Cette remarque vaut également pour tous les autres profils disponibles.

Abscisses de repérage

Choisir un repérage qui suive l'axe général du lit et non toutes les sinuosités (notamment sur les lits en tresse), mais respecte les méandres stables.

Attention aux abscisses des profils en long des Forces hydrauliques, relevées sur les cartes à 1/50 000 et donc très imprécises : se recaler par rapport aux ouvrages, aux confluent et aux limites communales.

Dans les rivières à lit en tresse, il peut être judicieux de définir les coordonnées Lambert des points kilométriques une fois pour toutes, ce qui évitera des erreurs dans les comparaisons futures.

Attention à prendre en compte la précision des comparaisons : changements de tracé en plan, incertitude sur la position exacte de certains points.

Systèmes de nivellement

Attention aux repères NGF : l'écart entre NGF Orthométrique et NGF Normal (IGN 69) atteint près d'un mètre dans le Nord. Les profils des Forces hydrauliques, et ceux levés jusque parfois dans les années quatre-vingts, sont en NGF Orthométrique. Les levés récents sont normalement en NGF Normal. Les profils très anciens peuvent tenir d'un nivellement différent (système Bourdaloue, par exemple).

Morphologie du lit

Sur les lits de torrent et les lits en tresse, les dénivelées entre bras peuvent dépasser le mètre...

La formation de mouilles importantes, notamment le long de digues, peuvent favoriser un abaissement de la ligne d'eau d'étiage. Mais, en compensation, les bancs s'exhaussent, le lit se rétrécit, et les hautes eaux peuvent être anormalement hautes.

- **Interprétation**

Se méfier des comparaisons trop locales, peu significatives. La comparaison doit d'abord porter sur la structure des pentes, obtenue en lissant les anomalies locales. On peut

retenir la longueur d'onde des méandres comme échelle de lissage des profils.

À l'expérience, sauf données très particulières ou points de repères incontestables, les évolutions inférieures à la dénivellée du lit sur 100 m (1 m à 1 % de pente) ne sont guère significatives.

De toute façon, les évolutions significatives doivent pouvoir être étayées par des indices morphologiques observés sur le terrain.

• Compléments

La comparaison peut également être effectuée sur des profils en travers : on peut croiser alors évolution du lit en plan et en altitude.

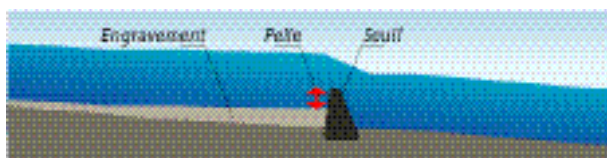
Cependant, le calcul d'un fond moyen pour quantifier l'évolution en altitude est souvent délicat, surtout lorsque la largeur active du lit a changé.

Très instructive est également l'analyse des courbes de tarage disponibles, en se méfiant des paramètres techniques (changements d'échelles, changement de système NGF).

• La loi d'alignement des charges (loi de pelle)

Sur un cours d'eau non torrentiel, on observe fréquemment des seuils qui ne sont pas engravés jusqu'à la crête, alors même que le lit est en équilibre et que le transit des matériaux charriés est assuré. La différence entre le niveau du lit et le niveau du seuil s'appelle la **pelle**.

On montre que le niveau du lit s'ajuste de façon que la ligne de charge en régime uniforme dans le lit (régime normal loin du seuil) s'aligne sur la charge hydraulique sur le seuil.



Cette loi peut s'exprimer plus généralement comme suit :

⚠ « Au droit d'une singularité, l'exhaussement du lit est, en première approximation, de l'ordre de la perte de charge (pour simplifier encore, de l'ordre de la dénivellée de la ligne d'eau) engendrée par cette singularité ».

Cette loi simple permet de bien sentir certains phénomènes :

- l'effet d'un seuil sur le niveau du lit dépend donc non pas du calage de sa crête, mais de son influence sur les lignes d'eau pour les débits les plus efficaces d'un point de vue morphologique (c'est-à-dire le plus souvent les hautes eaux,

jusqu'à la crue annuelle) : un seuil noyé en crue n'a guère d'incidence sur le niveau du lit... ;

- un pont ou un rétrécissement du lit vont favoriser des dépôts en crue à leur amont, lorsqu'ils créent une perte de charge, mais pas à l'étiage : ils occasionnent donc une « respiration » du lit. Noter cependant que le lit aura aussi tendance à se surcreuser dans le rétrécissement, atténuant ainsi le phénomène en amont.

Débit [m³/s]	50	100	200	500	1000
Fond du lit					
à l'aval du seuil [NGF]	98	98	98	98	98
Hauteur de charge en régime uniforme [m]	0,80	1,23	1,88	3,30	5,09
Niveau de charge à l'aval du seuil [NGF]	98,80	99,23	99,88	101,30	103,09
Niveau de charge à l'amont du seuil [NGF]	100,44	100,70	101,11	102,05	103,36
Niveau de stabilisation du fond à l'amont du seuil [NGF]	99,66	99,47	99,23	98,75	98,27
Dénivelée du lit [m]	1,64	1,47	1,23	0,75	0,27
Hauteur de pelle [m]	0,36	0,53	0,77	1,25	1,73

Exemple : lit de 100 m de largeur, 1 % de pente, seuil de 2 m de hauteur (crête à la cote 100 NGF).

Le seuil est noyé à partir de 1 000 m³/s, et ne provoque plus de perte de charge importante : son rôle morphologique s'estompe alors.

Si le débit dominant est voisin de 500 m³/s, le lit à l'amont du seuil se stabilise à 0,75 m au-dessus du lit aval. On voit que l'effet du seuil sur le profil en long est très différent de sa hauteur physique.

Il n'y a que sur les cours d'eau où le régime uniforme est proche du régime critique (autour de 1 % de pente) que le phénomène de pelle disparaît.

5.4 LES CALCULS DE CAPACITÉ DE TRANSPORT

■ CHAMP DES FORMULES DE TRANSPORT

⚠ Les formules de transport solide ne s'appliquent qu'au mouvement des matériaux constituant le fond du lit d'un cours d'eau.

Les matériaux constituant le fond du lit peuvent être transportés :

- par **charriage sur le fond** : il en est toujours ainsi pour les matériaux les plus gros graviers et galets, quelles que soient la pente et le débit ;
- à la fois par charriage de fond et en suspension pour les



sables, la limite étant fonction du critère de Schmidt Rouse, défini ci après : dans ce cas, on parle de **transport solide total**.



Lorsque les matériaux, argiles, limons, sables fins, sont transportés en suspension, mais sont différents des matériaux constituant le fond, nous les appellerons matériaux de lessivage (washload). La concentration de ces matériaux est alors indéterminée : elle ne dépend pas du débit liquide. On peut la mesurer par prélèvements d'eau, mais non la calculer. Ce type de transport n'est donc pas concerné par ce qui suit.

Nous soulignons fortement cette distinction, car la confusion entre transport solide total et transport en suspension par lessivage est très fréquente, notamment dans l'étude des rivières de plaine.

Nous décrivons en premier lieu le calcul de transport solide par charriage qui est en France métropolitaine le cas le plus général, mais en deuxième lieu le transport solide total avec une expression simplifiée de la formule d'Engelund Hansen, qui ne s'applique qu'aux rivières à sable peu nombreuses en France.

Les formules de transport solide sont le plus souvent utilisées pour établir le bilan de transport d'un cours d'eau. Dans ce cas, on appliquera la formule à la courbe des débits classés. Sur les torrents, le bilan de transport est en général peu significatif. En revanche l'estimation de l'apport d'une crue est indispensable à l'étude de la gestion des sédiments sur les cônes de déjection.

Elles seront également utilisées dans les modèles numériques de transport : ces modèles servent à déterminer la vitesse de l'évolution des lits sous l'effet des aménagements de toutes sortes.

■ PRINCIPES GÉNÉRAUX



L'application sans précautions des formules de transport solide disponibles dans la littérature s'avère souvent décevante, car la complexité apparente des formules ne permet pas d'apprécier la sensibilité des résultats au choix des hypothèses.

En particulier les bilans sédimentaires annuels et les modèles d'évolution sont très sensibles au débit de début d'entraînement. Paradoxalement, le calcul des crues présente moins d'aléa, car les débits liquides sont très supérieurs au débit de début d'entraînement.

C'est pourquoi nous conseillons de respecter les principes suivants :

- mettre en œuvre des formules simples pour commencer, quitte à revenir aux formules complètes ultérieurement pour affiner l'analyse ;
- traiter des sections simples, relativement régulières, dans lesquelles l'influence de la végétation soit négligeable ;
- analyser la sensibilité à l'incertitude des paramètres, principalement le diamètre du matériau et le coefficient de rugosité, et renoncer à afficher des résultats lorsque la sensibilité est trop forte, notamment pour les bilans annuels.

■ CHOIX DU TRONÇON POUR DÉBUTER L'ANALYSE

Dans un premier temps, il s'agit de sélectionner un tronçon où il y a a priori équilibre entre débits liquides, apports solides, granulométrie et pente. Cela exclut donc les zones de gorge, les affleurements rocheux et les lits fixés par des blocs provenant des versants.

On évitera les zones perturbées (extractions, barrages) et les zones excessivement contraintes en largeur :

- **sur les rivières torrentielles**, choisir un tronçon librement divaguant assez long pour que le calcul de la pente soit valide. Il doit être possible alors d'effectuer sur le terrain des mesures de granulométrie pertinentes ;
- **sur les rivières à lit simple**, choisir un tronçon de section et de pente régulières

■ SEUIL DE DÉBUT DE MOUVEMENT

En théorie le début d'entraînement est obtenu lorsque le « frottement adimensionnel » atteint la valeur critique :

$$\tau_c = \frac{h i}{(s-1)d} = A$$

i = pente
 h = hauteur d'eau
 s = densité des matériaux (= 2,65)
 d = diamètre caractéristique
 A = 0,047 (Meyer-Peter)

En pratique, la hauteur d'eau nécessaire pour entraîner un matériau donné s'exprime par :

$$h = 0,1 \frac{d}{i}$$

i = pente
 h = hauteur d'eau (m)
 d = diamètre caractéristique du matériau (m)

La connaissance de la hauteur de début d'entraînement permet en principe de déterminer facilement le débit de début d'entraînement.

Mais nous trouverons là une difficulté essentielle.

La valeur du seuil d'entraînement dépend directement de la granulométrie. Or la granulométrie à prendre en compte est difficile à apprécier sur le terrain.

Il y a deux raisons à cela :

- toutes les formules de transport ont été établies en laboratoire. Les expérimentations se sont peu attardées sur les conditions du transport près du début d'entraînement : ce début d'entraînement est souvent le point origine d'une courbe lissée, plus que le résultat d'une analyse fouillée du phénomène ;
- les essais en laboratoire ont le plus souvent été effectués avec des matériaux de granulométrie étroite. Or les sédiments charriés dans la nature se caractérisent par une granulométrie étendue et on sait aujourd'hui que, dans ce cas, la granulométrie du matériau transporté diffère de la granulométrie du matériau en place. Ces deux granulométries sont très proches pour les forts charriages, mais elles peuvent différer près du début d'entraînement : les fines sont alors entraînés plus facilement que les gros. La composition des matériaux du lit mineur est alors plus grossière que celle des bancs avoisinants et le seuil de mise en mouvement est plus élevé que celui qui serait déduit d'un prélèvement en masse. Or une erreur dans l'appréciation du débit de début d'entraînement peut modifier énormément les bilans sédimentaires, car les débits les plus proches du début d'entraînement sont aussi les plus fréquents.

• Choix du diamètre caractéristique

Lorsque la granulométrie des matériaux constituant le lit est étendue, on pourra rencontrer toutes les situations entre les deux extrêmes suivants :

- le lit est très mobile (type lit en tresse), les bancs sont fréquemment repris : les phénomènes de pavage restent peu importants. Le diamètre caractéristique est le diamètre moyen des alluvions dans la masse. Lors des mesures de granulométrie en surface, on rencontre en général un type de matériau présentant ces caractéristiques en bord de lit ordinaire sur les extrados érodés ;
- le lit est peu mobile, de forme simple : les phénomènes de pavage prennent de l'ampleur. Il faudra alors considérer deux diamètres : le diamètre caractéristique du début d'entraînement sera choisi en mesurant les matériaux grossiers qui pavent le fond du lit. Ce diamètre se rapproche du d90 des alluvions dans la masse. Le diamètre pris en compte dans la formule de transport sera le diamètre moyen des matériaux en masse mesuré sur les bancs.

Nous verrons après présentation des formules de transport comment tenir compte de ces deux diamètres à la fois.

Le choix de la granulométrie caractéristique reste de toute façon délicat et source de beaucoup d'incertitudes.

Il est donc fondamental de pouvoir croiser les résultats obtenus avec d'autres éléments de calage.

Il arrive même souvent que l'on soit conduit à procéder en sens inverse : on recherche la valeur de diamètre qui permet de retrouver des ordres de grandeur de débit de début d'entraînement ou de volumes charriés présumés mieux connus, et on vérifie que ce diamètre est compatible avec les alluvions observées sur place.

Un premier moyen de contrôle est d'estimer la fréquence du débit de début d'entraînement obtenu par calcul (fréquence lue sur une courbe de débits classés, telle qu'on peut en obtenir sur la banque de données HYDRO). Le simple bon sens peut permettre de corriger des aberrations : empiriquement, on pressent que sur une rivière

torrentielle de montagne à lit en tresse, une fréquence de 150 jours par an serait peu réaliste, de même qu'une fréquence d'un jour tous les dix ans. Or l'application sans précaution des formules peut conduire à de telles valeurs.

On peut proposer les ordres de grandeur suivant, à défaut de recherches approfondies sur cet aspect :

- rivières torrentielles à régime nival : charriage de 10 à 30 jours par an ;
- rivières torrentielles en régime méditerranéen : charriage de 1 à 10 jours par an ;
- on peut dépasser les 100 jours par an sur les cours d'eau de rang supérieur (ex : Durance naturelle) ;
- au contraire, sur beaucoup de torrents, le transport solide n'a lieu que rarement, mais devient alors intense. La notion de courbe de débits classés n'a d'ailleurs plus guère de sens.



■ FORMULES GLOBALES

Ces formules expriment le transport solide principalement en fonction de la pente, du débit liquide et du diamètre caractéristique des matériaux et en second lieu de la densité du matériau et de l'étendue de la courbe granulométrique.

Notations

Q_s : transport solide en volume apparent (m^3/s)
 dQ_s : transport solide sur un élément de section de largeur dB
 Q : débit liquide (m^3/s)
 Q_0 : débit liquide de début d'entraînement (m^3/s)
 q_s : transport solide par unité de largeur ($m^3/s/m$)
 q : débit liquide par unité de largeur ($m^3/s/m$)
 i : pente
 B : largeur (m)
 h : hauteur d'eau (m)
 h_0 : hauteur d'eau de début d'entraînement (m)
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
 ks : coefficient de rugosité du lit
 $\mu = ks/kr$: rapport de la rugosité totale du lit à la rugosité des grains
 s : rapport de la densité des matériaux à la densité du fluide porteur (en général, fluide porteur = eau, densité = 1)
 la formule de Rickenmann permet seule de prendre en compte la densité du fluide chargé d'argiles.

Toutes les formules sont exprimées en volume apparent, c'est à dire le volume qu'occupe le matériau au repos (y compris les vides entre les particules) : il n'y a donc aucun coefficient à appliquer pour en déduire la variation de volume du stock alluvial.

• Torrent à forte pente : formule de Meunier

$$\frac{Q_s}{Q} = 8,2 i^2$$

Q_s = Transport solide en volume apparent
 Q = débit liquide
 i = pente

Domaine d'application.

Torrents de pente supérieure à 5% et exclusivement pour les très fortes crues.

• Rivières torrentielles ou de piémont : formule Sogreah - Lefort (1991)

$$\frac{Q_0}{\sqrt{gd_m^3}} = 0,0776(s-1)^{0,75} i^{1,5} (1-1,2i)^{0,3}$$

$$\frac{Q_s}{Q} = 4,45 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} \frac{i^{1,5}}{s-1} \left[1 - \left(\frac{Q_0}{Q} \right)^{0,375} \right]$$

soit, avec $s = 2,65$

$$Q_0 = 0,92 d_m^{5/2} i^{1,5} (1-1,2i)^{0,3}$$

$$\frac{Q_s}{Q} = 2,7 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} i^{1,5} \left[1 - \left(\frac{Q_0}{Q} \right)^{0,375} \right]$$

Domaine d'application

20 % > pente > 0,2 %

Lits naturels avec bancs de gravier ou peu rétrécis.

Diamètre > 1 mm

$Q/Q_0 < 25$

Cette formule a été établie à partir de la formule de Smart et Jaeggi. Elle repose sur des réflexions basées sur une hypothèse de rapport hauteur / largeur constant, mais s'applique en fait à tous les cours d'eau dont la géométrie varie librement et rapidement en période de crue (notamment, lits torrentiels rectilignes divaguants et lits en tresse).

Exemple numérique :

$i = 5 \%$, $d_m = 59 \text{ mm}$, $d_{90}/d_{30} = 5$

$Q_0 = 74 \text{ m}^3/s$

$Q = 516 \text{ m}^3/s \rightarrow Q_s/Q = 0,68 \%$, $Q_s = 0,35 \text{ m}^3/s = 30\,263 \text{ m}^3/\text{jour}$

• Lit à chenal simple : formule de Meyer-Peter

Sur les cours d'eau de plaine, la largeur varie peu avec le débit (du moins en ne prenant en compte que le débit s'écoulant dans le lit principal, à l'exclusion du débit débordant). Si, très grossièrement, on considère une section d'écoulement rectangulaire, la formule de Meyer-Peter s'exprime, en négligeant l'effet des parois (Lefort 1995) :

$$\frac{Q_0}{\sqrt{gd_m^3}} = 0,0948 B \mu^{3/2} i^{3/6}$$

$$\frac{Q_s}{Q} = 1,278 i^{3/6} \mu^{3/2} \left[1 - \left(\frac{Q_0}{Q} \right)^{3/8} \right]$$

soit avec $\mu = 0,8$

$$Q_0 = 0,42 B i^{3/6} d_m^{5/2}$$

$$\frac{Q_s}{Q} = 0,91 i^{3/6} \left[1 - \left(\frac{Q_0}{Q} \right)^{3/8} \right]$$

Domaine d'application

Diamètre > 0,6 mm

Rapport $Q/Q_0 < 10$ (frottement adimensionnel < 0,2)

Pente $i < 2,5\%$

Cette présentation de la célèbre formule est à réserver aux études de sensibilité ou de première approche, la vérification expérimentale n'ayant pas été faite.

Exemple numérique :

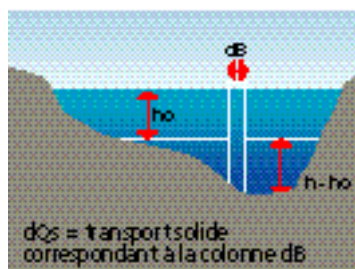
$i = 2\%$, $d_m = 50$ mm, largeur = 50 m

$Q_0 = 330$ m³/s

$Q = 1\,000$ m³/s $\rightarrow Q_s/Q = 0,22\%$, $Q_s = 0,22$ m³/s = 18 955 m³/jour

• Comparaison des formules globales de transport solide loin du début d'entraînement

Pour une même valeur du débit de début d'entraînement, le tableau ci-après montre que les formules citées ci-dessus donnent des résultats assez proches aux limites de leur domaines respectifs d'application (dans un rapport inférieur à 1 pour 2, ce qui en matière de transport solide est déjà bien).



$$h_0 = \frac{7,5 d_m^{3/4}}{i k_s^{3/2}}$$

$$dQ_s = \beta (h - h_0)^{3/2} dB$$

$$\beta = 0,02 k_s^{2,25} d_m^{3/8} i^{3/2}$$

Concentration en volume Q_s/Q [%]			
Pente [%]	Meyer-Peter (section rectangulaire de largeur constante) $Q/Q_0 = 10$	Sogreah-Lefort $Q/Q_0 = 10$	Meunier
0,1	0,17		
0,2	0,37	0,21	
0,3	0,60	0,39	
0,4	0,84	0,60	
0,5	1,1	0,84	
0,6	1,3	1,1	
0,7	1,6	1,4	
0,8	1,9	1,7	
0,9	2,2	2,0	
1	2,4	2,4	
1,2	3,0	3,1	
1,5	3,9	4,4	
2	5,5	6,7	
3		12	
4		19	
5		27	21
7		44	40
10		75	82
12		96	118
15		134	185
20		206	328

■ FORMULES PAR UNITÉ DE LARGEUR :

• Calcul du charriage seul sur des sections quelconques (formule de Meyer-Peter)

Lorsqu'on veut réaliser un calcul de transport solide par charriage en tenant compte de la forme de détail de la section, la formule de Meyer Peter reste la plus efficace, pour les pentes inférieures à 25 ‰ et supérieures à 0,4 ‰.

Nous proposons une présentation de cette formule basée sur les variables élémentaires de l'écoulement (J-C. Carré, 1988) : calcul de la hauteur de début d'entraînement h_0 , puis calcul du débit solide élémentaire dQ_s par élément de largeur dB , puis intégration sur toute la largeur.

Domaine d'application

Diamètre > 0,6 mm

Rapport $Q/Q_0 < 25$ (frottement adimensionnel < 0,2)

Pente $0,4\text{ ‰} < i < 25\text{ ‰}$

Exemple numérique

$i = 1\%$, $d_m = 20$ mm, $k_s = 28$

$h_0 = 2,69$ m

$\beta = 0,000263$

en fonction de la hauteur d'eau, on aura les débits solides par unité de largeur suivants :

$h = 3,5$ m $\rightarrow q_s = 17$ m³/j/m

$h = 5$ m $\rightarrow q_s = 80$ m³/j/m

• Calcul du charriage seul sur des sections quelconques en domaine torrentiel (formule de Rickenmann)

En domaine torrentiel, la formule de Rickenmann (1990) est fréquemment utilisée. Donnant un débit solide par unité de largeur, elle permet des calculs prenant en compte la largeur du lit, mais elle devient délicate d'emploi sur les tronçons à largeur variable dans le temps et dans l'espace.



$$\frac{q_o}{\sqrt{gd_{50}^3}} = 0,065 (s-1)^{5/3} i^{1,12}$$

$$\frac{q_s}{q} = \frac{12,6}{(s-1)^{1,5}} \left(\frac{d_{50}}{d_{30}}\right)^{0,2} i^2 \left(1 - \frac{q_o}{q}\right)$$

Domaine d'application

$5\% < i < 20\%$

$h/d_{90} < 20$

Comparaison avec la formule de Meunier

Avec des paramètres moyens ($s = 1,65$, $d_{90}/d_{30} = 7$), loin du début d'entraînement ($q_o/q \rightarrow 0$), on trouve :

$q_s/q = 8,3 i^2$

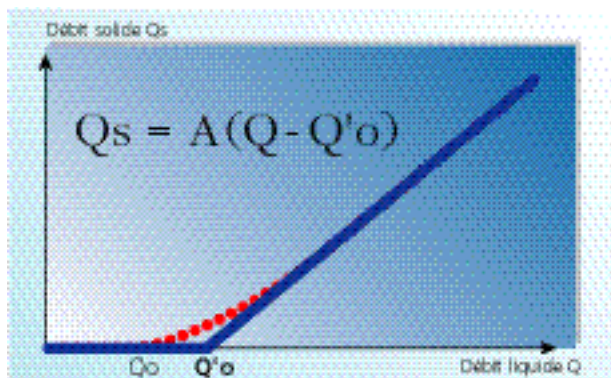
On retrouve la formule de Meunier.

■ APPROXIMATION PAR UNE FORMULE LINÉAIRE

On observe que les formules de charriage conduisent à des relations débit solide / débit liquide assez linéaires, à l'exception d'une courbure à la base. Cette courbe, calculée avec le diamètre des alluvions prises dans la masse, représente bien le transport solide aux forts débits.

En revanche, on a vu que le débit de début d'entraînement calculé avec ce diamètre moyen est souvent sous-estimé, en raison d'un pavage du lit.

Le débit de début d'entraînement corrigé, calculé sur les matériaux plus grossiers qui forment le fond du lit, peut souvent être aisément raccordé linéairement à la courbe débit solide/débit liquide calculée avec le diamètre moyen des alluvions du lit.

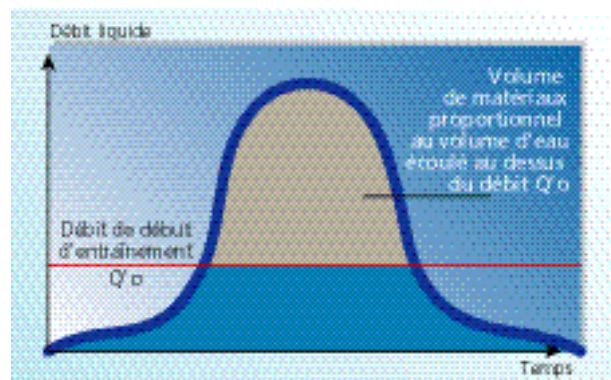


On a : $Q_s = A (Q - Q'o)$

L'établissement de cette formule linéaire reposera :

- sur le débit de début d'entraînement corrigé ($Q'o$), calculé en fonction des matériaux du fond du lit (souvent proche du d_{90} des alluvions dans la masse) ;
- sur un couple $Q_s(Q)$ calculé à fort débit à l'aide d'une des formules précédentes, ou lu sur le tableau de comparaison des formules présenté plus haut.

Dans le cas d'une relation linéaire, on montre que le volume solide charrié est proportionnel au volume d'eau écoulé au-dessus du débit de début d'entraînement, ce qui permet de sentir la variabilité inter-annuelle des apports, l'incidence des dériviages d'eau, etc.



■ CALCUL DU TRANSPORT SOLIDE TOTAL EN SECTION QUELCONQUE (formule d'Engelund-Hansen)

Le domaine des sables couvert par les formules du transport solide total telles que la formule d'Engelund-Hansen est complexe.

D'une part, on observe conformément à la définition donnée qu'une partie du matériau peut être transportée en suspension dans la veine liquide, avec une concentration décroissante lorsque l'on s'éloigne du fond.

D'autre part, le transport des sables conduit à un modèle de la surface du lit générant soit de petites ondulations appelées rides, soit des ondulations de grande amplitude appelées dunes ou anti-dunes.

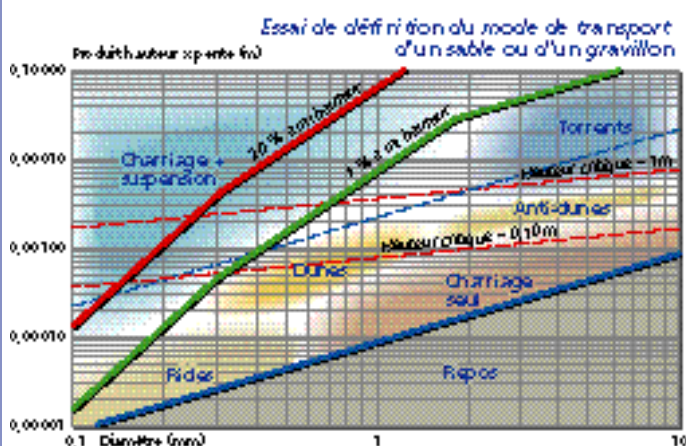
Nous essaierons ici de mieux cerner les limites du charriage et de la suspension à partir du critère de Schmidt-Rouse, puis nous citerons la formule d'Engelund-Hansen et son domaine d'application.

Critère de Schmidt-Rouse

On considérera que le charriage est accompagné d'un transport solide en suspension notable lorsque la grandeur Z appelée nombre de Schmidt-Rouse est supérieure à une valeur donnée.

$$Z = \frac{W}{0,4 \sqrt{ghi}}$$

W = vitesse de chute du matériau dans l'eau
 h = hauteur d'eau (m)
 i = pente
 g = accélération de la pesanteur (9,81 m/s²)



Schmidt et Rouse et les expériences de Vanoni ont montré que le rapport de la concentration en suspension en un point quelconque de la veine liquide à la concentration au fond était fonction du nombre de Schmidt Rouse et de la hauteur dans la veine liquide. Nous avons calculé (1) les valeurs du produit hi en fonction du diamètre, pour lesquelles ce rapport de concentration est à mi-hauteur de la veine liquide de 1 % ($Z = 1,5$) et de 20 % ($Z = 0,52$). La courbe de concentration à 20 % correspond à un transport en suspension très important.

La courbe de concentration à 1 % (de la concentration au fond) peut situer la limite du transport solide total (transport en suspension négligeable).

La courbe inférieure exprime la limite d'entraînement par charriage, suivant le critère exprimé au début du § 5.4.

Sur ce même graphique, nous avons tracé (en tirets) les droites correspondant de manière approximative au régime critique pour un écoulement uniforme de hauteurs : 0,1 m et 1,0 m. Au-dessus des droites, on est en régime torrentiel et au-dessous en régime fluvial.

En comparant ce graphique avec les résultats de la littérature, on peut situer les différents régimes d'écoulement liquide et d'entraînement des matériaux pour les sables et gravillons utilisés en laboratoire.

Le régime d'entraînement sera alors :

- le charriage seul avec rides pour $d < 0,6$ mm et les faibles valeurs du produit hi ;
- le charriage seul à lit plat pour $d > 0,6$ mm et les faibles valeurs de hi ;
- lorsque le produit hi augmente, on voit apparaître les dunes en régime fluvial et les anti-dunes en régime critique ;
- le transport solide avec charriage et suspension est observé au dessus de la courbe 1 % à mi hauteur.

(1) Les valeurs des constantes physiques sont :
température de l'eau = 12° C et densité du matériau = 2,65

Formule de Engelund-Hansen

L'adaptation que nous donnons de cette formule considère comme toutes les autres la concentration en volume apparent.

Le débit solide calculé est le débit solide de sable par unité de largeur exprimé en m³/s/m.

$$\frac{q_s}{q} = 0,023 i^{3/2} \frac{v}{\sqrt{gd}} \left(\frac{h}{d} \right)^{1/2}$$

$d = 450$: diamètre médian (m)
 v = vitesse moyenne

Domaine d'application

Rivières à sable pour les matériaux de 0,15 mm à 1,6 mm, soit la partie gauche du diagramme ci dessus, jusqu'à des valeurs très élevées du produit hi .

Elle recouvre le domaine du transport à fond plat, par dunes ou anti-dunes, et avec une fraction du matériau transporté en suspension.

Mais elle a été établie pour une granulométrie étroite : son application devient incertaine lorsque la granulométrie est étendue et comporte une proportion notable de fines.

Exemple numérique

$i = 0,5$ ‰, $d = 0,3$ mm, $q = 5$ m³/s/m, $h = 3,2$ m, $v = 1,56$ m/s
 $qs/q = 0,76$ ‰

5.5 LES BILANS VOLUMÉTRIQUES

■ VOLUMES CHARRIÉS LORS D'UNE CRUE

Lors des crues exceptionnelles, le débit de début d'entraînement est très largement dépassé, et les incertitudes qui pèsent dessus sont estompées. En outre, dans les tronçons librement divaguants, l'ensemble des matériaux disponibles a pu être mobilisé, après rupture de l'armure superficielle : on peut donc considérer le plus souvent que la capacité de transport a été saturée, à l'exception :

- des parties amont des bassins torrentiels, lorsque le lit est rocheux,
- des tronçons à l'aval immédiat de points d'interruption du transit (barrages, ...),
- des cours d'eau totalement endigués, sans zone de mobilisation possible des alluvions.



Hormis dans ces cas, les calculs de transport solide sont assez fiables.

On appliquera à l'hydrogramme de crue une des lois de transport proposées plus haut, en gardant toujours le souci de contrôler la pertinence du seuil de début d'entraînement.

On peut proposer une formule simplifiée pour évaluer rapidement l'ordre de grandeur des volumes charriés par une crue.

L'hydrogramme de crue est supposé triangulaire (temps de base t_b et débit de pointe Q_{max}).

La loi de transport est présumée linéaire, connue par le débit de début d'entraînement Q_0 et le débit solide correspondant au débit de pointe de la crue $Q_{smax} = Q_s(Q_{max})$.

On a alors :

$$\text{Volume charrié} = t_b/2 \times Q_{smax} \times (1 - Q_0/Q_{max})$$

Si la crue est très forte ($Q_{max} \gg Q_0$), on peut négliger la valeur de Q_0 :

$$\text{Volume charrié} = t_b/2 \times Q_{smax}$$

Exemple :

$$Q_{max} = 300 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{pente } i = 1 \text{ ‰}$$

$$t_b = 24 \text{ h} = 86\,400 \text{ s}$$

$$Q_{smax} = 300 \text{ m}^3/\text{s} \times 2,4 \text{ ‰ (cf. abaque plus haut)}$$

$$V_s \approx 30\,000 \text{ m}^3$$

Ces approches donnent plutôt des ordres de grandeur par excès, qui peuvent aider à relativiser les demandes de curage émises en urgence après une crue. On a pu montrer ainsi sur plusieurs cours d'eau que le volume des curages réalisés en urgence pour enlever les « dépôts » de la crue excédait sans aucun doute ce que la crue avait été capable de transporter (et a fortiori de déposer).

■ BILAN VOLUMÉTRIQUE GLOBAL

Sur un tronçon donné, il peut être intéressant d'effectuer un bilan volumétrique sur une période donnée qui s'exprime ainsi : volume vers aval = apports amont + variation du lit - prélèvements, où :

- volume vers aval = volume ayant quitté le tronçon,
- apports amont = apports solides en provenance du bassin versant,
- variation du lit = volume libéré par l'abaissement du lit (et/ou piégé par l'exhaussement),
- prélèvements = volumes extraits,

Ce type de bilan est plus particulièrement indiqué à l'amont d'une retenue où tout le transit a pu être piégé et ainsi mesuré.

En théorie, il est alors possible de cerner les apports naturels du tronçon, que l'on mettra en relation avec la capacité de transport calculée. Ce serait alors un moyen de calage des formules. Mais les difficultés sont nombreuses :

- il n'est pas aisé de faire toujours la part entre charriage et suspension, et surtout de s'assurer que le classement des sables est homogène entre les différents termes ;
- les volumes de dépôts mesurés dans les retenues comprennent des matériaux fins ;
- la relation entre volumes extraits autorisés et réels n'est pas toujours rigoureuse ;
- les extractions (et par voie de conséquence les volumes libérés par l'abaissement du lit) sont sur beaucoup de cours d'eau très supérieurs aux apports : ceux-ci sont alors de l'ordre de grandeur de la marge d'incertitude sur les volumes extraits.

Tronçon	Longueur [km]	Evolution du lit [m]	Apports [Mm ³]	Abaissement du lit [Mm ³]	Extraction [Mm ³]	Transport vers l'aval [Mm ³]	Etat de référence (apports = transport) [Mm ³]
Daluis - Pont de Gueydan	6	^a 0	3	0	0,2	2,8	3
Pont de Gueydan - Entrevaux	5	0 à -6	3,3	1,7	3	2	3,5
Entrevaux - Cians	15	0 à -3	2	2	0,5	3,5	3,5
Touët à Villard	5	-3	5,3	0,8	0,4	5,7	6
Villars à la Tinée	11	-2	5,7	0,8	1,5	5	6
Gorges de la Mescla	8	-4	7,5	1,2	0,8	7,9	8,5
Plaine du Var	23	Jusqu'à -9	11,9	36	47	<5 ?	12,5

Exemple de bilan volumétrique sur le Var (période de 40 ans) : plus que des valeurs absolues, très imprécises, un tel bilan apporte une vision relative des différents termes sur les tronçons successifs.

Il est rare en définitive que ces bilans apportent des éléments nouveaux : tout au plus peuvent-ils constituer un indice supplémentaire pour valider les ordres de grandeur de volumes charriés estimés par ailleurs.

■ VOLUMES D'APPORTS EN MOYENNE ANNUELLE

Sur le principe, ces volumes sont calculés par application d'une des formules sur la courbe des débits classés.

Nota : des courbes de débits classés sont disponibles dans la banque HYDRO. Elles peuvent aisément être extrapolées à d'autres points du bassin à proportion stricte des superficies de bassin-versant. Cependant, les données fournies par la banque de données sont peu détaillées pour les fréquences rares qui sont souvent importantes pour le transport solide : les fréquences de non dépassement fournies sont en règle générale 0,999 (1 fois tous les 3 ans), 0,99 (4 j/an), 0,98 (7 j/an), 0,95 (18 j/an), etc. Les débits morphogènes, dépassés environ 1 jour/an (fréquence de 0,997) sont donc mal cernés. Il est donc nécessaire soit d'interpoler des valeurs complémentaires, soit de revenir aux données brutes pour affiner la courbe dans cette gamme de débits.

Exemple de calcul sur une courbe de débits classés (le Var en amont de Nice, formule Sogreah/LEFORT)

L'évaluation du débit de début d'entraînement, et donc le diamètre moyen associé, ont été ajustés en fonction de la fréquence plausible de ce débit (de l'ordre de 40 à 50 jours par an).

<i>pente</i>	5 ‰
<i>diamètre moyen [m]</i>	0,059
<i>d90/d30</i>	5
<i>débit de début d'entraînement [m³/s]</i>	74

Remarque : les courbes de débits classés, basées sur les débits moyens journaliers, ne sont qu'une approximation des débits réels observés, variables au cours de la journée. En fait, l'erreur ainsi commise est le plus souvent négligeable devant toutes les autres sources d'incertitude.

En pratique, les évaluations du transport solide annuel moyen sont très délicates, car les débits les plus efficaces sont assez proches du début d'entraînement : les incertitudes sur ce terme se répercutent directement sur les évaluations.

Débit [m³/s]	Fréquence de non dépassement	Fréquence [j/an]	Débit moyen de la classe [m³/s]	Fréquence de la classe [j/an]	Débit solide [m³/s]	Volume charrié par classe [m³/an]
1 706	0,9999	0,04				
1 325	0,9998	0,07	1516	0,04	1,350	4 258
944	0,9995	0,18	1135	0,11	0,956	9 041
728	0,999	0,37	836	0,18	0,656	10343
557	0,998	0,73	642	0,37	0,469	14780
475	0,997	1,10	516	0,37	0,351	11065
387	0,995	1,83	431	0,73	0,274	17278
290	0,99	3,65	339	1,83	0,193	30491
214	0,98	7,30	252	3,65	0,122	38500
178	0,97	10,95	196	3,65	0,079	24800
138	0,95	18,25	158	7,30	0,051	32325
95	0,9	36,50	117	18,25	0,024	37747
61	0,8	73,00	78	36,50	0,002	6 052
45	0,7	109,50	53	36,50	0,000	0
35	0,6	146,00	40	36,50	0,000	0
						TOTAL : 236 678



La Durance à Mirabeau (11 700 km ² , pente : 2,8 ‰)			
Diamètre moyen [mm]	Débit de début d'entraînement (Q ₀) [m ³ /s]	Fréquence de Q ₀ [jours/an]	Volume annuel [m ³]
40	100	240	1 049 000
45	134		828 000
50	174		612 000
52	192	130	537 000
55	221		441 000
60	274		312 000
70	403	29	148 000

On observe sur cet exemple que des variations modérées du diamètre caractéristique retenu (on trouve facilement dans le lit de la Durance des bancs présentant des diamètres moyens allant de 40 à 70 mm) conduisent à une grande variabilité des volumes moyens annuels calculés. On note aussi que la réflexion en terme de fréquence du début d'entraînement peut aider à resserrer la fourchette.

On pourra valider aussi les estimations d'apports annuels par comparaison avec quelques ordres de grandeur régionaux :

Région	Rivière	Volumes annuels par charriage [m ³ /km ² /an]	Volumes annuels totaux (charriage+suspension) [m ³ /km ² /an]
Ardennes	bassins forestiers	0,25	
Bassin parisien	Seine		10 à 25
Massif central			20 à 50
	Loire à Villerest	2 à 5	
	Petite Rhue		50
Cevennes			
	Ardèche	15 à 40	
Alpes du Sud		25 à 60	100 à 300
	Drôme	30	
	Aygues	25 à 30	
	Bassin de la Durance	30 à 60	200 à 300
Alpes du Nord			200 à 800
	Arve	100	500 à 800
	Romanche		250 à 300
	Vénéon	90 à 150	
	Drac amont	100 à 200	600 à 800
	Fier		200 à 300
	Rhône suisse	250	900
Pyrénées	Gave d'Aspe		70

Ces évaluations ont de l'intérêt non pas vraiment dans l'absolu (les incertitudes sont trop grandes), mais en relatif, pour quantifier l'impact d'une perturbation.

■ APPLICATION À LA STRUCTURE DES PENTES

Ces calculs de volume peuvent aider à analyser les ruptures de pente à une confluence. On calculera le transit moyen en amont et en aval de la confluence, en fonction des apports liquides de l'affluent et des pentes observées de part et d'autre. On en déduira les apports solides théoriques de l'affluent, que l'on confrontera à des évaluations faites directement sur l'affluent.

	Surface du bassin [km ²]	Pente [‰]	Diamètre moyen [mm]	Q ₀ [m ³ /s]	Fréquence de Q ₀ [j/an]	Volume charrié [m ³ /an]
A1	1 000	6	60	52	15	49000
A2	1 400	6	60	52	29	106000
A3	1 400	5,45	60	64	20	69000
B1	1 000	6	70	77	7	28000
B2	1 400	6	70	77	14	62000
B3	1 400	5,45	70	94	10	39000
C1	1 000	6	50	33	40	89000
C2	1 400	6	50	33	66	180000
C3	1 400	5,5	50	40	51	125000

Exemple numérique théorique à un confluent.

Les calculs sont basés sur la courbe de débits classés du Var présentée plus haut (superficie du bassin : 1 800 km²) corrigée à proportion du bassin-versant. À l'amont du confluent, on a une pente de 6 ‰. Avec un diamètre de 60 mm, on aura un transit annuel moyen de 49 000 m³ (cas A1).

Si à l'aval du confluent (avec un accroissement du bassin versant de 40 ‰), on avait les mêmes paramètres de pente et de granulométrie, le débit de début d'entraînement serait inchangé malgré l'accroissement des débits liquides. Le transit annuel serait alors plus que doublé (cas A2). Une continuité de la pente entre l'amont et l'aval du confluent traduira donc des apports solides importants de l'affluent.

Pour que le transport solide augmente à proportion de la superficie du bassin (l'affluent est alors supposé présenté des caractéristiques biogéographiques semblables à celles du bassin principal), il faut que la pente aval s'abaisse à 5,45 ‰ (cas A3). On trouve là une des causes de la décroissance des pentes des cours d'eau de l'amont vers l'aval. On notera que la fréquence du charriage augmente un peu avec la taille du bassin.

Les cas B et C montrent la même démarche avec d'autres valeurs de diamètre moyen, et donc des volumes annuels sensiblement différents. Les conclusions sont similaires.

Cet exemple montre ainsi que même si les évaluations des volumes dans l'absolu sont incertaines, les calculs de transport solide restent pertinents pour une analyse en valeurs relatives.

Bien évidemment, toutes ces analyses devront intégrer d'éventuelles variations de la granulométrie des alluvions au confluent, en fonction de la nature des apports de l'affluent.

■ INFLUENCE D'UNE PERTURBATION

Les calculs de transport solide auront permis d'établir dans une situation de référence une relation entre pente, diamètre des matériaux, débits liquides et capacité de transport (volumes charriés potentiels).

Sur cette base, en utilisant les mêmes formules, on peut évaluer l'incidence de perturbation :

- en cas de suppression d'une partie des apports, comment doit réagir la pente et/ou le diamètre des matériaux pour ramener la capacité de transport aux apports disponibles ?
- en cas de dérivation d'eaux, quelle sera la capacité de transport résiduelle ?

	Entrée/sortie de débit [m³/s]	Pente [‰]	Diamètre moyen [mm]	Volume charrié [m³/an]
A	0	6	60	49 000
B1	-30	6	60	26000
B2	-30	7,1	60	49 000
C1	+30	6	60	125 000
C2	+30	5,2	60	49 000
C3	+30	6	71	49000

Exemple numérique de l'effet de dérivation ou de restitution permanentes de débit.

Le cas A représente l'état de référence.

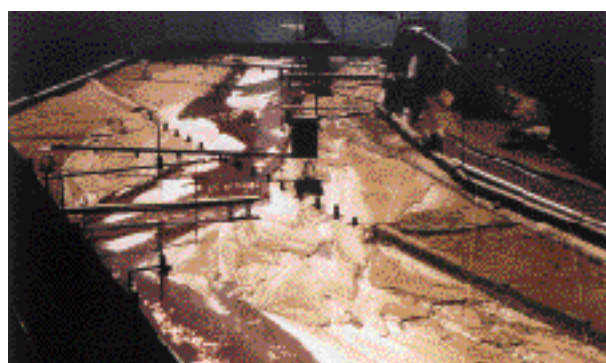
Le cas B correspond à une dérivation permanente de 30 m³/s, sans réduction du transit sédimentaire. Avec la pente initiale, la capacité de transport est réduite (cas B1). Pour assurer le transit des apports d'amont, il faut un basculement de la pente de 6 ‰ à 7,1 ‰ (cas B2).

Inversement, en cas de restitution d'eau sans apports solides correspondants (cas C), la capacité de transport théorique est fortement accrue. La pente devrait s'abaisser à 5,2 ‰ à l'aval de la restitution pour retrouver la continuité du transit (cas C2). Cependant, une telle érosion progressive est en générale entravée par un pavage du lit : le cas C3 montre qu'un faible accroissement de la taille des sédiments suffit à compenser l'accroissement des débits liquides.

5.6 LES MODÈLES

■ LES MODÈLES PHYSIQUES

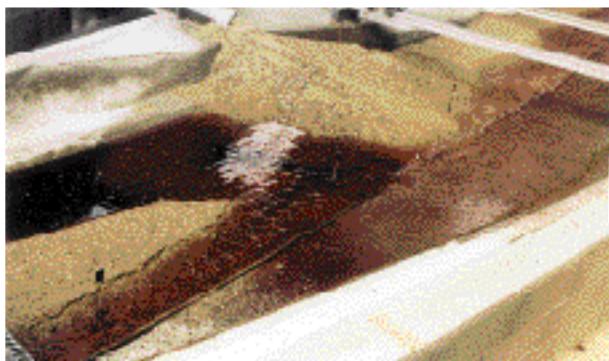
Exemples de modèles physiques [source : laboratoire de Sogreah].



La Durance à Cavaillon (Bouches-du-Rhône) : lit en tresse, pente 2,5 ‰.



Le torrent de Saint-Vincent (Pyrenées-Orientales).



Obstruction du lit de l'Arc par déjections du Rieubel (Savoie).

Les modèles physiques à fond mobile permettent une représentation assez fidèle des phénomènes, notamment sur les pentes moyennes à fortes, en prenant en compte les effets bidimensionnels et tridimensionnels. Il est possible de prendre en compte des courbes granulométriques étendues.



Sur les torrents, il s'agit d'un des seuls outils de quantification. L'importance des pentes et la taille des matériaux permet d'utiliser des lois de similitude très simples et fiables.

Sur les rivières divagantes, ils permettent une bonne représentation de la morphologie du lit : la simulation d'une chronique de débits de plusieurs années réelles permet de façonner un lit d'un réalisme souvent étonnant.

Sur les rivières de plaine, le modèle physique reste un outil efficace, mais la modélisation est plus délicate : une distorsion entre l'échelle horizontale et l'échelle verticale est souvent nécessaire ; la représentation des alluvions en similitude doit recourir à des distorsions de densité des matériaux, pour éviter des matériaux trop fins sur le modèle, qui se comporteraient différemment des matériaux réels ; la cohésion des berges est mal représentée.

Dans tous les cas, les contraintes d'emprise limite leur utilisation à des tronçons de quelques km.

Mise en œuvre

Sans entrer dans le détail, on peut donner quelques précisions sur la conception et l'utilisation de ces modèles :

- échelle : en général entre 1/30 et 1/80 ;
- conditions aux limites : à l'amont du modèle sont injectés d'une part des débits liquides (selon les cas, débits permanents, hydrogrammes de crue ou chroniques de débits représentant plusieurs années) ; d'autre part des matériaux selon une loi préétablie, ajustée lors de l'étalonnage ;

- étalonnage : l'étalonnage du modèle repose le plus souvent sur sa capacité à simuler les pentes et les formes du lit observées en réalité pour une granulométrie conforme à celle du site, au facteur d'échelle près. Selon la problématique posée, l'étalonnage peut être complété par la simulation d'un événement observé (engravement d'un confluent au cours d'une crue, par exemple) ou par l'observation du comportement du modèle sur un long cycle de débits ;

- résultats : le modèle permet d'observer d'une part le comportement général du lit en plan et en altitude pour différentes hypothèses de projet, d'autre part le comportement spécifique du lit au droit d'une singularité. Les mesures portent en général sur l'évolution géométrique du lit, les hauteurs d'eau, les vitesses, l'évolution de la granulométrie...

Usuellement, l'établissement d'un état de référence permet ensuite d'étudier finement diverses hypothèses d'aménagement.

Applications

Surtout études d'ouvrages et d'aménagements localisés. Mais ces modèles apportent des données de calage pour des calculs qui peuvent être étendus à de grands linéaires.

■ LES MODÈLES MATHÉMATIQUES

Quatre niveaux de modélisation sont possibles :

• **Modèle filaire de bilan volumétrique**

La rivière est représentée comme une ligne. Pas de calcul de lignes d'eau. Application directe d'une loi de transport solide par biefs, en fonction de la pente, du débit et de la granulométrie fournie.

Ces modèles permettent de simuler l'évolution du lit en altitude, en fonction de la différence entre les volumes entrant et sortant à chaque pas de temps.

Avantage : mise en œuvre légère.

Limitations

Loi de transport supposée univoque : limitation dans le domaine des torrents

Pas de prise en compte des lignes d'eau : limitation dans le domaine des rivières de plaine.

Difficulté de la représentation de la variation de la granulométrie d'amont en aval, notamment aux confluences.

Pas de représentation des phénomènes de pavage.

Mise en œuvre

La construction d'un modèle de ce type requiert, pour chaque point de calcul, la donnée du niveau du lit, de sa lar-

geur, de la granulométrie caractéristique (pouvant varier au long du modèle pour traduire les phénomènes de tri granulométrique) ainsi que des informations complémentaires éventuelles (représentation d'ouvrages : seuils, barrages, plages de dépôt... ; niveau du substratum non affouillable...). Il faut par ailleurs préciser les conditions aux limites (à l'amont du modèle et sur points d'introduction intermédiaires) : débits liquides et apports solides.

Ces modèles doivent au préalable être étalonné sur une situation de référence, si possible peu perturbée.

Ils permettent alors de simuler l'évolution du lit après diverses interventions (extractions, curages, aménagement et modification d'ouvrages...).

Applications

Rivières torrentielles principalement.

Quantification des délais d'évolution du profil en long, réaction du profil en long à certains types de perturbations.

Particulièrement adapté aux études morphologiques générales de cours d'eau, où il s'agit de prévoir les grandes évolutions futures du cours d'eau.

• Modèle filaire avec calcul d'écoulement en granulométrie uniforme

La rivière est représentée comme une ligne. Calcul en parallèle de l'écoulement liquide et du transport solide.

Meilleure représentation des singularités de l'écoulement.

Limitation

Pente < 1%

Pas de représentation des phénomènes de tri granulométrique.

• Modèle filaire avec calcul d'écoulement en granulométrie étendue

La rivière est représentée comme une ligne. Prise en compte d'une granulométrie étendue. Représentation des phénomènes de tri granulométrique par des notions de coefficients de masquage, de couche de mélange, ...

Limitation

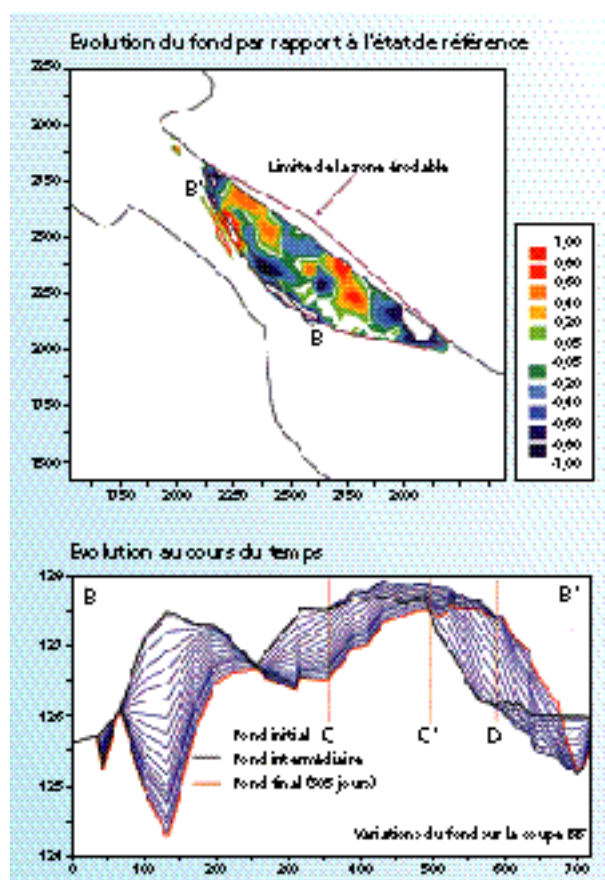
Complexité de mise en œuvre, et surtout difficulté du calage et de la validation (nombreux paramètres de réglage).

• Modèle bidimensionnel

La rivière est représentée par un maillage permettant le calcul des composantes des écoulements dans les deux dimensions de l'espace.

Encore du domaine de la recherche en domaine torrentiel.

Quelques applications prometteuses en domaine fluvial.



Exemple de modèle numérique sur la Loire [source : Diren Centre, Sogreah].

LES MÉTHODES ET LES OUTILS



ANNEXE 1

RÉFÉRENCES DES TEXTES

Cette annexe est principalement issue de la synthèse proposée dans « *La gestion des transports solides des cours d'eau de Savoie* », MISE 73, janvier 1997.



La plupart des actions proposées dans le guide relèvent des procédures de déclaration ou d'autorisation au titre de la loi sur l'eau.

Les opérations qui comprennent un prélèvement de matériaux avec valorisation de ces matériaux relèvent en général des procédures Installations classées.

Rappelons enfin que les opérations dépassant douze millions de francs nécessitent une autorisation au titre des lois de 1976 et 1983 relatives à la Protection de l'environnement.

Lorsqu'une opération relève de plusieurs de ces textes, un seul dossier d'impact est fourni, une seule enquête publique est engagée et une seule autorisation préfectorale est délivrée.

■ LOI SUR L'EAU DU 3 JANVIER 1992.

Décrets n°93-742 et 93-743 du 29 mars 1993.

Instaure un régime d'autorisation et de déclaration en fonction de l'importance des travaux, des ouvrages et des activités :

- autorisation : dossier « loi sur l'eau » comportant un dossier d'incidence, soumis à enquête publique ;
- déclaration : fourniture d'une notice d'incidence.

Rubrique n° 2.4.0 (projet entraînant une différence de niveau > 35 cm pour le débit moyen annuel ou la submersion d'une rive) : autorisation.

Rubrique n° 2.5.0 (détournement, rectification du lit d'un cours d'eau) : autorisation.

Rubrique n° 2.5.3 (ouvrage, remblai, épi modifiant la géométrie du lit mineur).

Rubrique n° 2.6.0 (curage d'un cours d'eau) :

- volume supérieur à 5 000 m³ : autorisation
- volume compris entre 1 000 m³ et 5 000 m³ : déclaration.

Rubrique n° 4.4.0 (carrières alluvionnaires) : autorisation.

■ LOI « CARRIÈRE » 93-3 DU 4 JANVIER 1993 (loi « Saumade »).

Décret du 9 juin 1994 modifiant la nomenclature des installations classées.

Soumet les carrières à la réglementation des installations classées (dossier ICPE) prévue par la loi 76-663 du 19 juillet 1976.

Rubrique n° 2510 : sont soumises à autorisation les opérations de dragage de cours d'eau lorsque les quantités à

extraire excèdent 2 000 tonnes, et que les matériaux sont valorisés.

Sont exclus les travaux destinés à assurer le libre écoulement des eaux et qui présentent un caractère d'urgence.

■ CIRCULAIRE DU 23 JUIN 1994 en application du décret du 9 juin 1994.

Précise la définition de carrière et dragage :

- les carrières sont destinées à la production de matériaux en vue de leur utilisation ;
- les dragages sont les opérations d'extraction nécessaires à l'entretien et à l'aménagement du cours d'eau.

Proscrit les extractions dans le lit mineur des cours d'eau à des fins commerciales (carrières).

Sont exclues du régime d'autorisation au titre des installations classées (pas de régime de déclaration) les opérations de dragage lorsque les matériaux ne sont pas utilisés en tant que matériaux de carrière ou que les quantités sont inférieures à 2 000 tonnes.

■ ARRÊTÉ DU 22 SEPTEMBRE 1994 relatif aux exploitations de carrières pris pour l'application de la loi « carrière » du 4 janvier 1993.

L'article 11.2 interdit les extractions de matériaux en lit mineur des cours d'eau.

Les extractions en lit mineur dûment justifiées par des besoins d'entretien ou d'aménagement des cours d'eau sont appelés « dragages ». Ces dragages ne sont pas concernés par cet arrêté.

■ LOI SUR LE RENFORCEMENT DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT DE FÉVRIER 1995

(loi « Barnier »). Circulaire du 9 mai 1995 pour application de l'art 29 de la loi du 2 février 1992.

Art 29 : pour les cours d'eau de montagne (forte pente, débit irrégulier, étiage hivernal dû au froid ou étiage estival, influence de la fonte des neiges, crues soudaines) :

- les services de l'État estiment les excédents de débit solide par cours d'eau ou par bassin ;
- le préfet accorde des droits d'extraction temporaire lorsque les encombrements du lit sont de nature à provoquer des inondations ;
- ces autorisations sont délivrées après avis de la commission des carrières.



Modifie l'articulation Dossiers ICPE / Loi sur l'eau :

- lorsque les dragages relèvent de la nomenclature ICPE, ils ne sont pas soumis à la nomenclature loi sur l'eau ;
- le projet autorisé ne doit pas être contraire aux objectifs généraux de la loi sur l'eau.

■ LOI « PÊCHE »

L'article L 232-3 du Code rural soumet à autorisation « les travaux en rivière dès lors qu'ils sont de nature à détruire les frayères, les zones de croissance ou les zones d'alimentation ou de réserves de nourriture de la faune piscicole ».

Pour les curages et dragages, on peut proposer le tableau de synthèse suivant :

INTERVENTIONS HORS ZONES PISCICOLES

Travaux de dragage	Avec caractère d'urgence	Sans caractère d'urgence
Avec utilisation des matériaux	Loi sur l'eau Art. 34 du décret 93-742 (travaux en cas de péril grave et urgent)	ICPE : autorisation au-delà de 2 000 t
Sans utilisation des matériaux	Loi sur l'eau Art. 34 du décret 93-742 (travaux en cas de péril grave et urgent)	Loi sur l'eau, rubrique 2.6.0 du décret 93-743

INTERVENTIONS EN ZONES PISCICOLES

Travaux de dragage	Avec caractère d'urgence	Sans caractère d'urgence
Avec utilisation des matériaux	Loi sur l'eau Art. 34 du décret 93-742 (travaux en cas de péril grave et urgent) Loi Pêche : art. L232-3 du code rural	ICPE : autorisation au-delà de 2000 t Loi Pêche : art. L232-3 du code rural
Sans utilisation des matériaux	Loi sur l'eau Art. 34 du décret 93-742 (travaux en cas de péril grave et urgent) Loi Pêche : art. L232-3 du code rural	Loi sur l'eau Rubrique 2.6.0 du décret 93-743 Loi sur l'eau, art. 10 Loi Pêche : art. L232-3 du code rural

Nota : le décret du 6 janvier 1995 précise que les autorisations délivrées au titre de l'article 10 de la loi sur l'eau valent autorisation au titre de l'article L232-3 du code rural.

ANNEXE 2

ÉLÉMENTS POUR L'ÉLABORATION DES CHARGES D'UNE ÉTUDE

Il ne saurait être question de proposer un cahier des charges type. À chaque type de cours d'eau, à chaque contexte morphologique, à chaque problème posé doit correspondre une étude spécifique.

On peut cependant indiquer quelques règles qui doivent présider à la définition des études de transport solide, notamment en terme d'extension spatiale de l'étude et de niveau d'étude requis.

ETUDES GLOBALES D'UN COURS D'EAU

DOMAINE D'ÉTUDE

La délimitation du domaine d'étude passera prioritairement par les coupures sédimentologiques évidentes (lac, grands réservoirs).

Mais ce cas de figure est rare.

Côté amont, l'étude doit en principe inclure tous les affluents morphologiquement actifs. Cependant, lorsqu'un affluent est trop important pour pouvoir être inclus dans l'étude, ou lorsque la partie amont du cours d'eau ne peut pas être incluse dans l'étude, il sera impératif de pouvoir apprécier :

- les apports solides de cette partie du bassin,
- les évolutions probables de ces apports dans les prochaines années,
- les répercussions passées ou futures sur cette partie du bassin des évolutions du lit sur la zone d'étude (risques d'érosion régressive...).

Ces termes pourront être appréciés par des évaluations basées sur la pente générale de la partie terminale, sur la granulométrie des alluvions et sur le régime hydrologique, dans l'état actuel et dans un état de référence si le cours d'eau a été fortement perturbé dans les dernières décennies. Une expertise complémentaire permettra d'évaluer sommairement les tendances d'évolution.

Côté aval, l'extrémité « officielle » du cours d'eau n'est souvent pas une limite vraiment satisfaisante sur le plan du transit sédimentaire, bien qu'elle soit souvent adoptée en raison des emprises administratives des maîtres d'ouvrage. Là-aussi, il convient de pouvoir apprécier le contexte global du cours d'eau principal dans laquelle se jette la rivière étudiée, de façon à assurer que les choix retenus sur la rivière ne soient pas préjudiciables pour le cours d'eau aval. L'évolution du

cours aval devra être appréciée sommairement pour identifier les répercussions possibles sur la zone d'étude.

OUTILS DU DIAGNOSTIC

L'étude de base doit reposer sur trois gammes d'outils du diagnostic morphologique : des reconnaissances de terrain, une analyse de l'évolution du lit en plan et en altitude et une quantification succincte du transport solide.

Cette dernière comprendra notamment la fourniture d'un ordre de grandeur des volumes de charriage caractéristiques (volumes charriés au cours d'une crue, et si possible en année moyenne) pour permettre de situer les demandes d'arasement et de curage.

Une quantification plus sophistiquée paraît nécessaire seulement sur les cours d'eau fortement perturbés : elle seule permettra de fournir des délais d'évolution et de préciser les marges de manœuvre disponibles dans la gestion des ouvrages. Cette quantification devra surtout s'attacher à évaluer de manière relative la capacité de transport d'un tronçon par rapport aux autres.

Une modélisation simplifiée par bilan volumétrique sera une aide précieuse à la compréhension sur les cours d'eau à pente moyenne ou forte (au-dessus de 2 ‰ de pente).

Pour des pentes plus faibles, seuls des calculs couplés écoulement/transport solide ont un sens, et leur mise en œuvre n'est pas aisée à l'échelle d'un bassin-versant.

SYNTHÈSE ET RENDU

Pour le rendu cartographique, une vision synthétique ne s'accommode pas d'échelles trop grandes : le 1/10 000 n'est pratiquement jamais adapté, sauf sur des ruisseaux ; le 1/25 000 apporte des informations précieuses, mais conduit à des documents de grande taille : il permet de rendre compte des informations localisées, mais ne permet guère d'embrasser globalement l'ensemble du cours d'eau.

On pourra recourir à une présentation graphique synthétique du type de celle proposée au chapitre 3 qui permettra une vision d'ensemble du fonctionnement morphologique du cours d'eau. Une échelle en plan de 1/50 000 à 1/100 000 est bien adaptée pour des cours d'eau de taille moyenne (50 à 150 km de longueur étudiée). Une échelle plus grande sera adoptée pour des cours d'eau plus modeste.



TRAITEMENT D'UN PROBLÈME D'ATTERVISSEMENTS

CONNAISSANCE DU CONTEXTE MORPHOLOGIQUE

En présence d'une étude générale préalable, on disposera des éléments nécessaires pour replacer le problème ponctuel dans un contexte plus global.

En l'absence d'une telle approche globale, les contraintes de budget ne permettront pas en général de mener une étude détaillée sur tout le tronçon susceptible d'être concerné par le traitement de l'atterrissement. Il sera cependant possible, notamment sur les cours d'eau de taille modeste, de faire réaliser une expertise sommaire (quelques jours) du cours d'eau, basée surtout sur une reconnaissance rapide, pour mettre en évidence les grandes tendances morphologiques (pas d'évolutions significatives, ou au contraire abaissement marqué, voire mise à nu du substratum) et les principaux enjeux.

EXTENSION DE LA ZONE D'ÉTUDE ET NATURE DES INVESTIGATIONS À MENER

Les investigations doivent être structurées autour des types d'incidences envisageables :

Incidences sur le fonctionnement local du cours d'eau

L'étude devra envisager les impacts potentiels d'un traitement de l'atterrissement :

- modification du fonctionnement morphologique local (report des érosions sur un autre point...) ;
- perturbation du milieu naturel en distinguant les impacts temporaires et les impacts définitifs, et en mettant en évidence le cas échéant les gains écologiques à terme (développement d'une ripisylve en relation avec la rivière...) ;
- accroissement de la capacité du lit à écouler les crues : attention à ne pas prendre en compte seulement l'accroissement de la section d'écoulement, mais également le linéaire sur lequel il se fait sentir.

Risques d'érosion régressive

Lorsque les actions envisagées comportent un prélèvement de matériaux, l'étude devra porter sur le tronçon amont susceptible d'être touché par une érosion régressive. La zone d'étude ira donc en théorie jusqu'au premier point dur, affleurement rocheux ou seuil artificiel (à condition de ne pas

remettre en cause sa stabilité). En l'absence d'un tel ouvrage, la zone d'étude doit être adaptée à l'ampleur des prélèvements envisagés. Normalement, les actions envisageables aujourd'hui sur des cours d'eau ne devraient pas engendrer d'érosions régressives majeures et la zone d'étude pourra être limitée à quelques kilomètres.

L'étude devra analyser les incidences potentielles sur les nappes, sur les milieux aquatiques riverains et sur les ouvrages.

Incidences du déficit sédimentaire à l'aval

Le déficit peut se faire sentir à l'aval indépendamment des points de stabilisation du profil en long. L'extension de la zone d'étude dépendra là encore de l'importance relative des prélèvements envisagés. Le plus souvent, l'analyse fine suffira sur quelques kilomètres, relayée ensuite par la connaissance du contexte morphologique global (voir plus haut).

Modification du régime des crues

Lorsqu'il est réalisé dans une zone de forts débordements, un curage significatif peut modifier notablement les conditions de propagation des crues, pas toujours de manière négative, d'ailleurs : les crues qui ne seront plus débordantes seront aggravées, mais des crues demeurant débordantes pourront, dans certaines conditions, être mieux écrêtées. C'est pourquoi une analyse hydraulique sérieuse sera nécessaire.

NIVEAU D'ÉTUDE NÉCESSAIRE

Il est délicat de donner des règles précises sur le degré d'investigation nécessaire : il devra être adapté aux incidences potentielles, elle-même fortement conditionnées par le contexte local.

On peut considérer que si les volumes en jeu sont nettement inférieurs aux apports annuels moyens, il s'agit d'une opération mineure, qui peut reposer sur des analyses qualitatives assez sommaires : reconnaissances de terrain, interprétation de photos aériennes, analyse du profil en long.

Si les volumes concernés sont de l'ordre des apports annuels moyens, des analyses en plan et en altitude du lit et de son évolution au cours des dernières décennies seront menées, complétées par des simulations simples de l'évolution du lit (modèles à bilan volumétrique, par exemple). L'étude devra indiquer les évolutions à attendre à court terme et à moyen terme.

Si les volumes concernés sont supérieurs aux apports annuels moyens, des investigations plus poussées sont nécessaires, et devront concerner un linéaire nettement plus important.

ANNEXE 3

BIBLIOGRAPHIE

- AMOROS (C.), PETTS (G.E.), Hydrosystèmes fluviaux. Masson, 1993.
- Bassin Rhône Méditerranée Corse, Guide technique n° 2. Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau, novembre 1998.
- BERNARD (Jean-Christophe), Gestion des barrages et Transport solide. Les opérations de vidanges, de chasses et de « transparence » des barrages EDF en Midi-Pyrénées. Synthèse ISIGE, 1994.
- BOUVARD (Maurice), Entraînement des matériaux, INPG, 1988.
- BOUVARD (Maurice), Barrages mobiles et ouvrages de dérivation. Eyrolles, 1984.
- BRAVARD (J.P.) et PETIT (F.), Les cours d'eau : dynamique du système fluvial. Armand Colin, 1997.
- BRGM, La gestion régionale des sédiments. Communications, n°30. Séminaire national Propiano (Corse), 27, 28, 29 mai 1981. BRGM 1981.
- CNRS, Laboratoire de géographie rhodanienne, Syndicat mixte de la rivière Drôme, N. LANDON, H. PIEGAY, J.P. BRAVARD, Propositions pour une gestion physique équilibrée du lit de la Drôme. Octobre 1995.
- COUVERT (Bernard) et LEFEBVRE (Bernard), Contribution de modèles physiques à l'étude du charriage torrentiel. La Houille Blanche, 3-1994.
- COUVERT (Bernard), LEFEBVRE (Bernard), LEFORT (Philippe) et MORIN (Étienne), Étude générale sur les seuils de correction torrentielle et les plages de dépôts. La Houille Blanche, 6-1991.
- DIREN, Entretien du lit de la Loire. Guide méthodologique. 2^e partie. Diren Centre, 1998.
- ENGELUNG (Franck), A monograph on sediment transport in alluvial streams. Université Technique, Copenhague, 1967.
- GRAF (Walter H.), Hydraulics of Sediment Transport. McGraw-Hill. Series in Water Resources & Environment Engineering, 1971.
- KOULINSKI (Vincent), Étude de la formation d'un lit torrentiel Cemagref, n° 15 Équipements pour l'eau et l'environnement, 1994.
- KOULINSKI (V.), LEFORT (P.) et BOYER (M.), Schéma de restauration et de gestion du haut Verdon. Avril 1997
- LANDON (N.), L'évolution contemporaine du profil en long des affluents du Rhône moyen. Constat régional et analyse d'un hydro-système complexe, la Drôme. Thèse de géographe et aménagement. Université Paris IV, Sorbonne, 1999
- LEFORT (Philippe), Transport solides dans le lit des cours d'eau. Dynamique fluviale. INPG, 1995
- LE GUENNEC (B.), Transport solide et morphologie fluviale. INP ENSEIHT, 1992-1993
- MEUNIER (Maurice), Eléments d'hydraulique torrentielle. Cemagref, Collection Études Montagne, 1991
- MEYER, PETER, MULLER, Formule de transport par charriage AIHR, 1948
- Ministère de l'Environnement, Agence de l'Eau RMC, l'Atelier technique des espaces naturels, Gestion patrimoniale des milieux naturels fluviaux. Guide technique. Outils de gestion, 1995.
- Mission interservice de l'Eau de la Savoie, La gestion des transports solides des cours d'eau de Savoie. Janvier 1997.
- RAMEZ (Philippe), Érosion et transport solide en rivière. Tome 1 - Guide pour la compréhension des phénomènes. CEMAGREF, Gestion des milieux aquatiques n° 8, 1995.
- RAMETTE (M.), Essai d'explication et de quantification des morphologies fluviales à partir de la théorie du régime. La Houille Blanche, 1-1990.
- RAMETTE (M.), Guide d'hydraulique fluviale. 1^e partie - Les reconnaissances de base. 2^e partie - Travaux et techniques en hydraulique fluviale. EDF, avril 1981.
- RAMETTE (M.), Morphologie et transport solide de rivières à forte pente. La Houille Blanche, 1988.
- RAMETTE (M.), ROULT (D.), Evolution morphologique des rivières. Considérations théoriques et comparaisons avec des cas extrêmes.
- Revue de géographie de Lyon, Enfoncement des lits fluviaux. Processus naturels et impacts des activités humaines. Vol 69. N° 1, 1994.
- RIJN (Leo C. van), Sediment transport. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 110, oct., nov., déc. 1984.
- ROSGEN (Dave), Applied river morphology. Wibland Hydrulogy, 1996.
- SMART (Graham M.) et JAEGGI (Martin), Transport des sédiments à forte pente. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. [voir aussi article Journal of Hydraulic Engineering, 1984].
- Société hydrotechnique de France, École française de l'eau au service du développement mondial. Tome 2. Congrès de la Société hydrotechnique de France, 25^{es} Journées de l'hydraulique. Chambéry du 15 au 18 septembre 1998. SHF, 1998.
- Syndicat mixte d'aménagement de la vallée de la Durance - Sogreah, Étude hydraulique et sédimentologique de la moyenne et basse Durance, juin 1998.
- Le fond des rivières et du littoral. La Houille Blanche, 4-1994.

ANNEXE 4

GLOSSAIRE



Nombre de termes sont définis dans le corps du texte avec schémas à l'appui : on y renverra le lecteur.

Capacité de transport

Débit solide que la rivière est capable de transporter à saturation pour un matériau de granulométrie donnée. Spécialement, dans les lits librement divaguants, désigne la capacité de transport des alluvions du lit

Affouillement

Ce terme est parfois employé à tort au sens d'abaissement du lit. On le réservera aux phénomènes locaux de surcreusement contre des obstacles (piles de pont, pied de berge) sans qu'il y ait évolution générale du lit.

Charriage (cf. §2.1, p12)

Chenalisation

Terme fréquemment employé de nos jours pour désigner des réalités très différentes : suppression des possibilités de débordement, fixation des berges, réduction des possibilités de divagation, recalibrage rectiligne, développement d'un lit unique...

Il nous semble préférable de spécialiser le terme pour désigner l'évolution du style fluvial d'un cours d'eau vers un lit à chenal unique, profond, peu mobile enserré entre des bancs élevés fixés par la végétation. Une telle évolution est généralement le signe d'un manque de mobilité due à la combinaison d'un déficit d'apports solides et d'une réduction des débits actifs.

Curage

Curage et extractions représentent des opérations de même nature. Mais le curage est une opération non régulière, qui répond à des impératifs hydrauliques.

L'extraction correspond à une exploitation économique des alluvions en vue de leur utilisation, qui conduit à des prélèvements réguliers quelques soient les apports réels du cours d'eau. C'est pourquoi elles ne peuvent plus être envisagées que dans des circonstances exceptionnelles (queues de retenues, par exemple), et accompagnées de précautions (seuil anti-érosion régressive, notamment).

Diamètres (cf. granulométrie)

Erosion régressive, érosion progressive (cf. §2.2, p 25)

Extractions (cf. curage)

Granulométrie

La granulométrie des matériaux est définie par des diamètres caractéristiques, qui ne sont pas dépassés par x % en poids des matériaux : 90 % des matériaux en poids ont un diamètre inférieur au d90, 50 % au d50 (appelé également diamètre médian), 30 % au d30, ...

Le diamètre moyen d_m est la moyenne des diamètres caractéristiques pris à intervalles réguliers (par ex, moyenne de d5, d15, d25,..., d95). (cf. §2.1, p 21)

Incision

Terme employé fréquemment dans un sens général d'abaissement du lit des cours d'eau. Nous proposons d'employer plutôt ce terme moins marqué d'« abaissement » pour le cas général.

Le terme d'incision renverra plutôt aux phénomènes d'abaissement du lit (souvent associés à une forte réduction de la largeur du lit actif) dans un contexte de déficit d'apports, en excluant les abaissements provoqués directement par des prélèvements de granulats (abaissement au droit de l'extraction et érosion régressive).

Lit confiné, seuil de confinement

cf. §2.2, p 31 (« endiguements »)

Loi de pelle (cf §5.3, p72)

Pavage

Le terme pavage désigne d'une manière générale la présence à la surface du lit de matériaux plus grossiers que les alluvions normales.

Lorsque les matériaux grossiers ont une origine extérieure au cours d'eau (blocs éboulés du versant...), on évitera le terme de pavage. On parlera de fixation du lit par des blocs.

Le terme de pavage sera réservé aux phénomènes de tri granulométrique.

Nous proposons même de le spécialiser pour les phénomènes de tri amplifiés par un déficit d'apports solides (mécanisme d'érosion progressive, notamment).

Lorsque que le tri résulte de la dynamique normale des formes fluviales, on parlera plutôt d'armage. (cf. §2.1, p 21)

Profil d'alerte (cf. §4.1, p 52)

Respiration du lit (cf. §2.1, p 19)

Nous proposons de réserver le terme de « respiration du lit » aux variations réversibles du lit en altitude. Pour les variations en plan, on parlera plutôt de divagation ou de mobilité latérale.

Seuils et mouilles (cf. §2.1, p 15)

Style fluvial

Type de forme prise par le lit : lit en tresse, méandres mobiles, etc.

Substrat, substratum

Le substratum est la formation géologique non alluviale qui se trouve sous les alluvions du cours d'eau. (cf. §2.1, p 22)

Le substrat désigne, en hydrobiologie, les matériaux du fond du lit en tant que caractéristique des habitats de la faune et de la flore benthiques.

Suspension (transport en) (cf. §2.1, p12)

Transport actif, transport passif (cf. §2.1, p 12)

Washload

Transport passif (voir ce terme).

ANNEXE 5

SYNTHÈSE DU TRAITEMENT D'UN ATTERRISSSEMENT

Préciser les objectifs

*Faut-il réduire les risques de débordements ?
Faut-il atténuer les érosions de berge ?
Faut-il favoriser certains usages ?
Faut-il restaurer les milieux ?*

Poser clairement le problème

*Risques de débordement : quelle est l'efficacité réelle attendue du reprofilage du lit ?
Risques d'érosion : le banc est-il vraiment à l'origine de l'érosion de berge ?
L'atterrissement pourra-t-il se résorber seul ?
À quelle échéance ? Y a-t-il urgence ?*

Observer le type de matériau

*Le banc est-il formé de matériaux du lit ?
Ou de sédiments plus fins ?*

Préciser l'activité du banc

*Le banc participe-t-il au fonctionnement du lit vif ?
Est-il érodable ?
Est-il durablement figé ?*

Étudier le contexte morphologique

*Le tronçon est-il stable, en exhaussement, en abaissement ?
Quelles sont les évolutions à l'aval et à l'amont : déficit sédimentaire, interruption du transit, excédents ?*

Évaluer les enjeux

*Quels sont les enjeux locaux ?
Justifient-ils une intervention ?
Quels sont les enjeux à l'échelle du tronçon et de l'ensemble du cours d'eau : risques d'inondation, état de la nappe, qualité des milieux alluviaux, ...*

Choisir une action

*Faut-il une intervention lourde ou légère ?
Avec ou sans prélèvement d'alluvions ?
Pérenne ou temporaire ?*

Analyser les impacts

Quels sont les impacts sur le milieu naturel alluvial et aquatique, les nappes, les débordements, les ouvrages, le paysage, les usages ?

Collection des études des Agences de l'Eau

Les trente derniers titres parus

- 35 *Etude bibliographique des méthodes biologiques d'évaluation de la qualité des eaux continentales (1994) 3 tomes*
- 36 *Décontamination des nappes (1994) 3 tomes*
- 37 *Guide pour le diagnostic des stations d'épuration urbaines (1994)*
- 38 *Mise à niveau des stations d'épuration (1995)*
- 39 *Lessives, phosphates, et eutrophisation des eaux (1997)*
- 40 *Approche technico-économique des coûts d'investissement des stations d'épuration (1995)*
- 41 *Prévention des pollutions accidentelles dans les industries de la chimie, du traitement de surface et les stockages d'hydrocarbures et de produits phytosanitaires (1996)*
- 42 *Prévention des pollutions accidentelles dans les abattoirs, les équarrissages, les laiteries et les sucreries (1996)*
- 43 *Prévention des pollutions accidentelles dans les industries du bois et des pâtes à papier (1996)*
- 44 *Génotoxicité : un choix entre le test pleurodèle (Jaylet) et le test xénope (1995)*
- 45 *Conception des stations d'épuration urbaines : les 50 recommandations (1996)*
- 46 *Etude du procédé biostyr : nitrification / dénitrification (1996)*
- 47 *Référentiel de l'utilisation des bioadditifs dans les milieux aquatiques (1996)*
- 48 *Impact de la nouvelle directive européenne relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (1996)*
- 49 *Etude bibliographique sur les pollutions accidentelles (1996)*

- 50 *Guide de l'autosurveillance des systèmes d'assainissement (1997)*
- 51 *La gestion intégrée des rivières - guide méthodologique (1997)*
- 52 *Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau SEQ-eau
Etude de rodage - rapport final (1997)*
- 53 *Seuils de qualité pour les micropolluants organiques et minéraux dans les eaux superficielles - synthèse (1997)*
- 54 *Optimisation du volet micropolluants du RNB - guide méthodologique (1997)*
- 55 *Les bryophytes aquatiques comme outils de surveillance de la contamination des eaux courantes par les micropolluants métalliques (1997)*
- 56 *Etude méthodologique de l'impact de déversements en temps de pluie. Application à la rivière l'Orne - Synthèse (1997)*
- 57 *Traitement phytosanitaire et qualité des eaux de drainage (1997)*
- 58 *Modes d'utilisation des produits phytosanitaires en France (1997)*
- 59 *Réglementations de l'usage des phytosanitaires en Europe (1997)*
- 60 *Guide inondabilité (1997)*
- 61 *Intérêts et contraintes du recyclage agricole des boues (1998)*
- 62 *Limnologie appliquée au traitement des plans d'eau (1998)*
- 63 *Efficacité de dispositifs enherbés pour lutter contre la pollution par les phytosanitaires (1998)*
- 64 *Rapport de présentation du Système d'Evaluation de la Qualité de l'Eau dans les cours d'eau (1998)*

Le transport de matériaux dans le lit des cours d'eau est un élément majeur du fonctionnement des systèmes alluviaux. Fortement perturbé depuis plusieurs décennies (extractions, recalibrages, aménagements hydroélectriques...), il se trouve aujourd'hui au cœur des préoccupations sur beaucoup de rivières. La loi sur l'eau, à travers les SDAGE, a affirmé le transit sédimentaire comme une composante majeure du fonctionnement des hydrosystèmes. Parallèlement, les fortes crues de ces dernières années ont conduit les riverains à réclamer des curages des lits accusés de s'exhausser. Il ressort de ces deux attentes parfois contradictoires la nécessité d'une réflexion d'ensemble à l'échelle du bassin versant sur le thème du transport solide et de la continuité du transit sédimentaire.

Après un rappel des mécanismes d'évolution du lit des cours d'eau, ce guide propose une démarche de diagnostic morphologique pour bien mettre en perspective les différents enjeux de la gestion du transport solide. Sur cette base sont proposées différentes actions possibles pour agir sur les conditions du transit sédimentaire. Des méthodes numériques sont enfin présentées pour aider à la quantification des phénomènes.

Agence de l'Eau Adour-Garonne
90, rue du Férétra
31078 TOULOUSE CEDEX 4
Tél. : 05 61 36 37 38
Fax : 05 61 36 37 28

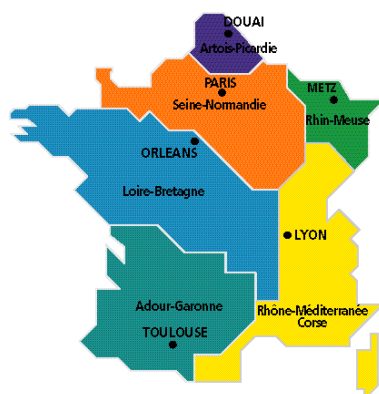
Agence de l'Eau Artois-Picardie
200, rue Marceline - B.P. 818
59508 DOUAI CEDEX
Tél. : 03 27 99 90 00
Fax : 03 27 99 90 15

Agence de l'Eau Loire-Bretagne
Avenue Buffon - B.P. 6339
45063 ORLEANS CEDEX 2
Tél. : 02 38 51 73 73
Fax : 02 38 51 74 74

Agence de l'Eau Rhin-Meuse
Route de Lessy-Roziérieulles
B.P. 30019
57161 MOULINS-LES-METZ CEDEX
Tél. : 03 87 34 47 00
Fax : 03 87 60 49 85

Agence de l'Eau
Rhône-Méditerranée-Corse
2-4, allée de Lodz
69363 LYON CEDEX 07
Tél. : 04 72 71 26 00
Fax : 04 72 71 26 01

Agence de l'Eau
Seine-Normandie
51, rue Salvador Allende
92027 NANTERRE CEDEX
Tél. : 01 41 20 16 00
Fax : 01 41 20 16 09



Ministère de l'Aménagement
du Territoire et de
l'Environnement
Direction de l'Eau
20, avenue de Ségur
75302 PARIS 07 SP
Tél. : 01 42 19 20 21
Fax : 01 42 19 12 06

