Mesures de terrain

On réalise généralement les mesures de terrain lorsque l'examen des cartes, des photographies aériennes, et de tous les autres documents recueillis au cours de l'étude a déjà permis d'analyser le fonctionnement global du cours d'eau, son évolution historique, et éventuellement les principaux dysfonctionnements observables à ces échelles (rectitude artificielle du tracé, présence de seuils, digues, etc.).
Il s'agit alors de :

- compléter les informations concernant le fonctionnement hydromorphologique : altérations hydromorphologiques, texture et état des berges (naturelles, artificialisées, etc.), granulométrie des bancs alluviaux, etc. ;
- valider ou infirmer certaines hypothèses.

Ces mesures de terrain sont généralement réalisées à l'échelle de l'ensemble du cours d'eau étudié, voire de ses affluents. Elles peuvent être complétées par des mesures particulières sur des **stations représentatives.**

NB Un protocole standard simplifié de recueil de données hydromorphologiques à l'échelle de stations du Réseau de Contrôle et de Surveillance (RCS) national a été élaboré par l'Onema. Cette approche stationnelle nommée CARHYCE ne sera donc pas décrite ici.

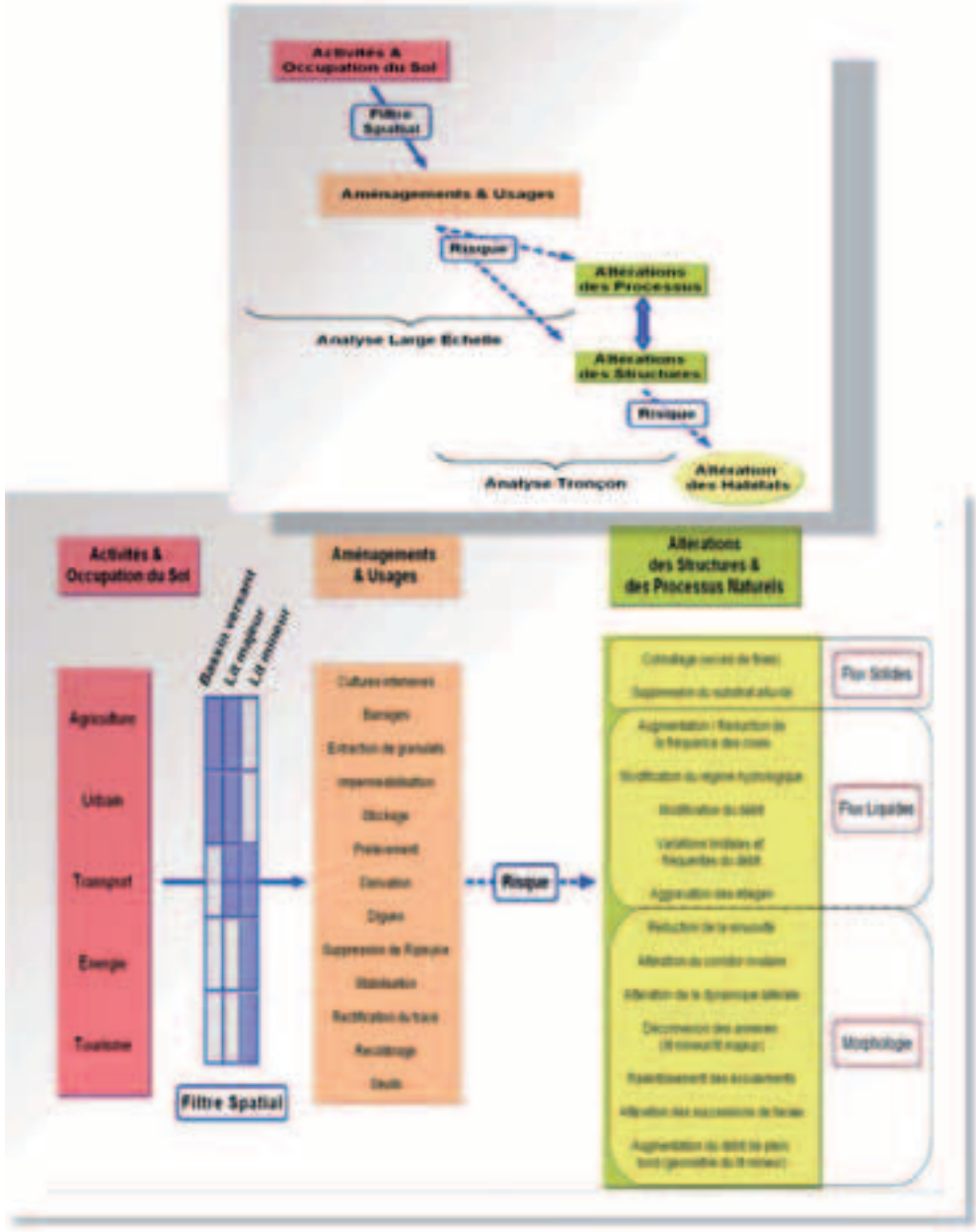
Cartographie des pressions et altérations

La première partie d'une étude hydromorphologique permet en général d'identifier les principales sources de pression et d'altération existant sur le cours d'eau lui-même et son bassin versant.
Une base de données nationale au niveau bassin et tronçon de cours d'eau permet déjà d'avoir une image synthétique des principales pressions et altérations sur environ 225 000 km de cours d'eau (base SYRAH, gérée par l'Onema). Cette base doit être complétée sur le terrain pour un certain nombre de pressions/altérations qui ne sont pas visibles par l'approche SYRAH.

■ SYRAH : concept et bases de données associées

Le système d'audit **SYRAH-CE** (**SY**stème **R**elationnel d'**A**udit de l'**H**ydromorphologie des **C**ours d'**E**au) analyse le fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau et permet d'évaluer les risques d'altérations susceptibles d'avoir une influence sur les habitats aquatiques et par conséquent sur l'état écologique du cours d'eau (au sens DCE) (Chandesris *et al*., 2007). L'approche « descendante » proposée s'appuie sur une évaluation du « risque d'altération » à l'échelle des bassins versants (large échelle), renforcée par une analyse au niveau des tronçons hydromorphologiques homogènes (échelle tronçon).
L'objectif majeur est de **détecter les altérations hydromorphologiques d'origine non naturelle** et pouvant être clairement associées à une dégradation de l'« état écologique ». Les altérations hydromorphologiques les plus fréquentes et les plus susceptibles d'être à l'origine d'impacts sur le fonctionnement écologique des cours d'eau ont été identifiées. Pour les traiter, l'audit repose sur la valorisation de couches d'informations géographiques et de bases de données existantes, et sur leur croisement avec des informations nécessaires à la gestion, la programmation, la décision et l'évaluation des actions de restauration.
L'analyse s'effectue à différentes échelles successives, du bassin versant au tronçon de cours d'eau.

Figure 208



Schémas conceptuels de la méthode d'audit SYRAH (Chandesris et al.*, 2007).*

Les cartes résultantes sont utilisables dans une perspective de gestion et de programmation, en gardant à l'esprit que, de par leur construction, leur précision est limitée, notamment pour les aspects morphologiques « locaux ». Cette échelle d'analyse est donc insuffisante pour poser un diagnostic précis des dysfonctionnements et finaliser des mesures de restauration locale. Elle garde en revanche toute sa pertinence pour la vision globale d'un grand territoire.

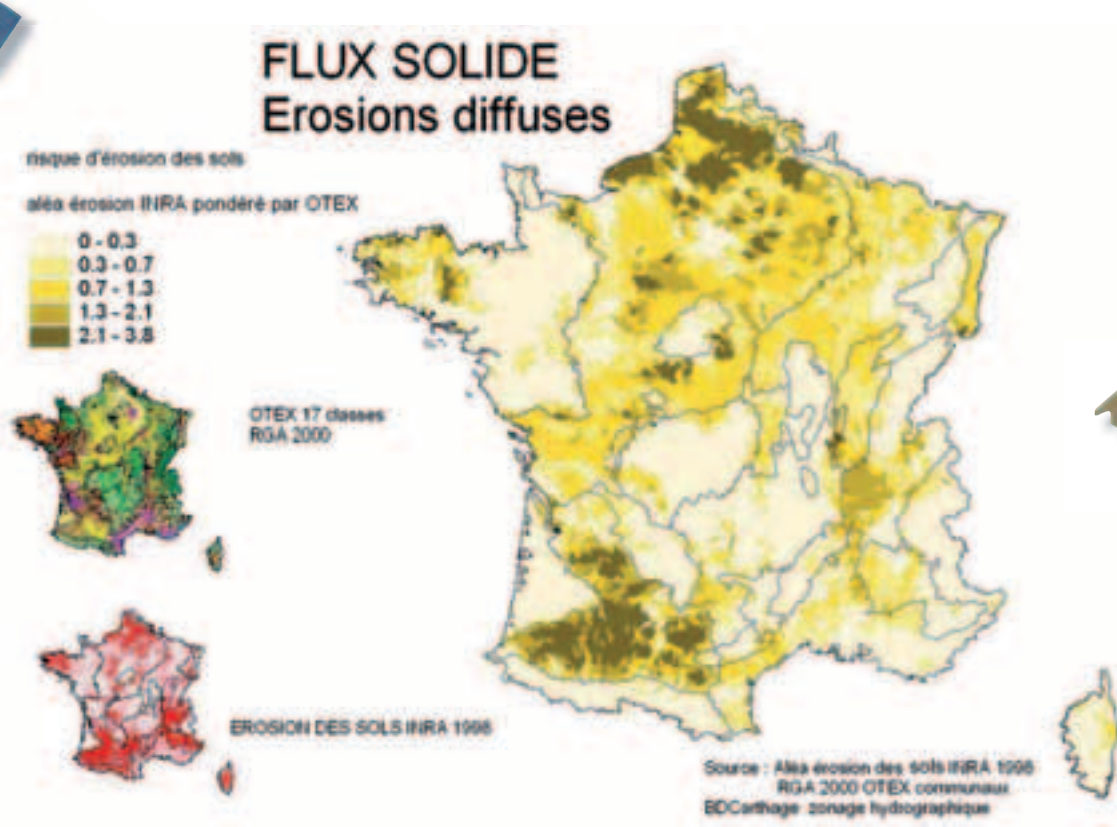
L'analyse à l'échelle de tronçons géomorphologiques permet une description des « aménagements et usages » à un niveau de précision compatible avec la recherche de causes de dégradation de l'état écologique observable. Ce niveau de finesse dans l'analyse est rendu possible par l'existence de bases de données géographiques précises de type BDTOPO IGN®.

Outre la **cartographie des risques d'altération hydromorphologique** encourus par les cours d'eau, l'audit SYRAH-CE permet d'aller plus loin dans l'aide à la gestion et à la restauration fonctionnelle. Les résultats bruts de l'audit permettent d'identifier facilement les éléments du réseau hydrographique subissant une pression limitée. Cette information, combinée avec la connaissance de la qualité chimique de l'eau, peut aider à l'identification de secteurs susceptibles de se situer en « Très Bon Etat » au sens de la DCE et donc à **préserver en priorité.**

Le report cartographique d'indicateurs rendant compte des pressions permet d'identifier celles qui prédominent, de localiser les problématiques et d'en établir une hiérarchie.

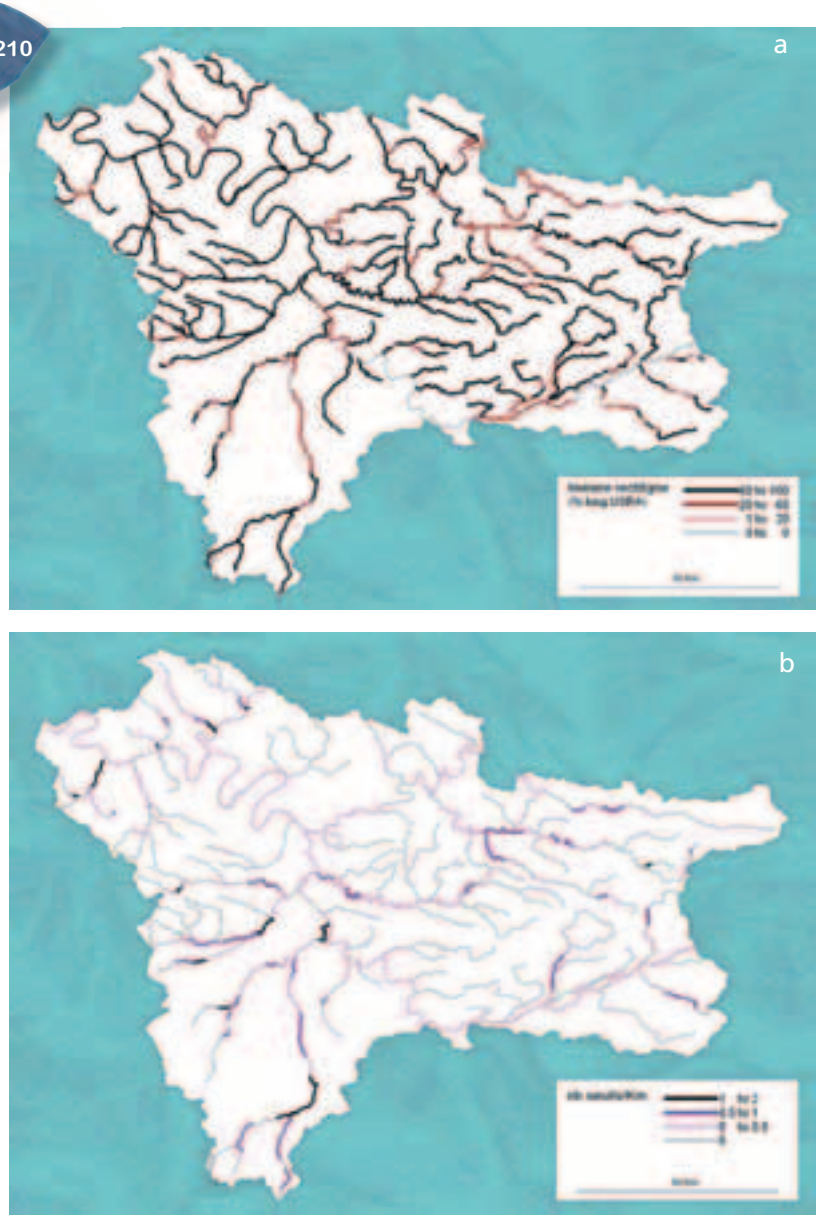
Une expertise de cet ensemble d'informations permet d'envisager un appui à l'établissement de plans de gestion à plusieurs échelles, avec une identification facilitée des actions de restauration souhaitables et une assistance à leur programmation.

Figure 209



Exemple de carte « large échelle » permettant d'identifier les zones à risques d'érosion des sols élevés, pouvant conduire à des phénomènes de colmatage des lits des cours d'eau.

Figure 210



Exemple de cartes à l'échelle des tronçons présentant des pressions/altérations de type rectitude du tracé en plan ou nombre de seuils par kilomètre linéaire (région Île-de-France, Malavoi, 2007). Plus la ligne est foncée, plus mauvais est le fonctionnement hydromorphologique.

Les pressions/altérations actuellement renseignées dans la base SYRAH Tronçons sont les suivantes :

- couverture du cours d'eau ;
- rectitude du tracé ;
- ouvrages transversaux en lit mineur (seuils) ;
- absence de ripisylve ;
- blocage probable de la dynamique latérale : présence d'infrastructures (routes par exemple) susceptibles d'être à l'origine de protections de berges bloquant la dynamique latérale du cours d'eau ;
- digues (données assez imprécises, à compléter par des observations de terrain) ;
- gravières en lit majeur ;
- urbanisation : pression urbaine globale (catégorie 1 territoires artificialisés) ;
- présence d'étangs sur le cours d'eau ;
- végétalisation du corridor fluvial ;
- blocage probable de la dynamique latérale : ponts.

■ Les compléments nécessaires

Un certain nombre de pressions et d'altérations hydromorphologiques ne sont actuellement pas identifiables (ou le sont mal) par l'approche SYRAH. Il peut donc être nécessaire, en fonction des objectifs de l'étude, de compléter certaines informations. Le niveau de précision de l'inventaire de terrain sera lui aussi fonction de l'objectif de l'étude hydromorphologique.
Par exemple, il n'est pas nécessaire de cartographier les faciès d'écoulement de manière exhaustive (ce qui coûte très cher) dans le cadre d'une étude hydromorphologique générale ne requérant pas explicitement une évaluation des habitats aquatiques. De même, la localisation des digues, voire leur mesure précise (hauteur, largeur, position exacte), n'est pas systématiquement nécessaire s'il n'y a pas d'enjeu « inondation » explicitement exprimé.

NB L'utilisation d'un GPS « grand public » (c'est-à-dire non différentiel) permet d'obtenir une précision de quelques mètres en x - y pour les informations recueillies, ce qui est généralement très suffisant pour ce type d'approche.

Recalibrage

Le recalibrage est un élargissement et/ou un approfondissement volontaire du lit mineur visant à augmenter la section d'écoulement pour faire transiter une crue de projet d'un débit (largement) supérieur au débit de pleins bords naturel.

1- Altérations hydromorphologiques généralement associées

- incision du lit mineur (*cf.* incision) ;
- étalement de la lame d'eau, entraînant de faibles profondeurs en étiage ;
- homogénéité des faciès d'écoulement ou *a minima* types de faciès présents et/ou proportion de faciès différents du modèle naturel ;
- augmentation de la capacité de charriage en crue entraînant éventuellement des incisions supplémentaires ;

2- Altérations écologiques généralement associées

- conditions critiques d'habitat, particulièrement en étiage et en hautes eaux ;
- aggravation des effets de l'eutrophisation ;
- augmentation des températures en étiage.

3- Informations disponibles dans SYRAH

Certaines pressions à l'origine de fortes probabilités de recalibrages plus ou moins étendus sont identifiables *via* SYRAH : zone urbaine ou périurbaine, éventuellement grande culture (pas encore validé). Mais on sait qu'il y a eu des recalibrages intensifs dans des secteurs ne présentant pas ces pressions « large échelle ». Le taux de rectification est aussi un bon indice car les deux opérations ont souvent été menées conjointement.

4- Approche complémentaire envisageable

- recherche dans les archives (DDE, DDAF, Archives Départementales) des dossiers de projets de travaux (*cf. supra*) ;
- mesure de la géométrie hydraulique à pleins bords sur différents sites (stratégie d'échantillonnage à définir au cas par cas) : largeur, profondeur, pente. Comparaison avec les valeurs naturelles du rapport largeur/profondeur pour le type hydromorphologique ;
- calcul des débits à pleins bords et détermination de leur période de retour. Comparaison avec les valeurs naturelles pour le type hydromorphologique.

Curage

Le curage est une action visant à retirer du lit mineur les alluvions gênant un ou plusieurs usages. Cette action est souvent réalisée à l'échelle locale (au droit d'un pont, dans une traversée de village) mais parfois sur des linéaires importants.

1- Altérations hydromorphologiques généralement associées

- incision du lit mineur. (*cf.* altération incision) ;
- étalement de la lame d'eau, entraînant de faibles profondeurs en étiage ;
- homogénéité des faciès d'écoulement ou *a minima* types de faciès présents et/ou proportion de faciès différents du modèle naturel.

2- Altérations écologiques généralement associées

- dérangement des biocénoses ;
- conditions critiques d'habitat ;
- augmentation des températures en étiage.

3- Informations disponibles dans SYRAH

Certaines pressions « large échelle » à l'origine de fortes probabilités de curage plus ou moins fréquents et étendus du lit mineur sont identifiables *via* SYRAH : zone urbaine ou périurbaine, éventuellement grande culture (pas encore validé). Mais on sait qu'il y a eu (et qu'il y a encore) des curages intensifs dans des secteurs ne présentant pas ces pressions « large échelle ».

4- Approche complémentaire envisageable

- enquête auprès des SPE (Services de Police de l'Eau, chargés de réglementer ces pratiques), des Syndicats de rivière, des riverains ;
- recherche d'indices sur le terrain (merlons récents, remblaiement de chemins ruraux avec des matériaux alluvionnaires, etc.).

Extraction en lit mineur

L'extraction de granulats est une action visant à extraire les alluvions d'un cours d'eau dans un objectif commercial. Les extractions en lit mineur étant interdites en France depuis 1994 (voire plus anciennement dans certains départements), on recherche donc les anciennes extractions. Les linéaires exploités, les modes d'exploitation, les volumes extraits étaient très variables d'un cours d'eau à l'autre.

1- Altérations hydromorphologiques généralement associées

- incision généralisée du lit mineur (*cf.* altération « incision ») ;
- types de faciès présents et/ou proportion de faciès différents du modèle naturel.

2- Altérations écologiques généralement associées

- (voir incision.)

3- Informations disponibles dans SYRAH

Certaines pressions indicatrices de fortes probabilités d'anciennes extractions en lit mineur sont identifiables via SYRAH : extractions en lit majeur, plans d'eau en lit majeur (*id.*). Pressions complémentaires à tester : proximité d'une agglomération, d'une infrastructure majeure de transport (autoroute, voie rapide, TGV).

4- Approche complémentaire envisageable

- enquête auprès des services (DDE, DRIRE, DIREN, Onema) ;
- recherche des indices d'incision généralement associés (voir plus loin).

Digues

Les digues sont des structures linéaires d'une altitude supérieure à celle du terrain naturel, situées dans le lit majeur, plus ou moins près du cours d'eau, et visant à limiter l'emprise des inondations.

1- Altérations hydromorphologiques généralement associées

- déconnexion hydraulique entre le lit mineur et le lit majeur et ses annexes hydrauliques (ces déconnexions ont des caractéristiques très variables selon les cours d'eau, la largeur de la zone intra-digues, la hauteur des digues, etc. Elles peuvent être permanentes ou temporaires) ;
- incision du lit mineur suite à l'augmentation des débits dans la zone intra-digues, particulièrement si l'endiguement est étroit ;
- aggravation des inondations en aval.

2- Altérations écologiques généralement associées

Selon l'intensité des « déconnexions » (et de l'incision si elle existe), les impacts sur les milieux naturels sont plus ou moins importants et plus ou moins réversibles. D'une manière générale : appauvrissement des milieux naturels du lit majeur lié à une absence de submersion fréquente, appauvrissement des biocénoses terrestres associées, appauvrissement de certains compartiments des biocénoses aquatiques dont une partie du cycle de développement est lié à ces connexions (notamment la reproduction pour certaines espèces de poissons).

3- Informations disponibles dans SYRAH

La couche digue de la BD TOPO exploitée dans le SYRAH ne présente pas une fiabilité suffisante.

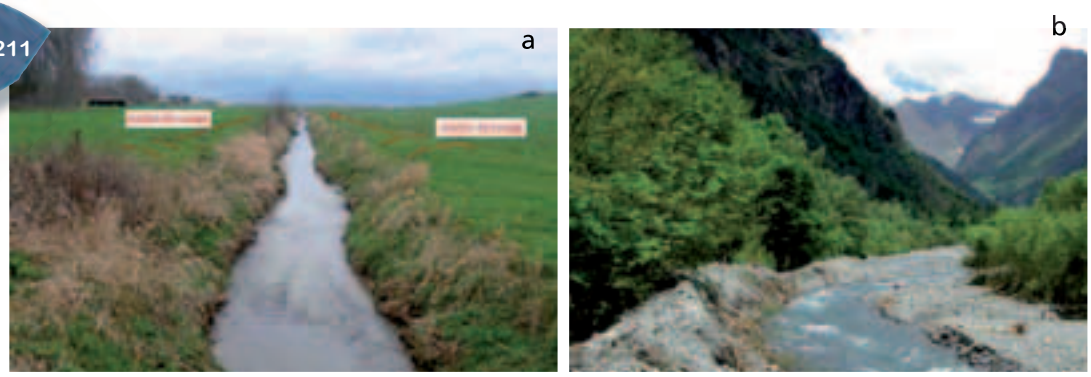
4- Approche complémentaire envisageable

- enquête auprès des services (DDE, DRIRE) ;
- travail de terrain systématique (si l'étude le justifie) et (ou) MNT très précis.

Merlons de curage

Les merlons sont des bourrelets de berges artificiels liés au redépôt des sédiments curés dans le lit mineur (*cf.* pression « curage »).

Figure 211



a- b- © J.R. Malavoi

Merlons de curages pérennes (a) (faible dynamique) et non pérennes (b) (forte puissance : merlons repris à la première crue).

1- Altérations hydromorphologiques généralement associées

Dans certains cas, elles peuvent se traduire par les mêmes effets que de petits endiguements (*cf.* digues).

2- Altérations écologiques généralement associées (cf. digues)

3- Informations disponibles dans SYRAH

Certaines pressions indicatrices de probabilités de curages sont identifiables *via* SYRAH (*cf.* curages).

4- Approche complémentaire envisageable

Terrain systématique si l'étude le justifie.

Protections de berges

Ce sont toutes les techniques visant à empêcher les processus d'érosion latérale.

1- Altérations hydromorphologiques généralement associées

- blocage de la dynamique latérale qui se traduit par un appauvrissement général de la diversité morphologique du corridor fluvial ;
- baisse de la « production interne » de sédiments grossiers par manque de reprise du stock alluvial disponible sur les berges (or l'équilibre débit liquide/débit solide est un élément essentiel de l'équilibre hydromorphologique).

2- Altérations écologiques généralement associées

- impacts liés à la réduction des processus géodynamiques et donc des milieux qui leurs sont associés (notamment les milieux pionniers) ;
- appauvrissement de la qualité écologique des rives.

3- Informations disponibles dans SYRAH

Certaines pressions indicatrices de fortes probabilités de présence de protections de berges sont identifiables *via* SYRAH : zone urbaine ou péri-urbaine, infrastructures de transport à proximité du lit mineur. Mais on sait qu'il existe des protections de berges même dans des secteurs ne présentant pas ces pressions.

4- Approche complémentaire envisageable

- terrain systématique si l'étude le justifie (à pied ou en bateau sur les cours d'eau assez grands) ;
- sur les cours d'eau présentant peu de ripisylve, un survol aérien à basse altitude peut permettre de renseigner une grande partie du linéaire ;
- il peut être utile de distinguer le type de protection (palplanches, béton, enrochements libre ou liaisonnés, génie végétal, etc.), et l'état de dégradation de la protection (moins évident car c'est souvent le pied qui est dégradé, et il est généralement immergé…).

Incision

Il s'agit d'une altération hydromorphologique majeure se traduisant par l'enfoncement du lit mineur dans ses alluvions. La rivière peut aussi inciser rapidement son talweg dans le substratum lorsqu'il est peu résistant, (par exemple la Loire dans la plaine du Forez et l'Allier en Limagne s'enfoncent dans les marnes oligocènes).

1-Altérations hydromorphologiques généralement associées

- pavage du lit (alluvions très grossières formant peu à peu une couche de surface non mobile et difficilement utilisable par la faune aquatique). C'est souvent le cas en aval des grands barrages ;
- parfois disparition de la couche alluviale et apparition du substratum rocheux résistant ;
- affaissement de la nappe alluviale d'accompagnement (eaux souterraines contenues dans l'aquifère de la plaine alluviale) ;
- déchaussement d'ouvrages divers (ponts, digues, protections de berges, etc.).

2- Altérations écologiques généralement associées

- conditions critiques d'habitat en lit mineur, particulièrement si le substratum rocheux devient dominant ;
- déconnexions des annexes hydrauliques en lit majeur ;
- moindre fréquence de connexion avec le lit majeur lui-même et dépérissement de la forêt alluviale.

3- Informations disponibles dans SYRAH

Certaines pressions à l'origine d'incisions probables plus ou moins étendues du lit mineur sont identifiables *via* SYRAH : grands ouvrages hydroélectriques piégeant la charge solide, forte densité de seuils, extractions en lit majeur (souvent indicatrices d'anciennes extractions en lit mineur), plans d'eau en lit majeur (*id*.). Eventuellement effets de la présence de séries RTM (travaux de stabilisation des versants et des torrents de montagne) qui ont provoqué des dépôts, mais parfois des affouillements au pied des « barrages ». Le problème principal est que l'altération réelle (incision, pavage, affleurement du substratum) n'est pas toujours associée à la présence de ces pressions. Par exemple, l'effet d'un grand barrage sur l'incision du lit plusieurs kilomètres en aval se fait généralement sentir au bout de quelques décennies et peut se prolonger sur des siècles.

4- Approche complémentaire envisageable

Dans les zones à forte probabilité d'incision (aval de barrages, anciens secteurs d'extraction en lit mineur, tronçons très rectifiés, etc.) :

- recherche d'anciens profils en long (lignes d'eau IGN) et en travers. Lever de profils en travers sur les mêmes sites. Lever d'un profil en long pour un débit proche de celui des levés historiques (pas toujours disponible) ; ces trois étapes sont théoriquement déjà réalisées lors de la première phase de l'étude hydro-morphologique ;
- recherches d'indices d'incision : déchaussement d'ouvrages (piles ou culées de pont notamment, pieds de digues, base d'enrochements), affleurement du substratum rocheux.

Attention. Un système racinaire apparent et sous-cavé n'est pas systématiquement un indicateur d'incision, ce peut n'être qu'une « simple » érosion latérale. La seule conclusion que l'on peut éventuellement tirer d'une telle observation (figure 212) est que la matrice dans laquelle était inclus le système racinaire a disparu.

De même, une pile ou une culée de pont renforcée par des palplanches et du béton n'indique pas toujours une incision généralisée : ce type d'obstacle à l'écoulement se traduit souvent par un affouillement localisé qui peut nécessiter à terme un renforcement. La présence d'un seuil immédiatement en aval ou sous un pont peut en revanche faire suspecter une incision plus générale, et notamment un processus d'érosion régressive. D'autre part, si incision il y a, elle peut n'être que très localisée. Il faut donc recenser un certain nombre d'indices d'incision sur le linéaire pour en déduire l'existence d'un processus d'incision généralisé, qui est l'information que l'on recherche.

Figure 212

a- b- © J.R. Malavoi

L'apparition du chevelu racinaire, voire la chute d'arbres en bordure de cours d'eau, peut indiquer une incision du lit mineur (c'est le cas en (a) suite à la disparition d'un seuil de moulin). Il peut aussi ne refléter qu'un processus d'érosion latérale (b). Mais, si l'on ne connaît pas l'histoire récente du cours d'eau, il est difficile de faire la distinction.

Figure 213

a- b- c- d- © J.R. Malavoi

Quelques indices d'incision certaine. (a, b) Encaissement du lit dans ses propres alluvions récentes ; (c) renforcement important de piles de pont ; (d) apparition des alluvions sous le niveau de fondation d'ouvrages, ici un mur de soutènement routier ; (e) construction d'un seuil en aval d'un ouvrage ancien.

■ analyse de la géométrie hydraulique (stratégie d'échantillonnage à définir au cas par cas) : ainsi un faible rapport largeur/profondeur (<3 par exemple) peut faire suspecter une incision, même si ces valeurs existent naturellement dans certaines conditions (chenaux à lit unique et à berges très cohésives).

Attention. Les processus d'érosion régressive et progressive peuvent se propager sur des kilomètres. Il peut donc être intéressant de rechercher des indices d'incision bien au-delà des zones directement impactées par les pressions à l'origine d'une incision probable (anciennes extractions en lit mineur, aval de grands barrages, endiguement étroit.

Colmatage

Le colmatage est un dépôt de sédiments fins (des argiles aux sables) en surface et dans les interstices de substrats plus grossiers.

1- Altérations hydromorphologiques généralement associées

■ moindre perméabilité et porosité du substrat ;
■ moindre efficacité des échanges d'air et d'eau.

2- Altérations écologiques généralement associées

■ modification des habitats benthiques et interstitiels entraînant une perturbation de la structure du peuplement d'invertébrés, augmentation de la dérive, réduction de l'abondance totale des organismes. Les espèces sensibles adaptées aux substrats grossiers disparaissent au profit des espèces adaptées aux sédiments fins (Gayraud *et al.*, 2002) ;
■ dysfonctionnements des frayères et des habitats de certaines espèces de poissons ;
■ modification des échanges d'eau et de matière entre la surface et l'hyporhéos.

3- Informations disponibles dans SYRAH

Certaines pressions à l'origine d'un colmatage probable (non naturel) plus ou moins étendu du lit mineur sont identifiables via SYRAH : superficies cultivées associées à la carte d'érodabilité des sols de l'INRA.

4- Approche complémentaire envisageable

Il existe actuellement de nombreuses méthodes d'évaluation de l'état de colmatage du substrat alluvial d'un cours d'eau mais aucune n'est normalisée.
A l'échelle globale, on cherche à décrire le **degré de colmatage de faciès lotiques**, de types radiers ou plats courants qui, *a priori*, devraient être les moins colmatés.

On peut distinguer trois niveaux de précision dans les méthodes existantes :

■ la plus grande précision peut être obtenue par la technique de prélèvement à l'azote liquide. Cette méthode, lourde et coûteuse, est généralement utilisée à des fins de recherche mais donne une image intéressante du phénomène dans l'épaisseur du substrat alluvial ;
■ une précision intermédiaire permet de mesurer la perméabilité d'un substrat alluvial en place (et donc son degré de colmatage) en y injectant un certain volume d'eau dans un tube crépiné (Descloux *et al.,* 2009). Cette méthode, nommée méthode de la conductivité hydraulique, est en cours de formalisation dans une optique de réseau de mesures DCE ;
■ un niveau de précision sommaire consiste à évaluer visuellement ou au moyen de mesures très rudimentaires, uniquement le colmatage de surface : la surface (par exemple au moyen du gabarit visuel présenté ci-après) et l'épaisseur colmatée ;
■ éventuellement le degré d'enchâssement des particules grossières dans une matrice plus fine.

Figure 214

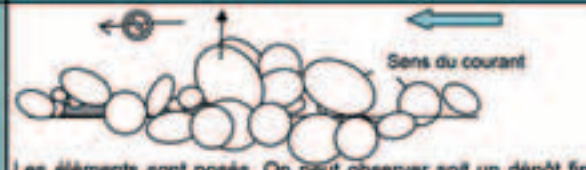
Evaluation visuelle de la surface occupée par des sédiments fins sur un substrat alluvial grossier (Northcote, 1979).

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

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

- **code 1.** Si les éléments se soulèvent facilement, nous attribuons la classe 1. Les éléments sont posés sur la sous-couche granulométrique et ne génèrent pas de nuage de limon lorsqu'ils sont soulevés ;
- **code 2.** Si les éléments se soulèvent plus difficilement, nous attribuons la classe 2 en fonction de la quantité de limon qui se libère dans l'eau sous les éléments. Le nuage généré est peu dense, c'est-à-dire que la couche de surface est collée par une couche de limon légèrement colmatante, qui lie les éléments entre eux ;
- **code 3.** Si les éléments se soulèvent avec un nuage de limon assez épais, nous attribuons la classe 3. Les éléments sont très enchâssés ;
- **code 4.** Si les éléments se soulèvent difficilement, nous attribuons la classe 4. Le nuage de limon produit est très dense. La structure est enchâssée dans une sous-couche très compacte dont l'emprise est forte sur les éléments ;
- **code 5.** Si les éléments ne se soulèvent pas ou très difficilement (structure cimentée ou sous forme d'un dallage) nous attribuons la classe 5. C'est le cas lorsque la granulométrie est recouverte par une épaisse couche de limon, cette classe granulométrique se retrouvant en Subs. Dom.

Figure 215

Code	Classes de Colmatage	Représentation du degré de colmatage (lorsque l'on soulève un élément du fond)
1	] 0 - 25%]	 Les éléments sont posés. On peut observer soit un dépôt fin de limons peu colmatant (cas de gauche) soit aucun dépôt (cas de droite)
2	] 25 - 50%]	Les éléments sont collés par une sous-couche de limon (avec ou sans limon en dépôt). Le nuage de limon qui se soulève est peu dense.
3	] 50 - 75%]	Les éléments sont légèrement enchâssés et provoquent un nuage de limon assez épais lorsqu'ils se désolidarisent de la sous-couche.
4	] 75 - 90%]	Les éléments sont très enchâssés et provoquent un nuage épais de limons (accentué ou non par un dépôt de limons)
5	] 90-100%]	Les éléments sont recouverts de limons et provoquent un nuage très épais (cas de gauche) ou bien sont entièrement cimentés dans la sous-couche et impossibles à soulever (cas de droite)

Exemple de méthode d'évaluation du degré de colmatage et d'enchâssement des matériaux du substrat alluvial (Archambaud et al.*, 2005).*

Modification des faciès d'écoulement

Les faciès d'écoulement ont été très souvent altérés par des interventions anthropiques de type chenalisation, seuils et barrages, extractions de granulats. Ces altérations peuvent être identifiées par la présence de types de faciès d'écoulement et/ou des proportions de faciès, différentes du modèle naturel.

1- Altérations hydromorphologiques généralement associées

- modification des caractéristiques de l'écoulement (profondeurs, vitesses, granulométrie) ;
- modification du fonctionnement auto-épuratoire (certains faciès (plats courants, radiers) semblent mieux « épurer » que d'autres.

2-Altérations hydromorphologiques généralement associées

Modification des habitats et des biocénoses associés.

3- Informations disponibles dans Syrah

Certaines pressions à l'origine d'une modification probablement importante des faciès d'écoulement sont identifiables *via* SYRAH : rectification du tracé, forte fréquence de seuils (remous d'ouvrage en lieu et place des faciès naturels), éventuellement « surlargeurs » liées à d'anciennes extractions.

4- Approche complémentaire envisageable

Dans les zones à forte probabilité de modification des faciès (*cf.* données SYRAH) : cartographie des faciès (à partir de mesures pédestres ou de survols à basse altitude). Les méthodes d'identification et de cartographie des faciès sont présentées dans le détail dans Malavoi (1989) et Malavoi et Souchon (2002).

Transport solide et granulométrie des alluvions

Nous avons vu lors des chapitres précédents qu'il était possible de localiser, voire de cartographier, les bancs alluviaux d'un cours d'eau, soit à partir de la BD ORTHO®, soit à partir de survols à basse altitude, soit enfin à partir de visites de terrain.
En complément de ce premier niveau d'analyse, il est indispensable de recueillir des informations sur la quantité et la granulométrie des alluvions en transit.
La méthode consiste à réaliser des mesures sur des sites d'échantillonnage répartis de l'amont à l'aval du cours d'eau (la stratégie d'échantillonnage est à définir au cas par cas), ou, si l'on cherche l'exhaustivité, sur chaque banc identifié lors de la phase initiale.

■ Evaluation des volumes transportés

Il n'existe pas de méthode normalisée pour ce type de mesure.
Dans le cadre d'une étude hydromorphologique « classique », c'est-à-dire non spécifiquement dédiée à l'analyse poussée du transport solide, le plus simple consiste à évaluer la superficie du banc alluvial échantillonné et son épaisseur moyenne par rapport au niveau du talweg (partie la plus profonde du lit).

NB L'épaisseur d'alluvions mobilisée lors des crues peut être bien supérieure à l'épaisseur des bancs. Il ne s'agit donc que d'évaluer les ordres de grandeur des volumes en jeu.

■ Evaluation de la taille des particules transportées

Plusieurs niveaux de précision des mesures granulométriques sont envisageables selon les objectifs de l'étude. Là encore, si l'étude n'est pas fortement orientée « transport solide », il semble suffisant de réaliser des mesures granulométriques sommaires de la **couche d'armure** (pour obtenir des informations sur **la sous-couche,** qui représente la granulométrie réellement transportée par charriage, les investigations nécessitent des prélèvements volumétriques beaucoup plus lourds et complexes).
Nous proposons de réaliser ces mesures (ou observations granulométriques) sur la partie visuellement la plus grossière des bancs alluviaux mobiles (généralement en amont des bancs, dans l'axe principal d'écoulement de crue). On sait donc que l'on biaisera volontairement la granulométrie du cours d'eau vers les fractions grossières du charriage.
Deux méthodes peuvent être envisagées (rappel : on ne décrit ici que la granulométrie de surface ou **armure**) :

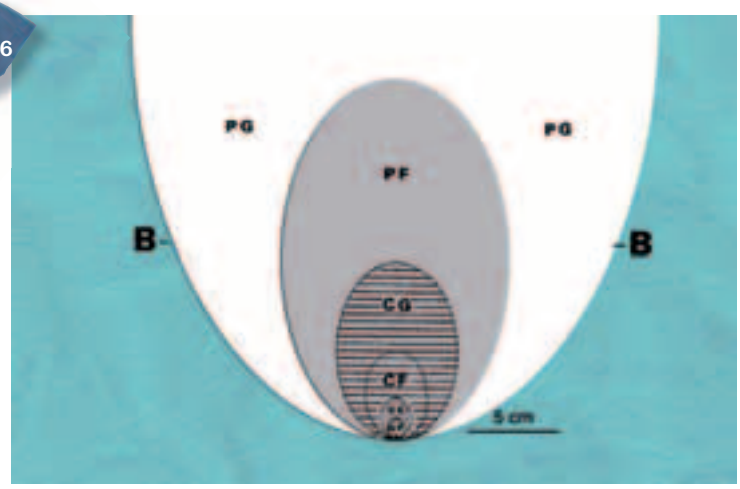
- la méthode visuelle (Malavoi et Souchon, 1989) permet de caractériser la granulométrie au moyen d'un gabarit visuel à l'échelle. Le substrat observé est décrit par un code à 6 caractères (voir tableau suivant) :
- classe granulométrique de l'élément le plus grossier (à rapprocher du D90) : deux caractères (ex. : PG),
- élément dominant (proche du D50 s'il n'y a qu'un seul élément dominant) : (deux caractères (ex. : PG si cette classe est à la fois la plus grossière et aussi la classe dominante),
- si besoin, second élément dominant : deux caractères (ex. : CG).

Le substrat décrit dans les exemples précédents sera donc noté PGPGCG, ce qui représente un substrat globalement grossier.

Tableau 11 *Classification de Wentworth (1922).*

Type granulométrique	Taille en mm	Code microhabitats
Rocher ou Dalle	> 1024	R ou D
Bloc	256 - 1024	B
Pierre Grossière	128 - 256	PG
Pierre Fine	64 - 128	PF
Caillou Grossier	32 - 64	CG
Caillou Fin	16 - 32	CF
Gravier Grossier	8 - 16	GG
Gravier Fin	2 - 8	GF
Sable Grossier	0,5 - 2	SG
Sable Fin	0,0625 - 0,5	SF
Limon	3,9 - 62,5 µ	L
Argile	< 3,9 µ	A

Figure 216



Gabarit visuel des classes de taille (à mettre à la bonne échelle avant de s'en servir sur le terrain…) (Malavoi et Souchon, 1989).

■ la méthode dite de Wolman, plus objective, consiste à prélever 100 éléments par échantillonnage au hasard sur la partie la plus grossière du banc, à en mesurer l'axe intermédiaire (axe b) perpendiculaire au plus grand axe (axe a), et à en tirer une courbe et des percentiles granulométriques (D50, D90, etc., voir figure ci-après).

NB Sur les bancs alluviaux exondés, la méthode de Wolman peut être avantageusement remplacée par une photographie verticale avec échelle visuelle. Il est très aisé ensuite, avec un logiciel adapté, de réaliser un échantillonnage par grille et la mesure des axes intermédiaires. De même, il est très intéressant, lorsque l'on en dispose, de réaliser la ou les mesures granulométriques au niveau de profils en travers (exemple ci-après) afin de pouvoir éventuellement affiner l'approche hydraulique (débits de mise en mouvement par exemple).

Figure 217

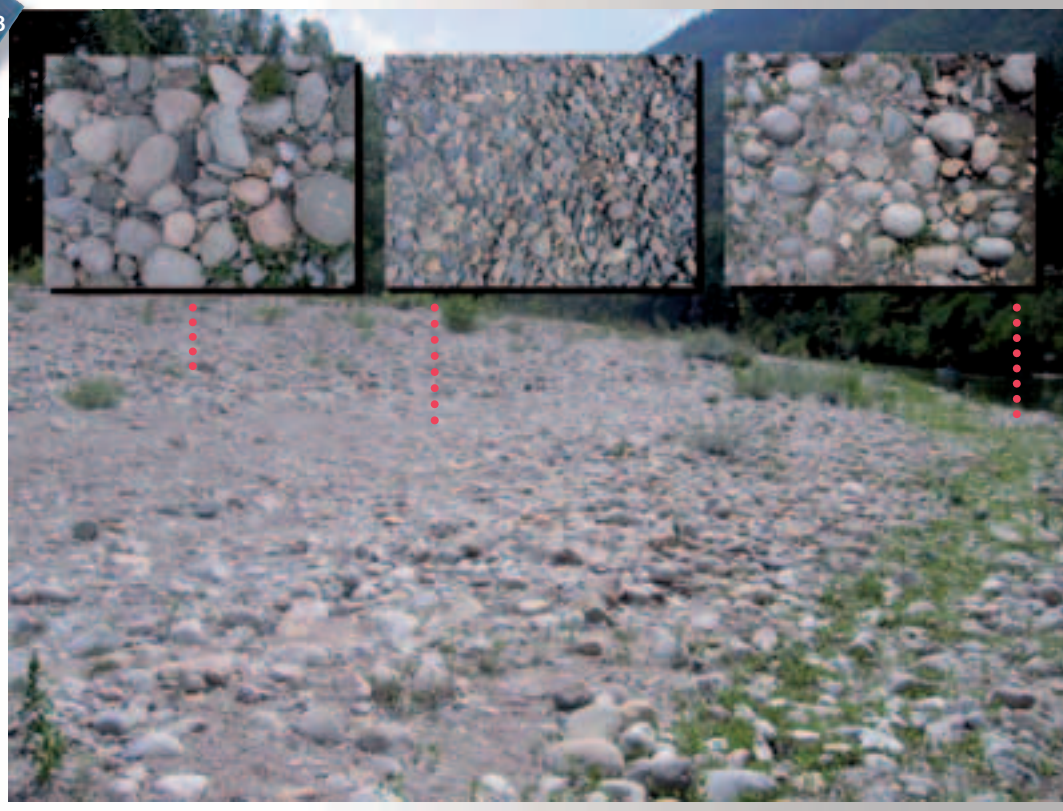
a- Fond BD ORTHO® 2006. © IGN 2010. b- © J.R. Malavoi

Exemple de mesure granulométrique de l'armure sur la base d'une photographie verticale réalisée au droit d'un transect (a) et courbe granulométrique résultante (c). Les mesures des axes médians (b, traits bleus) sont réalisées sous SIG après mise à l'échelle de la photo (la plaquette d'identification de l'échantillon mesure 10 cm). On mesure les éléments présents sous chaque intersection de la grille fictive (en rouge), soit sur 49 individus (grille 7 x 7). (Malavoi et Adam, 2007)

La difficulté principale des mesures granulométriques sur les bancs alluviaux mobiles est la stratégie d'échantillonnage. En effet, il a été démontré de très nombreuses fois (notamment par Mosley et Tindale, 1985) que les matériaux transportés par l'écoulement se distribuaient de manière très hétérogène à la surface des unités de dépôt (bancs et dunes), selon les axes d'écoulement, l'altitude des diverses parties du banc, la présence de végétation ou d'embâcles, etc. De plus, peuvent se superposer sur une même unité de bancs, les dépôts de différentes crues ou de différentes phases de la même crue.

Ceci peut avoir pour conséquence que, selon l'endroit où est réalisée la mesure, les caractéristiques de la courbe granulométrique (percentiles) peuvent varier d'un facteur 2,5 (figure ci-dessous), voire 100 si l'on a des dépôts de sable issus d'un ralentissement du courant en fin de crue (avec par exemple un D50 de 0,5 mm), voisinant avec des dépôts grossiers mis en place pendant le pic de la crue (avec un D50 de 50 mm par exemple) !

Figure 218



© J.R. Malavoi

Illustration de la variabilité de la granulométrie de surface sur un banc alluvial (banc de convexité). On trouve un facteur 5 d'écart sur le D50… et la fraction la plus grossière est plutôt sur le haut du banc. En l'occurrence, on choisira la zone la plus grossière.

■ Granulométrie des radiers

En complément de la mesure de la granulométrie des matériaux charriés au niveau des bancs alluviaux, il est intéressant de décrire la granulométrie des radiers qui sont en théorie les **portions du cours d'eau où se dépose la fraction la plus grossière de la charge de fond.**

Cette mesure présente un double intérêt :

- intérêt « typologique » : elle permet de ranger un cours d'eau ou un tronçon de cours d'eau dans un type « granulométrique ». Cours d'eau à radiers à blocs, radiers à cailloux, radiers à graviers, etc. ;
- intérêt en termes de connaissance des processus de mobilisation du substrat alluvial. Couplée à la puissance spécifique, elle permet de connaître la fréquence minimale de mise en mouvement des matériaux du lit.

Figure 219

Exemple de report de mesures granulométriques visuelles sur les faciès radiers de la Veyle et de ses affluents (couleur foncée = plus grossier). Dans la partie aval, les radiers ne sont plus visibles car ils sont souvent immergés dans les retenues de seuils de moulins (Malavoi et Epteau, 2003).

Géométrie hydraulique et caractéristiques des berges naturelles

Les deux derniers éléments de terrain complémentaires, éventuellement déjà renseignés à partir de documents existants, sont la géométrie hydraulique moyenne du cours d'eau et la nature cohésive ou non des berges.

■ Géométrie hydraulique à pleins bords

Les données géométriques à « pleins bords » sont des éléments de classification typologique, tant statique (ex. : rapport largeur/profondeur) que dynamique (ex. : débit à pleins bords, puissance spécifique).

Le rapport de la largeur sur la profondeur moyenne à pleins bords est, nous l'avons vu, une caractéristique géométrique intéressante à plusieurs titres :

- d'un point de vue hydromorphologique, c'est un paramètre typologique **indicateur de l'activité géodynamique d'un cours d'eau.** Ainsi, les cours d'eau à dynamique plutôt active, caractérisés par des processus érosifs latéraux importants et des apports solides assez élevés, ont des rapports l/p plutôt forts (20 ou plus). Les rivières en tresses ont souvent des rapports l/p proches de ou supérieurs à 100 ;
- le rapport l/p donne aussi des indications sur la **cohésion des berges** (*cf.* paragraphe suivant) : plus celles-ci sont cohésives, plus les cours d'eau sont étroits et profonds et inversement, si les berges sont peu cohésives, les cours d'eau ont tendance à être plus larges et moins profonds. On retrouve ici les mêmes tendances que celles liées à la présence de végétation rivulaire, les deux paramètres (végétalisation et cohésion) jouant dans le même sens en favorisant l'érosion verticale aux dépens de l'érosion latérale ou l'inverse ;

■ ces mesures géométriques permettent enfin de calculer des débits à pleins bords et des puissances spécifiques correspondantes :

- débit à pleins bords. Il est couramment admis que le débit de pleins bords d'un cours d'eau naturel en équilibre a une période de retour correspondant sensiblement à la crue journalière de fréquence 1,5 à 2,5 ans. Le calcul, même sommaire, de ce débit au droit d'une station permet donc en théorie de détecter une éventuelle altération (ex. : recalibrage) si sa période de retour dépasse largement Q2ans (ex : Q5, Q10),
- puissance spécifique à pleins bords. RAPPEL : La puissance spécifique à pleins bords est un paramètre déterminant de la dynamique fluviale. Plus elle est élevée, plus le cours d'eau a de capacité à éroder ses berges (si-celles ci ne sont pas cohésives) et à transporter ses alluvions. Couplée aux caractéristiques du substrat et à l'hydrologie, elle permet aussi de déterminer la fréquence de mise en mouvement des sédiments et donc la stabilité temporelle du substrat, élément important du fonctionnement écologique.

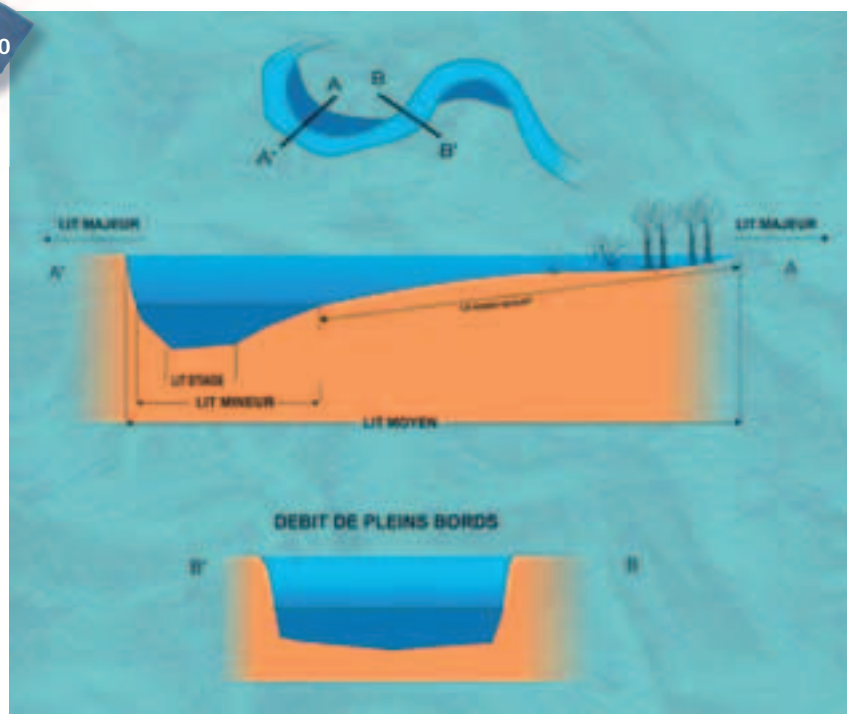
NB Ces mesures géométriques à « pleins bords » doivent théoriquement être réalisées :

- soit au droit d'un point d'inflexion entre deux sinuosités ;
- soit dans une portion rectiligne.

C'est en effet dans ce type de configuration en plan que l'on trouve, en théorie, des sections symétriques alors qu'elles sont en général dissymétriques et plus complexes dans les sinuosités (figure 220). Notons que c'est aussi au droit des points d'inflexion ou des portions rectilignes que l'on trouve généralement les faciès d'écoulement (RADIER ou PLAT COURANT) les plus favorables à un calcul hydraulique simple de type Manning-Strickler[4]. L'écoulement y est en effet généralement uniforme[5] .

Les mesures de géométrie en travers ne nécessitent pas une très grande précision (on accepte environ 15 - 20 % d'erreur). Ces mesures peuvent être réalisées au multidécamètre (pour les largeurs) et avec une simple mire (pour les hauteurs de berges).

Figure 220



Exemples de formes de section selon la localisation en plan. On mesure préférentiellement les données géométriques en plan (largeur) et en travers (hauteur) au droit des sections de type B, B'.

[4] Formule de Manning-Strickler : V = K·R2/3 J1/2 et Q= V S où V est la vitesse (m/s), R le rayon hydraulique (m), J la pente (m/m), S la section mouillée (m²).
[5] Un écoulement uniforme s'établit dans un cours d'eau si :
- la pente du lit est constante,
- la géométrie (section mouillée) est pratiquement constante,
- la rugosité est constante,
- le débit est constant (écoulement stationnaire).

Figure 221

a- b- © J.R. Malavoi

Exemples de mesure de la géométrie à pleins bords.
NB. *: Que ce soit pour la mesure de la largeur ou de la profondeur, on prend toujours la berge la plus basse.*

■ Degré de cohésion des berges

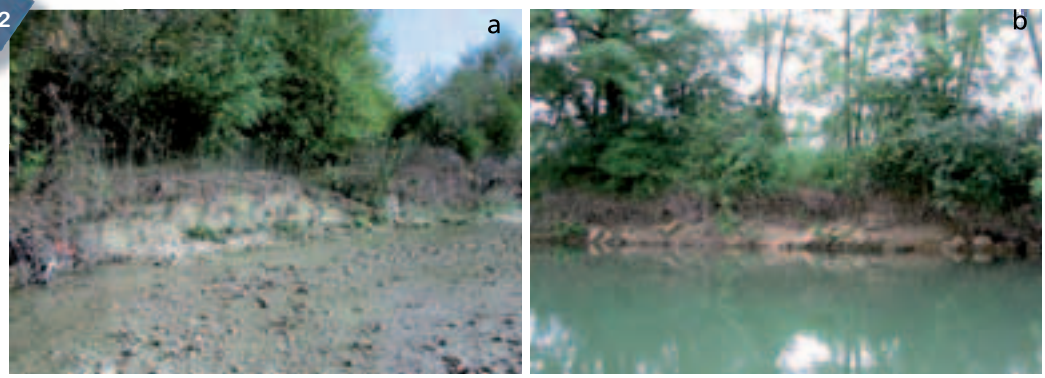
Nous savons que la nature cohésive ou non des berges est l'une des variables de contrôle des processus géodynamiques.
En dehors des berges rocheuses pour lesquelles la question ne se pose pas, l'appréciation de la cohésion des berges, et donc de leur érodabilité potentielle, peut se faire de manière sommaire en évaluant la proportion de sédiments cohésifs dans la berge (limons et argiles) et leur position stratigraphique (sommet de berge, pied de berge, etc.).

NB Il s'agit d'évaluer l'érodabilité **potentielle** des berges. Si celles-ci sont protégées par diverses structures, il est nécessaire de rechercher un secteur non protégé. D'autre part, selon l'histoire géomorphologique de la vallée, la nature, la hauteur, la structure stratigraphique des berges peuvent présenter une grande variabilité. Une seule observation ne suffit donc pas pour qualifier, à l'échelle d'un tronçon par exemple, l'ensemble du linéaire de berges.

Les différentes étapes de description sont présentées ci-dessous :

■ recherche d'une portion de berge non végétalisée et non protégée, si possible dans un secteur où le pied de berge atteint sensiblement le fond moyen du lit, voire le talweg ;

Figure 222

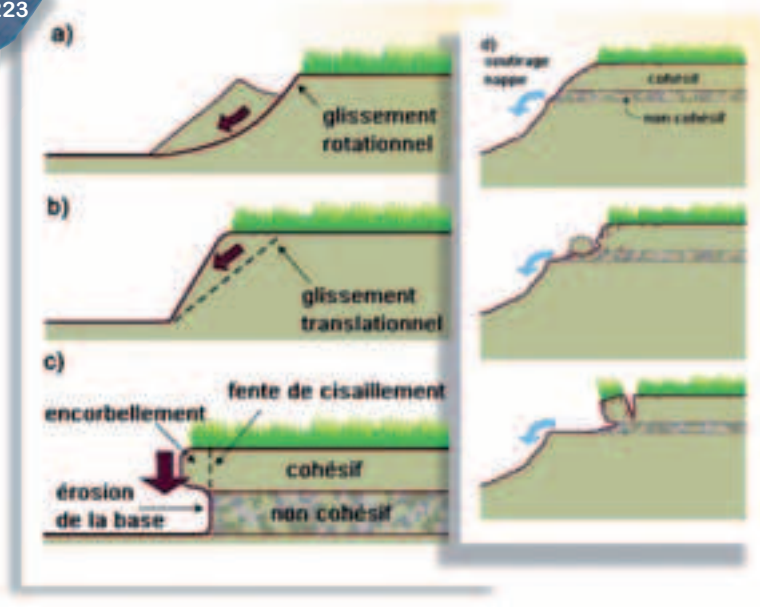


a- b- © J.R. Malavoi

Même si la berge est végétalisée par de la végétation naturelle, il est souvent possible de distinguer au moins une partie du talus, notamment la base. C'est le cas aussi lorsqu'il existe des protections de berge en mauvais état ou discontinues.

■ dégagement du talus de berge jusqu'en pied de berge. En effet, c'est le pied de berge qui est la partie la plus fragile vis-à-vis de l'érosion. Si la partie supérieure de la berge est cohésive mais le pied non cohésif, les processus d'érosion latérale peuvent être assez actifs ;

Figure 223



Exemples de types d'érosion en fonction de la nature et de la stratigraphie des berges.

■ qualification de l'érodabilité de la berge. Elle peut se faire directement sur le terrain ou *a posteriori* après prise de photographie de l'ensemble du talus de berge (si possible avec une échelle visuelle identifiable sur la photo). Ce degré d'érodabilité est décliné en quatre classes (*cf.* chapitre « score géodynamique ») : nulle, faible, moyenne, forte :

- **érodabilité nulle.** Il s'agit de berges rocheuses ou dont la granulométrie grossière, souvent héritée, fait que les particules ne peuvent plus être entraînées par le cours d'eau actuel,

Figure 224

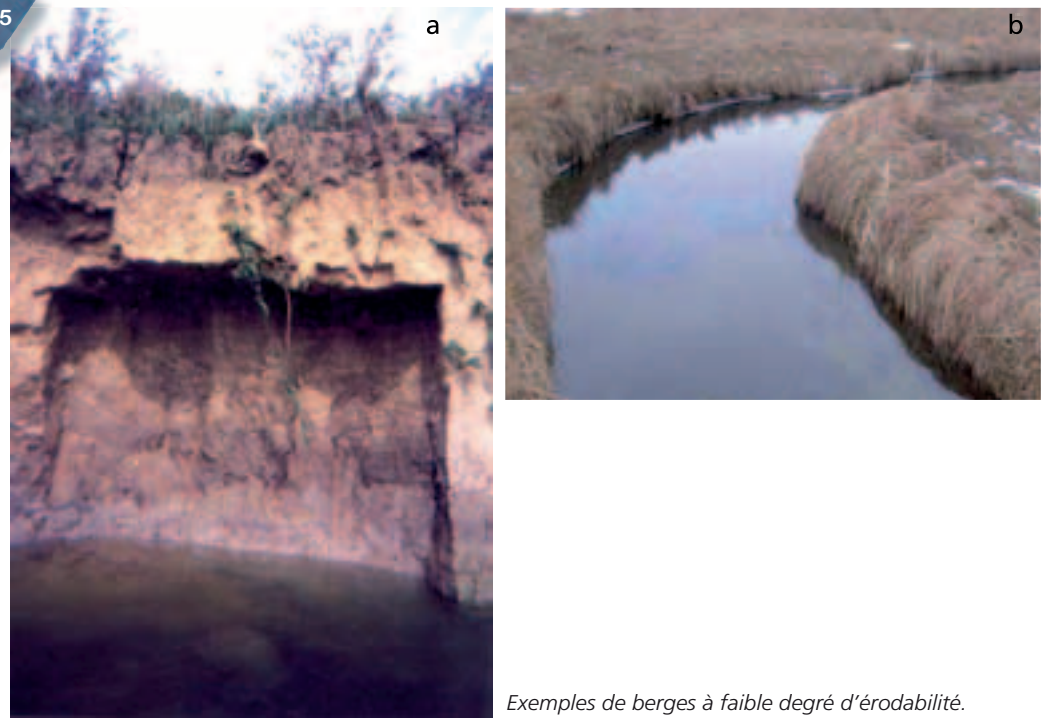
a- b- © J.R. Malavoi

Exemples de berges à degré d'érodabilité nul.

● **érodabilité faible.** Ce sont les berges argileuses (extrêmement cohésives) ou argilo-limoneuses (très cohésives) sur toute la hauteur de la berge. Malgré ce fort degré de cohésion, ces berges peuvent néanmoins être érodées, notamment après une période sèche qui permet la création de « fentes de dessication ». Celles-ci deviennent des zones de faiblesse facilitant l'effondrement gravitaire de la berge,

NB La présence de végétation sur tout ou partie du talus de la berge peut être un indicateur d'une probable faible érodabilité.

Figure 225



a- b- © J.R. Malavoi

Exemples de berges à faible degré d'érodabilité.

● **érodabilité moyenne.** Ce sont les berges où le limon est dominant soit dans la texture des alluvions (limon-sableux, voire sable-limoneux), soit dans la stratigraphie (il occupe plus des 4/5^{e} de la hauteur de berges). C'est le cas aussi de berges de granulométrie initialement non cohésive mais qui peuvent être rendues plus ou moins cohésives par précipitation de carbonate de calcium (phénomène de cimentation),

Figure 226

a- b- © J.R. Malavoi

Exemples de berges à degré d'érodabilité moyen : (a) berge limoneuse, (b) berge graveleuse rendue plus cohésive par précipitation de carbonate de calcium (effet de cimentation).

• **érodabilité forte.** Les sédiments sableux à caillouteux (jusqu'aux blocs dans les torrents de montagne), dominent sur au moins le 1/4 inférieur de la berge (érodabilité forte), voire sur toute la hauteur (érodabilité très forte),

Figure 227

a- b- c- d- © J.R. Malavoi

Exemples de berges à fort degré d'érodabilité.

• **qualification de la granulométrie.** Il peut être utile de préciser la granulométrie dominante, ou des deux strates dominantes, avec si possible un repérage stratigraphique (0 à - 2 m : limon ; - 2 à - 3 m : graviers, sables ou GGGFSG si l'on utilise la méthode visuelle citée plus haut). Cette qualification, sommaire, peut se faire *a posteriori* sur photo.