Outils d'une étude hydromorphologique

144 Généralités sur les études hydromorphologiques
146 Cartes et plans
162 Photographies aériennes
167 Données topographiques
173 Données hydrologiques
175 Autres données utiles
177 Mesures de terrain

Généralités sur les études hydromorphologiques

La première question que l'on doit se poser est : quel est l'objectif de l'étude hydromorphologique que l'on souhaite faire réaliser (si l'on est maître d'ouvrage) ou réaliser (si l'on est bureau d'étude) ?

Trois grandes catégories d'études hydromorphologiques (hors compartiment hydrologie) et donc d'objectifs, peuvent être identifiées, pour lesquelles les outils et les niveaux de résolution appropriés pourront être différents :

■ **l'étude globale.** C'est le type d'étude le plus fréquent actuellement, généralement réalisé à l'occasion de SAGE ou Contrat de Rivière. Les objectifs du volet hydromorphologique de ce type d'étude (souvent associé à un volet qualité de l'eau, un volet hydrologie, un volet risque inondation, un volet milieux aquatiques, parfois un volet économique et foncier, un volet paysage, etc.) sont de :

- comprendre le fonctionnement hydromorphologique du cours d'eau à l'échelle d'un bassin hydrographique et de tronçons homogènes,
- identifier les dysfonctionnements hydromorphologiques et leur origine,
- proposer des orientations de gestion visant à les résorber et à préserver les tronçons encore fonctionnels.

Sur les grands cours d'eau, ces études globales peuvent être réalisées par sous-bassin (SAGE Allier aval, SAGE basse vallée de l'Ain, etc.).

NB Même réalisée à l'échelle d'un sous-bassin, une étude hydromorphologique doit recueillir un minimum d'informations à l'échelle du bassin global, particulièrement dans le cas de sous-bassins aval.

■ **l'étude locale.** Il s'agit généralement de répondre à une problématique hydromorphologique spatialement localisée : risque d'érosion d'un puits de captage, risque de contournement d'un pont, risque de déchaussement d'ouvrages, risque de sur-alluvionnement au droit d'une traversée urbaine.

NB Même pour répondre à une question locale, il est indispensable de prendre un peu de recul en analysant *a minima* le fonctionnement hydromorphologique à l'échelle du tronçon concerné, voire de quelques tronçons amont et aval (apports solides, processus d'érosion régressive, etc.).

Comme l'étude globale, l'étude locale doit avoir pour objectifs de :

- comprendre le fonctionnement hydromorphologique du cours d'eau à l'échelle du tronçon homogène dans lequel se situe le problème et *a minima* les tronçons amont et aval,
- identifier les dysfonctionnements hydromorphologiques globaux et locaux éventuellement à la racine du problème motivant l'étude et leur origine (le déchaussement d'un pont peut venir d'une érosion régressive générée par une ancienne extraction située 10 km en aval),
- proposer des solutions techniques visant à résoudre le problème local et des orientations de gestion visant à résorber l'origine plus globale du dysfonctionnement, si elle a été identifiée.

■ **L'étude thématique.** C'est une étude visant généralement un objectif particulier à l'échelle d'un tronçon plus ou moins long : définition d'un espace de mobilité, étude de transport solide, étude préalable à un projet de restauration hydromorphologique...

NB Ce type d'étude thématique ne devrait en théorie être réalisé qu'à la suite ou à l'occasion d'une étude hydromorphologique globale qui aurait identifié la nécessité de cartographier un espace de mobilité ou de mieux analyser le transport solide du cours d'eau, ou de restaurer sa morphologie et ses processus géodynamiques.

La plus grande partie d'une étude hydromorphologique, et en tout cas la partie initiale, se fait au bureau, sur cartes, plans, photos aériennes, etc. Les mesures de terrain, hors visite préalable éventuelle, ne se font généralement que lorsque les éléments globaux du diagnostic sont déjà posés.

Une étude hydromorphologique, c'est comme une visite chez le médecin.

Sur 20 minutes de consultation, le praticien en passe 15 (80 % du temps) à poser son diagnostic et 5 à déterminer les remèdes les plus adaptés.
Le travail et les proportions sont les mêmes pour une étude hydromorphologique. L'essentiel de l'étude consiste à bien poser le diagnostic : quels sont les dysfonctionnements hydromorphologiques (symptômes) et quelles en sont les causes (étiologie). Si cette étape, la plus longue de l'étude, est bien réalisée, les remèdes peuvent être « facilement » identifiés.
Attention, on ne parle ici que des orientations de gestion et d'aménagement. Les avant-projets (de travaux par exemple) sont une étape ultérieure qui peut nécessiter beaucoup de temps (plans détaillés, mesures complémentaires, etc.).

L'objectif de la phase de terrain est alors :

- de vérifier certaines hypothèses (la stabilité en plan du cours d'eau dans ce secteur est probablement due à des protections de berges, il y a probablement une incision généralisée dans ce tronçon car on y a réalisé par le passé de nombreuses extractions en lit mineur, etc.) ;
- de compléter certaines informations nécessaires au diagnostic précis (granulométrie du lit, des bancs alluviaux, stratification des alluvions des berges, levés topographiques, etc.).;
- de rencontrer des personnes ressources (riverains, pêcheurs, etc.) susceptibles d'aider à la compréhension du fonctionnement du cours d'eau.

Il convient aussi de signaler que **toute étude hydromorphologique doit commencer par la lecture (éventuellement critique) des études qui ont été réalisées précédemment sur le cours d'eau** et son bassin : études hydrologiques, hydrauliques, écologiques, etc.

Cartes et plans

L'analyse des cartes, récentes ou anciennes, répond à plusieurs objectifs :

- prises isolément, elles donnent une image du cours d'eau dans son contexte géographique et historique. C'est l'approche **synchronique** ;
- en comparant des cartes de différentes époques, notamment sous SIG (Système d'Information Géographique), on obtient alors une image **diachronique** qui permet de suivre et (éventuellement) de comprendre l'évolution du cours d'eau au cours du temps.

Cartes actuelles

■ Cartes et scans IGN

Les cartes IGN (au 1 : 25 000e, 1 : 50 000e, etc.) sont aujourd'hui disponibles sur support papier, sous forme scannée géoréférencée (Scan25, 100, 1000, etc.) et sous forme vectorisée pour le 1 : 25 000e (BDtopo).

Basées sur l'interprétation des photographies aériennes, ces cartes étaient jusque dans les années 90 mises à jour environ tous les 15 ans, soit toutes les 3 séries de photographies aériennes.

■ Cadastre actuel

Le cadastre français est un outil cartographique à vocation fiscale qui sert à calculer l'assiette des impôts fonciers. Son intérêt par rapport aux cartes générales est l'échelle, comprise entre 1 : 500 et 1 : 5000. Son inconvénient majeur est que sa fréquence de mise à jour, et donc son intérêt en termes d'analyse des tracés des cours d'eau, est très variable à l'échelle nationale (voir figure 165) mais une harmonisation est en cours.

Chaque commune française est subdivisée en sections, chaque section en planches et sur chaque planche figurent une ou plusieurs unités de propriétés foncières : **les parcelles.**

Le cadastre existe actuellement sous une forme papier, une forme numérisée (raster) et une forme vectorisée, utilisable sous SIG pour réaliser diverses requêtes.

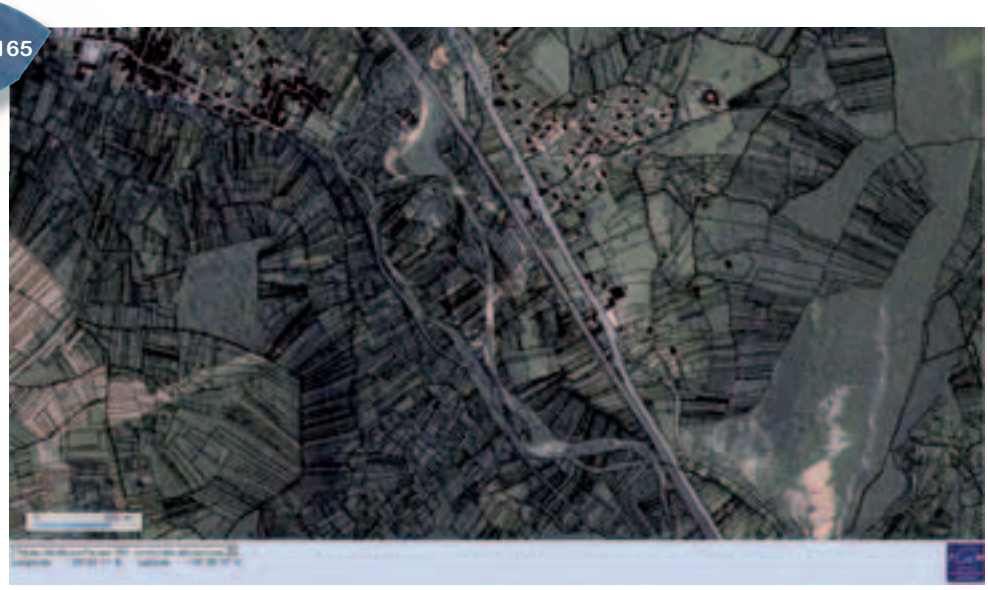
Il est maintenant aussi visualisable sur le Géoportail de l'IGN.

Figure 164

© http://www.cadastre.gouv.fr/

Exemple d'une feuille communale vectorisée. Commune d'Ambérieux (01) (source : http://www.cadastre.gouv.fr/). Notez le parcellaire très morcelé et souvent perpendiculaire au cours d'eau (en zone agricole, l'accès à l'eau est important).

Figure 165



Extrait Géoportail. © IGN 2010

Visualisation du cadastre et de la BDortho sur le Géoportail de l'IGN sur le même secteur. On constate le décalage entre le parcellaire et le tracé actuel de l'Albarine en raison d'une fréquence de mise à jour du cadastre très largement inférieure, ici, à la vitesse de déplacement latéral du cours d'eau.

■ Cartes et scans BRGM

Le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) produit des cartes géologiques de la France à diverses échelles. Elles existent actuellement au format papier, scanné, voire vectorisé.

Ces cartes géologiques permettent de situer le cours d'eau dans son contexte géologique, élément majeur du diagnostic hydromorphologique :

- à l'échelle du bassin, afin de connaître, par exemple, les caractéristiques d'érodabilité et de perméabilité des roches ;
- à l'échelle de la vallée, afin d'identifier notamment les espaces de mobilité potentielle et les « verrous » géomorphologiques (resserrements de la vallée).

La carte au 1 : 50 000e

C'est actuellement l'échelle la plus précise et la plus utile pour une étude hydromorphologique. La France métropolitaine comprend 1 060 feuilles dont chacune couvre une zone d'environ 30 km sur 20 km. Certaines de ces cartes sont maintenant disponibles sous forme vectorisée (contacter le BRGM), ce qui permet des analyses SIG très poussées.

La carte au 1 : 80 000e

L'ensemble de la France est disponible à cette échelle (55 feuilles) mais l'utilisation de ces cartes anciennes ne se justifie que dans les cas où la carte au 1 : 50 000e n'est pas encore réalisée (une trentaine de feuilles ne sont pas encore disponibles).

La carte au 1 : 250 000e

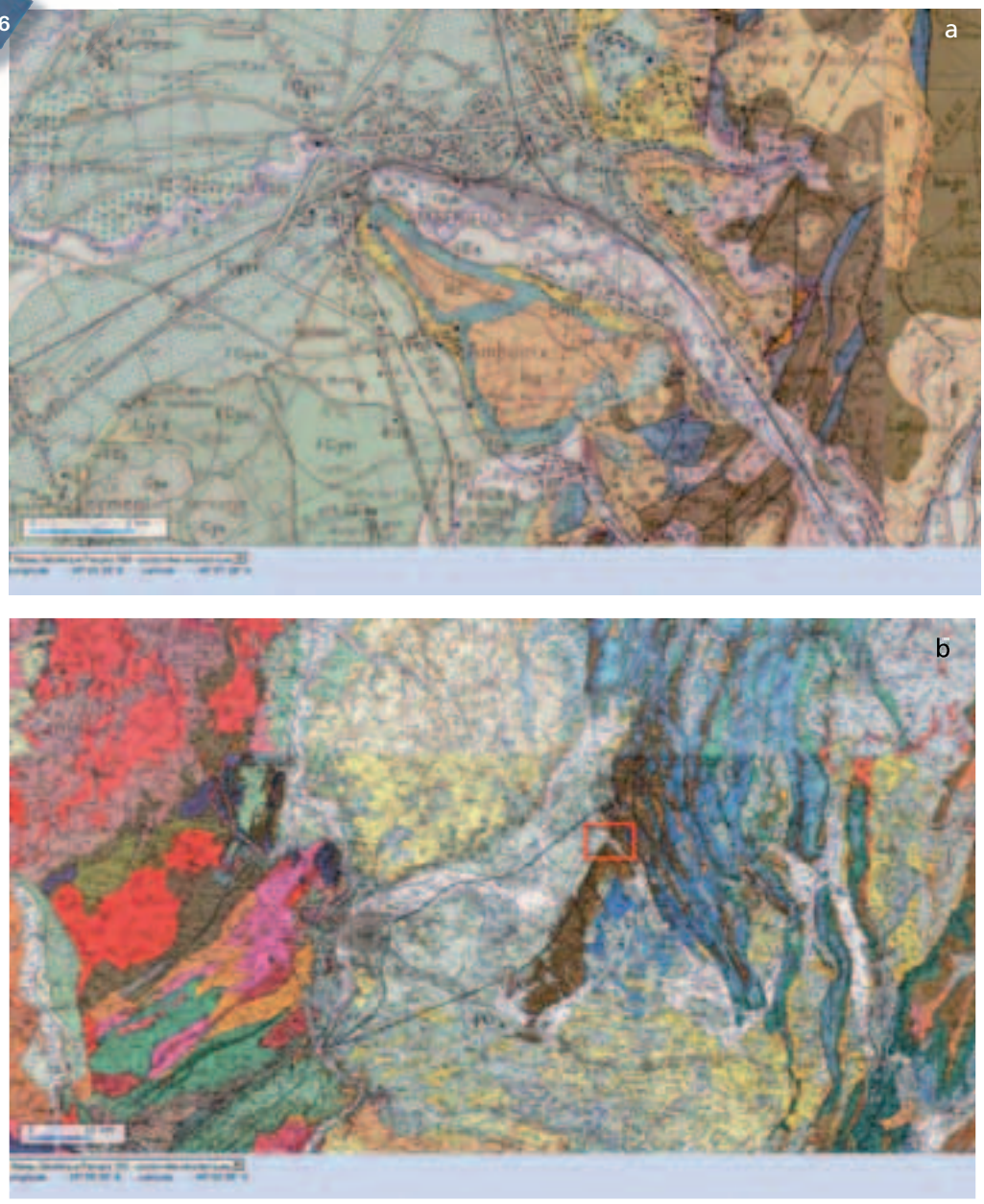
Cette carte permet des analyses à l'échelle régionale de grands bassins hydrographiques. Quinze feuilles sur 44 sont actuellement disponibles.

La carte au 1 : 1 000 000e

Cette carte présente la géologie de l'ensemble de la France. Elle est utile pour l'analyse sommaire du contexte géologique global d'un grand ou très grand bassin hydrographique (Loire, Rhône, etc.).

L'ensemble de ces cartes est aujourd'hui visualisable sur le Géoportail de l'IGN. L'échelle de la carte géologique est fonction du niveau de zoom (exemples ci-après).

Figure 166

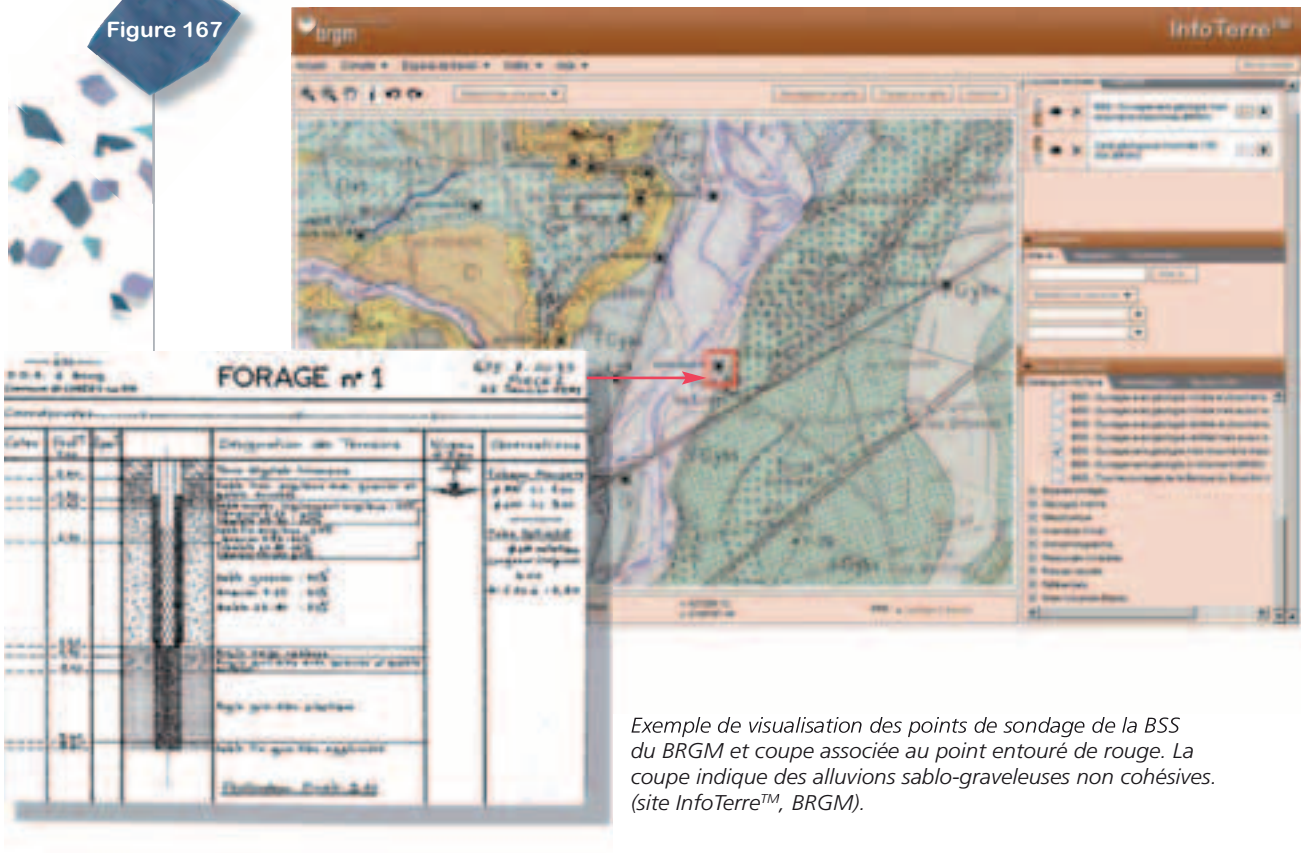


a- b- © BRGM © Géoportail IGN

Deux des trois échelles de cartes géologiques visualisables sur le Géoportail en fonction du niveau de zoom :
(a) 1 : 50 000e
(b) 1 : 250 000e

On notera aussi l'existence du site InfoTerre™ du BRGM qui permet de visualiser, outre les cartes géologiques, les coupes de terrain de la Banque du Sous-Sol (BSS). Lorsque des coupes existent dans le fond de vallée du cours d'eau, elles peuvent être éventuellement utilisées pour obtenir un premier niveau d'information sur la nature des sédiments du lit majeur… qui deviennent les sédiments des berges lorsque le cours d'eau les traverse. On obtient donc ainsi des éléments sur la nature potentiellement cohésive ou non des berges, qui est l'un des éléments de contrôle majeur des processus géodynamiques.

Figure 167



© BRGM

Exemple de visualisation des points de sondage de la BSS du BRGM et coupe associée au point entouré de rouge. La coupe indique des alluvions sablo-graveleuses non cohésives. (site InfoTerre™, BRGM).

Cartes anciennes disponibles sur toute la France

■ Carte de Cassini

En 1747, Louis XV confie à César Cassini de Thury le levé d'une carte du royaume qui devient ensuite la « Carte générale et particulière de la France », première carte de base réalisée sur l'ensemble de la France. La première feuille (Paris) est publiée en 1756. La Carte de Cassini est à l'échelle du 1/86 400e.

Les **points de repère majeurs** de la carte sont les **clochers** des villages, dont la position est jugée immuable et pouvant servir de référence pendant des siècles. Pour chacune des feuilles, des centaines de ces positions sont déterminées par triangulation et rattachées à la triangulation générale du royaume réalisée en 1744. La carte est achevée en 1815 par le fils de César, Dominique Cassini. Les moulins sont localisés avec une bonne précision (notamment pour des raisons fiscales car les moulins sont soumis à impôts). C'est une information intéressante car elle permet de connaître rapidement l'âge minimal d'un ouvrage et son régime juridique (les moulins présents sur la carte ont généralement des « droits fondés en titre »).

Les cartes de Cassini sont disponibles sous diverses conditions de prix à la cartothèque de l'IGN (service public) sous forme de simples photocopies ou de fichiers scannés. Elles peuvent être assez correctement géoréférencées sous SIG en utilisant pour le recalage le centre des cercles figurant les clochers des églises (cercles surmontés d'une croix). Il suffit alors de déterminer les coordonnées Lambert de ces mêmes cercles à partir du Scan25 : ils sont en théorie au même endroit.

En revanche, la précision du tracé des cours d'eau est très variable selon que l'on est en plaine (assez bonne précision) ou en montagne (faible précision) et selon que le cours d'eau est grand (assez bonne précision) ou petit (< 20 - 30 m, faible précision).

Les cartes de Cassini sont visualisables sur le Géoportail de l'IGN.

■ Cartes d'Etat-major

La carte d'État-Major est une carte générale de la France réalisée au XIX^{e} siècle. C'est une carte initialement à vocation militaire visant à bien connaître le terrain et particulièrement les routes et les rivières (elle était dénommée initialement « carte du Dépôt de la Guerre », à l'échelle du 1 : 40 000^{e}). Elle est réalisée sur la base d'un réseau de triangulation densifié. Commencée vers 1820, la première série de la carte est achevée au début des années 1860. A la fin du XIX^{e} siècle, les minutes sont encore levées au 1 : 40 000^{e} et les cartes diffusées au 1 : 80 000^{e}.

Les cartes d'Etat-Major sont disponibles sous diverses conditions de prix à la cartothèque de l'IGN (service public) sous forme de simples photocopies ou de fichiers scannés.

NB On peut demander les minutes au 1 : 40 000^{e}, plus précises que les cartes finales.

Figure 168

Fond carte de Cassini. © IGN 2010

Extrait de la carte de Cassini (1 : 86 400e) dans la région de Parcey-sur-Loue (39).

Figure 169

Fond carte d'Etat-Major. © IGN 2010

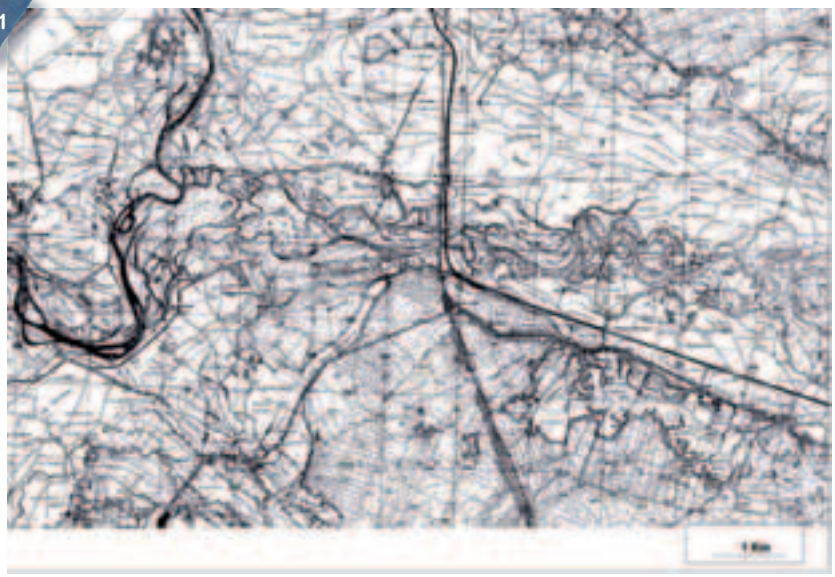
Extrait de la carte du Dépôt de la Guerre de 1834 (1 : 40 000^{e}), sur le même secteur.

Figure 170

Fond carte d'Etat-Major. © IGN 2010

Extrait de la carte d'Etat-Major de 1913 (1 : 40 000e), sur le même secteur.

Figure 171



Fond carte d'Etat-Major. © IGN 2010

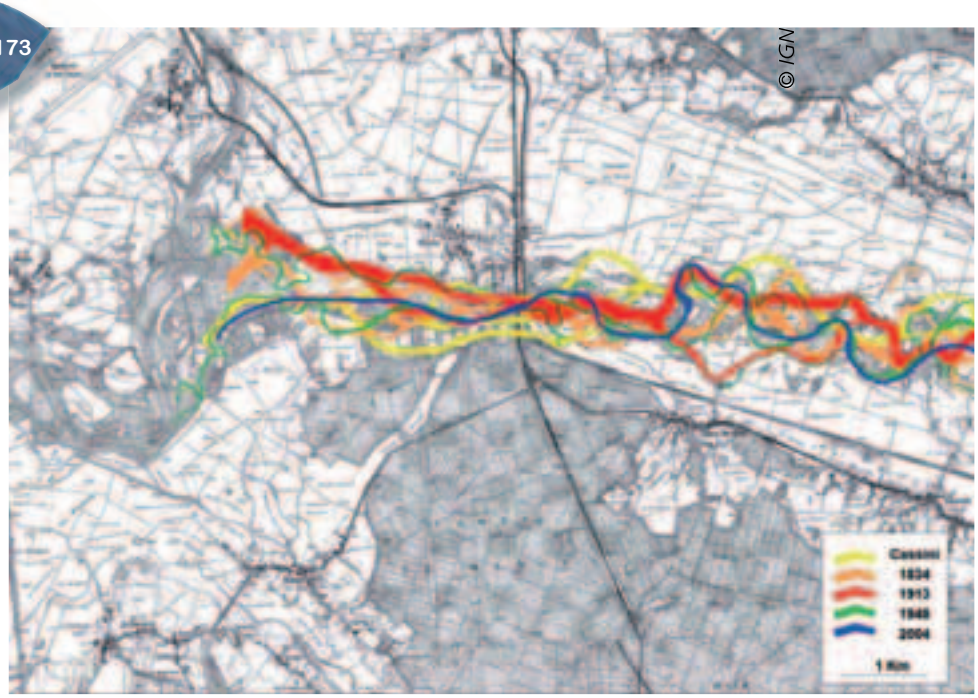
Extrait de la carte de 1948 (1 : 20 000e), sur le même secteur.

Figure 172

Fond SCAN 25®. © IGN 2010

Extrait de la carte IGN de 1985 (1 : 25 000e) sur le même secteur.

Figure 173



Fond SCAN 25®. © IGN 2010

Exemple de carte diachronique présentant les divers tracés digitalisés sous SIG (2004 est le tracé correspondant à la BDOrtho) (Malavoi, 2006).

NB Les cartes d'Etat-Major et les autres cartes topographiques anciennes peuvent être géoréférencées de la même façon que les cartes de Cassini (clochers) et/ou en utilisant d'autres points de repère reconnaissables sur le Scan25 (croisements de routes par exemple).

Autres cartes, plans et documents anciens

On peut trouver des cartes et plans anciens dans divers services ou collectivités.

NB Sur les cartes anciennes, le nord est souvent en bas.

■ Aux archives départementales

Doivent normalement y être versés les documents antérieurs à 1940.

Cartes générales

On trouve de très nombreuses cartes où apparaissent des éléments du réseau hydrographique, même si celui-ci n'est pas directement l'objet de la carte. Certaines peuvent parfois être géoréférencées et servir de support à des analyses diachroniques.

Figure 174

Plan de la ville de Montpellier (archives départementales de l'Hérault, 1750).

Figure 175

Exemple. Projet de chemin (nord en bas). Fin du XVIII[e] siècle (AD du Tarn : exposition virtuelle : Cartes et Plans d'Ancien Régime).

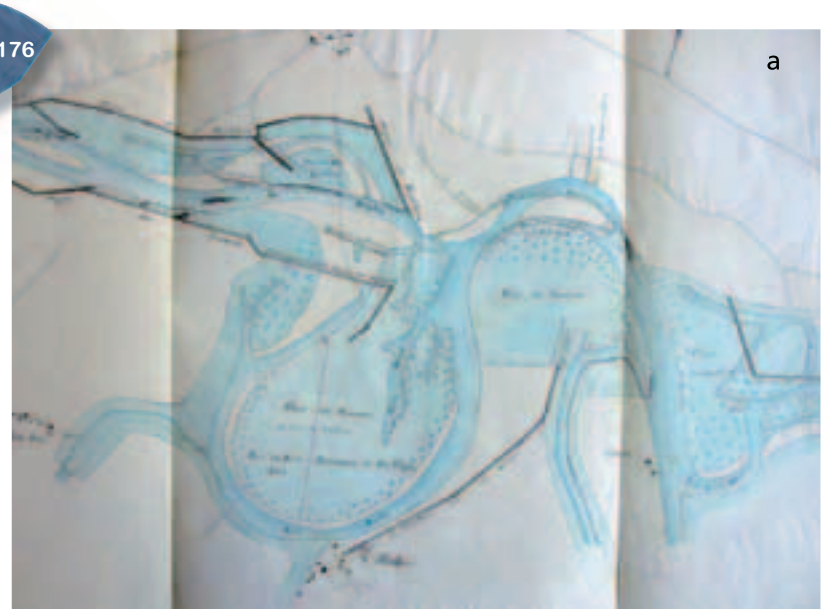
Séries Travaux publics-Mines-Transports-Eaux et Forêts

Les archives regroupées sous ces intitulés proviennent de la Préfecture, de la Direction Départementale des Ponts et Chaussées (DD de l'Equipement aujourd'hui), du bureau de l'ingénieur en chef des mines, des services départementaux des Eaux et Forêts (DD de l'Agriculture et de la Forêt aujourd'hui).

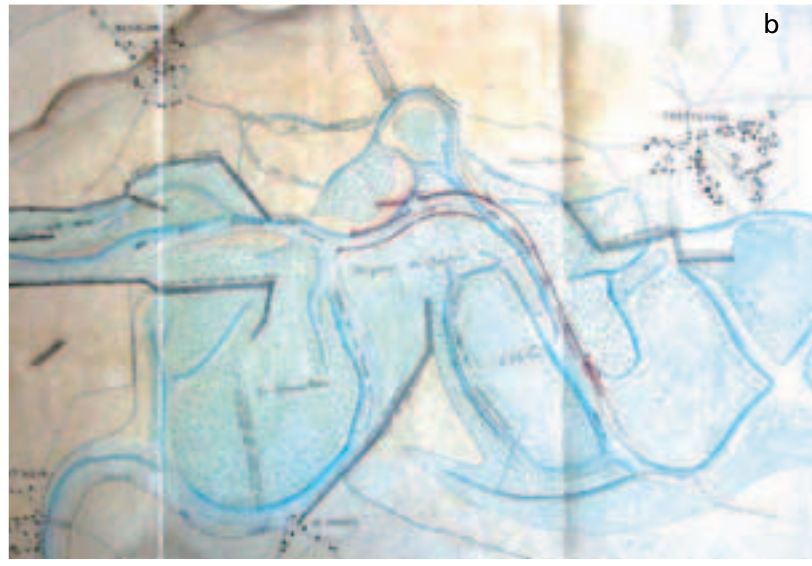
NB Les services départementaux de l'équipement, de l'agriculture et de la forêt sont regroupés en un seul service, la DDT depuis le 1/01/2010.

On y trouve généralement des plans ou des avant-projets de travaux, des plans et coupes d'ouvrages (ponts, digues, etc.) ainsi que, parfois, les documents écrits accompagnant ces plans (notices de travaux).

Figure 176



1859



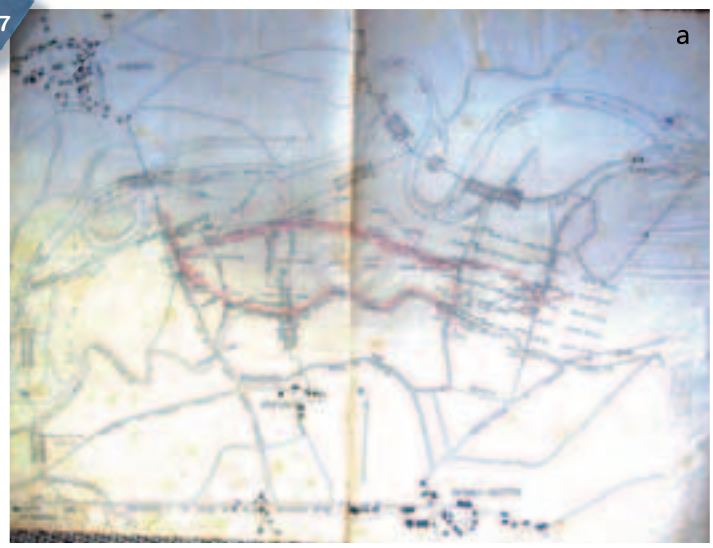
1876

1882

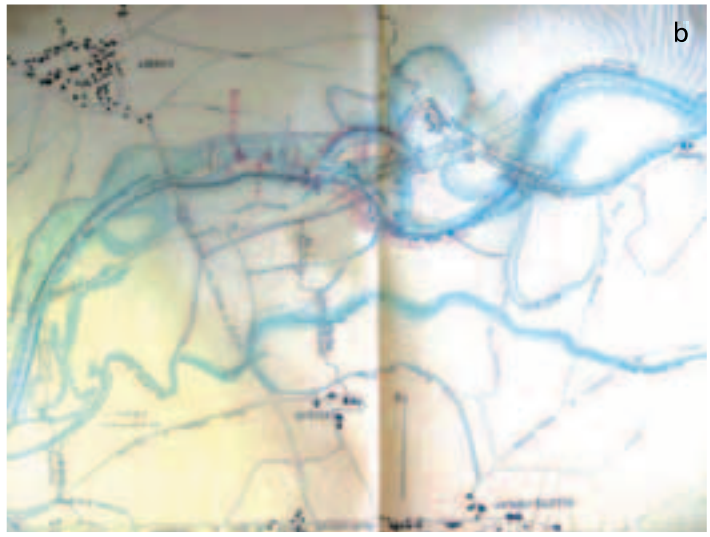
Trois cartes d'avant-projets de travaux qui permettent, notamment, de suivre l'historique d'aménagement (ici la progression de l'endiguement sur le Doubs aval) (AD du Jura). Le nord est en bas.

Certains de ces cartes et plans anciens peuvent parfois être géoréférencés, si y sont représentés suffisamment de repères encore visibles aujourd'hui (croisement de routes, de chemins).

Figure 177



1889



1898

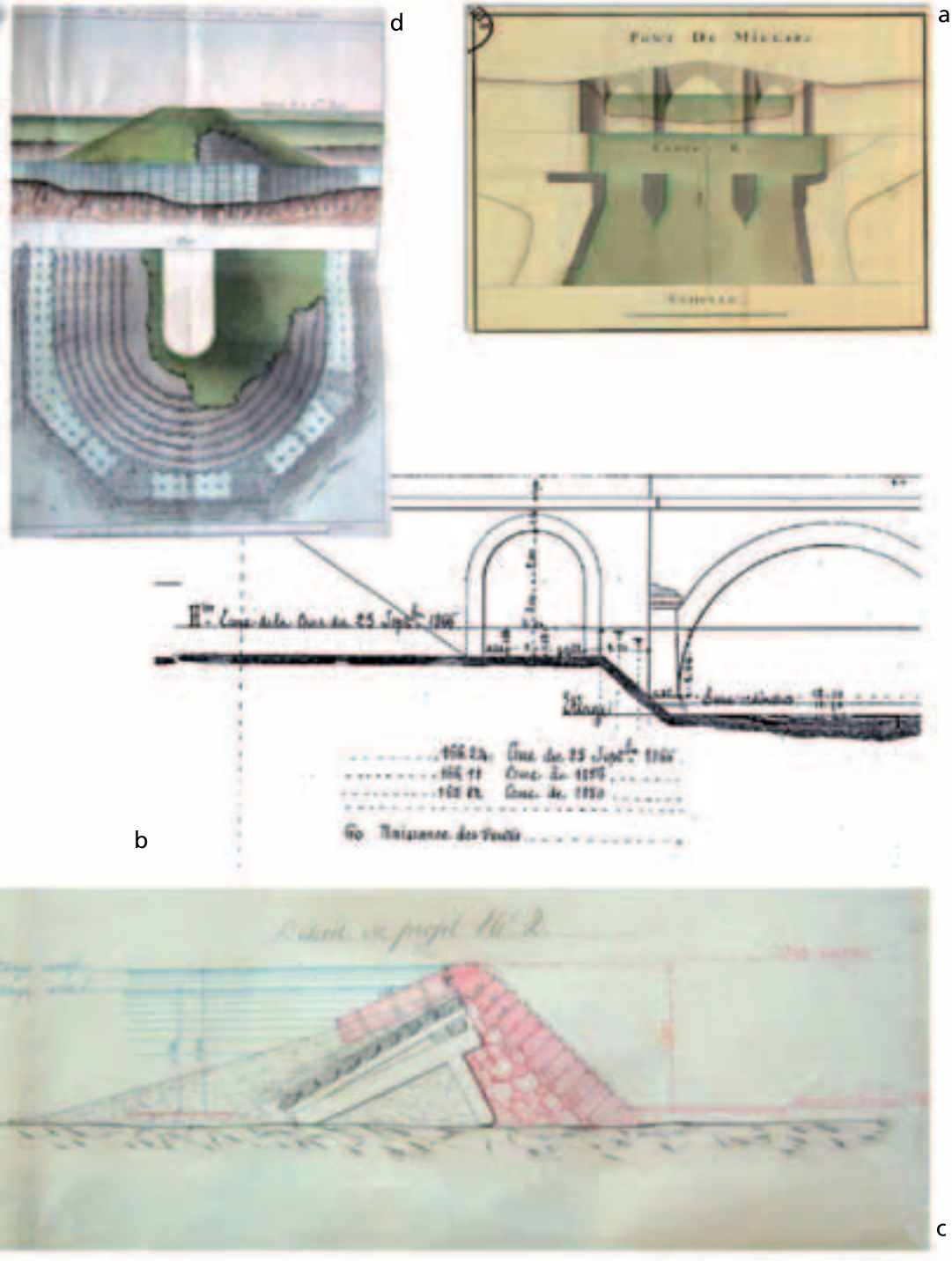
Deux cartes de la Loue avec avant-projets de travaux (digues et rescindements de méandres). Elles ont pu être géoréférencées sur la base des croisements de routes (AD du Jura). (Le nord est en bas sur le document original, nous l'avons remis dans le sens du système cartographique Lambert, d'où des textes « à l'envers ».) On observe qu'il y a eu un recoupement naturel du méandre par déversement puis un déplacement latéral très rapide du nouveau tracé.

Figure 178

Fond BD ORTHO® 2006. © IGN 2010

Les tracés de la Loue de 1889 et 1898 (y compris l'avant-projet de rescindement).

Figure 179



a) Pont de Milhars (plan de 17??) (AD du Tarn), b) pont de Tonnerre (1866), c) avant-projet d'épi sur le Doubs (1844) (AD du Jura), d) coupe d'un seuil sur le Doubs (AD du Doubs).

Les plans et coupes d'ouvrage sont très utiles pour diagnostiquer certains dysfonctionnements, comme l'incision du lit mineur, voire quantifier leur ampleur. On y trouve souvent aussi des indications sur les hauteurs de crues anciennes (*cf.* ci-dessus).

Cadastre napoléonien

En 1807, Napoléon 1er demande à son ministre du Trésor, N.F. Mollien, de créer un cadastre couvrant toutes les communes de l'Empire, avec arpentage et cartographie de chaque parcelle de propriété. L'objectif était la connaissance précise des propriétés foncières en vue d'une meilleure répartition de l'impôt. Ce travail connu sous le nom de « cadastre napoléonien » s'est achevé en 1847.

Pour chaque commune, il existe un tableau d'assemblage à l'échelle du 1 : 10 000e au 1 : 20 000e, représentant la totalité du territoire communal et des plans de section à l'échelle du 1 : 1 000e au 1 : 2500e.

Les nombreux points de repère disponibles sur ces plans (sauf en pleine campagne, au milieu des champs), croisements de routes notamment, permettent souvent de géoréférencer correctement ce cadastre et de l'utiliser comme outil précis de cartographie diachronique.

Figure 180

Extraits du cadastre Napoléonien (a) tableau d'assemblage (b) zoom sur la zone A5 (commune de St Maurice de Remens, 01).

A noter que le cadastre napoléonien avait été précédé, toujours sous l'Empire, par les Plans par masses de culture ; ils représentent les limites des parcelles lorsque l'on change de grande catégorie d'affectation du sol : terres labourées, prairies, bois…

Mappes sardes

Le cadastre sarde, appelé aussi « mappe » sarde, concerne les départements actuels de Savoie et Haute-Savoie. Réalisé entre 1728 et 1738 par l'administration du royaume de Piémont-Sardaigne, c'est le plus ancien cadastre européen cartographié. L'échelle est d'environ 1 : 2400e.

NB On trouve aussi aux archives départementales les contentieux ayant trait aux cours d'eau, ce qui est très intéressant du point de vue de la connaissance du contexte sociologique et historique d'un cours d'eau et de son territoire.

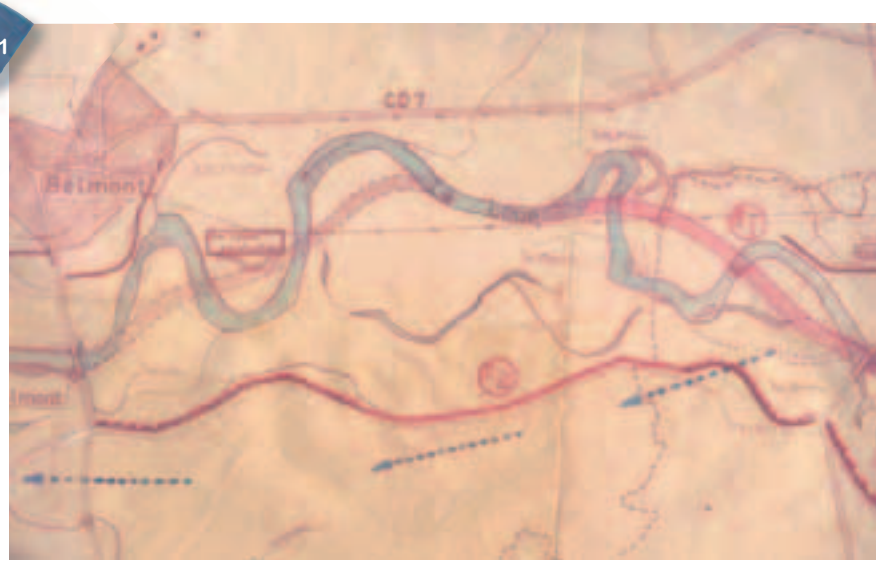
■ Dans les archives des services de l'Etat

On trouve dans les archives des divers services de l'Etat, et particulièrement des Directions Départementales de l'Equipement et de l'Agriculture (aujourd'hui DDT), les documents postérieurs à 1940 qui n'ont pas encore été versés aux archives départementales. Il est toujours extrêmement intéressant d'y programmer une visite assez longue. La difficulté majeure vient du fait que les méthodes d'archivage sont très variables d'un service et d'un département à l'autre.

Notices, plans et coupes d'avant-projets de travaux

Les notices de travaux, plans d'avant-projets, coupes, etc., permettent de connaître assez précisément l'histoire récente de l'aménagement d'un cours d'eau. La précision des plans permet souvent une bonne localisation des profils en travers qui peuvent alors être utilisés comme référence pour de nouveaux levés.

Figure 181



© DDE 39

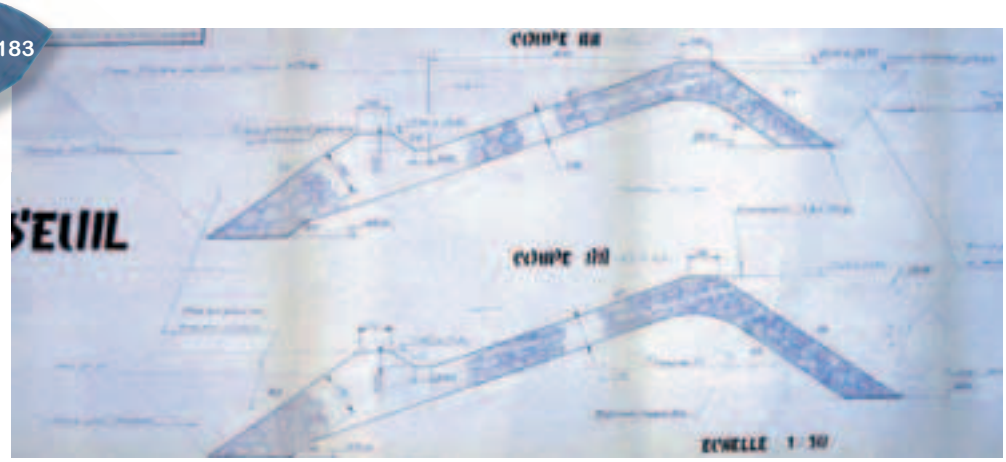
Plan d'avant-projet de travaux de rescindement de méandres sur la Loue (1958).

Figure 182

© DDAF 01

Notice de travaux d'aménagement de la Veyle, plans et profils en travers d'exécution (années 60, DDAF 01). Noter le « recalibrage » proposé : largeur et profondeur à pleins bords multipliées par 2 à 3.

Figure 183



© DDE 71

Coupe type d'un seuil (années 80, DDE 71).

Photographies

On trouve parfois des photographies terrestres ou aériennes, notamment avant, pendant ou après les chantiers de travaux.

Figure 184

© DDE 39

Exemples de photographies aériennes obliques de chantiers en cours sur le Doubs aval (années 60, DDE 39).

Figure 185

a- b- c- d- © DDE 39

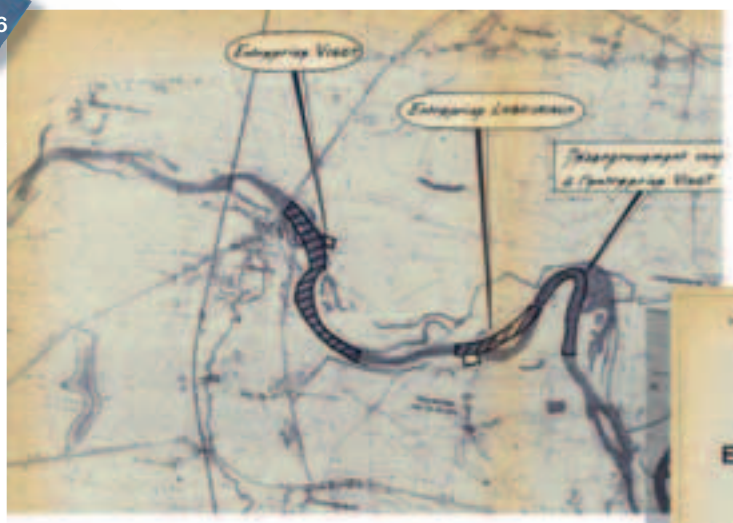
(a) Plans (site D4), (b) photos aériennes et (c, d) terrestres des travaux de rescindement de la Loue en amont du pont d'Ounans (années 60).

Données concernant les extractions

On trouve assez facilement, sur les cours d'eau domaniaux, des données concernant les extractions, notamment l'emplacement des concessions d'exploitation et parfois les profils autorisés. Elles sont très utiles pour établir le diagnostic de fonctionnement hydromorphologique sous l'angle du transport solide.

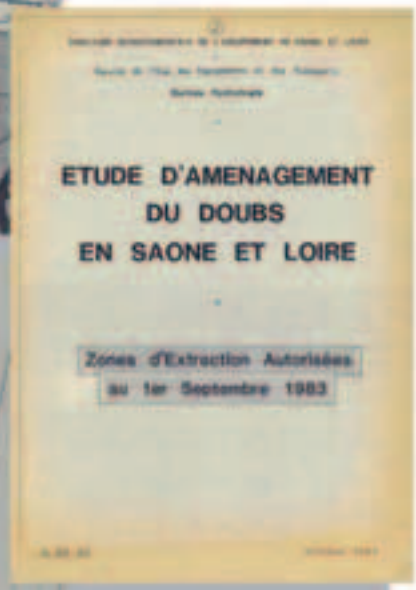
Figure 186

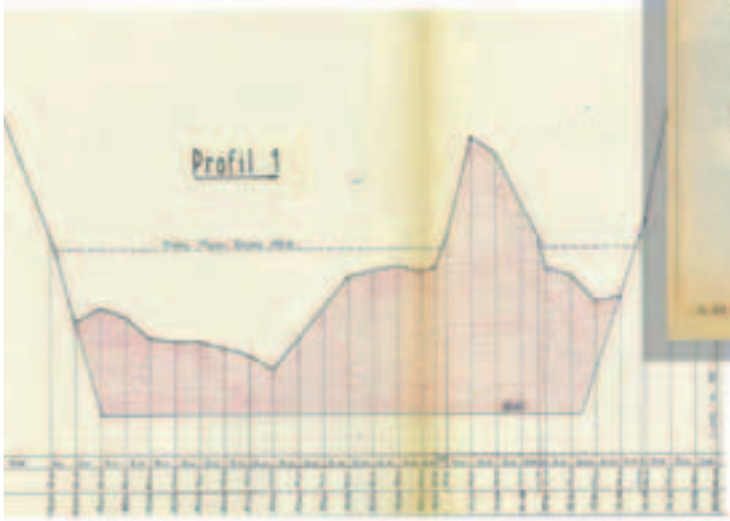
a



© IGN 2010

b





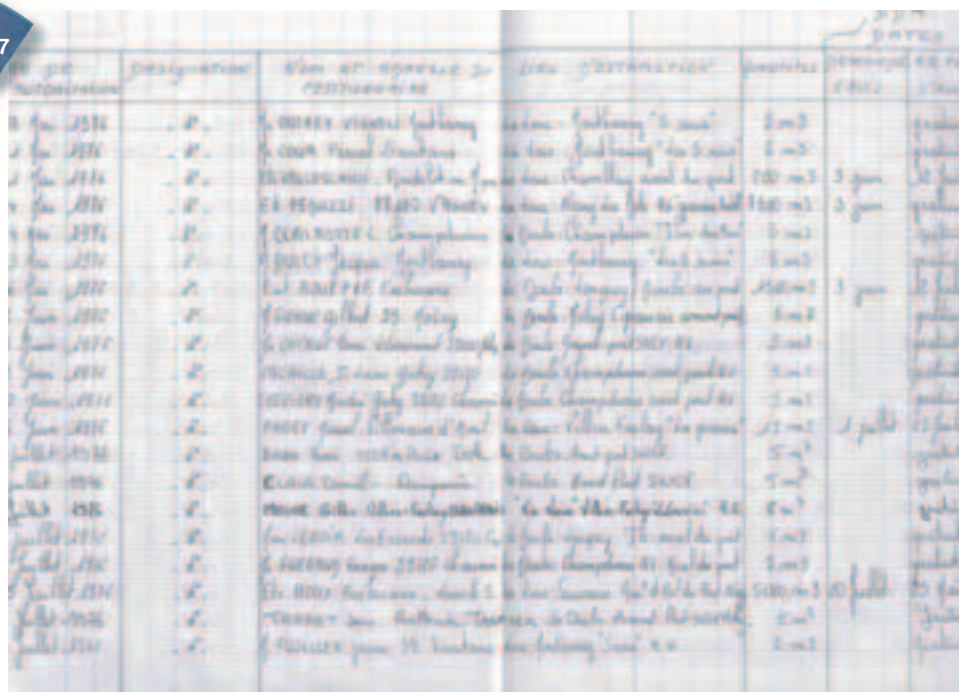
c

a - b - c - © DDE 71

Exemples d'informations concernant les anciennes extractions en lit mineur sur le Doubs aval (DDE 71), notamment un profil d'exploitation autorisée. Notez le « désengravement » confié à certaines entreprises d'extraction au titre de l'entretien du DPF (qui n'est pas soumis aux mêmes règles que les extractions).

On découvre parfois des informations plus frustes mais néanmoins intéressantes, comme les **carnets d'extraction** conservés dans les services.

Figure 187



© DDE 39

Exemple de carnet d'extraction tenu par la DDE du Jura. On y repère aussi bien l'enlèvement de tombereaux de graviers (par unité de 5 m³) que des extractions plus intensives.

■ Dans les archives communales

Cartes de toutes natures et à toutes les échelles, théoriquement postérieures à 1940 car les autres devraient avoir été versées aux Archives départementales.

■ Dans d'autres archives

Les archives de la SNCF possèdent des documents concernant les cours d'eau pour toutes les lignes longeant des rivières ou tout ouvrage de franchissement. On y trouve des plans, des profils en travers, des coupes d'ouvrage, etc. (centre d'archives historiques de la SNCF, Le Mans).

Photographies aériennes

Par rapport aux cartes, les photographies aériennes apportent deux avantages majeurs :

- leur mise à jour est beaucoup plus fréquente ;
- leur possibilité d'analyse est bien supérieure : on distingue le type d'occupation des sols, les bancs alluviaux, la nature de la végétation (avec un peu d'expérience…), etc.

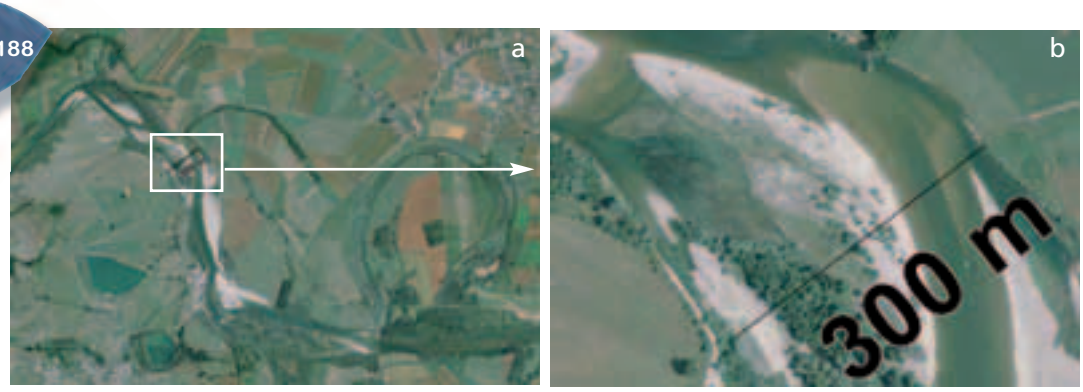
Photographies aériennes actuelles

■ La BD ORTHO® de l'IGN

La BD ORTHO® de l'IGN est une base de données de photographies aériennes numériques géoréférencées. Elle est disponible sur l'ensemble du territoire national et mise à jour tous les cinq ans (prochainement tous les trois ans). Elle est réalisée à une résolution de 0,5 m, 1 m, 2,5 m et 5 m (les deux dernières, beaucoup moins chères que les deux autres, sont peu utilisables pour une approche hydromorphologique). **Le coût moyen au km² pour la résolution 0,5m est de 1 euro** (variable fonction de la superficie commandée, *cf.* site de l'IGN).

NB La BD ORTHO agglo® est diffusée sur les grandes agglomérations avec une résolution de 0,2 à 0,3 m.

Figure 188



a- b- Fond BD ORTHO® 2006. © IGN 2010

Un extrait de la BD ORTHO® à la résolution de 0,5 m. Le zoom permet de distinguer la microtopographie des bancs et des masses alluviales en mouvement, les hauteurs d'eau relatives, le type de végétation, on distingue même les berges d'érosion.

■ Les photographies « satellitales »

Les photographies prises depuis des satellites peuvent compléter, voire remplacer les photographies aériennes. Elles offrent l'avantage d'être moins chères et d'un pas de renouvellement beaucoup plus important que les photographies de la BD ORTHO® (quelques jours). Elles offrent en outre des possibilités d'analyses spectrales qui permettent un traitement plus complexe de l'information (humidité des sols, état de la végétation, etc.).

Quelques exemples de sociétés privées fournissant des images satellitales sont donnés ci-dessous :

- Spot Image. Plusieurs satellites SPOT fournissent actuellement des images jusqu'à une résolution au sol de 2,5 m et devraient à terme fournir une résolution de 0,5 m ;
- Digital Globe. Cette société fournit des images d'une résolution de 0,5 m (images panchromatiques satellite Worldview1) ou de 2,5 m (images multispectrales Quickbird) ;
- Geo Eye. Cette société peut fournir des images d'une résolution de 0,4 m.

■ Les photographies aériennes à haute résolution

Il est possible aujourd'hui de réaliser des photographies aériennes à très haute résolution (pixel de quelques cm) grâce au développement des appareils numériques, de plus en plus légers et de plus en plus performants.

Ces photographies peuvent être réalisées depuis des aéronefs pouvant voler à faible vitesse (ULM, hélicoptères, drones). Elles peuvent être réalisées, selon les objectifs de l'étude, en prises de vue verticales (orthorectifiables et géoréférençables sous certaines conditions) ou obliques. La miniaturisation des GPS embarqués permet de positionner précisément chaque prise de vue.

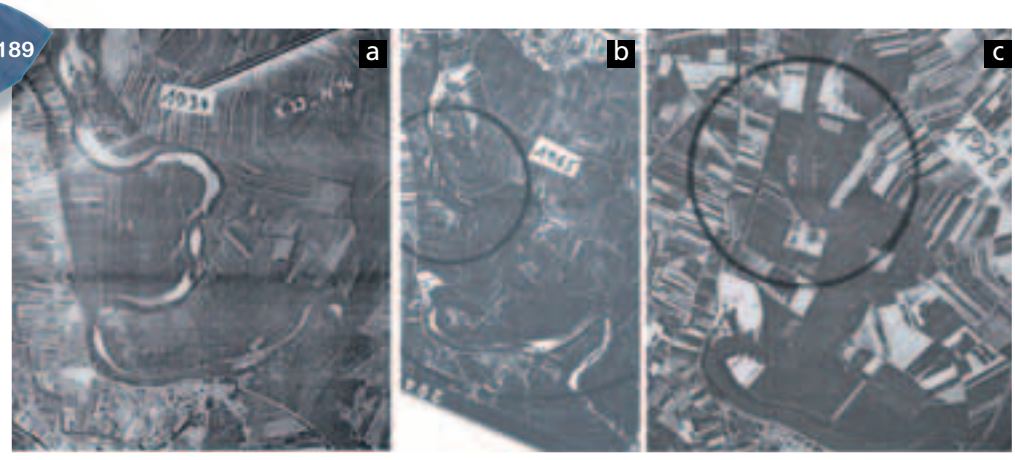
Photographies aériennes anciennes

Les plus anciennes photographies aériennes **verticales** disponibles auprès de la photothèque de l'IGN datent des années 20 ; elles étaient initialement réalisées par le service cartographique des Armées. C'est après la seconde guerre mondiale que les relevés photographiques aériens, qui deviennent la donnée de base des nouvelles cartes au 1 : 20 000e puis 1 : 25 000e, sont intensifiés avec un pas de temps quinquennal.

Attention. Les photographies aériennes (sauf BD ORTHO®) ne sont pas orthorectifiées ni redressées et seul le tiers central de la photo n'est pas déformé par la focale de prise de vue. Il existe des logiciels qui permettent de le faire ou des sociétés spécialisées. On peut aussi acheter toutes les photographies qui généralement se recouvrent (pour l'analyse photogrammétrique), n'en garder que le tiers central et les assembler.

On peut enfin accepter une certaine erreur liée à cette déformation de l'image (erreur très variable selon le relief), notamment dans le cadre d'études diachroniques de tracés de cours d'eau ne requérant pas une grande précision.

Figure 189



Fond photographie aérienne a- 1937, b- 1965, c- 1978 © IGN 2010

Exemple de séries de photographies aériennes utilisables dans le cadre d'une étude diachronique. Il s'agissait ici d'étudier l'évolution du Gardon au droit d'un futur ouvrage de franchissement TGV (cercle noir). Noter le pincement progressif du méandre sud, en amont du village de Comps.

Survols à basse altitude

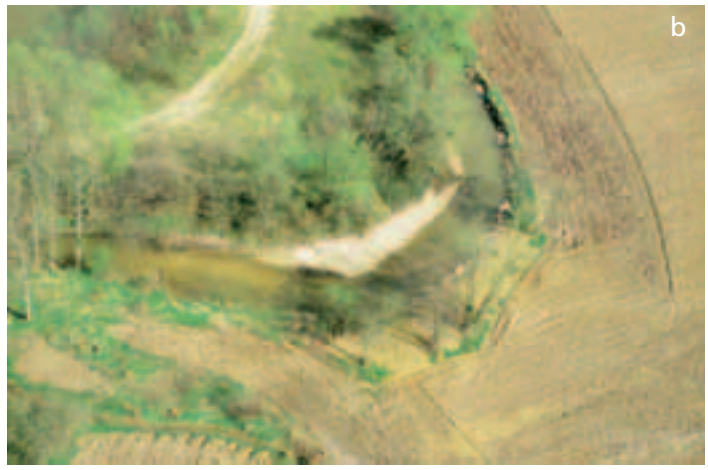
Les prises de vues obliques, réalisées à l'occasion de survols aériens à basse altitude, sont très informatives car elles donnent une échelle d'analyse intermédiaire entre le terrain, « au ras de l'eau », et la photographie aérienne verticale.

Sur les grands cours d'eau ou ceux ne présentant pas une ripisylve trop fournie, ce type de survol permet souvent de localiser précisément les protections de berges, d'évaluer l'état des ouvrages de type seuil, etc.

L'un des avantages majeurs de cette approche est de permettre de réaliser une investigation rapide et exhaustive de la totalité d'un cours d'eau en quelques heures.

L'idéal est de voler à environ **100 - 200 m du sol**. L'aéronef le plus pratique est l'hélicoptère (environ 300 à 400 euros/h pour un 2 places, le double pour un 4 - 5 places), mais l'ULM est très bien aussi et beaucoup moins cher (100 à 150 euros/h). L'avion (prendre un appareil avec ailes hautes) vole un peu trop vite mais peut être utilisé faute de mieux. Il est souvent intéressant de réaliser aussi des prises de vue vidéo.

Figure 190



a- b - © C. Thévenet

c- d- © J.R. Malavoi

Exemples de prises de vue à basse altitude (100 à 200 m du sol). On peut observer de nombreux détails comme les érosions et les protections de berges, l'état (approximatif) des ponts ou des seuils, les faciès d'écoulement, etc.

Géoportail de l'IGN et Google Earth

Ces deux outils permettent d'obtenir très rapidement sur Internet des photographies aériennes récentes (avion ou satellite).

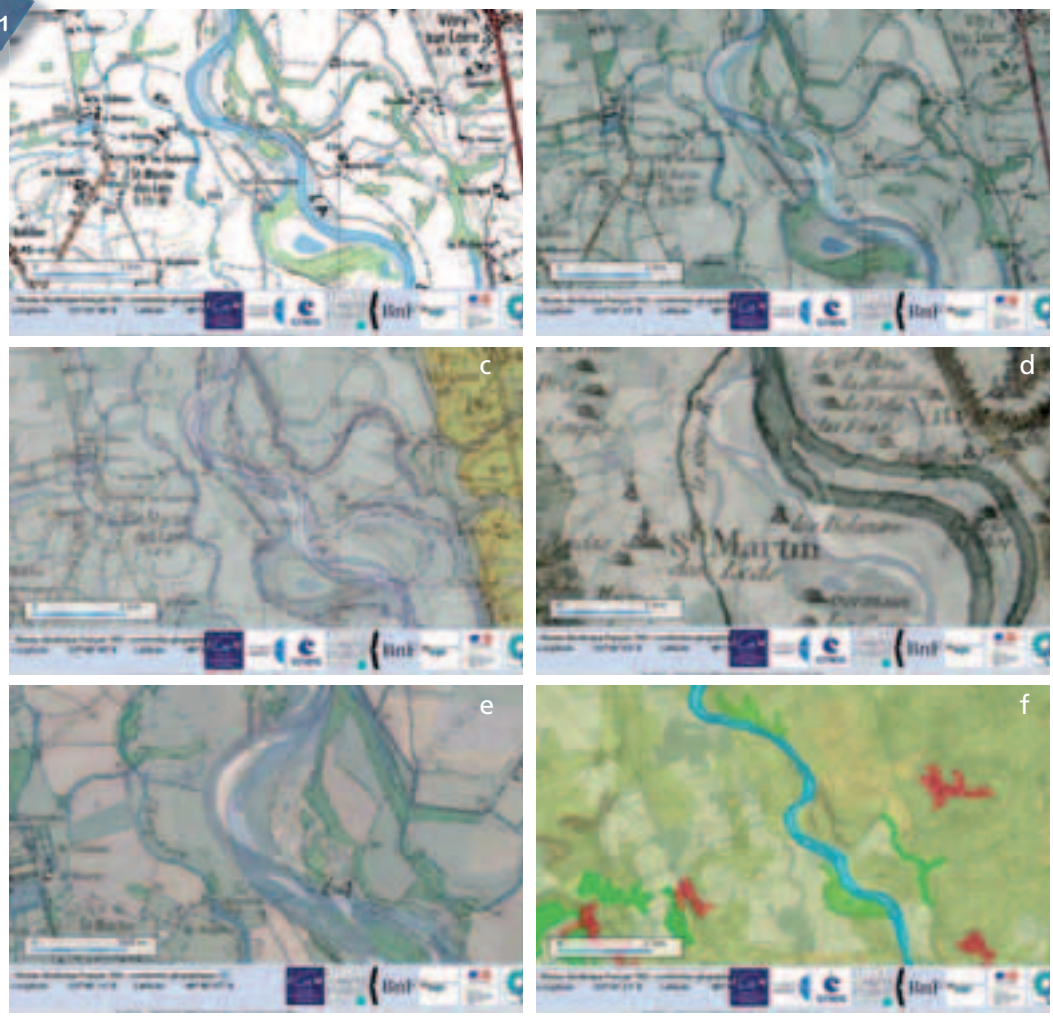
Google Earth offre des images du monde entier avec une résolution variable selon les endroits du globe, mais parfois égale (voire supérieure) à 0,5 m.

Le Géoportail de l'IGN permet de visualiser la France (et les DOM-TOM) avec une résolution théorique de 0,5 m (BD ORTHO®) mais qui est souvent moins bonne car l'outil zoom y est (actuellement) limité.

L'avantage principal du Géoportail est qu'il permet d'afficher outre les dernières photographies aériennes (Spot ou BD ORTHO® selon le niveau de zoom), de nombreuses autres informations telles que les cartes IGN (à toutes les échelles, fonction du niveau de zoom), les cartes géologiques (id.), le réseau hydrographique numérisé, les limites administratives, le relief, le cadastre numérisé, l'occupation des sols Corine Land Cover, etc.

La version 3D permet de visualiser le relief en trois dimensions et offre aussi des outils de mesure de longueur et de surface.

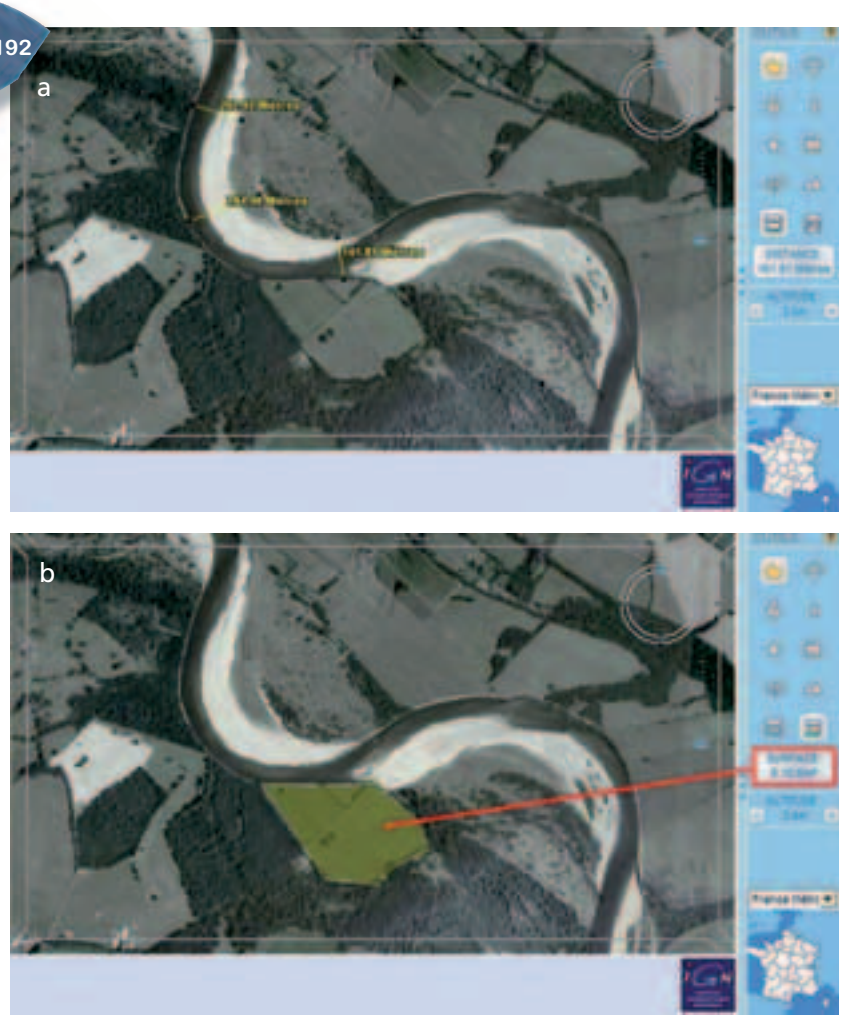
Figure 191



Exemples de couches disponibles sur le Géoportail : (a) Scan25 (ancien); (b) scan25 + Spotimage en jouant sur l'opacité des couches, ce qui permet parfois de mesurer des érosions actives, comme c'est le cas ici (à un niveau de zoom plus fin c'est la BD ORTHO® qui s'affiche (voir (e)); (c) carte géologique au 1 : 50000e + Spotimage; (d) Cassini + Spotimage; (e) BD ORTHO® + Scan25, on distingue bien l'érosion active du méandre; (f) à un niveau de zoom inférieur occupation des sols Corine Land Cover + Spotimage.

a- b- c- d- e- f- Fond Géoportail. © IGN 2010

Figure 192



a- b- Fond Géoportail. © IGN 2010

Exemples d'utilisation de la version 3D du Géoportail. Mesures de longueurs et de surfaces.

NB Ces informations sont susceptibles de changer rapidement car le Géoportail est en constante évolution.

Données topographiques

Les données topographiques sont un élément essentiel du diagnostic hydromorphologique, notamment pour identifier, voire quantifier les processus d'incision ou d'exhaussement. Malheureusement, les données topographiques anciennes sont moins fréquentes, moins homogènes à l'échelle nationale et moins facilement disponibles que celles concernant le tracé en plan.
Si l'on en trouve (profils en long, en travers, semis de points), il peut être alors extrêmement intéressant d'en faire réaliser de nouvelles afin de qualifier et quantifier une éventuelle évolution topographique du cours d'eau, tant à l'échelle globale que locale.

NB D'un point de vue pratique, notamment pour le maître d'ouvrage, il est important de toujours prévoir un budget topographique assez important. L'idéal, qui est rarement atteint, notamment pour des raisons de procédure de marchés publics, est que la topographie soit découplée de l'étude hydromorphologique et que les besoins en topographie ne soient déterminés que lorsque l'étude est déjà assez avancée. Un marché adapté aux besoins est alors passé avec un prestataire géomètre.

Les profils en long

■ Les profils des grandes forces hydrauliques

Un levé du profil en long d'un certain nombre de cours d'eau a été réalisé initialement par le service du Nivellement Général de la France (futur IGN) pour le Service des Grandes Forces Hydrauliques. Les rivières étudiées sont en effet principalement celles qui pouvaient présenter un intérêt en termes de développement de l'hydroélectricité. On trouve la carte de France des cours d'eau levés et l'accès aux profils en long sur le site de l'IGN (http://geodesie.ign.fr/fiches/index.php?module=e&action=e_profils).

Figure 193

a

b

a- b- Site IGN. © IGN 2010

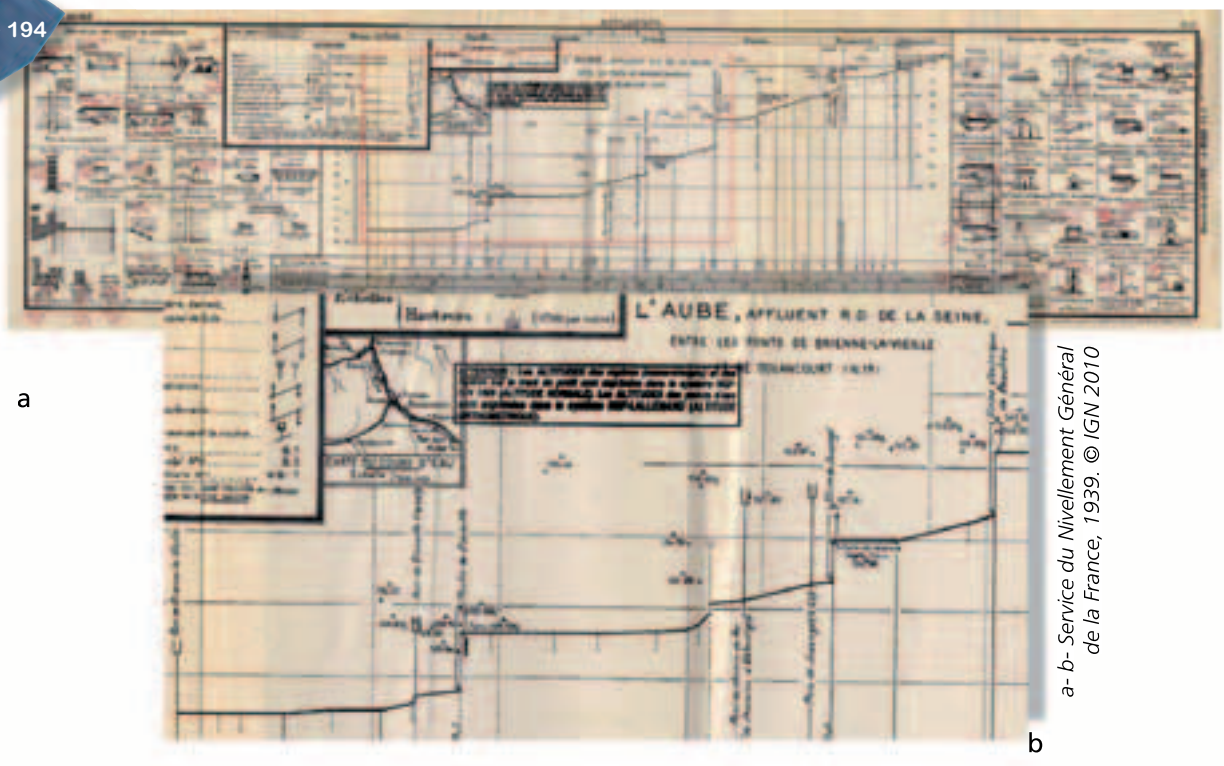
(a) Carte des cours d'eau levés au 1/01/1977 et (b) site d'accès aux fichiers de profils (profils au format jpg).

Les premiers profils datent sensiblement d'immédiatement avant la première guerre mondiale et les derniers de la fin des années 70.

L'inconvénient principal de ces profils est qu'il s'agit de **levés de la ligne d'eau** et non du fond. D'autre part, pour les profils les plus anciens, il est très difficile de connaître le débit d'observation. La date des relevés (3e ligne en partant du bas) peut permettre de savoir si l'on est plutôt en étiage ou en eaux moyennes.

L'un des intérêts majeurs de ces documents est qu'ils permettent de connaître l'emplacement des seuils, leur cote de retenue et donc leur hauteur de chute, la longueur des remous liquides et l'usage de ces seuils (moulins, forges, papeterie, etc.).

Figure 194



a- b- Service du Nivellement Général de la France, 1939. © IGN 2010

Exemple de profil en long. Vue générale et zoom (attention cotes orthométriques).

Attention. Les cotes données sur ces profils sont généralement des cotes **NGF Lallemand Orthométriques** et non NGF IGN69 Normales. La correction des cotes orthométriques en cotes NGF69 se fait par **addition d'une valeur** de l'ordre de quelques cm (par exemple en région Aquitaine) à plusieurs dizaines de cm (Nord, plus de 60 cm).

$$Z\ NGF69 = Z\ Ortho + \triangle Z$$

L'IGN fournit les valeurs correctives sur son site Internet, par carte au 1 : 50 000e (figure 195). Sur l'exemple ci-dessus il faut ainsi ajouter 0,34 m (carte n°2917, figure 195) aux cotes fournies sur le profil. La crête du seuil est donc à 128,54 NGF69 et non 128,2.

Figure 195

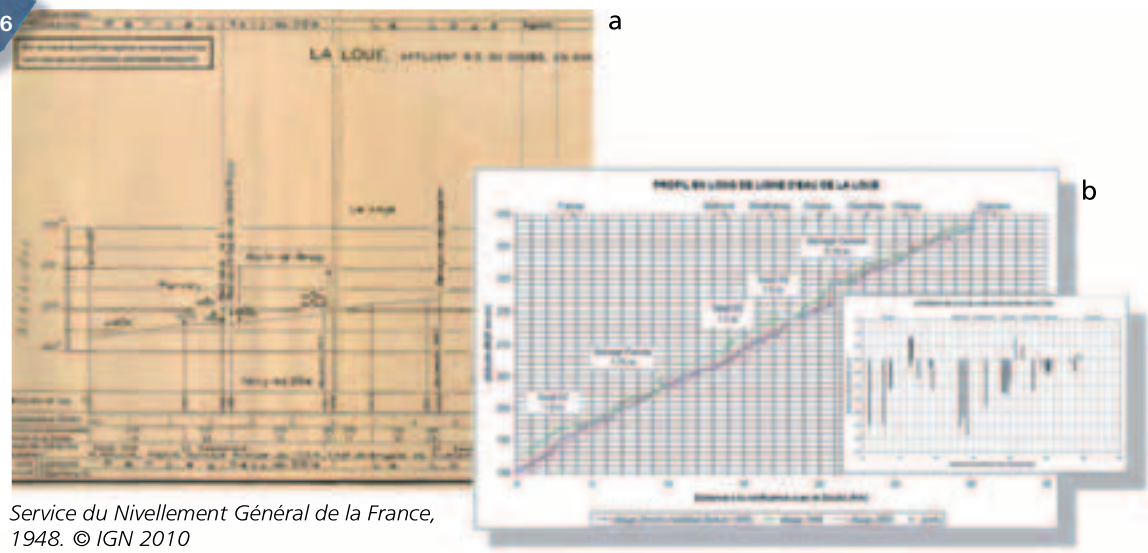
© IGN 2010

Exemple de tableau de correction des cotes orthométriques pour la zone nord Picardie. On ajoute à la cote orthométrique la valeur donnée sous le numéro de carte.

Malgré les imperfections de ces profils (uniquement les lignes d'eau et mauvaise connaissance du débit d'observation), il peut être intéressant de les utiliser comme références et de lever à nouveau un profil complet ou partiel du cours d'eau. Toutefois, les incertitudes sur les débits lors des levés initiaux se traduisent par une difficulté importante pour déterminer et surtout quantifier d'éventuelles incisions ou exhaussements, sauf lorsque les différences sont très fortes (plusieurs mètres).

Attention aussi aux abscisses en long (ou PK) qui peuvent être une source d'erreur importante sur les cours d'eau très mobiles (ou artificiellement rectifiés). Le rescindement ou le développement de méandres peut faire perdre ou gagner des centaines de mètres, voire des kilomètres de linéaire.

Figure 196

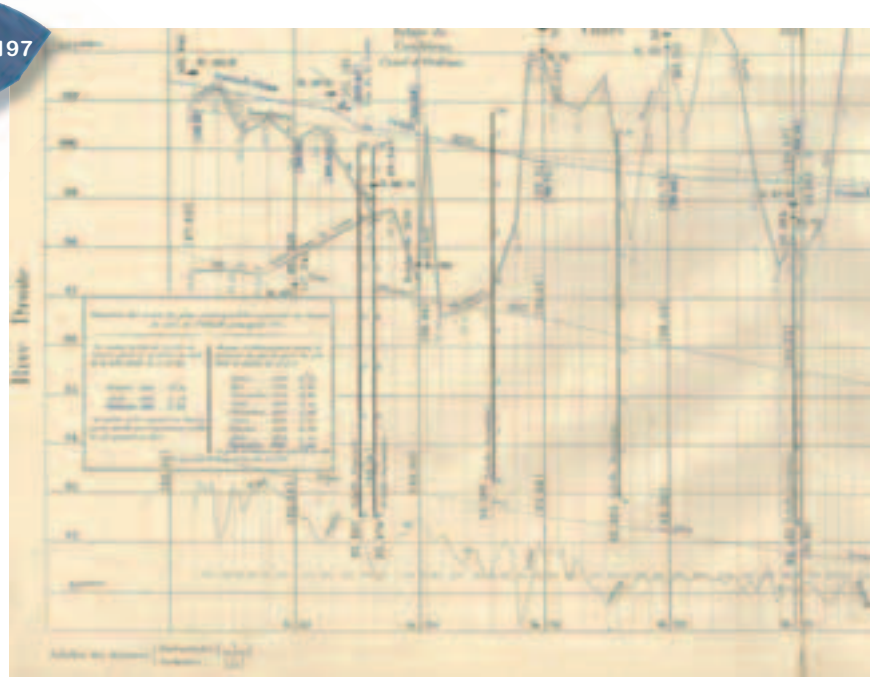


Service du Nivellement Général de la France, 1948. © IGN 2010

Exemple de comparaison du profil de la ligne d'eau de la Loue levé en 1948 pour les Grandes Forces Hydrauliques et le profil levé en 2005, à l'étiage (Malavoie et Adam, 2006). Les pointillés indiquent qu'il y a eu des modifications du tracé en plan qui ne permettent pas de reprendre strictement l'abscisse en long du profil de 1948. Il faut trouver un point de repère qui n'a pas bougé et décaler l'abscisse. La figure de droite donne une interprétation synthétique de la comparaison des deux profils.

Il arrive parfois que l'on trouve sur les cours d'eau domaniaux navigables, outre les lignes d'eau d'étiage, les cotes du fond du talweg et les lignes d'eau de certaines crues historiques (figure ci-dessous).

Figure 197



© DIREN

Exemple de profil en long de la Loire rive droite avec report des digues, du fond du talweg et des lignes d'eau des crues de 1856 et 1866. On observe ici près de 7 m d'écart entre la cote d'étiage et la cote de la crue de 1866.

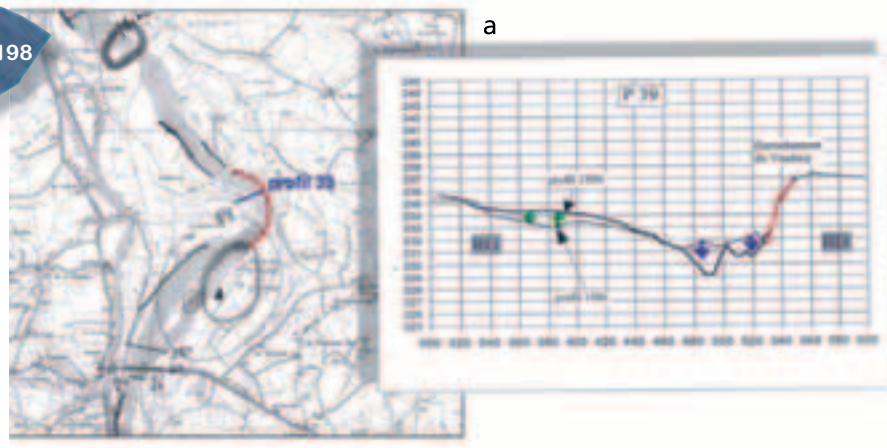
Profils en travers

Contrairement aux autres documents tels que cartes et profils en long, il n'existe pas de levés de profils en travers à l'échelle nationale. On en trouve cependant sur la plupart des cours d'eau navigables, dont le lit (et son entretien) appartiennent à l'Etat (Domaine Public Fluvial ou DPF) jusqu'au niveau du « plein bord » (*plenissimum flumen*). On les trouve dans les archives des services de l'Etat ou aux Archives départementales s'ils sont antérieurs à 1940. La DIREN Centre fournit un accès à différents profils en long et en travers numérisés sur son site Internet.

On peut aussi trouver des profils anciens de travaux ou d'avant-projets de travaux (figure 182) ainsi qu'au droit d'extractions en lit mineur (figure 186).

S'ils sont bien repérés sur carte, ces profils peuvent être levés à nouveau et permettre une interprétation précise de l'évolution verticale d'une portion de cours d'eau.

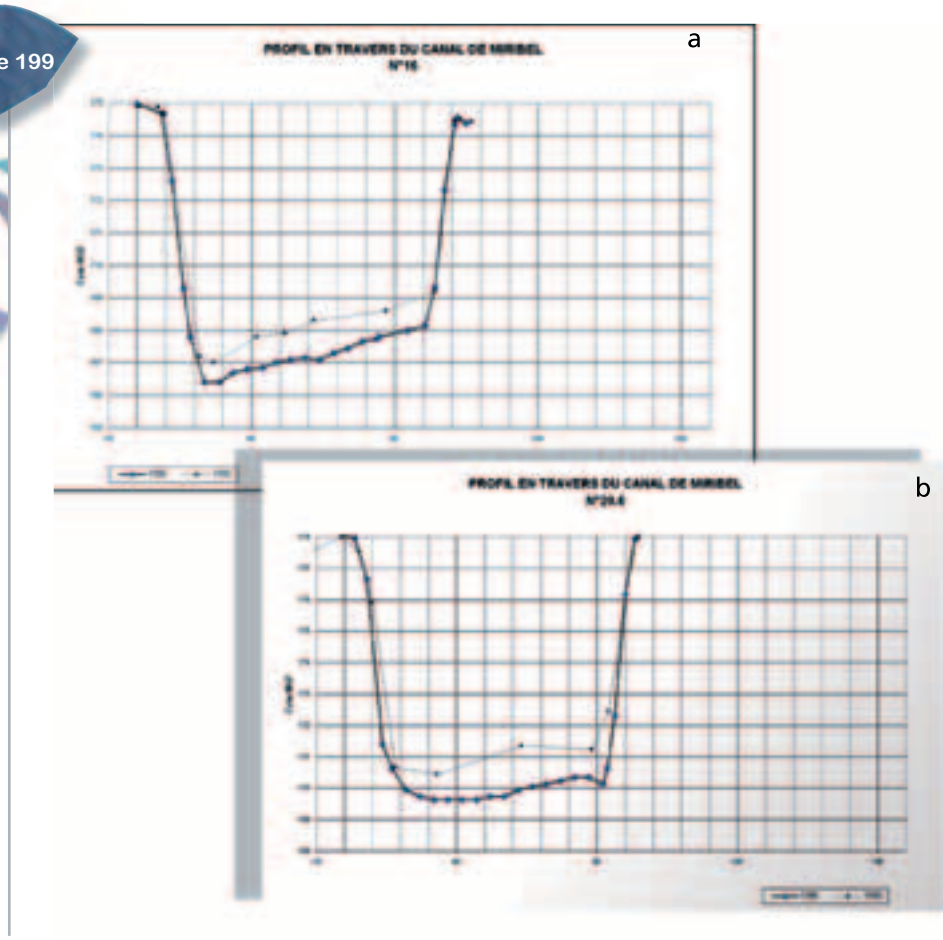
Figure 198



a- Fond SCAN 25®. © IGN 2010

Exemple de comparaison de profils en travers sur la Loire à 10 ans d'intervalle (Malavoi, 1996).

Figure 199



Exemple de comparaison de profils en travers sur le canal de Miribel (Malavoi, AREA 2000). On observe une incision d'1 m en 6 ans.

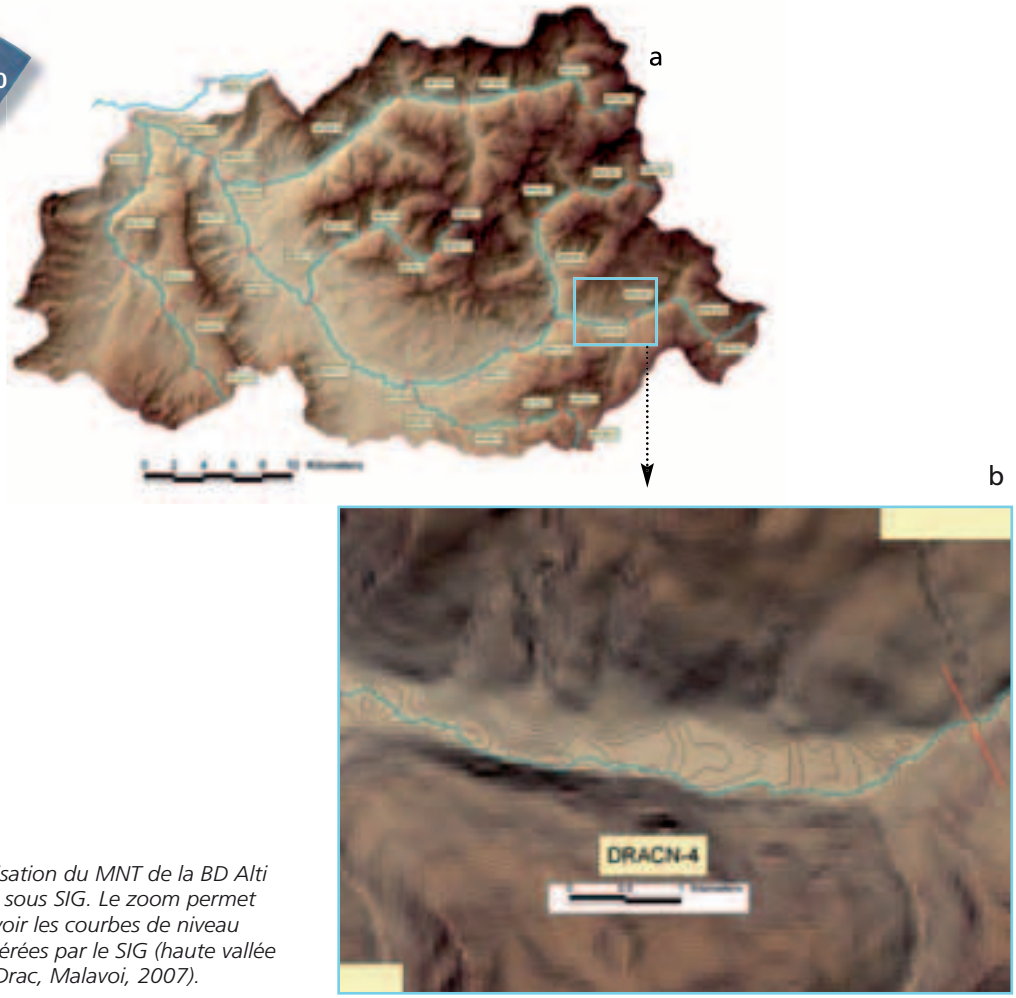
Modèles Numériques de Terrain

Les Modèles Numériques de Terrain sont des représentations virtuelles, issues de calculs numériques, de la topographie d'une zone terrestre ou sub-aquatique (on parle alors de MNT bathymétrique).
Un MNT permet de créer une image de synthèse du terrain en trois dimensions, de calculer des surfaces et des volumes, de tracer des profils topographiques, de simuler des écoulements, etc. Pour utiliser un MNT, généralement constitué d'un fichier informatique à trois colonnes (une pour les x, une pour les y, une pour les z (altitude), il faut une application informatique de type SIG par exemple, ou un logiciel de topographie.
La **qualité d'un MNT** (c'est-à-dire sa fidélité à la réalité du terrain) est fonction du mode d'obtention des données (dérivation de courbes de niveau, photogrammétrie (quelques dizaines de cm), levés terrestres au GPS différentiel (quelques cm), etc.), de la densité du quadrillage (un point de mesure x,y,z tous les mètres est meilleur qu'un point de mesure tous les 50 m), des méthodes d'interpolation si interpolation il y a.
La **précision du MNT** est fonction de ce que le fournisseur met à disposition. Ainsi la BD Alti de l'IGN est fournie avec une précision métrique (l'altitude z est donnée en mètres sans chiffre après la virgule). La qualité de la donnée altimétrique est plutôt de quelques mètres.
Le terme MNE ou Modèle Numérique d'Elévation est utilisé pour matérialiser par exemple les bâtiments et non uniquement le terrain.

■ Echelle du bassin

On peut utiliser un MNT à l'échelle d'un bassin ou d'un tronçon de cours d'eau pour cerner le fonctionnement global de celui-ci, la forme et la largeur de sa vallée, le relief des versants qui la bordent. Pour ce type d'application, un MNT au pas de 50 ou 100 m avec une précision métrique, tel que celui de la BD Alti de l'IGN, est très largement suffisant. Si l'on utilise un SIG permettant de gérer les MNT, on peut aussi réaliser diverses simulations, notamment de flux.

Figure 200

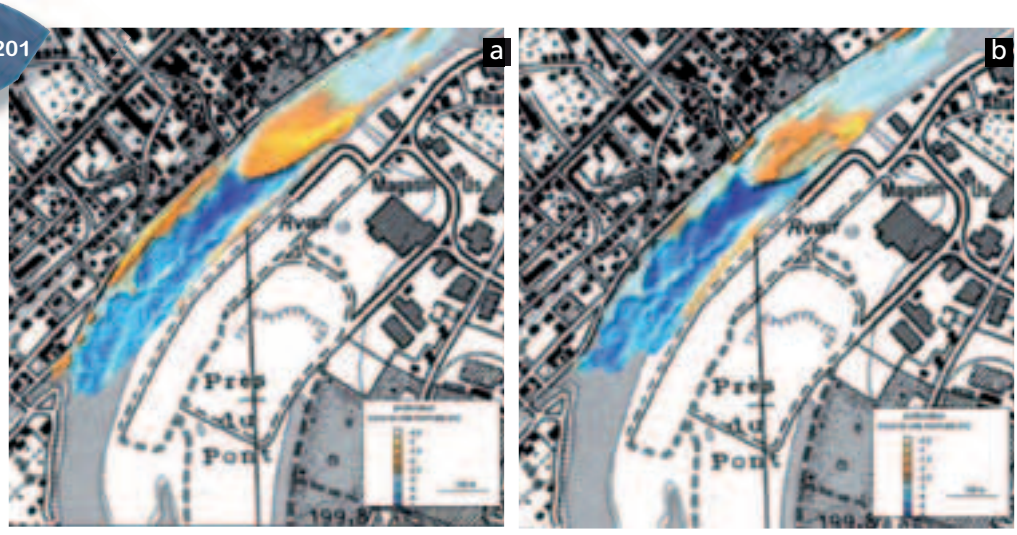


Utilisation du MNT de la BD Alti IGN sous SIG. Le zoom permet de voir les courbes de niveau générées par le SIG (haute vallée du Drac, Malavoi, 2007).

■ Echelle cours d'eau (topo-bathymétrie)

Si l'on doit travailler à une échelle plus fine, pour mieux comprendre par exemple l'évolution du fond du lit d'un cours d'eau, il est nécessaire d'obtenir un MNT d'une meilleure qualité et précision (de l'ordre de quelques cm en z).

Figure 201



a- b- Fond SCAN 25®. © IGN 2010

On distingue sur ces deux traitements cartographiques d'un MNT de grande qualité, les traces de prélèvements de granulats sur une dune alluviale immergée sur le Doubs (Malavoi, 2002). MNT fournis par VNF avec un pas de mesure de 1 m (dégradé à 5 m) et une précision centimétrique.

Données hydrologiques

Toute étude hydromorphologique doit comprendre une analyse du fonctionnement hydrologique du cours d'eau. Le débit étant en effet l'une des deux variables majeures de contrôle des processus géodynamiques, il n'est pas envisageable de ne pas connaître, quelle que soit l'échelle spatiale de l'étude hydromorphologique :

- le fonctionnement hydrologique global du cours d'eau sur le long terme (son régime moyen, ses crues de différentes périodes de retour, le rôle des barrages dans la modification du régime des crues, etc.) ;
- l'hydraulicité récente (sur les 2 ou 3 années précédant l'étude hydromorphologique) et très récente (sur les derniers mois).

Indépendamment des données générales que l'on peut trouver dans des manuels d'hydrologie, dans des monographies, dans des études hydrologiques antérieures, les données hydrologiques sur les cours d'eau peuvent être obtenues auprès de la banque HYDRO gérée par le Ministère chargé de l'Environnement.

La Banque HYDRO

Les données hydrologiques sur les cours d'eau français sont gérées par la Banque HYDRO, la banque nationale de données pour l'hydrométrie et l'hydrologie. HYDRO stocke les mesures de hauteur d'eau (à pas de temps variable) en provenance de 3 500 stations de mesure, dont 2 400 sont actuellement en service.
HYDRO calcule les débits instantanés, journaliers, mensuels, etc., à partir des valeurs de hauteur d'eau et des courbes de tarage (relations entre les hauteurs et les débits). Ces valeurs sont actualisées à chaque mise à jour d'une hauteur ou d'une courbe de tarage (addition, précision supplémentaire, correction...).
Les procédures disponibles en ligne sur http://hydro.eaufrance.fr/ sont :

- STATION. Présentation de la station hydrométrique ;
- QJM. Débits journaliers et mensuels sur un an ;
- ENTRE2. Comparaison graphique des débits journaliers d'une année avec ceux du passé ;
- SYNTHESE. Synthèse hydrologique ;
- TOUSMOIS. Ecoulements mensuels sur une période donnée ;
- VCN-QCN. Débits minimaux sur N jours consécutifs ;
- QMNA. Débit mensuel minimal annuel.

D'autres procédures plus complexes sont disponibles sur **abonnement**.
Les données hydrologiques sont fournies principalement par les services de l'Etat (DIREN, DDE, etc.), Electricité de France, certains organismes de recherche (Cemagref, universités...), ainsi que les compagnies d'aménagement (la Compagnie d'aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG), la Compagnie nationale du Rhône (CNR), etc.). Ces producteurs de données installent les stations de mesure en rivière, assurent leur maintenance, recueillent les données, les vérifient et en alimentent la banque. Ils réalisent des jaugeages au droit des stations de mesure et établissent les courbes de tarage qui figurent également dans la banque. Ensuite ils valident, et éventuellement corrigent les données. Ils en sont responsables et veillent à leur qualité.
Les données sont en général disponibles dans la banque moins de 40 jours après leur enregistrement.

Données en temps réel

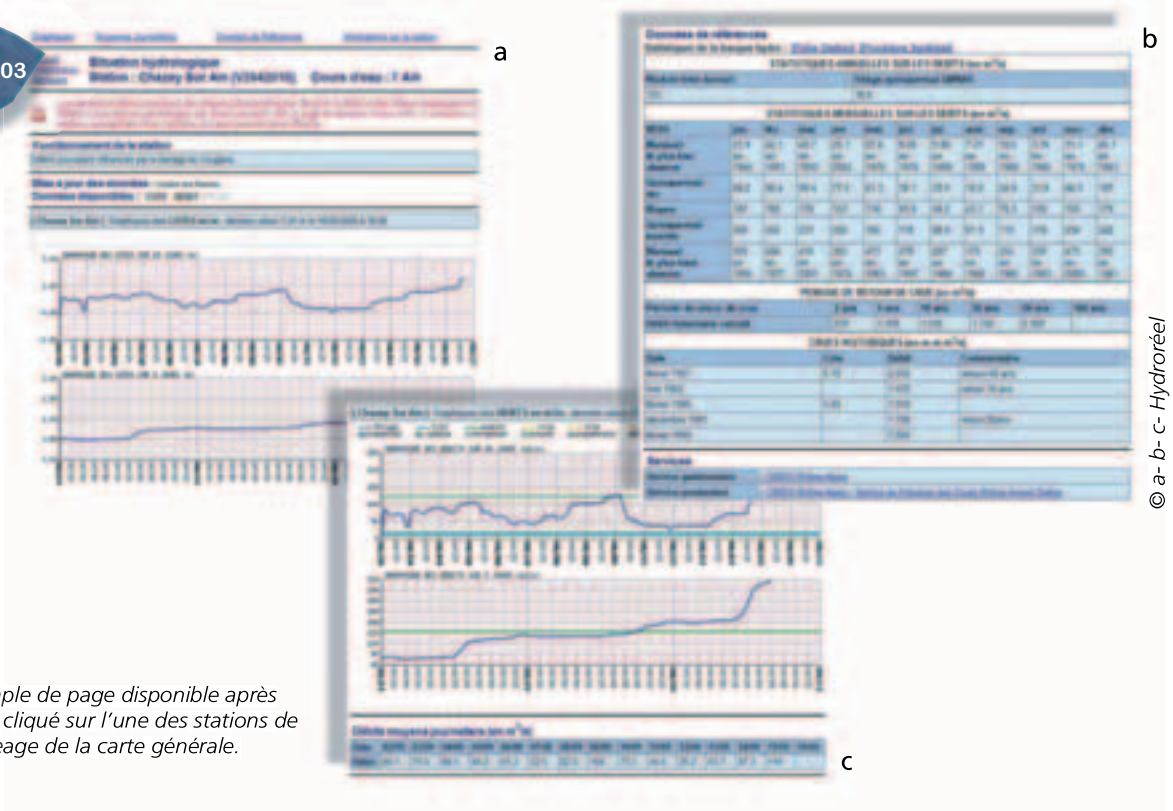
Certains services de l'Etat proposent des serveurs de données hydrologiques en temps réel sur Internet.
Ainsi le site Internet Hydroréel (http://www.rdbrmc.com/hydroreel2/carto.php) géré par la DIREN Rhône Alpes, DIREN du bassin Rhône-Méditerranée qui rend accessible à tout public les informations relatives à la situation hydrologique des cours d'eau, en temps réel ou quasiment réel. Le site est alimenté par les différents producteurs de données présentés plus haut.

Figure 202

Page d'accueil du site Hydroréel (DIREN de bassin Rhône-Méditerranée). Les points indiquent les stations de jaugeage.

La carte générale permet d'un seul regard de visualiser l'ensemble de la situation hydrologique du bassin en termes de crue, d'étiage ou de régime moyen.
En cliquant sur l'une des stations de jaugeage (les points), on est dirigé vers une page où l'on trouve les données hydrologiques des 15 derniers jours zoomées sur trois jours (cotes et débits), les données de synthèse de la station et un lien vers la banque HYDRO.

Figure 203



Exemple de page disponible après avoir cliqué sur l'une des stations de jaugeage de la carte générale.

© a- b- c- Hydroréel

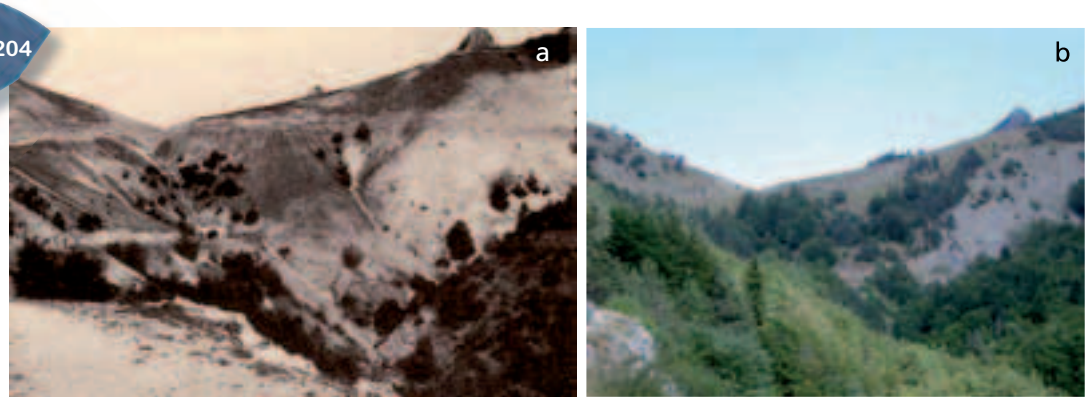
Autres données utiles

Cartes postales et photographies anciennes

■ Cartes représentant des paysages

Elles permettent, par comparaison avec des cartes actuelles ou des photographies, de visualiser des changements de types d'occupation des sols et de paysage en général. Elles complètent l'analyse des photographies aériennes pour les périodes antérieures à 1940.

Figure 204



b- © Bravard

(a) exemple de carte postale ancienne (1935) permettant de visualiser l'évolution de la végétalisation d'un bassin versant montagnard (b) en 2005. On voit bien la stabilisation des versants et la réduction des processus d'érosion, donc des apports primaires de charge de fond.

Elles sont extrêmement intéressantes si elles sont prises à l'occasion d'un événement hydrologique de type « inondation » car elles peuvent se substituer à des repères de crues (même si les photographies ne sont pas toujours prises au maximum de la crue).

Figure 205

Exemple de cartes postales illustrant des inondations (à noter la photographie aérienne oblique de l'inondation de l'Armançon à Tonnerre en 1866).

■ Cartes représentant des ouvrages (ponts, digues, lavoirs, moulins)

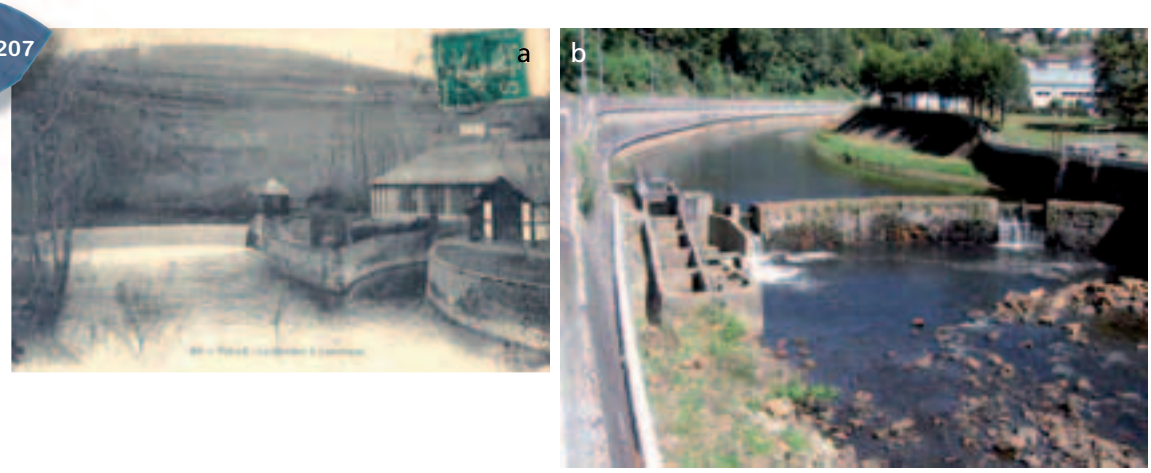
En complément des plans et coupes d'ouvrage que l'on peut trouver aux archives, elles peuvent aider à diagnostiquer certains dysfonctionnements, tels que l'incision du lit mineur.

Figure 206

b- d- © J.R. Malavoi

Exemple de cartes postales anciennes permettant d'analyser, de manière plus ou moins quantitative, l'évolution locale d'un cours d'eau (la Corrèze à Tulle). Noter la disparition du petit seuil du lavoir et le renforcement des piles du pont (béton coulé dans des palplanches), indicateur d'une probable incision, au moins localisée.

Figure 207



b- © J.R. Malavoi

Exemple de cartes postales anciennes permettant de visualiser l'évolution locale d'un cours d'eau (la Corrèze à Tulle, seuil de Lamarque).

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.

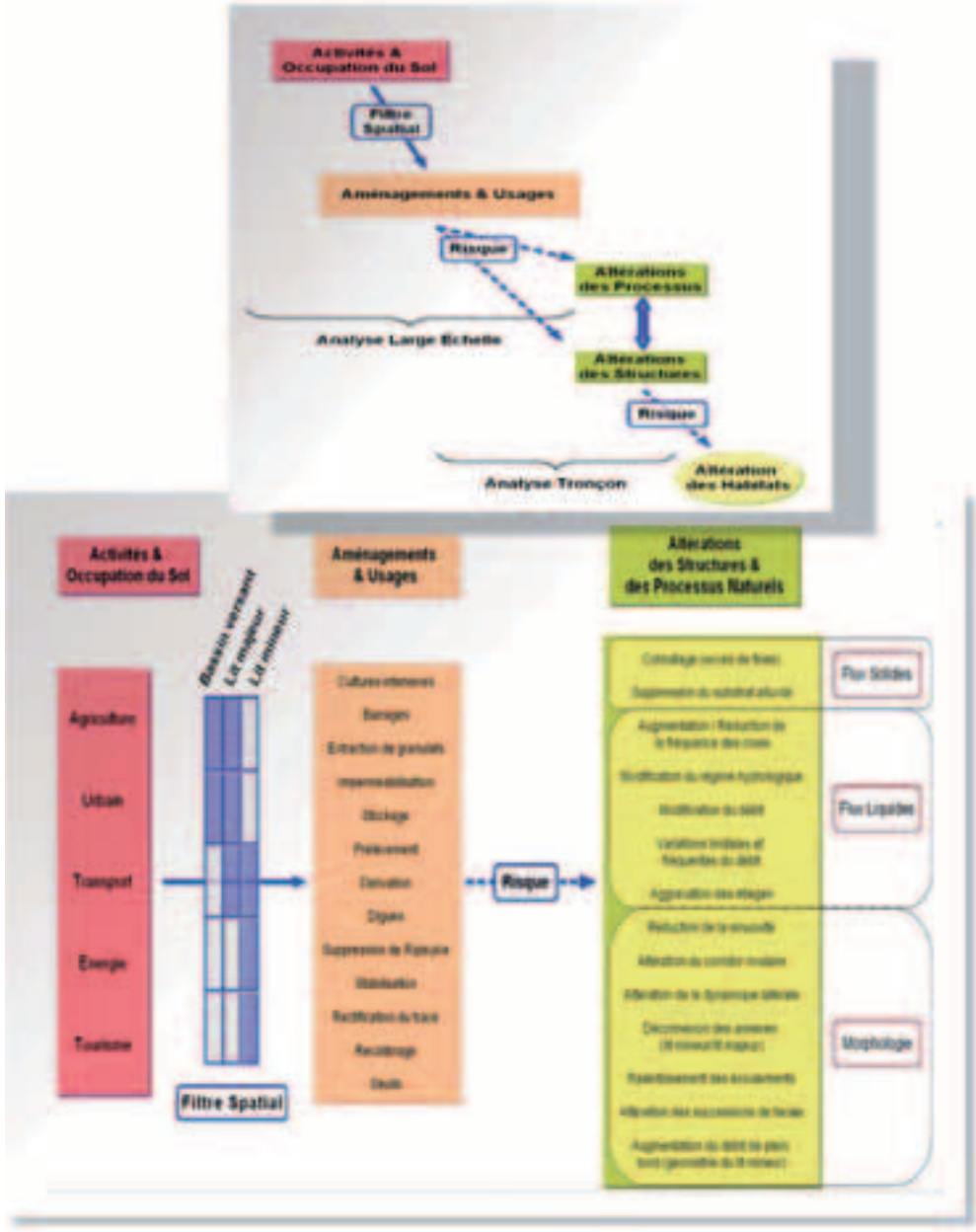
Cartographie des pressions et altérations

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.

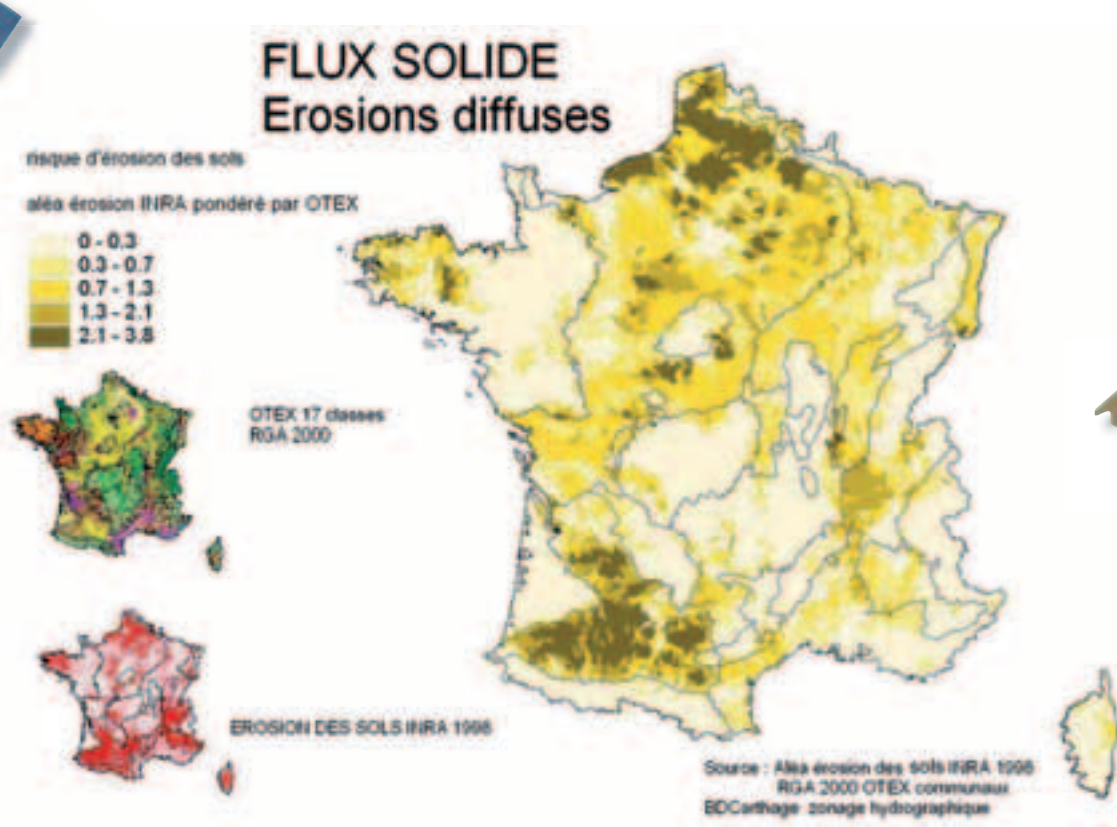
L'analyse à l'échelle de tronçons géomorphologiques permet une description des « aménagements et usages » à un niveau de précision compatible avec la recherche de causes de dégradation de l'état écologique observable. Ce niveau de finesse dans l'analyse est rendu possible par l'existence de bases de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

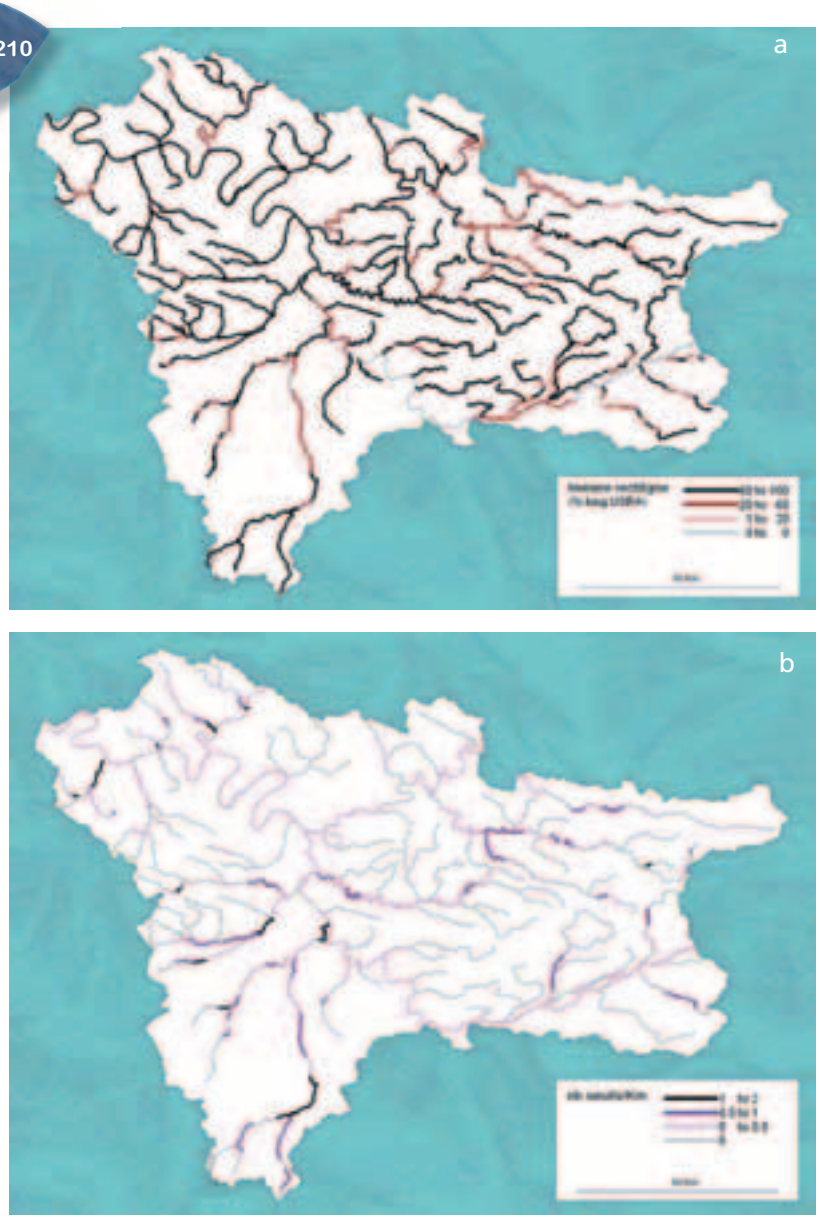
Une expertise de cet ensemble d'informations permet d'envisager un appui à l'établissement de plans de gestion à plusieurs échelles, avec une identification facilitée des actions de restauration souhaitables et une assistance à leur programmation.

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.

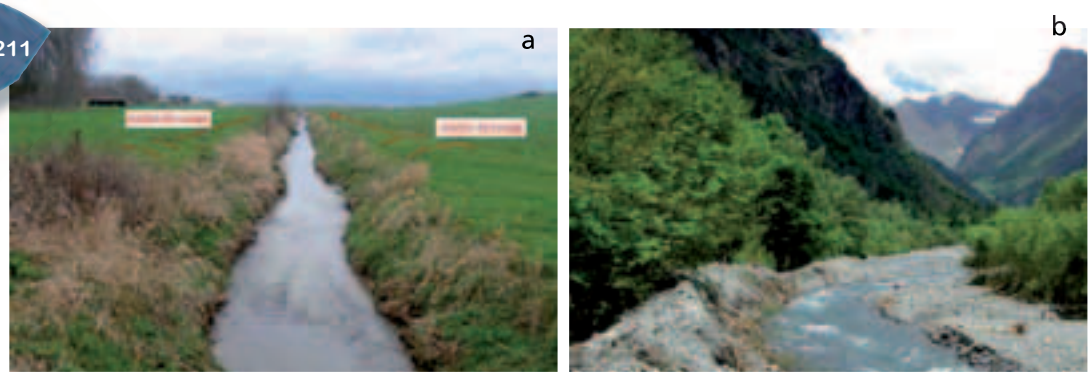
4- Approche complémentaire envisageable

- 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

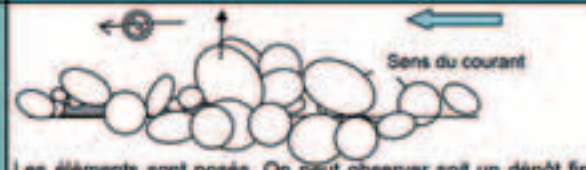
Evaluation visuelle de la surface occupée par des sédiments fins sur un substrat alluvial grossier (Northcote, 1979).

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**) :

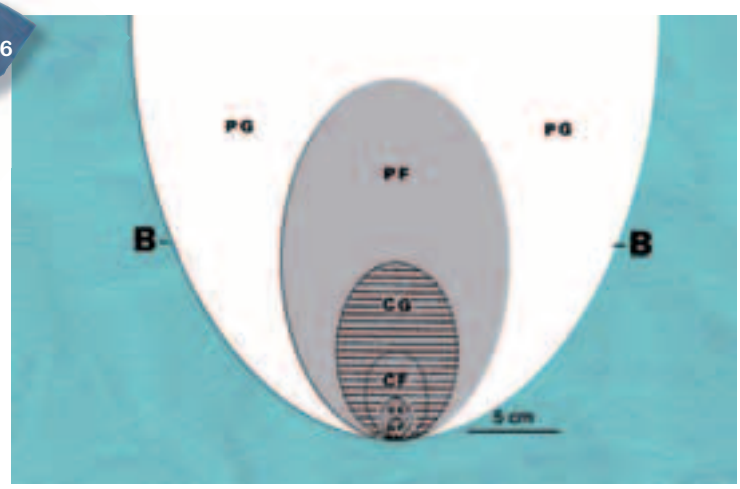
- la méthode visuelle (Malavoi et Souchon, 1989) permet de caractériser la granulométrie au moyen d'un gabarit visuel à l'échelle. Le substrat observé est décrit par un code à 6 caractères (voir tableau suivant) :
- classe granulométrique de l'élément le plus grossier (à rapprocher du D90) : deux caractères (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

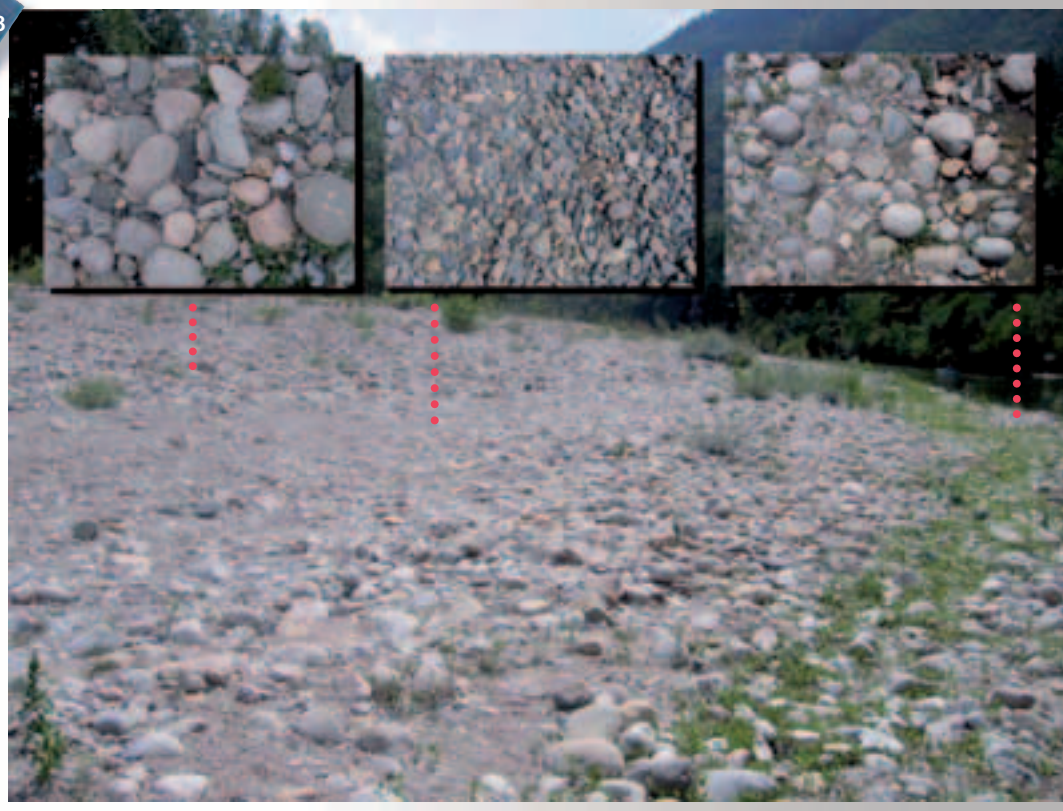
a- Fond BD ORTHO® 2006. © IGN 2010. b- © J.R. Malavoi

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.

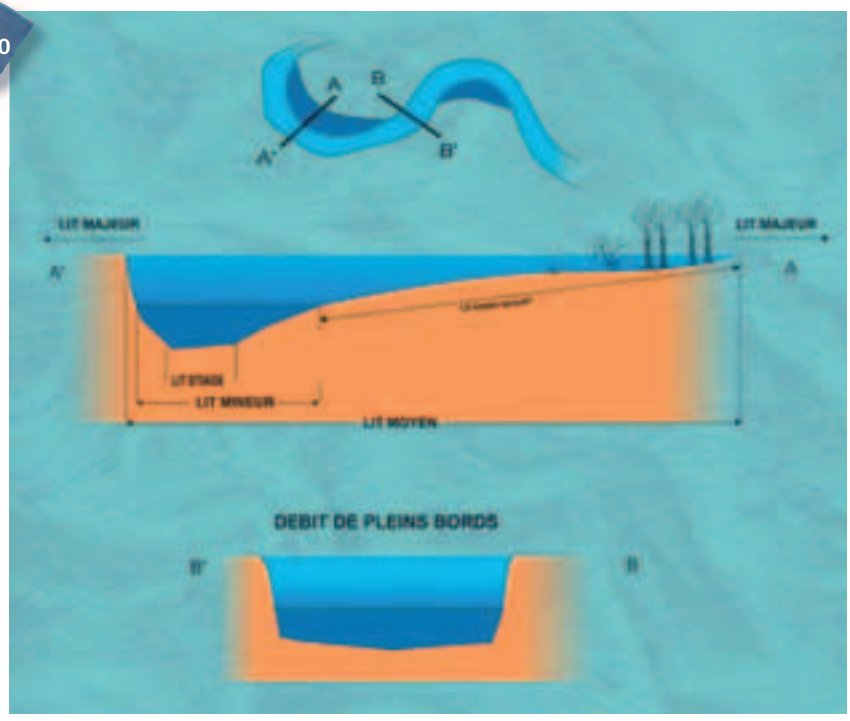
NB Ces mesures géométriques à « pleins bords » doivent théoriquement être réalisées :

- 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

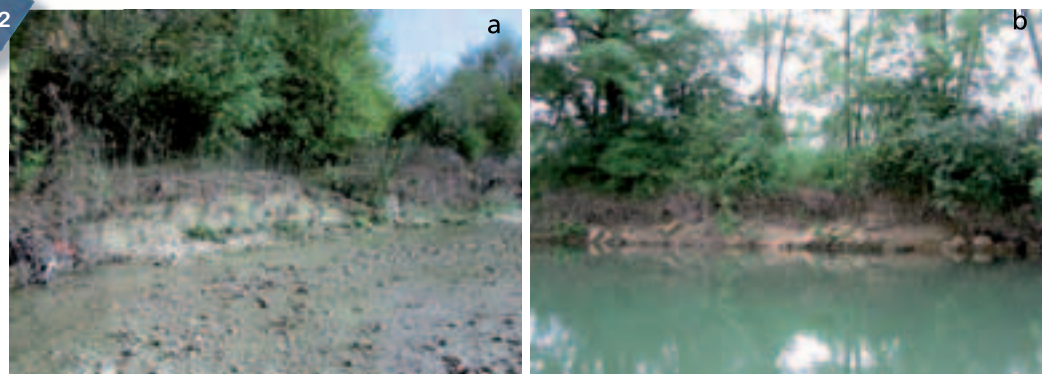
Nous savons que la nature cohésive ou non des berges est l'une des variables de contrôle des processus géodynamiques.
En dehors des berges rocheuses pour lesquelles la question ne se pose pas, l'appréciation de la cohésion des berges, et donc de leur érodabilité potentielle, peut se faire de manière 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

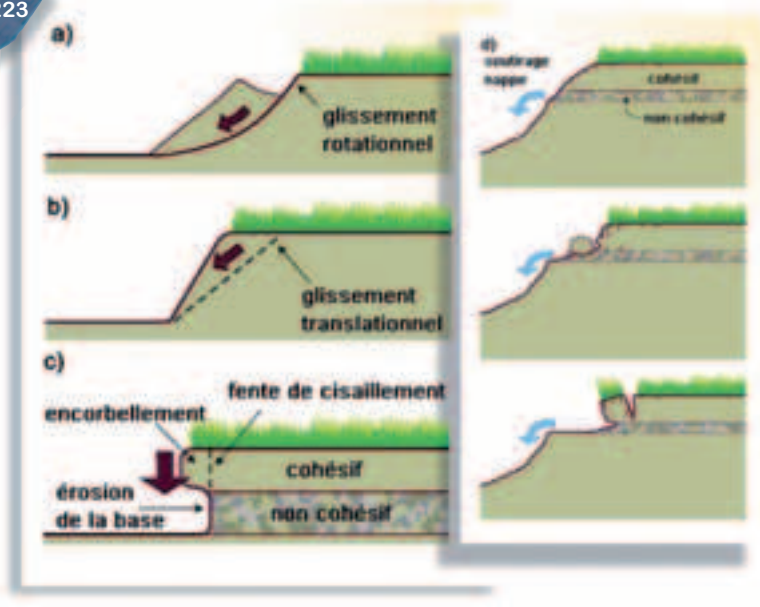


a- b- © J.R. Malavoi

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

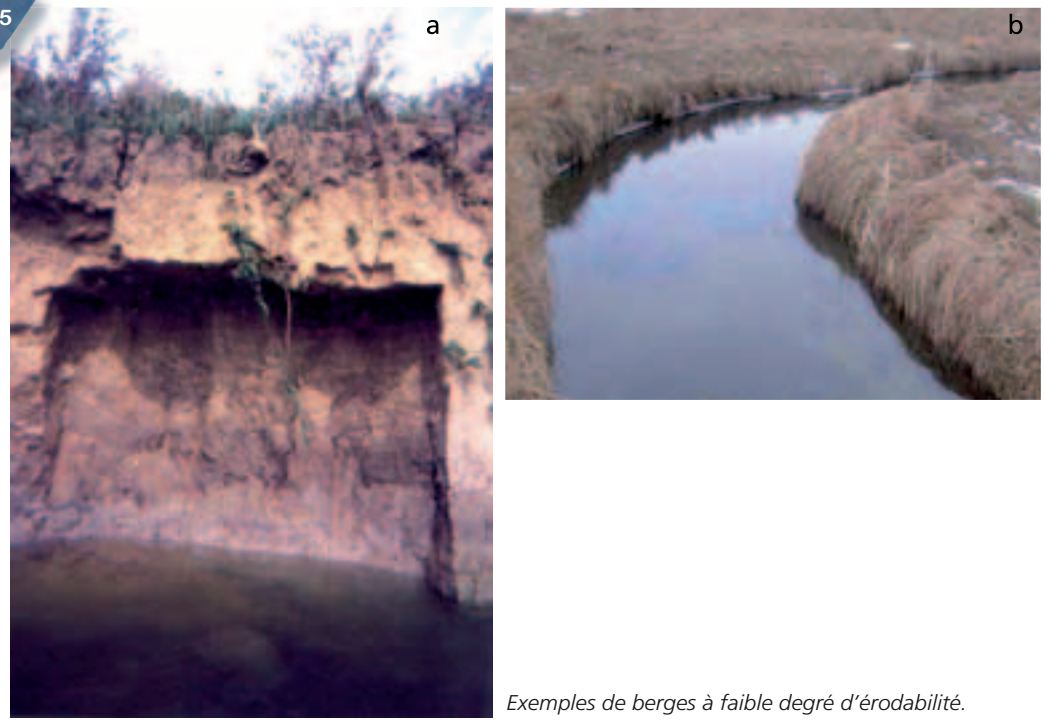
a- b- © J.R. Malavoi

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.