



# ÉLABORER ET METTRE EN ŒUVRE UN PLAN DE GESTION SÉDIMENTAIRE

BASSIN RHÔNE-MÉDITERRANÉE

Juin 2024



# EDITO

Le SDAGE Rhône-Méditerranée, dans sa disposition 6A-07 (mettre en œuvre une politique de gestion des sédiments), appelle à une gestion équilibrée des sédiments pour restaurer ou soutenir le bon état écologique des rivières et invite les structures exerçant la compétence GEMAPI à établir puis mettre en œuvre un plan de gestion sédimentaire (PGS) dans le cadre d'une démarche concertée à l'échelle des bassins versants, en tenant compte de l'ensemble des enjeux présents.

L'élaboration de plans de gestion sédimentaire, pour une gestion équilibrée des sédiments, doit également participer à une meilleure prévention des risques d'inondation, comme l'y invite le plan de gestion des risques d'inondation du bassin, dans sa disposition 2-7 « préserver et améliorer la gestion de l'équilibre sédimentaire ».

Le contenu de ce guide s'appuie sur un état de l'art poussé dans le domaine du fonctionnement hydrosédimentaire des cours d'eau et de leurs bassins versants. Il explique pourquoi il peut être nécessaire d'envisager un tel plan au regard des enjeux écologiques et socio-économiques liés à la dynamique sédimentaire sur un territoire. Il présente les étapes recommandées pour établir un diagnostic de ces enjeux, identifier et dimensionner les actions et mettre en place la gouvernance nécessaire sur des bases objectives et concertées. Il apporte enfin des recommandations sur la manière d'engager et d'organiser la concertation et la validation de ces différentes étapes en associant l'ensemble des parties intéressées, éléments essentiels de la réussite d'un plan de gestion sédimentaire.

Ce guide technique s'adresse principalement aux structures compétentes pour la gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations mais aussi aux bureaux d'étude et aux services de l'État et ses établissements publics (agence de l'eau et office français de la biodiversité) dans le cadre de l'accompagnement qu'ils apportent aux gestionnaires. Il est mis à disposition sur le site internet du bassin Rhône-Méditerranée : [www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr](http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr).



Le contenu du document a été rédigé par Jean-René MALAVOI (AERMC), Frédéric LIEBAULT (INRAE), Hervé PIEGAY (CNRS), Nathalie SUREAU-BLANCHET (AERMC), Benoit TERRIER (AERMC), en collaboration avec un comité technique que nous remercions vivement pour les échanges fructueux que nous avons eus et qui ont largement contribué à l'élaboration de ce guide.

Ce comité était constitué des organismes suivants :

- Administrations : OFB Lyon : Pascal Roche, OFB national : Gabriel Melun ; DREAL AURA: Christophe Pornon ; Département 05 : Pascal Krieg-Rabeski ; RTM-ONF: Yann Quéfféléan ;
- AERMC: Siège-DPI : Valérie Pandini ; délégation de Besançon : Vincent Porteret ; délégation de Montpellier : Fabrice Cathelin ; délégation de Marseille : Isabelle Chouquet ; délégation de Lyon : Florence Javion ;
- Bureaux d'étude : Burgeap/Ginger : Frédéric Laval ; Dynamique Hydro : Loïc Grosprêtre ; Hydrétudes : Jean-Manuel Deleuze; Artelia : Eric Tiriau ;
- Fédération de pêche : UFBRMC : Fabien Chiri ;
- Acteurs économiques : EDF: Rémi Loire ;
- Syndicats de bassin versant : Drac : Bertrand Breilh ; Buech : Antoine Gourhand ; Azergues : Pierre Gadiolet ; Saône Doubs : Nicolas Amendola ; Ain : Samuel Monnet ;
- Universités et laboratoires de recherche : INRAE Lyon : Hervé Capra ; Université de Franche-Comté : Gudrun Bornette.

### Remerciements :

Nous tenons aussi à remercier vivement les personnes qui, hors du comité technique, nous ont apporté des éléments de réflexion ainsi que des illustrations : François Chambaud (AERMC), Nicolas Debiais (BIOTEC), Alain Recking (INRAE Grenoble), Maria Alp et Thibault Datry (INRAE Lyon).

### Quelques éléments de lecture : 4 types de mise en évidence de texte.



Point clé



Point de vigilance

#### ENCADRE

Paragraphe plus développé hors texte sur un point particulier

#### FICHE EXEMPLE

Présente un exemple d'action réalisée.



## IMPORTANT

Les guides du secrétariat technique de bassin Rhône-Méditerranée sont des **documents à vocation méthodologique** visant à aider les parties prenantes à mettre en œuvre des préconisations du SDAGE afin de préserver ou de restaurer le bon état et le bon fonctionnement des milieux aquatiques, dans le cadre de démarches concertées, en tenant compte des caractéristiques physiques et des enjeux sociaux et économiques locaux.

Ils s'appuient sur l'état de l'art des connaissances disponibles lors de leur édition.

**Les guides du secrétariat technique de bassin n'ont aucune valeur prescriptive et encore moins réglementaire.** Les éléments méthodologiques proposés peuvent être adaptés à chaque contexte local dans le cadre d'une concertation entre les parties prenantes.

## SOMMAIRE

|  |            |
|--|------------|
| <b>1. BASES CONCEPTUELLES ET TECHNIQUES .....</b>  | <b>13</b>  |
| <i>UN COURS D'EAU OU DES COURS D'EAU ? .....</i>   | <i>13</i>  |
| 1.1.1. Une organisation longitudinale des entités fluviales .....  | 13         |
| 1.1.2. Une organisation transversale des entités fluviales.....  | 17         |
| <i>LES PROCESSUS HYDROSEDIMENTAIRES ET LEUR MESURE .....</i>   | <i>20</i>  |
| 1.1.3. Quelques concepts et définitions.....   | 20         |
| 1.1.4. Erosion, production sédimentaire, rendement sédimentaire.....   | 24         |
| 1.1.5. Sources, stockages, puits, transport et bilans sédimentaires .....  | 32         |
| 1.1.6. Part des sédiments fins et grossiers dans le transport solide .....   | 57         |
| 1.1.7. Variabilité hydrosédimentaire liée aux changements climatiques et aux actions anthropiques.....                     | 59         |
| <i>CARACTERISATION DE LA GRANULOMETRIE DES LITS FLUVIAUX.....</i>  | <i>64</i>  |
| 1.1.8. Difficultés rencontrées .....   | 64         |
| 1.1.9. Mobilité des particules.....  | 71         |
| 1.1.10. Méthodes de mesure de la granulométrie.....  | 75         |
| <i>LES LIENS ENTRE MORPHOLOGIE, SEDIMENTS, FONCTIONNEMENT ECOLOGIQUE ET BON ETAT DES EAUX .....</i>                        | <i>80</i>  |
| 1.1.11. Faciès d'écoulement et fonctionnement hydroécologique .....  | 80         |
| 1.1.12. Sédiments et fonctionnement hydroécologique.....   | 85         |
| <b>2. POURQUOI METTRE EN ŒUVRE UN PLAN DE GESTION SEDIMENTAIRE ? .....</b>   | <b>101</b> |
| <i>LES PRINCIPAUX ENJEUX ET PRESSIONS EN LIEN AVEC LES SEDIMENTS.....</i>  | <i>101</i> |
| 2.1.1. Principaux enjeux socio-économiques pouvant nécessiter une gestion sédimentaire.....                                | 101        |
| 2.1.2. Pressions anthropiques engendrant des dysfonctionnements hydrosédimentaires.....                                    | 102        |
| <i>LES PRINCIPAUX DYSFONCTIONNEMENTS HYDROMORPHOLOGIQUES ET ECOLOGIQUES EN LIEN AVEC LES SEDIMENTS.....</i>                | <i>104</i> |
| 2.1.3. Dysfonctionnements hydromorphologiques .....  | 104        |
| 2.1.4. Dysfonctionnements morphoécologiques .....  | 104        |
| 2.1.5. Dysfonctionnements écologiques .....  | 104        |
| 2.1.6. Autres dysfonctionnements possibles .....   | 104        |
| <i>LOGIGRAMME SEQUENTIEL D'ELABORATION ET DE MISE EN ŒUVRE D'UN PGS .....</i>  | <i>105</i> |
| 2.1.7. Etapes techniques .....   | 106        |
| 2.1.8. Organisation de la conduite du projet et phases de concertation et de validation .....                              | 108        |
| <b>3. MISE EN ŒUVRE DES ETAPES DU LOGIGRAMME .....</b>   | <b>110</b> |
| <i>ETAPE PREALABLE : DETERMINATION DU PERIMETRE D'ETUDE ET ORGANISATION DE LA CONDUITE DU PROJET.....</i>                  | <i>110</i> |
| 3.1.1. Périmètre d'étude .....   | 110        |
| 3.1.2. Organisation de la conduite du projet .....   | 112        |
| <i>ETAPE 1 : BILAN DES ENJEUX, DES PRESSIONS ET DES FONCTIONNEMENTS HYDROMORPHOLOGIQUE ET ECOLOGIQUE.....</i>              | <i>112</i> |
| 3.1.3. Sectorisation du cours d'eau .....  | 112        |
| 3.1.4. Recensement des enjeux socio-économiques pouvant nécessiter une gestion sédimentaire                                | 112        |
| 3.1.5. Diagnostic de fonctionnement hydromorphologique et écologique .....   | 115        |
| <i>ETAPE 2 : DETERMINATION DE L'EMPRISE SPATIALE DU PGS ET DE SES OBJECTIFS .....</i>                                      | <i>122</i> |
| 3.1.6. Emprise du ou des PGS.....  | 122        |
| 3.1.7. Définition, priorisation et localisation des objectifs.....   | 122        |
| <i>ETAPE 3 : ELABORATION DU PGS. CHOIX ET DIMENSIONNEMENT DES ACTIONS. INTEGRATION DES CONTRAINTES ET DES COUTS... 128</i> | <i>128</i> |
| 3.1.8. Les moyens d'action .....   | 128        |
| 3.1.9. Les types d'action associés.....  | 131        |
| 3.1.10. Choix des moyens d'action et des actions.....  | 165        |
| 3.1.11. Chiffrage de l'ensemble des actions à réaliser .....   | 169        |
| <i>ETAPE 4 : CHIFFRAGE FINAL DU PGS .....</i>  | <i>169</i> |
| <i>ETAPE 5 : MISE EN ŒUVRE DU PGS .....</i>  | <i>169</i> |
| <i>ETAPE 6 : SUIVI.....</i>  | <i>170</i> |
| 3.1.12. Choix des paramètres à suivre .....  | 170        |
| 3.1.13. Stratégie d'implantation des sites de suivi.....   | 173        |
| 3.1.14. Fréquence de mesure.....   | 174        |
| 3.1.15. Rendu du suivi .....   | 174        |

|  |            |
|--|------------|
| <i>ETAPE 7 : BILAN DU PGS</i> .....  | 174        |
| 3.1.16. Réalisation du bilan du PGS.....   | 175        |
| 3.1.17. Phase de concertation/validation N°5 : décision de poursuivre la mise en œuvre du PGS ou de revenir à des étapes antérieures.....                      | 177        |
| <b>4. ORGANISATION DE LA CONDUITE DU PROJET</b> .....  | <b>178</b> |
| <i>ETAPE PREALABLE : PRENDRE LE TEMPS D'UNE REFLEXION TERRITORIALE AVEC SES PARTENAIRES ET ORGANISER LA CONDUITE DU PROJET</i> 179                             |            |
| 4.1.1. Les enjeux territoriaux .....   | 179        |
| 4.1.2. Qui associer à la démarche ? Quand et comment ?.....  | 179        |
| 4.1.3. Constituer un binôme politique et technique.....  | 180        |
| 4.1.4. Clarifier le processus de pilotage, de concertation et de décision dès le lancement du projet    180  |            |
| <i>PHASE DE CONCERTATION/VALIDATION N°1 : DIAGNOSTIC SOCIOTECHNIQUE PARTAGE</i> .....  | 183        |
| 4.1.5. Recenser et recueillir les études et données mobilisables sur la rivière.....   | 183        |
| 4.1.6. Ecouter les acteurs du territoire pour cerner leurs intérêts et leurs besoins (enquêtes de terrain, entretiens).....                                    | 185        |
| 4.1.7. Préparer le processus de concertation et le situer par rapport à la gouvernance en place et au comité de pilotage, au comité technique .....            | 185        |
| 4.1.8. Faut-il faire appel à un professionnel de la concertation ?.....  | 187        |
| 4.1.9. Comment animer la concertation au stade du diagnostic ?.....  | 187        |
| 4.1.10. Valider le diagnostic socio-technique .....  | 189        |
| <i>PHASE DE CONCERTATION/VALIDATION N°2 : DEFINITION CONCERTEE DES OBJECTIFS DU PLAN</i> .....   | 190        |
| 4.1.11. Réunions multi-acteurs de concertation pour la définition des objectifs du plan de gestion    191  |            |
| 4.1.12. Valider les objectifs du plan de gestion sédimentaire .....  | 191        |
| <i>PHASES DE CONCERTATION/VALIDATION N°3 ET 4 : L'ELABORATION CONCERTEE DES ACTIONS A METTRE EN ŒUVRE ET LEUR CHIFFRAGE FINANCIER</i> .....                    | 192        |
| 4.1.13. Réunions multi-acteurs de concertation pour l'élaboration et le choix des actions.....   | 192        |
| 4.1.14. Faire pré-valider par le comité de pilotage, puis valider par l'instance de gouvernance locale et communiquer sur le plan de gestion sédimentaire..... | 193        |
| <i>PHASES DE CONCERTATION/VALIDATION N°5 ET 6 : LA MISE EN ŒUVRE DU PLAN, LA COMMUNICATION PENDANT LA PHASE DE TRAVAUX, LE SUIVI CONCERTÉ DU PLAN</i> .....    | 195        |
| <i>PHASE DE CONCERTATION/VALIDATION N°7 : BILAN CONCERTÉ DU PLAN DE GESTION SÉDIMENTAIRE</i> .....   | 196        |
| <b>ANNEXE 1 : LA DCE ET LES CONCEPTS UTILISES</b> .....  | <b>198</b> |
| <b>ANNEXE 2 : PRINCIPAUX TEXTES JURIDIQUES ENCADRANT LA GESTION SÉDIMENTAIRE</b> .....   | <b>203</b> |
| <b>ANNEXE 3 : TABLEAU DES ENJEUX / OBJECTIFS / MOYENS / ACTIONS</b> .....  | <b>206</b> |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....   | <b>208</b> |

## INTRODUCTION GENERALE

L'objectif de ce guide est d'être un outil opérationnel pour l'élaboration et la mise en œuvre de Plans de Gestion Sédimentaire (PGS) en application du SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) 2022-2027 du bassin Rhône-Méditerranée (Orientation fondamentale OF6A, disposition 6A-07).

L'objectif majeur de la DCE (Directive Cadre européenne sur l'Eau - 2000/60/CE), dont le SDAGE est l'un des piliers, est d'atteindre **le bon état des eaux de surface d'ici 2027**. La mise en œuvre d'un PGS sur un cours d'eau vise donc, dans ce cadre, à concourir à l'atteinte de ce bon état, notamment du bon **l'état écologique** qui est lui-même **fortement corrélé à un bon fonctionnement hydromorphologique**, en particulier de son compartiment sédimentaire.

Le contexte réglementaire actuel, qu'il soit européen (DCE) ou français (Code de l'Environnement, CE), impose la **continuité sédimentaire** comme l'un des processus fluviaux indispensables à l'atteinte du bon état écologique des cours d'eau. S'il est clair que, dans l'esprit des textes réglementaires (notamment dans la Circulaire du 18 janvier 2013 relative à l'application de l'Article L.214-17 CE), la continuité des sédiments grossiers est privilégiée, en raison d'un fort déficit constaté sur de nombreux cours d'eau européen, celle des sédiments fins et des sables paraît elle aussi indispensable, en particulier pour alimenter les processus sédimentaires littoraux. Ce guide traite donc de **l'ensemble du spectre granulométrique en transit dans les cours d'eau, des sédiments fins aux sédiments grossiers**.

En dehors des objectifs d'atteinte du Bon Etat écologique des eaux (au sens de la DCE), il importe de prendre en considération les **autres enjeux présents dans ou le long des cours d'eau et pouvant nécessiter une gestion sédimentaire**. Il s'agit principalement d'enjeux socio-économiques situés dans des zones où se produisent des **phénomènes de dépôts sédimentaires** plus ou moins massifs, qui peuvent aggraver les inondations ou être en eux-mêmes des sources de contraintes ou de risques. Il peut s'agir aussi d'enjeux situés en lit majeur ou traversant le cours d'eau et qui seraient menacés par des **phénomènes d'incision et d'érosion latérale, en lien avec les processus hydrosédimentaires**.

Si l'état écologique des eaux (au sens DCE) se définit par des indicateurs spécifiques aux **milieux aquatiques** (indices poissons et invertébrés notamment), il importe aussi de prendre en compte dans les objectifs des PGS, la préservation, voire la restauration, d'autres compartiments de l'hydrosystème et notamment les **biocénoses terrestres rivulaires inféodées aux processus hydrosédimentaires** (la faune et la flore des bancs alluviaux par exemple) qui contribuent fortement à la **biodiversité des cours d'eau**.

Enfin, ce guide visant à accompagner la mise en œuvre du SDAGE, il se réfère régulièrement à un certain nombre de concepts élaborés au fil des années dans le cadre de la mise en œuvre de la DCE. Pour clarifier certains des concepts utilisés, le guide se base sur le document AQUAREF qui fait actuellement référence en France pour la mise en œuvre de la DCE et qui est disponible sur le lien : <https://hydrobio-dce.inrae.fr/quelques-definitions/>. Ces éléments conceptuels sont présentés en annexe 1.



Ce guide est destiné à améliorer la gestion sédimentaire sur tous les types de rivières, y compris les rivières torrentielles. En revanche, il n'est **pas adapté à la gestion sédimentaire des torrents à très forte pente** (généralement supérieure à 6% (Surell, 1841)), souvent assez courts et caractérisés par la triade d'unités géomorphologiques suivante : bassin de réception/chenal d'écoulement/cône de déjection. De plus, de nombreux torrents sont sujets à des phénomènes hydrosédimentaires parfois cataclysmiques, les laves torrentielles, qui nécessitent une gestion particulière. Un guide dédié aux risques torrentiels et traitant notamment de la partie « sédimentaire » de ces risques a été publié sous la maîtrise d'ouvrage de la direction générale de la prévention des risques (DGPR) du Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires (MTECT, 2023).

Le guide est articulé en **trois grandes parties et trois annexes** :

- une première partie présente les éléments de connaissances scientifiques et techniques nécessaires pour l'élaboration puis la mise en œuvre d'un PGS. Elles concernent principalement les processus et les formes hydrosédimentaires et leurs liens avec le fonctionnement écologique du cours d'eau ;
- la seconde partie présente la méthodologie proposée pour élaborer puis mettre en œuvre un PGS, sur la base d'un logigramme séquentiel ;
- la troisième partie est dédiée à la proposition d'une démarche visant à optimiser la conduite du projet, qui est l'un des points clés pour la réussite d'un PGS ;
- l'annexe 1 présente des éléments concernant la mise en œuvre de la DCE vis-à-vis de la gestion sédimentaire ;
- l'annexe 2 synthétise les textes juridiques actuels associés à la gestion sédimentaire ;
- une dernière annexe fournit le tableau général des EOMA (Enjeux/Objectifs/Moyens d'action et Actions) guidant l'élaboration et la mise en œuvre d'un PGS.



La gestion sédimentaire des cours d'eau est aujourd'hui encadrée par **plusieurs textes juridiques** dont l'élaboration d'un PGS doit tenir compte. Ils sont présentés plus en détail en annexe 2. Il s'agit en particulier de :

- **l'arrêté du 22 septembre 1994** relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières, qui interdit les extractions de granulats dans le lit mineur des cours d'eau ;
- **l'arrêté du 24 janvier 2001** qui modifie et complète l'arrêté précédent en interdisant aussi les extractions de granulats dans l'espace de mobilité des cours d'eau, soit une partie du lit majeur ;
- **l'arrêté du 30 mai 2008** fixant les prescriptions générales applicables aux opérations d'entretien de cours d'eau ou canaux soumis à autorisation ou à déclaration ;
- **l'article L 215-15 du Code de l'Environnement** concernant l'entretien et la restauration des milieux aquatiques qui indique que les **opérations groupées d'entretien régulier d'un cours d'eau**, canal ou plan d'eau et celles qu'impose en montagne la sécurisation des torrents sont menées dans le cadre d'un **plan de gestion établi à l'échelle d'une unité hydrographique cohérente** et compatible avec les objectifs du schéma d'aménagement et de gestion des eaux lorsqu'il existe. Un guide rédigé par la DREAL Aquitaine (2018) précise les modalités de mise en œuvre de cette procédure et notamment l'articulation entre les dossiers réglementaires IOTA<sup>1</sup>, les plans de gestion pluriannuels et les DIG ;
- **l'article L.214-17 I 2° du CE** : Classements de cours d'eau en liste 2. L'alinéa 2° de cet article établit une liste de cours d'eau, parties de cours d'eau ou canaux dans lesquels il est **nécessaire d'assurer le transport suffisant des sédiments** et la circulation des poissons migrateurs. Ce texte s'applique aux ouvrages (seuils, barrages) situés sur ces cours d'eau classés.



Les opérations d'entretien faisant l'objet d'un plan de gestion au titre de l'article L 215-15 du code de l'environnement ne peuvent pas être considérées a priori comme suffisantes pour répondre aux objectifs du SDAGE de gestion équilibrée des sédiments nécessaire au bon fonctionnement des cours d'eau.

<sup>1</sup> La nomenclature IOTA (Installations, Ouvrages, Travaux et Activités est annexée à l'article R.214-1 du code de l'environnement) concerne les IOTA ayant une incidence sur l'eau et les milieux aquatiques.

### QUELLE ARTICULATION PREVOIR ENTRE LES PGS ET LES ESPACES DE BON FONCTIONNEMENT (EBF) DEFINIS AU TITRE DU SDAGE

Un PGS peut constituer un volet important d'un plan de gestion global d'une rivière et de son bassin versant, au même titre que la définition, la préservation et la restauration de l'espace de bon fonctionnement (EBF) d'un cours d'eau (voir le guide technique « délimiter l'espace de bon fonctionnement », 2016).

Dès lors qu'une étude de diagnostic globale met en avant des enjeux de gestion sédimentaire forts en lien avec l'atteinte du bon état écologique, il est très probable qu'un PGS et une étude d'EBF soient nécessaires, en raison des liens étroits entre la composante morphologique de l'EBF et le PGS.

Toutefois, **ces 2 outils ne se superposent pas**. En effet, la préservation et la restauration des fonctions morphologiques de l'EBF peuvent faire partie intégrante d'un PGS. Mais ce PGS pourra aussi prévoir d'autres actions en lien avec la gestion sédimentaire qui sont sans lien direct avec l'EBF.

De même, l'EBF est un concept qui prend en compte d'autres enjeux que les enjeux liés à la gestion des sédiments. Il peut présenter un intérêt sur des cours d'eau avec des enjeux hydrauliques forts par exemple et sans enjeu sédimentaire particulier.

**Pour rappel, la définition d'un EBF implique également l'analyse des fonctions hydrogéologiques, biogéochimiques et biologiques en plus des fonctions morphologiques et hydrauliques.**

# 1. BASES CONCEPTUELLES ET TECHNIQUES

## UN COURS D'EAU OU DES COURS D'EAU ?

Un cours d'eau est un système complexe qui est régi par des flux d'eau et de matière, eux-mêmes contraints par les caractéristiques longitudinales (la pente en particulier) et transversales (un fond de vallée plus ou moins large et résistant) de leurs vallées. Ceci explique que **les propriétés fonctionnelles d'un cours d'eau varient dans l'espace** et qu'il est donc important de bien comprendre et distinguer les différents compartiments fluviaux. Les entités d'un corridor fluvial peuvent être décrites longitudinalement et latéralement.

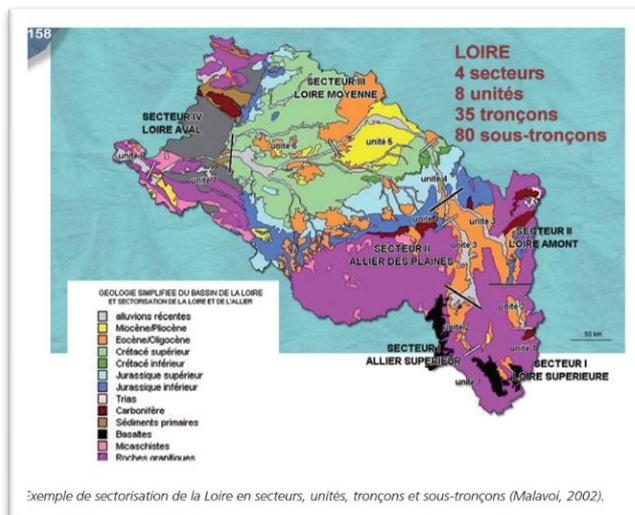
### 1.1.1. UNE ORGANISATION LONGITUDINALE DES ENTITES FLUVIALES

Tout cours d'eau présente généralement une physionomie et un fonctionnement qui varient tout au long de son parcours. Cette évolution amont-aval peut être brutale (lors d'un passage brusque de la montagne à la plaine ou de gorges à un vaste lit majeur) ou continue (augmentation progressive de la largeur, réduction progressive de la pente).

Pour en permettre l'étude, puis la gestion la plus adaptée à ces différents fonctionnements, tout cours d'eau devrait donc être segmenté en un certain nombre **d'entités emboîtées**, dont chacune présente un intérêt vis-à-vis de ces deux objectifs : **bien comprendre pour bien gérer**.

De nombreuses méthodes de **sectorisation** et de **classification typologique** ont été proposées dont celle de Malavoi et Bravard (2010), qui distingue **neuf entités emboîtées** présentant, chacune à leur échelle, une homogénéité des processus géomorphologiques et des processus écologiques qui leurs sont associés. Par ordre décroissant de taille, les entités de sectorisation proposées sont les suivantes (les ordres de grandeur des longueurs de ces entités, exprimés en n fois la largeur à pleins bords (l<sub>pb</sub>), sont donnés entre parenthèses).

- \* cours d'eau
  - \* secteur (≥ 1000 l<sub>pb</sub>)
    - \* unité (≥ 1000 l<sub>pb</sub>)
      - \* tronçon (100 à 1000 l<sub>pb</sub>) : nommé ici tronçon de contrôle géomorphologique (TCG)
      - \* sous-tronçon (100 à 1000 l<sub>pb</sub>) : nommé ici tronçon géomorphologique fonctionnel (TGF)
      - \* segment (10 à 100 l<sub>pb</sub>)
        - \* faciès (1 à 10 l<sub>pb</sub>)
          - \* sous-faciès (1 à 10 l<sub>pb</sub>)
            - \* micro-habitat (≤ 1 l<sub>pb</sub>)



a

| Unité | Tronçon                  | Lamtes amont-aval                   | long. (km) |
|-------|--------------------------|-------------------------------------|------------|
| U1    |                          | Sources – St Just-St Rambert        | 169.2      |
|       | T1                       | Sources-cl. Vernason (La Palisse)   | 18.4       |
|       | T2                       | Cfl. Vernason-Coubon                | 49.7       |
|       | T3                       | Coubon-Cfl. Borne                   | 8.9        |
|       | T4                       | Cfl. Borne – Pt SNCF Lavoute        | 12.2       |
|       | T5                       | Pt SNCF Lavoute-Cheyrac             | 5.6        |
|       | T6                       | Cheyrac-cl. Lignon Velay            | 32.7       |
|       | T7                       | Cfl. Lignon-cl. Ance                | 7.7        |
|       | T8                       | Cfl. Ance- Lamure                   | 5          |
| T9    | Lamure-StJust-St Rambert | 29                                  |            |
| U2    |                          | St Just-St Rambert-Bge de Villerest | 81.9       |
|       | T10                      | St Just-cl. Mare-Coise              | 22         |
|       | T11                      | Cfl. Mare-Coise-cl. Lignon Forez    | 16.6       |
|       | T12                      | Cfl. Lignon Forez- cfl. Aix         | 13.6       |
| U3    |                          | cfl. Aix – Bge de Villerest         | 29.7       |
|       |                          | Villerest-Bec d'Allier              | 191.7      |
|       | T14                      | Villerest-Pouilly/Charlieu          | 23.8       |
|       | T15                      | Pouilly/Charlieu-Iguerande          | 8.1        |
|       | T16                      | Iguerande-Digoin                    | 42.6       |
|       | T17                      | Digoin-Diou                         | 25         |
|       | T18                      | Diou-Decize                         | 51.8       |
|       | T19                      | Decize-Rac d'Allier                 | 40.4       |

b

Figure 1 : a) exemple de sectorisation complète d'un très grand cours d'eau, la Loire b) zoom sur les 3 unités amont jusqu'au niveau tronçon (TCG) (la Loire, Malavoï, 2002)

**NB** : les deux entités supérieures, secteurs et unités, n'ont d'intérêt que pour les très grands cours d'eau (plusieurs centaines de km et traversant des entités géologiques ou hydroclimatiques très contrastées). Dans le cadre du présent guide, il nous semble suffisant de proposer une **sectorisation à deux niveaux** : le tronçon, qui sera nommé ici **tronçon de contrôle géomorphologique (TCG)** et le sous-tronçon nommé ici **tronçon géomorphologique fonctionnel (TGF)**. Les 3 entités inférieures, des faciès aux microhabitats, bien que discriminées par des caractéristiques physiques (types d'écoulement, de géométrie en plan, en long et en travers, et de granulométrie) sont des entités à **signification écologique** au travers du concept d'**habitat pour les biocénoses aquatiques**. Elles sont donc qualifiées d'**entités de sectorisation morphoécologiques**.

#### 1.1.1.1. LE TRONÇON DE CONTRÔLE GEOMORPHOLOGIQUE (TCG)

Un TCG est un **tronçon de vallée** caractérisé par des **variables de contrôle géomorphologiques naturelles, immuables** à notre échelle de temps et qui vont en grande partie conditionner le fonctionnement du cours d'eau qui s'y écoule :

- la **largeur de la vallée (ou sa forme)** : c'est la première variable utilisée pour la discrimination car elle joue un rôle essentiel de contrôle des processus géodynamiques. En effet, elle représente l'extension maximale du lit majeur et permet donc d'appréhender l'**espace de mobilité** du cours d'eau, ainsi que la quantité de sédiments potentiellement mobilisable. Une limite de tronçon est placée à chaque changement important et brutal de la largeur du fond de vallée (élargissement ou réduction). En cas d'évolution progressive de cette largeur, il convient d'abord de déterminer s'il y a une modification du fonctionnement hydromorphologique ;
- la **pente du fond de vallée** rend compte de l'**énergie du cours d'eau** et notamment de sa capacité de mobilisation et de transport des sédiments ;
- et son « **hydrologie morphogène** » que l'on peut simplifier par le rang de Strahler (qui intègre aussi indirectement les apports solides relatifs). Une limite de tronçon est placée à chaque changement de rang de la rivière, c'est-à-dire après chaque confluence avec un affluent de taille équivalente. Pour les cours d'eau de taille importante, les confluences avec des cours d'eau de rangs inférieurs, mais intéressants en termes d'apports liquides et/ou solides, marquent également des limites de tronçons. En pratique, à partir du rang 4, les confluences avec les cours de rang n-1 délimitent des tronçons. A partir du rang 5, les confluences avec les rivières de rang n-2 sont également prises en compte.



Ces variables de contrôle ont été utilisées pour établir une **sectorisation nationale en TCG** dans le cadre du projet **SYRAH** (SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie. Valette et al., 2008, voir plus loin). Cette sectorisation a été réalisée sur plus de 200 000 km de cours d'eau français et est disponible sous forme de couche SIG au format shape sur le **portail Eaufrance**.

Cette sectorisation est reprise dans l'outil PRYMHO (Plateforme Pressions et Risques d'impacts Hydromorphologiques). **Nous proposons donc que le premier niveau de sectorisation d'un cours d'eau dans le cadre d'un PGS soit réalisé en utilisant comme base de départ ces TCG bancarisés**. Il sera cependant possible d'en modifier les limites au cas par cas au cours de l'étude, si cela est justifié.

**NB** : il est prévu que l'ordination de Strahler évolue légèrement dans les prochains référentiels. Mais celle qui a été utilisée jusqu'alors pour la délimitation des masses d'eau sera conservée.

Tel qu'identifié par les critères exposés ci-dessus, un **TCG** représente donc le « **cadre physique** » qui contrôle la morphologie et la dynamique du cours d'eau qui s'y développe. Celui-ci devrait donc en théorie, selon les lois de l'hydromorphologie fluviale, y présenter des caractéristiques hydromorphologiques (**variables de réponse**) relativement homogènes : style fluvial, géométrie (largeur et profondeur à pleins bords), pente du lit mineur (profil en long), séquence type de faciès d'écoulement, etc. Il arrive cependant que ces caractéristiques hydromorphologiques de réponse ne soient pas homogènes au sein d'un TCG pour des raisons le plus souvent liées à la présence de **paramètres de contrôle d'origine anthropique**, souvent très puissants (barrage, endiguements, etc.). Ce niveau de sectorisation basé sur les variables de contrôle naturelles est très intéressant car il permet souvent d'identifier, au sein d'un même TCG, des TGF qui pourraient servir de « référence à viser » dans un projet de restauration. Sur l'exemple présenté Figure 2, on conçoit bien qu'en supprimant ou en écartant largement l'endiguement étroit qui empêche la rivière de tresser, on pourrait aisément retrouver un tressage, qui est le style fluvial d'équilibre de ce TCG.

**1.1.1.2. LE TRONÇON GEOMORPHOLOGIQUE FONCTIONNEL**

Une fois les TCG identifiés, il convient de définir les tronçons géomorphologiques fonctionnels (**TGF**). Pour ce niveau de sectorisation nous privilégierons l'utilisation de **critères hydromorphologiques** :

- le **style fluvial** principalement, variable de réponse la plus évidente à identifier ;
- la présence d'**aménagement structurant** (paramètres de contrôle anthropiques) : endiguements plus ou moins étroits, rescindements de sinuosités, seuils et ponts plus ou moins fréquents, anciennes extractions ayant provoqué l'incision du lit, protections de berges continues, etc.

Notons que ce découpage en tronçons géomorphologiques fonctionnels rejoint le concept de « **secteur fonctionnel** » proposé par Amoros et al. (1988).



La sectorisation en **Tronçons de Contrôle Géomorphologique (TCG)** est nécessaire dès le début de l'étude, ne serait-ce que pour stratifier d'éventuels échantillonnages, notamment biologiques. En revanche, la **sectorisation en Tronçons Géomorphologiques Fonctionnels (TGF)** est l'une des finalités du diagnostic d'un futur PGS et sera donc réalisée au cours de celle-ci. La caractérisation des **entités morphoécologiques** (faciès d'écoulement, sous-faciès, habitats) sera à réaliser ou non en fonction des objectifs et des ambitions du PGS. Il est important de noter que dans de nombreux cas, en particulier si les TCG sont très naturels (absence de pression anthropique structurante), les limites spatiales des TCG et des TGF seront les mêmes (voir Figure 2)

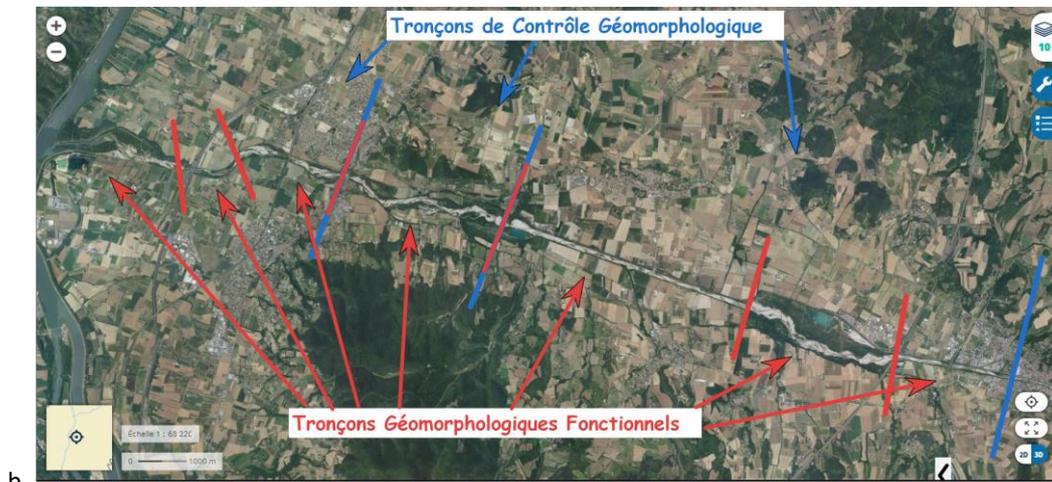
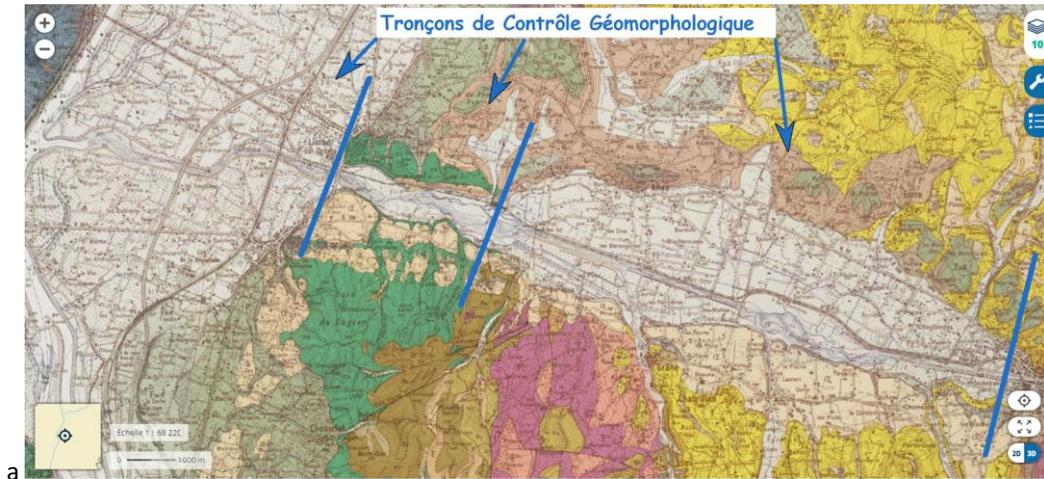


Figure 2 : exemple de sectorisation sur la Drôme aval a) en tronçons de contrôle géomorphologique (TCG) et b) en tronçons géomorphologiques fonctionnels (TGF). Notez qu'en cas de TCG homogènes sur le plan des variables de réponse, les limites des TCG et TGF se confondent

### CONCEPTS DE SECTORISATION « REGLEMENTAIRES »

Indépendamment de ces approches géomorphologiques de sectorisation, le législateur a aussi identifié la nécessité de découper les cours d'eau en entités présentant une certaine homogénéité fonctionnelle afin d'en faciliter la gestion. On trouve principalement deux types de découpage :

- les masses d'eau :

La **masse d'eau** est le découpage territorial élémentaire des milieux aquatiques destiné à être l'**unité d'évaluation de la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE)**. Au sein de ce référentiel, on distingue les masses d'eau souterraines et les masses d'eau de surface. Une **masse d'eau de rivière** constitue une partie distincte et significative des eaux de surface telles qu'une rivière, un fleuve ou un canal, une partie de rivière, de fleuve ou de canal.

**NB** : les TCG SYRAH bancarisés sont calés sur le référentiel SIG des masses d'eau. Il y a donc adéquation entre les **tracés** des deux types d'entités de sectorisation, mais pas nécessairement entre les limites amont et aval.

- les Unités Hydrographiques Cohérentes :

Le concept d'unité hydrographique cohérente (**UHC**) apparaît dans l'article L 215-15 du Code de l'Environnement (cité plus haut et disponible en ANNEXE 2) concernant l'entretien et la restauration des milieux aquatiques.

« I. – Les opérations groupées d'entretien régulier d'un cours d'eau, canal ou plan d'eau et celles qu'impose en montagne la sécurisation des torrents sont menées dans le cadre d'un **plan de gestion établi à l'échelle d'une unité hydrographique cohérente** et compatible avec les objectifs du schéma d'aménagement et de gestion des eaux lorsqu'il existe ».

Il est très difficile de définir de manière générale l'emprise spatiale cohérente pour établir un plan de gestion. Le législateur a essentiellement voulu exprimer par cette notion d'unité hydrographique cohérente (UHC), le fait que la prise en charge collective de la gestion d'un cours d'eau n'a de sens que si le linéaire concerné permet une étude pertinente du fonctionnement du cours d'eau, de ses éventuels dysfonctionnements et de leurs causes, permettant de déterminer les interventions adéquates. **Le législateur a donc souhaité empêcher toute gestion localisée sans vision globale du fonctionnement du cours d'eau.** L'évaluation par l'administration du respect de cette obligation d'échelle hydrographique cohérente doit se faire de manière pragmatique en tenant compte des différentes unités de cohérence possibles exposées ci-dessus (tronçons, sous-tronçons notamment), de la liberté des collectivités territoriales de se regrouper ou non et de l'intérêt de la prise en charge collective de l'entretien d'un cours d'eau, même si le niveau de l'unité hydrographique prise en charge n'est pas la plus grande.

Dans l'idéal, pour des cours d'eau de taille moyenne (quelques dizaines à une centaine de km de linéaire), **l'ensemble du cours d'eau** devrait être analysé au sein de son bassin versant.

Pour synthétiser les deux approches, nous pouvons considérer que les UHC sont des entités spatiales intéressantes pour proposer des « **stratégies** » de gestion globale alors que les TCG et les TGF seront plutôt des **entités « d'action »** plus concrètes : par exemple, désendiguement du TGF X au sein du TCG Y, dérasement des n seuils sur l'ensemble du TGF X, etc.

### 1.1.2. UNE ORGANISATION TRANSVERSALE DES ENTITES FLUVIALES

En parallèle à une discrétisation longitudinale du cours d'eau, que ce soit pour la phase d'étude ou pour la phase de gestion, il est indispensable aussi d'intégrer son organisation transversale (figure ci-dessous).

**NB** : toutes les entités transversales listées ci-après ne sont pas systématiquement présentes, en particulier dans les vallées en gorges ou même dans les vallées alluviales étroites au regard de la taille du cours d'eau.

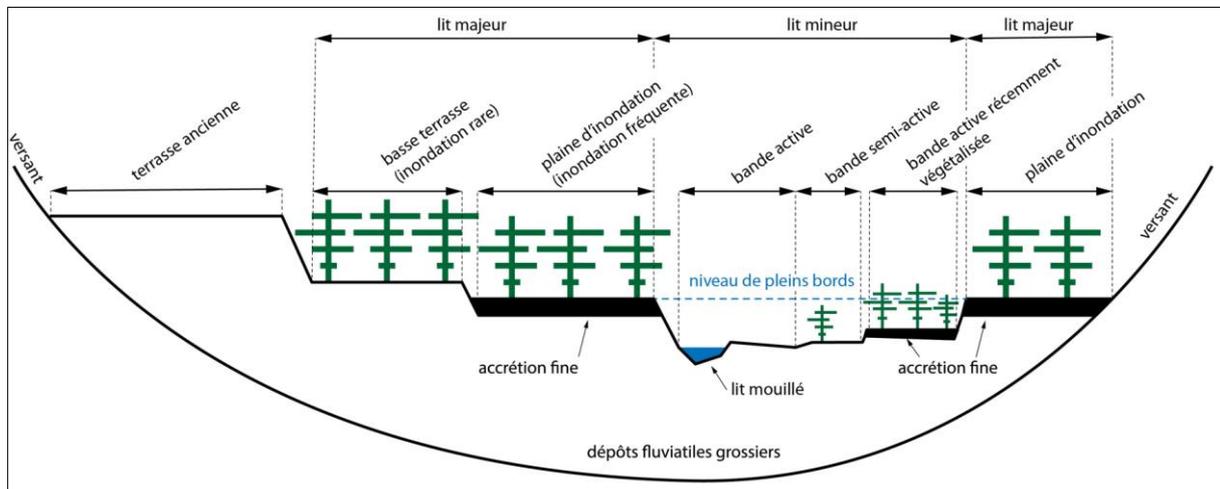


Figure 3 : schéma conceptuel des lits emboîtés dans une vallée alluviale

De l'extérieur vers l'intérieur de la vallée, nous pouvons distinguer plusieurs entités emboîtées les unes dans les autres :

- les **terrasses alluviales anciennes** : ces surfaces correspondent à d'anciennes zones d'alluvionnement qui se sont formées au cours des glaciations et des périodes interglaciaires du Quaternaire et sont notées **Fy à Fu** sur les cartes géologiques. Elles sont aujourd'hui perchées du fait de l'incision généralisée des cours d'eau et ne sont plus jamais inondées lors des crues. Par conséquent, elles ne se « construisent » plus par accrétion fine ;
- le **lit majeur** : c'est la zone d'expansion des crues lorsque les débits ne peuvent plus être contenus dans le lit mineur, généralement à partir de la crue de fréquence 1.5 à 2 ans pour les cours d'eau à chenal unique, plutôt 5 ans ou 10 ans pour les rivières en tresses. On peut souvent y distinguer deux entités emboîtées :
  - les **basses terrasses** qui se sont construites par alluvionnement depuis la fin de la dernière glaciation, il y a environ 12000 ans. Les terrasses récentes qui se sont formées suite à l'incision post Petit Age Glaciaire entrent dans cette catégorie ;
  - La **plaine alluviale d'inondation (floodplain)** : elle représente un espace alluvial fonctionnel en marge de la bande active, occupé par une végétation arborée spatialement continue, au sein duquel se produit une **dynamique d'accrétion par dépôt des sédiments fins** transportés lors des crues fréquentes capables d'inonder ces surfaces. Cet espace peut parfois apparaître sous la forme d'îlots boisés au sein de la bande active. Sa formation est intrinsèquement liée à la dynamique de divagation de la bande active au sein du fond de vallée.
- Nous trouvons ensuite le **lit mineur (main channel)** ou lit de « pleins bords » ou *plenissimum flumen* des juristes (celui qui définit le **Domaine Public Fluvial** sur les cours d'eau domaniaux). C'est aussi dans ce lit mineur que l'Arrêté ministériel de 1994 interdit les extractions de matériaux et que s'applique la réglementation concernant les « travaux en rivière » dite « **nomenclature IOTA** ». Lorsque le chenal est rectiligne ou au niveau du point d'inflexion entre deux sinuosités, le profil en travers du lit mineur est très symétrique et l'on n'y trouve généralement pas de bancs alluviaux très développés (parfois des bancs alternés dans les longs tronçons rectilignes à forte charge alluviale). Lorsque le lit mineur devient sinueux, la rive concave est généralement très verticale et c'est là que se concentre l'écoulement tandis que la rive convexe présente une pente qui remonte doucement de l'intérieur du chenal jusqu'aux limites du lit majeur. Cette partie convexe est la **zone principale de stockage plus ou moins temporaire de**

la charge alluviale grossière en transit dans le cours d'eau.

**NB** : La largeur à pleins bords dans les parties rectilignes, où le profil en travers est souvent symétrique, en U ou en auge, est souvent très inférieure à celle observée au droit des sinuosités. De même, sur les rivières très peu actives et à faible transport sédimentaire, le chenal peut être très homogène, sans zone de sédimentation apparente et sans différence de largeur, y compris dans les convexités. Sur les cours d'eau coulant sur le substratum géologique sous-jacent, une bande active peut exister mais elle ne sera généralement pas ou très localement végétalisée et on n'y observera pas de transit, sauf très sporadique, de charge alluviale grossière.

Au sein du lit mineur, plusieurs nouvelles entités emboîtées sont alors souvent identifiables, en particulier sur les rivières à dynamique active :

- la **bande active récemment végétalisée**, qu'un certain nombre d'auteurs nomment parfois plaine alluviale d'inondation naissante (*incipient floodplain*). Elle correspond à une bande alluviale encore active jusqu'à très récemment (une dizaine d'années) mais qui se trouve aujourd'hui à un stade assez avancé de transition vers une plaine d'inondation mature, ce qui se traduit par la présence d'une végétation arbustive ou arborée spatialement continue et **l'amorce du processus de sédimentation fine en surface**. Tout comme la bande semi-active, cette unité n'est pas systématiquement présente et elle traduit une dynamique de rétraction de la bande active ;
- la **bande semi-active** : située en marge de la bande active ou sous forme d'îlots au sein de la bande active, elle correspond à **d'anciens bancs sédimentaires mobiles qui commencent à se stabiliser**, et qui de ce fait sont occupés par une végétation pionnière arbustive, spatialement discontinue. La sédimentation fine de surface, typique de la plaine d'inondation, reste encore très marginale. Les surfaces minérales peuvent présenter une patine sombre sous l'effet de la colonisation par les lichens et mousses. Il s'agit d'une zone de transition entre la bande active et la plaine d'inondation, qui n'est pas systématiquement présente, et qui témoigne d'une dynamique de rétraction de la bande active, qui peut être d'origine hydrologique (réajustement post-crue) et/ou sédimentaire (réduction des apports sédimentaires) ;
- la **bande active** : elle correspond à l'espace fluvial occupé par les chenaux en eau et par les bancs sédimentaires non végétalisés. Comme son nom l'indique, il s'agit de la **partie " active " ou " mobile " du lit fluvial où se produit l'essentiel du transit sédimentaire par charriage** et son stockage plus ou moins temporaire. Elle n'est pas végétalisée ou très faiblement par des plantes pionnières herbacées annuelles. Sa largeur, en particulier son évolution temporelle, est souvent utilisée comme indicateur de fonctionnement. Dans le cas des lits sans bancs sédimentaires, la bande active se résume souvent au chenal en eau ;



Les processus de végétalisation de ce type de milieu sont très rapides. A peine quelques années sans crue importante capable de charrier des sédiments grossiers et d'arracher les plantules pionnières peuvent suffire pour que la bande active devienne **très végétalisée...** Inversement, une bande semi-active très végétalisée peut se transformer en bande active au cours d'une seule crue capable d'arracher la végétation qui s'y est développée (Figure 4 ci-dessous). Le phénomène d'élargissement brutal de la bande active est particulièrement marqué lors des événements hydrologiques extrêmes (voir Figure 22). Il faut donc être très vigilant, lorsque l'on décrit les caractéristiques de la bande active, à **bien replacer les observations dans leur contexte temporel ET surtout hydrologique.**

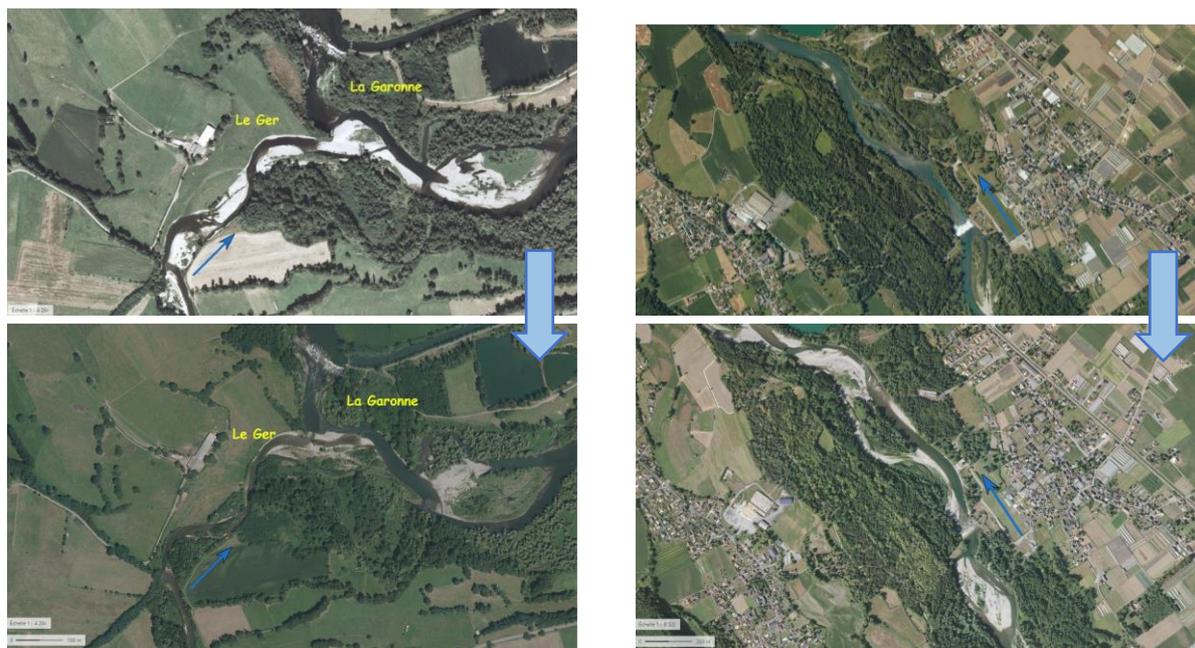


Figure 4 : a) vue de la confluence Ger-Garonne en 2002 et en 2010. Noter la forte emprise de la végétation dans l'ancienne bande active. b) inversement, régénération intense d'une bande active sur le Gave de Pau suite à la crue de 2013 (entre Q30 et Q50).

- Le **lit mouillé** (parfois appelé lit vif) : c'est la **partie submergée de la bande active** et c'est en son sein que se déroulent l'essentiel de la vie des biocénoses aquatiques comme la plupart des processus physico chimiques liés à l'eau. **Le problème est que ses dimensions, et notamment sa largeur, varient fortement en fonction du débit.** Nous proposons donc de qualifier de **lit mouillé** la partie du lit en eau jusqu'à un certain débit (le module par exemple). Cela permet à la fois de bien décrire la partie aquatique du lit mineur sans trop « empiéter » sur la bande active ;
- Enfin, le **lit d'étiage** est la partie, généralement très restreinte, du profil en travers d'un cours d'eau où s'écoule le débit des mois les plus secs, par exemple pour le QMNA moyen interannuel (débit mensuel sec de chaque année).

## LES PROCESSUS HYDROSEDIMENTAIRES ET LEUR MESURE



La grande majorité des données quantitatives disponibles dans la littérature vis-à-vis du transport sédimentaire concernent les **sédiments fins transportés en suspension**. Nous n'avons que très peu d'éléments quantitatifs sur les sédiments grossiers, dont les processus d'érosion/transport/dépôt sont beaucoup plus difficiles, et donc plus coûteux, à mesurer.

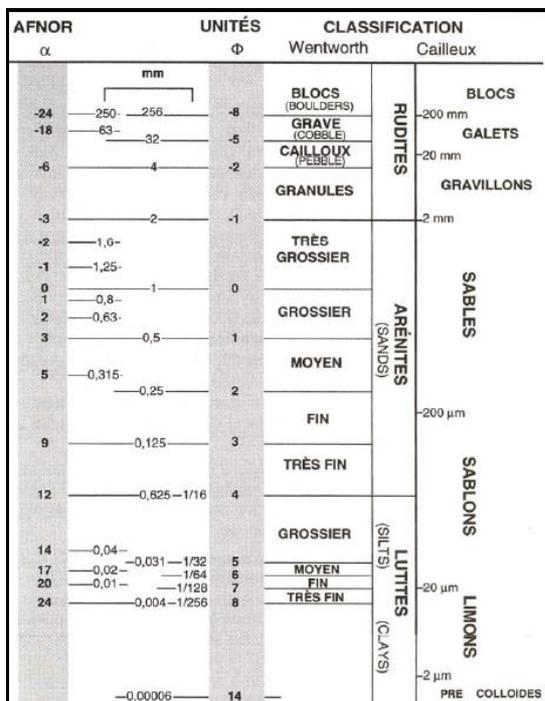
### 1.1.3. QUELQUES CONCEPTS ET DEFINITIONS

#### 1.1.3.1. SEDIMENTS FINS, MOYENS, GROSSIERS

À l'exception des hautes montagnes, les flux sédimentaires transportés sont généralement croissants vers l'aval avec l'affinement de la granulométrie. À de rares exceptions près, et sans effet anthropique majeur, **les flux de sédiments fins sont de 3 à 100 fois supérieurs aux flux de sédiments grossiers** (à nuancer cependant d'après les travaux de Turowski, 2010, voir Figure 37).

Une **distinction dichotomique sédiments grossiers/sédiments fins** est souvent utilisée par les gestionnaires des milieux aquatiques. Le plus généralement, la limite est située à 2 mm avec les « grossiers » au-dessus et les fins en dessous. Nous verrons que cette « simple » dichotomie n'est pas toujours pertinente, selon la discipline étudiée.

Il existe des classifications des sédiments par classes granulométriques, généralement proposées par des géologues, depuis plusieurs décennies, voire plusieurs siècles. Quelques exemples sont présentés ci-dessous. On y observe déjà des propositions en 3 classes avec la différenciation des sables (psammites chez Brongniart (1813) et arénites chez Grabau (1904)).



| Diamètre des particules | Brongniart (1813) | Grabau (1904) | sédiments meubles         | sédiments indurés   |
|-------------------------|-------------------|---------------|---------------------------|---------------------|
| > 2 mm                  | pséphite          | rudite        | gravier                   | conglomérat, brèche |
| de 2 mm à 62 $\mu$ m    | psammite          | arénite       | sable                     | grès                |
| < 62 $\mu$ m            | pélite            | lutite        | de 62 $\mu$ m à 4 $\mu$ m | silt                |
|                         |                   |               | < 4 $\mu$ m               | argile              |
|                         |                   |               | de 62 $\mu$ m à 4 $\mu$ m | siltite             |
|                         |                   |               | < 4 $\mu$ m               | argilite            |

Figure 5 : Exemples de classifications granulométriques

Plusieurs approches complémentaires, fonction des disciplines scientifiques concernées, proposent aujourd'hui d'autres principes de différenciation entre sédiments fins, grossiers...ou moyens.

1.1.3.1.1. Pour les hydrauliciens

C'est le mode de transport qui permet a priori de différencier les deux types de sédiments, mais ce n'est pas si simple.

Les **sédiments grossiers** sont en effet a priori transportés par **charriage** sur le fond, à des vitesses bien inférieures à celle de l'eau, tandis que les **sédiments fins** sont transportés en **suspension** dans la colonne d'eau, sensiblement à la même vitesse que celle-ci.

La courbe de Hjulström (1935), élaborée à partir de mesures en laboratoire et en rivière, fait bien apparaître cette scission entre les deux modes de transport (Figure 2).

**NB** : cette courbe n'est plus beaucoup utilisée mais elle est très pédagogique. On lui préfère aujourd'hui le diagramme adimensionnel de Shields pour étudier l'initiation du mouvement des sédiments fluviaux (Malavoi et al., 2011).

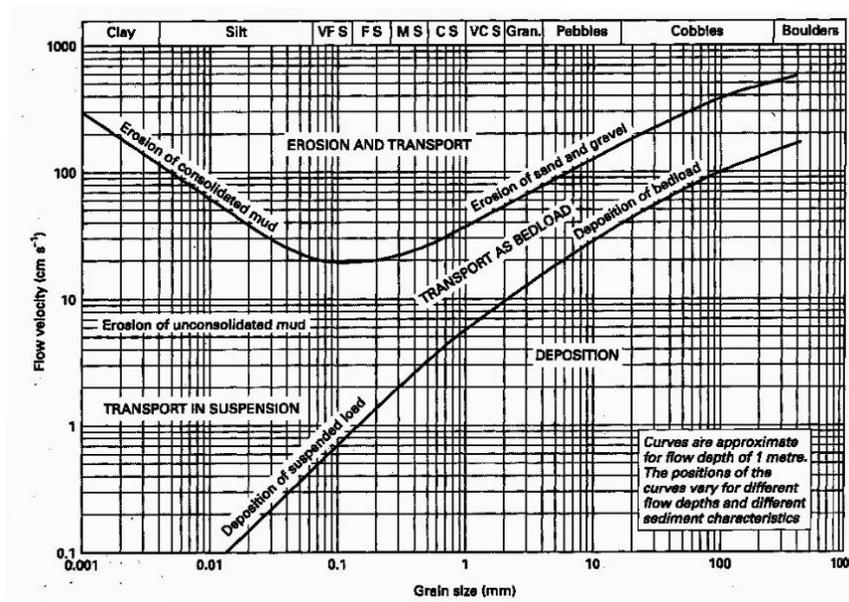


Figure 6: la courbe de Hjulström (1935)

On observe :

- qu'en dessous de la classe des limons (62.5 microns) le transport se fait uniquement en suspension ;
- qu'au-dessus de la classe des sables moyens (environ 0.25 mm), le charriage est le processus dominant ;
- qu'entre les deux (pour les sables fins et très fins notamment), les processus sont mixtes, fonction des vitesses d'écoulement dans la rivière et des phénomènes de turbulence.

La dichotomie fins/grossiers n'est donc pas tout à fait possible sur le critère du mode de transport du fait de la classe des sables présentant un régime de transport mixte, sauf si l'on considère comme fins les sédiments uniquement et systématiquement transportés en suspension, soit les limons et argiles.

1.1.3.1.2. Pour les chimistes

Il est admis que **les sédiments sont le milieu préférentiel de stockage des polluants divers** provenant du bassin versant d'un cours d'eau. Ils limitent ou ralentissent les flux transportés à l'aval et notamment les flux à la mer mais deviennent alors des réserves de composés toxiques partiellement et/ou potentiellement mobilisables. Les études menées sur les interactions entre les polluants et les matériaux alluvionnaires montrent que **les polluants vont préférentiellement se fixer sur la fraction très fine**, c'est-à-dire les argiles (diamètre inférieur à 3.9 μ), du fait de leurs propriétés électrostatiques particulières et dans une moindre mesure sur les limons, voire la fraction la plus fine des sables très fins (<80 μ, qui est aussi la limite inférieure de mesure granulométrique par tamisage selon la norme NF P 94-056.).

Une **limite dichotomique semble donc apparaître autour de 80 μ, soit la classe des limons et sables très fins.**

### 1.1.3.1.3. Pour les écologues aquatiques

La fraction superficielle des sédiments des rivières, quelle que soit leur nature, constitue l'habitat majeur des biocénoses aquatiques (voir le détail au 0). On distingue la zone aérobie (avec présence d'oxygène), où les organismes appartiennent à de multiples groupes, de la zone anaérobie, où les bactéries dominent.

#### A. *Les sédiments fins dans l'écologie des hydrosystèmes :*

Les sédiments fins sont souvent l'objet de critiques importantes dans les écosystèmes « rivières » et leur surabondance, notamment dans les régions où l'érosion des terres agricoles est intense, peut causer de graves dysfonctionnements. Pourtant, leurs rôles dans les écosystèmes sont multiples.

Pour les **aspects environnementaux positifs**, il est généralement admis que :

- les sédiments fins occupent une grande partie des lits des rivières, souvent dans l'épaisseur des bancs de sédiments plus grossiers. Ils servent alors de substrat fertile pour le développement de la végétation aquatique et riveraine ;
- les habitats marins qu'ils forment (sables et vases d'origine terrigène) sont très importants pour de nombreuses chaînes trophiques marines avec des conséquences économiques majeures sur la pêche de certaines espèces (poissons plats) ;
- les habitats subaquatiques qu'ils contribuent à façonner en mer ou en rivière telles que les vasières et les roselières sont d'intérêt majeur pour la biodiversité, spécialement pour les oiseaux et les amphibiens ;
- les apports de sédiments fins à la mer, notamment du fait de leur piégeage dans les grands ouvrages de retenue, sont en forte diminution depuis plus d'un siècle alors même que le niveau des mers s'élève, ce qui contribue à l'érosion du trait de côte.

Pour les **aspects environnementaux négatifs**, il est constaté que :

- les sédiments fins concentrent les polluants si bien que la chaîne trophique peut se retrouver contaminée ;
- ils peuvent fortement limiter les sous-écoulements (dits écoulements hyporhéiques) ;
- ils peuvent colmater les interstices des alluvions plus grossières et en réduire leur habitabilité (voir encadré) ;
- ils repartent facilement en suspension lors de la remobilisation des bancs de sédiments grossiers. Le colmatage et les pics de MES sont préjudiciables à de nombreux organismes rhéophiles.

#### B. *Les sédiments grossiers dans l'écologie des hydrosystèmes :*

Les alluvions grossières transportées par les cours d'eau, qu'elles soient submergées ou exondées selon les débits, sont essentielles au bon fonctionnement des biocénoses tant aquatiques que terrestres (celles vivant notamment sur les bancs alluviaux exondés du lit mineur une partie de l'année, sur la bande active et semi-active). On parle alors de **biocénoses riveraines**.

Dès leur dépôt, il se crée des sous-écoulements dans le squelette grossier qui agit comme un filtre en piégeant les MES et les matières organiques, apportant ainsi des nutriments à certains organismes.

Si les sédiments grossiers restent stables suffisamment longtemps, différentes fonctions biologiques sont observées :

- une fonction de lieu de vie où les organismes aquatiques et riverains utilisent les interstices et la porosité des sédiments comme habitat ;
- une fonction de support de ponte pour les poissons et les invertébrés sur les substrats submergés, et pour les oiseaux, les insectes et autres invertébrés sur les substrats émergés ;
- une fonction d'abri vis-à-vis des conditions hydrauliques et des prédateurs.

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

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

C. La problématique du colmatage

Les apports massifs de sédiments fins (argiles, limons, sables très fins), d'origine minérale ou organique (vases), constituent une perturbation majeure au sein des cours d'eau (Waters, 1995, Descloux et al., 2010). Ces apports intenses peuvent être liés à des processus naturels d'érosion de versants géologiquement fragiles (terres noires des Alpes du Sud par exemple) mais aussi à l'érosion de terres agricoles, à l'extraction de granulats en rivière, aux exploitations minières (comme cela est observé en Guyane actuellement) etc. Lorsque ces apports sont excessifs par rapport à la capacité des cours d'eau récepteurs à les évacuer, ils se déposent dans les lits mouillés et dans la bande active et viennent colmater les substrats alluviaux préexistants, généralement plus grossiers. Lorsque le dépôt de sédiments fins reste en surface ou dans les interstices entre les grains les plus grossiers du substrat alluvial en place, on parle de **colmatage externe ou superficiel**. Lorsqu'ils s'infiltrent plus profondément dans l'épaisseur des alluvions grossières (dans la sous-couche), on parle de **colmatage interne ou interstitiel**, qui est un phénomène plus grave d'un point de vue écologique.

- Le **colmatage de surface** se traduit par une perte directe d'habitat pour les biocénoses aquatiques inféodées aux substrats alluviaux grossiers. Cet état colmaté peut n'être que temporaire (étiage par exemple), les sédiments fins, s'ils ne sont pas trop cohésifs, pouvant être érodés assez facilement. Mais il apparaît que cet état peut être quasi permanent sur les cours d'eau soumis à une modification importante de régime hydrologique ne permettant pas la remise en mouvement saisonnière des sédiments fins, comme ce peut être le cas dans un tronçon court-circuité en aval d'un barrage de retenue par exemple.  
**NB** : lorsque l'épaisseur de sédiments fins est telle que l'on ne distingue plus les alluvions grossières sous-jacentes, on ne parle plus de colmatage mais de modification de substrat.
- Le **colmatage interstitiel** est lui aussi très pénalisant dans certains cas car il réduit la circulation de l'eau dans l'espace interstitiel et son habitabilité particulièrement importantes pour les biocénoses aquatiques (notamment les 20-30 premiers centimètres, zone d'incubation du frai des poissons lithophiles et habitat de très nombreuses espèces d'invertébrés aquatiques). Il perturbe aussi gravement les processus d'autoépuration et de régulation thermique se produisant au sein de cette zone hyporhéique. Gayraud (2001) montre qu'à l'intérieur du sédiment, l'abondance relative des macro-invertébrés est corrélée positivement avec la porosité, qui est elle-même liée au pourcentage de **sédiments de diamètre inférieur à 2 mm** (Figure 7).

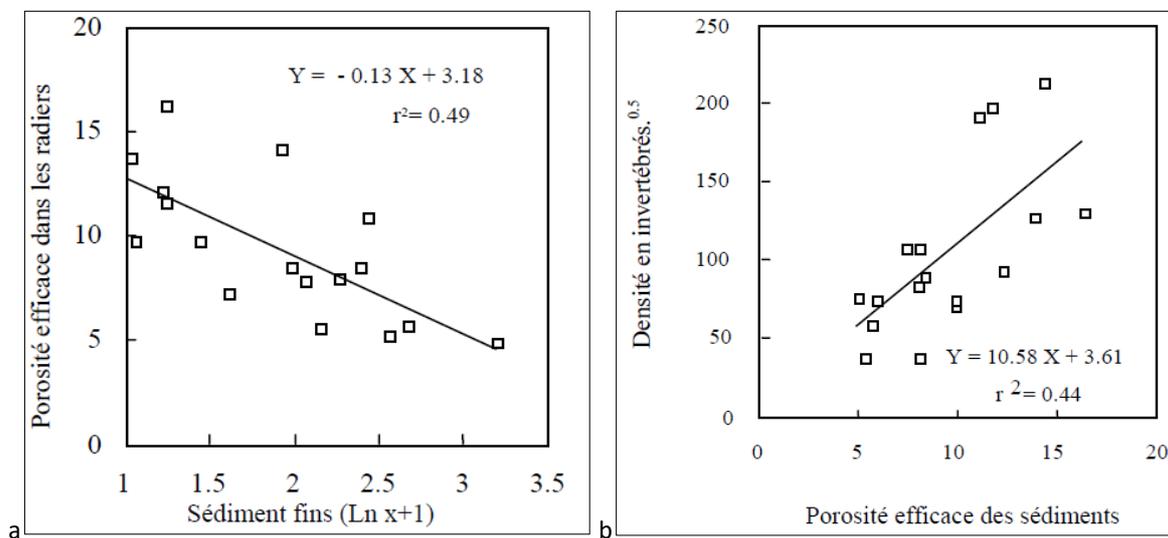


Figure 7 : a) Influence de la proportion moyenne de sédiments fins (< 2 mm) sur la porosité efficace moyenne des sédiments de sub-surface (0-15 cm) b) influence de la porosité efficace des sédiments de sub-surface (0-15 cm) sur la densité en invertébrés benthique, dans les radiers de 17 sites d'étude (Gayraud, 2001)

#### 1.1.3.1.4. Notre proposition de classement : sédiments fins, moyens, grossiers

Compte tenu de la diversité des approches et de l'hétérogénéité des limites de classes granulométriques associées, un **classement en trois catégories**, comme chez Brongniart (1813) et Grabau (1904), nous semble aujourd'hui le plus pertinent :

- les sédiments fins (<0.0625 mm (limons et argiles)) :
  - transport en suspension ;
  - très forte capacité de colmatage ;
  - cohésion possible ;
  - forte probabilité de piéger/transporter des polluants (même si la limite haute est plutôt autour de 0.08 mm).
- les sédiments moyens (0.0625 – 2mm (les sables : fins, moyens, grossiers, très grossiers)) :
  - transport mixte (mais généralement en suspension pour les sables fins et en charriage pour les grossiers) selon les conditions d'écoulement ;
  - capacité de colmatage moyenne à forte (pour les sables inférieurs à 1 mm).
- les sédiments grossiers (> 2 mm (graviers et diamètres supérieurs)) :
  - le charriage est le mode de transport dominant ;
  - pas d'effet de colmatage.

### 1.1.4. EROSION, PRODUCTION SEDIMENTAIRE, RENDEMENT SEDIMENTAIRE

#### 1.1.4.1. DEFINITIONS

- **L'érosion des sols** (*soil erosion ou soil loss*) désigne la production de sédiments sur le bassin versant par divers processus érosifs (ruissellement (*sheet, rill*), ravines (*gully*), glissements (*landslides*), etc.).
- **L'érosion totale ou brute** (*gross erosion*) désigne l'ensemble de l'érosion dans le bassin versant, c'est-à-dire l'érosion des sols vue précédemment mais aussi celle des berges et du fond du lit des cours d'eau.
- **La production sédimentaire** (*sediment yield*) est la part d'érosion brute qui est transportée par un cours d'eau et est mesurée (ou modélisée) en un point de celui-ci (souvent à l'exutoire d'un bassin ou sous-bassin versant). Notons qu'une grande partie des produits de l'érosion est stockée dans diverses entités à l'échelle du bassin versant (les puits). La production sédimentaire ne représente donc que la partie qui transite dans le cours d'eau au droit du point de mesure.

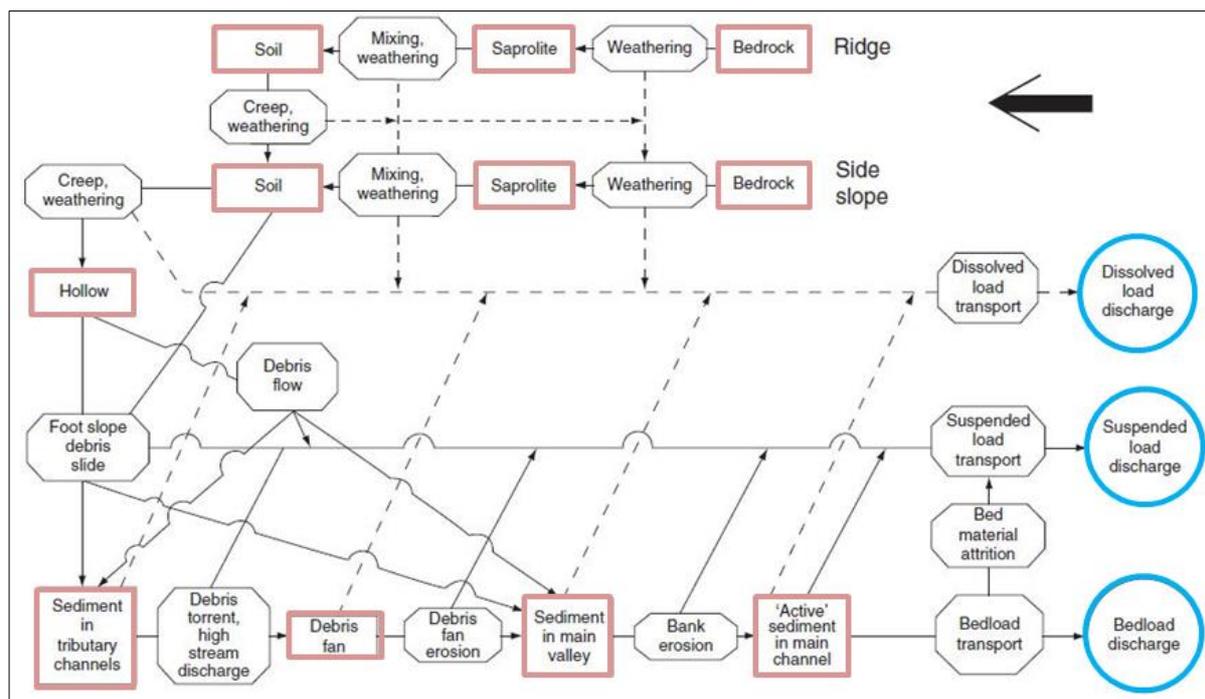


Figure 8 : Schéma conceptuel d'un bilan sédimentaire à l'échelle d'un bassin versant. Les rectangles marrons représentent les zones de stockage (puits), les octogones décrivent les processus de transfert et les cercles bleus les sorties sédimentaires. Les flèches pleines soulignent les transferts de sédiments et les flèches pointillées représentent les transferts de matières dissoutes. Reid et Dunne 2016

- La **production sédimentaire spécifique** (*Specific Sediment Yield*, voir plus loin) est généralement, au sein d'une même région, inversement proportionnelle à la superficie du bassin versant (elle se réduit donc de l'amont vers l'aval). La réalité est plus complexe et certains bassins montrent même des relations inverses (Vertsraeten et al 2009). Il semble en effet que la production spécifique stagne d'abord (Figure 9b) puis augmente assez fortement vers l'aval au fur et à mesure qu'augmente la quantité et la superficie des zones de stockage (puits), jusqu'à l'apparition des **plaines alluviales** qui vont devenir des puits majeurs et stocker progressivement une grande partie des apports amont (pour les sédiments fins).

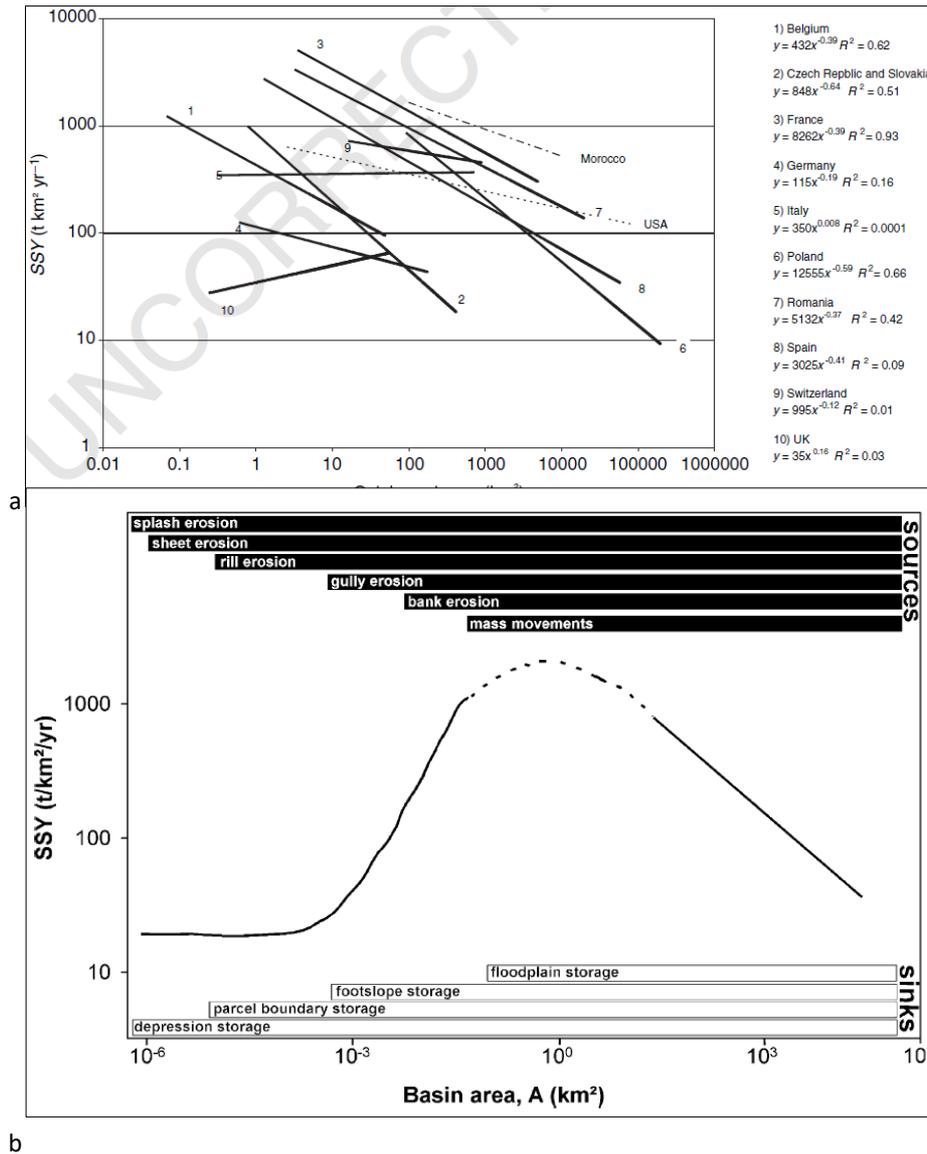


Figure 9 : (a) Relation entre la superficie du bassin versant et la production sédimentaire spécifique (SSY) dans 11 pays d'Europe, le Maroc et les Etats Unis. Données basées sur le remplissage de divers réservoirs de barrages. Verstraeten et al 2009. (b) De Vente et al, 2007

- Le rendement sédimentaire (RS)** (*sediment delivery ratio* ou **SDR**) est défini comme la production sédimentaire d'une zone divisée par l'érosion brute de cette même zone. Le RS est exprimé en pourcentage et représente l'efficacité du transport des particules érodées dans les zones d'érosion (les sources) vers le point où la production sédimentaire est mesurée. Ce concept est très important car il montre généralement le **très faible pourcentage de sédiments, qui une fois érodés sur un bassin arrivent finalement à son exutoire, via le cours d'eau collecteur**. Le RS est extrêmement variable d'un bassin à l'autre en fonction des caractéristiques, notamment topographiques, de celui-ci, mais aussi d'une année à l'autre en fonction des caractéristiques des précipitations et du ruissellement associé. Comme la production sédimentaire spécifique, **le RS évolue généralement négativement de l'amont vers l'aval** (Walling, 1983), proportionnellement à l'augmentation de la taille du BV du fait de l'augmentation du nombre et de la superficie des zones potentielles de stockage, en particulier dans le lit majeur (pour les sédiments fins). Dans l'exemple ci-dessous (Figure 10) on observe ainsi des valeurs de l'ordre de 70 % en amont mais de 15% en aval.

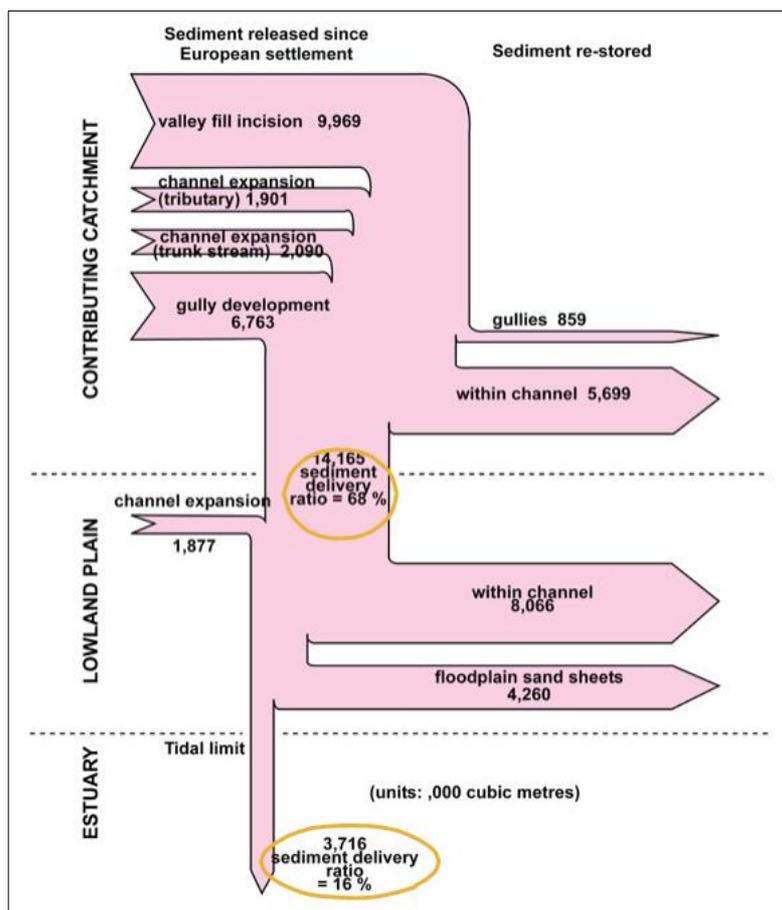


Figure 10 exemple de bilan sédimentaire à l'échelle d'un bassin faisant ressortir la décroissance amont-aval du RS (Fryirs and Brierley 2001)

Tableau 1 : exemples de rendements sédimentaires sur des cours d'eau de moyenne montagne tempérée (in Liébault 2003)

| Sites  | T (années) | S (km <sup>2</sup> ) | SDR (%) | Références  |
|--|------------|----------------------|---------|---|
| Garrett Creek (Californie, EU)                       | 24         | 10,8                 | 94      | Best <i>et al.</i> , 1995 (modifié)                                 |
| Matakonekone (Raukumara Range, Nouvelle-Zélande)     | 28         | 4,33                 | 93      | Marutani <i>et al.</i> , 1999 (modifié)                             |
| Oil Springs (Raukumara Range, Nouvelle-Zélande)      | 28         | 3,05                 | 93      | Marutani <i>et al.</i> , 1999 (modifié)                             |
| Watershed 10 (Chaîne des Cascades, Oregon, EU)       | 5-6        | 0,10                 | 79      | Caine et Swanson, 1989  |
| affluents de Redwood Creek (Californie, EU)          | 26         | de 1,6 à 44          | 78      | Pitlick, 1995 (modifié)   |
| Arbucies (Catalogne, Espagne)                        | 2          | 106                  | 58      | Batalla <i>et al.</i> , 1995 (modifié)                              |
| Rock Creek (Chaîne Côtière, Oregon, EU)              | ?          | 16,2                 | 50      | Dietrich et Dunne, 1978   |
| Saru River (Hidaka Range, Japon)                     | 30         | 1345                 | 41      | Nakamura <i>et al.</i> , 1995 (modifié)                             |
| Martinelli Basin (Montagnes Rocheuses, Colorado, EU) | 5-6        | 0,08                 | 11      | Caine et Swanson, 1989  |
| Appalaches (Caroline du Nord, EU)                    | ?          | ?                    | 10      | Phillips, 1991 ( <i>in</i> Bravard et Petit, 1997)                  |
| Mont-Lozère (Massif Central, France)                 | 3          | 0,17                 | 2,5     | Bernard-Allée et Cosandey, 1991 ( <i>in</i> Bravard et Petit, 1997) |

**NB** : l'érosion des sols, le transport solide, la production sédimentaire, les rendements sédimentaires peuvent se mesurer ou se modéliser. La plupart des données quantitatives que l'on trouve dans la littérature, qui restent

entourées d'une **très forte incertitude**, concernent les sédiments fins car ils sont plus faciles à mesurer que les grossiers.

#### LES PROCESSUS D'ATTRITION

Les processus d'attrition sédimentaire qui correspondent à une **diminution de la taille des grains** liée aux chocs et frottements des grains entre eux et contre le fond alluvial ou rocheux du cours d'eau) sont actifs dans le domaine fluvial. A titre indicatif, M. Dubille (2009) donne quelques valeurs d'attrition de roches de différentes natures pétrographiques : roches cristallines : 0.12% de perte de masse/km ; grès vosgien à ciment siliceux : 0.43 %/km ; calcaire micritique provenant du site de la Bastille à Grenoble : 0.12 à 0.29%/km, quartz filonien : 0.04 à 0.06 %/km. On peut retenir pour simplifier un **ordre de grandeur de 0.3% de perte de masse/km**. Cela signifie qu'un galet de 10 kg (soit un axe b de 20 cm environ) aux sources du Drac ne pèse plus que 7 kg environ à sa confluence avec l'Isère 130 km en aval (soit un axe b de l'ordre de 17 cm) ... cela reste cependant toujours un galet.

**NB** : l'attrition sédimentaire n'est pas le seul facteur explicatif de la réduction progressive de la granulométrie transportée par un cours d'eau de l'amont vers l'aval. La réduction graduelle ou brutale de la pente, donc de la compétence du cours d'eau, y contribue fortement aussi.

### LA MESURE DU COLMATAGE SUPERFICIEL ET INTERSTITIEL

Il existe plusieurs méthodes de mesure du colmatage.

Pour le **colmatage superficiel**, l'une des plus utilisées est le **protocole visuel Archambaud *et al.* (2005)**.

Il consiste à saisir puis soulever un élément identifié comme "substrat dominant" au niveau du point de mesure, puis d'estimer son degré de facilité d'extraction ainsi que la densité du nuage de matières en suspension généré dans la colonne d'eau.

Cinq classes de colmatage sont définies :

1. les éléments sont posés sur la sous-couche granulométrique et se soulèvent facilement. Ils ne génèrent pas de nuage de limon lorsqu'ils sont soulevés ;
2. les éléments se soulèvent plus difficilement. Le nuage de MES généré est peu dense, la couche de surface est à peine collée par une couche de limon légèrement colmatante et qui lie les éléments entre eux ;
3. les éléments se soulèvent avec un nuage de limon assez épais et sont très enchâssés ;
4. les éléments se soulèvent difficilement. Le nuage de MES produit est très dense. La structure est enchâssée dans une sous-couche très compacte dont l'emprise est forte sur les éléments ;
5. les éléments ne se soulèvent pas ou très difficilement (structure cimentée). C'est le cas lorsque la granulométrie est recouverte par une épaisse couche de limon, cette classe granulométrique se retrouvant aussi alors en substrat dominant.

La Figure 11 ci-dessous illustre cette classification (in Loire et al., 2021).



Figure 11 : exemples de niveaux de colmatage minéral superficiel. (© EDF, Sage, in Loire et al., 2021)

Pour le **colmatage interstitiel**, la méthode de la **conductivité hydraulique** développée par Datry *et al.*, 2011, Datry *et al.*, 2015, Descloux 2011 est souvent utilisée.

Il s'agit de mesurer la capacité du sédiment à laisser circuler l'eau à travers lui. Il a en effet été montré une forte corrélation entre le pourcentage de particules fines dans le sédiment et la conductivité hydraulique de ce dernier (Figure 12 a). Plus les fines sont en quantité importante, plus la conductivité hydraulique est faible (Descloux et al., 2010).

Le principe de cette méthode repose donc sur la mesure de la **conductivité hydraulique K**, dépendant des propriétés du milieu et de celles du fluide concerné.

K se calcule de la manière suivante (formule dérivée de la loi de Darcy qui permet le calcul du débit d'eau capable de s'écouler à travers un milieu poreux) :

$K = m \cdot Q / H$ , avec  $m$  : coefficient poche piézométrique, en  $m^{-1}$ , constante dépendant du matériel utilisé ;  $Q$  : débit d'eau infiltré, en  $m^3/s$  ;  $H$  : différence totale de charge, en  $m$ .

Sur le terrain, on enfonce dans le sédiment, au niveau de plusieurs points de mesure, un tube en métal creux à l'extrémité duquel se trouve une crépine (Figure 12 b), à une profondeur de **25 cm** environ, à l'aide d'une massette. A cette profondeur, la crépine se trouve dans la **zone hyporhéique**. On mesure ensuite le temps nécessaire à l'infiltration de 1 L d'eau dans le sédiment en un point et à une profondeur donnée. Ce temps permet de calculer le débit  $Q$  ( $Q = \text{quantité d'eau} / \text{temps d'infiltration}$ ).

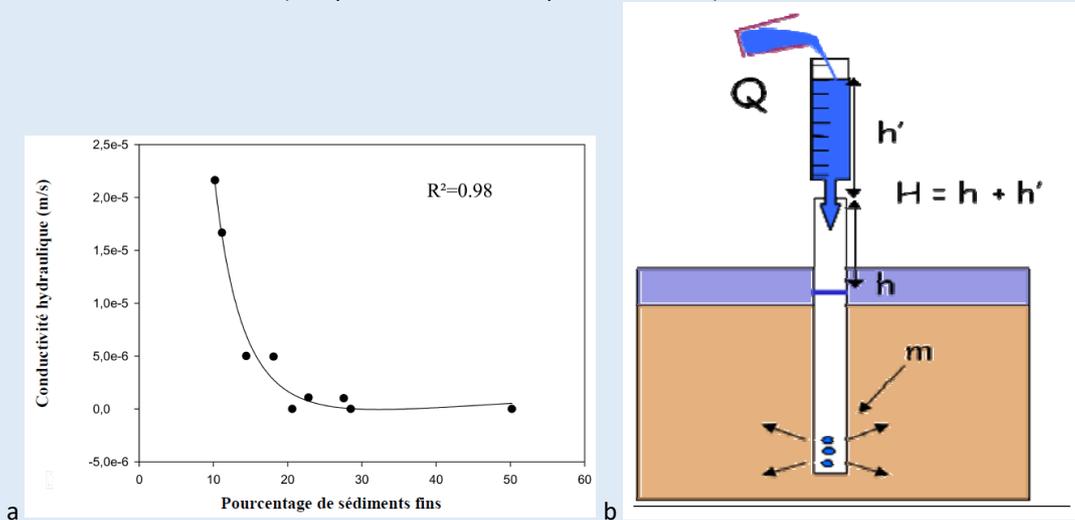


Figure 12 : méthode de la conductivité hydraulique développée (Datry et al., 2011).

Une autre méthode d'estimation du colmatage interstitiel est la **mesure de la profondeur moyenne d'oxygénation des sédiments dite méthode des bâtonnets**. Cette méthode initiée par Marmonier et al. en 2004 est utilisée depuis 2009 par l'OFB dans le cadre d'un plan de caractérisation hydromorphologique des cours d'eau français, en réponse aux exigences de la Directive Cadre sur l'Eau, qui impose la prise en compte de l'hydromorphologie dans le programme de surveillance des eaux.

Il s'agit d'insérer verticalement des tiges de bois d'une longueur de 30 cm dans le lit alluvial de la rivière. Ces bâtonnets doivent être retirés un mois après leur insertion. En condition anaérobie, l'activité bactérienne se traduit par la réduction de fer et manganèse et une coloration brune des substrats en bois. En mesurant la profondeur d'apparition des premières taches brunes sur le bâtonnet, on estime la profondeur moyenne d'oxygénation des sédiments. Plus la longueur de la zone claire sur le bâtonnet est grande, plus l'épaisseur de sédiment oxygéné est importante, moins la zone est colmatée.

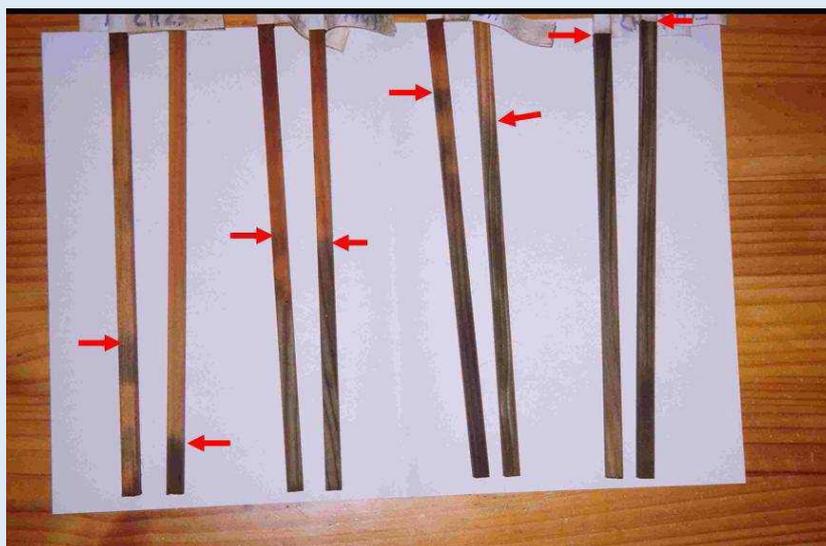


Figure 13 : Exemples de changement de coloration des bâtonnets après 1 mois d'incubation (© T. Datry)

### 1.1.4.2.ÉROSION BRUTE ET SPECIFIQUE

Le résultat des processus d'érosion à l'échelle du bassin versant (érosion des sols, érosion totale et production sédimentaire) est généralement exprimé en **valeurs brutes** ou en **valeurs spécifiques**, c'est-à-dire rapportées à la surface du bassin versant correspondant :

- elles peuvent être calculées selon divers pas de temps mais on trouve généralement des **valeurs annuelles**.
- de même, selon les publications, elles seront **généralement exprimées en masse** (kg ou tonnes) ou plus rarement en volume ( $m^3$ ). Il n'y a pas de convention sur les unités employées ;
- enfin, l'unité de surface de normalisation n'est pas non plus systématique. On trouve **généralement des valeurs exprimées par  $km^2$  ou par hectare**.

**NB** : il faut toujours **bien vérifier les unités employées**. Par exemple la base de données SIG du GloSEM 1.3 (Global Soil Erosion Modelling platform, Borrelli et al., 2022) donne des valeurs d'érosion des sols en kg/ha/an (<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/glosem>) mais la base FAO (LADA) les exprime en t/ha/an tandis que l'Irstea (Figure 15) donne des valeurs en t/ $km^2$ /an.

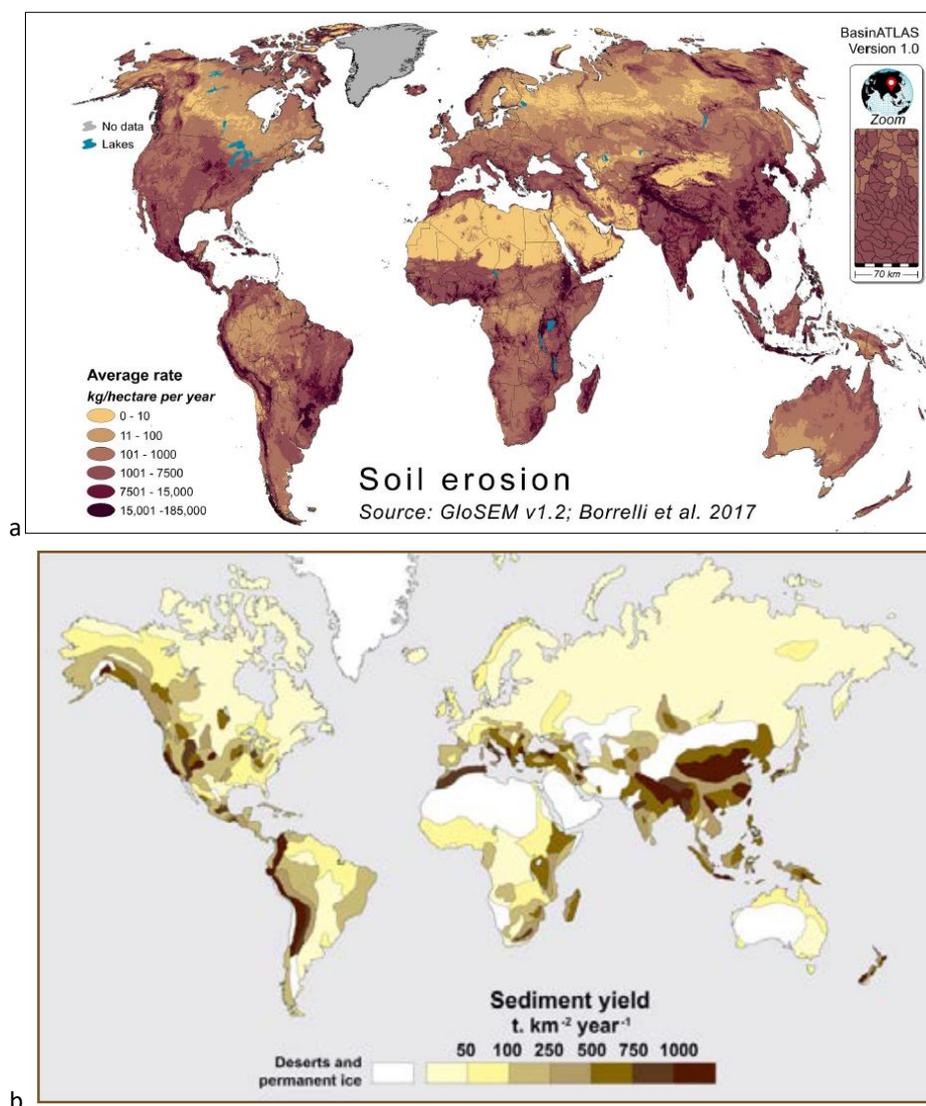


Figure 14 : exemples de divers types d'unités pour présenter des données concernant a) l'érosion des sols (GloSEM) ou b) la production sédimentaire (Walling et Webb 1983). Il faut diviser par 10 pour passer des premières (kg/ha/an) aux secondes (t/ $km^2$ /an)...et dans le second cas il s'agit de production sédimentaire et non d'érosion des sols...

Tableau 2 : extrait de la base FAO sur la production sédimentaire mesurée dans divers cours d'eau du monde

|                  | nombre de sites | Production spécifique moyenne (t/km2/an) | Production spécifique max. (t/km2/an) |              | nombre de sites | Production spécifique moyenne (t/km2/an) | Production spécifique max. (t/km2/an) |                   | nombre de sites | Production spécifique moyenne (t/km2/an) | Production spécifique max. (t/km2/an) |
|------------------|-----------------|--|---------------------------------------|--------------|-----------------|--|---------------------------------------|-------------------|-----------------|--|---------------------------------------|
| Taiwan           | 21              | 9 719                                    | 36 000                                | South Africa | 2               | 495                                      | 890                                   | Belgium           | 1               | 45                                       | 45                                    |
| Papua New Guinea | 5               | 6 817                                    | 11 126                                | Korea        | 10              | 461                                      | 1 056                                 | Uruguay           | 1               | 45                                       | 45                                    |
| New Zealand      | 29              | 5 797                                    | 20 000                                | Turkey       | 12              | 442                                      | 1 228                                 | Mozambique        | 3               | 44                                       | 80                                    |
| China            | 57              | 4 875                                    | 25 600                                | Iraq         | 2               | 387                                      | 722                                   | Moldova           | 1               | 40                                       | 40                                    |
| Indonesia        | 10              | 4 420                                    | 12 000                                | Afghanistan  | 8               | 381                                      | 750                                   | Egypt             | 2               | 40                                       | 40                                    |
| Niger            | 1               | 4 000                                    | 4 000                                 | Pakistan     | 3               | 350                                      | 502                                   | Hungary           | 8               | 37                                       | 49                                    |
| Nepal            | 23              | 3 325                                    | 10 205                                | Malaysia     | 26              | 323                                      | 1 550                                 | Syria             | 1               | 36                                       | 36                                    |
| Philippines      | 31              | 3 306                                    | 22 740                                | USA          | 50              | 316                                      | 2 570                                 | Mali              | 2               | 27                                       | 40                                    |
| Kenya            | 18              | 2 871                                    | 19 520                                | Japan        | 9               | 270                                      | 980                                   | Austria           | 1               | 23                                       | 23                                    |
| Albania          | 11              | 2 675                                    | 4 200                                 | Tanzania     | 9               | 262                                      | 543                                   | Côte d'Ivoire     | 2               | 16                                       | 22                                    |
| Sudan            | 2               | 2 190                                    | 3 422                                 | Spain        | 1               | 210                                      | 210                                   | Sweden            | 1               | 15                                       | 15                                    |
| Madagascar       | 4               | 2 189                                    | 3 130                                 | Azerbaijan   | 1               | 200                                      | 200                                   | Dem. Rep. Congo   | 2               | 15                                       | 18                                    |
| Peru             | 6               | 1 827                                    | 4 020                                 | Sri Lanka    | 5               | 200                                      | 239                                   | Netherlands       | 7               | 14                                       | 24                                    |
| Puerto Rico      | 2               | 1 750                                    | 1 800                                 | Australia    | 10              | 198                                      | 634                                   | Senegal           | 1               | 8  | 8                                     |
| El Salvador      | 2               | 1 362                                    | 1 539                                 | Nigeria      | 14              | 196                                      | 483                                   | Ukraine           | 3               | 8  | 15                                    |
| Iran             | 4               | 1 267                                    | 4 736                                 | Chile        | 3               | 196                                      | 237                                   | Poland            | 3               | 7  | 13                                    |
| Morocco          | 46              | 1 189                                    | 5 900                                 | Canada       | 37              | 179                                      | 1 100                                 | Chad              | 4               | 7  | 15                                    |
| Algeria          | 36              | 1 140                                    | 6 654                                 | Russian Fede | 15              | 157                                      | 2 000                                 | Centr. Afr. Rep.. | 4               | 5  | 9                                     |
| Ethiopia         | 10              | 1 082                                    | 3 480                                 | Zimbabwe     | 16              | 150                                      | 704                                   | Finland           | 2               | 0  | 0                                     |
| Bangladesh       | 5               | 1 040                                    | 1 545                                 | Thailand     | 104             | 129                                      | 966                                   |                   |                 |  |                                       |
| Italy            | 33              | 938                                      | 2 400                                 | Argentina    | 9               | 119                                      | 309                                   |                   |                 |  |                                       |
| Colombia         | 1               | 916                                      | 916                                   | Germany      | 20              | 118                                      | 402                                   |                   |                 |  |                                       |
| Viet Nam         | 3               | 830                                      | 1 190                                 | Cameroon     | 4               | 86                                       | 210                                   |                   |                 |  |                                       |
| Myanmar          | 3               | 781                                      | 904                                   | Romania      | 1               | 83                                       | 83                                    |                   |                 |  |                                       |
| Tunisia          | 1               | 708                                      | 708                                   | Slovakia     | 1               | 79                                       | 79                                    |                   |                 |  |                                       |
| India            | 29              | 648                                      | 1 735                                 | France       | 6               | 73                                       | 340                                   |                   |                 |  |                                       |
| Venezuela        | 8               | 636                                      | 2 200                                 | Brazil       | 5               | 68                                       | 190                                   |                   |                 |  |                                       |
| Georgia          | 1               | 630                                      | 630                                   | UK           | 15              | 55                                       | 164                                   |                   |                 |  |                                       |
| Lesotho          | 19              | 616                                      | 2 050                                 | Ghana        | 3               | 52                                       | 85                                    |                   |                 |  |                                       |
| Yemen            | 1               | 500                                      | 500                                   |              |                 |  |                                       |                   |                 |  |                                       |

production très forte si moyenne >500  
 production forte si moyenne >250  
 production moyenne si moyenne >100  
 production faible si moyenne >50  
 production très faible si moyenne <50

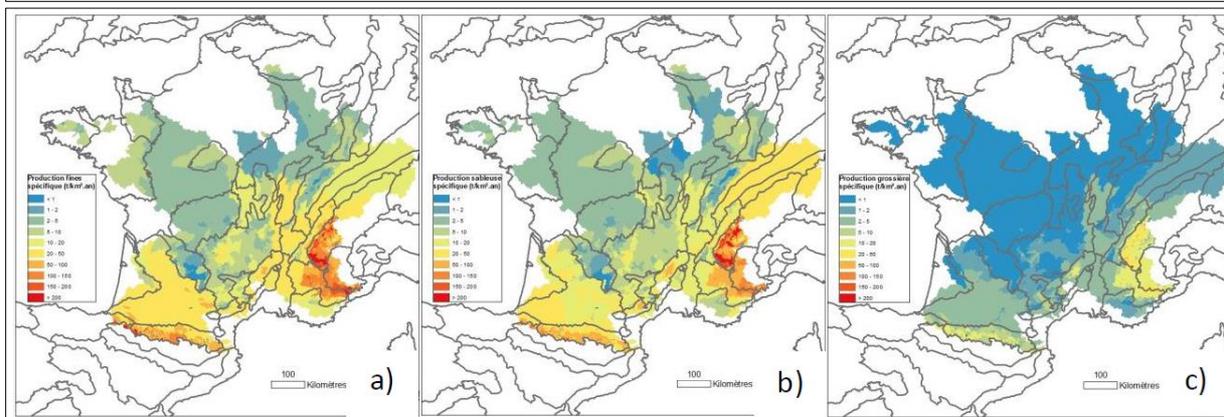


Figure 15 : cartographie des productions sédimentaires spécifiques. (a) les sédiments fins, (b) les sables, (c) les sédiments grossiers (Irstea, 2016) Sources, stockages, puits, transport et bilans sédimentaires

### 1.1.5. SOURCES, STOCKAGES, PUIES, TRANSPORT ET BILANS SEDIMENTAIRES

La plupart des auteurs considèrent aujourd'hui que l'on peut identifier **2, voire pour certains 3, grands types d'entités sédimentaires** dans un bassin versant : les zones de production sédimentaire ou **sources (sources)**, les zones de **stockage (stores ou storages)** et les **puits (sinks)**. Cette dernière entité est parfois considérée comme une sous-catégorie de stockage ; les alluvions qui s'y déposent et sont généralement stockées définitivement ou pour un temps très long. On considère en revanche que les alluvions qui se déposent dans des zones de stockage « simples » peuvent être reprises plus ou moins fréquemment par les processus érosifs. C'est finalement la durée du stockage qui différencie les « zones de stockage » des « puits » mais nous n'avons pas trouvé à ce jour de seuil de différenciation clair entre ces deux types d'entités.

Nous avons déjà vu plus haut quelques figures s'appuyant sur ces concepts (Figure 8, Figure 10b).

**NB** : on trouve le plus souvent dans la littérature la **simple dichotomie sources/puits** et c'est celle que nous proposons finalement d'utiliser.

Au sein et entre les zones de source et de puits sédimentaire s'insèrent des **processus d'érosion, de transport et de dépôt des sédiments**.

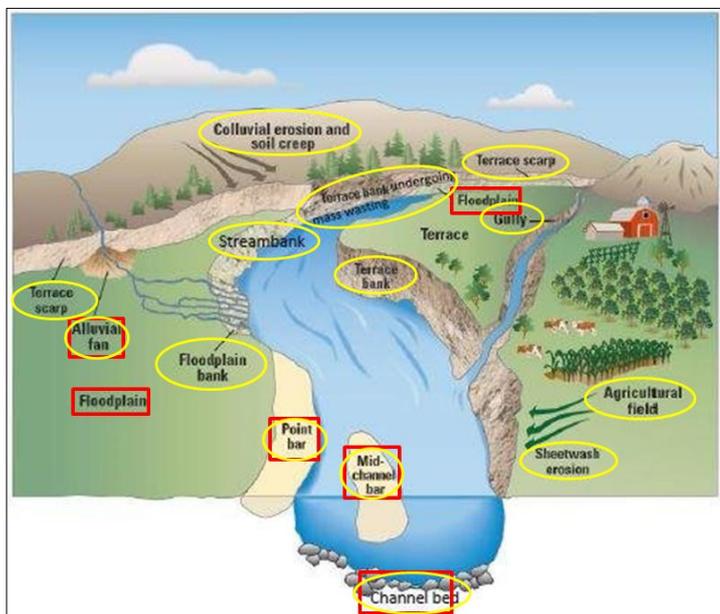


Figure 16 : Sources (ellipses jaunes) et puits (rectangles rouges) sédimentaires naturels. Le croisement des deux indique les puits temporaires pouvant régulièrement redevenir des sources. D'après Gellis, 2016 modifié.

Nous verrons donc ci-après l'enchaînement des processus hydrosédimentaires depuis les sources vers les puits en passant par le transport des sédiments qui s'achèvera par une présentation des différents concepts de bilan sédimentaire.

#### 1.1.5.1. LES SOURCES SEDIMENTAIRES

Pour un cours d'eau spécifique, les sources de sédiments au sein de son bassin versant peuvent être séparées en deux grandes catégories en fonction de leur origine :

- les « pentes » du bassin versant lui-même et les affluents qui les drainent, qui fournissent les « **apports externes** » ;
- les corridors fluviaux, c'est-à-dire les berges et le fond du lit des cours d'eau, qui fournissent les « **apports internes** ».

**RAPPEL** : si l'on connaît assez bien, en France ou ailleurs dans le monde, les apports sédimentaires fins de nombreux bassins versants, car ils sont relativement faciles à mesurer (mesures directes de MES ou mesures de turbidité), il n'en n'est pas de même pour les sables et les sédiments grossiers dont la métrologie est plus complexe. Comme indiqué plus haut, la grande majorité des données quantitatives sur l'érosion des sols, les apports sédimentaires, les rendements sédimentaires, les bilans sédimentaires concernent les sédiments fins transportés en suspension.

##### 1.1.5.1.1. Apports externes

###### A. Primaires

Il s'agit de sédiments qui, après leur mobilisation sur les versants via divers processus érosifs, arrivent quasi-directement au cours d'eau par le biais de transferts gravitaires plus ou moins complexes. La production primaire est issue de formes d'érosion associées à des processus d'ablation de la roche mère ou de dépôts de matériaux meubles des versants (cônes et talus d'éboulis, colluvions, sols et lithosols, moraines).

Les processus clés en matière de transfert sédimentaire direct entre les versants et les chenaux sont les **mouvements de terrain** (glissements de terrain, coulées de débris, laves torrentielles) et les **ravinements**, car les volumes mobilisés peuvent être considérables (Figure 17). A titre d'exemple, les vitesses d'ablation obtenues par différentiel topographique LiDAR de ravines incisées dans des dépôts meubles de versant (dépôts d'obturation glaciaire) sur le site du Réal dans les Alpes Maritimes peuvent atteindre des valeurs de 14 cm/an (Liébault, 2017). Le suivi par laser scanning d'un bassin de réception rocheux dans des alternances de calcaires et de marnes (Manival, Chartreuse) a montré des vitesses d'ablation nettement inférieures, comprises entre 0.14 et 1.46 cm/an (Loye 2013). Ces valeurs intègrent à la fois les processus d'éboulement des parois rocheuses et les coulées de débris dans les dépôts de pente. Même si les données de production sédimentaire primaire restent encore aujourd'hui très ponctuelles, la généralisation des levés LiDAR et leur répétition dans le temps devraient permettre à termes des avancées considérables en matière de connaissance des vitesses d'ablation et de leur variabilité spatiale.



Figure 17. Exemples d'apports externes par production primaire : (A) coulées de débris ; (B) glissement de terrain ; (C) dérochoir ; (D) ravinement

Selon la nature lithologique du bassin versant, ces apports comprendront une part variable de sédiments, fins, moyens et grossiers (revoir Figure 15 et figure ci-dessous (Hydrétudes, 2022)).

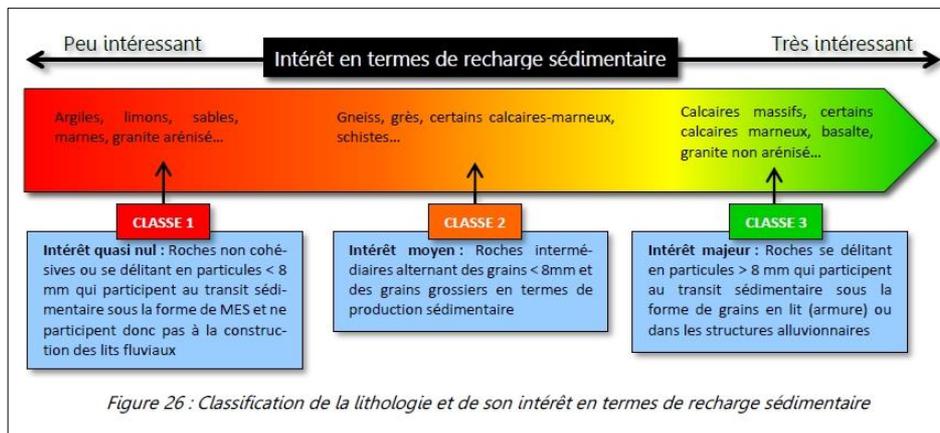


Figure 18 : classification lithologique simplifiée et intérêt en termes d'apports sédimentaires grossiers (Hydrétudes, 2022)

## ENCADRE : CONNECTIVITE SEDIMENTAIRE ET CARTOGRAPHIE DES SOURCES SEDIMENTAIRES PRIMAIRES

L'identification des **sources sédimentaires de versant** implique une évaluation du degré de connexion entre la zone de production sédimentaire et le réseau hydrographique. Une zone de versant en érosion active qui n'est pas directement connectée au réseau ne constitue pas à proprement parler une source sédimentaire. Cette évaluation peut se faire de manière experte à partir d'une photo-interprétation de l'imagerie disponible. La meilleure façon de procéder est de travailler sur un SIG à partir des ortho-images de l'IGN (BD ORTHO 50 cm) sur lesquelles sont projetées des courbes de niveau permettant de visualiser la présence des talwegs et les formes du relief (mouvements de versant). Dans l'idéal, l'utilisation d'un MNT LiDAR offre la meilleure solution possible pour la visualisation du relief, et notamment la détection des formes d'érosion sous couvert forestier. En l'absence de données LiDAR, une reconnaissance de terrain peut s'avérer indispensable, notamment dans les bassins versants forestiers où la plupart des sources sédimentaires sont masquées par la végétation. Cette approche a été utilisée récemment en Nouvelle-Calédonie pour cartographier les sources sédimentaires de bassins versants impactés par l'activité d'extraction du nickel (Fig. X). Elle a permis notamment de montrer que **la surface relative des sources sédimentaires classées comme « majeures » (celles qui forment des engravements dans le talweg récepteur) est un très bon indicateur de la production sédimentaire primaire du bassin versant** (Bertrand et Liébault, 2019). Cet indicateur est également utilisé pour évaluer de manière empirique la production sédimentaire extrême des torrents, suite à l'analyse statistique multivariée des données de curage de plages de dépôts principalement localisées en Isère et en Savoie (Peteuil, 2010 ; Peteuil et al., 2012).

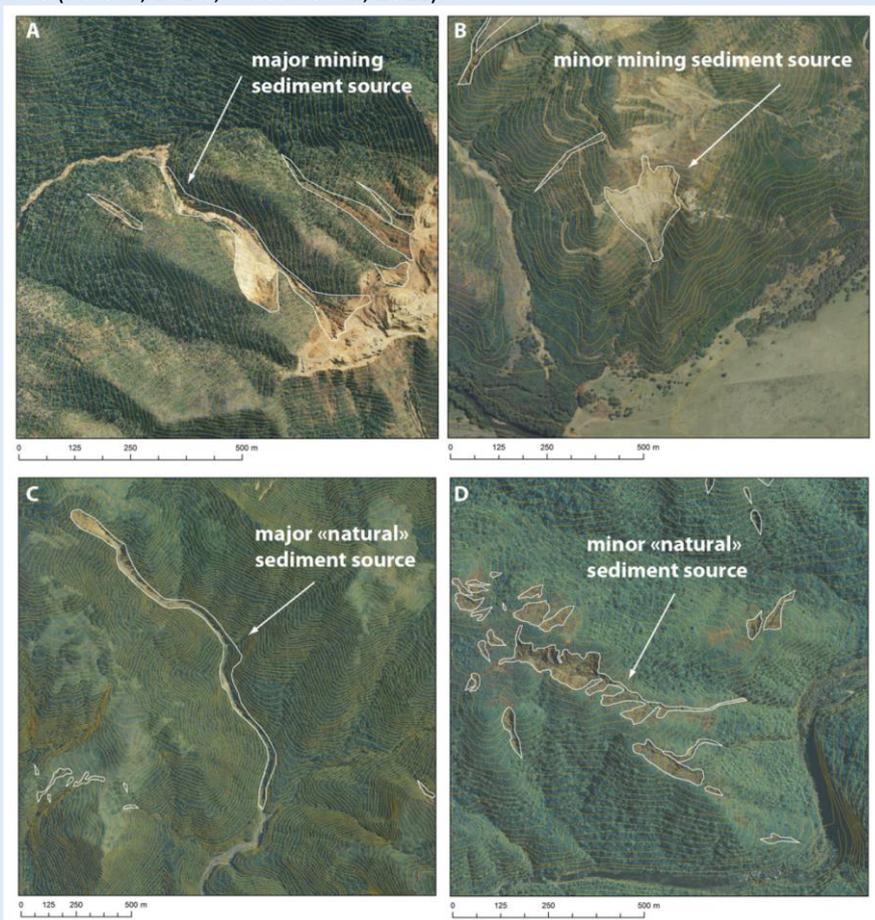


Figure 19 : Exemples de cartographie des sources sédimentaires dans des bassins versants de Nouvelle Calédonie à partir d'ortho-images et de courbes de niveau extraites d'un MNT de résolution 10 m (Bertrand et Liébault, 2019) ; les sources ont été classées en fonction de leur origine (minière ou « naturelle ») et de leur degré de production sédimentaire évaluée de manière qualitative à partir de la présence ou de l'absence d'engravements dans le talweg récepteur

La connectivité sédimentaire peut également être évaluée à partir d'un **indice de connectivité** structurelle fondé sur l'analyse morphométrique du relief (Borselli et al., 2008 ; Cavalli et al., 2013). Cet indice évalue pour chaque pixel d'un MNT son potentiel de connexion sédimentaire avec une cible pré-identifiée, qui peut être un exutoire ou un tronçon hydrographique (Figure 20). L'indice est un ratio calculé entre une composante amont qui traduit la capacité à transférer vers l'aval les sédiments produits, et une composante aval qui est principalement fonction de la distance que les sédiments doivent parcourir pour atteindre la cible pré-identifiée. L'indicateur peut être calculé automatiquement à partir de l'outil SedInConnect en libre accès :<https://github.com/HydrogeomorphologyTools/SedInConnect> 2.3

Ce type d'approche permet d'évaluer rapidement les zones de versant fortement connectées au réseau hydrographique. Elle peut ainsi fournir une première évaluation qualitative sommaire des zones potentielles de recharge depuis les versants, mais elle ne peut remplacer une cartographie experte des sources sédimentaires, qui reste encore aujourd'hui essentielle pour établir un diagnostic sur les apports de versants.

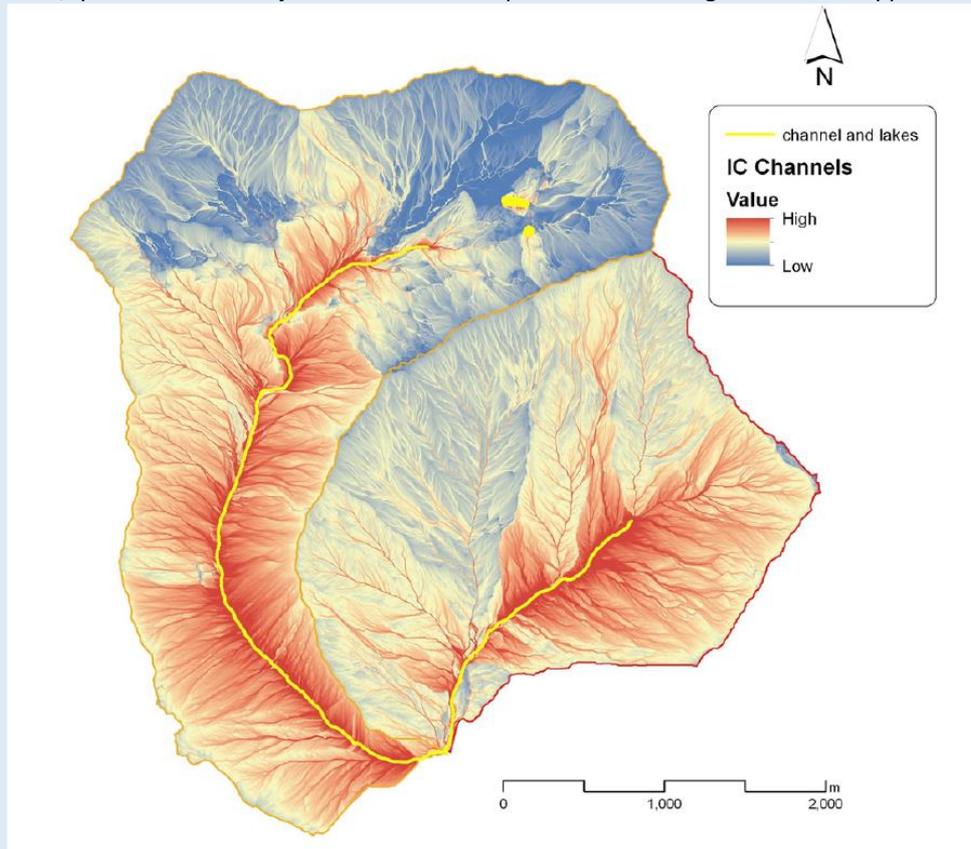


Figure 20 : Exemple de cartographie de l'indice de connectivité sédimentaire réalisée sur deux petits bassins versants de montagne en prenant comme cible le drain principal des deux torrents (Cavalli et al., 2013)

**B. Secondaires**

Il s'agit des apports des affluents, constitués eux-mêmes d'apports externes et internes (voir ci-après).



Figure 21 : exemple de forts apports externes secondaires. La confluence de la Durance (en haut) et du Sasse (à droite)

**APPORTS EXCEPTIONNELS SUITE A DES CRUES RARES OU DES GLISSEMENTS DE TERRAIN**

Ces apports exceptionnels peuvent avoir des **incidences fortes et durables sur la dynamique sédimentaire des cours d'eau récepteurs**. Le Bez en amont de Châtillon-en-Diois a subi un exhaussement brutal sous l'effet d'une recharge sédimentaire exceptionnelle induite par la réactivation du glissement de terrain de Ravel-et-Ferriers en 1994 (Astrade et al., 1998 ; Bravard et Landon, 2003). Une vague sédimentaire s'est propagée dans les Gorges des Gâts, occasionnant des engravements qui ont préoccupés les services de l'Etat jusqu'à ce que le Bez se réincise progressivement dans ses dépôts. Un exemple beaucoup plus récent est celui de la tempête Alex d'octobre 2020 dans les vallées de la Vésubie et de la Roya. Cette tempête en provenance de l'Atlantique Nord a traversé la France et généré un épisode Méditerranéen d'ampleur exceptionnelle, avec des cumuls de pluie supérieurs à 500 mm en 24h dans les hautes vallées (période de retour estimée à plus de 1000 ans). La réponse géomorphologique a été particulièrement dramatique en Vésubie, où le fond de vallée a été enseveli sous des engravements estimés à plusieurs millions de m<sup>3</sup>. Ceci s'est traduit par la formation rapide d'un lit en tresses sur un linéaire de 30 km (Figure 22 ci-dessous), avec un exhaussement du profil en long qui a pu atteindre localement 10 m, notamment dans les hautes vallées (ONF-RTM-INRAE 2022 ; Liébault et al., 2022). Des engravements d'une telle ampleur restent extrêmement rares, avec sans doute seulement deux cas analogues au cours du 20e siècle sur le territoire français : les crues du Guil et de l'Ubaye en juin 1957, et celles de la Têt et du Tech en octobre 1940.



Figure 22 : Élargissement brutal de la bande active et fort engravement de la Vésubie suite à la tempête Alex d'octobre 2020 près de Roquebillière (période de retour des précipitations sur 24 h de plusieurs milliers d'années...)

### 1.1.5.1.2. Apports internes

Conceptuellement, les apports internes sont ceux déjà présents dans les fonds de vallée que va solliciter le cours d'eau par déplacement latéral ou incision. On parlera aussi de « **stock alluvial interne** ». Celui-ci se présente sous **trois formes** :

- le **stock disponible dans le lit mineur actif (bande active et semi-active)** et généralement en transit progressif vers l'aval (les macroformes alluviales);
- le **stock parfois disponible sous la partie active et régulièrement mobile du lit mineur** et généralement hérité de périodes de sédimentation anciennes. Ce stock ancien peut être plus ou moins rapidement **déstocké en cas d'incision** ;
- le **stock du lit majeur et des terrasses**, hérité lui aussi de l'histoire géomorphologique ancienne (pléistocène et holocène) de la vallée et injecté progressivement dans le cours d'eau par les processus d'érosion latérale.

#### APPORTS SEDIMENTAIRES PAR EROSION DE BERGES

Sur de nombreux cours d'eau à dynamique active, en tresses ou à méandres, **l'érosion des berges fournit une part significative de la charge solide du cours d'eau**. Il est important cependant de toujours analyser ces apports latéraux en étudiant aussi le restockage sous la forme de bancs qui progressivement s'exhaussent et se végétalisent. Rollet (2007) a bien montré sur l'Ain que les érosions de berge ne contribuaient pas à la recharge **nette** en sédiments (c'est-à-dire qu'ils ne génèrent pas d'excédent sédimentaire) car un volume équivalent était immédiatement stocké dans les convexités.

Le stock du lit majeur et des terrasses plus anciennes est cependant, via les processus d'érosion latérale, une **source sédimentaire majeure** pour ce type de cours d'eau, souvent **indispensable à leur équilibre sédimentaire**, en particulier quand le système fluvial est en voie d'ajustement à la suite d'un tarissement sédimentaire et que les milieux érodés latéraux sont perchés.

Nous supposons que cette part de l'érosion des berges est prépondérante sur les tronçons de rivière déficitaires en apports sédimentaires externes, que ce soit pour des raisons de tarissement des sources primaires (stabilisation des versants notamment) ou de piégeage des apports secondaires et des apports des tronçons amont dans des structures anthropiques, en particulier les grands barrages.

**NB** : Bien souvent, en dehors des pertes foncières qui lui sont associées, l'érosion des berges est perçue comme une nuisance pour les milieux aquatiques, notamment lorsque ces berges sont composées de sédiments fins ou de sable à fort pouvoir colmatant. Si les berges sont composées de sédiments plus grossiers, la mobilité latérale est en revanche plutôt bénéfique pour les milieux aquatiques et riverains. L'intérêt de la préservation ou de la réactivation de l'érosion latérale dans le cadre d'un PGS doit donc être évaluée en tenant compte de cet aspect.

### 1.1.5.2. LE TRANSPORT SEDIMENTAIRE ET LES FORMES ASSOCIEES

Entre les sources et les puits s'insèrent les processus de transport sédimentaire.

#### 1.1.5.2.1. Les modes de transport sédimentaire

Il est couramment admis que le transport de matériaux solides en rivière se fait sous deux formes (revoir 1.1.3.1.1) :

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

La courbe de Hjulström (revoir Figure 6) présente une limite très nette au niveau du couple « diamètre 0,5 mm/vitesse 20 cm/s », que beaucoup interprètent comme une **limite charriage/suspension**. Notons cependant que ce même sable de 0,5 mm pourra être transporté en suspension pour des vitesses plus importantes en régime turbulent. La partie la plus grossière de la classe des sables est donc intermédiaire entre le charriage et la suspension, fonction des vitesses d'écoulement et de la turbulence. On comprend mieux aussi grâce à cette

courbe, le caractère « transitoire » du transport par charriage. Au-delà de cette valeur de l'ordre de 0,5 mm, si le grain est mis en mouvement pour une certaine vitesse d'écoulement, il se redépose pour une valeur à peine inférieure, alors que, lorsque l'on est dans la classe des limons, une fois le grain en mouvement, il se déplace vers l'aval sensiblement à la même vitesse que l'eau et ne se déposera plus que sous des conditions hydrauliques quasi stagnantes.

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

#### 1.1.5.2.2. Les formes sédimentaires

##### A. *Formes de propagation de la charge de fond*

La forme la plus fréquente que revêt le transport par charriage, **dès lors qu'il est suffisamment important**, est une **macroforme sédimentaire que l'on nomme banc ou dune**. Cette macroforme est généralement caractérisée par un profil en long triangulaire, avec un très court segment à pente forte à l'aval, proche de la pente d'équilibre des matériaux granulaires humides (30-40°) (front de progradation) et une longue **contre pente à faible inclinaison vers l'amont** (figure ci-dessous et Figure 24). Dans un contexte d'équilibre dynamique, la dune se propage vers l'aval par érosion de son talus amont, **migration des grains ainsi érodés sur « le dos » de la macroforme, puis glissement de ceux-ci en « avalanche » sur le front raide situé en aval**. La contre-pente et le front aval raide sont liés à la rugosité globale du lit qui freine le transit de la dune et provoque cet effet de « compression » mécanique. On retrouve cette morphologie et ces processus dans les **dunes éoliennes**.

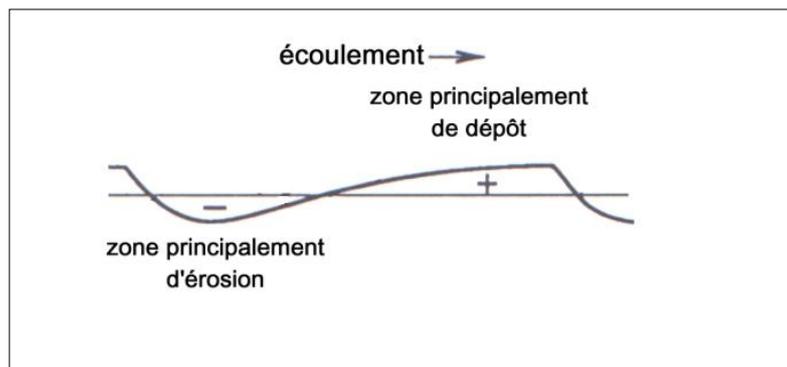


Figure 23 : coupe longitudinale d'une dune ou banc alluvial (d'après Yalin et Da Silva, 2001)



Figure 24 : exemples de formes alluviales actives et mobiles (a) sur l'Aine aval, (b) le Doubs aval, (c) l'Ardèche (d) dune caillouteuse isolée en progression sur le Doubs en aval de Dole

Si la charge solide est importante (en volume) les macroformes peuvent être jointives, le « front » de chaque dune progressant sur la « queue » de la dune le précédant, elle-même se propageant vers l'aval, etc. (Figure 25).



Figure 25 a) champ de dunes sablo-graveleuses sur l'Allier aval et (b) caillouteuses sur l'Allier amont

A la surface des macroformes (dunes) on peut trouver des microformes sédimentaires appelées **rides**. Elles se déplacent sous l'impulsion de courants à faible vitesse et on les trouve généralement sur les cours d'eau sableux, bien que l'on puisse parfois observer des rides caillouteuses. La répartition spatiale des macroformes en transit le long de l'axe fluvial se fait généralement sous forme de **bancs alternés**. Sur un cours d'eau initialement rectiligne, si les berges ne sont pas stabilisées par des ouvrages de protection, ces bancs alternés vont favoriser l'érosion latérale de la berge opposée et le lit va devenir de plus en plus sinueux. Si les berges sont stabilisées, les bancs alternés ne généreront pas d'érosion latérale et migreront simplement vers l'aval. Enfin, si le transport solide est très important et les berges très érodables, on observera le développement d'un **tressage** dans un lit large et peu profond.



Ce sont ces macroformes sédimentaires qui vont généralement former le lit mineur du cours d'eau, tant dans ses parties immergées (lit mouillé) qu'émergées (bande active plus ou moins végétalisée) ...sauf s'il ne coule que sur le substratum.

La **forme tridimensionnelle** et la **migration** de ces macroformes (voir plus loin) semblent d'autant plus marquées que le transport solide est important. Ces paramètres pourraient même éventuellement être utilisés comme **indicateurs d'une certaine intensité du transport solide par charriage** mais nous n'avons trouvé aucun élément dans la littérature permettant d'établir une relation, ne serait-ce que qualitative.

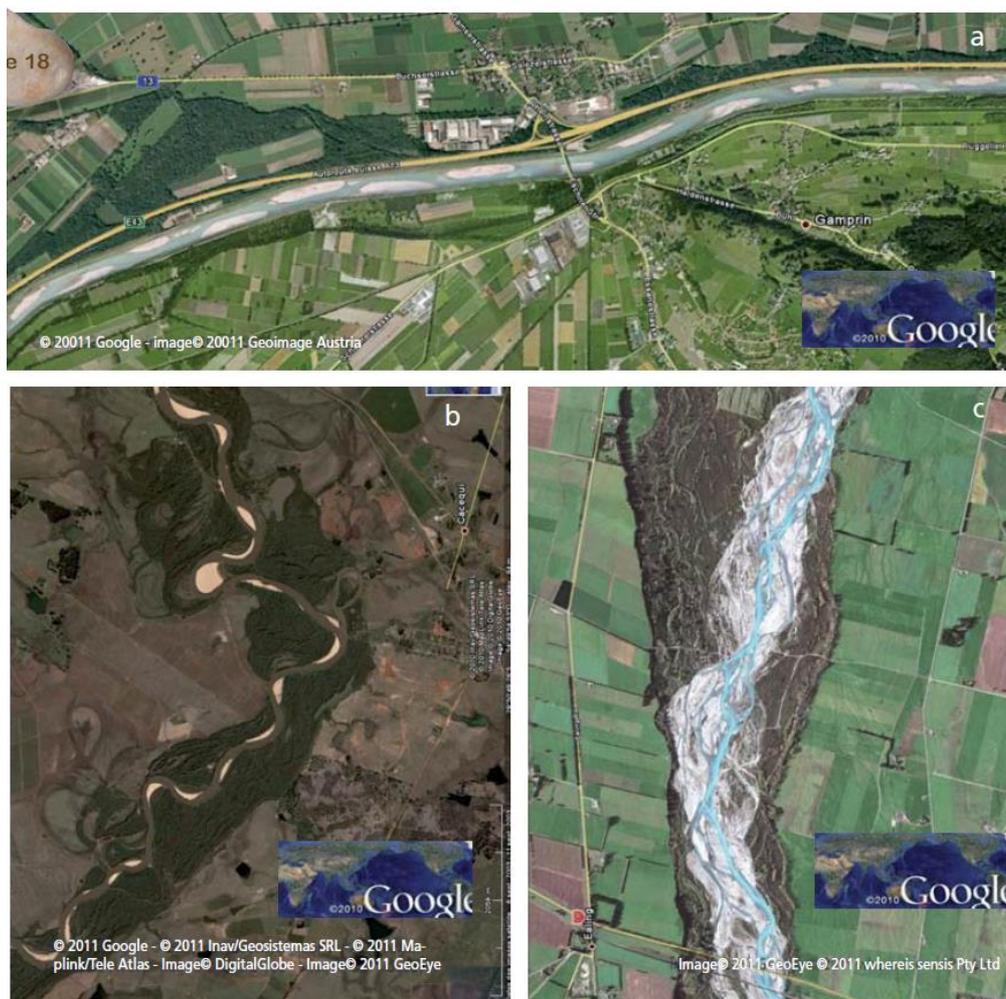


Figure 26 : Répartition des macroformes alluviales a) sous forme de bancs alternés si les berges sont protégées, b) sous forme de bancs alternés transformés en bancs de convexité si les berges sont érodables, c) sous forme de bancs coalescents si les apports sont très importants et les berges non cohésives (tressage).

### B. Mode de propagation de la charge de fond

Le principe théorique de migration des macroformes (dunes ou bancs) a été présenté sur la Figure 23.

### C. Fractionnement de la charge de fond

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

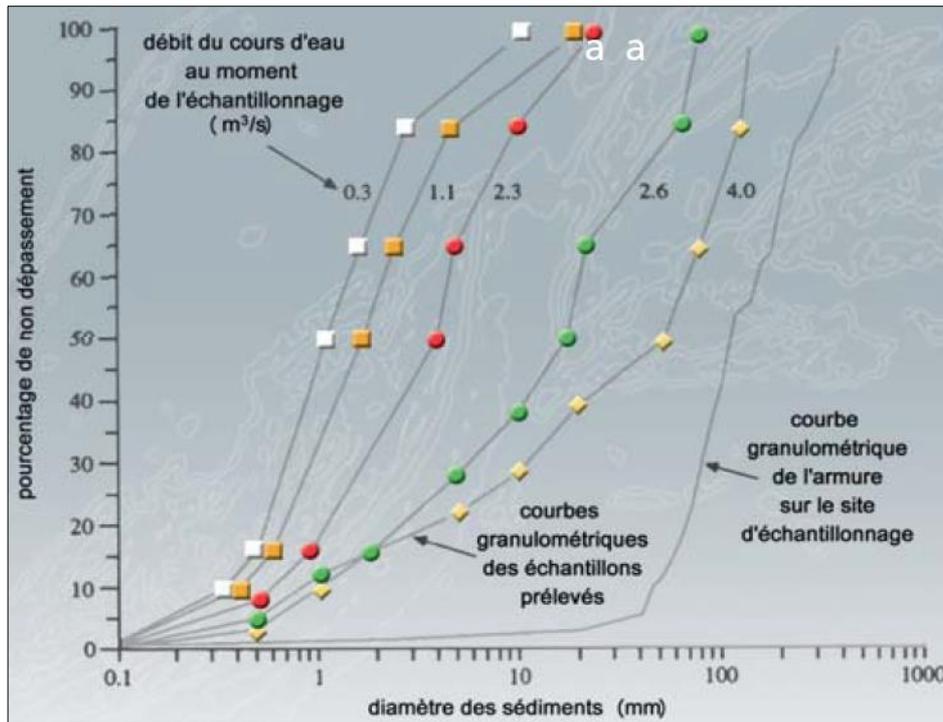


Figure 27 : Evolution de la granulométrie des alluvions transportées en fonction du débit (Bathurst, 1987 in Malavoi et al., 2011))

Ce phénomène est bien illustré par la Figure 27. On observe ainsi que plus le débit (donc la force tractrice) augmente, plus la taille moyenne des matériaux transportés augmente ( $D_{50} = 1$  mm à 0,3 m<sup>3</sup>/s et 50 mm à 4 m<sup>3</sup>/s). L'étendue granulométrique augmente pour les mêmes raisons (plus de classes de tailles sont en mouvement). On constate aussi que, dans cet exemple, la courbe la plus grossière n'atteint pas les valeurs de la granulométrie en place (courbe la plus à droite sur la figure) qui représente la granulométrie de la couche de surface que l'on nomme armure (voir le détail plus loin) beaucoup plus grossière que les alluvions transportées car liée à un processus de tri sélectif. Ceci explique pourquoi, en fonction des crues et des conditions géomorphologiques locales, la granulométrie des macroformes peut être différente (dans l'espace et dans le temps). On peut ainsi observer des macroformes constituées de pierres fines et graviers (nomenclature de Wentworth) en train de migrer sur des macroformes constituées de gros éléments (pierre grossières, blocs) en surface. Cela signifie que la crue précédente a eu une compétence suffisante pour transporter des pierres fines (venant de l'amont, des berges, des affluents etc.) mais insuffisante pour briser l'armure de pierres grossières de la macroforme sous-jacente (Figure 28 ci-après).



Figure 28 : Migration d'une dune de cailloux grossiers et fins sur une macroforme préexistante d'une granulométrie beaucoup plus grossière

#### D. Vitesse de propagation de la charge de fond

Si la vitesse de transit de la charge en suspension est très proche de celle de la vitesse de l'eau, il est très difficile de mesurer, et plus encore de prédire, la vitesse de propagation de la charge de fond. De nombreuses données ont été publiées dans des revues scientifiques à partir de l'utilisation de traceurs de différents types (Tableau 3 : Quelques exemples de vitesses de propagation de particules élémentaires d'alluvions grossières obtenues à partir de traceurs suivis sur des périodes > 1 an). L'émergence des traceurs RFID (PIT tags) il y a une vingtaine d'années a donné un nouveau souffle à cette thématique, avec notamment plusieurs suivis réalisés sur de grands fleuves ou de grandes rivières en tresses pour lesquels les techniques traditionnelles de traçage étaient peu adaptées (peinture, aimants). Ces observations de terrain montrent une très grande dispersion des données, avec des distances moyennes annuelles de transport qui varient de quelques dizaines de m à plusieurs km (voir synthèse de Liebault et al. 2023).

Même si l'hydrologie est un facteur de contrôle de la dispersion des traceurs, d'autres facteurs de première importance interfèrent avec la puissance des crues, comme la morphologie du lit, le degré de mélange des traceurs dans la couche active (qui dépend de la durée du suivi), ou encore la taille et la forme des grains. Il est d'autre part très difficile de dégager des lois générales, car la variabilité est forte même au sein d'un style morphologique donné. A titre d'exemple (tableau suivant), on peut citer les distances moyennes annuelles de transfert dans les lits en bancs alternés (ou à style divaguant), qui dans certaines rivières correspondent à l'espacement moyen entre les bancs (McQueen et al., 2021), alors que dans d'autres, elles peuvent représenter jusqu'à 5-7 fois cette métrique (Liébault et al., 2012).



Ces mesures ne représentent que des **vitesse de particules élémentaires**, qui ne doivent pas être confondues avec les vitesses de propagation des **macroformes alluviales** telles que celles visibles sur la Figure 24 et suivantes, qui ont un intérêt majeur en matière de gestion sédimentaire.

Tableau 3 : Quelques exemples de vitesses de propagation de particules élémentaires d'alluvions grossières obtenues à partir de traceurs suivis sur des périodes &gt; 1 an

| Site / surface drainée               | Granulométrie (mm) | Type de traceur      | Durée du suivi (ans) | Vitesse de transit moyenne (m/an) | Référence               |
|--------------------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Allt Dubhaig / 17 km <sup>2</sup>    | 16-256             | magnétique           | 8.5                  | 12-35                             | Ferguson et al. 2002    |
| Ardennes / 12-230 km <sup>2</sup>    | >20                | RFID passif          | 2-7                  | 2-126                             | Houbrechts et al. 2012  |
| Bouinenc / 39 km <sup>2</sup>        | 23-512             | RFID passif          | ~1                   | 300-370                           | Liébault et al. 2012    |
| Carnation Creek / 11 km <sup>2</sup> | 16-180             | magnétique           | 17.0                 | ~20                               | Haschenburger 2013      |
| Cher / 2232 km <sup>2</sup>          | >20                | RFID passif          | ~1                   | 11-18                             | Dépret 2014             |
| Reynolds Creek / 55 km <sup>2</sup>  | 45-160             | RFID passif          | ~1                   | 3500                              | Olinde and Johnson 2015 |
| Minervoies                           | 40-200             | RFID passif          | 1.4                  | 6-157                             | Michler et al 2016      |
| Ain / 3670 km <sup>2</sup>           | 42-145             | RFID passif          | ~1-8                 | 4-466                             | Piégay et al. 2016      |
| Halfmoon Creek / 61 km <sup>2</sup>  | 57                 | RFID passif          | 8.4                  | 37                                | Bradley 2017            |
| Rhin / 34 500 km <sup>2</sup>        | 35-147             | RFID passif          | 3.3                  | 494                               | Arnaud et al. 2017      |
| Dordogne / 5400-8700 km <sup>2</sup> | >25                | RFID passif et actif | 1.5                  | 172-615                           | Boutault 2020           |
| Morvan / 69-234 km <sup>2</sup>      | 23-130             | RFID passif          | ~2.5                 | 9-131                             | Gilet et al. 2020       |
| Drac / 340 km <sup>2</sup>           | 32-90              | RFID actif           | 1.7                  | 797                               | Brousse et al. 2020     |

Une publication de Katolikov et Kopaliani (2001, tableau suivant), permet de compléter ces données pour ce qui concerne la propagation des bancs latéraux mobiles (*side bars*). On constate des valeurs comprises entre 50 et 500 m/an environ (soit 5 à 50 km/siècle), ce qui est dans les ordres de grandeur du tableau ci-dessus (3 à 20 km/siècle).

Les vitesses de propagation des **vagues sédimentaires** ont fait l'objet d'un article de synthèse (Nicholas et al., 1995) qui montre là encore une grande dispersion des observations, avec des valeurs comprises entre 0.1 et 5 km/an. Cette variabilité est attribuée principalement à la granulométrie des apports sédimentaires à l'origine de la vague, au régime des crues et à l'hétérogénéité spatiale des tronçons au sein desquels la vague se propage. Ceci souligne que les diagnostics morphologiques doivent s'appuyer sur une analyse du transport solide nourrie par des observations et pas seulement une estimation à partir de formules d'hydraulique et de l'expertise, notamment lorsque les enjeux du plan de gestion sont sensibles.

Tableau 4 : Quelques données sur la vitesse de propagation des bancs latéraux (in Katolikov et Kopaliani (2001)).

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

### E. Caractérisation de la topographie du lit et des formes sédimentaires

Il s'agit principalement de décrire et quantifier en 2 ou 3 dimensions, la topographie des lits majeur et mineur, et en particulier des formes alluviales résultant du stockage, au cours de leur migration vers l'aval, des matériaux alluvionnaires en transit :

- la **topographie émergée** est généralement décrite sous la forme d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) au moyen des méthodes suivantes :
  - des **méthodes de terrain** : levés topographiques terrestres au niveau de chantier, au tachéomètre, au GPS différentiel, au laser scan terrestre (ou LiDAR terrestre). Très précises, ces approches sont cependant assez longues à réaliser et ne peuvent être mise en œuvre qu'à l'échelle de profils en travers espacés ou, si l'on cherche à élaborer des données 3D par semis de points, sur de petites superficies (quelques milliers de m<sup>2</sup>). La mesure au tachéomètre par exemple, est à privilégier pour des analyses d'évolution micro-topographique (comme l'érosion d'une frayère au cours d'une éclusée) ;
  - des **méthodes aéroportées**, par tout appareil volant de taille adaptée au transport d'un équipement **LiDAR** (Light Detection And Ranging émettant dans le proche infra-rouge) ou grâce à des levés photogrammétriques SfM (Structures from Motion) à partir de séquences photographiques. La mesure par LiDAR est en général suffisamment précise pour décrire des macro-évolutions topographiques (quelques cm de précision en altitude) et permet surtout de **couvrir de grandes surfaces** rapidement et à un coût relativement modeste.

**NB** : Le cout au km<sup>2</sup> d'un MNT issu d'un LiDAR aéroporté est dégressif en fonction de la surface prospectée. C'est la mobilisation de l'appareil qui coûte le plus cher (8000 à 9000 €). Il est donc intéressant de réaliser ces mesures LiDAR sur des linéaires importants. Des études récentes sur le Buëch nous permettent de donner les ordres de grandeur suivants : **3000€/km<sup>2</sup> pour 5 km<sup>2</sup> , 1500€/km<sup>2</sup> pour 10 km<sup>2</sup>**(NB : il est même possible de descendre sous les 1000€/km<sup>2</sup> pour des superficies de 20 km<sup>2</sup>). Notons aussi que depuis quelques années, des drones sont capables d'emporter des équipements LiDAR, ce qui permet de travailler sur de plus petites surfaces, à l'échelle d'une station par exemple, pour un coût plus faible et avec une meilleure précision.



La généralisation des méthodes modernes de restitution topographique par télédétection (LiDAR, photogrammétrie SfM) se traduit par le foisonnement de bilans sédimentaires par topographie différentielle, souvent réalisés à l'échelle du tronçon fluvial, et plus rarement à l'échelle du bassin versant.

La manipulation de ces MNT de grande précision et de haute résolution reste néanmoins délicate, car elle nécessite une grande maîtrise des étapes de pré-traitement, indispensables au calcul du bilan sédimentaire. Il est tout d'abord impératif de **réduire au maximum l'erreur systématique du différentiel topographique**. Cette première étape passe par le réaligement des nuages de points et elle nécessite de disposer de zones stables qui permettront d'une part d'effectuer le réaligement, et d'autre part de caractériser l'erreur systématique résiduelle, après réaligement. Le logiciel libre CloudCompare peut être utilisé pour faire ce réaligement (<https://www.danielgm.net/cc/>). A titre d'exemple, on peut citer le bilan sédimentaire d'un lit en tresses de 7 km extrait à partir d'un différentiel LiDAR pour lequel une erreur systématique moyenne de 2 cm a été mesurée. L'effet du réaligement sur le bilan net a fait passer un bilan net positif de 48 900 m<sup>3</sup> vers un bilan net négatif de 4600 m<sup>3</sup> (Lallias-Tacon et al., 2014). Il faut ensuite être en mesure de calculer le seuil de détection du changement altimétrique pour le calcul des volumes bruts en érosion et en dépôt (Lane et al., 2003). La dernière étape consiste à évaluer l'intervalle de confiance du bilan net par propagation des incertitudes. Différentes approches peuvent être mises en œuvre pour déterminer cet intervalle de confiance (Wheaton et al., 2010, Anderson 2019). Lorsque des bilans sédimentaires par topographie différentielle sont présentés, il est donc primordial d'explicitier comment les données ont été traitées, et de spécifier les intervalles de confiance des volumes obtenus et l'approche utilisée pour les obtenir.

- la **topographie immergée** peut être décrite elle aussi par :
  - des **méthodes « de terrain »** : levés bathymétriques au sondeur mono ou multifaisceaux ;
  - des **méthodes aéroportées**, par tout appareil volant de taille adaptée au transport d'un équipement LiDAR bathymétrique. La mesure par LiDAR peut depuis quelques années décrire aussi des topographies immergées jusqu'à plusieurs mètres en fonction de la transparence de l'eau (jusqu'à 1.5 à 3 fois la profondeur de Secchi<sup>2</sup>). On parle de LiDAR bathymétrique (émet dans le vert). Comme pour le LiDAR infra-rouge les coûts au km<sup>2</sup> sont dégressifs en fonction de la superficie traitée. Des mesures récentes sur **50 km du Vieux Rhin (soit environ 4 km<sup>2</sup>)** donnent un ordre de grandeur de **9000€/km<sup>2</sup>**. Des acquisitions hyperspectrales, encore rares, sont aussi possibles (thèse de J. Godfroy, 2023 sur l'Ain).

#### 1.1.5.2.3. La métrologie du transport sédimentaire

La métrologie du transport sédimentaire fait l'objet d'une description très détaillée dans le guide ONEMA de 2011 (Malavoi et al., 2011) et dans le récent guide de l'OFB (Camenen et Melun, 2021). Nous y renvoyons le lecteur désireux plus de détails et ne présentons ci-après qu'une synthèse sommaire.

##### A. Mesure des sédiments fins

- mesures directes :

Les flux de sédiments fins peuvent être mesurés **par prélèvement** au moyen de divers types d'appareils dont le choix est à adapter à la taille du cours d'eau et aux objectifs recherchés. La stratégie d'échantillonnage et la réalisation du prélèvement lui-même sont extrêmement importantes pour réduire l'incertitude (Dramais et al, 2022).

- mesures indirectes :

On peut aussi déduire les flux sédimentaires de la mesure d'autres paramètres, en particulier la **turbidité** de l'eau, phénomène optique dû aux particules en suspension. L'avantage majeur de la mesure de la turbidité est qu'elle peut être effectuée en continu contrairement aux prélèvements directs de matière, beaucoup plus lourds et coûteux à mettre en œuvre, et donc généralement réalisés de manière discontinue. Il est ensuite possible, sur

<sup>2</sup> C'est la profondeur à laquelle un disque de Secchi n'est plus visible lorsqu'il est immergé dans l'eau. C'est un indicateur de la transparence de l'eau.

la base de quelques mesures des caractéristiques des sédiments en suspension, variables d'un site à un autre, d'établir une corrélation entre la valeur de turbidité et la concentration de matières en suspension.

### *B. Mesure des sédiments grossiers*

Comme pour les sédiments fins, la mesure des sédiments grossiers transitant dans un cours d'eau peut être réalisée de manière directe ou indirecte.

- mesures directes

Elles sont effectuées au moyen de différents modèles de **préleveurs** dont le plus connu est le Helley-Smith. Ce sont généralement des mesures très lourdes à réaliser, mobilisant souvent beaucoup de personnel. Plus le cours d'eau est large et actif en termes de charriage, plus les mesures sont complexes à mettre en œuvre et à interpréter, et surtout, plus elles sont coûteuses. D'autre part, ces approches imposent la présence d'opérateurs pendant la crue pour effectuer les prélèvements.

Une autre solution consiste à utiliser des **trappes à sédiments** automatisées, qui permettent une mesure sans présence d'opérateur. Le modèle le plus utilisé est celui des trappes à fente (ou trappe Reid-Birkbeck), qui fonctionnent comme des balances qui pèsent en continu la masse de sédiments qui entrent dans la trappe au travers d'une fente d'échantillonnage et qui s'accumulent dans un caisson prévu à cet effet. Ces dispositifs restent cependant très lourds à déployer car ils nécessitent l'excavation du lit pour la mise en place des caissons, et l'installation d'un dispositif d'extraction des caissons. Les trappes doivent impérativement être positionnées en amont immédiat d'un seuil permettant de fixer le fond du lit. La période de mesure est conditionnée par la capacité de stockage du caisson, qui est très souvent dépassée au cours d'une crue. Il est donc souvent difficile d'obtenir le flux solide sur l'ensemble de l'hydrogramme. Malgré ces inconvénients, le dispositif permet d'obtenir des valeurs de flux solide à pas de temps court et il est encore aujourd'hui considéré comme la meilleure solution pour séparer le charriage de la suspension pendant les crues.

Les **plages de dépôts** (pièges à graviers) offrent aussi la possibilité de réaliser une mesure intégrée dans le temps du volume charrié. Le volume est obtenu par suivi topographique du remplissage du piège, qui doit être curé régulièrement pour assurer la continuité de la mesure. Le suivi du piège à graviers de Sisteron sur le Buëch a permis par exemple d'obtenir des données inédites de charriage sur une grande rivière en tresses et de montrer une relation linéaire avec le débit liquide (Coutaz, 2021).

- mesures indirectes :

Du fait de cette complexité et des coûts élevés de la mesure directe en rivière, de nombreux chercheurs développent depuis une vingtaine d'années, des méthodes d'évaluation des flux charriés fondées sur des mesures indirectes.

Parmi les plus connues, mais qui sont toujours du domaine de la recherche (pour ce qui concerne le traitement fin du signal notamment) nous pouvons citer :

- les hydrophones : micros immergés qui enregistrent le bruit (on parle de signal acoustique) des particules grossières s'entrechoquant ;
- les géophones : généralement des capteurs de vibration couplés à des plaques métalliques elles aussi immergées, qui enregistrent le bruit des particules touchant ces plaques ;
- les sismographes : qui sont placés sur les berges mais sont capables d'enregistrer les ondes sismiques des particules grossières s'entrechoquant dans la rivière ;
- les traceurs : ils permettent d'obtenir les distances de transport des particules et indirectement le flux solide lorsque ces distances sont combinées avec une mesure de couche active (qui peut être réalisée à partir de chaînes d'érosion, de colonnes de RFID actifs ou de suivi topographique du lit).

On peut citer aussi dans les mesures indirectes, les bilans sédimentaires réalisés avant/après crue par exemple, sur la base d'analyses différentielles de MNT suffisamment précis.

### *C. Variabilité temporelle naturelle du transport solide*

Il est couramment admis aujourd'hui que le transport sédimentaire varie énormément dans l'espace (de l'amont à l'aval d'une rivière par exemple) mais aussi dans le temps. Il existe de très nombreuses mesures démontrant cette réalité pour les matières en suspension, beaucoup moins pour les matériaux charriés.

Les deux figures ci-après montrent notamment la forte variabilité des volumes transportés pour un même débit sur un même cours d'eau et permettent de comprendre pourquoi il est indispensable de disposer de très nombreuses mesures pour pouvoir approcher le transport solide « moyen » d'un cours d'eau.

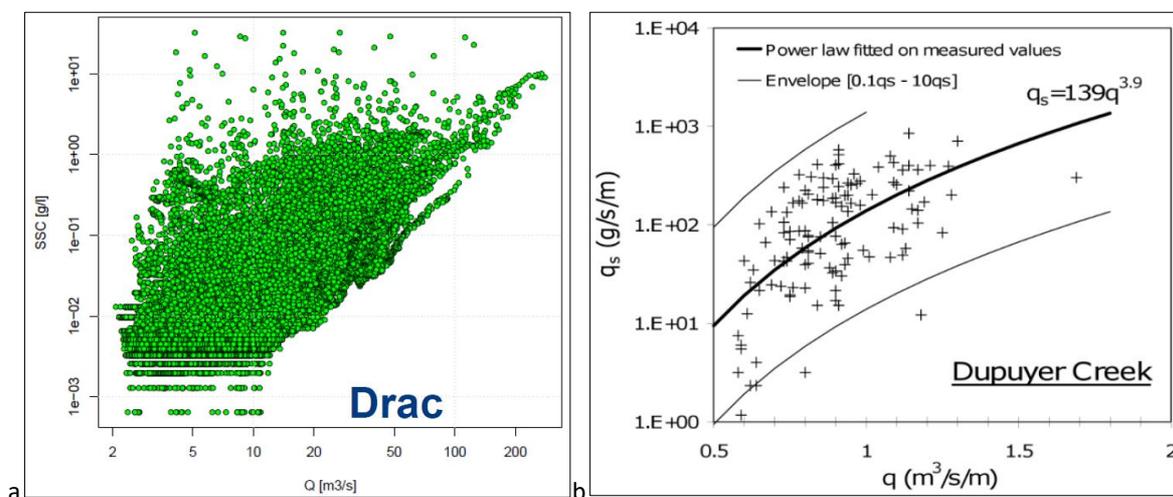


Figure 29 : exemples de variabilité temporelle du transport sédimentaire. Fin sur le Drac (a) (Misset, 2018) et grossier sur le Dupuyer Creek (b) (Whitaker et Potts, 2007). On constate régulièrement une amplitude de 2 à 3 ordres de grandeur pour un même débit liquide.

#### 1.1.5.2.4. Les méthodes de modélisation du transport sédimentaire

Comme la métrologie, les méthodes de modélisation du transport sédimentaire font l'objet d'une description très détaillée dans le guide ONEMA de 2011 (Malavoi et al., 2011) et dans le récent guide de l'OFB (Camenen et Melun, 2021). Nous y renvoyons le lecteur désireux de plus de détails et ne présentons ci-après que quelques éléments utiles à l'emploi pertinent des différents outils permettant d'évaluer le transport solide.

##### A. Qu'est-ce que la modélisation ?

On utilise très largement le terme « **modélisation** » lorsqu'on étudie le transport solide. Cependant derrière ce terme générique se cache une **multitude d'outils**. Une des définitions proposées par Le Petit Larousse pour le mot « modèle » nous semble intéressante dans le contexte de l'analyse du transport solide : « Structure formalisée utilisée pour rendre compte d'un ensemble de phénomènes qui possèdent entre eux certaines relations ». Un « modèle » peut donc se décliner sous plusieurs formes, allant de la plus simple (basée sur le « bon sens ») à la plus complexe (mettant en œuvre les dernières avancées en calcul numérique et en informatique). Il n'existe pas à ce jour d'outil universel et infallible pour « modéliser » le transport solide en rivière. Chaque situation est unique et nécessite la mise en œuvre d'une panoplie d'outils et de méthodes adaptés. Une des grandes difficultés, en particulier pour le charriage, est qu'il n'existe que très rarement (pour des raisons de coûts notamment comme nous venons de le voir) des mesures de terrain suffisamment précises et nombreuses pour « caler » les modèles puis en valider les résultats. Les modèles fournissent en outre une capacité de transport et non le transport solide réel, l'écart entre les deux pouvant être significatif si le cours d'eau est en déficit sédimentaire. Cet écart est en outre intéressant en termes de diagnostic et disposer des deux valeurs (transport solide potentiel et transport solide réel) permet d'évaluer la pertinence de certaines actions (recharge sédimentaire ou réactivation des érosions de berges). D'autre part, comme nous l'avons vu aussi, ce transport solide étant naturellement très variable dans le temps, ces mesures de calage et de validation doivent être nombreuses. Il est évident que ces données sont importantes pour établir un bon diagnostic mais qu'une ou deux « campagnes » de mesure ne suffisent pas.

##### B. Nécessité d'un haut niveau d'expertise

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

### 1.1.5.3. LES PUIITS SEDIMENTAIRES

Le schéma général de positionnement des puits sédimentaires au sein d'un bassin versant a été présenté sur la Figure 16.

Il faut **bien distinguer ici les zones de stockage des sédiments fins et moyens, généralement transportés en suspension, de celles des sédiments grossiers transportés principalement par charriage**. La plupart des données quantitatives et des publications qui en découlent concernent les premiers (principalement les fins) et très peu de références existent pour les seconds.

#### 1.1.5.3.1. Puits pour les sédiments fins

La figure suivante représente un bilan sédimentaire théorique faisant ressortir les sources et les puits, principalement pour les sédiments fins transportés en suspension.

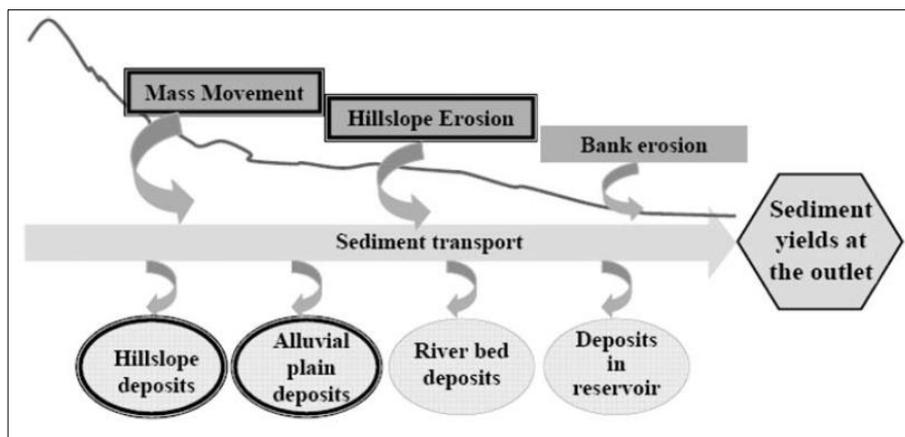


Figure 30 : Schéma théorique sources/puits dans un bassin versant. Delmas et al. 2009

On y observe 3 grandes zones de stockage « naturelles » (hors barrages) : dans le bassin versant lui-même (*hillslope deposits*), dans le lit majeur (*floodplain*) du cours d'eau, et dans son lit mineur (*river bed*) :

- **dans le bassin versant lui-même** : il s'agit principalement des dépôts colluviaux, des talus d'éboulis, de piégeage au sein de diverses structures (végétation notamment) ;
- **dans le lit majeur** : la plupart des auteurs considèrent que dans des conditions naturelles (hors présence de grands barrages par exemple), les lits majeurs sont bien les plus importantes zones de stockage des sédiments transportés en suspension (revoir Figure 30 ci-dessus). Comme ce stockage en lit majeur n'est pas régulièrement remobilisé lors des crues suivantes mais a plutôt tendance à s'accumuler au fil du temps, souvent sur plusieurs siècles, nous considérerons que **le lit majeur est plutôt un puits qu'une zone de stockage**. Les taux de sédimentation en lit majeur sont évidemment très variables selon les rivières mais les ordres de grandeur s'établissent entre **0.1 et 15 cm/an** (Coonen, 2020) ;
- **dans le lit mineur** : on a longtemps considéré que les sédiments transportés en suspension lors des crues se stockaient peu dans le lit mineur des cours d'eau car les vitesses d'écoulement y sont souvent, même en fin de crue, supérieures aux vitesses permettant la sédimentation de ces particules. On pensait donc que l'on ne pouvait trouver de sédiments fins (et encore, la fraction la plus grossière) que sur le sommet des bancs alluviaux les plus hauts et surtout dans la végétation alluviale arbustive riveraine. Les travaux récents de Misset et al. (2019, 2020, 2021) montrent cependant que **certains types de cours d'eau de montagne peuvent stocker (et déstocker fréquemment) des quantités importantes de fines dans la sous-couche des alluvions grossières de leur lit mineur**. Ils ont ainsi estimé que ces stocks pouvaient représenter plus de 50% de la charge en suspension annuelle moyenne dans les bassins versants ayant de grands linéaires en tresses. A l'inverse, ces stocks de fines atteindraient à peine 1% dans les cours d'eau torrentiels à chenal unique de tête de bassin. Ceci suggère que le lit mineur des grandes rivières alluviales alpines peut être considéré comme une source significative de particules fines.

On peut aussi distinguer les puits naturels des puits artificiels :

- les **puits naturels** :
  - des apports externes primaires : stockage de longue durée sur les versants et déconnexions naturelles versant/lit ;
  - Des apports externes secondaires (affluents) et des apports internes : ceux des apports primaires plus le stockage en lit majeur (Ex : accrétion du lit majeur de la Seulles depuis l'époque romaine (Lespez et al, 2015)).
- les **puits artificiels** :
  - des apports externes primaires : structures de piégeage des sédiments fins sur les versants eux-mêmes, déconnexions artificielles versant/lit (infrastructures de communication principalement) ;
  - Des apports externes secondaires (affluents) et des apports internes : grands barrages ou barrages plus petits barrages non gérés en continuité, certains seuils, anciennes fosses d'extraction en lit mineur (piègent surtout les grossiers), gravières en lit majeur capturant le cours d'eau.

**1.1.5.3.2.Puits pour les sédiments grossiers**

La charge grossière transportée par un cours peut être plus ou moins longuement stockée lors de son transit vers l'aval. Le concept général est présenté sur la figure suivante où quelques chiffres de durée de stockage sont proposés.

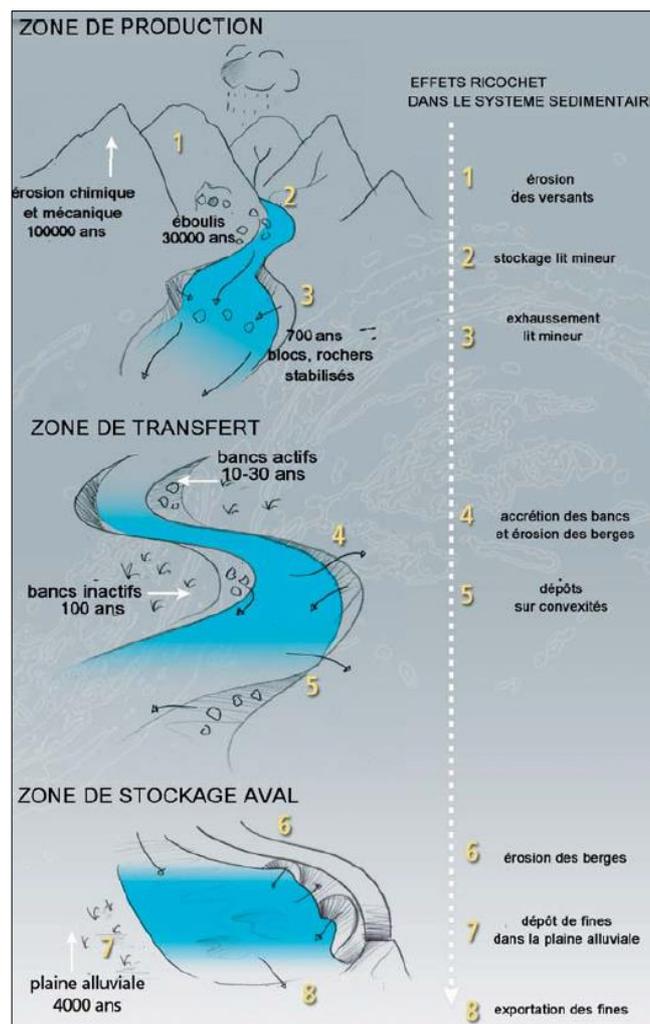


Figure 31 : Production, transfert et stockage de la charge de fond (d'après Sear and Newson, 1993, in Malavoi et al., 2011)). Les chiffres de durée de stockage sont des ordres de grandeur.

- stockage sur les versants : manteau d'altération des roches (altérites) et dépôts de pente (colluvions). Parmi les exemples de colluvions les plus fréquents, on peut citer les tabliers d'éboulis, les moraines (dépôts glaciaires), les cônes de déjection des laves torrentielles, les dépôts de mouvements de terrain (écroulements, glissements de terrain) ;
- stockage dans le chenal : il faut distinguer ici les alluvions du lit mineur (bande active, semi-active et bande active récemment végétalisée), du lit majeur (plaine d'inondation et terrasses récentes), et des terrasses anciennes.

Le type le plus évident de **stockage naturel**, de plus ou moins longue durée, des alluvions grossières en transit dans le lit des cours d'eau est celui qui se produit sur les bancs du lit mineur.

Sur les rivières actives, **la partie active des bancs (bande active et semi-active), est le lieu d'un stockage temporaire (quelques mois ou années)** et les matériaux sont fréquemment remaniés et emportés vers l'aval par les processus de transport solide. Sur la partie interne des bancs (bande semi-active et plaine d'inondation naissante), la végétation se développe progressivement, pour des raisons hydrologiques (absence de crues suffisamment morphogènes, voir 1.1.2) mais aussi, sur les rivières très mobiles en plan, au fur et à mesure que la berge concave opposée s'érode et que le méandre migre latéralement et vers l'aval. Cette végétalisation, ainsi que l'éloignement progressif de la zone à fortes vitesses, limitent les processus de transport solide. Les sédiments, plus ou moins végétalisés, sont alors stockés (de quelques années à plusieurs dizaines d'années) jusqu'à ce que le méandre situé en amont translate vers l'aval et reprenne, par érosion latérale, les matériaux stockés (Figure 32) ou qu'il se recoupe (recoupement par déversement).

Notons que, **plus la rivière est active, moins le stockage est long** car la translation des méandres vers l'aval mobilise très vite, par érosion latérale, les parties de bancs qui se sont végétalisées (Figure 32a).

Ces mêmes concepts de stockage temporaire et de plus longue durée sont applicables aux rivières en tresses où, là encore, l'effet de la végétalisation des macroformes dans les processus de stockage de longue durée est prépondérant (Figure 32b).



Figure 32 : Exemples de stockage naturel des alluvions grossières en transit (parties végétalisées des bancs).

On peut, comme pour les sédiments fins, distinguer les puits naturels des puits artificiels :

- les puits naturels :
  - des apports externes primaires : stockage de longue durée sur les versants et déconnexions naturelles versant/lit ;
  - des apports externes secondaires (affluents) et internes : les bancs alluviaux très végétalisés (voir plus haut), les lacs naturels (le Léman par exemple qui piège intégralement tous les sédiments du Rhône amont), les anciens ombilics glaciaires qui peuvent être des puits majeurs pour les alluvions grossières (par exemple, l'ancienne zone de tressage de Miribel-Jonage en amont immédiat de Lyon).
- les puits artificiels :

- des apports externes primaires : structures de piégeage des sédiments grossiers sur les versants eux-mêmes, déconnexions artificielles versant/lit (infrastructures de communication principalement) ;
- Des apports externes secondaires (affluents) et des apports internes : grands barrages ou barrages plus petits non gérés en continuité (transparence par chasse), seuils, pièges à graviers et plages de dépôt, anciennes fosses d'extraction en lit mineur, gravières en lit majeur capturant le cours d'eau.

**1.1.5.4. LE BILAN SEDIMENTAIRE**

Réaliser un bilan sédimentaire consiste à comparer les entrées sédimentaires au sein d'une entité spatiale aux sorties sédimentaires de cette même entité (bilan complet), ou simplement à évaluer un excédent ou un déficit par rapport à une situation initiale (bilan partiel).

**NB :** Il faut différencier le **bilan sédimentaire d'un bassin** (ce que l'on trouve le plus souvent dans la littérature, et qui est toujours négatif, exemple sur la Figure 10b) du **bilan sédimentaire d'un tronçon de cours d'eau** (peu de références bibliographiques, Figure 33), qui peut être positif, négatif ou en équilibre.

Si le bilan sédimentaire à l'échelle d'un bassin versant dans son ensemble est intéressant pour connaître les grands équilibres et identifier notamment les sources et puits de sédiments à l'échelle globale, **il est plus utile dans le cadre d'un PGS de réaliser des bilans à l'échelle des tronçons de cours d'eau.**

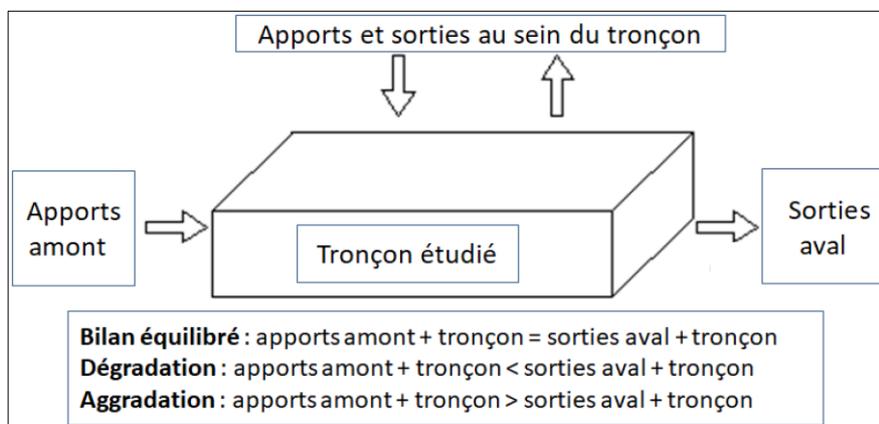


Figure 33 : schéma théorique du bilan sédimentaire d'un tronçon de cours d'eau



Même si l'information peut être intéressante, le bilan sédimentaire d'un tronçon de cours d'eau ne se juge généralement pas sur un événement (une crue) mais sur une durée minimale (5, 10 ans par exemple) permettant de lisser les événements hydrologiques. Il peut effectivement arriver qu'une crue apporte une quantité importante d'alluvions que la rivière n'a pas la capacité immédiate de transporter vers l'aval pour des raisons naturelles (les apports dépassent temporairement la capacité de charriage naturelle) ou artificielle (le lit a été sur-élargi, un seuil ou un pont a été construit en aval, etc.). S'il n'y a pas d'enjeux humains ou économiques, le bilan s'équilibrera tout seul sur une certaine durée. En revanche, **s'il existe des enjeux, il faut pouvoir gérer cet excédent temporaire pour limiter les risques d'inondation ou d'érosion.**

**1.1.5.4.1. Bilan sédimentaire partiel ou bilan morphologique : diagnostiquer la dynamique morpho-sédimentaire d'un tronçon**

Ce type de bilan est généralement basé sur la **comparaison de données topographiques** : MNT (ou séries de profils en travers) à un instant t comparé à un MNT à un instant t + n. On n'a ni les entrées ni les sorties sédimentaires mais simplement la comparaison de deux états de topographie alluviale séparés par une certaine durée. Il pourrait être comparé au « **résultat** » d'une entreprise dont on ne connaîtrait ni les revenus (les entrées) ni les dépenses (les sorties) mais juste le bilan par rapport à une situation initiale : **bénéfice ou perte**. Dans l'exemple ci-dessous (Ginger-Burgeap, 2018), le bilan sédimentaire partiel a été réalisé sur 1 an, sur la base d'une comparaison de MNT levés au Lidar aéroporté.

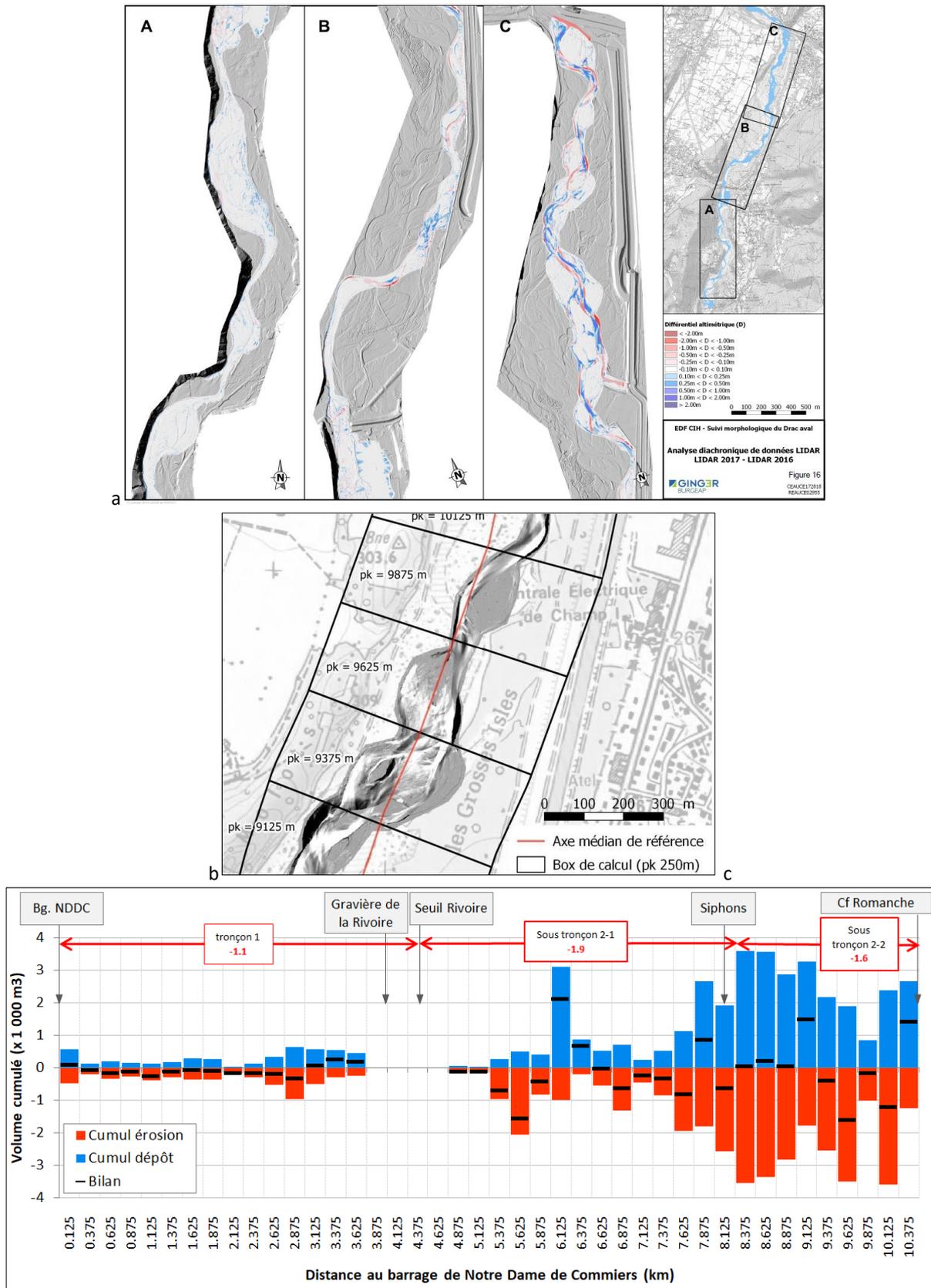


Figure 34 : exemple de bilan sédimentaire partiel à partir d'un différentiel topographique. a) les données initiales (MNT Lidar 2017 et 2016), b) le découpage en unités de mesure du différentiel topographique (« box » de 250 m) et c) le résultat du bilan par unité de mesure et synthétisé par sous-tronçon (Ginger-BURGEAP, 2018). On voit ici que le bilan est légèrement négatif, même si visuellement, les dépôts semblent compenser les érosions.

Ce type de bilan présente quelques limites :

- si les différences sont faibles, l'incertitude associée aux mesures topographiques (notamment celles obtenues par Lidar aéroporté) ne permet pas vraiment de qualifier l'état d'équilibre ou non du bilan ;
- on ne connaît généralement pas les entrées sédimentaires en amont du tronçon ni les apports des affluents au sein du tronçon lui-même. On peut néanmoins évaluer assez correctement les échanges de matières internes liés à l'érosion des berges (surfaces érodées x hauteur des berges x % de la fraction grossière dans les berges) et au restockage interne et évaluer si le tronçon stocke ou déstocke et intégrer cette information dans le diagnostic.

Cette approche topographique comparative peut permettre d'effectuer un **bilan historique partiel d'un tronçon sur une longue durée**, pour peu que des données topographiques anciennes suffisamment précises existent.

NB : en réalité, il s'agit plus d'un bilan des évolutions morpho-sédimentaire que d'un véritable bilan sédimentaire partiel sauf si les séquences temporelles sont fines.

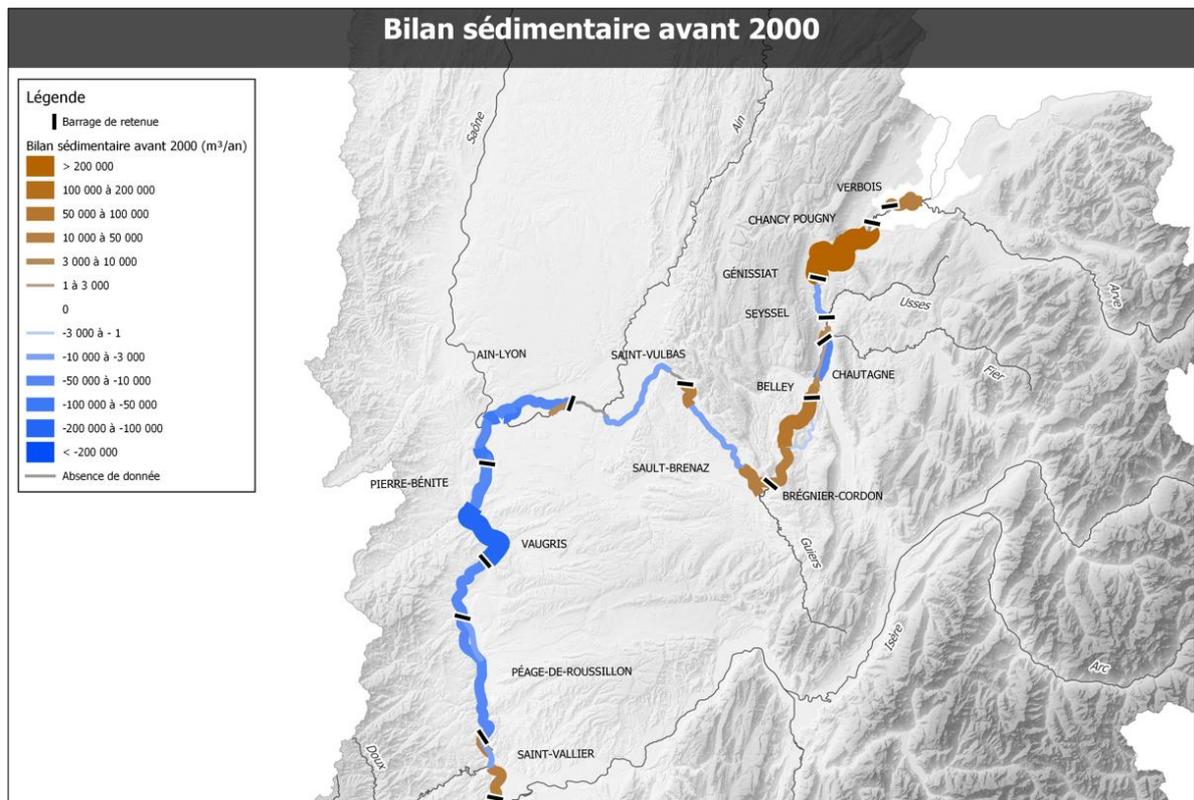


Figure 35 : bilan sédimentaire partiel du Rhône du Léman à la mer (ici la partie amont) sur la période 1950-2000. Les données de référence historique datent des années 50 et les chiffres sont donnés en m<sup>3</sup>/an (Ginger-Burgeap, 2022).

**NB** : Dans le cas de tronçons ayant subi plusieurs décennies d'extractions de granulats, il peut être intéressant et pédagogique, si l'on dispose de données sur les apports sédimentaires moyens annuels (théoriques ou mesurés) **d'exprimer le bilan sédimentaire partiel du tronçon, généralement très négatif sur ce type de tronçon, en nombre d'années d'apports solides**. On peut citer comme exemple le Gardon d'Anduze où les extractions réalisées en lit mineur sur une quarantaine d'années correspondent à environ 400 ans d'apports naturels (Burgeap 2017). On a aussi l'exemple du Coulon entre le pont Julien et Cavailon où les extractions sur 15 ans (1972 -1987) représentent **200 à 300 ans d'apports solides** (Dynamique Hydro, comm.pers.).

On peut considérer qu'il y a **dysfonctionnement du transport naturel des sédiments** lorsque l'on est confronté à l'un des phénomènes décrits ci-après :

- **bilan sédimentaire partiel à l'échelle d'un tronçon très négatif** : il arrive moins de sédiments de l'amont et dans le tronçon qu'il n'en part vers l'aval ou qu'il n'en est extrait mécaniquement. Cela signifie un déstockage de sédiments dans le tronçon lui-même. Les causes de ce dysfonctionnement sont multiples (on ne parlera pas des modifications à l'échelle du bassin versant liées à la réduction des apports de charge de fond sous l'effet de la reforestation, des travaux RTM, etc.) :

- prélèvements sédimentaires excessifs au sein du tronçon (extractions de graviers, curages du lit) à l'origine d'une incision régressive et progressive du lit depuis les fosses d'extraction ;
  - modification des apports solides : par exemple, piégeage à long terme des sédiments en amont du site par un barrage, un seuil, une ancienne fosse d'extraction ;
  - modification locale de la géométrie du lit comme, par exemple, le piégeage à plus court terme en amont du site au droit de sur-élargissements du lit (liés à des recalibrages par exemple) ou d'ouvrages de franchissement ; l'endigement du tronçon lui-même qui augmente les capacités de charriage.
- **bilan sédimentaire partiel à l'échelle d'un tronçon très positif** : il arrive plus de sédiments de l'amont qu'il n'en part vers l'aval, ce qui se traduit par un stockage de tout ou partie des sédiments sur le site. C'est à ce type de dysfonctionnement que pourraient a priori être associées des opérations de curage, s'il existe des enjeux à préserver contre les risques d'inondation ou d'érosion liés au stockage inhabituel de la charge de fond. Ce type de dysfonctionnement peut avoir plusieurs origines :
    - modification des apports solides comme, par exemple, des apports exceptionnels externes (via un affluent) ou internes (fortes érosions de berges en amont, propagation rapide d'une masse sédimentaire importante stockée en amont) dépassant la capacité naturelle de transport du site ;
    - modification de la géométrie du lit à l'amont à l'origine d'une augmentation locale de sa capacité de transport (endiguement, rescindements de méandres) ;
    - modification locale de la géométrie du lit comme, par exemple, une modification anthropique des caractéristiques géométriques en long et/ou en travers du site (sur-élargissement qui favorise le dépôt de la charge de fond, construction d'un seuil en aval qui génère un remous solide vers l'amont, construction d'un pont qui provoque souvent un piégeage temporaire des sédiments du fait de la présence des piles ou d'un sur-élargissement volontaire du lit mineur au droit de l'ouvrage, etc.) ;
    - modification du régime des crues comme, par exemple, le régime artificiel en aval d'un barrage de retenue (moindre fréquence, durée, intensité des crues) qui ne permet plus le transfert immédiat vers l'aval de la totalité des alluvions provenant de l'amont.

#### 1.1.5.4.2. Bilan sédimentaire complet intégrant les flux entrants et sortants

Ce type de bilan combine une analyse des échanges morphologiques à l'intérieur du tronçon avec une quantification des flux entrants et sortants. Le chenal peut présenter peu d'évolution morphologique interne et pourtant un flux sédimentaire significatif. Il peut aussi y avoir des échanges importants au sein du tronçon et pourtant un flux effectif modéré.

Les flux peuvent être mesurés in situ (prélèvement en crue, chaînes érosion) mais ils sont le plus souvent basés sur des **calculs de capacité de charriage théorique** au sein de chaque tronçon. Ce type de bilan permet de confronter des apports solides avec des capacités de charriage.

Son principal intérêt est de **permettre de proposer des préconisations de gestion**, comme par exemple, dimensionner des volumes sédimentaires à réinjecter en tête de tronçon pour équilibrer la capacité de charriage de celui-ci (ou la dépasser si l'objectif est de favoriser une remontée des fonds alluviaux suite à une période d'incision).

Attention toutefois à la forte incertitude associée aux calculs de capacité de charriage (revoir 1.1.5.2.4). L'étape de validation est essentielle.

La figure ci-après confronte ainsi les capacités de charriage théorique du Rhône en aval du Léman non validées par des mesures in situ avec les apports sédimentaires, essentiellement externes (apports des affluents) (Ginger-Burgeap, 2022) estimés par cubage aux embouchures et/ou par un calcul de la capacité de transport des affluents. On y observe des tronçons où la capacité de charriage est forte et les apports nuls, ce qui engendre des processus de déstockage internes au tronçon (sauf si l'on a un pavage) et d'autres où les apports dépassent la capacité du tronçon à les évacuer, on constate alors des phénomènes de sur-sédimentation.



Figure 36 : exemple de bilan sédimentaire du Rhône en aval du Léman, croisant des capacités de charriage annuelles théoriques par tronçon avec des apports sédimentaires, mesurés ou estimés via des bilans sédimentaires partiels. S’il n’y a pas une valeur égale de chaque côté de l’axe central (ce qui est globalement très rare aujourd’hui), on peut attendre des processus dominants d’érosion (si les sédiments sont mobilisables) ou de dépôt. (Ginger-Burgeap, 2022).

### 1.1.6. PART DES SEDIMENTS FINS ET GROSSIERS DANS LE TRANSPORT SOLIDE

Selon le contexte topographique et lithologique de chaque bassin versant et les caractéristiques du cours d’eau collecteur (notamment sa puissance), la part des sédiments fins et grossiers dans le transport solide est très variable. La différenciation peut être très marquée, à tel point que l’on distingue souvent dans la littérature, les rivières à sable (*sand bed river*) et les rivières à gravier (*gravel bed river*).

**Nous ne traiterons dans ce guide que des rivières à graviers qui sont dominantes sur le bassin Rhône-Méditerranée et la Corse.**

Cependant, au-delà de cette dichotomie simple, voire simpliste, la part du transport de sédiments en suspension (argiles, limons et sables fins et moyens) par rapport au transport par charriage (sables grossiers et granulométries supérieures) est importante à connaître pour bien analyser le fonctionnement du cours d’eau et proposer une gestion adaptée.

Les sections sableuses s’inscrivent logiquement dans le continuum fluvial et s’observent sur les parties aval des systèmes, loin des sources sédimentaires montagneuses et dans des contextes de pentes faibles. Ceci résulte à la fois de l’abrasion progressive des particules durant leur transport (attrition) et de la réduction de la capacité de transport.

La part de fines, sables et graviers peut varier significativement en lien avec certaines pressions anthropiques. Sur de petits bassins urbanisés, comme l’Yzeron, on a pu voir des arrivées sableuses extrêmement abondantes résultant d’une modification des processus érosifs et des apports (Grospretre, 2007) suite à une altération de l’hydrologie liée notamment à l’imperméabilisation des sols.

A l’aval de certains barrages, la rétention des sables peut avoir des effets importants sur le ralentissement des dynamiques successives en plaine alluviale, les exhaussements étant plus lents qu’auparavant, ... et une accélération dans certains cas (forte érosion des sols, par exemple dans le cas de déboisement ou de mise en culture). Sur certains cours d’eau à graviers, comme le Rhône, les fonds sont pavés mais des sables circulent

toujours au-dessus du pavage caillouteux. Evaluer le volume sableux transporté est un enjeu car celui-ci alimente potentiellement le delta et le littoral.

Une publication récente (Turowski et al 2010) fait un point assez précis sur les pourcentages de sédiments en suspension et en charriage dans la charge sédimentaire totale de divers cours d'eau sur lesquels ces paramètres ont été mesurés.

Deux observations importantes peuvent être faites à partir de la figure suivante :

- la taille du bassin versant est importante : ainsi, en dessous d'une centaine de km<sup>2</sup> de superficie, la variabilité d'un cours d'eau à l'autre est énorme puisque la fraction sédimentaire transportée en suspension varie de 20 à 100% de la charge totale. Au-delà de 1000-2000 km<sup>2</sup>, la part de charge en suspension devient très dominante, représentant généralement plus de 70% de la charge totale. On est même à plus de 80% au-delà de 7-8000 km<sup>2</sup> ;
- les rivières à sable ne présentent pas tout à fait la même distribution puisque l'on trouve encore 30 à 60% de sédiments charriés même dans les grands et très grands systèmes. Mais il faut noter que dans ce cas, la charge de fond est....principalement du sable.

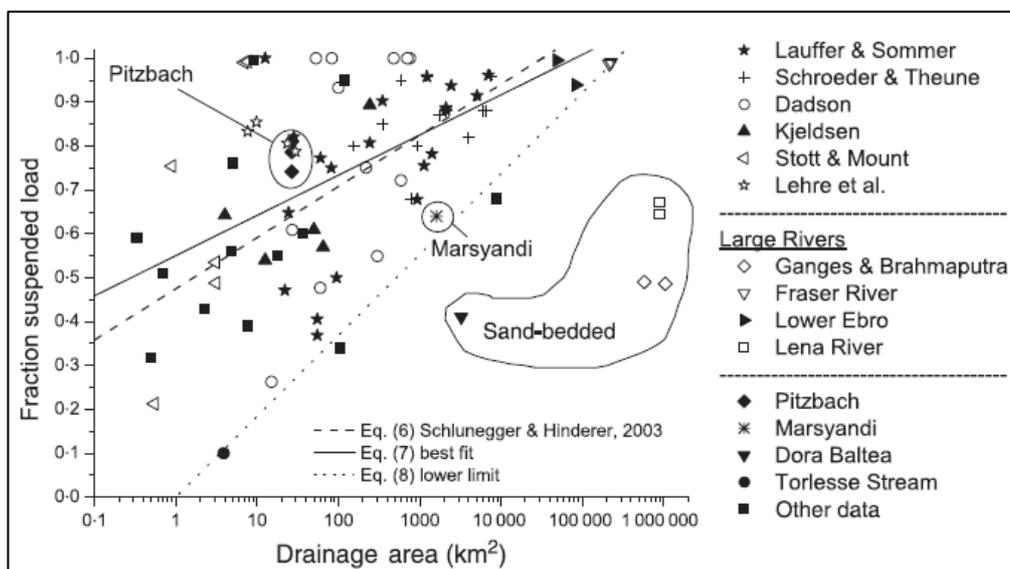


Figure 37 : Fraction de la charge en suspension pour des observations à long terme en fonction de la superficie du bassin versant. Pour les petits bassins versants, on observe une grande dispersion, qui diminue à mesure que la surface de contribution augmente. Tous les points de données résultent de périodes d'observation d'au moins un an, à l'exception des observations pour la rivière Lena, qui proviennent de deux inondations. Les droites de meilleur ajustement pour les cours d'eau à lit de graviers sont indiquées. Les points de données provenant de sources ayant plus de deux points de données sont mis en évidence (Turowski et al. 2010).

### 1.1.7. VARIABILITE HYDROSEDIMENTAIRE LIEE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET AUX ACTIONS ANTHROPIQUES.

Sans remonter jusqu'aux glaciations du Pléistocène et aux débuts de l'Holocène, les 7 derniers siècles ont connu des variations climatiques et des pressions anthropiques suffisamment importantes pour impacter considérablement les processus hydrosédimentaires.

#### 1.1.7.1. LE PETIT AGE GLACIAIRE

Le petit âge glaciaire (PAG) correspond à un refroidissement climatique modéré (moins 1°C en moyenne annuelle) mis en évidence par de nombreux historiens et climatologues dans les années 60 (notamment H.H. Lamb, 1963 et E. Leroy-Ladurie, 1967). On estime qu'il a duré de 1350 à 1850 environ, avec un paroxysme de froid du XVI<sup>ème</sup> au XVII<sup>ème</sup> siècle. Cet épisode climatique froid succédait à un épisode chaud ayant duré lui aussi 5 siècles (de 800 à 1300) : l'optimum climatique médiéval. Cette faible réduction des températures moyennes fut suffisante pour provoquer, en simplifiant, des hivers rigoureux et des étés pluvieux. Les premiers limitant le développement de la végétation en haute montagne et favorisant ainsi l'érodabilité des versants, les seconds permettant un accroissement de cette érosion et par conséquent une forte production externe de charge solide grossière.

Ce petit âge glaciaire est aussi marqué par l'avancée des glaciers alpins (provoquant l'évacuation de nombreux villages) et de la banquise Nord Atlantique.



L'accentuation de la production sédimentaire externe au cours du PAG n'est pas uniquement d'origine climatique puisque cette période a été également marquée par un fort accroissement démographique en zone de montagne, à l'origine de défrichements soutenus et d'un surpâturage intensif qui expliquent également l'amplification des phénomènes d'érosion (voir ci-après). On pense que la production accrue de charge solide grossière due à ces deux facteurs s'est traduite par extension du linéaire de rivières en tresses, qui ne le sont plus aujourd'hui.

#### 1.1.7.2. LA DEPRISE AGRO-PASTORALE :

Après une phase de déforestation importante sensiblement sur la même période que le PAG, on constate en France depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle jusqu'à nos jours, avec une accélération après la seconde guerre mondiale, une spectaculaire reconquête forestière spontanée des versants consécutive de l'exode rural et de l'abandon des pratiques agricoles. Cette revégétalisation spontanée des versants autrefois mis en culture et surpâturés, favorisée par le réchauffement climatique, contribue à leur protection contre l'érosion et à la réduction de la production primaire de charge alluviale de fond.

#### 1.1.7.3. LES TRAVAUX DE RESTAURATION DES TERRAINS EN MONTAGNE :

Dès le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, l'Etat a initié une politique volontariste de lutte contre l'érosion dans tous les massifs montagneux de France. L'objectif principal était **de lutter contre les risques d'inondation et de crues torrentielles** dans les villes et villages situés dans les zones de montagne et de piémont. On sait aujourd'hui que cette instabilité était en partie liée à un déboisement volontaire par les populations rurales en très forte expansion démographique depuis le XIV<sup>e</sup> ou le XV<sup>e</sup> siècle (mise en culture, surpâturage, bois de chauffage, bois d'œuvre). C'est le service RTM (Restauration des Terrains en Montagne) aujourd'hui rattaché à l'ONF (Office National des Forêts) et créé par les lois de 1860-1864-1882, qui a été et est encore aujourd'hui chargé de cette mission de protection des populations contre les risques naturels en montagne. Les lois dites RTM avaient défini des « périmètres RTM », zones expropriables par l'Etat, sur lesquelles ont été implantés, principalement entre 1860 et 1914, des boisements de stabilisation et des ouvrages de protection contre l'érosion et le ravinement. Même si on est loin des objectifs de la loi de 1860, les périmètres RTM définis après 1882 ont permis de « traiter » plus de 300 000 ha et **environ 100 000 ouvrages ont été réalisés sur près de 1 500 torrents**. Outre les boisements, visant à bloquer les processus érosifs « à la source », les services RTM ont implanté dans les torrents des **milliers d'ouvrages de correction torrentielle (seuils et barrages RTM)**, initialement en bois, en pierres sèches, puis en béton.



Figure 38 : quelques exemples de travaux du RTM. (a) stabilisation de versants, (b) seuils de correction torrentielle

#### 1.1.7.4.SYNTHESE

Cette **politique intensive de stabilisation**, souvent concomitante aux deux causes précédentes (réchauffement climatique de la **fin du PAG** et **déprise démographique et agro-pastorale**) s'est traduite très rapidement par une **réduction brutale des apports solides externes** (dont l'excès était, nous l'avons vu, lui aussi en grande partie d'origine anthropique...). De nombreux torrents et cours d'eau de montagne à forte charge alluviale, qui développaient souvent un style fluvial en tresses, ont commencé à s'inciser dans leurs alluvions et le tressage a peu à peu disparu au profit d'un lit à chenal unique, plus étroit et plus profond. Ce déficit de charge s'est propagé au fil des décennies vers l'aval des bassins versants, entraînant une érosion progressive dans le stock alluvial qui s'était constitué au fil des siècles de « production intense » (XVe-XIXe). Outre des métamorphoses fluviales (notamment passage du tressage au lit unique), le déclin rapide des apports sédimentaires externes s'est combiné aux effets des interventions anthropiques du XXe siècle (barrages hydroélectriques dans les vallées intramontagnardes, curages, extractions massives de granulats et chenalisation des lits plus à l'aval), pour entraîner au final une **incision généralisée des lits fluviaux**.

Depuis le XIVe siècle, la plupart des cours d'eau d'Europe ont été soumis à plusieurs facteurs influençant le contrôle des débits liquide et solide. La Figure 39 ci-après présente la synthèse de ces facteurs depuis le milieu du XVIIIe siècle. A cette échelle de temps, ils ont eu pour conséquence de favoriser plutôt la sédimentation et l'exhaussement des fonds alluvionnaires au cours du XIXe siècle, puis à l'inverse de favoriser l'incision et parfois la disparition des alluvions au profit d'un fond rocheux au cours du XXe siècle.

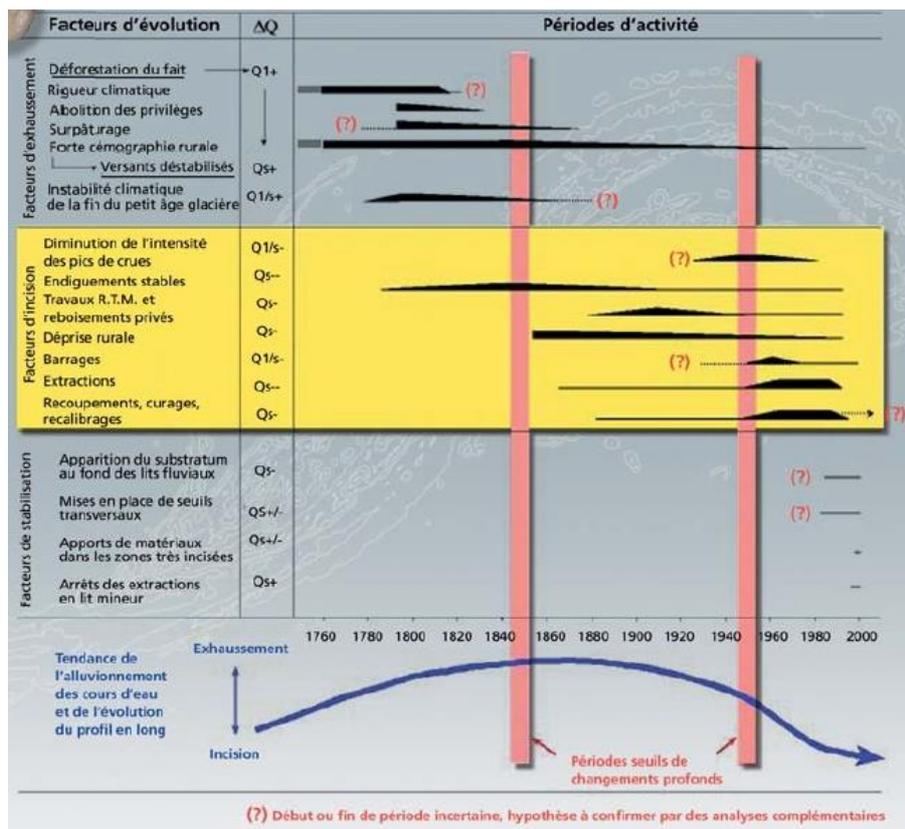


Figure 39 : Essai de synthèse chronologique des causes de l'évolution des débits solides et liquides des affluents du Rhône moyen depuis le XVIIIe siècle (Landon, 1999)

### LE TRESSAGE ET SON DEVENIR

L'alimentation sédimentaire est le premier facteur expliquant le tressage : **il n'y a pas de rivière en tresse sans une charge solide abondante**. Quand une tresse se tarit d'un point de vue sédimentaire, les écoulements vont progressivement se concentrer dans un chenal unique. Les apports sédimentaires amont qui se réduisent sont compensés pendant un certain temps par des sédiments provenant du lit qui s'incise et par érosion des berges et la mobilité latérale du lit au sein du corridor alluvial. Cet ajustement peut se manifester pendant plusieurs décennies jusqu'à ce que la rivière n'ait plus qu'un chenal unique et que la métamorphose fluviale soit achevée.

Les études paléogéographiques montrent que **durant la période Tardiglaciaire (il y a 15 000 ans) le tressage était le style fluvial le plus répandu en Europe**. Depuis cette période, le bassin du Rhône a enregistré plusieurs périodes climatiques qui ont conduit les cours d'eau à ajuster leur style fluvial plusieurs fois. Ainsi, durant l'optimum climatique médiéval (Xe-XIVe siècles), le tressage a sans doute fortement reculé alors qu'il a enregistré une nouvelle progression durant le Petit Âge Glaciaire (XIVe-XIXe siècles).

**Le tressage a été favorisé au cours des XVIIe et XVIIIe siècles par la diminution du couvert végétal due aux activités humaines, notamment pastorales, dont les conséquences en termes de production sédimentaire ont pu être exacerbées lors du Petit Âge Glaciaire.**

On estime que **le tressage dans le bassin Rhône-Méditerranée au cours du Petit Âge Glaciaire (1550-1850) s'étendait sur un linéaire fluvial cumulé de près de 1066 km**. C'est à partir de la fin du XIXe siècle que la dynamique du tressage sur le bassin Rhône-Méditerranée s'atténue puisqu'environ 36% du linéaire de rivières en tresses a disparu (de 1066 km à 680 km). Cette diminution est liée à la sortie du Petit Âge Glaciaire mais également à plusieurs facteurs anthropiques affectant les quantités de charges sédimentaires et les régimes de crue, à savoir :

- le reboisement spontané de nombreux bassins versants sous l'effet de la déprise agricole et pastorale ;
- et plus localement le reboisement planifié des versants par les services RTM dès la deuxième moitié du XIXe siècle ;
- les modifications des débits liquides suite à la construction de grands barrages réservoirs.

Des facteurs locaux expliquent également la disparition de nombreuses tresses, comme la construction d'ouvrages de protection contre les inondations et l'extraction de matériaux en lit mineur.

Les rivières en tresses représentent un patrimoine naturel remarquable. **Aujourd'hui, du fait de la réduction « naturelle » des apports solides grossiers observée sur certains bassins versants, certaines rivières en tresses sont en train de se rétracter et d'évoluer progressivement vers un style à chenal unique. Pour ces rivières il ne paraît pas pertinent de vouloir maintenir ou restaurer un tressage à tout prix, en voulant dévégétaliser des bancs alluviaux et des versants à grande échelle par exemple.**

Il est en revanche nécessaire **d'accompagner le changement de style fluvial et de limiter les effets négatifs de l'enfoncement du lit**. En outre, même si le tressage est très peu développé ou n'est plus actif, une crue majeure peut entraîner un élargissement temporaire et plus ou moins localisé du lit (cas de la tempête Alex). Par conséquent il est très important de préserver ou de restaurer l'espace de bon fonctionnement de ces cours d'eau à fort potentiel d'élargissement en cas de crue importante.

Des **indicateurs spécifiques** ont été développés afin d'aider à positionner la rivière en tresse sur une trajectoire géomorphologique (Terrier et al. 2018, Devreux 2023) et de voir si une tresse est potentiellement pérenne. Il s'agit de la largeur normalisée de la bande active » ( $W^*$ ), de la rugosité de la bande active » ( $BRI^*$ ), du potentiel d'apports sédimentaires, de l'encaissement de la bande active dans la plaine alluviale récente » (T) et de la tendance à l'élargissement/rétraction ou à l'exhaussement/incision des dernières décennies.

### EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES PROCESSUS HYDROSEDIMENTAIRES

Lorsque l'on aborde les effets du changement climatique sur les processus hydrosédimentaires, il y a **trois aspects à considérer** : l'évolution du **régime de crue**, l'évolution des **températures** et l'évolution des basses eaux et des précipitations lors de la **germination des salicacées**.

Il faut donc analyser attentivement les projections hydroclimatiques des régions concernées pour évaluer leurs effets potentiels sur les processus géomorphologiques. Une exacerbation des épisodes hydroclimatiques est censée dynamiser les systèmes fluviaux, **augmenter la capacité de transport et potentiellement les apports sédimentaires**.

**Si les deux augmentent en proportion (charge disponible, capacité de transport), les systèmes fluviaux peuvent être de plus grande taille, plus larges et plus mobiles**. Le changement morphologique doit progressivement se propager vers l'aval (quelques centaines de mètres par an à quelques km à l'aval des sources sédimentaires).

Si l'augmentation des apports n'est pas aussi significative que l'augmentation de la capacité de transport, les systèmes devraient enregistrer des incisions et des rétractions, et s'exhausser et s'élargir dans le cas contraire. Il est à noter que le changement climatique a déjà commencé à modifier les caractéristiques du régime des crues dans le Sud-Est. On observe une augmentation de l'intensité des maxima (+22% dans les régions Méditerranéennes entre 1961 et 2015) ainsi qu'un doublement de la fréquence des événements extrêmes (à plus de 200mm en 24h) et une augmentation d'un facteur 4 des surfaces concernées par ce type d'événement (Ribes et al., 2019).

Ceci dit, il est important d'analyser également les **effets de l'évolution des températures**.

Le changement climatique tel que décrit à ce jour se manifeste en effet avant tout par une augmentation de la température de l'air. Cette augmentation de température peut favoriser (si la ressource en eau est disponible) ou au contraire affecter (si la ressource en eau se raréfie également) la **dynamique de colonisation et de croissance de la végétation**, la phyto-stabilisation des versants et donc par effet cascade les apports sédimentaires aux cours d'eau. **En zones continentale et océanique, la phytostabilisation des versants pourrait être renforcée alors qu'elle pourrait se réduire en zone plus méditerranéenne**. Ce phénomène est complexe et devrait se manifester sur plusieurs décennies en termes d'ajustement végétal et sur plusieurs décennies encore en termes de réponse morphologique, réponse morphologique qui en outre devrait se propager progressivement vers l'aval. **Comme pour la fin du PAG, il sera sans doute difficile de dissocier les effets de ces phénomènes de ceux résultant des actions humaines** sur les territoires car ces derniers sont souvent plus brutaux et plus rapides que ceux induits par le changement climatique.

En outre le régime des basses eaux (intensité et saisonnalité) peut aussi affecter potentiellement les conditions de germination et donc la dynamique d'installation des pionniers ripicoles (saules et peupliers) dans les bandes actives et favoriser leur stabilisation ou leur réactivation, tout comme l'évolution des précipitations durant cette période. Si la dispersion des graines de saules et de peupliers, de mai à juillet selon les espèces, se fait dans des conditions qui deviennent plus favorables à la germination avec des coups d'eau ennoyant les bancs qui deviennent moins fréquents et des précipitations plus abondantes, la **fenêtre optimale de germination est alors plus fréquente et le cours d'eau peut enregistrer une végétalisation**.

Ceci est fréquent à l'aval de grands barrages hydroélectriques mais pourrait se manifester aussi dans le cadre d'un changement climatique induisant de telles modifications des conditions hydroclimatiques. **La végétalisation d'un corridor fluvial n'est pas uniquement liée à une atténuation de son régime de crue mais aussi à une atténuation de son hydrologie lors de la phase de germination**. Si les conditions deviennent plus sèches en phase de germination et les coups d'eau plus fréquents, le succès de la germination va être réduit et la végétalisation moins marquée, favorisant des bandes actives larges plus résilientes.

## CARACTERISATION DE LA GRANULOMETRIE DES LITS FLUVIAUX

La description des sédiments déposés dans les cours d'eau peut répondre à divers objectifs :

- **caractérisation « typologique »** : Il s'agit de caractériser un type de cours d'eau par différents paramètres dont sa granulométrie dominante. S'il existe une dichotomie classique dans la littérature, qui différencie les rivières à sable (*sand bed rivers*) et les rivières à graviers (*gravel bed rivers*), celle-ci ne traduit pas complètement la diversité des cas, notamment pour les rivières « à graviers ». Une typologie plus fine peut aider à améliorer la transférabilité/extrapolabilité de données, de méthodes, de types de processus etc. Une méthode consiste à caractériser la granulométrie dominante d'un type de faciès d'écoulement présent sur la plupart des cours d'eau : le **radier** (*riffle*). C'est un faciès de sédimentation grossière, souvent positionné dans les zones de divergence de l'écoulement (par exemple dans la zone d'inflexion entre deux sinuosités de phase opposée). La caractérisation se fait en utilisant la classification granulométrique de Wentworth (voir Figure 5 et Tableau 5) et en **décrivant la fraction la plus grossière des radiers** sur un ou plusieurs sites le long d'un tronçon homogène de rivière : on trouve par exemple des **radiers à blocs** sur la Loire amont dans le Massif central et des **radiers à graviers** sur la Loire aval. La caractérisation de la granulométrie des radiers est ainsi proposée dans le protocole CARHYCE OFB (2017) ;
- **caractérisation des "habitats", aquatiques ou rivulaires** : pour divers éléments des biocénoses fluviales, de nombreuses espèces de poissons et d'invertébrés notamment, les substrats alluviaux sont des habitats majeurs, que ce soit pour s'abriter, se nourrir ou se reproduire. Il est alors intéressant de décrire ces habitats. La méthode de description de la granulométrie de surface utilisée dans le protocole EVHA (Malavoi et Souchon, 1989) est particulièrement simple et efficace pour ce type d'approche ;
- **caractérisation du transport solide par charriage** : Il s'agit de déterminer les caractéristiques des sédiments déposés dans un cours d'eau pour en déduire, en introduisant ces caractéristiques dans des formules ou des modèles numériques de transport solide, **la capacité de charriage du cours d'eau**. La plupart de ces formules utilisent un ou plusieurs « diamètres caractéristiques » (le plus souvent le diamètre médian (D50), ou le diamètre moyen (Dm)), déterminés sur des zones du lit mineur « **représentatives** » **du transport solide par charriage** dans le cours d'eau concerné.  
L'une des questions fondamentales que devra se poser l'opérateur est alors : quel type d'évènement sédimentologique dois-je chercher à représenter : une crue fréquente (la granulométrie sera probablement plus petite) ou une crue plus rare (qui sera caractérisée par des dépôts plus grossiers). Nous y reviendrons par la suite.

L'objectif de cette partie est donc d'aider à répondre aux questions suivantes :

- Pourquoi échantillonner ?
- Quoi échantillonner ?
- Où échantillonner ?
- Comment échantillonner ?
- À quel moment échantillonner ?
- À quelle fréquence échantillonner ?

### 1.1.8. DIFFICULTES RENCONTREES

Un certain nombre de difficultés sont rencontrées lors des mesures de terrain visant à caractériser la granulométrie des sédiments transportés par charriage. Il s'agit principalement de la grande variabilité spatiale des dépôts sédimentaires, y compris à l'échelle d'une « station » représentative de petite dimension et de leur variabilité verticale. Une difficulté importante est aussi d'évaluer si les sédiments que l'on observe font bien partie du charriage ou s'ils ne sont pas mobiles.

## 1.1.8.1. VARIABILITE SPATIALE DES SEDIMENTS DEPOSES

## 1.1.8.1.1. Dépôts monogéniques

Les sédiments en transit par charriage ne se déposent pas uniformément dans l'emprise du lit mineur, y compris ceux transportés par un **même évènement de crue** (on parle de **dépôts monogéniques**). En effet selon les caractéristiques de l'écoulement dans le lit (notamment les vitesses locales et les phénomènes de turbulence), les processus de dépôt seront différenciés et l'observateur sur site se trouvera souvent en présence de zones granulométriques parfois très différentes. Théoriquement, on trouvera les sédiments les plus grossiers dans le talweg, puis des dépôts de granulométrie décroissante en allant du talweg vers les rives, jusqu'à la corde des bancs alluviaux quand il en existe. On pourra même trouver des sables et des limons sur les parties les plus hautes des bancs et notamment dans la végétation alluviale.



Ce gradient granulométrique décroissant du talweg vers les marges du lit actif n'est valable que pour les dépôts monogéniques. Les dépôts polygéniques peuvent même montrer un gradient inverse...voir plus loin. Notons aussi qu'il est **assez rare d'observer des dépôts purement monogéniques** sur un banc alluvial. Le plus souvent les bancs présentent une granulométrie polygénique.

## 1.1.8.1.2. Dépôts polygéniques

A. Qu'est-ce qu'un dépôt polygénique ?

A cette diversité de conditions d'écoulement pour un même évènement s'ajoute l'histoire hydrologique, récente ou plus ancienne, du cours d'eau, qui se traduit le plus souvent, dans l'emprise du lit mineur, par des **dépôts polygéniques** reflétant, selon les secteurs, plusieurs évènements de crue de débit et/ou durée différents. L'opérateur sera alors confronté à une diversité spatiale encore plus grande des caractéristiques granulométriques des dépôts.



Figure 40 : (a), (b) et (c) exemple de dépôts polygéniques « simples » (générés par des crues différentes mais assez proches en termes de débit). La photo (c) montre néanmoins le charriage d'une petite dune sableuse sur un banc plus grossier.

On trouve très souvent, y compris sur des bancs alluviaux globalement grossiers, des dépôts sédimentaires fins (limons, sables) qui reflètent généralement des épisodes de débits suffisamment élevés pour transporter/déposer ces fractions fines sans pour autant mobiliser la fraction grossière superficielle. Ce sont

généralement des dépôts de suspension (ils ne présentent pas de forme de charriage de type dune, comme sur la Figure 40c) et peuvent être assez étendus (on parle alors de **placages**) ou très localisés (**patches**). Ces placages et patches peuvent aussi se former en fin de crue, lorsque l'écoulement transporte encore en suspension ces fractions sablo-limoneuses.

Comme les fractions très grossières non mobiles (voir plus loin), ces sédiments fins ne doivent a priori pas être intégrés dans les courbes granulométriques « types » de charriage du cours d'eau étudié...mais doivent l'être pour caractériser les habitats.



Figure 41 : exemples de dépôts sableux sur un banc globalement très grossier (a) grands placages, (b) petits patches localisés. Les deux ne reflètent pas la granulométrie en charriage mais un ou des épisodes de transport solide de faible intensité, ou une fin de crue, avec un transport essentiellement en suspension

### **B. Une bonne synthèse de la problématique : Mosley et Tindale 1985**

Ces deux auteurs ont voulu démontrer la difficulté de décrire et comprendre la granulométrie d'une station représentative d'environ 700 m de long et 350 m de large sur la rivière Ashley, un cours d'eau en tresses de Nouvelle Zélande (module 250 m<sup>3</sup>/s). La couche superficielle des alluvions en transit a été échantillonnée (Wolman) dans **141 zones de granulométrie homogène** le long de sept sections transversales, et des échantillons de 30 kg dans la masse ont été prélevés au hasard en 86 points le long des mêmes sections transversales. Sur un des points, un seul échantillon de 854 kg composé de 28 sous-échantillons a également été collecté.

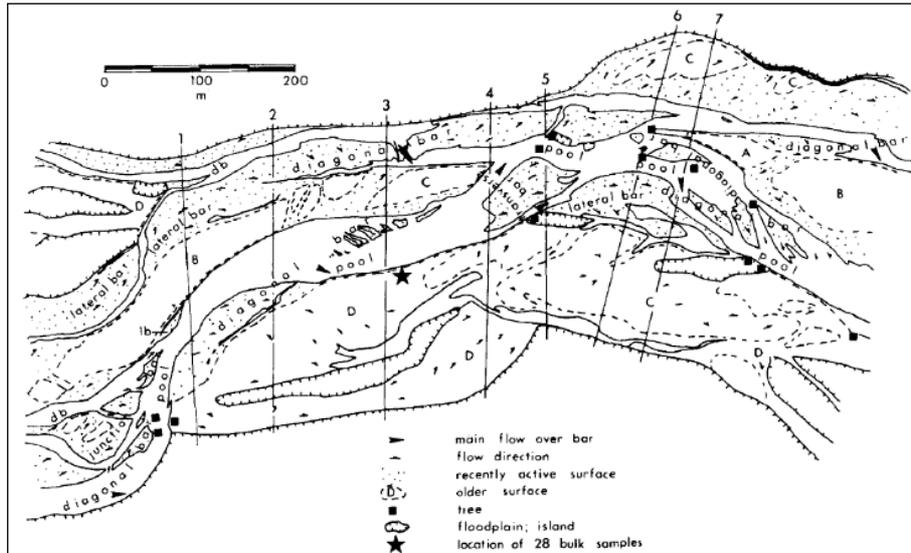


Figure 3. Sketch map of the study reach in November 1982, drawn from uncontrolled vertical aerial photographs. Surfaces A to D are in order of increasing age, as indicated by vegetation colonization

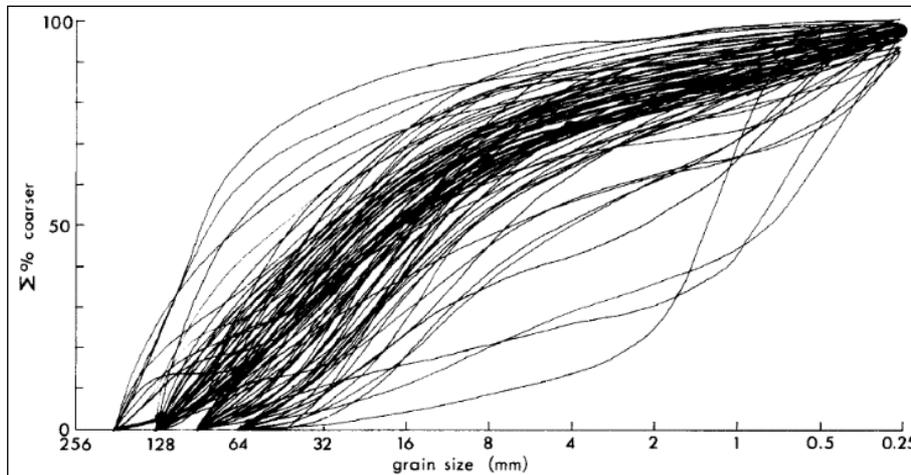


Figure 9. Grain-size distributions for 86 bulk samples and for the single aggregated sample (heavy line)

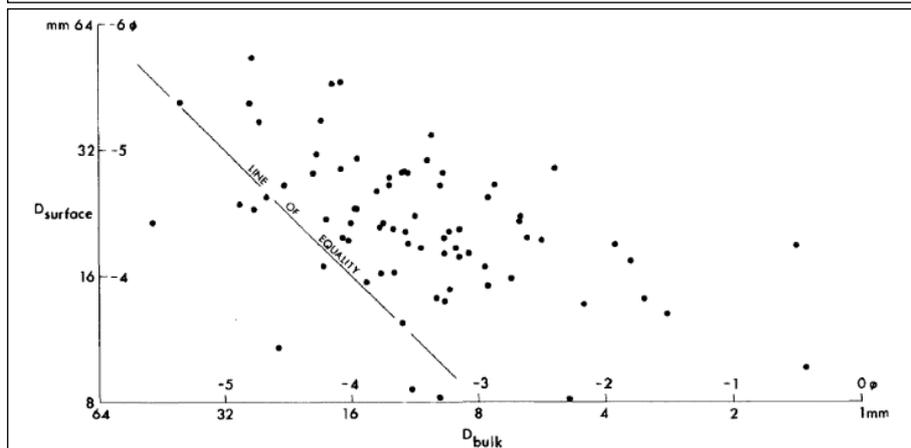


Figure 11. Relationship between mean grain size for the surface layer and the bed material beneath ( $D_{surface}$  and  $D_{bulk}$  respectively) at 86 locations in the Ashley River. Samples in the lower left ( $D_{bulk} > D_{surface}$ ) are from older surfaces where a veneer of sand has reduced  $D_{surface}$ , or from diagonal bar crests where the subsurface and surface layer material are very similar

Figure 42 : Illustration de la très grande variabilité granulométrique dans un lit mineur de rivière en tresse. Figures extraites de Mosley et Tindale (1985)

Sans entrer dans le détail de l'article, il s'agit juste ici de montrer l'extrême variabilité spatiale des dépôts ainsi que leur forte variabilité verticale. Pourtant, l'ensemble de la surface de la station, y compris les parties les plus

anciennes plus ou moins végétalisées, ont **moins de 5 ans**. Les auteurs constatent aussi qu'il n'existe qu'une relation très faible entre les tailles moyennes des grains pour les échantillons de surface et de subsurface aux mêmes endroits (Figure 42D). Une valeur de D50 pour la couche superficielle de 16 mm, par exemple, est associée à une gamme de valeurs de D50 pour les échantillons dans la masse de 3 à 18 mm, nous y reviendrons plus loin.

#### 1.1.8.2. VARIABILITE VERTICALE DES SEDIMENTS DEPOSES

##### 1.1.8.2.1. Distinction couche/sous-couche : l'armure et le pavage

De nombreux auteurs anglo-saxons ont depuis longtemps introduit le concept de stratification d'un lit fluvial mobile. Ils y distinguent une **surface armurée** (avec de nombreuses manières de la nommer : armour layer, armouring, armoured bed, etc.) et une couche sous-jacente la **sous-couche** (subsurface). Ils distinguent généralement cette couche armurée du **pavage** (qu'ils nomment bed pavement, paved bed, etc.). La plupart des chercheurs, malgré quelques différences d'ordre terminologique, semblent d'accord aujourd'hui sur les mécanismes de formation de l'armure et du pavage : les alluvions des rivières sont généralement composées d'un matériel de granulométrie non uniforme, souvent très étendue. Quand ces sédiments sont soumis à certaines gammes de vitesses de courant, les éléments fins à moyens sont mis en mouvement et évacués vers l'aval tandis que les plus gros restent en place. Si cette ségrégation des particules dure assez longtemps, cela aboutit à la concentration d'éléments grossiers à la surface du lit. Cette accumulation stable et protégeant temporairement les couches sous-jacentes est appelée **armure**. Poussé à l'extrême, le même processus aboutit à un **pavage**, d'une stabilité beaucoup plus durable. Les définitions suivantes sont celles proposées par Bray et Church (1980).

##### A. L'armure

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

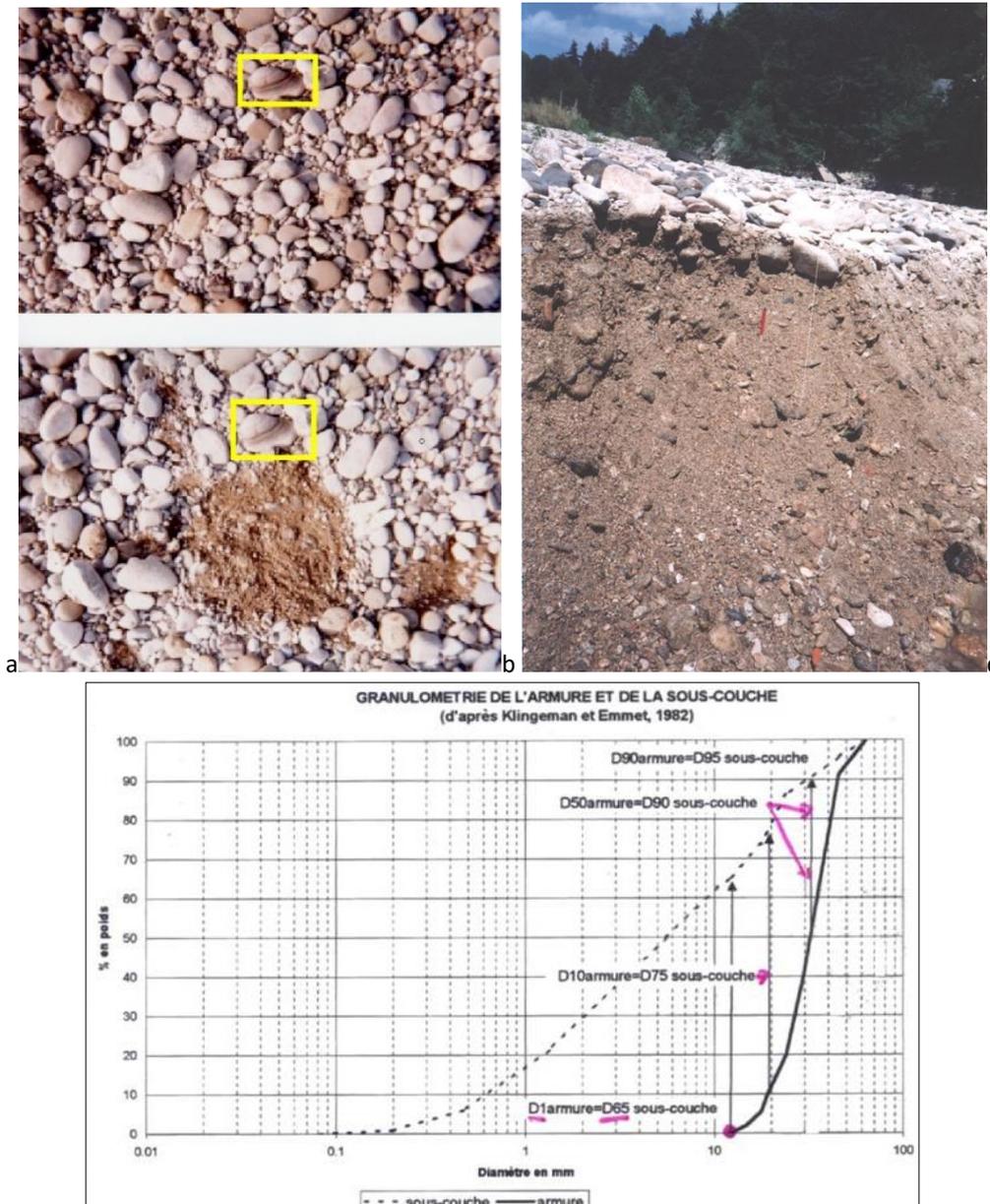


Figure 43 : (a) vue d'en plan d'une couche d'armure et de sa sous-couche (le rectangle jaune montre une particule « repère »). (b) coupe dans un banc alluvial montrant l'armure et sa sous-couche. (c) exemple de courbe granulométrique d'une couche d'armure et de sa sous-couche

**B. Le pavage**

Les particules constituant la surface des lits pavés ne sont mises en mouvement que lors d'épisodes hydrologiques exceptionnels (très fortes crues) si toutefois elles sont encore susceptibles d'être mobilisées par le régime hydrologique actuel. Il s'agit du même processus ségrégatif que pour l'armure mais il est plus accentué en raison de conjonctures particulières, notamment l'absence de renouvellement de la charge fond du fait de sa réduction naturelle (stabilisation des versants) ou artificielle (barrage piégeant).

**NB : à l'inverse de l'armure, le pavage est non ou peu biogène** (uniquement la surface des éléments granulométriques qui le composent), c'est pourquoi, s'il se développe de manière trop importante dans un cours d'eau, sa résorption voire sa disparition au profit d'une armure, peut être l'un des **objectifs majeurs d'un PGS**.

### COMMENT DETERMINER L'EXISTENCE D'UN PAVAGE

L'existence d'un pavage peut être évaluée sur le terrain en comparant la granulométrie des sédiments constituant la couche de surface (Di-s) et la couche de sub-surface (Di-ss). Ce sont généralement les tailles médianes qui sont retenues (D50) à partir desquelles on calcule un **indice de pavage** (D50-s / D50-ss). Les D50 sont calculés à partir d'un « échantillonnage Wolman » de 100 particules, en surface ainsi qu'en sub-surface, une fois la couche de surface retirée. Un tel protocole présente un certain biais observateur et il est donc important que celui-ci soit réalisé par le même opérateur sur différentes placettes et différentes sections. Ces mesures granulométriques sont à réaliser sur un banc alluvial en bordure immédiate du lit mouillé car il n'est pas possible de réaliser un « Wolman » de sub-surface sous l'eau (les particules les plus fines se remettraient immédiatement en transit).

Il est fondamental de disposer de plusieurs valeurs d'indice de pavage (au moins plusieurs dizaines si l'on veut diagnostiquer un tronçon complet) pour évaluer la variabilité spatiale et interpréter l'indice. Sur une couche pavée, peut en effet circuler du plus petit matériel qui peut ici et là former des zones d'accumulation et laisser penser à l'absence de pavage alors qu'il en existe peut-être un.

Sur la base de nos connaissances actuelles, nous pouvons considérer que lorsque l'indice de pavage se situe autour de 2, on est plutôt en présence d'un fond de lit pouvant être mobilisé par les crues de forte fréquence. Entre 2 et 4, on se rapproche d'un pavage plus établi, mobilisable pour les fortes crues ; **au-delà de 4 on est probablement en présence d'un réel pavage.**

**ATTENTION** : La plupart des indices de pavage que l'on trouve dans la littérature ont été calculés sur la base d'échantillons de sub-surface massiques. Les valeurs de l'indice sont donc plus élevées car on y trouve une plus grande proportion de sédiments fins. Nous ne préconisons pas cette méthode car elle est très lourde à mettre en œuvre : (environ 4 heures contre 20 mn par échantillon) ; elle permet néanmoins d'avoir une caractérisation bien plus complète de la distribution granulométrique de sub-surface, incluant notamment les fractions les plus fines.

Pour diagnostiquer un pavage, il nous semble intéressant de compléter les mesures d'indice de pavage par un **faisceau d'indicateurs complémentaires** : on peut notamment calculer, à partir d'un modèle hydraulique simple, le **débit seuil de mise en mouvement** du substrat et donc sa fréquence de mobilisation. Si celle-ci se situe autour de la crue de fréquence biennale (QJ2) on peut estimer être en présence d'un fond de lit mobile, si elle se situe entre QJ2 et QJ5, on peut commencer à parler d'une armure renforcée (*strong armouring*), au-delà de QJ5, on peut émettre une suspicion de pavage et au-delà de QJ10 une certitude.

On peut également identifier, à partir de **galets peints ou équipés de transpondeurs RFID**, les fréquences de mise en mouvement de ces particules de surface (attention à bien choisir les granulométries des particules équipées (D50 ou plus grossier) et les intégrer dans la structure du substrat en place et non de les poser simplement en surface, ce qui fausserait l'interprétation lors du premier suivi mobilisateur). Les mêmes seuils que précédemment peuvent être utilisés pour interpréter les résultats (QJ2, QJ5, QJ10). Si pavage il y a, il résulte généralement d'un déficit d'apport qu'il est en outre possible de confirmer via un diagnostic géomorphologique.

**1.1.8.2. Variabilité verticale, au sein même de la sous-couche**

En plus de la dichotomie couche/sous-couche, toujours très marquées sur les rivières à graviers, beaucoup moins sur les rivières à sable, la plupart des formes alluviales que l'on observe en rivière sont polygéniques, c'est à dire qu'elles ont été créées par des crues successives. L'analyse de leur granulométrie en profondeur révèle la forte variabilité des granulométries charriées en fonction des évènements hydrologiques.

L'exemple ci-dessous montre le cas d'une dune sableuse en progradation sur la Loire aval. On y observe une couche de surface beaucoup plus fine que sa première sous-couche (pas d'armure : 0.6 mm contre 2 mm juste en dessous), puis une grande diversité d'épaisseur et de granulométrie des strates sous-jacentes que nous avons mesurées jusqu'à 1.6 m de profondeur. NB : les deux strates les plus profondes : 110-130 cm puis 130-160 cm présentent les deux courbes granulométriques extrêmes de ce site (D50 = 0.35mm et 4mm).

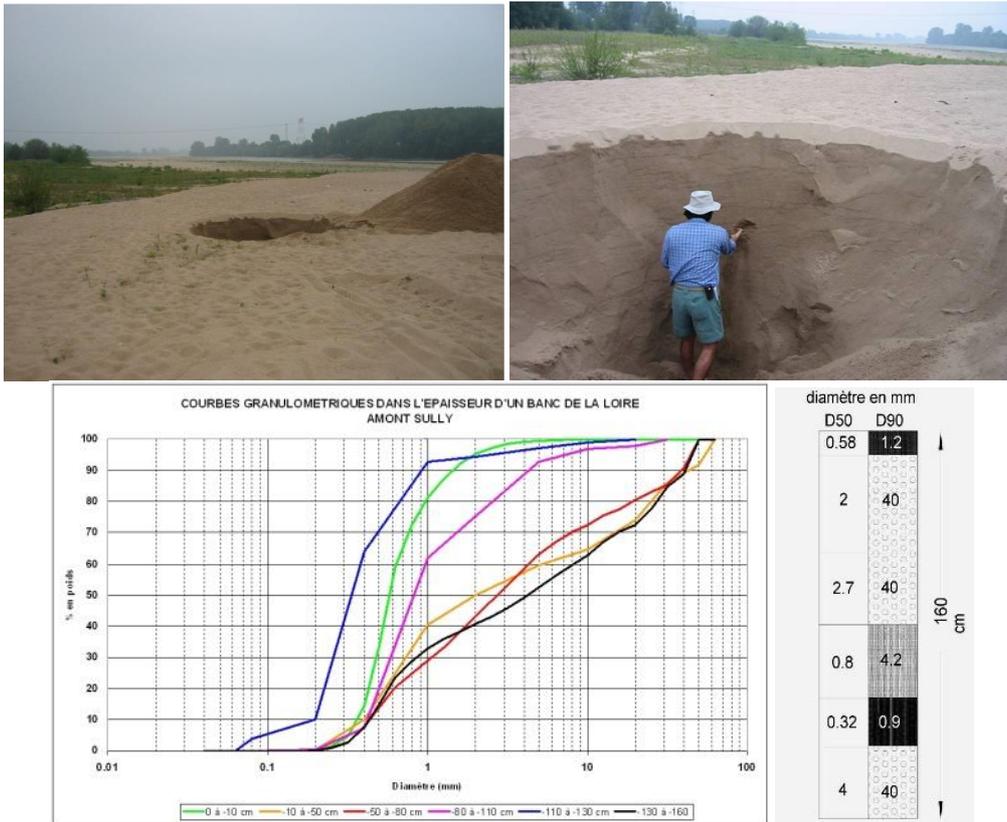


Figure 44 : exemple de forte variabilité verticale des granulométries charriées au sein d'une même dune récente de la Loire aval

**1.1.9. MOBILITE DES PARTICULES**

Comme nous venons de le voir, il arrive fréquemment que l'on trouve sur un même site d'échantillonnage « représentatif » de la rivière, des zones granulométriques très variées mais qui représentent néanmoins des granulométries transportées pour des évènements hydrologiques de plus ou moins forte intensité. Il arrive aussi, sans parler des cas de pavage, que l'on y rencontre des **granulométries qui ne sont a priori pas mobilisables**, parce que dépassant la « compétence » de l'écoulement, c'est-à-dire sa capacité à mettre en mouvement puis à déplacer une particule d'une certaine taille. Ainsi, en rivière de montagne notamment, on peut trouver des blocs pluri-décimétriques, voire métriques, dans le lit mineur des rivières. Ils ne font pas partie pour autant de la granulométrie charriée régulièrement par le cours d'eau. Ils peuvent provenir soit d'éboulements de versants proches, soit d'érosion de terrasses fluvioglaciales ou de moraines en bordure de lit mineur (où ces granulométries sont fréquentes), soit d'apports plus récents de laves torrentielles, soit encore de l'érosion de protections de berges en enrochement (ils sont alors souvent très anguleux et faciles à identifier). Il arrive aussi que, sur certaines rivières, l'incision récente des lits fasse réapparaître en surface des granulométries très grossières datant d'une période où l'activité fluviale était notablement plus forte, comme à la fin de la dernière

période glaciaire par exemple (fonte tardiglaciaire). On trouve ainsi parfois des blocs fluvioglaciaires dans les lits mineurs de rivières de piémont, qui ne font pas partie des fractions mobilisables par les rivières actuelles.

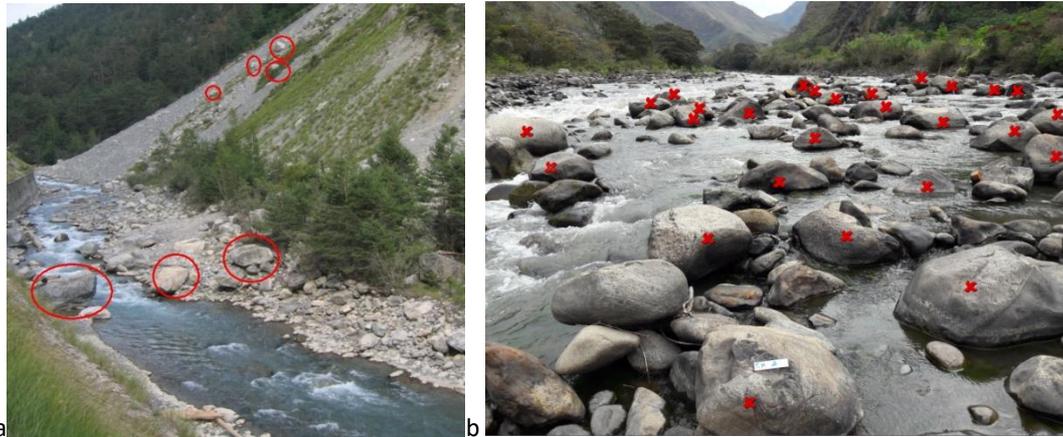


Figure 45 : (a) apports d'éboulis non mobilisables par le cours d'eau lui-même. (b) a priori les blocs marqués en rouge sont probablement issus d'éboulis de versant et ne sont jamais, ou très rarement et très localement, mis en mouvement. Ils ne font pas partie de la « charge solide » du cours d'eau mais font bien partie de ses habitats, aquatiques ou rivulaires.

Selon les objectifs des mesures granulométriques, il faudra (si l'on veut décrire des habitats alluviaux) ou pas (si l'on veut caractériser le transport solide moyen) inclure ces éléments. La difficulté, notamment sur les rivières à forte énergie, est de faire la part entre les **fractions granulométriques « mobilisables »** (celles qui vont permettre d'évaluer les caractéristiques du transport par charriage sur le cours d'eau étudié), et celles qui ne le sont pas du tout ou trop peu fréquemment et trop localement pour être comptabilisée dans le « charriage moyen ».



Il faut dissocier la « **non-mobilité** » probable ou certaine liée au diamètre de la particule (compétence) et la **fréquence de mobilité**. Ainsi, des particules très grossières telles que celles que l'on voit sur la Figure 40d sont bien mobilisables, mais seulement pour des débits de crue rare qui atteignent leurs vitesses critiques de mise en mouvement, y compris sur le sommet de banc. Cet aspect renvoie donc à une question de fond dans l'échantillonnage granulométrique à objectifs de calculs théoriques de charriage : quel évènement de crue veut-on représenter ? En reprenant la Figure 40d, si l'on cherche à évaluer le charriage en crue moyenne on échantillonnera la zone basse du banc. Si l'on veut représenter une crue rare, les caractéristiques granulométriques seront plutôt celles observées en sommet de banc. Si l'on veut évaluer un volume charrié sur 20 ou 50 ans, il faudra sans doute considérer plusieurs courbes granulométriques associées à diverses fréquences de crue.

### 1.1.9.1. EVALUER LA MOBILITE DES ALLUVIONS

#### 1.1.9.1.1. Profil en long des macroformes

La mobilité des macroformes fluviales (les bancs alluviaux principalement, mais aussi les faciès d'écoulement) est l'une des caractéristiques des cours d'eau à dynamique active et à transport de fond (*bedload*) élevé. Cette mobilité est donc un premier indicateur de la mobilité probable des particules qui les composent.

Les bancs mobiles sont généralement caractérisés par une morphologie tridimensionnelle rappelant les dunes éoliennes (revoir 1.1.5.2.2).

**NB** : cette morphologie tridimensionnelle est flagrante sur les rivières à « fort » transport solide mais moins marquée voire absente sur les rivières où celui-ci est modeste. En ce sens, la forme en dune des bancs est un premier indicateur qualitatif de l'intensité du charriage sur le cours d'eau.

#### 1.1.9.1.2. Tuilage des particules

Un indicateur intéressant de mobilité des particules composant ces macroformes alluviales, est la présence d'un **tuilage des sédiments**. Lorsque les éléments sont tuilés, c'est-à-dire disposés les uns sur les autres dans le sens de l'écoulement, avec leur grand axe généralement perpendiculaire à l'écoulement de dépôt, on peut considérer qu'ils sont a priori mobiles (voir figures ci-après).



Inversement, **l'absence de tuilage ne signifie pas que les particules ne sont pas mobiles**. En effet, toutes les particules ne s'agencent pas systématiquement en tuiles. Ce mode d'imbrication dépend beaucoup de la forme, donc de la lithologie d'origine des particules. Les particules plutôt plates et allongées (provenant de certaines formations calcaires notamment) se tuilent très facilement alors que les sédiments d'origine granitique ou basaltique, de forme plus arrondie, se tuileront moins facilement et auront tendance, même mobiles, à s'agencer plutôt « à plat ».



Figure 46 : (a) tuilage sur la Durance (grand axe du carnet = 15 cm) et (b) sur le Chontayacu. Sur les cours d'eau à très forte énergie, même les granulométries les plus grossières (échelle = 15 cm) sont mobiles. (c) les blocs plurimétriques visibles en rive gauche sont mobiles lors des crues cycloniques (Réunion, rivière de l'Est). (d) particules mobiles mais non, ou très faiblement tuilées.

### 1.1.9.2. EVALUER LA FREQUENCE DE MOBILITE

#### 1.1.9.2.1. Par la présence/absence de végétation pionnière

Les formes alluviales « fraîches », ou tout au moins celles dont la couche superficielle (armure + une partie de la sous-couche) est fréquemment remaniée, sont généralement non végétalisées ou recouverte de quelques individus d'une végétation pionnière (herbacées ou jeunes stades d'arbustes), dont l'âge correspond sensiblement à la date du dernier évènement hydrologique « morphogène » à cet endroit.



Figure 47 : a) banc mobile « frais » non végétalisé, b) banc mobile mais déjà en partie végétalisé.

Si l'absence de végétation sur une macroforme indique probablement une mobilité fréquente, ou au moins récente, la présence de végétaux épars n'indique pas nécessairement une absence ou une faible fréquence de mobilité.

**RAPPEL** : la végétation alluviale pousse très vite (figure ci-dessous). Ce sont des espèces pionnières herbacées ou arbustives, qui sont capable de coloniser et de stabiliser durablement un banc alluvial mobile en 2-3 ans. Seule une crue très forte, ou une érosion latérale de ce banc, sera à nouveau capable de mobiliser les alluvions qui le composent. Notons l'effet de la dynamique latérale très active du cours d'eau, qui favorise encore ce processus de végétalisation.



Figure 48 : un banc alluvial actif sur l'Ain. 4 ans séparent les deux photos. (a) août 2013, (b) octobre 2017

### 1.1.9.2.2. Par la présence/absence d'un biofilm

La couche alluviale (armure et sous-couche) n'est pas mobilisée à chaque évènement (figure ci-dessous). Un indicateur biologique, le biofilm (comprenant le périphyton) peut permettre d'évaluer la mobilité récente d'une couche d'armure (ou l'absence de mobilité d'une couche de pavage).

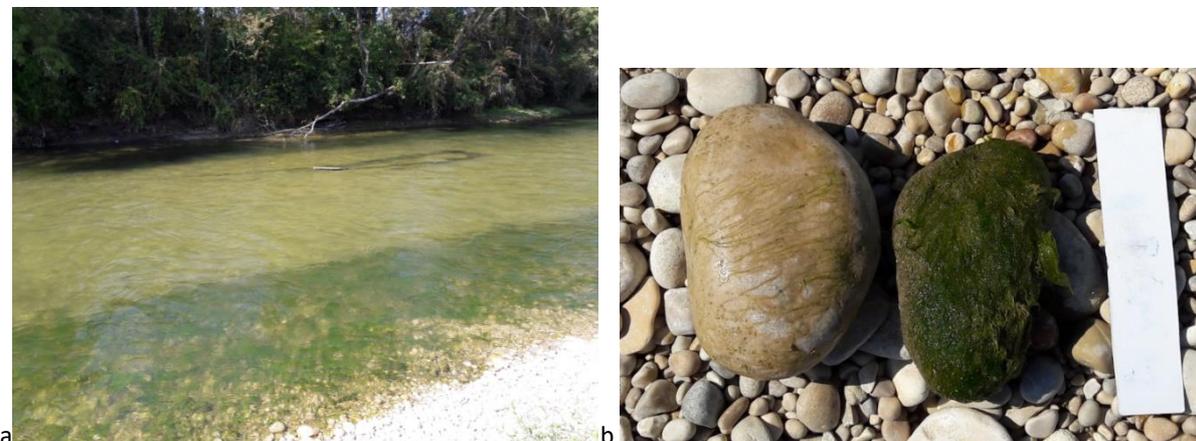


Figure 49 : mobilité différenciée des particules de l'armure après une petite crue en fonction de leur position dans le chenal. On distingue bien la partie du chenal qui a été mobilisée (blanche) et celle qui n'a pas bougé (recouverte de périphyton). À droite 2 galets de même taille prélevés dans les deux zones (échelle 15 cm).



Figure 50 : (a) (b zoom) exemple de pavage sur le Vieux Rhin indiqué par la présence d'une croûte de biofilm ancienne et l'absence de tuilage alors que d'autres bancs en présentent dans le même secteur.

## 1.1.10. METHODES DE MESURE DE LA GRANULOMETRIE

Nous présentons ci-dessous quelques exemples de méthode de mesures des caractéristiques granulométriques d'un lit alluvial en fonction des objectifs visés.

### 1.1.10.1. GRANULOMETRIE DE SURFACE

#### 1.1.10.1.1. Description dans un objectif de caractérisation des « habitats »

Les mesures granulométriques à visée « habitat » peuvent être réalisées le long de transects (méthode la plus courante) ou selon un échantillonnage surfacique.

Sur chaque point de mesure, on décrit la **granulométrie de surface** au moyen du protocole de la **méthode EVHA**, utilisée notamment dans le cadre de définition de débits réservés (Malavoi et Souchon, 1989), tant dans le lit mouillé que sur les points exondés de la bande active.

On utilise pour cela le code en 6 caractères de la méthode EVHA décrivant de manière simplifiée les classes granulométriques de Wentworth (Tableau 5) :

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

Ces types sont identifiés sur le terrain par un système visuel (patatoïde de la méthode EVHA, Figure 51) dans un **rayon de 0.5 m autour du point** d'observation (sauf si, sur un petit cours d'eau, le point de mesure suivant est à moins de 0.25 m, auquel cas on décrit la granulométrie jusqu'à mi-distance avec le point de mesure suivant). Les deux premiers caractères indiquent la **classe granulométrique la plus grossière** (ex : PG) à condition que ce type occupe au moins 10% de la surface observée. Les deux autres indiquent la ou les **classes dominantes** en surface occupée, le substrat dominant pouvant aussi être le plus grossier (ex : PGPG). Les deux derniers décrivent le deuxième dominant lorsque deux classes dominantes apparaissent (cas le plus fréquent) (ex : PGPCG, PGPGPF etc..). **Par convention le dominant 1 est toujours le plus grossier**. S'il n'y a qu'un seul dominant, on le note 2 fois (ex : PGPFPF).

Un exemple de résultat est présenté sur la Figure 52.

Tableau 5 : Echelle granulométrique de Wentworth modifiée

| Nom de la Classe granulométrique | Classe de taille (diamètre en mm) | Code utilisé |
|----------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| Dalles (dont dalles d'argile)    | >1024                             | D            |
| Rochers                          | >1024                             | R            |
| Blocs                            | 256 - 1024                        | B            |
| Pierres Grossières               | 128 - 256                         | PG           |
| Pierres Fines                    | 64 - 128                          | PF           |
| Cailloux Grossiers               | 32 - 64                           | CG           |
| Cailloux Fins                    | 16 - 32                           | CF           |
| Graviers Grossiers               | 8 - 16                            | GG           |
| Gravier fins                     | 2 - 8                             | GF           |
| Sables                           | 0,625 - 2                         | S            |
| Limons                           | 0,0039 - 0,0625                   | L            |
| Argiles                          | < 0,0039                          | A            |

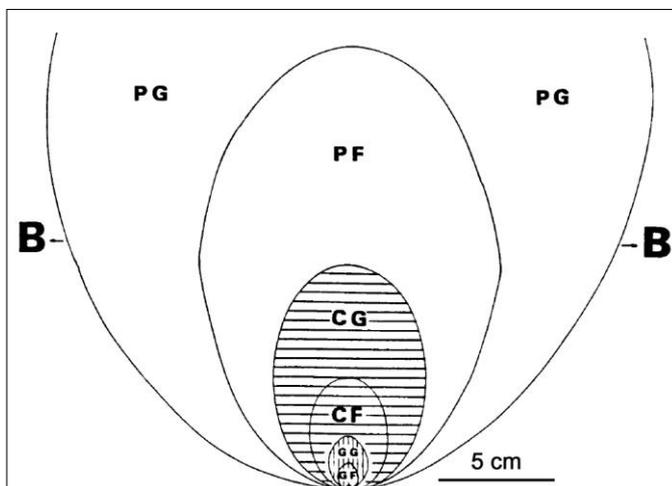


Figure 51 : granulomètre visuel de terrain (Malavoi et Souchon, 1989) (NB : ne pas oublier de mettre à l'échelle avant d'aller sur le terrain...)

Sur les points hors d'eau, à la place ou en complément de la description visuelle, il peut être utile de prendre une photo verticale et de déterminer un véritable histogramme granulométrique (figures ci-dessous).



**Ne jamais oublier de poser à terre un repère visuel permettant de connaître l'échelle.**

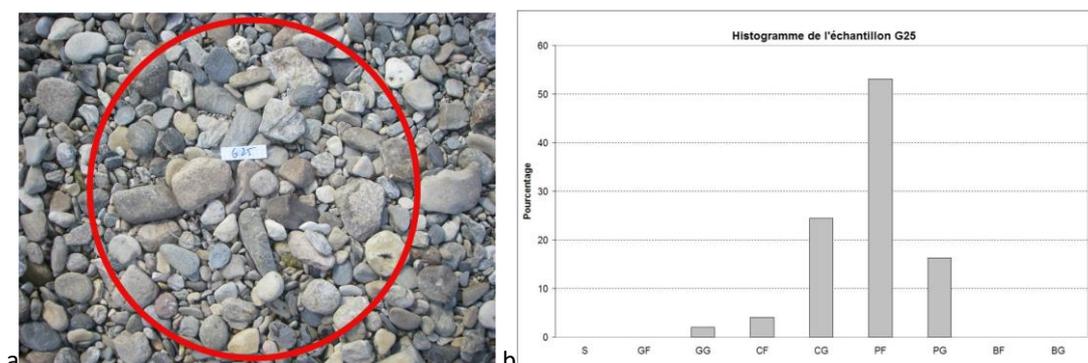


Figure 52 : a) exemple de description visuelle du substrat dans un rayon de 0.5 m autour d'un point de mesure et b) histogramme correspondant : PGPFCG. NB : La plaquette supportant le code de l'échantillon sert d'échelle de calage (15cm).

### 1.1.10.1.2. Description dans un objectif de caractérisation du « transport solide »

La première chose à faire est de bien « comprendre » la dynamique du site de mesure et de bien choisir les zones que l'on veut échantillonner.

On voit par exemple sur la figure ci-dessous que, s'il est intéressant de décrire les nombreux blocs présents à la surface du banc si l'objectif des mesures est de caractériser un habitat (voir ci-dessus), il ne faut surtout pas les considérer pour l'établissement d'une courbe granulométrique « type » des sédiments transportés. On a ici affaire à un dépôt manifestement polygénique avec des reliques d'une forte crue (peut être très ancienne), ayant transporté ces blocs et une granulométrie graveleuse beaucoup plus petite reflétant probablement le charriage de la dernière crue.

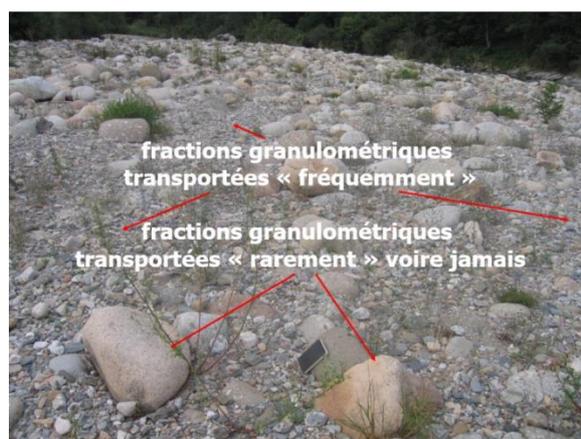


Figure 53 : exemple de fractions granulométriques qui sont manifestement non ou très peu fréquemment mobiles. Les gros blocs sont a priori à exclure d'une courbe granulométrique « type » de charriage sur cette rivière, même s'ils peuvent occasionnellement être mobilisés et bouger légèrement.

Cette analyse étant faite deux types de protocoles sont alors envisageables :

- soit des mesures in situ sur la base d'une stratégie d'échantillonnage et de mesure de type « Wolman » ;
- soit des prises de vue verticales et des analyses granulométriques a posteriori, manuelles ou via des logiciels d'analyse d'image.

Ces deux approches, aujourd'hui bien connues, sont décrites sommairement ci-après, nous renvoyons le lecteur vers le **guide OFB de 2021** (Camenen et Melun, 2021) ou la note technique EDF (2021) pour plus de détails.

#### A. Méthode de Wolman

Cette méthode élaborée par M.G. Wolman (1954) consiste à prélever **une centaine d'éléments** composant le substrat que l'on souhaite décrire le long d'une cordelette à nœuds, d'un multi décamètre, d'une grille ou simplement en déambulant aléatoirement sur la bande active ou dans le lit mouillé. Le prélèvement est effectué

à chaque nœud de la corde, ou tous les n cm du décimètre, ou au point focal de la botte (on y pose la pointe d'un crayon) quand on déambule aléatoirement.



Figure 54 : mesures « Wolman » le long d'un décimètre

**NB :** Les nœuds de la corde ou les espacements à choisir sur le décimètre doivent être au moins de l'ordre de 2 fois l'axe b de la plus grosse particule de la zone échantillonnée.



Il a été fréquemment noté un biais consistant à prélever sous une même graduation, plutôt la particule la plus grossière que la plus fine.

Les éléments prélevés sont ensuite mesurés selon leur **axe b** (2<sup>ème</sup> axe en longueur, perpendiculaire au plus grand axe(a)), soit avec une règle soit au moyen d'un granulomètre. On en tire enfin une courbe granulométrique exprimée en pourcentage des effectifs cumulés. Le granulomètre est plus rapide à utiliser tout en donnant des résultats suffisamment précis pour établir des courbes granulométriques.

Une mesure de type « Wolman » classique (prélèvement et mesure de 100 particules) prend une trentaine de minutes à deux opérateurs.



Figure 55 : a) mesure à la règle de l'axe b d'un galet, b) granulomètre

### B. Méthode par prise de vue verticale sur site ou par LiDAR

La méthode consiste à prendre une photo verticale au-dessus de la zone à échantillonner et à réaliser une mesure manuelle ou automatique des axes  $b$  des particules présentes. Elle peut être mise en œuvre sur le terrain en multipliant les stations ou via des acquisitions aéroportées permettant de renseigner la granulométrie sur toute la surface exondée (voire légèrement inondée) et à l'échelle de tronçons fluviaux de plusieurs dizaines de km. L'avantage de cette méthode est double :

- pouvoir multiplier les points d'échantillonnage et réduire ainsi l'incertitude liée à la diversité spatiale, ou en tout cas mieux la représenter ;
- mesurer de manière exhaustive toutes les particules présentes et non « seulement » une centaine.

L'inconvénient est lié à deux sources d'incertitude :

- une insuffisante représentation des très petites particules si la résolution de l'appareil photo n'est pas suffisante ;
- le masquage/recouvrement de certaines particules par d'autres qui peut donc conduire à un biais de la courbe vers les plus petites classes => il existe des coefficients correcteurs liant  $D_{50image}$  et  $D_{50terrain}$ .

Plusieurs logiciels de traitement granulométrique existent dont le plus connu, et plutôt performant, est Basegrain ©.

Le résultat de ces mesures est relativement proche de celui des mesures de type « Wolman », à savoir des courbes granulométriques exprimées en % d'effectifs cumulés.

**NB** : des méthodes encore plus sophistiquées basées sur le *deep learning* ou *machine learning* sont en cours de développement et permettront sous peu des analyses simplifiées sur des superficies importantes (Soloy et al., 2020, Lang et al., 2020). D'autres approches fondées sur la rugosité altimétrique de surface extraite de nuages de points 3D obtenus par traitement photogrammétrique SfM d'images drone montrent également des résultats encourageants (Vazquez-Tarrio et al., 2017 ; Liébault et al., 2023 ). Ces approches qui s'appliquent sur des surfaces émergées sont particulièrement adaptées pour caractériser la granulométrie de surface des lits en tresses, qui présentent une variabilité spatiale très marquée.

#### 1.1.10.2. GRANULOMETRIE DE LA SOUS-COUCHE

Pour prendre en compte une grande partie des alluvions moyennes et fines (des limons aux graviers) qui n'apparaissent plus en surface mais qui font bien partie de la charge alluviale du cours d'eau, il est nécessaire de réaliser des **prélèvements dans la masse**. Ceci est aussi la principale stratégie permettant de déterminer quelle était la charge transportée par la rivière avant la formation d'un éventuel pavage pour évaluer les tailles appropriées pour une recharge ou une réinjection sédimentaire. Le principe consiste à prélever un certain volume de sédiments après avoir décapé la couche d'armure, par définition plus grossière que la sous-couche. Selon Church et al. (1987), le volume à prélever doit être suffisamment important pour que la masse de la plus grosse particule ne constitue qu'un faible pourcentage de la masse totale. Ils suggèrent ainsi que la masse maximale admissible de la plus grosse particule soit de 0,1 % de la masse totale pour un diamètre maximal inférieur à 32 mm, 1 % pour  $D_{max} \leq 64$  mm et 5 % pour  $D_{max} \leq 128$  mm.

Le volume prélevé est ensuite tamisé sur place et permet de construire une courbe granulométrique par masse.



Malgré toutes les précautions prises et la multiplicité des mesures, rappelons la **très forte hétérogénéité spatiale des dépôts sédimentaires à l'échelle d'une portion de rivière** (revoir la synthèse de Mosley et Tindale (1985) au (1.1.8.1.2)). Il convient donc d'être toujours très prudent avec la manipulation et l'utilisation de données granulométriques dans un but de caractérisation du transport solide grossier dans un cours d'eau. Il faut aussi toujours travailler avec un ensemble de mesures afin de mieux apprécier les conditions médianes et de s'affranchir de conditions locales particulières.

## LES LIENS ENTRE MORPHOLOGIE, SEDIMENTS, FONCTIONNEMENT ECOLOGIQUE ET BON ETAT DES EAUX

Pour rappel, la DCE définit le "**bon état**" d'une masse d'eau de surface lorsque l'état écologique et l'état chimique de celle-ci sont au moins bons.

L'état écologique est évalué via une analyse du fonctionnement des écosystèmes aquatiques associés à cette masse d'eau et est déterminé à l'aide d'**éléments de qualité** : **biologiques** (espèces végétales et animales), **hydromorphologiques** et **physico-chimiques**, mesurés grâce à des indicateurs (par exemple les indices invertébrés ou poissons en cours d'eau).

Le lien entre le fonctionnement hydrosédimentaire et le « bon état » d'une masse d'eau se fait notamment à travers le concept d'**habitat des biocénoses** peuplant cette masse d'eau ou devant en théorie la peupler.

L'aspect hydrosédimentaire du « bon état » est bien décrit dans la circulaire DCE 2005/12 qui précise les **paramètres hydromorphologiques qui soutiennent les paramètres biologiques** :

- les **conditions morphologiques** : diversité des profondeurs, de la largeur de la rivière (soit la **diversité des faciès d'écoulement**), du **substrat du lit** et de la végétation des rives ;
- la continuité écologique de la rivière : montaison et dévalaison des espèces aquatiques ; **flux de sédiments**, connexions avec les annexes hydrauliques ;

Ce sont les différents liens entre morphologie, sédiments et fonctionnement écologique qui sont présentés dans ce chapitre.

### 1.1.11. FACIES D'ÉCOULEMENT ET FONCTIONNEMENT HYDROECOLOGIQUE

Il est couramment admis aujourd'hui que le fonctionnement biologique de la plupart des hydrosystèmes est très fortement lié à leur fonctionnement physique, lui-même régi par les processus d'érosion/transfert/dépôt de sédiments. Ces processus engendrent des formes fluviales en plan, en travers et en long que l'on est maintenant en mesure d'associer assez bien à des fonctions écologiques. La passerelle la plus utilisée pour établir ces liens est basée sur le concept d'habitat des communautés biologiques, par le biais notamment des **faciès d'écoulement** que l'on considère comme des méso-habitats.

Les faciès d'écoulement sont de petites portions de cours d'eau (d'une longueur comprise entre 1 et 10 fois la largeur à pleins bords environ) présentant une homogénéité, à l'échelle de quelques m<sup>2</sup> à quelques centaines de m<sup>2</sup>, sur le plan des vitesses, des profondeurs, de la granulométrie, de la pente du lit et de la ligne d'eau, des profils en travers (Malavoi, 1989, Malavoi et Souchon, 2002).

**Les hydromorphologues considèrent les faciès, et notamment les alternances de radiers et de mouilles, comme les unités fondamentales des rivières.** Ils leur attribuent une fonction physique de dissipation optimale de l'énergie. Elles sont également le reflet à long terme des conditions hydrauliques et des contraintes locales exercées par la géologie, la morphologie terrestre, la couverture végétale et le climat.

Les hydrobiologistes s'intéressent également à ces unités morphologiques pour décrire l'utilisation de l'habitat par les biocénoses aquatiques ou pour composer leurs unités d'échantillonnage : prélèvements de macroinvertébrés benthiques, inventaires piscicoles ou choix de séquences de faciès représentatives d'un tronçon de cours d'eau (stations) pour l'application des méthodes de type microhabitat.

L'identification des faciès d'écoulement est souvent problématique. Dans la réalité il existe très peu de faciès « d'école ». Les critères permettant de les identifier ont beaucoup souffert d'une certaine subjectivité, certains auteurs privilégiant tantôt la composition du substrat, tantôt la pente de la ligne d'eau, tantôt la répartition des hauteurs et vitesses, le nombre de Froude ou encore les caractéristiques de la surface de l'eau.

Malavoi (1989) et Malavoi et Souchon (2002) ont proposé une approche qui, bien qu'entachée d'imperfections induisant un biais lié à l'opérateur, essaie d'objectiver la description au moyen d'une clé de détermination.

#### 1.1.11.1. CRITERES DE DISCRIMINATION DES FACIES

Deux niveaux de classification sont proposés.

##### 1.1.11.1.1. Niveau 1

Deux critères de premier niveau ont été retenus :

- la hauteur d'eau moyenne ;
- la vitesse d'écoulement moyenne.

Ces deux variables doivent être observées pour un débit d'étiage moyen proche du débit moyen mensuel sec interannuel (moyenne des débits mensuels d'étiage). On peut alors proposer un premier niveau de classification des faciès d'écoulement sur la base de leur hauteur d'eau :

- faciès profonds, hauteur d'eau supérieure à 60 cm : chenaux lotiques (CLO), chenaux lenticques (CLE), mouilles de concavité (MOU), fosses de dissipation (FOS) ;
- faciès peu profonds, hauteur d'eau inférieure à 60 cm : plats (PLA), plats lenticques (PLL), radiers (RAD), rapides (RAP), cascades (CAS) ;

ou sur la base de la vitesse du courant :

- faciès « lenticques », vitesses inférieures à 30 cm/s : mouilles, chenaux lenticques, plats lenticques ;
- faciès « lotiques », vitesses supérieures à 30 cm/s : radiers, plats courants, rapides, chenaux lotiques.

Il serait tout à fait envisageable de proposer une typologie utilisant des valeurs adimensionnelles qui permettraient d'identifier des radiers avec 5 mm de profondeur sur un modèle réduit expérimental et de 50 cm sur un cours d'eau de 100 m de large. Toutefois, pour répondre à une demande de classification émanant plutôt de biologistes, il a été souhaité **une typologie basée sur des valeurs brutes permettant d'y associer des types de peuplements**.

##### 1.1.11.1.2. Niveau 2

Les critères de deuxième niveau permettant d'affiner le premier découpage sont :

- le profil en travers ;
- le profil en long et les caractéristiques de la surface de l'eau.

Un niveau 3, non inclus dans la clé de détermination, permet de préciser encore la classification ; il s'agit de la granulométrie du substrat.

La clé actuellement utilisée (Figure 56) permet d'identifier 11 types de faciès dont 6 majeurs et 5 secondaires. Ces 11 types peuvent éventuellement, en cas de nécessité de simplification, être regroupés en 4 méga-types (à droite sur la figure).

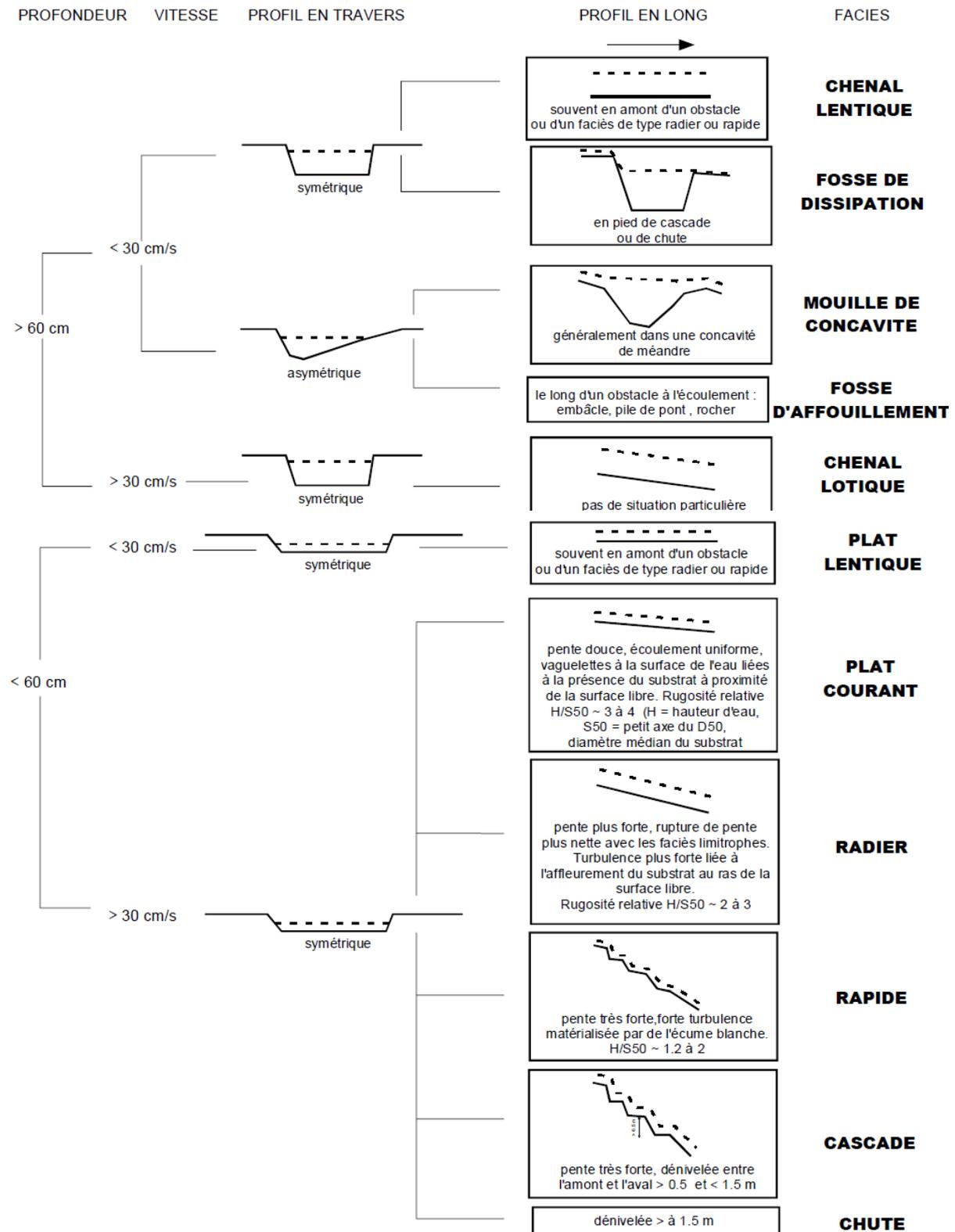


Figure 56 : clé de détermination simplifiée des faciès d'écoulement (Malavoi et Souchon, 2002)



Figure 57 : Quelques exemples de faciès d'écoulement.

### 1.1.11.2. FACIES ET ECOLOGIE AQUATIQUE

Depuis de nombreuses années, les scientifiques ont cherché à corréliser les faciès d'écoulement avec l'habitat et les fonctions vitales de différentes espèces de poissons, invertébrés et végétaux aquatiques.

Un exemple d'application de la typologie des faciès et de leur cartographie est présenté sur la figure suivante. L'étude (Malavoi, 1999) avait pour objectif de cartographier les **surfaces potentielles de reproduction et de développement du saumon atlantique** dans le bassin de l'Allier. Ces surfaces sont détectables par le biais des faciès d'écoulement puisque les faciès correspondant à ce type d'habitat (fraie et grossissement des tacons) sont les **plats courants et les radiers**, particulièrement les radiers à blocs qui ont été distingués.

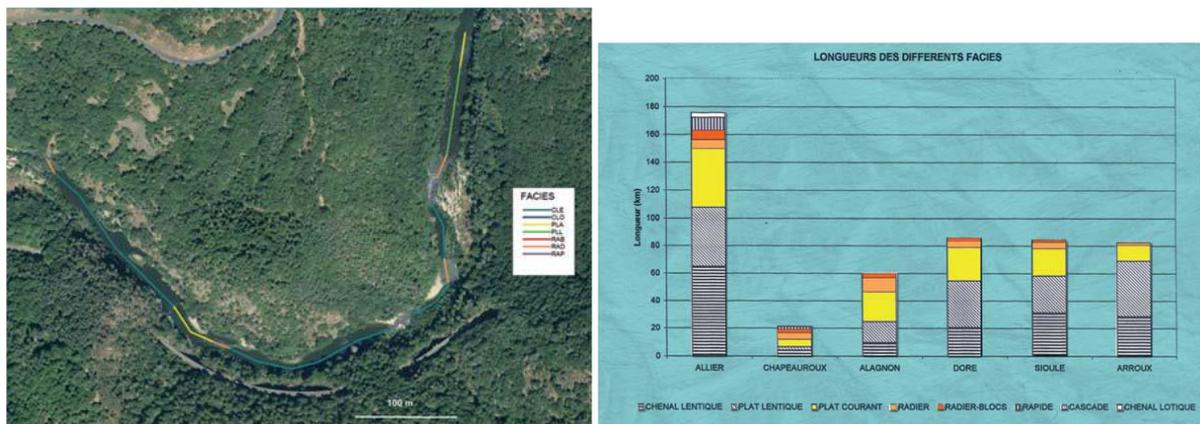


Figure 58 : a) Exemple de cartographie des faciès d'écoulement sur le haut Allier. b) synthèse de la cartographie sur les six cours d'eau « à saumon » du bassin de l'Allier (Malavoi, 1999). En couleur apparaissent les faciès intéressants pour la reproduction et le développement des saumons.

Le tableau suivant présente quelques exemples de longueurs de faciès d'écoulement relatives à la largeur à pleins bords du lit mineur sur la base des données recueillies pour cette étude. Ces mesures ayant été réalisées sur des cours d'eau à forte puissance du bassin de l'Allier, les résultats ne sont pas extrapolables à l'ensemble des types de cours d'eau français mais donnent des ordres de grandeur cohérents qui peuvent aider au diagnostic de fonctionnement et aux éventuelles propositions de restauration.

On observe ainsi que les radiers sont généralement très courts, d'une longueur de l'ordre de 1 fois la largeur du cours d'eau, tandis qu'à l'opposé, les chenaux lenticques et les plats lenticques font généralement 8 à 10 fois la largeur. Notons aussi que seul le Chapeauroux présente des cascades.

Tableau 6 : quelques exemples de longueur de faciès d'écoulement relatives à la largeur du cours d'eau à pleins bords (CLE=Chenal Lenticque, PLL= Plat Lenticque, PLA= Plat courant, RAD= Radier, RAB= Radier à Blocs, RAP=Rapide, CAS=Cascade, CLO=Chenal Lotique).

|             | CLE    | PLL  | PLA  | RAD  | RAB  | RAP  | CAS  | CLO  |
|-------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| ALLIER      | 8,57 W | 6,63 | 3,12 | 1,36 | 1,76 | 2,46 |      | 2,19 |
| ALLAGNON    | 7,53   | 5,81 | 4,80 | 2,21 | 3,16 | 1,57 |      | 1,08 |
| ARROUX      | 11,41  | 8,40 | 2,59 | 0,89 | 2,04 |      |      |      |
| CHAPEAUROUX | 7,03   | 6,07 | 4,96 | 4,39 | 5,33 | 6,45 | 3,50 |      |
| DORE        | 8,72   | 9,83 | 4,61 | 1,16 | 2,20 | 0,54 |      | 1,48 |

## 1.1.12. SEDIMENTS ET FONCTIONNEMENT HYDROECOLOGIQUE

### 1.1.12.1. LES SEDIMENTS ET LES BIOCENOSES AQUATIQUES

**NB : une grande partie de ce sous-chapitre et des deux suivants est reprise du guide ONEMA 2011 (Malavoi et al. 2011).**

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

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

- pour les sédiments fins, moyens et grossiers, une **fonction de lieu de vie** où les organismes aquatiques et riverains utilisent les sédiments comme habitat ;
- pour les sédiments moyens (sables) et grossiers, une **fonction de support de ponte** pour les poissons et les invertébrés sur les substrats submergés, et pour les oiseaux, les insectes et autres invertébrés sur les substrats émergés ;
- pour les sédiments grossiers une **fonction d'abri** vis-à-vis des conditions hydrauliques et des prédateurs.

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

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

Notons enfin que l'infiltration de l'eau dans l'épaisseur des macroformes alluviales favorise une régulation thermique que l'on n'observe pas sur les cours d'eau coulant sur des fonds pavés ou ceux où domine le substratum.

#### 1.1.12.1.1. Les sédiments : lieu de vie de la faune aquatique

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

Ainsi, la très grande majorité des invertébrés et en particulier leurs larves, vivent enfouies dans le sédiment, fin ou grossier. On y trouve aussi certains stades de développement (œufs et larves notamment) de plusieurs espèces de **poissons dits lithophiles** (truites, saumons, lamproies).

Tous ces animaux n'utilisent pas les mêmes granulométries ni les mêmes caractéristiques hydrodynamiques (vitesse et hauteur d'eau), d'où l'importance de la variété des dépôts alluvionnaires.

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

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



a-b © G. Archambaud

Figure 59 : : Exemple d'invertébrés aquatiques (*simuliidae*) vivant sur (a), et sous (b) les éléments grossiers du substrat de l'armure.

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

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



Figure 60 : a) moule perlière sur son substrat de pierres et cailloux, b) *Ancylus fluviatilis*.

**Les surfaces occupées par des substrats alluviaux de granulométrie et de nature variées sont donc un facteur clé du fonctionnement biologique du cours d'eau via notamment sa capacité d'accueil pour la faune aquatique.**



La variété des dépôts alluviaux est fortement corrélée à celle des faciès d'écoulement, d'où l'importance de cet **objectif dans le cadre de la mise en œuvre d'un PGS.**

Pour les substrats grossiers, la « qualité » du sédiment, qui peut être exprimée en termes de porosité (volume des interstices) et/ou de conductivité hydraulique (capacité du sédiment à laisser transiter les flux d'eau) est également un facteur déterminant pour le développement de la faune benthique et la réalisation des processus biologiques auxquels elle participe (dégradation de la matière organique et cycles biogéochimiques associés). L'importance du volume des interstices favorise le piégeage de matières végétales et de détritiques qui constituent la base de la chaîne alimentaire et assurent ainsi une colonisation et un développement optimal de certaines larves d'invertébrés aquatiques, notamment les déchetisseurs (Peckarsky, 1980).

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



La présence d'une **épaisseur suffisante** d'alluvions grossières assure donc une meilleure résilience pour la faune benthique, notamment après les épisodes de crue. Nous verrons que ce **peut être un objectif majeur à viser dans le cadre d'un PGS** (voir 1.1.12.4).

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

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

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

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

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

#### 1.1.12.1.2. Les sédiments : support de ponte

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



La profondeur d'enfouissement des œufs pour les poissons lithophiles est variable selon les espèces mais il semble qu'une valeur de 5 cm soit un minimum, avec un optimum autour de 20-25 cm (voir 1.1.12.4). D'où l'importance de ce type d'objectif dans un PGS (voir plus loin la partie sur les épaisseurs alluviales souhaitables en fonctions des compartiments et des niveaux d'ambition des objectifs visés).



Figure 61 : (a) chevesne sur une frayère dans un radier, (b) lamproie de Planer sur sa frayère, (c) chabot sur site de ponte, (d) truite fario en pleine reproduction.

D'autres viennent simplement déposer ces œufs sur les substrats grossiers (vandoise, vairon, goujon, chabot, loche...) qui y adhéreront grâce à leur capacité de fixation. D'autres encore, comme la grande alose, se regroupent la nuit sur des frayères situées en amont de radiers constitués d'alluvions grossières et libèrent œufs et sperme lors de leur spectaculaire parade nuptiale. Ceux-ci dérivent ensemble dans l'écoulement et se déposent progressivement dans les interstices entre les sédiments grossiers du radier aval. Sur les 80 espèces de notre faune piscicole, 25 utilisent des substrats minéraux grossiers pour leur reproduction (Keith et Allardi, 2001).

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

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

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

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



Atteindre une superficie minimale de SGF de l'ordre de 3 à 5% de la superficie du lit mouillée au débit de ponte pourrait être l'un des objectifs importants d'un PGS.

**NB** : les proportions « normales » de SGF sont en réalité variables selon les types de cours d'eau et en particulier de la géologie de leur bassin versant et de leur capacité de production sédimentaire grossière. Nous ne disposons pas à ce jour de données régionalisées, d'où cette proposition de valeur de 3 à 5 % qui semble être une valeur « moyenne ».

Les conditions hydrauliques qui règnent sur ces zones sont très importantes pour leur utilisation potentielle comme zones de fraie. Les vitesses du courant doivent en effet rester compatibles avec les capacités de nage de ces espèces ce qui correspond très souvent à des valeurs inférieures à 50 cm/s, sauf pour le saumon atlantique et la lamproie marine qui sont capables d'utiliser des zones où les vitesses sont de l'ordre de 70 à 80 cm/s.

Il est important que le cours d'eau puisse offrir différents types de dépôts alluvionnaires, sous différentes conditions hydrauliques, afin de garantir une diversité de choix aux espèces utilisatrices selon les conditions hydrologiques.

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

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

**Les alluvions doivent aussi présenter une porosité satisfaisante** afin d'assurer une bonne circulation des écoulements interstitiels garantissant l'oxygénation des œufs et l'évacuation des déchets azotés. Cette porosité est très **liée à la quantité de sédiments fins** présents dans les zones de graviers et de petits galets (**colmatage interstitiel**). Des teneurs en particules fines (diamètre < 2 mm) supérieures à 30 % dans le nid conduisent à une mortalité quasi totale des œufs. Au-delà de 10 %, la moitié des œufs meurent dans une frayère de truites (Raleigh et al., 1986 ; Cocchiglia et al., 20112).



La résorption/limitation du colmatage, superficiel ou interstitiel peut être un objectif important dans le cadre de la mise en œuvre d'un PGS.

#### 1.1.12.1.3. Les sédiments grossiers : abris hydrauliques

La dernière fonction biologique des sédiments grossiers est liée à leur rugosité qui permet de modifier les conditions hydrauliques dans la zone de contact et assure ainsi des abris hydrauliques pour la faune aquatique évoluant près du fond. Cette zone de contact est essentielle pour de nombreuses espèces qui bénéficient des conditions hydrauliques turbulentes pour se déplacer, se nourrir ou échanger des composés chimiques avec la colonne d'eau (Vogel 1981, Koehl 1984) tout en étant **protégées des fortes vitesses par la rugosité hydraulique de la couche limite**.

Le chabot ou encore l'apron du Rhône sont des espèces de poissons qui évoluent quasiment toujours au ras du fond, en s'abritant dans les interstices existants entre les cailloux et les pierres grossières. De même, les jeunes stades de salmonidés utilisent beaucoup les cailloux et pierres (nomenclature de Wentworth) comme abris hydrauliques leur permettant de vivre dans des zones lotiques (radiers et plats courants) et de s'y alimenter

(notamment sur la dérive d'invertébrés), tout en étant relativement protégés des fortes vitesses par la taille des sédiments derrière lesquels ils peuvent s'abriter.

#### 1.1.12.1.4. Les sédiments et la flore aquatique

La flore aquatique et riveraine est un excellent descripteur de fonctionnement des milieux aquatiques et temporaires. Elle permet en particulier de caractériser :

- les **échanges nappe-rivière** : les espèces végétales sont sensibles à l'**oxygénation de la rhizosphère et à la turbidité de l'eau**, deux paramètres régis par la connectivité entre eau de surface et eau souterraine, car les apports phréatiques contribuent à l'oxydation de la rhizosphère et, par leur température relativement basse, limite l'activité microbienne hétérotrophe, limitant ainsi la désoxygénation biologique des sédiments. De surcroît, les températures faibles des eaux souterraines limitent la croissance algale et préservent ainsi des eaux d'autant plus limpides que le débit de ces apports souterrains est important ;
- les **processus d'érosion-dépôt**, et donc la **stabilité du sédiment** : les plantes sont soit brisées, soit enfouies sous les dépôts sédimentaires lors des crues. Les crues agissent également fortement sur la dispersion des végétaux (dispersion de fragments et de graines). Enfin, ces processus agissent sur la connectivité entre les milieux de surface et les milieux souterrains, en érodant, ou au contraire en colmatant le sédiment. Enfin, lorsque les processus de dépôt dominant, ils contribuent à maintenir un fort niveau de ressources nutritionnelles dans les cours d'eau, favorisant la production végétale ;
- le **degré de disponibilité des ressources trophiques** : les végétaux sont très sensibles à la disponibilité en nutriments, principalement **azote et phosphore**. En milieu aquatique, la hiérarchie compétitive est exacerbée, car l'augmentation du niveau de ressources de l'habitat est accompagnée d'une diminution de la limpidité de l'eau et d'une augmentation des phénomènes d'anoxie racinaire. Ainsi, très rapidement, on observe le remplacement d'espèces de petite taille, peu compétitives, par des espèces de grande taille, capables d'atteindre la surface de l'eau, et de disposer de lumière et d'oxygène, puis par des espèces non fixées, capables de résister aux conditions les plus extrêmes d'anoxie et de carence en lumière dans la masse d'eau. Sur les rives, le caractère rhizomateux, la grande taille, et la capacité à transporter de manière active de l'oxygène vers la rhizosphère va fortement influencer la survie et le succès des espèces dans ce type d'habitat (par exemple *Phragmites australis*, *Typha latifolia*, *Glyceria maxima*). Les tiges de ces végétaux héliophytes se composent d'un parenchyme aérifère (aérenchyme) qui fournit l'oxygène aux organes souterrains (rhizome et racines) même en période de submersion et d'anoxie.

Si l'on se focalise plus spécifiquement sur les processus sédimentaires, ceux-ci n'agissent donc pas uniquement sur l'habitat physique des végétaux, mais également sur l'**habitat chimique**, et bien au-delà de la rhizosphère.

Ainsi, dans les situations fortement érodées, le substrat grossier domine dans la plupart des parcelles (on peut même parfois parler de **pavage**) et, par conséquent, les végétaux ne disposent que de peu de refuges.

La possibilité pour les espèces végétales de survivre repose sur la préservation d'au moins une partie de l'individu. On peut citer (par exemple les systèmes racinaires, fortement ancrés dans le substrat, comme les réseaux racinaires d'*Apium nodiflorum* en cours d'eau, les racines et rhizomes de *Nuphar lutea* dans les zones humides ou les systèmes racinaires de *Buddleia sp.* sur les marges. Il est nécessaire pour que ces espèces puissent s'installer durablement que la **durée initiale d'installation se déroule pendant une période de stabilité relative des écoulements** : cette période permet à la plante de consolider son ancrage, et elle est d'autant plus longue que le milieu est pauvre en nutriments. Les végétaux avec des racines pivotantes profondes ou une strate arbustive ou arborée dense peuvent contribuer à piéger les particules fines et à stabiliser le substrat, facilitant ainsi potentiellement l'ancrage et la croissance d'autres espèces. Une fois cet ancrage consolidé, on considère que l'on a passé un seuil d'irréversibilité et que la plante restera en place, à moins qu'un évènement paroxystique ne vienne remodeler le sédiment en profondeur.

Les évènements hydrauliques sont également efficaces pour disperser les fragments et les semences, qui auront souvent une faible durée de vie, et qui boucleront leur cycle reproducteur entre deux crues.

Dans les situations où les processus de dépôt dominant, les plantes peuvent être exposées à une inondation de longue durée et à un enfouissement partiel par des sédiments fins. Comme la vitesse d'écoulement est généralement faible dans ces situations, les pertes de biomasse par rupture sont faibles, mais les plantes doivent résister à l'anoxie et à l'enfouissement. Dans les milieux aquatiques, les dépôts sédimentaires favorisent les espèces eutrophes rhizomateuses, telles *Phragmites australis*, *Potamogeton nodosus*, ou bulbeuses, telle *Sagittaria sagittifolia*. Certaines espèces, comme dans les faciès érodés, bouclent leur cycle de vie pendant les périodes inter-crués, comme *Najas marina*. La forte turbidité que l'on rencontre souvent dans ces types de situations favorise les espèces non fixées (*Ceratophyllum demersum*, *Lemna sp.*). En général, les espèces

pérennes à forte biomasse (*Nuphar*, *Nymphaea*, *Phragmites*) sont celles qui se révèlent les plus tolérantes à ces processus de dépôt.

**1.1.12.2. LES SEDIMENTS ET LES BIOCENOSSES TERRESTRES**

**1.1.12.2.1. Faune**

Les bancs d'alluvions grossières (du sable aux blocs) exondés une partie de l'année servent d'habitat à de nombreux animaux. Le terme de grève est généralement employé dans les publications des biologistes et écologues pour désigner ces dépôts sédimentaires mobiles exondés. Parmi les vertébrés supérieurs qui affectionnent les grèves, on peut citer certains oiseaux qui en font leur habitat de reproduction privilégié, dont des espèces protégées au niveau européen (œdicnème criard, sterne naine et sterne pierregarin, pipit rousseline). Certains limicoles comme le petit gravelot ou le chevalier guignette par exemple y pondent leurs œufs au printemps, au milieu des galets fluviaux avec lesquels il se confondent, de même que les poussins qui sont ainsi protégés des prédateurs.



a © F. Damiani  
b © tous droits réservés

Figure 62 : a) petit gravelot et b) nid et poussin.



a- b © tous droits réservés

Figure 63 : a) sterne naine (et son poussin) et b) sterne pierregarin.

Certains insectes sont aussi inféodés à ces milieux alluviaux mobiles, comme le forficule des galets, géant des perce-oreilles qui atteint presque 3 cm de long et occupe les plages de galets au bord des cours d'eau. Si l'œdipode turquoise et l'œdipode rouge, deux espèces de criquets, sont encore bien représentées, l'œdipode

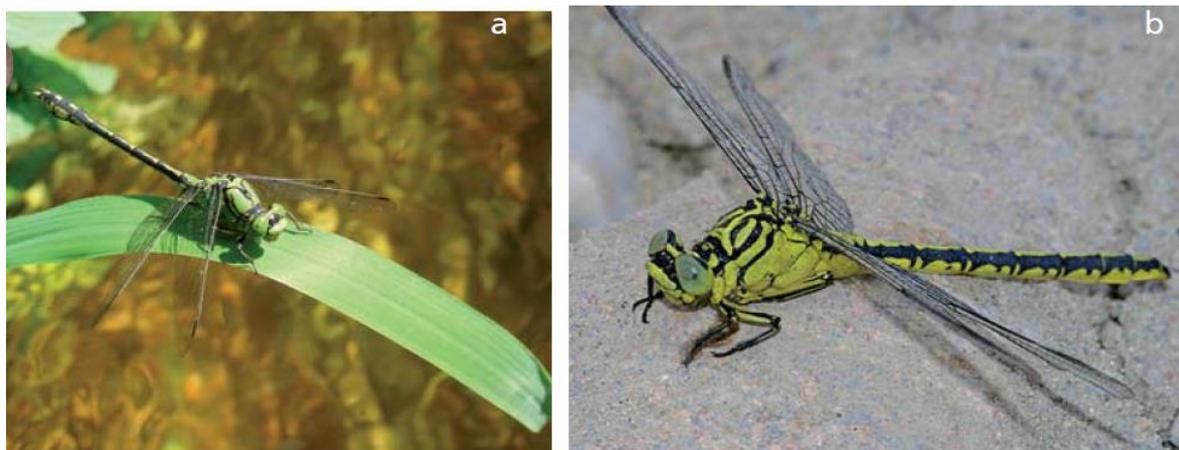
des salines, qui occupe le même milieu que la petite massette (voir plus bas) a très fortement régressé du fait des aménagements de cours d'eau qui ont altéré le fonctionnement hydrosédimentaire.



a © P. Dubois - b © Konig Photo

Figure 64 : a) œdipode turquoise et b) œdipode des salines.

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



a © J.M. Lett - b © C. Fischer

Figure 65 : a) gomphe serpent in et b) gomphe à pattes jaunes.

#### 1.1.12.2.2. Flore

Lorsque les dépôts alluvionnaires subissent d'assez longues périodes d'exondation, on observe leur colonisation rapide par des végétaux terrestres herbacés et arbustifs. Parmi ceux-ci on trouve des espèces pionnières comme les renouées ou les chénopodes, plantes annuelles qui forment des habitats patrimoniaux et d'intérêt communautaire.

Ces milieux constituent des habitats remarquables et susceptibles d'accueillir des espèces protégées parmi lesquelles on peut citer le Trèfle des graviers (*Trifolium pallescens* espèce protégées en Auvergne-Rhône-Alpes). On y trouvera aussi l'argousier, capable de fixer l'azote par ses racines et le saule faux-daphné, aux racines vigoureuses qui peuvent résister à la puissante dynamique des rivières en tresses. La **petite massette** (*Typha minima*), qui s'installe sur les bancs de sable temporaires, est devenue très rare du fait de la réduction de son habitat alluvial mobile et se trouve sur la liste rouge française. De belles stations existent encore sur les lits en tresses des rivières du bassin de la Durance (réserve naturelle du Bas-Drac par exemple). L'épilobe de Fleischer, qui s'installe lui aussi sur les alluvions grossières des torrents, a même donné son nom à un habitat correspondant aux alluvions torrentielles (*Epilobion fleischeri* (Code Corine 24.221 et 24.222, Cahiers d'Habitat Natura 2000) pouvant être recensé au titre des ZNIEFF de type I (cas du petit Buech ou celui de Haute Durance). Dans les zones

alluviales de la Loire et de l'Allier, l'épervière de la Loire (*Hieracium peleterianum*), endémique, accompagne la corynéphore, une graminée formant de véritables pelouses sur les plages sableuses.



a- b © Tous droits réservés

Figure 66 : a) l'épilobe de Fleischer et b) le corynéphore.

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



Ces habitats particuliers sont également un lieu privilégié de développement d'espèces végétales exotiques envahissantes affectionnant les **milieux fréquemment remaniés, dont les alluvions mobiles des cours d'eau** (buddleia, balsamines notamment celle de l'Himalaya, renouées dont celle du Japon, ambrosie, herbe de la Pampa). Ces espèces à développement rapide et envahissant vont limiter le développement des végétaux autochtones.

### 1.1.12.3. LES SEDIMENTS ET LES PROCESSUS PHYSICO-CHIMIQUES

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

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

#### 1.1.12.3.1. Les processus d'épuration dans les substrats alluviaux immergés

Les cours d'eau sont capables de métaboliser une partie des éléments qui proviennent du bassin versant, dans la mesure où la charge n'outrepasse pas leurs capacités intrinsèques. Ce **processus auto-épuratoire** met en œuvre différents sous-processus qui font intervenir les organismes présents dans le cours d'eau. Végétaux, biofilms, bactéries vont prélever les nutriments présents dans le milieu (azote et phosphore en particulier) et les utiliser dans leur métabolisme. Les capacités d'autoépuration d'un cours d'eau vont donc dépendre de la présence de tels organismes. Une **diversité d'habitats favorables** à l'installation d'organismes différents pourra être bénéfique pour ces processus métaboliques. De plus, la circulation de l'eau est influencée par la **nature et la diversité des substrats rencontrés dans le cours d'eau**. Si l'on détaille la Figure 67, on observe que le passage de l'eau dans des zones à macrophytes ou à embâcles ralentit le flux (1), permet le dépôt et l'accumulation de matière organique nécessaire aux métabolismes bactériens (2 et 3) et favorise l'élimination d'azote sous forme gazeuse par dénitrification. Les substrats grossiers que l'on trouve par exemple sur des **faciès d'écoulement nommés radiers**, provoquent des phénomènes d'infiltration (6, 11, 13, 15) et permettent le piégeage à plus ou moins long terme du phosphore en particulier. Les bancs alluviaux (9 et 10) sont également un lieu d'échange

important et permettent le développement d'une végétation temporaire utilisant les nutriments et limitant ainsi leur accès au cours d'eau.

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

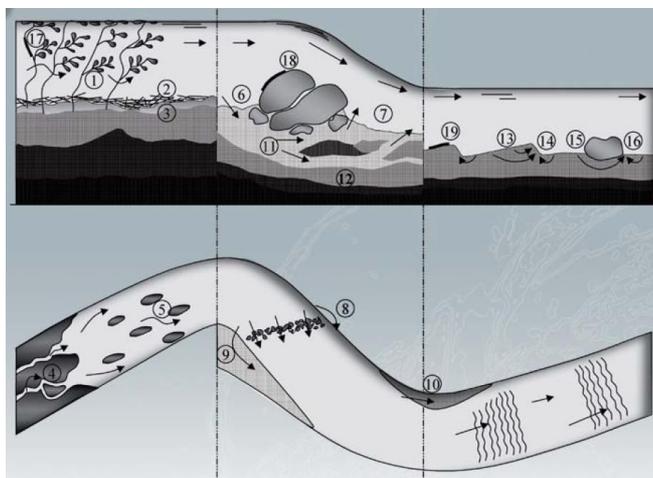


Figure 67 : Représentation schématique des principaux processus d'échange dans un cours d'eau (d'après Birgand et al. 2007).

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

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



Nous comprenons mieux ici toute l'importance de **garantir une diversité de faciès d'écoulement** pour optimiser ces processus physico-chimiques. Ce peut être l'un des objectifs majeurs d'un PGS.

#### 1.1.12.3.2. Le rôle des alluvions du lit mineur dans la thermie de l'eau

Si la connaissance du rôle du substrat alluvial dans les processus d'auto-épuration est encore du domaine de la recherche, il semble aujourd'hui relativement admis qu'il joue un rôle assez net dans la thermie de l'eau. Ainsi Burkholder (2007), (Figure 68) montre l'effet de la présence d'un substrat alluvial sur la température estivale d'un petit cours d'eau. Celle-ci a été mesurée sur deux secteurs du même cours d'eau : l'un disposant d'un substrat alluvial et de faciès (radiers/mouilles) permettant le développement d'écoulements hyporhéiques, l'autre coulant directement sur le substratum rocheux. La différence de température moyenne mais surtout d'amplitude journalière est flagrante.

Un guide technique sur l'utilisation de l'infrarouge thermique aéroporté (IRT-a) comme outil de caractérisation de la température de surface par télédétection est disponible (Marteau et al., 2023).

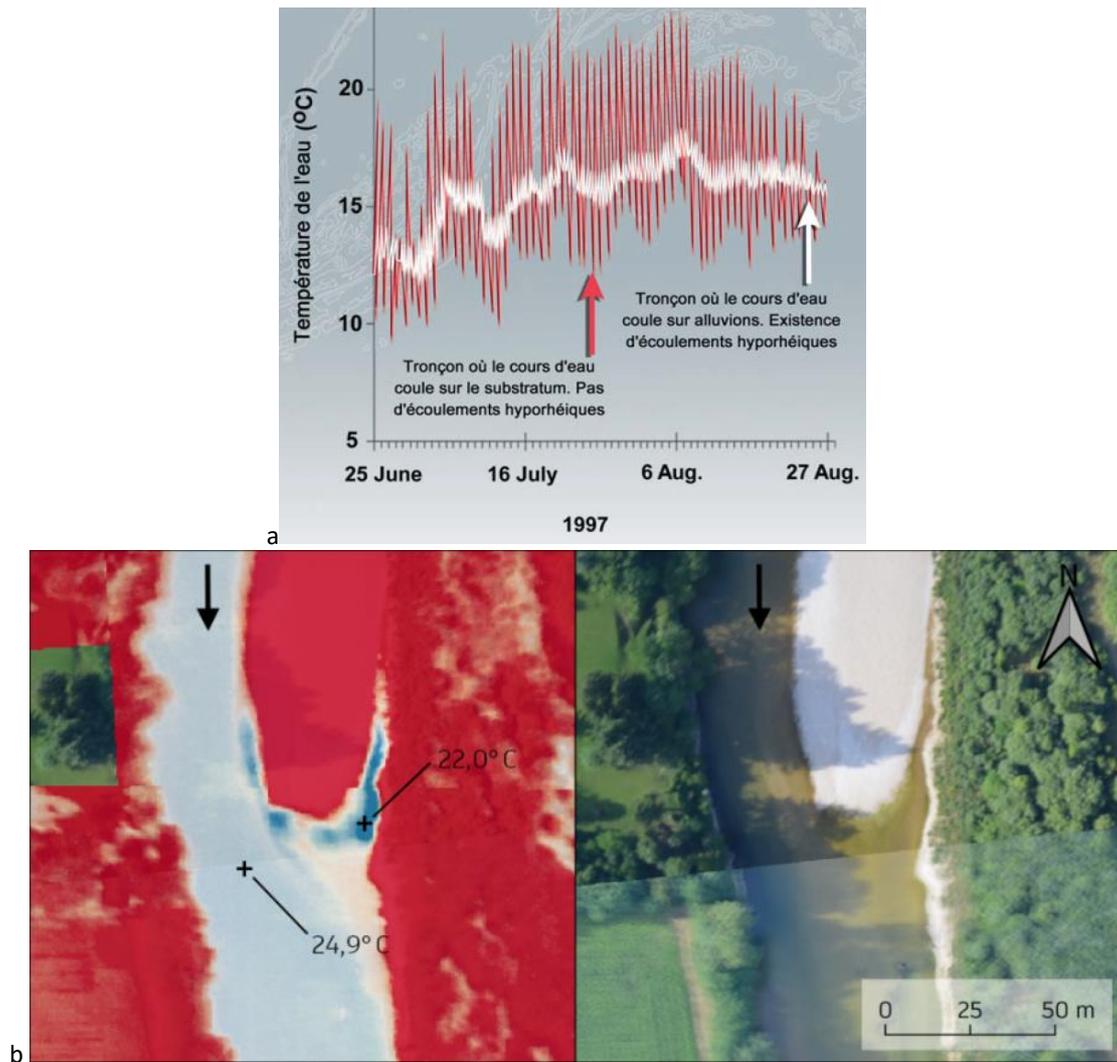


Figure 68 : a) Exemple montrant le rôle de la présence d'un substrat alluvial dans la thermie de l'eau (Burkholder, 2007) et b) exfiltrations hyporhéiques en aval d'un banc alluvial sur la rivière d'Ain (Wawrzyniak, 2014, in Marteau et al., 2023)

### 1.1.12.3.3. Le biofilm

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

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

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

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

1.1.12.4. QUELLE ÉPAISSEUR ALLUVIALE POUR QUELS OBJECTIFS ?

Dans le cadre de la mise en œuvre d’actions d’un PGS qui viseront à **restaurer un flux sédimentaire grossier** (réinjections sédimentaires par exemple) voire **recréer directement une couche alluviale** quand celle-ci a disparu ou que le lit est fortement pavé (on parle alors de recharge alluviale), il est important d’avoir quelques **ordres de grandeurs des épaisseurs alluviales nécessaires** (en considérant un **substrat non colmaté**) en fonction de différentes fonctionnalités que l’on souhaite restaurer.

Nous proposons 4 approches pour évaluer ces « **valeurs guides** » d’épaisseur alluviale nécessaire :

- pour un bon fonctionnement de l’**habitat alluvial de la macrofaune aquatique** (en distinguant la macrofaune benthique et hyporhéique) ;
- pour la **reproduction des poissons lithophiles** (ceux qui se reproduisent dans le substrat alluvial) ;
- pour le bon **fonctionnement hydraulique** (down et upwelling), **thermique** (création de refuges thermiques et régulation thermique de la masse d’eau) et **physico-chimique** (autoépuration et cycles biogéochimiques) de la zone hyporhéique, en fonction de différentes échelles spatiales ;
- pour garantir la pérennité d’une couche alluviale en considérant les **processus de transport solide**.

1.1.12.4.1. Quelle est l’épaisseur nécessaire vis-à-vis de l’habitat de la macrofaune aquatique ?

De nombreux invertébrés présents dans les cours d’eau sont très fortement inféodés à un substrat alluvial, notamment grossier. Certains peuvent vivre principalement en surface du lit (sur et dans les interstices de la couche d’armure) et ne s’enfoncer dans la sous-couche que pour y trouver refuge en cas de crue ou d’assèchement du lit (les espèces benthiques ou stygoxènes). D’autres vivent principalement ou effectuent une partie de leur cycle vital (stade larvaire par exemple) dans la sous-couche (les espèces hyporhéiques ou stygophiles). D’autres enfin, les stygobites, sont strictement inféodés aux profondeurs de la sous-couche alluviale.

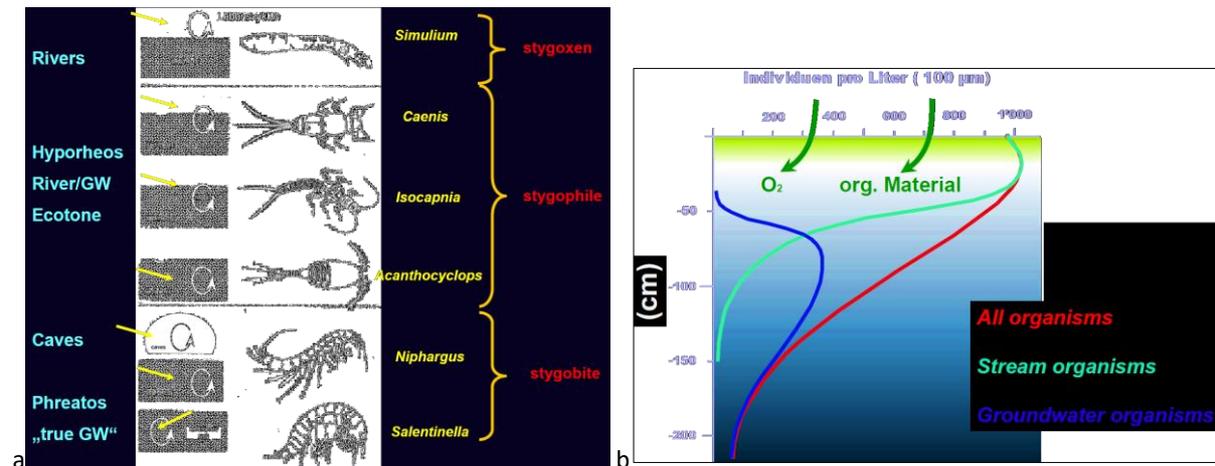


Figure 69 : a) répartition de la macrofaune sur ou dans l’épaisseur du substrat alluvial, b) épaisseurs nécessaires à la faune benthique (0 à 50-60 cm pour garantir des refuges) et hyporhéique (70 cm à 1.5 m) (C. Robinson, présentation)

Si l’on espère la présence de l’ensemble de ces communautés, ou a minima des deux premières (hors stygobites), l’épaisseur d’alluvions devrait donc atteindre **au moins 0.5 m et si possible 1 m, voire 1.5 m**.

1.1.12.4.2. Quelle est l’épaisseur nécessaire pour la reproduction des poissons lithophiles ?

De nombreuses espèces de poissons lithophiles ont besoin d’une certaine épaisseur de substrat alluvial pour **enfouir leurs œufs**, mais une épaisseur plus importante est souvent indispensable pour permettre le **développement des larves** jusqu’à ce que celles-ci soient en capacité de nager en pleine eau.

Pour la truite fario (*Salmo trutta*), de nombreuses études compilées par DeVries (1997) donnent en général (forte variabilité) une profondeur d’enfouissement (par rapport à la cote initiale du plancher alluvial) comprise entre 6 et 25 cm (figure ci-dessous).

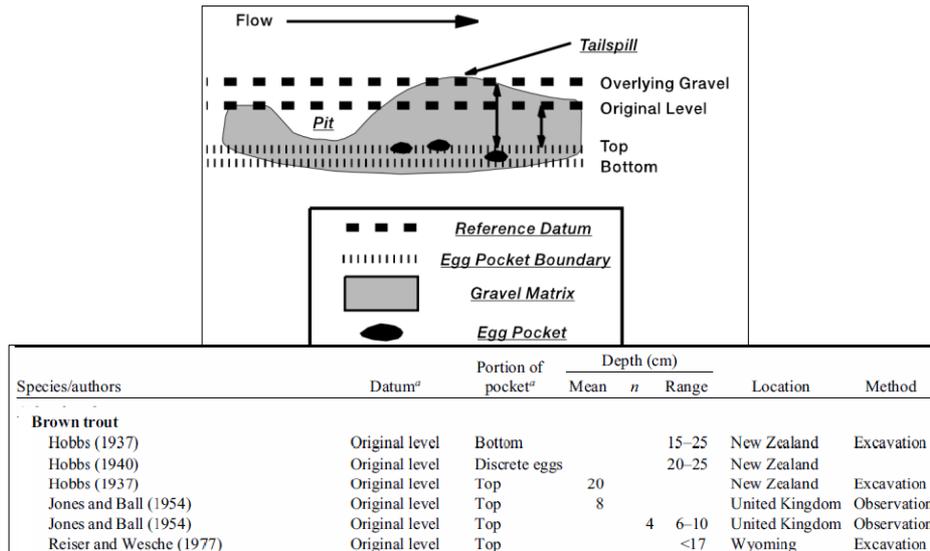


Figure 70 : a) coupe longitudinale d'une frayère à salmonidé et b) revue bibliographique de l'enfouissement des œufs de truite fario (DeVries, 1997)

Il existe peu d'information sur d'autres espèces lithophiles non salmonidés. Pour le hotu (*Chondostoma nasus*), si l'on reprend la publication de Duerregger et al. (2018) on constate que si les œufs se trouvent généralement dans la sous-couche entre 5 et 15-20 cm, les larves se répartissent en migrant verticalement jusqu'à 30 cm. On retrouve sensiblement le même schéma pour le vairon (*Phoxinus phoxinus*) (Bless, 1992).

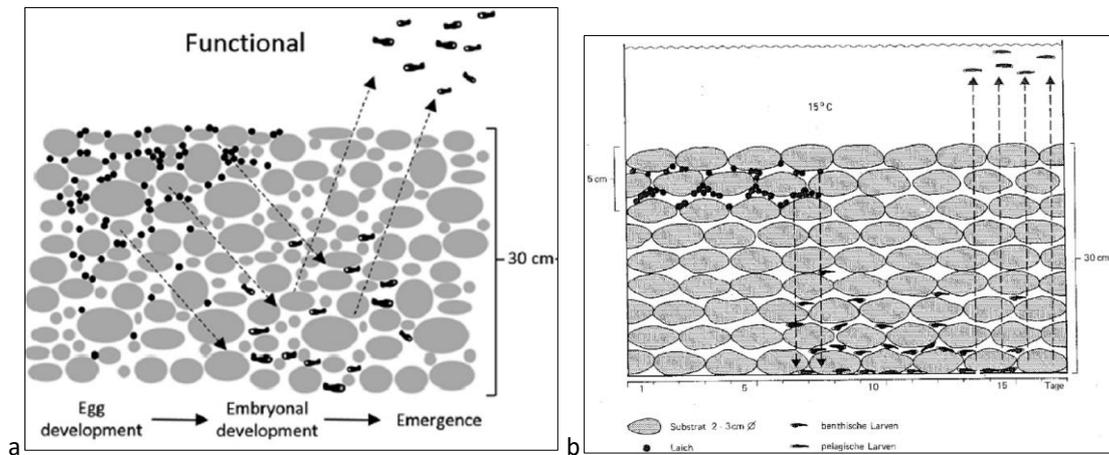


Figure 71 : répartition des œufs chez le hotu (Duerregger et al, 2018) et le vairon (Bless, 1992).

Sur la base de ces quelques données, nous pouvons proposer une **épaisseur alluviale** pour la reproduction et le développement larvaire des poissons lithophiles de l'ordre d'**au moins 15 cm et si possible 30 cm**.

**NB** : outre l'épaisseur, il faut aussi une **granulométrie favorable**, différente selon les espèces (voire la taille des géniteurs pour une même espèce) et des **superficies suffisantes**.

#### 1.1.12.4.3. Quelle est l'épaisseur nécessaire pour permettre un bon fonctionnement hydraulique, thermique et physico-chimique de la zone hyporhéique

La zone hyporhéique est définie comme l'ensemble des **sédiments saturés en eau**, situés au-dessous et à côté d'une rivière, contenant une certaine proportion d'eau de surface (Figure 72, Datry et al., 2008). Il n'existe évidemment pas de zone hyporhéique quand la rivière coule sur un substratum imperméable. La zone hyporhéique peut être constituée exclusivement d'eau de surface, lorsqu'elle résulte de phénomènes d'advection d'eau de la rivière à l'intérieur des sédiments (phénomènes de down et up-welling) ou lorsque la rivière est « perchée » au-dessus de la nappe alluviale. Enfin, lorsque la rivière développe des échanges

hydrauliques verticaux importants avec la nappe sous-jacente, ou si elle est en équilibre dynamique avec celle-ci, la zone hyporhéique est caractérisée par un mélange d'eau de surface et d'eau souterraine.

D'autre part, les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines (échanges hyporhéiques) se produisent à diverses échelles spatiales, de la plus large, pouvant aller de plusieurs kilomètres ou dizaines de kilomètres (entre l'amont et l'aval d'une vallée alluviale), jusqu'à quelques décimètres autour d'un obstacle à l'écoulement dans le lit mouillé. En référence aux approches de sectorisation morphoécologiques proposées plus haut, on peut désigner les échelles de ces échanges par : **échelle tronçon, segment, faciès, micro-habitat**.

Il est important de noter que cette zone hyporhéique, outre l'habitat majeur qu'elle fournit pour de nombreuses espèces de poissons et d'invertébrés (voir ci-dessus), peut jouer un rôle important dans la **régulation thermique de l'eau de surface et fournit des refuges thermiques pour certaines espèces** (Marteau et al., 2022). L'effet de ces échanges sur la température moyenne de la masse d'eau est possible mais nécessite que ceux-ci se fassent sur de longs linéaires et bien souvent en basse eau car la régulation dépend du différentiel de température des deux masses d'eau et de leurs débits respectifs, l'apport hyporhéique devant être significatif pour influencer celui de la rivière. Ces effets sont observés par exemple sur la basse vallée de l'Ain (35 km) en basse eau, l'atténuation est de l'ordre de 0.5°. Sans que ces apports influencent significativement la température moyenne du chenal, ils sont aussi à l'origine de poches d'eau plus froide dans le chenal en été qui peuvent être des **refuges thermiques** importants pour permettre à certaines espèces de résister à ces périodes de stress. Il faut en outre que les sédiments soient fréquemment mis en mouvement (voir l'effet hydraulique ci-après) afin que les processus de colmatage interstitiel ne perturbent pas ces échanges.

Notons enfin que la zone hyporhéique participe fortement à l'autoépuration de l'eau (dénitritation notamment). Dans certaines conditions, on observe aussi un abattement de certaines pollutions externes.

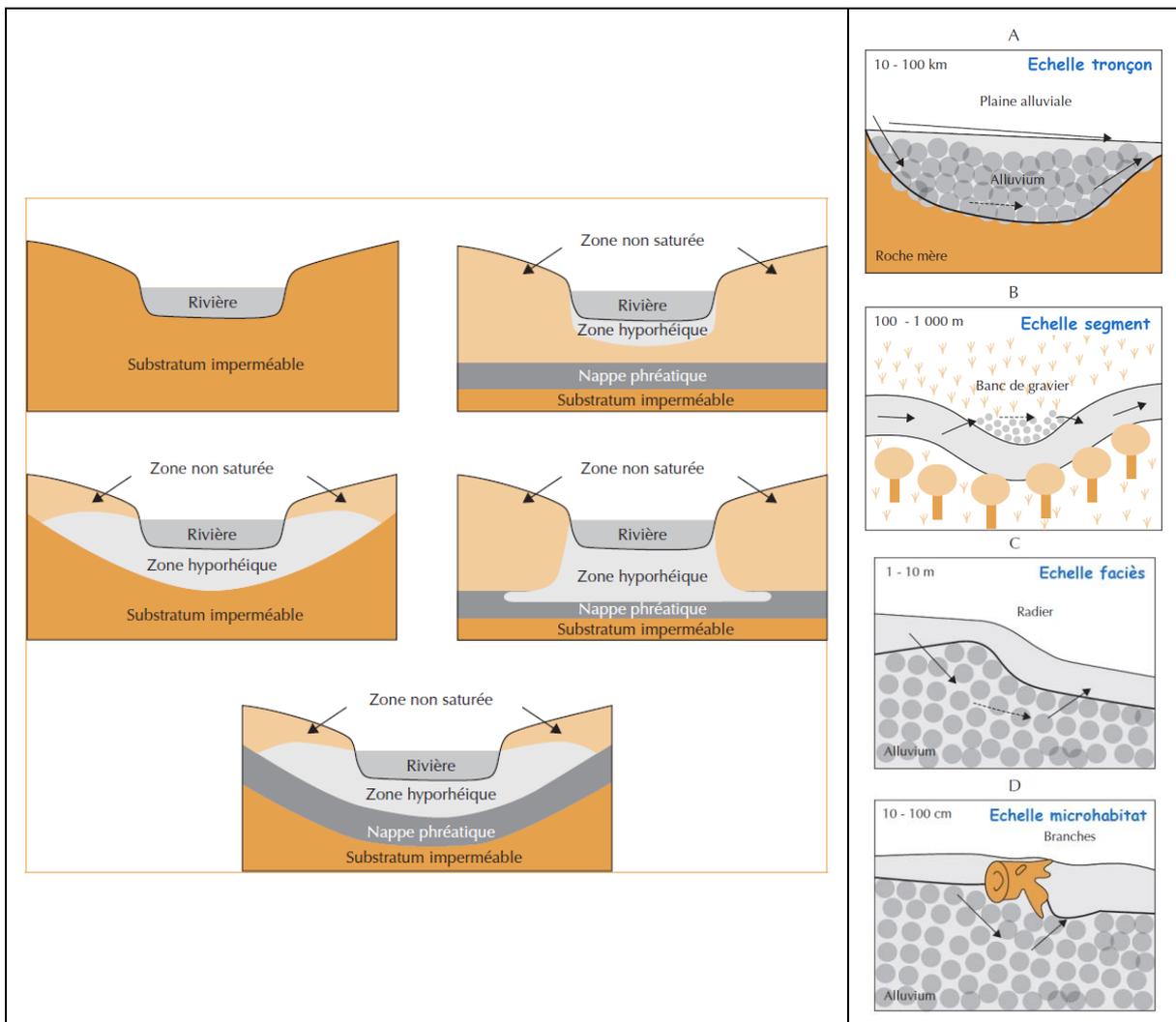


Figure 72 : a) les différents types de zone hyporhéique, b) les différentes échelles spatiales d'échanges hyporhéiques (Datry et al., 2008)

Si l'objectif de la plupart des PGS ne sera jamais la reconstitution d'une plaine alluviale et de son fonctionnement hyporhéique à l'échelle « tronçon », on pourra chercher à reconstituer à minima les deux échelles les plus locales (faciès et micro-habitat), voire même l'échelle « segment » (succession de faciès) par la reconstitution d'un matelas alluvial.

La littérature ne donne pas vraiment de valeurs d'épaisseur nécessaire pour assurer les échanges à ces 3 échelles et les fonctionnalités associées. Datry (comm.pers.) propose des **valeurs comprises entre 1 et 2 m** pour les échelles segment et faciès, qui sont celles que nous retiendrons ici.

#### **1.1.12.4.4. Quelle est l'épaisseur nécessaire pour garantir la pérennité d'une couche alluviale en considérant les processus de transport solide**

Les processus de transport solide en rivière se traduisent notamment par l'érosion régulière (en crue principalement) du fond alluvial du lit mineur. Pour garantir la pérennité des différentes fonctionnalités présentées plus haut, il faut au minimum que l'épaisseur des alluvions qui pourraient être réinjectées ou déposées sous forme de recharge dépasse, au moins initialement, celle des alluvions mobilisées par ces processus. Outre cette épaisseur minimale, il faudra également que les apports sédimentaires provenant de l'amont (naturels ou réinjectés) viennent régulièrement compenser les épaisseurs mobilisées par les processus d'érosion.

En première approche, Recking et al. (2023) et Recking (comm.pers.) proposent de travailler sur deux dimensions de l'épaisseur alluviale potentiellement mobilisable par les processus d'érosion/transport/dépôt sédimentaires, en utilisant la terminologie de Church et Haschenburger (2017) :

- la **couche active dynamique** (*dynamical active layer*) d'épaisseur **Dd**, qui est la couche relativement « fine » d'échange continu de particules entre le fond du lit et le charriage en transit ;
- la **couche active événementielle** (ou couche de perturbation) (*event active layer*) d'épaisseur **De**, qui est la couche de sédiments pouvant être mobilisée et redéposée lors d'un événement de transport solide (ou d'événements multiples), ou lors de la progradation de macroformes sédimentaires telles que les bancs ou dunes.

Pour ce qui est de la couche dynamique **Dd**, Recking et al. (2023), sur la base d'un modèle semi-empirique validé avec des observations de terrain, évaluent son épaisseur à : **1.4SW** où S est la pente moyenne (en m/m) et W la largeur du lit actif (en m), c'est-à-dire le chenal principal en eau (qui est à distinguer de la bande active dans le cas d'un lit en tresse).

L'évaluation de la couche événementielle **De** est plus compliquée car chaque situation est a priori unique et la couche De dépend de l'état d'équilibre du tronçon et de la saisonnalité. Si l'on réinjecte des sédiments sur un tronçon en fort déficit, il y a des chances qu'ils soient très rapidement évacués, quelle que soit l'épaisseur du matelas de réinjection. Sur des tronçons naturels à forte saisonnalité dans les apports, comme sur la Séveraisse, on mesure régulièrement des variations locales de topographie de l'ordre du mètre sur une saison hydrologique. En première approximation, Recking (comm.pers.) propose une **épaisseur minimale de 3 fois Dd** (soit **4 SW**) et si possible de l'ordre de **5 fois Dd** (soit **7 SW**).

## 1.1.12.4.5.Synthèse

Les différents éléments présentés sont repris dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7 : synthèse des données disponibles pour les 4 approches

|   |              | épaisseur fonctionnelle (cad non comatée) |           |   |  |
|---|--------------|---|-----------|---|--|
|   |              | minimale                                  | favorable | références                                  | commentaire  |
| Habitat macrofaune                                      | benthique    | 0 cm                                      | 50 cm     | C. Robinson (?), autres ref ?               | rôle d'habitat mais surtout de refuge pour la faune benthique, d'habitat principal pour la faune hyporhéique   |
|   | hyporhéique  | 70 cm                                     | 150 cm    |   |  |
| Reproduction poissons lithophiles                       | truite fario | 5 cm                                      | 25 cm     | compilation dans DeVries (1997)             | profondeurs d'enfouissement des œufs   |
|   | hotu         | 5 cm                                      | 30 cm     | Duerregger et al (2018)                     | enfouissement des œufs et migration des embryons   |
|   | vairon       | 5 cm                                      | 30 cm     | Bless (1992)                                |  |
| Fonctionnalités zone hyporhéique échelle segment/faciès |              | 1 m                                       | 2 m       | Datry (comm. pers.), Piégay (comm.pers.)    | dépendant fortement du contexte hydrogéologique, des liens avec la nappe et des échelles spatiales visées  |
| Epaisseur active  |              | 4 SW                                      | 7 SW      | Recking et al. (2023) et Recking comm.pers. | sur la base sur la base d'un modèle semi-empirique validé avec des observations de terrain, Recking et al. (2023).<br>S = pente en m/m et W=largeur en m |

Sur la base de cette synthèse d'une bibliographie au demeurant très réduite, notre proposition opérationnelle consiste à utiliser la valeur minimale de la colonne « favorable », soit **30 cm, comme objectif d'épaisseur minimale** à viser dans le cadre d'un projet de gestion (il s'agira alors de la préserver) ou de restauration (il s'agira lors de l'atteindre). La valeur maximale (2 m) de la même colonne pourrait être considérée comme favorable. Il paraît cependant intéressant de **viser systématiquement, dès lors que les contraintes techniques et financières le permettront, une épaisseur de l'ordre de 1 m** qui garantirait, au moins théoriquement, l'ensemble des fonctionnalités.

Au-delà des épaisseurs minimales ou favorables pour garantir ces fonctionnalités, il serait nécessaire d'aborder aussi la question des **superficies sur lesquelles appliquer ces valeurs**. On sait que quelques pourcents du lit mouillé (autour de 5-6%) suffisent pour ce qui concerne les SGF de la truite fario et on sait aussi que pour les processus hyporhéiques « en grand » (échelles tronçon et segment), on doit a priori considérer l'ensemble du lit mineur, sur l'ensemble du linéaire. D'un point de vue pragmatique, il est clair que c'est le niveau d'ambition du projet et ses contraintes techniques et financières qui permettront de fixer cet élément de dimensionnement.

## 2. POURQUOI METTRE EN ŒUVRE UN PLAN DE GESTION SÉDIMENTAIRE ?

De très nombreux cours d'eau ont subi ou subissent encore des **pressions anthropiques** à l'origine de graves dysfonctionnements hydromorphologiques qui induisent des altérations importantes de leur fonctionnement et de leur état écologique. **L'enjeu de restauration de cet état écologique et des compartiments qui le soutiennent est donc primordial** pour espérer atteindre le bon état général des cours d'eau demandé par la DCE. Ce sera **l'objectif majeur d'un Plan de Gestion Sédimentaire** (souvent nommé **PGS** dans la suite du document) élaboré au titre du SDAGE.

De **nombreux autres enjeux** sont souvent présents dans ou le long des cours d'eau et sont potentiellement concernés par les processus hydrosédimentaires qui sont à l'origine de **contraintes** et qui induisent des **risques**. Il convient donc d'analyser l'ensemble de ces enjeux et de proposer des solutions permettant d'atteindre le bon état des eaux tout en réduisant autant que possible les contraintes et les risques sur les autres enjeux.

L'élaboration et la mise en œuvre d'un PGS à l'échelle d'un cours d'eau et de son bassin versant est donc utile si :

- des dysfonctionnements hydromorphologiques et écologiques liés aux processus hydrosédimentaires sont pressentis et font courir un risque de non atteinte du bon état des eaux ;
- d'autres enjeux que « l'état des eaux » nécessitent une gestion sédimentaire.



Le terme Plan de Gestion Sédimentaire recouvre aussi les **actions de restauration** des processus et des formes hydrosédimentaires, préalable souvent indispensable avant de passer à de la gestion proprement dite.

### LES PRINCIPAUX ENJEUX ET PRESSIONS EN LIEN AVEC LES SEDIMENTS

#### 2.1.1. PRINCIPAUX ENJEUX SOCIO-ECONOMIQUES POUVANT NECESSITER UNE GESTION SÉDIMENTAIRE

On peut lister au moins **4 grands types d'enjeu** potentiellement concernés par les processus hydrosédimentaires :

- la **protection des biens (foncier (bâti et non bâti) et infrastructures) et des personnes (sûreté/sécurité)** en lien avec :
  - les dépôts sédimentaires qui réduisent les sections d'écoulement (notamment au droit des ouvrages de franchissement) et peuvent aggraver les inondations en zones urbanisées par exemple, ou menacent l'alimentation en eau des centrales nucléaires ;
  - les incisions du lit qui mettent en péril les infrastructures longitudinales (digues, protections de berges, routes, réseaux divers) ou transversales (ponts) ;
  - des érosions latérales qui peuvent menacer certains enjeux forts : infrastructures de transport (routes, voies ferrées, canaux, réseaux divers), zones urbanisées, zones de loisirs, équipements divers. Ces érosions latérales peuvent aussi engendrer directement des pertes foncières et en conséquence une perte de l'outil de production (zones agricoles notamment).
- la **navigation fluviale ou en canal** : qui peut être perturbée par les dépôts sédimentaires réduisant la profondeur du chenal navigable ou des ports et haltes fluviales ;

- les **retenues d'eau** à usage hydroélectrique, AEP, irrigation, loisirs : dont le volume utile peut être fortement réduit par la sédimentation et dont l'exploitation peut être rendue difficile par ces mêmes processus (comblement des prises d'eau notamment). On peut associer à cet enjeu l'entretien des passes à poissons réalisées sur les barrages à l'origine de ces retenues et qui peuvent parfois subir des colmatages sédimentaires importants (fin et grossiers) ;
- les **captages en nappe** : qui perdent en productivité du fait de l'incision du lit généralement accompagné d'un affaissement du niveau de la nappe d'accompagnement. Certains puits peuvent même ne plus être alimentés (exemple des captages de la ville de Vichy au bord de l'Allier).  
NB : les **captages gravitaires en rivière** peuvent aussi être affectés par les processus d'incision.

Un 5<sup>ème</sup> enjeu lié aux processus sédimentaires peut être mentionné :

- la **dynamique des deltas, estuaires et trait de côte** : le maintien du trait de côte mais aussi le bon fonctionnement des deltas et des estuaires est très dépendant des apports sédimentaires provenant du bassin amont. Garantir la continuité d'une quantité suffisante de ces apports au travers de l'ensemble de l'hydrosystème est un objectif majeur.

D'autres enjeux ou usages potentiellement concernés par les processus hydrosédimentaires pourraient encore être identifiés tels que les loisirs récréatifs sur les bancs de sable ou de galets en bord de cours d'eau, les prises d'eau agricoles gravitaires, les activités halieutiques, etc.

### 2.1.2. PRESSIONS ANTHROPIQUES ENGENDRANT DES DYSFONCTIONNEMENTS HYDROSEDIMENTAIRES

Plusieurs décennies d'études sur le sujet nous permettent de dresser une liste quasi-exhaustive des **pressions<sup>3</sup> anthropiques** engendrant des dysfonctionnements hydrosédimentaires plus ou moins graves. Ces pressions ont joué et jouent encore souvent à la fois sur les **apports sédimentaires externes et internes**, sur les **flux**, et enfin sur les **stocks** disponibles en lit mineur et majeur.

Elles sont présentées ci-dessous par grand type d'impact.

- impacts potentiels sur les **déficits en sédiments grossiers** :
  - **extractions en lit mineur** : arrêtées à peu près partout en France depuis 1994 (arrêté ministériel) mais forte rémanence sur de nombreux cours d'eau, avec d'anciennes grandes fosses d'extractions encore présentes sur certains et continuant à piéger la charge alluviale provenant de l'amont. Sur certains cours d'eau, les volumes de sédiments grossiers extraits sur une quarantaine d'années (de l'immédiat après-guerre jusqu'au milieu des années 90) correspondent à **plusieurs siècles d'apports sédimentaires** ;
  - **barrages** : leurs impacts sont très variables et dépendent beaucoup du volume de l'ouvrage, de sa gestion (aucune gestion sédimentaire, chasses ou transparences, curage/réinjection), de la nature et de l'intensité du transport solide en amont et en aval, de la modification concomitante des débits morphogènes en aval (s'il y a moins de sédiments à transporter mais parallèlement moins de débits morphogènes, les impacts sont moins flagrants et moins rapides) ;
  - **travaux de correction torrentielle** : stabilisation/végétalisation des versants (NB : joue aussi sur les sédiments fins), ouvrages de stabilisation des torrents (seuils), plages de dépôt. Notons qu'une fois totalement atterris, les seuils de stabilisation n'arrêtent plus le transport solide mais le régulent (dépôt/reprise au fil des crues) ce qui n'est pas le cas des plages de dépôts qui sont régulièrement curées et les matériaux généralement exportés hors du système fluvial ;



Une grande partie de la végétalisation des bassins versants de montagne depuis le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle est due à d'autres causes que les travaux des services RTM : réchauffement climatique depuis la fin du PAG (Petit Age Glaciaire) qui a fait remonter en altitude la limite de végétation, très forte déprise agro-pastorale et d'une manière générale très forte diminution de la pression démographique, d'où une moindre utilisation du bois (revoir 1.1.7).

<sup>3</sup> Dans le cadre de ce guide, nous appellerons pression toute intervention d'origine anthropique se traduisant par une modification des formes et des processus hydrosédimentaires naturels.

- **curages** : leurs impacts seront d'autant plus marqués qu'ils seront étendus, intenses, récurrents. **NB** : depuis l'arrêté de 2008 (voir annexe 2), les matériaux curés doivent préférentiellement être réinjectés dans le cours d'eau, ce qui réduit notablement l'impact de ce type de pression ;
  - **seuils** : leurs impacts ne sont pas systématiques et dépendent beaucoup de la nature et de l'intensité du transport solide en amont et en aval de l'ouvrage, de son ancienneté, de son influence sur la ligne d'eau de crue morphogène, de la taille du réservoir, de la densité d'ouvrages sur le linéaire ;
  - **ouvrages de navigation : épis, dhuits, chevrettes** : ouvrages implantés historiquement sur les cours d'eau navigables (Loire, Rhône) pour favoriser la concentration de l'écoulement le long d'un thalweg et permettre son autocurage et la garantie d'une profondeur suffisante pour la navigation ;
  - **protections de berges de toute nature, y compris en génie végétal** : la gravité de leurs impacts sera fonction de la longueur touchée (en particulier si les deux berges le sont), de la mobilité naturelle en plan du cours d'eau (plus elle est potentiellement intense plus l'impact est fort), de la nature des alluvions des terrasses constituant les berges (plus elles sont constituées de matériaux graveleux plus l'impact est fort) ;
  - tous travaux de **chenalisation** : rectification du tracé, endiguement étroit, recalibrage, bétonnage du fond et des berges, etc ;
  - **extractions en lit majeur** : elles n'ont a priori pas d'impact direct mais peuvent en avoir si elles capturent le cours d'eau qui les borde ou limitent le lit actif dans un corridor étroit. D'autre part, elles ont un impact indirect assez fort sur l'un des moyens de restauration d'un certain transport sédimentaire en empêchant (ou limitant) la possibilité de donner un espace de mobilité au cours d'eau.
- impacts potentiels sur les **excès de sédiments fins** (sables compris) :
    - certaines **pratiques agricoles** (types de labours, saisonnalité des semis, etc.) ;
    - **déforestation, création de routes et de chemins forestiers** (beaucoup d'apports massifs sableux constatés de ce fait sur plusieurs cours d'eau du Massif central) ;
    - **mines et terrassements divers** ;
    - **drainage agricole** ;
    - **urbanisation** (pendant la période de construction puis à cause de l'augmentation du ruissellement) ;
    - **gestion des barrages** (chasses et vidanges mal contrôlées, raréfaction des débits morphogènes de « nettoyage »).
  - impacts potentiels sur les **excédents (ou les dépôts excessifs) de sédiments grossiers** :
    - **réduction en intensité/durée/fréquence des débits morphogènes** du fait de la présence de grands barrages écrêteurs. Cet effet peut empêcher la reprise de matériaux apportés par des affluents (torrents notamment) et favoriser des exhaussements et une aggravation des inondations au droit des confluences ;
    - **remous solides** en amont des retenues de seuils et de barrages ;
    - **urbanisation et dérégulation de l'hydrologie favorisant une augmentation de l'intensité et de la fréquence des crues**
  - impacts potentiels sur la **végétalisation excessive de la bande active** du lit mineur :
    - **réduction en intensité/durée/fréquence des débits morphogènes** du fait de la présence de grands barrages écrêteurs. Cet effet peut favoriser une végétalisation excessive des bandes actives ;
    - **modification de la saisonnalité des débits** qui peut aussi favoriser une végétalisation excessive des bandes actives.



L'absence de crues morphogènes durant plusieurs années voire décennies peut être à l'origine d'une végétalisation importante **naturelle** de la bande active (revoir 1.1.2).

## LES PRINCIPAUX DYSFONCTIONNEMENTS HYDROMORPHOLOGIQUES ET ECOLOGIQUES EN LIEN AVEC LES SEDIMENTS

### 2.1.3. DYSFONCTIONNEMENTS HYDROMORPHOLOGIQUES

Les **dysfonctionnements hydromorphologiques** résultant de ces pressions sont eux aussi aujourd'hui bien identifiés :

- liés au **déficit en sédiments grossiers** : **incision** du lit, **pavage**, **déficit de certaines fractions granulométriques**, **affleurement important du substratum**, affaissement de la nappe alluviale d'accompagnement, végétalisation excessive de la bande active du fait de l'incision du lit (NB : le pavage ou les affleurements du substratum peuvent être tout à fait naturels dans certaines conditions. Le diagnostic devra permettre de préciser la situation.) ;
- liés aux **excès de sédiments grossiers** : **exhaussement** du lit, inondation ;
- liés aux **excès de sédiments fins** : **colmatage**, **ensablement**.

### 2.1.4. DYSFONCTIONNEMENTS MORPHOECOLOGIQUES

Les **dysfonctionnements morphoécologiques** (voir définition au 3.1.5.3.2) qui découlent des précédents sont eux aussi connus :

- **modification/perte d'habitats aquatiques du (des) lit(s) mouillé(s)** : disparition des frayères pour les espèces de poissons lithophiles, simplification des faciès d'écoulement, colmatage/ensablement des habitats alluviaux grossiers ;
- **modification/perte d'habitats de la bande active et semi-active** : réduction de la quantité et de la fonctionnalité des bancs alluviaux mobiles, des chenaux secondaires ;
- **assèchements d'annexes hydrauliques et de zones humides du lit majeur**.

### 2.1.5. DYSFONCTIONNEMENTS ECOLOGIQUES

Les **dysfonctionnements écologiques** associés sont les suivants. Ils sont principalement dus à une **altération profonde des habitats alluviaux** :

- **dégradation de l'état des biocénoses aquatiques du (des) lit(s) mouillé(s)** : (composition, abondance, biomasse, structure des peuplements faunistiques et floristiques) ;
- **dégradation de l'état des biocénoses de la bande active et semi-active** (composition, abondance, biomasse, structure des peuplements faunistiques et floristiques) ;
- **dégradation de l'état des biocénoses du lit majeur** associées au cours d'eau (celles des annexes hydrauliques et des zones humides notamment), ainsi que de la ripisylve et de la forêt alluviale).

On peut y ajouter le **dysfonctionnement de certains processus physico-chimiques** :

- moindre régulation thermique et baisse des capacités auto-épuratoires du lit mineur alluvial (revoir 1.1.12.3).

### 2.1.6. AUTRES DYSFONCTIONNEMENTS POSSIBLES

D'autres dysfonctionnements en lien avec l'altération de la morphologie des cours d'eau et des processus sédimentaires sont enfin identifiables, en (revoir lien avec les enjeux listés précédemment) :

- problèmes d'alimentation en eau potable ou pour l'irrigation depuis des captages dans la nappe alluviale du fait de son affaissement corrélatif à l'incision du lit mineur ;
- problèmes d'alimentation des captages gravitaires du fait de l'incision du lit ;
- déchaussement d'ouvrages d'art du fait de l'incision du lit ;
- aggravation des inondations du fait de processus de sur-sédimentation.

## LOGIGRAMME SEQUENTIEL D'ELABORATION ET DE MISE EN ŒUVRE D'UN PGS

L'élaboration puis la mise en œuvre d'un Plan de Gestion Sédimentaire nécessite **plusieurs étapes techniques séquentielles** et, au terme de certaines d'entre elles, des **phases de validation indispensables** avant de passer aux étapes suivantes.

En effet, un diagnostic (étape 1) non partagé par les parties prenantes, ou au moins le plus grand nombre d'entre elles, pourrait aboutir à un blocage complet lors des étapes ultérieures de définition des objectifs. La concertation autour des objectifs visés par le PGS puis leur validation (étape 2) est elle-même indispensable pour proposer des actions (étape 3), qui elles-mêmes doivent être validées puis chiffrées avant de passer à une phase opérationnelle.

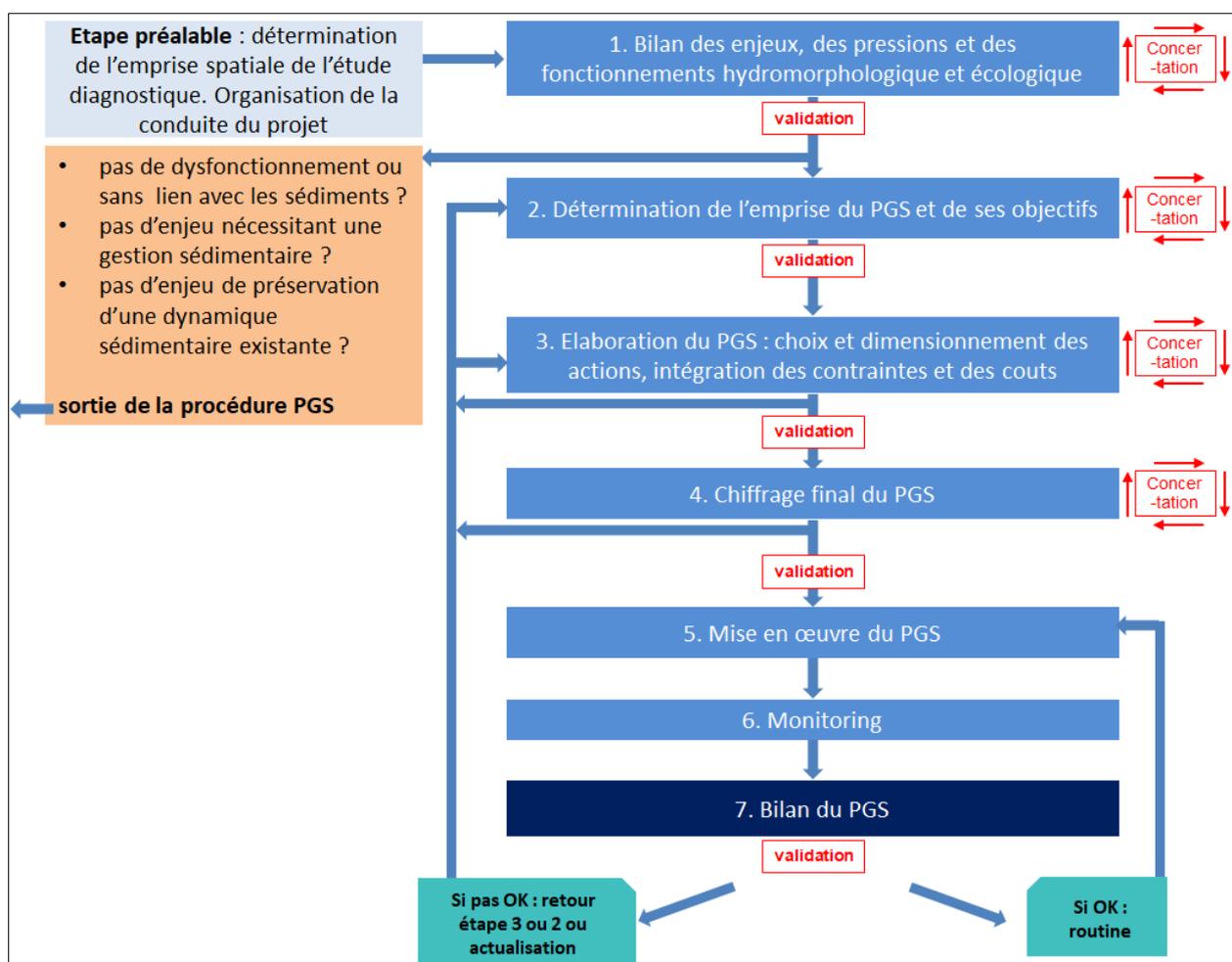


Figure 73 : logigramme séquentiel d'élaboration et de mise en œuvre d'un Plan de Gestion Sédimentaire

### 2.1.7. ETAPES TECHNIQUES

Nous décrivons ci-après les principales **étapes techniques** de ce logigramme, qui seront détaillées dans le chapitre 3.

- **Etape préalable : définir le périmètre géographique et organiser la conduite du projet.**

Avant d'entrer véritablement dans la déclinaison du logigramme séquentiel, il est nécessaire de définir le **périmètre géographique** sur lequel porteront les bilans à réaliser en étape 1.

**NB** : Cette étape préalable nécessite aussi, de la part des maîtres d'ouvrage du futur PGS, une identification des parties prenantes et une organisation de la **conduite du projet** (voir 2.1.8).

- **Etape 1 : Bilan des enjeux, des pressions et des fonctionnements hydromorphologique et écologique.**

Cette étape consistera à réaliser :

- un recensement et une analyse de risque des enjeux autres que l'état des eaux, nécessitant une gestion sédimentaire ;
- un recensement et une analyse de l'intensité des pressions présentes, passées, voire futures, ayant un effet probable sur la dynamique sédimentaire du cours d'eau ;
- un diagnostic de fonctionnement hydromorphologique et écologique des cours d'eau du périmètre d'étude, reposant notamment sur une analyse des trajectoires passées, du fonctionnement actuel et de l'évolution tendancielle future de divers paramètres. Ce diagnostic mettra finalement en évidence les enjeux de Bon Etat écologique qui devront être visés par le PGS (en particulier au travers d'une restauration de l'équilibre sédimentaire quand celui-ci aura été plus ou moins profondément perturbé).



Si les données disponibles sont insuffisantes pour tout ou partie des compartiments à étudier, il est possible que l'élaboration du diagnostic nécessite des études de terrain assez longues, voire même des relevés de certains paramètres sur plusieurs années.

Un diagnostic partagé étant une condition indispensable à la poursuite de l'élaboration d'un PGS efficient, **l'élaboration du PGS devrait alors être mise en pause jusqu'à la finalisation du diagnostic**. Cependant, si certaines parties du diagnostic sont finalisées (par exemple l'incision du lit est évidente et il faut agir rapidement pour la bloquer), une première validation peut être effectuée par les parties prenantes afin de poursuivre la procédure et répondre à ces 1ers éléments de diagnostics dans l'attente des résultats d'études complémentaire.

- une phase majeure de concertation/validation sur la base d'un bilan global croisant ces données et déterminant l'intérêt ou non d'élaborer et de mettre en œuvre un plan de gestion sédimentaire. Il est possible en effet au terme de cette phase, de décider que l'élaboration d'un PGS n'est pas l'outil approprié pour résoudre les dysfonctionnements constatés, ou répondre à certains enjeux, si ceux-ci n'ont finalement pas de lien avec les problématiques sédimentaires (flèche de **sortie de la procédure PGS**).

- **Etape 2 : Détermination de l'emprise du PGS et de ses objectifs.**

Si l'étape 1 a permis d'établir l'existence de dysfonctionnements en lien avec les processus hydrosédimentaires, ou la nécessité de gérer les sédiments du fait d'enjeux « à risque » vis à vis de ces mêmes processus, il faut alors **définir l'emprise la plus cohérente pour l'élaboration d'un PGS** sur le bassin versant concerné puis **qualifier et si possible quantifier les objectifs** visés par sa mise en œuvre, **les prioriser et enfin les localiser**.

- **étape 3 : Elaboration du PGS. Choix et dimensionnement des actions. Intégration des contraintes et des coûts.**

Cette étape doit aboutir, sur la base des objectifs fixés lors de l'étape précédente, à des propositions d'actions, qui sont ensuite passées au crible des **contraintes et des coûts** (le coût pouvant éventuellement être considéré comme une contrainte aussi) qui leurs sont associés. Le principe de ne mettre en évidence les contraintes et les coûts qu'en fin d'étape 3 a pour objectif de **ne pas se fermer immédiatement de portes techniques pour atteindre les objectifs visés** (sauf si des contraintes majeures et évidentes, notamment techniques, empêchent manifestement, dès le début de cette phase, la proposition de telle ou telle action).



Si l'apparition de contraintes/coûts pour certaines actions ne remet pas en cause les objectifs déterminés à l'étape 2 (des alternatives sont possibles par exemple, pour aboutir aux objectifs visés), l'abandon de ces actions peut être décidé en petit comité. En revanche, si ces contraintes/coûts empêchent la réalisation d'actions majeures et nécessitent soit de **revoir une grande partie des actions** proposées (on remonte alors au début de l'étape 3) soit de **réviser les objectifs** (on alors remonte à l'étape 2), cette décision doit être prise lors de la phase de concertation/validation finale de l'étape 3.

- **étape 4 : Chiffrage final du PGS.**

Il s'agit de la détermination finale des objectifs et du dimensionnement des actions puis du chiffrage global de la mise en œuvre du Plan de Gestion Sédimentaire sur plusieurs d'années. Il doit prendre en compte :

- l'ajustement des coûts par action ou combinaison d'action, après que les études complémentaires ont été réalisées au terme de l'étape 3 ;
- le coût du suivi, du bilan du PGS et de la suite des actions de concertation/validation.

- **étape 5 : Mise en œuvre du PGS.**

Cette étape est l'aboutissement opérationnel des étapes précédentes par la mise en œuvre du PGS. Elle peut prendre **plusieurs années**.

**NB** : pour faciliter sa mise en œuvre, les actions du PGS devront être déclinées en début d'étape 5 sous la forme de fiches opérationnelles par UHC (Unités Hydrographiques Cohérentes) assorties de cartographies adaptées.

- **étape 6 : Suivi.**

Le suivi est indispensable pour vérifier l'efficacité des actions qui seront mises en œuvre et les ajuster, voire ne plus les réaliser si elles sont inefficaces ou contre productives. Il est à initier dès le début de la mise en œuvre du PGS, voire avant pour certains paramètres afin de disposer d'un plan d'échantillonnage solide permettant de comparer les situations avant et après intervention. Il est même possible que certaines parties du suivi soient à démarrer lors de l'étape 1 pour parfaire le diagnostic. **Le suivi se fera au minimum sur une période de 10 ans pour intégrer suffisamment d'évènements hydrologiques morphogènes.**

- **étape 7 : Réalisation du bilan du PGS.**

Cette étape essentielle consiste, au terme d'un nombre d'années à définir par les parties prenantes (à mi-parcours, voire au terme d'une première séquence de suivi de 10 ans par exemple), en un **bilan objectif et quantifié de l'efficacité** ou non des actions menées dans le cadre du PGS. C'est le rôle du suivi de fournir ces éléments objectifs d'appréciation.

Si cette efficacité est démontrée, le PGS peut être reconduit en l'état pour un cycle de n années supplémentaires. Dans le cas contraire, et en fonction de l'écart avec les ambitions affichées initialement pour chaque type d'objectif, il peut être nécessaire de remonter à l'étape 3 pour revoir les actions à mener, voire à l'étape 2 pour réviser les objectifs et leur niveau d'ambition. Il est possible aussi que des résultats négatifs soient liés, pour différentes raisons, à une mise en œuvre imparfaite ou partielle des actions proposées. Dans ce cas, il peut suffire de remonter à l'étape 5 et de remettre en œuvre correctement les actions qui auraient été mal ou partiellement réalisées.

**NB** : l'idéal serait, en plus d'un bilan d'efficacité des actions menées, d'en réaliser un **bilan d'efficience**, si possible action par action. L'efficience d'une action mesure le rapport entre le résultat obtenu et les ressources utilisées pour l'atteindre. L'efficacité ne mesure que le résultat sans tenir compte des moyens (humains et financiers) dépensés pour y parvenir. L'exercice semble cependant extrêmement compliqué (voir 3.1.16).

### 2.1.8. ORGANISATION DE LA CONDUITE DU PROJET ET PHASES DE CONCERTATION ET DE VALIDATION

Nous décrivons succinctement ci-après les principes de concertation et de validation qui accompagneront les étapes techniques présentées plus haut. Ils seront détaillés dans le chapitre 4.

- **étape préalable : qui associer, quand et comment ?**

Cette étape préalable aborde non seulement la dimension technique du projet mais également sa dimension sociale : la conduite du projet avec les acteurs du territoire. Il s'agit de repérer les acteurs à associer et de déterminer quand et comment ces acteurs vont être associés : va-t-on leur proposer de participer au comité de pilotage ? au comité technique ? ou à des réunions de concertation thématiques ? ou géographiques ?

L'important à ce stade est de n'oublier personne... bien qu'il soit toujours possible de « raccrocher » des acteurs dans les instances ou réunions en cours de route, si cela s'avère nécessaire.

Le mandat de chaque comité (de pilotage et technique) doit être clair. Celui de chaque réunion de concertation également. Le processus de décision doit être lisible par tous, ceci afin d'éviter les malentendus. Il est nécessaire de se poser les questions suivantes :

- s'agit-il pour les participants de donner un avis ? De construire des propositions ?
- doivent-ils faire le relais auprès d'autres groupes, d'autres instances ?
- qui va trancher, décider au final ?
- est-on dans une information, une consultation ou une co-construction ?

Il faudra bien préciser aux participants que les réunions de concertation servent à produire des propositions qui seront soumises à la décision des élus.

**Généralement, le comité de pilotage pré-validate une proposition de plan de gestion sédimentaire qui sera ensuite votée en commission locale de l'eau ou en comité de rivière** lorsque ces instances existent, sinon en conseil syndical, dans le cas où le projet est porté par un syndicat de rivière, ou en conseil d'intercommunalité le cas échéant.

**Parfois, le plan de gestion est prévu dans une fiche action du contrat de rivière, et donc déjà validé dans son principe en conseil syndical. Dans ce cas, c'est le comité de pilotage du plan de gestion qui le validera.**

- **étape 1 : partager et valider un diagnostic sociotechnique.**

Cette étape de diagnostic n'est pas uniquement technique, loin de là. Il est utile et souvent nécessaire de la compléter par un diagnostic historique, social, économique, etc. Il s'agira de retracer l'histoire de la rivière dans le territoire, des usages qu'elle a connus et qui ont notamment eu un impact d'un point de vue sédimentaire. Il s'agira également d'interviewer les usagers, les acteurs en lien avec la rivière, pour recueillir leurs perceptions, leurs attentes. Un regard sur la dimension économique des usages à ce stade n'est pas superflu ; il pourra permettre de comprendre ce qui se joue pour certains acteurs.

Cette écoute est à mener par type d'acteurs en un premier temps : cela libère la parole et permet de mieux repérer les positions par grand groupe d'acteurs. Ce qui aura été recueilli lors de cette phase d'écoute sera partagé en un deuxième temps en réunion multi-acteurs, quand il s'agira d'établir ensemble le diagnostic.

Si des réunions de concertation géographiques (par communes) ou thématiques (par grandes filières industrielles, agricoles, etc.) sont prévues, il est nécessaire qu'elles débutent par cette phase de diagnostic territorial.

**La validation de cette première étape est déterminante.** C'est généralement là que se joue un premier point d'accord entre les acteurs. C'est également à ce stade que se tissent les liens de confiance entre eux, ou de premières régulations, chacun en venant à connaître et comprendre les enjeux de l'autre. **Cette étape est nécessaire pour qu'une construction collective d'objectifs et d'actions, généralement moins consensuelle, soit possible.**

- **étape 2 : définir les objectifs du plan de façon concertée, puis les valider.**

Pour travailler cette étape, il peut être intéressant de prévoir une sensibilisation rapide et « vulgarisée » du fonctionnement sédimentaire d'une rivière ainsi que des conditions d'un bon fonctionnement sédimentaire. Quelques retours d'expériences d'autres territoires peuvent venir éclairer les débats et aider les participants, notamment les non spécialistes, à comprendre les objectifs que l'on est en train de se fixer. Ils peuvent ainsi réellement participer aux discussions, faute de quoi les actions décidées par la suite (étape suivante) ne seront pas comprises ni acceptées.

Si des réunions de concertation géographiques (par communes par exemple) ou thématiques (par grandes filières industrielles, agricoles, etc.) sont prévues, cette sensibilisation y est également bienvenue.

La validation de cette phase, tout comme celle des étapes précédentes et des étapes suivantes, est préparée en comité de pilotage puis votée en commission locale de l'eau ou en comité de rivière lorsque ces instances existent, sinon en conseil syndical, dans le cas où le projet est porté par un syndicat de rivière, ou en conseil d'intercommunalité le cas échéant. Comme évoqué plus haut, le principe d'un plan de gestion peut être prévu dans une fiche action du contrat de rivière, déjà validé en conseil syndical. C'est alors souvent le comité de pilotage du plan de gestion qui valide cette étape.

- **étape 3 : élaborer et valider les propositions d'actions avec les acteurs concernés.**

Il est indispensable que les propositions d'actions soient discutées, et idéalement même élaborées avec les acteurs qui les mettront en œuvre. Ces acteurs doivent même être associés à la démarche dès la phase de diagnostic. Comme nous l'avons vu plus haut, si le diagnostic n'est pas partagé par tous les acteurs concernés alors il y a un risque que des blocages apparaissent au stade de la définition des actions.

Dans le cas où, par exemple, une commune devrait réaliser une action et que l'acteur détenant la compétence GeMAPI en est l'intercommunalité, il faudra prévoir que la commune concernée soit associée dès l'étape du diagnostic (étape 1), selon la taille du projet et la taille des différentes instances, soit en comité de pilotage, soit dans les réunions de concertations géographiques prévues par commune ou par territoire.

**La validation de ces actions doit non seulement être prévue en comité de pilotage**, pour garantir une cohérence des actions entre elles, mais aussi et surtout dans **le conseil municipal des communes porteuses** de ces actions, ou **dans les conseils d'administration lorsqu'il s'agit de conservatoires des espaces naturels** ou d'autres structures associatives. Ce qui est important à ce stade, c'est la validation par les décideurs des structures qui porteront les actions. Ces structures pourront décider, par la suite, de lancer en complément et à leur niveau, une démarche de concertation avec les acteurs concernés par la mise en œuvre des actions.

- **étape 4 : chiffrage financier des actions prévues au plan puis validation.**

Les actions prévues au plan auront été priorisées à l'étape précédente. Dans l'idéal, le chiffrage financier ne devrait pas avoir d'incidence sur la priorisation des actions. Dans la réalité c'est parfois le cas : les étapes 3 et 4 sont réalisées en même temps.

Comme pour l'étape précédente, **la validation de ces actions doit non seulement être prévue en comité de pilotage**, pour garantir une cohérence des actions entre elles, mais aussi et surtout dans les instances décisionnelles des structures porteuses de ces actions. Cette **validation est indispensable pour disposer des moyens financiers nécessaires** à la réalisation concrète des actions, **et identifier les demandes d'aides à prévoir** auprès des financeurs.

- **étape 5 : mise en œuvre des actions prévues au plan de gestion sédimentaire.**

La mise en œuvre des actions peut être réalisée par différents maîtres d'ouvrage. Elles peuvent supposer d'associer des riverains, par exemple lorsque ceux-ci sont propriétaires fonciers des parcelles concernées par les travaux. Il est donc important d'anticiper cette phase de mise en œuvre des actions et/ou de travaux en associant, le plus en amont possible, les propriétaires riverains, et, plus largement, les acteurs qui peuvent être impactés par les travaux : agriculteurs, randonneurs, vététistes, kayakistes, etc.

Pour certains travaux (cours d'eau en traversée de ville ou de village) **des réunions publiques** peuvent être prévues, ainsi que des **panneaux d'information** en bord de rivière. Plus généralement, **la communication en amont et pendant** la phase des travaux (mais aussi après celle-ci) doit être prévue.

- **étape 6 : suivi de la mise en œuvre du plan de gestion sédimentaire.**

Pour suivre la réalisation des actions prévues au plan de gestion sédimentaire et leurs effets, il est conseillé de monter un comité de suivi. Celui-ci, en ayant une configuration identique ou proche du comité de pilotage qui a validé le plan de gestion, permet de soutenir la dynamique du projet dans la durée, mais aussi et surtout de maintenir une « *arène de débat* » complémentaire, le cas échéant, à la commission locale de l'eau ou au comité de rivière, qui porte un regard plus spécifiquement sur la gestion sédimentaire de la rivière.

- **étape 7 : bilan et mise à jour du plan de gestion sédimentaire.**

Le comité de pilotage est rassemblé à nouveau pour un bilan du plan de gestion. Celui-ci travaillera sur la base d'un bilan technique, réalisé par un bureau d'études spécialisé, ainsi que d'un bilan territorial, qui décrira les porteurs d'actions et le système d'acteurs concerné par la gestion sédimentaire et évoquera les difficultés et leviers de mise en œuvre du plan.

## 3. MISE EN ŒUVRE DES ETAPES DU LOGIGRAMME

### ETAPE PREALABLE : DETERMINATION DU PERIMETRE D'ETUDE ET ORGANISATION DE LA CONDUITE DU PROJET

#### 3.1.1. PERIMETRE D'ETUDE

La détermination de l'emprise spatiale sur laquelle devra porter le diagnostic est une étape préalable courte mais cruciale car vont en dépendre les coûts des études de diagnostic ainsi que l'identification des parties prenantes à mobiliser le plus en amont possible de la procédure d'élaboration du PGS. L'emprise du futur PGS correspondra à tout ou partie de cette emprise initiale d'étude.

Les agences de l'eau, structures gemapiennes et services de l'Etat impliqués connaissent déjà un certain nombre de bassins cibles pour l'élaboration et la mise en œuvre de PGS. Sont par exemple identifiés dans le programme de mesures (PDM) du SDAGE Rhône-Méditerranée 2022-2027 un certain nombre de sous-bassins faisant l'objet d'une mesure MIA0204<sup>4</sup> (« restaurer l'équilibre sédimentaire et le profil en long d'un cours d'eau » figure ci-dessous) et qui pourraient a priori faire l'objet de PGS.

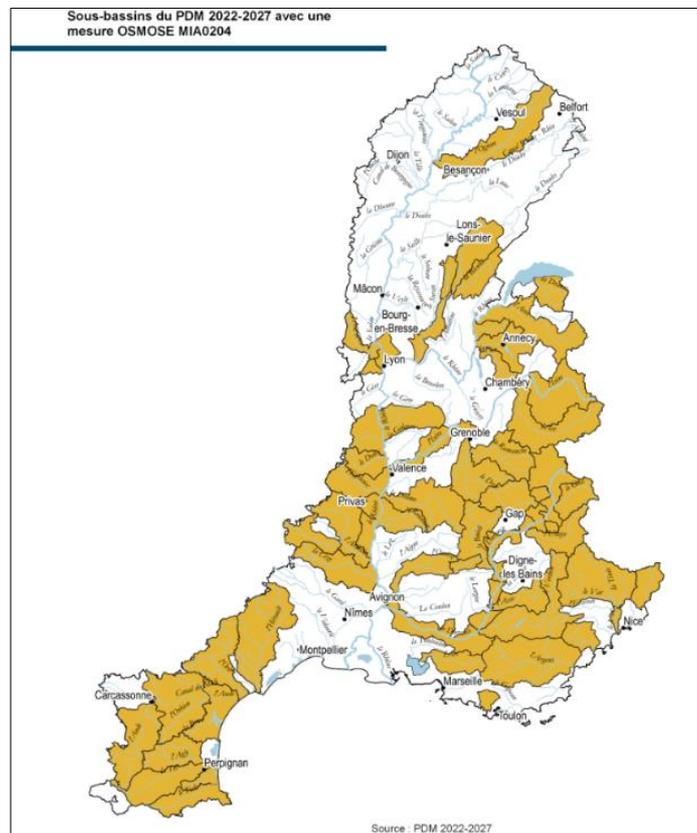


Figure 74 : les sous-bassins faisant l'objet d'une mesure MIA0204 dans le cadre du PDM du SDAGE 2022-2027.

<sup>4</sup> La mesure MIA0204 (référentiel national OSMOSE relatif aux programmes de mesures des SDAGES) est intitulée : restaurer l'équilibre sédimentaire et le profil en long d'un cours d'eau.

Elle vise à rétablir une dynamique de transport sédimentaire lorsque cette dernière est dégradée et consiste à définir et à mettre en œuvre l'ensemble des interventions nécessaires à la reprise et au transport des sédiments, de l'amont vers l'aval, à la recharge par érosion latérale et à la gestion des atterrissements. Elle inclut les travaux ainsi que les études et l'éventuel suivi réglementaire associés. Cette mesure peut agir pour d'autres enjeux (inondation, milieux naturels, captage d'eau potable et d'eau pour irrigation, stabilité des ouvrages).



### 3.1.2. ORGANISATION DE LA CONDUITE DU PROJET

Cette étape préalable sera donc une étape de validation des périmètres pertinents pour l'élaboration d'un PGS. Elle sera aussi l'**occasion de premiers échanges avec les parties prenantes locales** autour des problématiques sédimentaires. Le détail de l'organisation de la conduite du projet est présenté au **chapitre 4**.

## ETAPE 1 : BILAN DES ENJEUX, DES PRESSIONS ET DES FONCTIONNEMENTS HYDROMORPHOLOGIQUE ET ECOLOGIQUE

Cette étape consistera à réaliser :

- une sectorisation du cours d'eau en différentes entités : Tronçons de Contrôle Géomorphologiques (TCG), Tronçons Géomorphologiques Fonctionnels (TGF) et Unités Hydrographiques Cohérentes (UHC) notamment ;
- une analyse des périmètres de gestion et de la gouvernance déjà en place sur le bassin ;
- un recensement et une analyse de risque des enjeux socio-économiques nécessitant une gestion sédimentaire ;
- un recensement et une analyse de l'intensité des pressions présentes, passées, voire futures, ayant un effet probable sur la dynamique sédimentaire du cours d'eau ;
- un diagnostic de fonctionnement hydromorphologique et écologique des cours d'eau du périmètre d'étude, reposant notamment sur une analyse des trajectoires passées et tendancielle de divers paramètres ;
- une localisation et une quantification des sources et des puits sédimentaires ;
- un bilan global croisant ces données et déterminant l'intérêt ou non d'élaborer et de mettre en œuvre un plan de gestion sédimentaire.

### 3.1.3. SECTORISATION DU COURS D'EAU

#### 3.1.3.1. DECOUPAGE EN TCG ET TGF

Le cours d'eau sera découpé en TCG (Tronçons de Contrôle Géomorphologiques) et TGF (Tronçons Géomorphologiques Fonctionnels) sur les bases présentées en première partie (revoir 1.1.1), si possible en reprenant les TCG de la base SYRAH (Valette et al. 2008).

#### 3.1.3.2. DECOUPAGE EN UHC

Les UHC (Unités Hydrographiques Cohérentes) ont pour vocation de devenir les unités de gestion de base du PGS. Elles correspondront à minima à des TCG mais il est possible que certains TCG puissent être regroupés pour former des UHC pertinentes (revoir 1.1.1).

### 3.1.4. RECENSEMENT DES ENJEUX SOCIO-ECONOMIQUES POUVANT NECESSITER UNE GESTION SEDIMENTAIRE

Il s'agit ici de recenser les **enjeux socio-économiques pouvant nécessiter une gestion sédimentaire** (voir liste au 2.1.1) et devant être pris en compte dans le cadre de l'élaboration d'un PGS.

Ces enjeux seront cartographiés le plus précisément possible à l'échelle du 1 : 25 000<sup>ème</sup> puis synthétisés par tronçon, par UHC et par masse d'eau à des échelles adaptées.

On pourra éventuellement leur adjoindre un « niveau d'enjeu » basé sur une « **grille d'évaluation sommaire de l'enjeu** » de divers types d'occupation des sols en bordure de rivières susceptibles d'être menacés par les processus géodynamiques et hydrauliques liés au transport solide (figure ci-après, Malavoi et al. 2011).

Dans l'exemple ci-dessous, les enjeux sont classés du plus faible au plus fort niveau.

Cette grille ne prétend pas être exhaustive et n'est en aucun cas une « règle stricte de détermination d'un enjeu ». Elle se veut plutôt une **base de travail et de réflexion pour que les gestionnaires et acteurs du territoire élaborent leur propre grille au cas par cas**.

UNE PROPOSITION DE GRILLE D'ENJEUX

Une étude de faisabilité technique et économique doit permettre au cas par cas d'évaluer la pertinence d'un déplacement ou d'une indemnisation plutôt qu'une protection de ces enjeux, qui engendrerait d'autres impacts hydromorphologiques...et parfois des coûts plus importants. En première analyse, le rapport coûts/bénéfices du **déplacement de certains enjeux « déplaçables » de niveau 2.5 à 3 voire 3.5** est en général meilleur que leur protection (exemple dans l'encadré suivant).

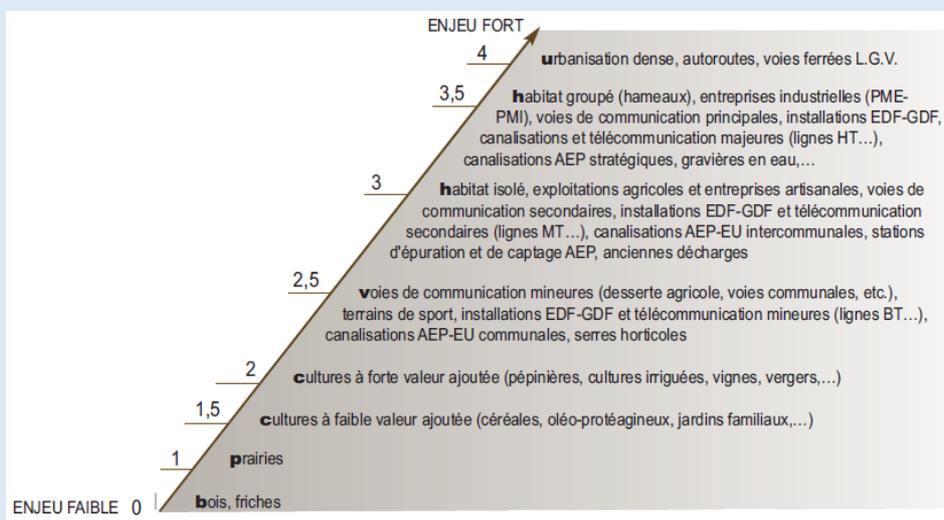


Figure 75 : exemple de grille d'évaluation de l'importance des enjeux à prendre en compte dans le cadre d'un PGS. Malavoi et al (2011). NB : ne sont indiqués ici que les enjeux liés à l'occupation du sol.

## DECLASSEMENT ET DEPLACEMENT DE LA RD37 (11)

- **Contexte** : Suite à la crue du 14 février 2017, après une longue phase de concertation, le Conseil Départemental de l'Aude a accepté de déclasser l'ancienne RD37 entre la STEP de Villegly et Bagnoles pour **redonner un espace de mobilité** à la Clamoux sur environ **900 mètres linéaires**. En 2018, une subvention de 100 000 € HT a permis l'**acquisition du foncier** nécessaire à l'opération ainsi que des travaux de terrassement nécessaire à la restauration. Une subvention supplémentaire de 250 000 € HT a contribué à la destruction de l'ancienne RD37 et à la construction d'une nouvelle route en retrait. L'opération visait à redonner rapidement de la mobilité à la Clamoux en accélérant les processus d'érosion par suppression de tout élément de nature à fixer la berge (protections de berge, végétation). L'objectif principal était de permettre à la rivière de façonner elle-même un nouveau gabarit de lit en crue et en particulier des surlargeurs favorisant les conditions d'un exhaussement alluvial du lit pour lutter contre les phénomènes d'incision.
- **Portage du projet** : Le maître d'ouvrage des opérations est le Syndicat Mixte Aude Centre, le SMMAR (Syndicat mixte des milieux aquatiques et des rivières) de l'Aude) étant en appui technique et financier.
- **Parti d'aménagement retenu et déroulé de l'opération** : Négociation des terrains par la Safer, découpage parcellaire pour n'acquérir que la surface nécessaire au projet, achat des terrains, destruction de l'ancienne route et construction de la nouvelle réalisées par le Syndicat Intercommunal de cylindrage, coupe à blanc de la ripisylve en rive droite en régie, dessouchage et destruction des systèmes racinaires, arasement des merlons et enlèvement des protections de berge.
- **Illustrations**



Figure 76 : localisation du site



Figure 77 : a) La Clamoux le long de la RD 37 avant travaux. Corsetage, incision, réparation enrochements après chaque crue, b) premières érosions après le désenrochement (printemps 2022)

### 3.1.5. DIAGNOSTIC DE FONCTIONNEMENT HYDROMORPHOLOGIQUE ET ECOLOGIQUE

Cette phase de l'étape 1 est extrêmement importante car elle doit amener à réaliser un **diagnostic du fonctionnement hydromorphologique et écologique** du cours d'eau, au travers notamment du croisement (exemple Figure 81) :

- d'une **analyse trajectorielle historique** (évolution historique du cours d'eau) ;
- d'une **analyse fonctionnelle actuelle** (comment fonctionne-t-il aujourd'hui) ;
- d'une **analyse trajectorielle prospective** (comment fonctionnera-t-il dans 10, 50, 100 ans, si on ne fait rien ou si on agit).

Cette analyse trajectorielle sera réalisée à travers celle **d'un certain nombre de métriques appropriées** (<sup>5</sup>voir la définition plus précise en ANNEXE 3). Elle est essentielle car elle permet **d'objectiver d'éventuels dysfonctionnements hydromorphologiques et écologiques pouvant empêcher ou retarder l'atteinte du bon état des eaux**. Malheureusement, les caractéristiques historiques de nombreuses métriques ne seront probablement pas disponibles et il faudra souvent se contenter de quelques années ou dizaines d'années.

#### 3.1.5.1. RECENSEMENT DES PRESSIONS AYANT, OU AYANT EU, UN EFFET PROBABLE SUR LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE DU COURS D'EAU

Il s'agit lors de cette étape de localiser les **pressions actuelles et passées** pouvant avoir un effet sur les processus hydrosédimentaires et de renseigner leur intensité (ex : linéaire d'enrochement de berges, d'endiguement, nombre de seuils etc. voir liste au 2.1.2). **Ces pressions seront cartographiées avec la même précision que les enjeux.**

**NB** : Le prestataire devra, en fin d'étape 1, **hiérarchiser ces pressions** en fonction de leur rôle estimé dans les dysfonctionnements observés et ce notamment en vue de prioriser celles sur lesquelles il est urgent (et encore possible) d'intervenir. Notons ici que la pression « **extraction de granulats en lit mineur** » n'existe plus en France depuis 1994 (sauf cas particulier comme l'amont des retenues de certains grands barrages, par exemple le barrage du Sautet sur le Drac). Il n'est donc **plus possible de la réduire** et pourtant elle est l'une des (si ce n'est la) **principales causes de l'incision généralisée** observée sur de nombreux cours d'eau alluviaux, en France et dans le monde.



Une évaluation des **pressions futures** probables à moyen/long terme (10-20 ans), si elle est possible, peut permettre de justifier l'intérêt d'élaborer un PGS visant à anticiper, éviter, réduire ou compenser leurs impacts éventuels sur la dynamique sédimentaire du cours d'eau.

#### 3.1.5.2. LOCALISATION ET QUANTIFICATION DES SOURCES ET PUIXS SEDIMENTAIRES

Il s'agit ici de localiser, qualifier et si possible **quantifier les sources et les puits sédimentaires majeurs** (voir 0). Le Schéma Directeur de Gestion Sédimentaire du Rhône (Ginger Burgeap, 2022) permet d'illustrer cette démarche à l'échelle d'un grand fleuve.

Une carte permet d'identifier clairement les apports, qui, sur le Rhône, sont constitués presque exclusivement d'apports externes secondaires (apports des affluents).

<sup>5</sup> une **métrique** est un paramètre descriptif d'un état, d'un fonctionnement ou d'une évolution, un **indicateur** est une métrique qui permet explicitement de les qualifier. Tous les indicateurs sont des métriques mais toutes les métriques ne sont pas des indicateurs.



Ces métriques permettent de traduire les **pressions** identifiées précédemment (linéaire de berges enroché, anciennes extractions en lit mineur, etc.). Elles viennent généralement confirmer et quantifier les impacts de ces pressions sur le fonctionnement de l'hydrosystème.



La **bonne échelle spatiale de mesure des métriques** (pour l'échantillonnage et le calcul de valeurs moyennes par exemple) est le **TGF** (Tronçon Géomorphologique Fonctionnel). L'état de fonctionnement qui en sera déduit sera cartographié et pourra être synthétisé par TCG, par UHC et éventuellement par masse d'eau. Notons aussi que le **choix des métriques et indicateurs est fondamental** car outre la réalisation du **diagnostic de fonctionnement**, une partie de ces paramètres servira à **fixer des objectifs de gestion/restauration** puis à évaluer, grâce à un suivi adapté, l'**efficacité des actions** menées dans le cadre du PGS. Il est donc important, dès l'étape de diagnostic du fonctionnement hydromorphologique et écologique, de choisir et mesurer un certain nombre de métriques qui serviront aussi **d'état initial pour le suivi** qui sera réalisé sur plusieurs années après mise en œuvre du PGS.

#### 3.1.5.3.1. Métriques et indicateurs de fonctionnement hydromorphologique

Ces métriques ont pour objectif d'identifier des dysfonctionnements associés à des pressions anthropiques actuelles ou passées sur l'hydromorphologie et le transport sédimentaire du cours d'eau : l'incision du lit, son pavage ou l'apparition du substratum rocheux, la rétraction de sa bande active, une métamorphose fluviale, etc.).

#### 3.1.5.3.2. Métriques et indicateurs de fonctionnement morphoécologique

Le compartiment **morphoécologique** correspond à l'**interprétation écologique** de certains paramètres hydromorphologiques au travers du **concept d'habitat**.

Nous avons vu au chapitre 1.1.11.2, qu'un **faciès d'écoulement**, qui est initialement une « simple » unité morphologique caractérisée par une granulométrie, une vitesse d'écoulement, une profondeur moyenne, des profils en travers et en long caractéristiques, une position au sein du chenal, etc., peut être interprété comme un **mésohabitat** auquel peuvent être associées certaines caractéristiques écologiques, comme la probabilité de présence d'une espèce piscicole, voire d'un stade de développement de cette espèce (Schwartz, 2016). Ainsi par exemple, les radiers, rapides et plats courants sont des **faciès** qui sont les **mésohabitats** les plus favorables au développement des juvéniles de saumon 0+. La superficie et la fonctionnalité (colmatage, pavage etc., voir plus loin) de ces faciès peuvent donc être considérées comme des indicateurs de proportions suffisantes d'habitats favorables pour le stade juvénile de cette espèce (revoir l'exemple des cours d'eau du bassin de l'Allier au 1.1.11.2).

Dans le même registre, la **Surface de Granulométrie Favorable (SGF)** à la reproduction des truites dans un cours d'eau (Delacoste, 1995) est évaluée en mesurant, à l'échelle d'une station, toutes les zones du lit mineur d'au moins 20 cm de côté (0.04 m<sup>2</sup>) et présentant une granulométrie moyenne comprise entre 0.2 et 5 cm. La valeur cumulée de ces SGF rapportée à la superficie totale du lit mineur est un indicateur de proportion suffisante de ces habitats pour assurer une bonne reproduction de l'espèce. **L'ordre de grandeur d'une SGF suffisante pour un certain nombre de cours d'eau des Pyrénées a ainsi été évaluées à 3 à 5 % du lit mouillé** par Delacoste, 1995 et Baran et al., 1999.

**NB** : ces valeurs sont probablement assez variables d'un cours d'eau à un autre, en particulier en fonction de la lithologie du bassin versant et sa capacité à « produire » des alluvions d'une certaine granulométrie. Elle mériteraient donc d'être régionalisées.

Les métriques hydromorphologiques à vocation d'interprétation écologique (dites morphoécologiques) sont signalées en grisé dans le Tableau 8.

EVALUATION DE L'ETAT SEDIMENTAIRE D'UN COURS D'EAU

Un guide méthodologique d'évaluation de « l'état sédimentaire » d'un cours d'eau en aval d'un barrage » a été élaboré par EDF (Malavoi et al., 2015). Il permet notamment, au moyen d'une méthodologie d'échantillonnage adaptée, d'estimer l'écart entre les caractéristiques sédimentaires d'un tronçon situé en amont d'un barrage (qui peut être naturel ou déjà influencé) et celles d'un tronçon situé en aval. L'approche se fait par transects répartis le long des tronçons témoins et influencés (à l'échelle de stations ou du linéaire total) sur lesquels sont décrites certaines caractéristiques du substrat alluvial telles que la granulométrie (au moyen de la méthode EVHA (voir 1.1.10.1.1)), l'épaisseur de la couverture alluviale (supérieure ou inférieure à 25 cm), le colmatage de surface (protocole Archambaud).

Une des analyses en résultant est la comparaison entre les tronçons témoins et influencés des **caractéristiques des habitats alluviaux** au moyen d'une « matrice d'habitat » basée sur les dominants 1 et 2 de la méthode de description granulométrique EVHA.

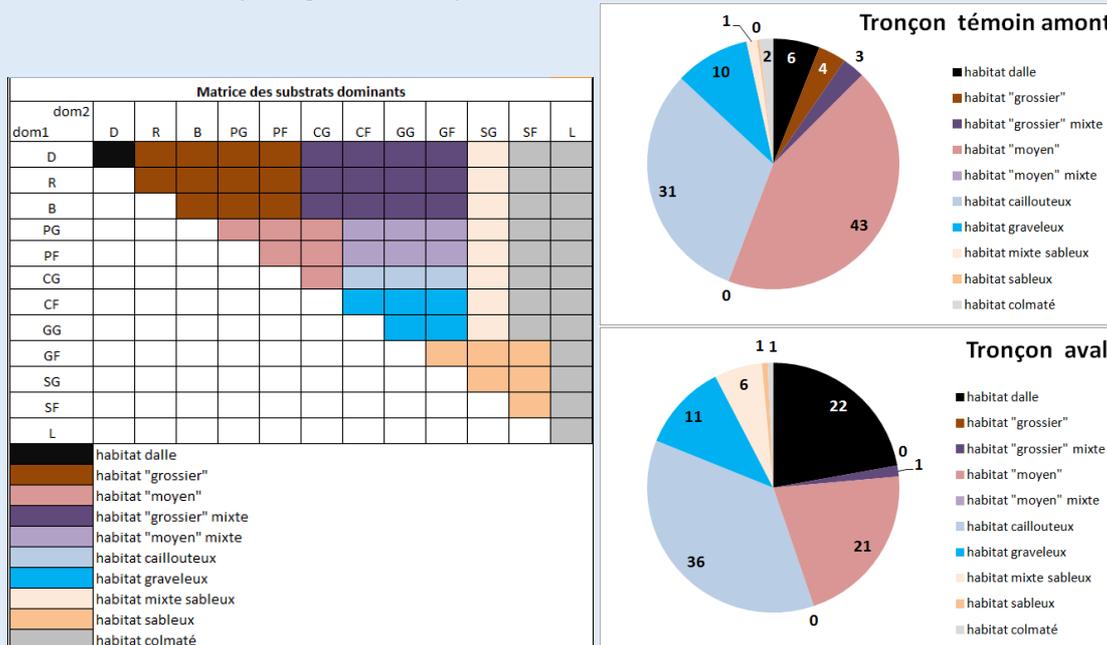


Figure 80 : a) matrice des substrats dominants et leur traduction en « habitats » et synthèse des résultats pour les deux tronçons étudiés (le Guiers aval). On observe par exemple que les habitats caillouteux et graveleux présentent sensiblement les mêmes proportions mais qu'il y a beaucoup plus de dalles (affleurements du substratum) en aval.

3.1.5.3.3. Métriques et indicateurs écologiques



Il a été estimé par le comité technique de ce guide, qu'il n'existait pas de métriques écologiques suffisamment fines et indépendantes d'autres facteurs (physico-chimie des eaux notamment, événements hydrologiques particuliers (grave sécheresse, forte crue)) pour rendre compte pertinemment des effets de seuls dysfonctionnements hydrosédimentaires ou d'une amélioration de ce compartiment suite à la mise en œuvre d'un PGS. Les quelques métriques écologiques proposées ici ne permettront donc pas de fixer des objectifs à atteindre ou d'évaluer l'efficacité d'actions qui seraient mises en œuvre. En revanche, l'étude et l'analyse de leur trajectoire après mise en œuvre d'un PGS sont indispensables pour améliorer notre connaissance des processus liant hydromorphologie et écologie (voir 3.1.16).

Quelques exemples de métriques et indicateurs biologiques sensibles au fonctionnement hydrosédimentaire d'un cours d'eau sont proposées ci-dessous, en vue de mettre en place une étude des effets biologiques du PGS pour établir un bilan de leur trajectoire :

### A. Poissons

L'indicateur le plus intéressant serait l'**abondance d'alevins de poissons lithophiles** (poissons pondant dans ou sur des substrats graveleux). Des **échantillonnages ponctuels d'abondance** (EPA, Protocole de Nelva et al. (1979)) ainsi de comparer la trajectoire d'évolution de la métrique purement morphoécologique qu'est la SGF (Surface Granulométrique Favorable à la reproduction) à celle d'une métrique purement biologique qui lui est, théoriquement, fortement associée.

### B. Insectes terrestres

La boîte à outils RhoMeo (Rhône-Méditerranée outils) fournit des indicateurs clés en main pour suivre et évaluer l'évolution de l'état de conservation des fonctions des zones humides (<https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=rhomeo.bao>).

Pour les insectes terrestres, les orthoptères (sauterelles, grillons, criquets) et les odonates (libellules), peuvent donner des indications intéressantes sur l'état des milieux sédimentaires :

- orthoptères (I05 dynamique sédimentaire, I09 humidité du milieu) : se référer aux fiches indicateurs (I05 et I09), protocole (P05), analyses et interprétation (A05 et A07). Le même protocole d'échantillonnage produit deux indicateurs distincts. Indicateurs à mobiliser deux années successives tous les six ans ou trois années successives tous les 10 ans ;
- odonates (I10 intégrité du peuplement). Se référer à la fiche indicateur (I10), protocole (P06), analyses et interprétation (A10). Suivi de 3 campagnes en 10 ans (N0, N+5, N+10). L'évaluation repose sur la comparaison, à l'échelle d'une zone humide, du peuplement d'Odonates observé avec le peuplement attendu selon les habitats aquatiques présents.

### C. Flore terrestre

RhoMeo propose un Indice floristique d'engorgement (I02), de fertilité du sol (I06) et de qualité floristique (I08). Ces trois indicateurs reposent sur le même protocole d'échantillonnage (P02) qui est accompagné de trois fiches d'analyse et d'interprétation des résultats (A02, A06 et A08).

Pour l'appliquer à l'évaluation de la restauration sédimentaire d'un cours d'eau et son incidence sur la végétation et les habitats il est recommandé de réaliser des transects perpendiculaires à la berge et d'échantillonner les habitats rencontrés, homogènes dans leurs dimensions stationnelles et floristiques. Campagnes d'échantillonnage (N0, N+5, N+10 à minima). La flore peut révéler l'évolution des facteurs édaphiques et notamment la saturation temporaire ou permanent du sol en eau consécutivement aux travaux de restauration morphologique.

### D. Oiseaux

Les oiseaux constituent un groupe biologique intéressant car ils occupent de nombreuses niches écologiques et sont très réactifs aux modifications des milieux et du paysage.

Diverses approches peuvent être proposées pour évaluer une certaine « qualité » des habitats sédimentaires vis-à-vis de ces biocénoses :

- inventaire de l'avifaune par station d'écoute avec le protocole des IPA (indices ponctuels d'abondance : 2 fois 20 mn au printemps, Blondel et al., 1970). Points d'écoute distants à minima de 500 m pour éviter les doubles comptages. La comparaison des campagnes d'inventaires dans le temps pourraient rendre compte de la trajectoire d'évolution de la restauration morphologique et son incidence sur les peuplements aviens qui en dépendent :
  - à partir des IPA, possibilité de focaliser sur l'abondance des espèces nichant sur les bancs de sables ou de graviers (Petit Gravelot, Sterne pierregarin, Sterne naine, Cédicnème criard) ou celles colonisant les berges sapées par la dynamique du cours d'eau (Hirondelle de rivage, Guêpier d'Europe, Martin pêcheur) ;
  - pour les colonies de Guêpier d'Europe ou d'Hirondelle de rivage qui rendent compte de la dynamique fluviale, la méthode de l'indice kilométrique d'abondance (IKA) peut aussi être utilisée pour évaluer et suivre l'évolution de la capacité du milieu à les accueillir (Ferry et Frochot, 1958).

Tableau 8 : Exemples de métriques de fonctionnement hydromorphologique, morphoécologique et écologique

| Compartment  | Contribution au diagnostic fonctionnel   | Élément à décrire  | Exemples de métriques (à relever au niveau des TGF) (à relever au niveau des TGF)   | Commentaire   |   |
|--|--|--|---|---|---|
| Hydromorphologie   | Incision ou exhaussement du lit mineur   | Cote du fond/ligne d'eau du lit mineur (profils en long ou en travers)   | Différence brute de cote entre 2 ou plusieurs dates (p. long)   | Attention aux référentiels topographiques pour les profils en long anciens (Bourdalous, Lallemand, NGF69). Attention au type de relevé : fond du lit ou ligne d'eau.  |   |
|  |  |  | Taux de différence de cote entre 2 ou plusieurs dates (p. long)   |   |   |
|  | Equilibre sédimentaire   | Niveau de la nappe d'accompagnement  | Différence de cote entre 2 ou plusieurs dates   | Il faut un nombre minimum de PT pour être pertinent.  |   |
|  |  |  | Bilan sédimentaire interannuel  | Donne aussi des indications sur une éventuelle altération des milieux humides du lit majeur et sur une problématique socio-économique d'alimentation en eau (potable ou pour l'irrigation). Voir le chapitre consacré aux méthodes et incertitudes  |   |
|  | Capacité du lit à transporter des sédiments grossiers  | Lit mineur   | Capacité de charriage (calculée par des équations adaptées)   | Voir le chapitre consacré aux méthodes et incertitudes  |   |
| Modifications naturelles ou anthropiques des apports liquides (Q) ou solides (Qs), ou de travaux (extractions, essartements, etc.) | Bande active du lit mineur   | Evolution temporelle et spatiale de la largeur moyenne (ou superficie) brute ou normalisée (par la superficie du BV par exemple)   | 1. vérifier qu'il n'y a pas eu une très forte crue, juste avant l'établissement des cartes ou photos, ou inversement pas de crue depuis minimum 5 ans (végétalisation rapide), éventuellement chercher une photo post forte crue. 2. la construction de nombreux barrages a pu modifier fortement le régime hydrologique des cours d'eau situés en aval   |   |   |
| Fonctionnement hydromorphologique global.  | Style fluvial  | Evolution temporelle du type de chenal (simple ou multiples) et des ses caractéristiques. Pour les chenaux uniques, on mesure le coefficient de sinuosité (SI). Pour les tresses on calcule les différents indices de Terrier et al. (2019): Largeur normalisée (W*), Rugosité (BRI et BRI*), Encassement dans plaine all. Récente (T) | Pour les rivières à chenal unique : s'il est naturel, le SI est un indicateur très intéressant. Plus il est élevé plus la pente est faible et moins la rivière est active. Généralement aussi plus les berges sont cohésives, plus le rapport l/h est faible. Pour les rivières à chenaux multiples, la simple présence d'un tressage indique déjà un transport solide grossier plutôt élevé (en relatif par rapport à un lit à chenal unique). Les métriques présentées ici sont détaillées dans le guide "rivières en tresses" (Terrier et al., 2019) |   |   |
| Hydromorphologie   | Intensité de l'activité morphodynamique. Potentiel de recharge alluviale par apports internes (érosion latérale) | Berges   | Taux d'érosion annuel (en brut (ha, m3 par tronçon) ou relatif (ha, m3 par /km)   | Apporte des indications sur le potentiel de recharge alluviale par apports internes   |   |
|  |  |  | Nb de flèches d'érosion (en brut, par km de rivière, en relatif, par n fois la largeur pb)  | Une flèche d'érosion se mesure sur une durée suffisante, entre 2 position d'une même sinuosité (voir Malavoi et al., 2011). Permet aussi parfois (si subsistent des portions naturelles dans le TGC) de détecter une altération anthropique.  |   |
|  | Potentiel de recharge alluviale par apports externes   | Connexion versant/cônes d'éboulis  | Volume disponible en connexion (linéaire si volume pas possible)  | Fournit des indications sur le potentiel de recharge alluviale par apports externes primaires   |   |
| morpho-écologie  | Importance de la charge alluviale grossière. Présence d'habitats alluviaux.                                      | Bancs alluviaux non végétalisés  | Indice de banc (IB ou IB+)  | Complète le paramètre "bande active". Peut devenir un indicateur de dysfonctionnement si on dispose de valeurs repères soit historiques, soit géographiques.  |   |
|  |  |  | Epaisseur moyenne   | Pour une rivière à chenal unique, un même IB voire IB+ n'a pas la même signification, en terme d'importance du TS, si les bancs sont épais ou fins. On pourrait prendre une épaisseur moyenne / à la cote de la ligne d'eau d'étiage ou à la cote moyenne du talweg au droit du banc. En terme de lien avec les éclusées, plus les bancs sont fins plus ils sont susceptibles d'être totalement ennoyés/dénoyés pendant les éclusées. |   |
|  | Description des méso-habitats du lit mineur  | Facès d'écoulement   | % de chaque type de faciès  | Simple métrique descriptive mais qui peuvent devenir des indicateurs de dysfonctionnement si l'on dispose de valeurs repères soit historiques, soit géographiques.  |   |
|  |  |  | Epaisseur alluviale   | Peut se faire en mesurant cette épaisseur au moyen d'une pique en métal enfoncée au marteau. On peut proposer pour simplifier, de vérifier si une épaisseur minimale est présente (ex : 25 ou 30 cm) (Malavoi et Loire, 2015).  |   |
|  |  |  | Affleurement du substratum  | Superficie ou % linéaire  |   |
|  |  |  | Alluvions en eau au module  | % SGF (Surface de Granulométrie Favorable) pour la reproduction des poissons lithophiles.   |   |
|  | Des cription de la diversité des habitats annexes  | Annexes hydrauliques bande active  | Superficie ou % linéaire pavé   |   |   |
|  |  |  | Colmatage des substrats grossiers   | Classe de colmatage Archambaud + linéaire concerné  |   |
|  |  |  | Annexes hydrauliques lit majeur   | Conductivité hydraulique  |   |
|  |  |  | Zones humides lit majeur  | Diversité/quantité/fonctionnalité   |   |
| Etat du peuplement piscicole   | Annexes hydrauliques lit majeur  | Diversité/quantité/fonctionnalité  |   |   |   |
|  |  | Recrutement d'espèces de poissons lithophiles  | Densité d'alevins (par unité de surface ou de longueur de berges)   | Indicateur (indice) DCE   |   |
|  |  | Etat du peuplement d'invertébrés   | Peuplements faune benthique   | IPR   | Permet d'évaluer le niveau de recrutement d'espèces de poissons lithophiles. Il existe plusieurs méthodologies. |
|  |  | Etat fonctionnel des habitats humides : flore et végétation caractéristiques présentes   | Flora   | I2M2  | Indicateur (indice) DCE   |
| Ecologie   | Dynamique fluviale et milieux humides associés : dépôts alluviaux  | Orthoptères  | I08* : Indice de qualité floristique (I02, I06)   | La richesse botanique constitue un indicateur de qualité qui varie avec l'état des autres fonctions. Ce dernier peut conforter ou améliorer l'état écologique des masses d'eau liées. L'indicateur de suivre et d'évaluer la réponse à une gestion des habitats pour l'atteinte d'un état de conservation favorable.  |   |
|  |  |  | I09* : Humidité du milieu – orthoptères (I05)   | En zones humides alluviales, l'indicateur traduit le degré d'humidité des habitats et leur capacité d'accueil pour des orthoptères à l'écologie plus ou moins exigeante (espèce pionnière par ex).  |   |
|  | Mosaïque d'habitats humides et d'eau libre   | Odonates   | I10 : Intégrité du peuplement d'odonates, I11 : Intégrité du peuplement d'amphibiens  | La qualité des milieux imbriqués et leur attractivité pour la biodiversité peut être révélée par l'utilisation des indicateurs « odonates » ou « batraciens ».  |   |

**3.1.5.4. METRIQUES ET INDICATEURS POUR D’AUTRES COMPARTIMENTS**

Plusieurs métriques peuvent aussi permettre de décrire les caractéristiques « d’état » de fonctionnement du système vis-à-vis d’enjeux autres qu’écologiques.

Par exemple :

- la perte de productivité de captages AEP/irrigation suite à baisse du niveau piézométrique de la nappe d’accompagnement ;
- le déchaussement d’ouvrages d’art (suite à l’incision) ;
- l’aggravation des inondations (suite à l’exhaussement du lit et à l’excès de sédiments grossiers, voir plus haut).

Même si les objectifs autres qu’écologiques ne seront pas ceux principalement visés dans le cadre de PGS réalisés au titre du SDAGE, il est néanmoins nécessaire de proposer des métriques pour les analyser.

Des exemples de métriques sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 9 : Exemples de métriques pour d’autres enjeux

| Compartment                                    | Contribution au diagnostic fonctionnel | Elément à décrire               | Exemples de métriques (à relever au niveau des TGF)  |
|--|--|---------------------------------|--|
| Protection des biens et des personnes          | Etat de fonctionnement                 | Zones inondables à enjeux forts | Superficie ou nb enjeux menacés pour différentes fréquences de crue.<br>Perte de capacité d’ouvrages de franchissement |
|  |  | Ponts affouillés                | Nombre et niveau d’incision  |
|  |  | Digues affouillées              | Linéaire touché et niveau d’incision   |
|  |  | Protections de berges           | Linéaire touché et niveau d’incision   |
| Navigation fluviale                            |  | Chenal de navigation            | Points noirs (hauts fonds)   |
| Retenues à usage hydroélectrique, AEP, loisirs |  | Volume de retenue               | Taux de sédimentation annuel   |
|  |  | Perte d’exploitation            | A développer   |
| Captages en nappe                              |  | Difficulté d’exploitation       | A développer   |
|  |  | Productivité                    | Perte de productivité entre 2 ou plusieurs dates   |

**3.1.5.5. BILAN SEDIMENTAIRE PAR TRONÇON**

Il s’agit de réaliser les bilans sédimentaires tels que décrits au 1.1.5.4. :

- un **bilan sédimentaire partiel au sein d’un tronçon**, basé sur la comparaison de données topographiques (MNT ou séries de profils en travers) à un instant t et à un instant t + n afin de déterminer si le tronçon accumule ou libère des sédiments (latéralement ou verticalement). Selon les besoins de l’étude et les données disponibles plusieurs bilans peuvent être réalisés ;
- un **bilan sédimentaire complet**, basé sur des mesures effectives du flux sédimentaire ou un **calcul de capacité de charriage validé par des mesures** au sein de chaque tronçon, croisés avec des données d’apports sédimentaires externes et internes évalués plus ou moins quantitativement. Ce type d’approche permettra notamment de dimensionner des actions ayant pour vocation à augmenter la quantité d’apports sédimentaires grossiers.

## ETAPE 2 : DETERMINATION DE L'EMPRISE SPATIALE DU PGS ET DE SES OBJECTIFS

### 3.1.6. EMPRISE DU OU DES PGS

Si l'étape 1 a permis de démontrer l'existence de dysfonctionnements ou la nécessité de gérer les sédiments du fait d'enjeux « à risque » vis à vis des processus hydrosédimentaires, il faut ensuite **définir l'emprise spatiale la plus cohérente pour l'élaboration d'un ou plusieurs PGS** sur le bassin concerné. Plus le bassin sera important plus il sera compliqué d'élaborer et mettre en œuvre un PGS « global ». Des sous découpages seront donc parfois nécessaires. Ils devront néanmoins être cohérents entre eux. Par exemple, un PGS sur un sous bassin qui viserait à augmenter fortement le volume de sédiment grossiers entrants alors que le sous bassin récepteur est en excédent ne serait a priori pas cohérent.

### 3.1.7. DEFINITION, PRIORISATION ET LOCALISATION DES OBJECTIFS

Une fois l'emprise du PGS déterminée, il faut alors **qualifier et, chaque fois que ce sera techniquement possible, quantifier les objectifs** visés par sa mise en œuvre. Ces objectifs devront ensuite être **priorisés** en fonction de divers critères à définir au cas par cas, comme par exemple :

- la gravité des dysfonctionnements constatés ;
- l'urgence à les traiter ;
- l'intensité des contraintes et des risques vis-à-vis de certains enjeux socio-économiques.

**NB** : même si la priorisation des objectifs sur ces bases techniques est à privilégier, il peut arriver que la capacité financière disponible puisse amener à revoir les priorités initialement définies.

Chaque objectif **sera défini dans le cadre d'une emprise spatiale précise** à l'échelle des TCG, des TGF et des UHC. Pour ce qui concerne la **quantification des objectifs**, l'idéal est d'aller jusqu'à des « **plages cibles d'objectifs** » (exemple Figure 82), ce qui permettra d'une part aux parties prenantes d'avoir une vision claire des résultats attendus et d'autre part de vérifier, par un suivi adapté, que ces objectifs ont bien été atteints. C'est aussi cette quantification qui permettra de mieux **choisir et dimensionner les actions** à mener.

Dans l'exemple fictif ci-dessous, l'analyse de la **trajectoire de la SGF** (Surface de Granulométrie Favorable pour la reproduction des poissons lithophiles) fait ressortir une chute brutale des superficies à partir des années 50, qui laisse supposer, dans une trajectoire globalement à la baisse, l'apparition à cette époque d'une pression nouvelle à l'origine d'un dysfonctionnement. On est aujourd'hui à 1% et l'évolution tendancielle sans action de gestion ou de restauration montre une poursuite de la chute, peut-être jusqu'à 0%.

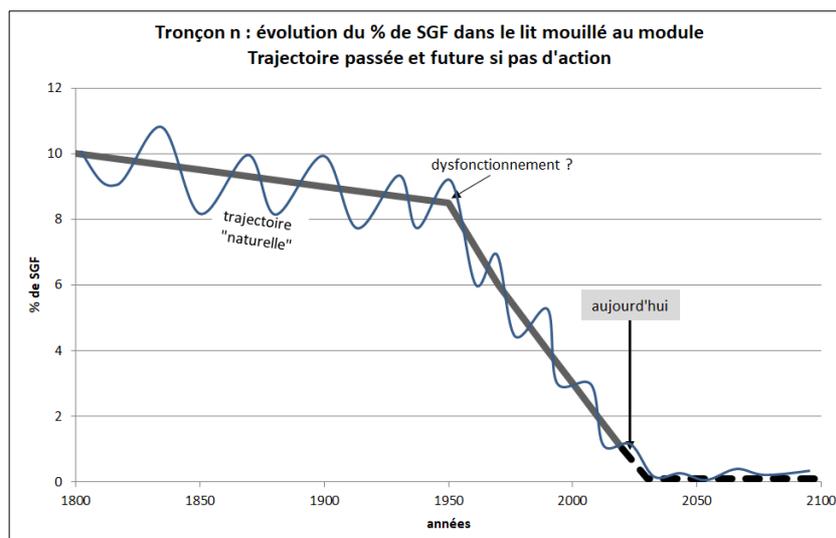


Figure 81 : exemple fictif de la trajectoire et de sa tendance lissée d'une métrique morphoécologique : la Surface de Granulométrie Favorable à la reproduction des poissons lithophiles.

Sur la base de cet exemple fictif, la figure suivante présente le principe de « **plage cible d'objectif** » qui pourrait être fixée dans le cadre d'un PGS.

A partir de la situation d'aujourd'hui, la **plage cible** envisageable serait par exemple, compte tenu du fonctionnement actuel, des diverses contraintes etc., non pas de revenir à la situation de 1950 mais d'atteindre des valeurs de SGF comprises entre 4 et 6%.

Il peut être intéressant aussi (mais encore plus compliqué), de définir un « **délai d'objectif** » qui formalise les échéances des résultats attendus. C'est ce qui transparaît dans la Figure 82 où l'on indique que l'on espère atteindre la base de la plage cible sous 4 à 5 ans et l'optimum sous 20-25 ans.

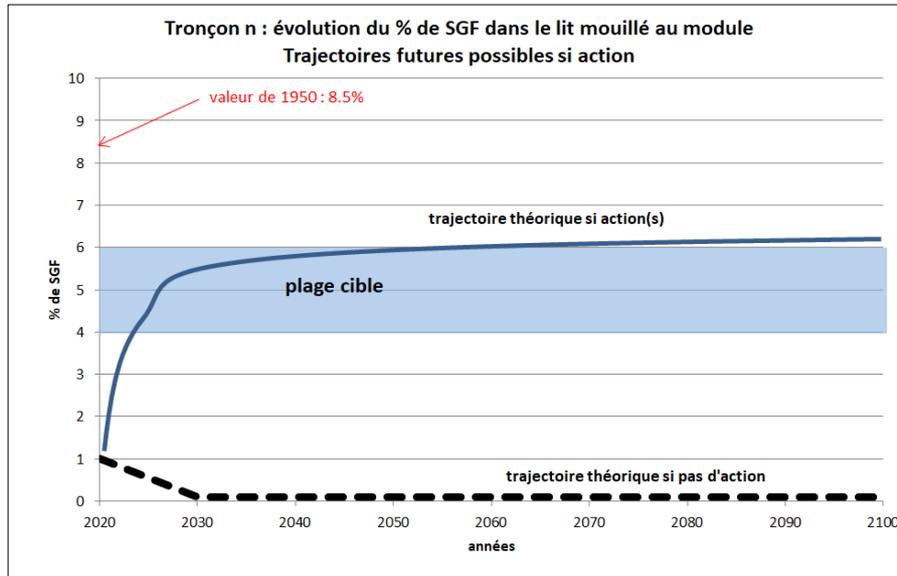


Figure 82 : exemple fictif de trajectoire théorique d'une métrique morphoécologique en cas de mise en œuvre d'actions de restauration : la Surface de Granulométrie Favorable à la reproduction des poissons lithophiles.



**Il est préférable de ne fixer qu'une seule plage cible d'objectif**, si possible la plus ambitieuse. Des plages moins ambitieuses ne seraient alors utilisées, lors du suivi du PGS (étape 6), que pour mesurer l'écart entre les résultats attendus et ceux observés, évaluer l'efficacité des actions mises en œuvre et éventuellement proposer de nouvelles actions pour tendre vers la cible initiale (voir l'étape 7).

### 3.1.7.1.OBJECTIFS ECOLOGIQUES : LE BON ETAT DES EAUX ET DE L'HYDROSYSTEME EN GENERAL

Théoriquement, les objectifs écologiques du PGS doivent être le négatif des dysfonctionnements écologiques constatés lors de l'étape 1.

Pour rappel, les principaux dysfonctionnements écologiques associés à une altération des processus hydrosédimentaires sont :

- une **dégradation de l'état des biocénoses aquatiques** (diversité, densité, biomasse, structure des peuplements) ;
- une **dégradation de l'état des biocénoses de la bande active et semi-active (faune et flore)**
- une **dégradation de l'état des biocénoses du lit majeur** associées au cours d'eau (celles des annexes hydrauliques et des zones humides notamment), ainsi que de la ripisylve et de la forêt alluviale.



S'il a été estimé par le comité technique de ce guide, que les objectifs écologiques ne pouvaient pas être quantifiés (pas de plage cible à atteindre), en revanche, **l'analyse de leur trajectoire après mise en œuvre d'un PGS est indispensable** (voir 3.1.16). Il a donc été décidé, même si l'objectif final est bien le bon fonctionnement écologique du cours d'eau, de **ne fixer des objectifs quantitatifs que pour les métriques hydromorphologiques ou morphoécologiques qui seront considérées comme des proxys de l'état écologique** (voir ci-dessous).

### 3.1.7.2. OBJECTIFS HYDROMORPHOLOGIQUES ET MORPHOÉCOLOGIQUE

L'objectif final d'un PGS est de contribuer à l'atteinte du « **bon état des eaux** » au sens de la DCE et en particulier du **bon état écologique des hydrosystèmes en général**. Il est alors nécessaire de **décliner les moyens** qui permettront de l'atteindre, qui **deviennent alors des sous-objectifs**, nécessitant eux-mêmes des moyens pour les atteindre, etc.

Ces moyens, et donc ces sous-objectifs, sont généralement hydromorphologiques car c'est en améliorant les processus et les formes hydromorphologiques (les habitats notamment) que l'on a la meilleure chance d'améliorer l'état écologique (hors qualité chimique et physico-chimique).

D'autre part, le constat a souvent été fait qu'il est difficile, voire impossible, de relier les indicateurs DCE utilisés pour l'évaluation de l'état écologique (par exemple les indices « poissons » IPR+ et « invertébrés » I2M2), ou même des métriques biologiques plus fines, à des actions concrètes de restauration. En effet, l'évolution des biocénoses d'un cours d'eau répond généralement à une multiplicité de facteurs anthropiques et naturels (qualité de l'eau, thermie, événements hydrologiques etc.) qu'il est compliqué d'isoler ou de hiérarchiser. Il semble donc plus réaliste de **viser directement des objectifs hydromorphologiques ou morphoécologiques** dont les métriques, analysées comme des **proxys d'objectifs écologiques**, permettront de vérifier que les actions mises en œuvre sont efficaces. De plus, un objectif basé sur un **proxy hydromorphologique est plus facile à quantifier**, ce qui permet de mieux dimensionner la ou les actions nécessaires pour l'atteindre.



L'atteinte des plages cibles pour un ou plusieurs proxys hydromorphologiques ou morphoécologiques est une condition nécessaire mais non suffisante pour espérer atteindre un bon état écologique. En effet, d'autres facteurs naturels ou anthropiques influencent l'état des communautés biologiques.

Nous présentons ci-dessous, dans un extrait du tableau global de l'annexe 2, un exemple d'**emboîtement d'objectifs** qui permet d'aller jusqu'aux actions à mettre en œuvre pour les atteindre. Le principe de ce tableau consiste à choisir le **niveau d'objectif** (en réalité de sous-objectif) le plus approprié pour permettre le choix et le dimensionnement d'une ou plusieurs actions puis l'évaluation de leur efficacité.

Tableau 10 : tableau d'emboîtement enjeux/objectifs/moyens/actions. Les cases grisées indiquent que le renseignement a déjà été fourni ailleurs dans le tableau (moyens d'action identiques).

| Emboîtement Enjeu/Objectif/Moyens d'action/Actions  |   |                                       |   |   |  |
|---|---|---------------------------------------|---|---|--|
| Enjeu   | Objectif  | Sous-objectif niveau 1                | Sous-objectif niveau 2  | Moyen d'action  | Action   |
| Etat écologique de l'hydrosystème                   | Restaurer le bon état écologique DCE ainsi que la biodiversité des rives et du lit majeur | Restaurer les habitats du lit mouillé | Restaurer les SGF (Surfaces de Granulométrie Favorable) pour la reproduction des poissons lithophiles | Augmenter les apports solides grossiers                                   | App. externes : dévégétaliser les versants, éboulis etc.                     |
|   |   |                                       |   |   | App. externes : reconnecter versants/lit                                     |
|   |   |                                       |   |   | App. internes : activer l'érosion des berges                                 |
|   |   |                                       |   |   | App. internes : améliorer structurellement la continuité amont/aval ouvrages |
|   |   |                                       |   |   | App. internes : améliorer la gestion de la continuité amont/aval ouvrages    |
|   |   |                                       |   |   | App. internes : dévégétaliser les bancs                                      |
|   |   |                                       |   |   | réinjection brute  |
|   |   |                                       |   |   | réinjection chirurgicale   |
|   |   |                                       | Mettre en place des micro-structures pour piéger une partie des sédiments                             | Implantation de petits seuils   |  |
|   |   |                                       |   | Implantation de déflecteurs divers  |  |
|   |   |                                       | Augmenter l'épaisseur alluviale (globale ou sur certains types de faciès)                             | Augmenter les apports solides grossiers                                   |  |
|   |   |                                       |   | Mettre en place des micro-structures pour piéger une partie des sédiments |  |
|   |   |                                       |   | Elargir le lit mineur   | Elargir le lit mineur  |
|   |   |                                       | Stabiliser l'incision   | Augmenter les apports solides grossiers                                   |  |
| Mettre en place des rampes sous fluviales           | Mettre en place des rampes sous fluviales   |                                       |   |   |  |
|   | Elargir le lit mineur   |                                       |   |   |  |
| Résorber / atténuer le pavage                       | Augmenter les apports solides grossiers   |                                       |   |   |  |
| Résorber / atténuer les affleurements du substratum | Mettre en place des micro-structures pour piéger une partie des sédiments                 |                                       |   |   |  |
|   | Augmenter les apports solides grossiers   |                                       |   |   |  |

Détaillons le tableau ci-dessus :

- nous avons un **enjeu** majeur (colonne 1) « l'état écologique de l'hydrosystème » (d'autres enjeux sont aussi déclinés dans le tableau complet en annexe 2 : sureté, navigation, etc., voir) associé à un objectif principal qui est souvent sa restauration ;
- le **premier niveau d'objectif** (colonne 2) est quantifiable, par exemple via l'atteinte ou non des valeurs des indicateurs de bon état DCE (IPR+ et I2M2) mais il **est insuffisant pour choisir et surtout dimensionner l'action** (probablement les actions) la plus adaptée pour l'atteindre. Il sera d'autre part difficile (voire impossible) d'évaluer la part et l'efficacité d'une action (colonne 6) dans l'atteinte ou non de cet objectif, donc de valider son intérêt et sa pérennisation dans le cadre d'un PGS ;
- pour améliorer les peuplements piscicoles, hors qualité de l'eau, il est couramment admis qu'il faut « restaurer les habitats », en particulier ceux du lit mouillé ». Ce **moyen devient alors un sous-objectif de niveau 1** (colonne 3). Notons qu'il s'agit du **premier niveau d'objectif de nature hydromorphologique, voire morphoécologique**. De notre point de vue, il est encore trop imprécis pour définir des objectifs quantifiés et donc pour choisir et dimensionner les actions adaptées ;
- le niveau d'objectif décliné colonne 4 (**sous-objectif de niveau 2**), « augmenter les SGF » (Surface de Granulométries Favorables pour la reproduction des espèces de poissons lithophiles), est très intéressant car il **précise l'objectif précédent à un niveau tel que l'on peut le quantifier** assez finement et donc disposer d'éléments de choix puis de dimensionnement des actions nécessaires pour l'atteindre. Par exemple, si le diagnostic a fait ressortir que l'indicateur SGF présentait des valeurs insuffisantes pour assurer une bonne reproduction des salmonidés dans le tronçon concerné (exemple dans la Figure 81 : 1% de la surface mouillée) on peut alors proposer une plage cible d'objectif (ex : 4 à 6%) ;
- Pour atteindre cet objectif quantifié plusieurs **moyens d'action** sont maintenant envisageables (colonne 5). Ils peuvent être combinés dans l'espace et/ou dans le temps. Ce sont les contraintes techniques, financières,

écologiques, etc. (voir 3.1.10.3.5) qui permettront d'orienter le choix des moyens, puis des actions associées ;

- La colonne suivante précise les **actions** possibles à mettre en œuvre pour atteindre les sous objectifs fixés précédemment.



Le niveau d'objectif le plus pertinent pour choisir et dimensionner des actions, puis vérifier leur efficacité, est le 2<sup>ème</sup> niveau de nature hydromorphologique (**sous-objectif de niveau 2**), tout en gardant à l'esprit la chaîne d'emboîtement des objectifs amont. Ce niveau d'objectif sera considéré comme un proxy des effets écologiques des actions menées. Des indicateurs adaptés permettront de vérifier l'efficacité des actions mise en œuvre pour l'atteindre.

Nous présentons ci-dessous une liste non exhaustive et non hiérarchisée d'objectifs hydromorphologiques et morphoécologiques de ce niveau, qui pourraient être poursuivis dans le cadre d'un PGS. Elle est le reflet des dysfonctionnements « classiques » associés à des pressions impactant les processus hydrosédimentaires (revoir 3.1.5). Comme les objectifs écologiques, **ils devront, pour pouvoir être correctement dimensionnés et suivis, être quantifiés au travers de plages cibles d'objectif.**

Nous pouvons subdiviser ces objectifs selon le compartiment de l'hydrosystème visé (colonne 3 du tableau) : le lit mineur en eau, la bande active, le lit majeur.

Il apparaît qu'une douzaine d'objectifs quantifiables semblent suffisants pour atteindre l'objectif global d'amélioration de l'état écologique du cours d'eau.

Ces objectifs sont les suivants :

- **compartiment lit mouillé** (revoir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** pour les définitions) :
  - restaurer les SGF (Surfaces de Granulométrie Favorable) pour la reproduction ;
  - augmenter l'épaisseur alluviale (globale ou sur certains types de faciès) ;
  - stabiliser l'incision ;
  - rehausser le fond alluvial (notamment pour restaurer les connexions rivière/nappe et rivière/affluents) ;
  - résorber/atténuer le pavage ;
  - résorber/atténuer les affleurements du substratum ;
  - résorber/atténuer le colmatage ;
  - augmenter la surface de faciès spécifiques.
- **compartiment lit mineur** (bande active et semi-active) :
  - restaurer/augmenter la largeur de la bande active ou de la bande de tressage ;
  - restaurer/augmenter le nombre de chenaux secondaires.
  - Restaurer la mobilité en plan ou dans le cas d'autres dysfonctionnements la ralentir
- **compartiment lit majeur** :
  - restaurer/augmenter la fréquence de débordement (pour améliorer les connexions avec le lit majeur et ses zones humides) ;
  - restaurer/augmenter le nombre de chenaux secondaires ;
  - restaurer/augmenter le nombre d'annexes hydrauliques et leurs connexions avec la rivière.

3.1.7.3.OBJECTIFS CONCERNANT LES ENJEUX SOCIO-ECONOMIQUES

En plus des objectifs écologiques et hydromorphologiques, les autres enjeux autour du cours d'eau identifiés lors des phases précédentes devront être pris en compte et nécessiteront eux même la définition d'objectifs. Par exemple :

- la remontée du niveau moyen de la nappe pour restaurer la productivité des captages AEP ou d'irrigation ;
- la restauration et l'entretien de sections d'écoulement « cible » évitant le débordement en zone urbaine jusqu'à une crue de projet de récurrence n ;
- la restauration et le maintien d'un chenal navigable ;
- Etc.



Dans la mesure où la mise en œuvre d'un Plan de Gestion Sédimentaire sera réalisée au titre du SDAGE, les objectifs visés par les enjeux socio-économiques autres que le « **bon état des eaux** » pourront être recherchés en analysant leur compatibilité. Il n'est en effet **pas judicieux d'opposer les enjeux écologiques et les autres**. La prise en considération de ces derniers pourra en effet aider à sélectionner les scénarios d'actions qui permettront d'optimiser les réponses à la diversité de ces enjeux.

Tableau 11 : extrait du tableau d'emboîtement enjeux/objectifs pour les enjeux socio-économiques. Le tableau complet est présenté en annexe

| Enjeu  | Objectif   | Sous-objectif niveau 1                                  | Sous-objectif niveau 2                                  |
|--|--|---|---|
| Protection des biens et des personnes                            | garantir la sécurité des biens et des personnes  | limiter les inondations                                 | conserver/restaurer une section d'écoulement suffisante |
|  |  | gérer les dépôts torrentiels en lit majeur              | gérer les dépôts torrentiels en lit majeur              |
|  |  | préserver les digues                                    | Stabiliser l'incision                                   |
|  |  | préserver les protections de berges                     | protéger les infrastructures                            |
|  |  | préserver les ponts                                     | Stabiliser l'incision                                   |
| Usages agricoles du lit majeur (et éventuellement des terrasses) | Garantir les usages                              | limiter les inondations                                 | conserver/restaurer une section d'écoulement suffisante |
|  |  | réduire les érosions latérales                          | réduire les processus                                   |
| Navigation fluviale  | Garantir les usages                              | maintenir un chenal de navigation                       | maintenir un chenal de navigation                       |
|  |  | maintenir l'accessibilité des ports et haltes fluviales | maintenir l'accessibilité des ports et haltes fluviales |
| Retenues à usage hydroélectrique, AEP, loisirs                   | Garantir les usages                              | maintenir un volume utile                               | maintenir un volume utile                               |
|  |  | maintenir de bonnes conditions d'exploitation           | maintenir de bonnes conditions d'exploitation           |
| Captages en nappe  | maintenir/restaurer la productivité des captages | maintenir/restaurer le niveau de la nappe alluviale     | Stabiliser l'incision                                   |
|  |  |   | Rehausser le fond alluvial                              |
|  |  |   | Rehausser la cote de ligne d'eau                        |
| Deltas, estuaires, trait de côte                                 | Garantir le bon fonctionnement                   | garantir la continuité sédimentaire                     | garantir la continuité sédimentaire                     |

Comme pour les autres compartiments, plus les objectifs seront quantifiés, plus il sera facile de choisir et dimensionner les actions adaptées et plus il sera simple de vérifier leur efficacité et leur compatibilité, voire leur synergie avec les enjeux de bon état.

Ainsi par exemple, **rehausser le plancher alluvial** est typiquement un objectif qui peut permettre de répondre à des **enjeux socio-économiques** (remonter le niveau de la nappe alluviale pour améliorer sa productivité pour des captages AEP) tout en contribuant à l'amélioration des **fonctionnalités écologiques** (habitat des poissons et des invertébrés benthiques) et **physicochimiques** (autoépuration, régulation thermique) du lit mouillé.

## ETAPE 3 : ELABORATION DU PGS. CHOIX ET DIMENSIONNEMENT DES ACTIONS. INTEGRATION DES CONTRAINTES ET DES COUTS

Nous proposons d'aborder la phase d'élaboration concrète du PGS sur la **base des objectifs fixés lors de l'étape précédente**. Cette approche permettra d'identifier si plusieurs moyens d'action et actions seront nécessaires pour atteindre un objectif.

**NB** : selon la multiplicité des parties prenantes, des enjeux présents et des objectifs visés, il pourra être nécessaire de proposer divers **scénarios d'élaboration puis de mise en œuvre du PGS**. Ces scénarios permettront notamment de décliner les moyens d'action les plus adaptés aux objectifs visés (voir 3.1.10). Cette entrée par les objectifs aboutit nécessairement à des répétitions en termes d'actions associées car un même moyen d'action (décliné si besoin en actions) pourra répondre à divers objectifs. Par exemple, une réinjection sédimentaire (action) dans un tronçon, pourra concourir à atteindre quasiment tous les objectifs listés plus haut pour les compartiments lit mineur et bande active.

**C'est le dimensionnement de l'action, et donc de l'objectif, qui fera la différence.**

Par exemple, si l'objectif de la réinjection est de recréer 4 à 5% de SGF dans un tronçon où l'on n'en trouve plus actuellement que 2%, celui-ci pourra probablement être atteint par des volumes et une fréquence de réinjection assez modeste. Si une rehausse importante et généralisée du plancher alluvial du cours d'eau est visée, elle nécessitera des volumes et une récurrence largement supérieurs.

### 3.1.8. LES MOYENS D'ACTION

Nous avons vu que le niveau d'objectif le plus pertinent pour choisir les moyens d'action et dimensionner des actions associées était le 2ème niveau de nature hydromorphologique (« sous-objectif de niveau 2 » du Tableau 10).

#### 3.1.8.1. PRINCIPAUX MOYENS D'ACTION VIS-A-VIS DE L'ENJEU « ETAT ECOLOGIQUE »

Il existe **une dizaine de moyens d'action susceptibles d'être proposés dans le cadre d'un PGS pour atteindre la plupart des objectifs hydromorphologiques et morphoécologiques sous tendant le bon état écologique**. Plusieurs d'entre eux devront assez fréquemment être mis en œuvre de manière complémentaire.

Les **principaux moyens d'action** identifiés sont listés ci-dessous dans l'ordre où ils apparaissent dans le Tableau 13 déclinant les sous-objectifs de niveau 2 auxquels ils doivent répondre.

Tableau 12 : les principaux moyens d'action et les compartiments visés

| Moyens d'action                                    | Compartiments visés |           |            |
|--|---------------------|-----------|------------|
|  | Flux                | Géométrie | Végétation |
| · Augmenter les apports solides grossiers          | X                   |           |            |
| · Mettre en place des micro-structures de piégeage |                     | X         |            |
| · Elargir le lit moyen                             |                     | X         |            |
| · Mettre en place des rampes sous fluviales        |                     | X         |            |
| · Limiter les apports de fines                     | X                   |           |            |
| · Réaliser des lâchers morphogènes                 | X                   |           |            |
| · Dévégétaliser mécaniquement la bande active      |                     |           | X          |
| · Favoriser la diversité des écoulements           |                     | X         |            |
| · Recreuser certains chenaux                       |                     | X         |            |

Tableau 13 : liste des moyens d'action associés aux sous-objectifs hydromorphologiques et morphoécologiques. Les moyens d'action similaires sont de la même couleur.

| Sous-objectif niveau 1                | Sous-objectif niveau 2  | Moyen d'action  | Sous-objectif niveau 1  | Sous-objectif niveau 2  | Moyen d'action                                   |   |
|---------------------------------------|---|---|---|---|--|---|
| Restaurer les habitats du lit mouillé | Restaurer les SGF (Surfaces de Granulométrie Favorable) pour la reproduction des poissons lithophiles | Augmenter les apports solides grossiers                                   | Restaurer les habitats du lit mouillé                                 | Résorber/atténuer le colmatage  | Limiter les apports de sédiments fins            |   |
|                                       |   | Mettre en place des micro-structures pour piéger une partie des sédiments |   |   | réaliser des lâchers morphogènes                 |   |
|                                       |   | Augmenter l'épaisseur alluviale (globale ou sur certains types de faciès) |   | Augmenter les apports solides grossiers                                   | Augmenter la surface de faciès spécifiques       | Augmenter les apports solides grossiers |
|                                       |   |   |   | Mettre en place des micro-structures pour piéger une partie des sédiments |  | Favoriser la diversité des écoulement   |
|                                       | Stabiliser l'incision   | Elargir le lit mineur   | Restaurer les habitats de la bande active et semi-active              | Restaurer / augmenter la largeur de la bande active                       | Elargir le lit mineur                            |   |
|                                       |   | Augmenter directement l'épaisseur alluviale                               |   |   | Augmenter les apports solides grossiers          |   |
|                                       |   |   |   |   | Dévégétaliser mécaniquement la bande semi-active | réaliser des lâchers morphogènes        |
|                                       |   | Augmenter les apports solides grossiers                                   |   |   | Elargir le lit mineur                            |   |
|                                       | Résorber / atténuer le pavage   | Augmenter les apports solides grossiers                                   | Restaurer / augmenter le linéaire de chenaux secondaires              | Restaurer / augmenter le linéaire de chenaux secondaires                  | Augmenter les apports solides grossiers          |   |
|                                       |   | Mettre en place des rampes sous fluviales                                 |   |   | Elargir le lit mineur                            |   |
|                                       | Résorber / atténuer les affleurements du substratum   | Elargir le lit mineur   | Restaurer les habitats du lit majeur et leur connexion au cours d'eau | Restaurer / augmenter la fréquence de débordement                         | Recruser certains chenaux                        |   |
|                                       |   | Augmenter les apports solides grossiers                                   |   |   | Augmenter les apports solides grossiers          |   |
|                                       |   |   | Restaurer / augmenter le linéaire de chenaux secondaires              | Recruser certains chenaux   |  |   |
|                                       |   |   | Restaurer / augmenter le linéaire d'annexes hydrauliques              | Recruser certains chenaux   |  |   |

### 3.1.8.2. PRINCIPAUX MOYENS D'ACTION VIS-A-VIS DES AUTRES ENJEUX

Une douzaine de moyens d'action (MA) peuvent permettre de répondre aux objectifs visés dans le cadre de la prise en compte des enjeux socio-économiques.

Notons que **certains moyens d'action sont communs avec ceux identifiés pour atteindre les objectifs de bon état écologique**, comme par exemple augmenter les apports solides grossiers pour stabiliser l'incision voire rehausser le plancher alluvial, ce qui permet aussi de répondre aux objectifs de préservation des ouvrages d'art et à l'amélioration de la productivité des puits en nappe alluviale.

Notons aussi que certains moyens d'actions peuvent être antagonistes avec ceux envisageables pour atteindre le bon état écologique, comme réduire les apports solides grossiers pour éviter l'engorgement des sections d'écoulement dans les zones à enjeux vulnérables vis-à-vis des inondations.

Ces moyens d'actions sont listés ci-dessous ainsi que dans le Tableau 16 avec leurs actions associées (liste non hiérarchisée, en grisé, les moyens d'action communs avec ceux identifiés pour atteindre les objectifs de bon état écologique) :

- réduire les apports solides ;
- conserver/restaurer mécaniquement une section d'écoulement suffisante ;
- curer les dépôts ;
- augmenter les apports solides grossiers ;
- mettre en place des rampes sous fluviales ;
- élargir le lit mineur ;
- retirer certains ouvrages limitant la mobilité en plan
- réduire les dépôts sédimentaires favorisant l'érosion ;

- créer / restaurer les protections (des digues, des ponts, des berges, des canaux, etc.) ;
- modifier la géométrie en plan ;
- entretenir un chenal navigable ;
- entretenir l'ouvrage ;
- mettre en place des seuils hauts ;
- rendre transparents le maximum de pièges à sédiments, fins et grossiers.



L'un des points clé de la réussite d'un PGS sera donc de bien localiser et dimensionner ces moyens d'action pour que les actions restent cohérentes à l'échelle de l'UHC de gestion. Nous rappelons aussi que **ces objectifs et moyens d'actions doivent être compatibles avec ceux du SDAGE** qui sont avant tout le « bon état écologique » des eaux et la fonctionnalité hydromorphologique et sédimentaire des hydrosystèmes.

Tableau 14 : liste des moyens d'action associés aux enjeux socio-économiques. Les moyens d'action similaires sont de la même couleur

| Enjeu                                 | Objectif  | Sous-objectif niveau 1                  | Sous-objectif niveau 2                                  | Moyen d'action                                |
|---------------------------------------|---|---|---|---|
| Protection des biens et des personnes | garantir la sécurité des biens et des personnes                       | limiter les inondations                 | conserver/restaurer une section d'écoulement suffisante | Réduire les apports solides                   |
|                                       |   |   |   | conserver/restaurer mécaniquement une section |
|                                       |   | gérer les dépôts torrentiels en lit     | gérer les dépôts torrentiels en lit mineur/majeur       | Réduire les apports solides                   |
|                                       |   |   |   | Curer les dépôts                              |
|                                       |   | présERVER les digues                    | Stabiliser l'incision                                   | Augmenter les apports solides grossiers       |
|                                       |   |   |   | Mettre en place des rampes sous fluviales     |
|                                       |   |   | protéger les infrastructures                            | Elargir le lit mineur                         |
|                                       |   | présERVER les protections de berges     |   | Stabiliser l'incision                         |
|                                       |   |   | Augmenter les apports solides grossiers                 |   |
|                                       |   |   | protéger les infrastructures                            | Mettre en place des rampes sous fluviales     |
|                                       |   | présERVER les ponts                     |   | Stabiliser l'incision                         |
|                                       |   |   | Réduire les dépôts sédimentaires favorisant l'érosion   |   |
| protéger les infrastructures          | Créer / restaurer les protections                                     |   |   |   |
|                                       | réduire les érosions latérales des terrains en bordure de cours d'eau | réduire les processus érosifs           | Augmenter les apports solides grossiers                 |   |
| Créer / restaurer les protections     |   |   |   |   |
| protéger les berges                   | protéger les berges   | Augmenter les apports solides grossiers |   |   |
|                                       |   | Mettre en place des seuils hauts        |   |   |

| Enjeu  | Objectif   | Sous-objectif niveau 1                                  | Sous-objectif niveau 2                                  | Moyen d'action  |
|--|--|---|---|---|
| Navigation fluviale                            | Garantir les usages                              | maintenir un chenal de navigation                       | maintenir un chenal de navigation                       | Réduire les apports solides   |
|  |  |   |   | Entretien d'un chenal navigable   |
| Retenues à usage hydroélectrique, AEP, loisirs | Garantir les usages                              | maintenir l'accessibilité des ports et haltes fluviales | maintenir l'accessibilité des ports et haltes fluviales | Réduire les apports solides   |
|  |  |   |   | Entretien l'ouvrage   |
| Captages en nappe                              | maintenir/restaurer la productivité des captages | maintenir un volume utile                               | maintenir un volume utile                               | Réduire les apports solides   |
|  |  |   |   | Réduire les apports solides   |
|  |  | maintenir de bonnes conditions d'exploitation           | Stabiliser l'incision                                   | Augmenter les apports solides grossiers                                 |
|  |  |   |   | Mettre en place des rampes sous fluviales                               |
| Rehausser le fond alluvial                     | Rehausser la cote de ligne d'eau                 | Elargir le lit mineur                                   |   |   |
|  |  | Augmenter les apports solides grossiers                 |   |   |
| Deltas, estuaires, trait de côte               | Garantir le bon fonctionnement                   | garantir la continuité sédimentaire                     | garantir la continuité sédimentaire                     | Elargir le lit mineur   |
|  |  |   |   | Mettre en place des seuils hauts  |
|  |  |   |   | Rendre transparents le maximum de pièges à sédiments, fins et grossiers |

### 3.1.8.3. MOYENS D'ACTION COMPLEMENTAIRES ET PRECONISATIONS DIVERSES

Il s'agit de moyens d'action qui peuvent être préconisés soit pour éviter certaines actions « inutiles » soit pour éviter des dysfonctionnements futurs probables :

- **pas d'action** : il pourra apparaître dans certains cas que la solution la plus efficace pour atteindre un objectif visé sera de ne rien faire. C'est un cas qui nécessite généralement beaucoup de pédagogie auprès des parties prenantes ;
- **moyens d'action "préventifs"** : protections de gravières en lit majeur contre les captures, stabilisation du fond alluvial par rampes sous-fluviales pour limiter voire empêcher l'incision, favoriser la gestion préventive des érosions de berges pour limiter l'artificialisation (en définissant par exemple un EBF où l'implantation de certaines infrastructures devra être contrôlée).

### 3.1.9. LES TYPES D'ACTION ASSOCIES

Plusieurs de ces **moyens d'action** peuvent être mis en œuvre de différentes façons, ce qui nécessite de les décliner en **actions**. D'autres sont déjà des actions et seront donc simplement repris tels quels.

En reprenant l'exemple du Tableau 10 :

- l'objectif « **augmentation des surfaces de SGF** » peut être atteint par la mise en œuvre de **deux grands moyens d'action**, non exclusifs l'un de l'autre :
  - **augmenter les apports solides grossiers** de taille adaptée (c.a.d. d'une granulométrie favorable pour la reproduction) ;
  - **et/ou mettre en place des micro-structures** favorisant le piégeage localisé d'une partie de la charge grossière (petits épis, blocs et rochers, amas de bois morts, éventuellement petits seuils transversaux, etc.) ;
    - NB : un élargissement modéré du lit mineur peut éventuellement être proposé pour favoriser des dépôts sédimentaires dont, parmi eux, des SGF.
- le moyen d'action « **augmentation des apports solides grossiers** » peut lui-même être mis en œuvre au travers d'**actions**, qui doivent ensuite être dimensionnées et dont la récurrence doit être évaluée sur la base des objectifs quantifiés :
  - augmentation des apports externes : **dévégétalisation des versants**, éboulis etc. ;
  - augmentation des apports externes : **reconnexion versants/lit** ;
  - augmentation des apports internes : **activation de l'érosion des berges** ;
  - augmentation des apports internes : **amélioration la continuité amont/aval** au niveau des ouvrages de type seuil, barrage et ouvrages de franchissement ;
  - augmentation des apports internes : **dévégétalisation des bancs alluviaux stabilisés** ;
  - réinjections sédimentaires : déversement d'alluvions grossières dans le cours d'eau.

**NB** : nous aurions pu décliner encore un niveau plus fin précisant éventuellement diverses **modalités de mise en œuvre d'une action** mais cela aurait alourdi considérablement la lecture. Ces modalités de mise en œuvre seront donc plutôt associées à la phase de dimensionnement des actions (3.1.10.1).

Nous présentons ci-après les principaux types d'actions associés aux différents moyens d'action présentés plus haut.

Pour ce qui concerne les **enjeux écologiques**, nous proposons aussi de distinguer, sur la base des objectifs visés, les actions à vocation générique ou spécifique, les actions à portée globale ou locale, les actions à effet immédiat ou long terme et enfin les actions à effets durables ou temporaires. La synthèse en est donnée dans le Tableau 15.

- actions génériques/spécifiques :
  - **action générique** : toute action touchant potentiellement plusieurs compartiments de l'hydrosystème. Ainsi une action de **réinjection de sédiments** en aval d'un barrage peut concourir à augmenter les SGF pour la reproduction des poissons lithophiles, augmenter les habitats favorables à tel ou tel groupe fonctionnel d'invertébrés benthiques, augmenter les superficies voire les épaisseurs alluviales au sein du

lit mineur, et par conséquent les surfaces de biofilm favorables à l'autoépuration, voire rehausser globalement le plancher alluvial. Donc même générique, une action n'aura pas les mêmes incidences sur tous les compartiments ;

- **action spécifique** : toute action ne visant (et ne touchant) qu'un compartiment de l'hydrosystème. Par exemple une restauration de frayère à salmonidés par implantation de micro-seuils, un lâcher morphogène modéré en intensité pour viser uniquement le décolmatage de certains types de faciès dans un TCC.
- actions à portée globale/locale :
  - **action à portée globale** : toute action ayant un effet sur une grande partie du cours d'eau, généralement à son aval. Ainsi la dévégétalisation importante d'un sous bassin versant, ou de plusieurs hectares de bande active, pourrait contribuer à une augmentation des apports solides sur un linéaire important du cours d'eau aval. La suppression d'un seuil ayant piégé des décennies d'apports solides génèrera aussi une augmentation du transport sédimentaire sur un linéaire important ;
  - **action à portée locale** : toute action, généralement localisée, ayant un effet lui-même très limité dans l'espace : « dépavage » mécanique d'une partie du lit mineur/moyen, réinjection ciblée de matériaux pour créer une frayère (ex : Maronne)
- action à effet immédiat/long terme :
  - **action à effet immédiat** : toute action générant l'effet recherché immédiatement ou peu de temps après (après la première crue annuelle par exemple) sa mise en œuvre. Ainsi une réinjection massive de sédiments grossiers en un point se traduira très vite par des dépôts alluviaux dans et en aval de la zone de réinjection ;
  - **action à effet long terme** : toute action dont les effets mettront plusieurs années, voire décennies, à se faire ressentir dans le tronçon visé. Par exemple, la dévégétalisation d'une partie de bassin versant pour recréer de la production sédimentaire externe n'aura probablement pas d'effet dans le tronçon visé avant plusieurs années, sauf si celui-ci est au cœur même du bassin concerné.
- actions à effet durable/temporaire :
  - **action à effet durable** : toute action qui une fois réalisée aura des effets à moyen/long terme et qui ne nécessitera pas de récurrence ou à pas de temps long (15-20 ans). Par exemple le désenrochement de plusieurs centaines de mètres de berges, la construction d'une rampe sous fluviale pour stopper l'incision, la suppression d'un seuil pour rétablir la continuité sédimentaire ;
  - **action à effet temporaire** : toute action dont les effets seront limités dans le temps et nécessiteront une répétition à pas de temps courts et réguliers (2-5 ans). Par exemple, La dévégétalisation mécanique d'une bande active en cours de fermeture sera probablement à réitérer tous les 2 à 3 ans en l'absence de crue suffisamment morphogène pour empêcher la repousse. On peut imaginer la même chose pour la dévégétalisation mécanique de versants.



Certaines actions, en particulier celles qui seront choisies dans le cadre d'objectifs autres que le bon état écologique des milieux, devront sans doute être réalisées dans le cadre de la **démarche (ou séquence) ERC** (Eviter, Réduire, Compenser les impacts associés) :

- **Eviter** : en vérifiant que l'action est bien indispensable à l'atteinte des objectifs visés ;
- **Réduire** : en mettant en œuvre l'action de manière raisonnée, sur le linéaire ou la superficie les plus restreints possible ;
- **Compenser** : les impacts négatifs éventuels liés à la mise en œuvre de l'action.

La nécessité de mise en œuvre de cette séquence ERC sera à évaluer au cas par cas par les services instructeurs.

3.1.9.1. MOYENS D'ACTION VIS-A-VIS DE L'ENJEU « ETAT ECOLOGIQUE » ET ACTIONS ASSOCIEES

Les principaux moyens d'action et actions associées sont présentés dans le tableau de synthèse ci-dessous et détaillés plus loin.

Tableau 15 : extrait du tableau de synthèse des moyens d'action et actions et nature de leurs effets

| Emboitement Enjeux/Objectif/Moyens d'action/Actions |   |   | Nature de l'effet  |                      |              |                     |                    |  |
|---|---|---|--|----------------------|--------------|---------------------|--------------------|--|
| Sous-objectif niveau 1                              | Sous-objectif niveau 2  | Moyen d'action                          | Action   | Générique/spécifique | Global/local | Immédiat/long terme | Durable/temporaire |  |
| Restaurer les habitats du lit mouillé               | Restaurer les SGF (Surfaces de Granulométrie Favorable) pour la reproduction des poissons lithophiles | Augmenter les apports solides grossiers | App. externes : dévégétaliser les versants, éboulis etc.                     | G                    | G            | L                   | T                  |  |
|   |   |   | App. externes : reconnecter versants/lit                                     | G                    | G            | I                   | D                  |  |
|   |   |   | App. internes : activer l'érosion des berges                                 | G                    | G            | I                   | D                  |  |
|   |   |   | App. internes : améliorer structurellement la continuité amont/aval ouvrages | G                    | G            | I/L                 | D/T                |  |
|   |   |   | App. internes : améliorer la gestion de la continuité amont/aval ouvrages    | G                    | G            | I                   | T                  |  |
|   |   |   | App. internes : dévégétaliser les bancs                                      | G                    | G            | I                   | T                  |  |
|   |   |   | réinjection brute  | G                    | G            | I                   | T                  |  |
|   |   |   | réinjection chirurgicale   | S                    | L            | I                   | T                  |  |
|   |   |   | Mettre en place des micro-structures pour piéger une partie des sédiments    |                      | L            | I                   | D                  |  |
|   |   |   | Implantation de déflecteurs divers   | S                    | L            | I                   | D                  |  |
|   | Augmenter l'épaisseur alluviale (globale ou sur certains types de faciès)                             | Augmenter les apports solides grossiers |  |                      |              |                     |                    |  |
|   |   |   | Mettre en place des micro-structures pour piéger une partie des sédiments    |                      |              |                     |                    |  |
|   |   |   | Elargir le lit mineur  | G                    | L            | I                   | D                  |  |
|   | Stabiliser l'incision   | Augmenter les apports solides grossiers |  |                      |              |                     |                    |  |
|   |   |   | Mettre en place des rampes sous fluviales                                    | S                    | G/L          | I                   | D                  |  |
|   | Résorber / atténuer le pavage   | Augmenter les apports solides grossiers |  |                      |              |                     |                    |  |
|   |   |   | Elargir le lit mineur  |                      |              |                     |                    |  |
|   | Résorber / atténuer les affleurements du substratum   | Augmenter les apports solides grossiers |  |                      |              |                     |                    |  |
|   |   |   | Mettre en place des micro-structures pour piéger une partie des sédiments    |                      |              |                     |                    |  |

3.1.9.1.1. M.A. : Augmenter les apports solides grossiers

C'est probablement le **moyen d'action répondant au maximum d'objectifs**. Leur atteinte dépendra toutefois beaucoup de la quantification de ceux-ci (plages cibles) et du dimensionnement des actions associées.



Il est indispensable de vérifier que l'augmentation des apports solides grossiers est bien compatible avec les autres enjeux potentiellement concernés par ces apports et en particulier les enjeux soumis à des risques d'inondation.

- rappel des objectifs visés :
  - Restaurer les SGF (Surfaces de Granulométrie Favorable) pour la reproduction ;
  - Augmenter l'épaisseur alluviale (globale ou sur certains types de faciès) ;
  - Stabiliser l'incision ;
  - Rehausser le fond alluvial ;
  - Résorber/atténuer le pavage ;
  - Résorber/atténuer les affleurements du substratum ;
  - Augmenter la surface de faciès spécifiques (notamment les radiers) ;
  - Restaurer/augmenter la largeur de la bande active ou de la bande de tressage ;
  - Restaurer/augmenter le nombre de chenaux secondaires ;
  - Restaurer/augmenter la fréquence de débordement (pour améliorer la connexion avec le lit majeur).

Une **grande variété d'actions** est envisageable depuis la reconnexion versant/lit jusqu'à la réinjection chirurgicale localisée de sédiments pour reconstituer des frayères.

### LA QUESTION DE LA DEVEGETALISATION DES VERSANTS, CONES D'ÉBOULIS, ETC.

Ce type d'action, séduisant sur le principe, consiste à **réactiver les processus d'érosion** sur les versants pour recréer des **sources sédimentaires primaires externes**. La mesure qui semble la plus efficace pour réactiver ces processus est de supprimer la végétation sur les versants qui se seraient végétalisés soit naturellement sous l'effet du réchauffement climatique depuis la fin du PAG et de la déprise agro-pastorale, soit sous l'effet de plantations notamment par les services RTM.

**Cependant**, ce type d'action, outre son caractère temporaire (il faudra sans doute dévégétaliser régulièrement) n'aura d'effets sensibles sur le cours d'eau collecteur qu'au terme de plusieurs années, voire plusieurs décennies. D'autre part, suite aux expérimentations menées sur le bassin de la Drôme (Liébault et al. 2006 notamment), il apparaît que ce type d'action, même si probablement efficace sur le long terme, à condition d'arracher les souches, est **très difficile à mettre en œuvre pour des raisons d'acceptabilité sociale**. L'effort de pédagogie pour réaliser ce type d'action sera probablement très important.

Par ailleurs, ce type d'action doit être bien réfléchi pour **éviter d'aggraver les risques** sur des enjeux situés en aval immédiat (biens et personnes, infrastructures).

Il est possible aussi que ce type d'action génère des **apports sédimentaires fins**, pas toujours "utiles" au bon fonctionnement hydrosédimentaire et écologique recherché. La "qualité" (fins/grossiers/mixtes) des apports sédimentaires qui seront "libérés" devra donc être évaluée assez précisément au cas par cas.

Les versants végétalisés peuvent aussi présenter une certaine **richesse écologique**, voire être classés (Natura 2000, APB, ZNIEFF etc.). Il est donc important de vérifier que l'action de dévégétalisation préconisée présentera suffisamment d'intérêt écologique (pour la rivière en aval) pour justifier une perte éventuelle de biodiversité à l'échelle du versant et est compatible avec les documents de gestion des sites classés s'ils existent.

Enfin, il faut rappeler que **dans de nombreux cas, le reboisement des versants s'est fait naturellement** sous l'effet du réchauffement de la fin du petit âge glaciaire, couplé à une forte déprise agro-pastorale. On peut alors se poser la question de la pertinence de vouloir s'opposer à un processus naturel de "restauration" de secteurs anciennement très anthropisés... On peut ajouter à cela que même dans le cas de reboisements (et autres types de travaux) réalisés par les services RTM dès le milieu du XIXe siècle, ceux-ci avaient souvent pour vocation de "contrer" les effets hydrosédimentaires du surpâturage et de la coupe massive des arbres jusqu'à des altitudes très élevées pour la construction de maisons, la cuisine et le chauffage...

Pour toutes ces raisons, nous avons choisi de **ne pas inscrire cette action au titre des actions à préconiser** dans le cadre de l'élaboration et de la mise en œuvre d'un PGS. Cela n'exclut pas la possibilité de renouveler des expérimentations pour bien cerner les processus et revenir éventuellement sur l'intérêt de ce type d'action.

#### A. Reconnexion versants / lit

Cette action peut être mise en œuvre sur des versants actifs mais n'étant plus en connexion avec le chenal capable de les mobiliser à la suite de la construction d'ouvrages.

Cette action peut être réalisée de plusieurs manières:

- déconstruction de la structure "déconnectante";
- construction d'une structure de connexion (chenal);
- rapprochement du chenal jusqu'au pied du versant;
- curage en amont de la structure déconnectante et injection des matériaux en aval, dans le chenal principal.

#### B. Activation de l'érosion des berges

Il s'agit d'**initier ou augmenter l'érosion latérale** pour réinjecter "naturellement" les sédiments des terrasses ou du lit majeur bordant le cours d'eau. Cette action peut nécessiter une phase initiale de **dé-protection des berges** si celles-ci sont protégées artificiellement. On privilégiera l'enlèvement des protections de berges même si les protections sont en mauvais état, l'expérience montrant que des crues parfois importantes peuvent ne pas être suffisantes pour les emporter. Elle peut parfois nécessiter aussi, pour obtenir des résultats plus rapides et plus significatifs, la mise en place de **structures de suractivation de l'érosion** comme des épis déflecteurs, des dépôts en masse d'alluvions ou la réintroduction de bois dans le cours d'eau (souches, troncs, etc.) le long de la berge opposée à celle que l'on souhaite éroder, etc. Cette action permet aussi au cours d'eau d'ajuster sa largeur en

réponse aux crues importantes, en particulier dans des secteurs de confluences ou en amont ou à l'aval de secteur étroit, naturel (gorges) ou artificiel (endiguement).

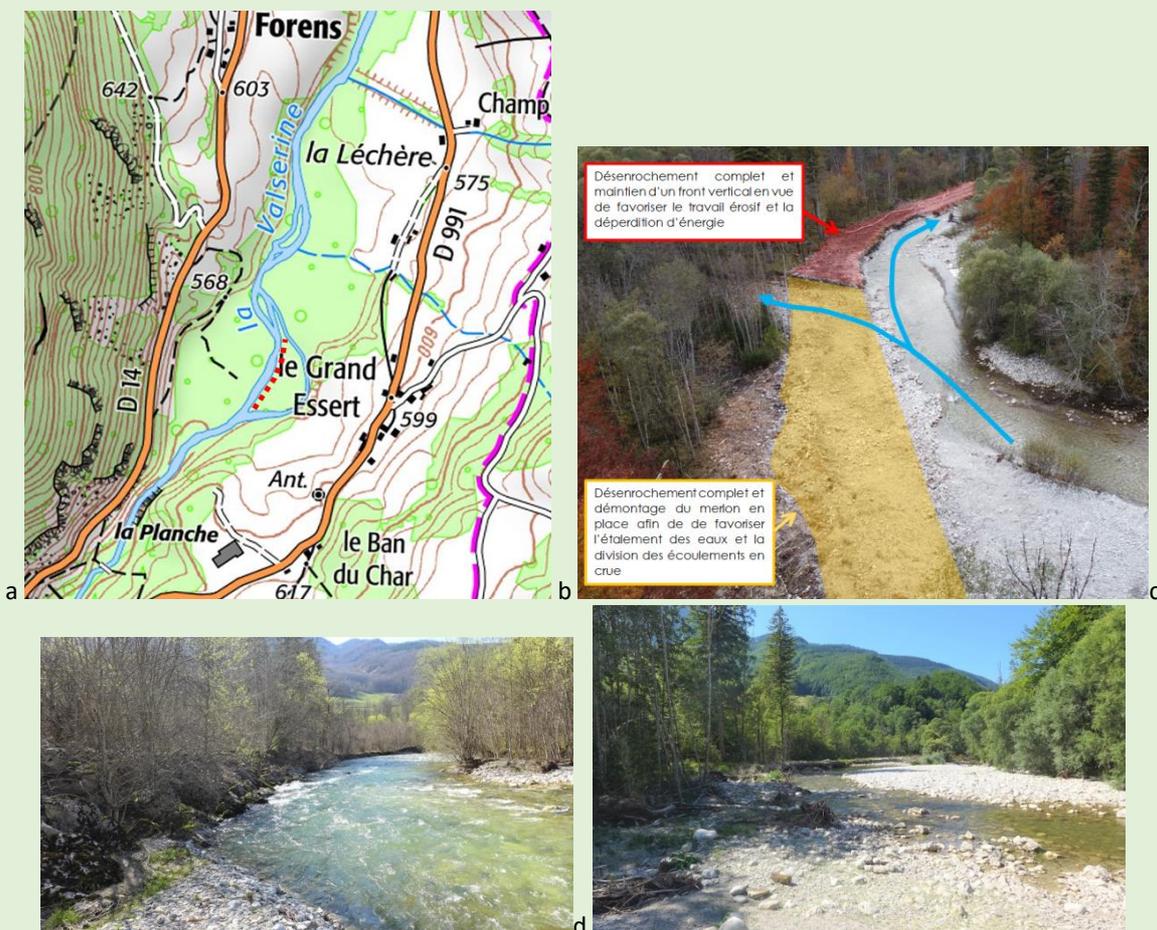
On peut aussi imaginer fragiliser les berges que l'on souhaite voir s'éroder un peu plus activement au moyen d'engins de terrassement (décompactage, réalisation d'encoches etc.).

**RAPPEL** : les **apports solides internes par érosion latérale des stocks alluvionnaires** (terrasses) bordant les cours d'eau fournissent souvent aujourd'hui une grande partie, voire **l'essentiel de leur charge alluviale grossière**, notamment dans des contextes de pressions de type barrages piégeants en amont. Cependant, en cas de fort déficit sédimentaire ou si les volumes érodables sont faibles, ce type de mesure seul sera probablement insuffisant et devra être accompagné de mesures complémentaires (réinjections par exemple).

**NB** : berge érodable ne veut pas dire berge érodée et bien souvent, "laisser faire" la rivière n'est pas toujours une mesure adaptée car une rivière à fort déficit sédimentaire, incisée et pavée n'a plus forcément les conditions hydrauliques lui permettant d'éroder ses berges. Il faut donc parfois l'aider en activant les processus (mise en place de déflecteurs par exemple), pré-érosion mécanique de la berge avec des engins de terrassement, etc.

**DESENROCHEMENT DE LA VALSERINE AU GRAND ESSERT (O1) (MO BIOTEC, 2020)**

- **Contexte** : Dans le cadre de la compétence GEMAPI (Gestion de l’Eau, des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations) puis du label Site « Rivières Sauvages » dont bénéficie la Valsérine, le Parc Naturel Régional du Haut-Jura s’est engagé en 2020 dans une opération de renaturation du tronçon situé au lieu-dit du grand Essert en aval du centre bourg à Chézery-Forens et ayant fait l’objet de travaux de **rectification** suite à la crue de février 1990 d’occurrence cinquantennale. Cette rectification a été complétée par des merlons/digues. Une incision progressive du plancher alluvial s’est alors manifestée se traduisant par une disparition du tressage et un enfoncement de l’ordre de 70 cm environ.
- **Portage du projet** : Parc Naturel Régional du Haut-Jura
- **Parti d’aménagement retenu** : afin de limiter l’incision constatée puis **retrouver un milieu dynamique capable de réinitialiser les habitats/espaces**, il a été choisi de restituer un plus ample **espace de mobilité** à la Valsérine en visant la division des écoulements et le débordement plus précoce des eaux en crue. En effet, dès lors que la rivière décharge une partie de son débit en lit majeur, les contraintes appliquées sur les fonds deviennent moins importantes. Il en résulte un secteur faisant naturellement office de point de « contrôle » du profil en long. Il a donc été engagé un travail de **démontage du merlon constitué de blocs d’enrochements** non liaisonnés et de matériaux alluvionnaires issus du site et ce sur plus de 70 mètres linéaires. Les matériaux constitutifs de l’ouvrage ont ensuite été concassés aux dimensions adaptées pour être réinjectés au sein du lit vif en vue de participer à la rehausse du plancher du lit.
- **Illustrations** :



### C. Amélioration structurelle de la continuité sédimentaire

Pour les **barrages et les seuils** il s'agit principalement de modifications structurelles (création ou adaptation des vannes qui permettront ensuite de réaliser une **gestion par chasses** (voir ci-dessous)). Il peut aussi s'agir de la construction de tunnels de dérivation du transport solide (*bypass tunnel*).

Il peut enfin être envisagé des **actions plus radicales telles que l'arasement ou de dérasement complet (effacement) de l'ouvrage**.

Les seuils de stabilisation torrentielle exercent encore aujourd'hui une régulation du transport solide des têtes de bassin et contribuent à la stabilisation des versants par leur effet d'atténuation des dépôts et reprises dans les chenaux à forte pente et de contrôle du profil en long. Ils contribuent également à piéger de fait des sédiments, de par la formation d'atterrissements en amont des ouvrages. Même si les volumes piégés restent souvent relativement faibles comparativement à la charge sédimentaire qui arrive de l'amont, le dérasement de certains de ces ouvrages peut être une solution intéressante pour réinjecter des volumes importants d'alluvions dans le circuit sédimentaire. Leur suppression peut être également favorable pour réactiver la recharge sédimentaire depuis les versants dans certaines têtes de bassin situées dans des secteurs aujourd'hui abandonnés et sans enjeux de protection. Il faudra toutefois vérifier au cas par cas que les volumes qui seront ainsi libérés, plus ou moins brutalement selon la mise en œuvre de ces arasements et l'hydraulicité des cours d'eau, ne mettront pas en danger certains enjeux situés à leur aval. Pour ce qui concerne les **anciennes « grandes » fosses d'extraction** en lit mineur encore « piégeantes », il est souvent difficile de les rendre « transparentes » au charriage tant que leur remplissage n'est pas achevé.

Des solutions de contournement ont déjà été mises en œuvre sur de petits cours d'eau (la Veyle dans l'Ain par exemple (Figure 84)) mais semblent irréalisables pour de plus grandes rivières (exemple du Doubs (Figure 85)).



Figure 84 : le nouveau tracé de la Veyle (01), creusé intégralement dans le lit majeur en 2009 pour « sortir » le cours d'eau d'une gigantesque gravière qui avait été réalisée sur son cours et au-delà.



Figure 85 : exemple d'une énorme gravière réalisée dans le lit mineur du Doubs aval (39)... encore pas complètement comblée en 2020 (vue de dragues flottantes en action dans les années 70, puis situation dans les années 2000, 2010, 2020). La taille du cours d'eau (80 m de large) rend difficile une solution de type « Veyle »

## LA BLEONE A DIGNE (04)

- Contexte** : La Bléone a été le siège d'**extractions massives de granulats** entre 1970 et 2000. On estime que pendant près de 30 ans, le volume prélevé annuellement (150 000 m<sup>3</sup>) correspondait à 2 fois les apports naturels annuels théoriques. Ces activités d'extraction, essentiellement concentrées entre Digne et Malijai ont été à l'origine d'une **incision généralisée du lit mineur** (jusqu'à près de 4m par endroit) qui a eu des conséquences majeures sur le fonctionnement de la rivière et sur divers ouvrages : effondrement d'une des piles du Grand Pont de Digne les Bains en 1973, déchaussement de digues et de protections de berges, aggravation des phénomènes d'érosion là où les berges n'étaient pas protégées, déconnexion de prises d'eau de canaux, déconnexion et/ou assèchement d'adoux. Pour remédier à ces effets, les collectivités et/ou les services de l'Etat ont construit, entre 1974 et 1997, **4 seuils transversaux dans la traversée de Digne pour stabiliser le profil en long**. Ces ouvrages, s'ils ont bien joué leur rôle de stabilisation du lit, sont néanmoins à l'origine d'autres impacts : accumulation des sédiments en amont avec réduction de la capacité d'écoulement du lit et donc augmentation du risque d'inondation, déficit sédimentaire en aval avec déchaussement de digues et de prises d'eau, déconnexions biologiques entre l'amont et l'aval des seuils (obstacles) à la continuité piscicole.
- Portage du projet** : Syndicat Mixte d'Aménagement de la Bléone (SMAB).
- Parti d'aménagement retenu** : En raison des nombreux effets négatifs de ces ouvrages et suite aux études menées par le SMAB depuis 2011, un projet global d'aménagement des 4 seuils transversaux sur la Bléone à Digne a été inscrit au Contrat de Rivière 2015-2022 signé le 21 octobre 2015. Ce projet concerne les actions suivantes : aménagement du seuil du Grand Pont, abaissement partiel du seuil du pont Beau de Rochas, arasement complet du seuil du Pont des Chemins de Fer, arasement complet du seuil de la canalisation des eaux usées de Digne (non encore réalisé).
- Illustrations** :

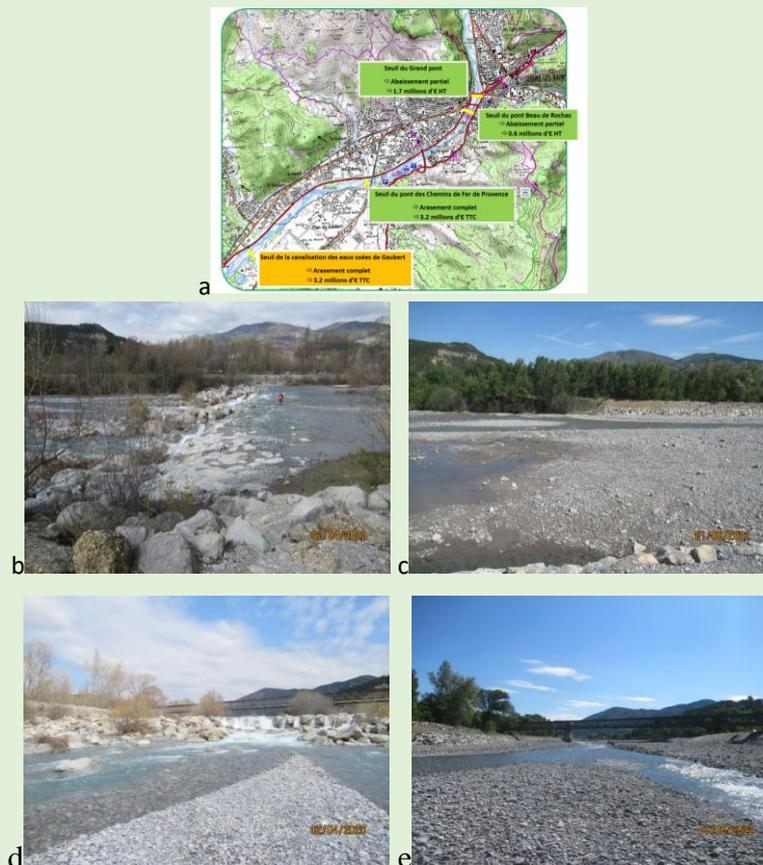


Figure 86 : a) vue générale des travaux. NB : le seuil de Gaubert n'a pas encore été effacé. c) à e) vues du seuil du pont du chemin de fer avant et après dérasement.

#### D. Amélioration de la gestion de la continuité sédimentaire

Pour les barrages et les seuils, il s'agit principalement de rechercher une amélioration de la gestion des ouvrages pour augmenter leur transparence sédimentaire (mise en oeuvre ou amélioration de la **gestion par chasses**). Cette amélioration de la gestion peut passer par une première phase de modifications structurelles (voir ci dessus : adaptation des organes de chasse (vannes), construction de *bypass tunnels*).

**NB** : s'il n'est pas possible de gérer les ouvrages par chasse, il peut être nécessaire de procéder régulièrement à des curages et à une réinjection des matériaux curés en aval (voir plus loin). Outre sur les barrages et les seuils, ce type d'action de curage/réinjection peut aussi être envisagé sur tout obstacle à la continuité sédimentaire qui ne pourrait être modifié structurellement (ponts étroits notamment, passages busés sous dimensionnés à l'exutoire de torrents etc).

#### E. Dévégétalisation des bancs

Il s'agit de dévégétaliser une certaine superficie de bancs alluviaux théoriquement mobiles mais ayant tendance à se fixer sous l'effet d'une **végétalisation excessive d'origine anthropique** (modification des débits de crue par des barrages situés en amont, incision du chenal vif, modification saisonnière des écoulements, tarrissement sédimentaire). L'objectif est de permettre la remobilisation des alluvions composant ces bancs par l'action des écoulements.

**NB** : il a été observé que l'érosion des bancs et la reprise des matériaux alluviaux se faisaient principalement par **sapement latéral des bancs** (comme l'érosion des berges) et assez peu par érosion sur la surface des bancs, ou alors en très forte crue. Cependant, il apparait que la dévégétalisation, avec dessouchage notamment, favorise ce sapement latéral.



Ces actions de dévégétalisation, surtout si elles sont massives, sont aujourd'hui **controversées**, en particulier si la végétalisation est naturelle (faible hydraulicité pendant quelques années). En effet, comme les versants végétalisés (voir plus haut) les bancs végétalisés peuvent présenter une certaine **richesse écologique**, voire être classés au titre de la protection de la nature. Il est donc important de vérifier que l'action de dévégétalisation préconisée présentera suffisamment d'intérêt écologique pour justifier une perte éventuelle de biodiversité liée à la présence d'une végétation alluviale en lit mineur et est compatible avec les documents de gestion des sites classés s'ils existent. Il est aussi possible que la plus-value morphodynamique soit faible et que le banc se revégétalise rapidement. Il est donc important dans le diagnostic de bien identifier les causes de la végétalisation et du ralentissement de la mobilité en plan. Celle-ci peut être associée à une modification du régime de crue ou des apports sédimentaires. C'est bien souvent sur ces facteurs amont qu'il faut agir pour espérer maintenir plus en aval des bancs nus mobiles.

### LES CHASSES (OU "TRANSPARENCES") DE BARRAGES

Les gestionnaires de barrages sont souvent confrontés à des apports sédimentaires fins et grossiers, parfois très importants, qui les ont amenés, au fil des décennies d'exploitation, à élaborer et à mettre en œuvre une gestion sédimentaire spécifique de certains ouvrages en termes de transport solide : les chasses ou transparences. Le principe consiste à **ouvrir, généralement en période de hautes eaux, les organes permettant de rendre le barrage le plus transparent possible vis-à-vis du transport solide (vannes de fond principalement)**. Parallèlement, la retenue est abaissée en-dessous de la cote minimale d'exploitation, ce qui permet à la rivière de retrouver son thalweg d'origine au sein duquel le transfert des matériaux est possible en écoulement libre, comme sur un cours d'eau naturel.

Il faut différencier ces opérations des "chasses d'entretien courant" qui consistent en une ouverture des organes de fond à cote haute du plan d'eau, pour dégager les vannes de fond dans un objectif de sûreté.

Les opérations de chasses **se différencient aussi des opérations de vidange qui n'ont pas pour objectif d'évacuer les sédiments de la retenue, mais d'en vider l'eau pour visiter les ouvrages** pour des raisons de sécurité ou pour réaliser des travaux dans les parties normalement immergées. Les vidanges sont programmées longtemps à l'avance et s'effectuent généralement en période de basses eaux.

**L'obligation de continuité sédimentaire des sédiments grossiers** dans le cadre de la déclinaison française de la Directive Cadre sur l'Eau se traduit aujourd'hui par une **augmentation des demandes** de l'Administration de réaliser des **chasses** plus fréquentes lors des épisodes de crue. Cependant, ces chasses se traduisent parfois aussi par un transfert important et brutal vers l'aval des sédiments fins (limons et sables) accumulés dans la retenue depuis la dernière opération (soit souvent 1 à plusieurs années).

**L'idéal serait alors, sur les ouvrages où cela est techniquement possible, d'envisager des chasses assez fréquentes sur débits de hautes eaux pour limiter l'accumulation de sédiments fins** et des chasses moins fréquentes, mais calées sur des débits entrants plus élevés, pour faire transiter les sédiments grossiers en limitant les apports massifs de sédiments fins à l'aval.

Dans l'exemple ci-dessous (barrage de Cadarache sur la Durance), le débit de déclenchement d'une transparence est de 500 m<sup>3</sup>/s (soit environ 2.5 fois le module) si celui-ci est estimé durable dans le temps.

La durée d'ouverture de l'ouvrage dépend des caractéristiques de la crue mais aussi de certaines obligations de l'exploitant vis-à-vis d'autres usages. Ici, il s'agit d'obligations d'approvisionnement en eau des tiers (prélèvements des canaux d'irrigation). L'exploitant estime approximativement la durée dont il dispose pour réaliser une transparence, à partir des prévisions de débit et du suivi en temps réel des niveaux d'eau dans les canaux de Cadarache à Mallemort. Sur ce site, EDF réalise en général une transparence par an si le débit de déclenchement est atteint. Le diamètre médian des alluvions qui transitent à travers l'ouvrage est de l'ordre de 30 à 40 mm.

**NB** : La gestion des ouvrages en chasse implique une bonne réactivité de l'exploitant, ce qui se traduit souvent par de fortes contraintes de gestion de personnel (les jours fériés ou la nuit si les « bons » débits se présentent...), parfois plus compliquées à gérer que les contraintes techniques.



Figure 87 : a) le barrage de Cadarache en transparence. b) les bancs alluviaux liés au transit des matériaux grossiers au travers de l'ouvrage

### TRAVAUX D'ESSARTEMENT SUR LE GRAND BUËCH (05) (2018)

- **Contexte** : Le Buëch est une rivière des Alpes du Sud qui prend sa source, pour la branche du Grand Buëch, à Lus-la-Croix-Haute. C'est une rivière en tresses pouvant alterner parfois avec un chenal unique divagant. Le fonctionnement naturel du Buëch a largement été perturbé au cours des derniers siècles par les activités humaines : extractions massives de sédiments dans le lit mineur entre 1950 et début 2000, endiguement de plusieurs tronçons depuis le XIXe siècle, reboisement des bassins versants (spontané ou planifié) réduisant fortement les apports sédimentaires, travaux de correction torrentielle sur certains affluents actifs. Il en résulte une tendance à la chenalisation et à l'incision du lit mineur (1 à 2 m depuis 1 siècle).
- **Objectifs des opérations de traitement des atterrissements** : Les opérations de redynamisation des bancs alluvionnaires menées sur le Grand Buëch par le Syndicat Mixte de Gestion Intercommunautaire du Buëch et de ses Affluents (SMIGIBA) visaient à répondre à une double problématique :
  - **réduire les menaces pesant sur les infrastructures et les enjeux humains** en guidant le chenal principal du cours d'eau pour qu'il divague plus loin des zones à enjeux. Il s'agit de "décharger" les zones vulnérables au profit de zones naturelles non vulnérables de l'espace de bon fonctionnement du cours d'eau, notamment d'anciens bancs plus ou moins boisés. Cela peut permettre d'éviter ou de reporter des travaux d'artificialisation des berges ;
  - **redynamiser le tressage** qui a été dégradé par les différentes pressions présentées plus haut ;
- **Portage du projet** : MOA : Syndicat Mixte de Gestion Intercommunautaire du Buëch et de ses Affluents (SMIGIBA). Coûts des travaux : 72K€ HT. Surface : environ 10ha. Cadre réglementaire : DIG.
- **Parti d'aménagement retenu** : Essartement « simple » : coupe et broyage de la végétation de surface. Essartement/scarification : coupe à blanc et « labourage » mécanique (profondeur de 0,90 m jusqu'à 1,30 m selon l'outil) et souches laissées sur place. Ouverture de chenaux secondaires : création de tranchées (largeur 3-5 m) traversant les bancs, guidant les écoulements et favorisant les érosions tout en délestant le chenal principal et ses divagations vers des zones vulnérables. Les chenaux secondaires sont initialement fermés en tête par des merlons fusibles. Les terrassements ont donc été réalisés hors d'eau, les chenaux ne sont alimentés et "capturés" par la rivière qu'à l'occasion de crues.

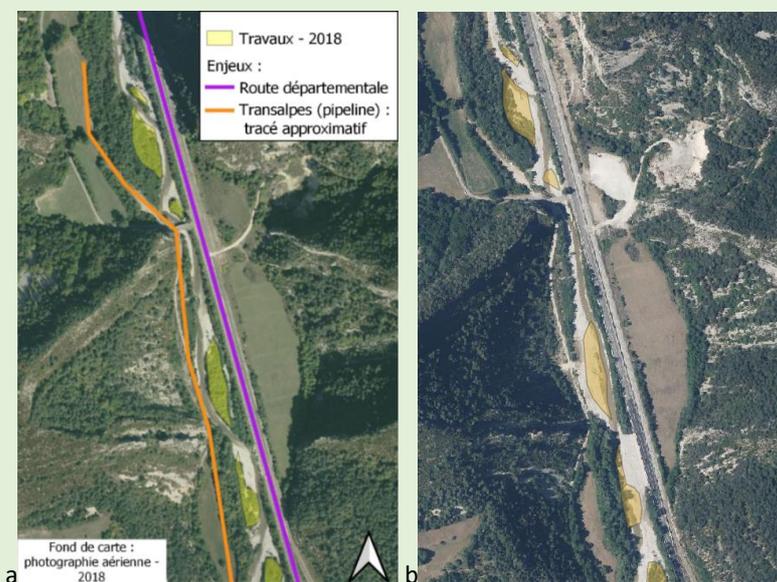


Figure 88 : a) vue d'une partie des secteurs d'intervention en 2018 sur le Grand Buëch. Les polygones jaunes correspondent aux secteurs d'intervention où la végétation s'était fortement développée entre 2003 et 2018. Les travaux ont consisté à créer des chenaux centraux sur les atterrissements et à essarter / scarifier les bancs. b) situation en 2022.

#### F. Réinjection sédimentaire

L'action consiste à réinjecter en un ou plusieurs points le long d'un cours d'eau, un certain volume de sédiments grossiers qui sera ensuite repris par l'écoulement et **recréera un flux sédimentaire**. Ce type d'action **fait souvent suite à une action de curage** au droit d'un obstacle plus ou moins important à la continuité sédimentaire naturelle (barrage, seuil, pont étroit, etc.).

Le bon dimensionnement et la bonne récurrence de l'action nécessitent des objectifs quantifiés. La mise en œuvre de l'action est généralement simple : déversement des sédiments dans le cours d'eau en talus ou en cordon.

Un **guide technique** ciblé sur les réinjections sédimentaires est en cours de rédaction par l'OFB et divers autres contributeurs.

**NB : Il ne faut pas confondre cette action avec une recharge sédimentaire** (voir plus loin) qui vise à recréer directement in situ, un matelas alluvial d'une certaine épaisseur, dont on ne souhaite généralement pas la remobilisation par l'écoulement, ou alors très modeste et peu fréquente (on ne vise généralement pas la recréation de flux sédimentaires). Réinjection et reconstitution d'un matelas peuvent aller de paire sur des tronçons très affectés par un déficit sédimentaire, la reconstitution du matelas permettant de restaurer rapidement les habitats perdus et la réinjection (amont) permettant de préserver durablement ces habitats ainsi restaurés.

**REINJECTION SEDIMENTAIRE SUR LE BUECH EN AVAL DU BARRAGE DE ST SAUVEUR (05) (EDF, 2016)**

- **Contexte** : L'opération avait un double objectif : **réduire l'engravement** de la retenue Saint-Sauveur afin de limiter le risque inondation en amont au droit de certains enjeux vulnérables et **améliorer le transit sédimentaire grossier** en aval de l'ouvrage, dans un tronçon fortement déficitaire.
- **Portage du projet** : EDF
- **Parti d'aménagement retenu** : 43 500 m<sup>3</sup> de sédiments grossiers ont été curés en queue de retenue puis réinjectés à environ 250 m en aval du barrage, ce qui a nécessité une rotation de tracto-bennes avec un rythme de 2500 m<sup>3</sup>/j (soit 4500 à 5000 camions pour la totalité du volume). Les matériaux ont été disposés en deux merlons de chaque côté du chenal actif sur des surfaces préalablement scarifiées. Leur hauteur varie de 1,3 m à 2,8 m au-dessus du terrain naturel sur une longueur de 360 m. Les remblais adoptent un profil de type dissymétrique, plus volumineux, plus long et plus pentu en rive gauche. Un chenal secondaire a été creusé pour faciliter l'érosion dans le merlon de rive gauche. Les sédiments n'ont pas été criblés avant réinjection (Brousse et al., 2019).
- **Illustrations** :

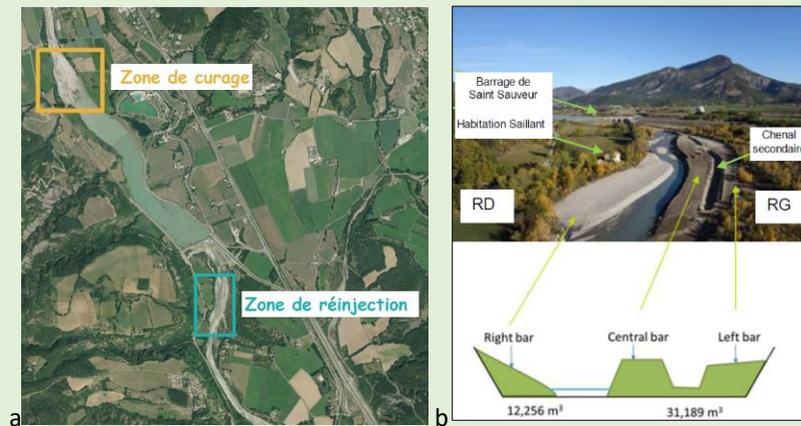


Figure 89 : a) vue de la zone de projet. b) vue oblique et en coupe des merlons de réinjection (Brousse et al., 2019)

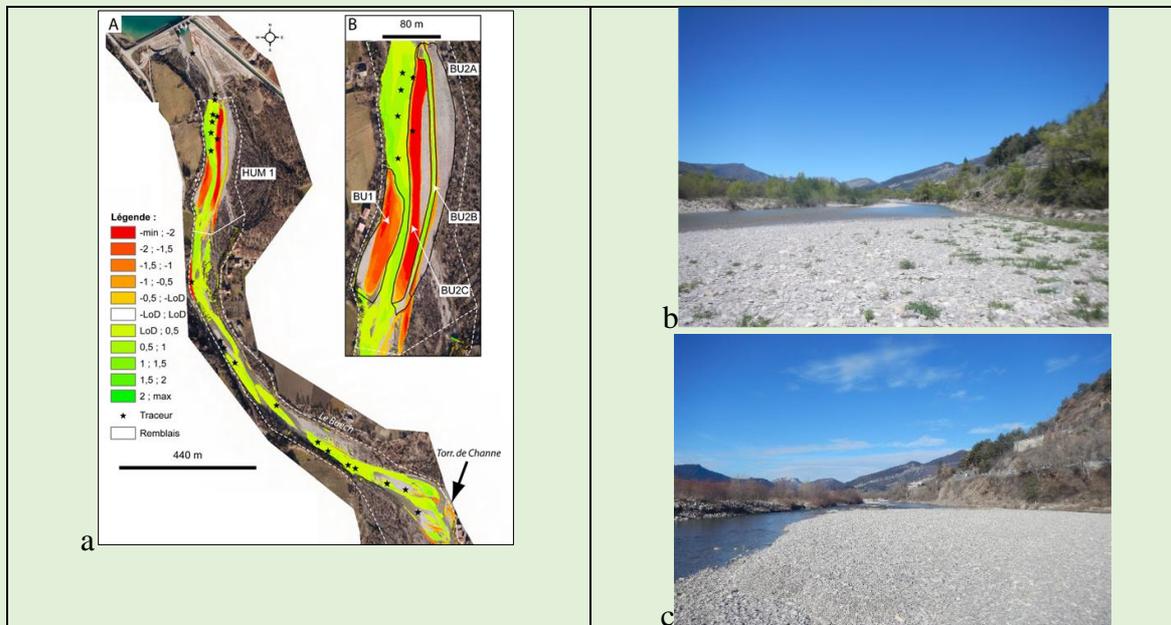


Figure 90 : a) bilan sédimentaire morphologique ou partiel du tronçon aval suite à la première crue post-réinjection (11/2016). b) et c) vue de la diminution de la granulométrie globale des alluvions sur un banc sensiblement au droit du torrent de Channe ((Brousse et al., 2019)).

### 3.1.9.1.2.M.A. : Mettre en place des micro-structures de piégeage

Il s'agit de construire de **petits ouvrages** pour favoriser le dépôt d'alluvions et/ou garantir leur maintien en place pendant un temps suffisamment long pour qu'ils puissent assurer les objectifs morphoécologiques visés et les fonctionnalités écologiques associées :

- restaurer les SGF (Surfaces de Granulométrie Favorable) pour la reproduction des espèces de poissons lithophiles ;
- augmenter l'épaisseur alluviale (globale ou sur certains types de faciès) pour restaurer les fonctionnalités de la zone hyporhéique (habitat des macro-invertébrés et des poissons benthiques, régulation thermique, capacités d'autoépuration) ;
- résorber / atténuer les affleurements du substratum (mêmes objectifs que précédemment).

#### A. *Implantation de petits seuils*

Pour ce qui concerne les SGF, il s'agit de petits seuils piégeant à leur amont une partie des sédiments en transit (remous solide). Ces ouvrages « piscicoles » étaient très en vogue dans les années 1960 à 90 mais de nombreux gestionnaires considèrent aujourd'hui qu'ils ont eu finalement plus d'impacts négatifs que positifs...à tel point qu'ils ont plutôt tendance à les démanteler. Nous citons cependant ce type d'action car il pourrait parfois être intéressant d'y recourir si les alternatives (voir ci-dessous) ne suffisent pas.

**NB**: la construction de seuils est soumise à la rubrique 3.1.1.0 de la nomenclature IOTA : Installations, ouvrages, remblais et épis, dans le lit mineur d'un cours d'eau, constituant un obstacle à la continuité écologique :

- entraînant une **différence de niveau supérieure ou égale à 50 cm, pour le débit moyen annuel** de la ligne d'eau entre l'amont et l'aval de l'ouvrage ou de l'installation (**autorisation**) ;
- entraînant une **différence de niveau supérieure à 20 cm mais inférieure à 50 cm** pour le débit moyen annuel de la ligne d'eau entre l'amont et l'aval de l'ouvrage ou de l'installation (**déclaration**).



L'implantation de seuils transversaux, même de faible chute (quelques dizaines de centimètres) peut avoir des **impacts négatifs**, plus ou moins durables :

- le fait de favoriser les dépôts sédimentaires grossiers va limiter, pour un temps, leur transit vers l'aval. Il faudra donc bien vérifier en préalable que cette action présente plus d'intérêts que d'inconvénients ;
- si les faciès créés en amont de ces seuils sont trop lenticques, les substrats alluviaux créés risquent de se colmater assez vite, ce qui leur fera perdre une grande partie de leur intérêt ;
- enfin, dans un contexte national où l'on essaie de favoriser la continuité sédimentaire et piscicole par le dérasement de seuils existants, il n'est en général peu pertinent de proposer d'en construire de nouveaux.

#### B. *Implantation de déflecteurs divers*

Il peut s'agir de petits épis, blocs rocheux ou **amas de bois mort** favorisant des contre-courants dans lesquels se déposeront les sédiments de taille souhaitée (graviers, cailloux fins). Même si ce sont souvent de petites zones, elles sont généralement très favorables pour la reproduction des salmonidés. Cette solution semble préférable à l'implantation de petits seuils car elle évite notamment les impacts cités plus haut (ralentissement de l'écoulement, colmatage des substrats nouvellement créés, etc.).

**NB** : Si l'on vise une **augmentation généralisée de l'épaisseur alluviale**, sans passer par une opération de « recharge » (voir plus loin) ou une réduction importante des surfaces où le substratum affleure, il faut multiplier les structures et sans doute passer parfois, sous réserve qu'il n'y ait pas d'alternative efficace, par l'implantation de **structures transversales de type seuils**. Si les apports solides sont estimés insuffisants, il est nécessaire de passer directement à une **action de recharge**.

### 3.1.9.1.3.M.A. : Augmenter la largeur du lit mineur

**NB** : ce moyen d'action est déjà un type d'action.

- Rappel des objectifs visés :
  - Augmenter l'épaisseur alluviale (globale ou sur certains types de faciès) ;
  - Stabiliser l'incision ;
  - Rehausser le fond alluvial (notamment pour restaurer les connexions rivière / nappe) ;
  - Augmenter la surface de faciès spécifiques (en particulier les radiers et les plats courants) ;
  - Restaurer/augmenter la largeur de la bande active ou de la bande de tressage ;
  - Restaurer/augmenter le nombre de chenaux secondaires.

La **puissance spécifique** ( $\omega$ ) d'un cours d'eau, qui lui donne notamment sa capacité de charriage des alluvions, est proportionnelle à sa pente, à son débit et à sa largeur.

$$\omega = \gamma QJ/l \text{ (en watt/m}^2\text{)}$$

où  $\gamma$  est le poids volumique de l'eau (9810 N/m<sup>3</sup>), Q le débit (m<sup>3</sup>/s) (on prend souvent le débit de pleins bords), J la pente de la ligne d'énergie en m/m et l la largeur du lit pour le débit utilisé (m).

Le fait d'augmenter la largeur du lit mineur (largeur dite « de pleins bords ») va donc réduire la capacité du cours d'eau à transporter des sédiments et donc favoriser le dépôt d'une partie de la charge, les termes pente et débit restant constants.

Les méthodes d'élargissement sont classiques et basées sur des travaux de terrassement aux engins de chantier.



Favoriser les dépôts sédimentaires grossiers par élargissement du lit mineur va limiter, pour un temps, leur transit vers l'aval. Il faudra donc bien vérifier en préalable que cette action présente plus d'intérêts que d'inconvénients. Si le lit se végétalise et se rétracte, il faut en outre en comprendre les raisons car les effets de ce type d'action sont bien souvent peu durables

### 3.1.9.1.4.M.A. Augmenter directement l'épaisseur alluviale

Ce moyen d'action a pour objectif de **recréer immédiatement une certaine épaisseur alluviale** dans un secteur de cours d'eau particulièrement incisé (avec substratum affleurant par exemple), de manière à obtenir très rapidement les résultats attendus en termes de restauration de certaines fonctionnalités liées à la présence d'un substrat alluvial : habitats aquatiques, processus d'autoépuration, régulation thermique, rehausse de la nappe alluviale d'accompagnement, etc. **NB** : **Contrairement à la réinjection sédimentaire** présentée plus haut, l'objectif n'est **pas de restaurer un flux sédimentaire**. Il est même souvent envisagé de **limiter au maximum la remobilisation par l'écoulement** de la couche alluviale restaurée en accompagnant la recharge de travaux connexes tels que la mise en place de petits seuils en aval pour réduire la pente et la capacité de transport qui en résulte.

#### A. Recharge sédimentaire massive

La recharge sédimentaire peut être massive et concerner un linéaire important du cours d'eau, sur tout ou partie de sa largeur (voir les 2 fiches exemples ci-dessous, Herbasse et Drac).

#### B. Recharge sédimentaire "chirurgicale"

Si l'on vise une action spécifique très localisée, comme par exemple la création de quelques frayères à salmonidés, la mise en œuvre de l'action peut être plus **chirurgicale** (positionnement précis des sédiments dans le cours d'eau dans des endroits favorables en termes de vitesse et hauteur d'eau en période de reproduction) (voir la fiche exemple Maronne).

**RECHARGE DU LIT DE L'HERBASSE A MONTRIGAUD (26) (MO BIOTEC, 2018).**

- **Contexte** : L'opération avait comme objectifs conjoints le rééquilibrage du profil en long de la rivière, la recréation d'un milieu attractif et biogène, ainsi que le rétablissement de la continuité écologique dans un contexte de **morphologie en « canyon » du fait d'une incision massive** liée à la rectification du tracé en plan.
- **Portage du projet** : Le maître d'ouvrage du projet est le Syndicat Intercommunal d'Aménagement du Bassin de l'Herbasse (SIABH).
- **Parti d'aménagement retenu** : Outre le dérasement d'un seuil, l'extension du linéaire de rivière et la diversification de son tracé par réactivation d'anciens méandres, puis l'élargissement du lit mineur, l'action principale a consisté en un **important rehaussement des fonds du lit sur un linéaire de près de 260 mètres** par mise en œuvre de matériaux argilo-terreux (sous-couche/issus des travaux de déblais menés sur site), surmontés d'une **épaisseur de plus de 80 cm** de matériaux alluvionnaires apportés.
- **Illustrations** :



Figure 91 : les travaux de recharge alluviale sur l'Herbasse a) 06/2018, b) 07/2018, c) 09/2018 d) 03/2019. © Biotec

**RECHARGE DU LIT DU DRAC A SAINT BONNET (05) (MO BURGEAP, 2014)**

- **Contexte** : Le Drac en Champsaur (05) est une rivière en tresses qui draine la partie sud du massif des Ecrins (336 km<sup>2</sup>), en bénéficiant des apports du Drac Blanc et du Drac Noir. Sur un linéaire de près de 4 km, en amont de St-Bonnet-en-Champsaur, le Drac a fait l'objet de **nombreuses extractions** jusque dans les années 1980. Les prélèvements s'opéraient dans le matelas alluvial de la bande active, qui était pourtant limité à quelques mètres d'épaisseur au-dessus de marnes argileuses tendres. Le lit a été stabilisé par deux seuils d'environ 3 m de dénivelé dans la traversée du village (seuil des Barraques en aval, seuil de la Déchèterie en amont), et par un seuil de faible hauteur au droit de la prise d'eau du plan d'eau touristique du Champsaur. Malgré ces aménagements, **l'incision du lit s'est poursuivie** et a atteint son paroxysme dans les années 2010, après les crues vingtennales des années 2006 et 2008. Trois facteurs notamment ont favorisé cette incision :
  - 1) une exploitation autorisée de granulats en lit mineur subsistait en amont (carrière Pascal, plaine de Chabottes) et favorisait une érosion progressive par privation d'apports amont,
  - 2) l'incision sur le linéaire devenait très rapide une fois les horizons argileux tendres atteints (formation de canyons),
  - 3) les seuils aval avaient été calés sous le profil en long historique, créant ainsi une pente d'énergie plus élevée que l'initiale (1%) et favorisant une érosion régressive.Le Drac sur ce linéaire était donc dans l'incapacité de reconstituer son matelas alluvial. Lors des études d'avant-projet de restauration en 2012, l'incision atteignait en moyenne 3 m sur les 4 km concernés (en référence au profil des GFH du début 20<sup>ème</sup> siècle), et 5 m au pied du seuil du plan d'eau, qui menaçait de céder et de propager l'incision en amont. Une telle situation entraînait de nombreux enjeux écologiques : pavage des fonds, colmatage, pertes d'habitats aquatiques et humides, drainage de la nappe et dépérissement des boisements, discontinuité biologique (seuils, confluences perchées). Les enjeux étaient également socio-économiques et sécuritaires : glissements de terrain sur les versants (habitations, STEP, route nationale), augmentation des risques hydrauliques en aval (du fait de l'absence de débordements), risques pour la digue du plan d'eau, les seuils, la prise d'eau, etc.
- **Portage du projet** : Communauté Locale de l'Eau du Drac et de ses Affluents (CLEDA).
- **Parti d'aménagement retenu** : Les processus morphodynamiques sur ce linéaire étant irréversibles, il était nécessaire de réaliser une opération ambitieuse afin de rétablir un équilibre sédimentaire et des fonctionnalités écologiques satisfaisantes. Une forte volonté politique de la CLEDA et l'accompagnement financier et technique des partenaires ont permis de réaliser en 7 mois sur l'hiver 2013-2014 **l'un des plus importants projets de restauration par recharge sédimentaire jamais réalisés**. La première mesure a consisté dès 2012 à fermer l'exploitation de granulat située en amont du site afin de rétablir des apports (qui peuvent être estimés à environ 20-30 000 m<sup>3</sup>/an). Les principes de restauration ont été basés sur une **recharge en sédiments (355 000 m<sup>3</sup> sur 3,6 km, soit en moyenne 100 m<sup>3</sup> par mètre de cours d'eau)** provenant d'anciennes terrasses voisines et d'apports externes. En parallèle, la **bande active a été élargie d'un facteur 3** (38 m à 110 m en moyenne). Le calage du profil en long d'équilibre a été réalisé en référence à celui des grandes forces hydrauliques (IGN) et en visant à recouvrir significativement les horizons argileux repérés par une étude géotechnique. Ces deux objectifs de pente et de cote altimétrique ont démontré que le seuil de la déchèterie, point d'ancrage aval du profil en long restauré, était calé environ 1,65 m trop bas. Il a donc été fait le choix de **rehausser ce seuil**. Comme il était en mauvais état et infranchissable, le seuil a été dans un premier temps reconstruit en 2013 sous la forme d'une rampe à 6% de pente (2,3 m de dénivelé, 38 m de longueur) équipée d'une passe à poissons, puis rehaussée d'une autre rampe similaire (1,65 m de dénivelé, 27 m de longueur) en 2014, en préalable à la recharge. Ce double aménagement, bien qu'imposant, est intégré dans le paysage alluvial du fait de la faiblesse des pentes des rampes. Il apparaît aujourd'hui comme un ouvrage indispensable qui a permis de stabiliser l'état morphologique du Drac et de restaurer ses fonctionnalités sur 4 km de linéaire en tresses.

• Illustrations :

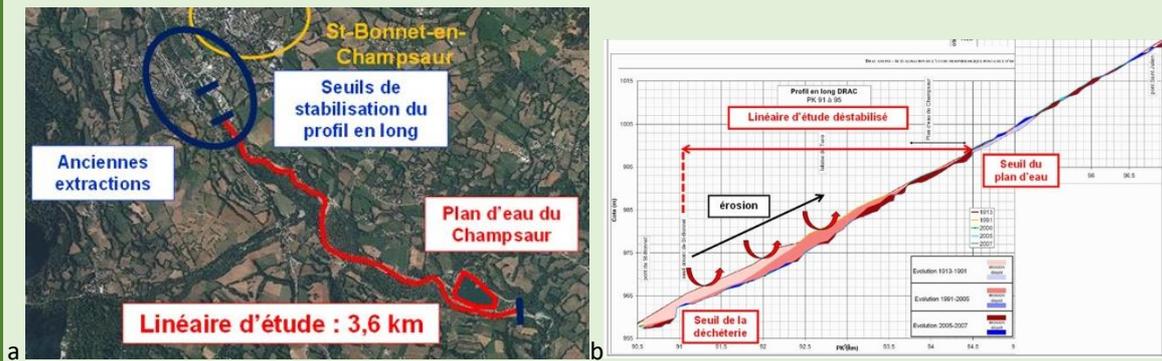


Figure 92 : a) localisation du secteur restauré et b) historique de l'évolution du profil en long (BURGEAP, 2014)

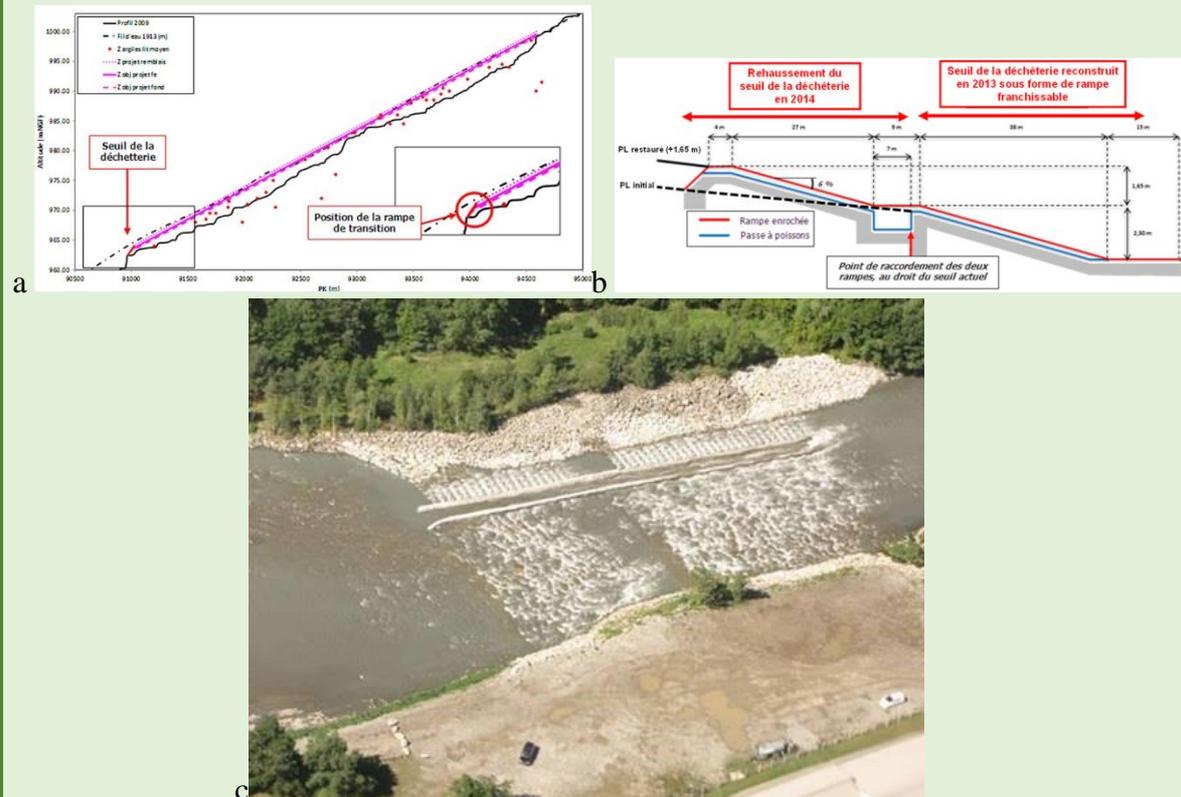


Figure 93 : a) vue du projet de recharge avec le seuil de calage en aval. b) détail du seuil et de son rehaussement c) vue aérienne (BURGEAP, 2014)

**RECHARGES SÉDIMENTAIRES CHIRURGICALES SUR LA MARONNE (19) (MO ECOGEA, 2016)**

- Contexte :** La Maronne est un affluent majeur de la Dordogne, confluant avec elle en rive gauche à l’aval immédiat du barrage du Sablier, premier ouvrage infranchissable de la « chaîne Dordogne » et « terminus » pour les migrateurs. Les 9 derniers kilomètres de son cours sont soumis à deux pressions majeures : une dérivation de l’eau et un débit réservé entre le barrage EDF de Hautefage et l’usine hydroélectrique (tronçon court-circuité d’environ 3 km) puis, sur les 6 derniers kilomètres en aval de l’usine, à un régime d’éclusées. Lorsque de forts débits sont turbinés à l’usine de Hautefage, la Maronne attire donc une partie importante des grands salmonidés migrateurs (saumon atlantique et truite) remontant la Dordogne. Elle présente donc un intérêt majeur pour la reproduction de ces poissons migrateurs sur le bassin. Le tronçon court-circuité de la Maronne, plus favorable à la reproduction que celui soumis aux éclusées, montre cependant un important **déficit en habitats de reproduction pour les salmonidés**, habitat constitué de graviers et petits galets. Depuis la construction du barrage (1958), ces granulats favorables autrefois présents dans cette portion de rivière, ont en effet été peu à peu emportés vers l’aval, sans renouvellement depuis l’amont, ce qui a conduit au pavage progressif du tronçon et à la disparition des frayères potentielles. Pour résorber en partie cet impact lié à ses aménagements, EDF a souhaité, en accord avec l’OFB, l’association Migrateurs Garonne Dordogne Charente Seudre (MIGADO), l’Etablissement Public Territorial du Bassin de la Dordogne (EPIDOR) et la Fédération de Pêche et de Protection du Milieu Aquatique 19, améliorer l’habitat de reproduction des grands salmonidés.
- Portage du projet :** EDF, OFB, MIGADO, EPIDOR, Agence de l’Eau Adour-Garonne.
- Parti d’aménagement retenu :** Pour atteindre cet objectif, il a donc été décidé d’apporter de la granulométrie favorable sur plusieurs zones hydrauliquement propices à la reproduction des salmonidés et notamment des géniteurs de grands salmonidés. Une modélisation hydraulique du tronçon court-circuité a permis de sélectionner 8 sites favorables sur lesquels les graviers et petits galets rechargés restent en place jusqu’à un débit de l’ordre de 80 m<sup>3</sup>/s (débit de déversements observé au barrage de Hautefage dépassé une année sur trois). Ces recharges sont donc réalisées périodiquement lorsque les crues ont fini par emporter les matériaux. Ainsi en 2022 une nouvelle recharge a été réalisée sur les 2 sites principaux qui ont accueilli dès l’hiver une cinquantaine de frayères.
- Illustrations :**

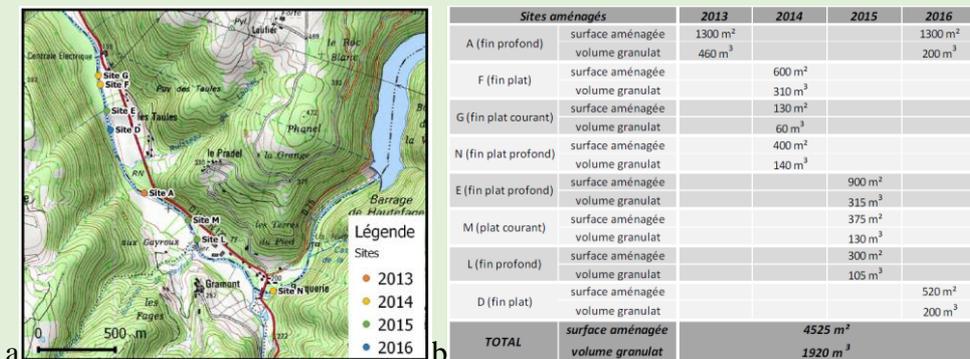


Figure 94 : a) localisation des sites de recharge, b) caractéristiques des recharges, c) le site D en cours de recharge en octobre 2016 d) les premières frayères quelques semaines après

### 3.1.9.1.5.M.A. : Mettre en place des rampes sous fluviales

**NB** : ce moyen d'action est déjà une action.

- Rappel des objectifs visés :
  - stabiliser l'incision, stabiliser le fond du lit.

Il s'agit plus d'une action de restauration hydromorphologique que de gestion sédimentaire.

L'édification de seuils et rampes est une mesure adaptée, et souvent même nécessaire, pour **éviter ou limiter des phénomènes d'incision du lit**, en particulier sur les cours d'eau puissants ayant subi des chenalisations excessives ou des extractions importantes de matériaux alluvionnaires. Sur des cours d'eau peu puissants, la réalisation de seuils et rampes peut aussi poursuivre des objectifs de diversification des faciès d'écoulement ou de «reconnexion» de zones humides annexes au cours d'eau.

Le principe consiste à fixer le fond du lit en un ou plusieurs points du linéaire pour bloquer le processus d'incision. Les rampes sous-fluviales sont des ouvrages de fond constitués généralement d'enrochements libres. Ils ne créent donc pas, s'ils sont bien conçus, dimensionnés et construits, de discontinuité écologique ou sédimentaire (si ce n'est éventuellement dans les premiers temps, jusqu'à ce que les interstices entre les blocs d'enrochements soient comblés).

Sur la base d'un diagnostic et d'un recensement des espèces piscicoles présentes (ou potentiellement désirables) sur le cours d'eau considéré, on veillera à construire des ouvrages parfaitement franchissables en respectant les principes suivants (Malavoi, Biotec, 2006):

- hauteur de chute inférieure à ~ 20 cm, et si la dénivellation de l'ouvrage doit être supérieure (rampe), développement de surfaces hétérogènes, avec une succession de zones localement plus profondes et propices au « repos » intermédiaire de la faune piscicole ;
- mise en place de structures rugueuses, facilitant la progression du poisson et limitant les effets d'accélération des écoulements, en particulier en partie amont de l'ouvrage qui constitue le point le plus sensible pour la faune piscicole (fatigue due à la progression) ;
- développement d'ouvrages (rampes) à faible pente et généralement inférieure ou égale à 5Horizontal/1Vertical (5H/1V) ;
- ancrage suffisamment profond, à la fois côté amont et aval de l'ouvrage réalisé, afin d'éviter qu'une éventuelle incision du lit, même localisée, rende l'ouvrage infranchissable ;
- ancrage suffisamment profond des ouvrages en berges, pour éviter un risque de contournement ;
- forme légèrement incurvée ou cintrée de l'ouvrage en son centre, pour éviter un étalement de la lame d'eau lors de l'étiage.

Ce type d'action est assez efficace pour bloquer une incision liée à des processus d'érosion régressive. Dans ce cas, un seul ouvrage peut parfois suffire à protéger efficacement plusieurs kilomètres à son amont. Elle l'est moins dans le cas d'un processus progressif lié à un déficit sédimentaire important, ou alors il faut multiplier les ouvrages.

**NB** : voir les remarques faites au 3.1.9.1.2, concernant les aspects réglementaires et les risques associés aux seuils

La figure ci-dessous illustre l'implantation de près d'une **quarantaine de rampes en enrochement** sur l'Arve pour stabiliser un **processus généralisé d'incision** (entre 1 m et 4 m en moyenne mais jusqu'à 12 m dans la plaine) lié à un endiguement très étroit depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et à 30 années **d'extractions massives de granulats** en lit mineur entre 1960 et la fin des années 80.

**NB** : ces rampes n'ont pas toujours été prévues franchissables par les poissons et certaines doivent aujourd'hui être modifiées pour garantir la continuité piscicole (voir ci-dessous).



Figure 95 : a) exemple d'implantation de rampes sur l'Arve en amont de Sallanches et b) rivière de contournement piscicole de deux rampes à Pressy (commune de Thyez) © SM3A

### 3.1.9.1.6.M.A. : Limiter les apports de sédiments fins

- Rappel des objectifs visés :
  - résorber/atténuer le colmatage.

L'objectif écologique de ce type d'action est de réduire voire de **résorber le colmatage fin** (superficiel et/ou interstitiel) **du substrat alluvial grossier** des cours d'eau et donc d'améliorer la qualité des habitats benthiques et les processus physicochimiques liés à une perméabilité suffisante des alluvions (régulation thermique, autoépuration).



Certains bassins présentant une lithologie particulière (marnes noires par exemple) produisent naturellement des sédiments fins. Faut-il pour autant empêcher ces apports naturels ? La question peut se poser si en aval de ces bassins, des pressions anthropiques aggravent les phénomènes de colmatage potentiellement associés (tronçons court-circuités en aval de barrages hydroélectriques, existence de seuils favorisant des faciès lentiques propices à la sédimentation, etc.).

- Plusieurs types d'actions sont possibles :
  - réduire « à la source » l'érosion des sols naturels productifs en fines ;
  - réduire « à la source » l'érosion des sols agricoles ;
  - implanter des structures linéaires de rétention sédimentaire le long du cours d'eau ;
  - implanter des structures localisées de rétention sédimentaire ;
  - maîtriser la mobilisation et le transfert des sédiments fins hors de la retenue lors des chasses et vidanges de barrages.

### 3.1.9.1.7. M.A. : Réaliser des lâchers morphogènes

- Rappel des objectifs visés :
  - résorber ou atténuer le colmatage des substrats alluviaux par des sédiments fins ou sableux ; éventuellement : restaurer / augmenter /entretenir la largeur de la bande active ou de la bande de tressage.

Les **lâchers morphogènes** sont une méthode de gestion des barrages visant à lâcher depuis les ouvrages, des débits relativement élevés afin d'induire des changements aval plus ou moins intenses dans les caractéristiques physiques des lits fluviaux.

Cela peut aller du « simple » décolmatage ou désensablement des tronçons court-circuités (c'est l'objectif le plus fréquent et le plus atteignable par ce type d'action), jusqu'à un arrachement de la végétation alluviale pionnière voire un élargissement des bandes actives alluviales ou un maintien de celles-ci dans un état peu végétalisé. C'est

aussi un moyen de régénérer le transport solide grossier dans un tronçon déficitaire, en accompagnement de réinjections sédimentaires.

Une méthodologie a été développée récemment par Loire et al. (2019, 2020) et reprise dans un **guide technique** édité par l'OFB (Loire et al. 2021). Elle présente des méthodes de dimensionnement de ces lâchers (intensité, durée, forme de l'hydrogramme, variation saisonnière et récurrence), évalue les conflits potentiels avec divers enjeux environnementaux, socioéconomiques et opérationnels associés. Elle propose également des solutions alternatives lorsque ces lâchers ne peuvent être mis en œuvre, du fait notamment de contraintes trop lourdes.

**LACHERS MORPHOGENES EXPERIMENTAUX SUR LA SELVES (12) (EDF 2019)**

- Contexte :** Dans le cadre de l'élaboration de la méthodologie citée plus haut, plusieurs lâchers morphogènes ont été réalisés sur des cours d'eau barrés par des ouvrages hydroélectriques, dont celui présenté ci-dessous, sur la Selves en aval du barrage de Maury (Loire et al., 2019) afin d'évaluer leurs effets.



Figure 96 : a) exemple de l'un des lâchers au barrage de Maury sur la Selves et vues du cours d'eau b) au débit réservé (0.24 m<sup>3</sup>/s) et c) au moment du lâcher à 20 m<sup>3</sup>/s. © R. Loire (EDF)

Trois débits ont été testés, 10, 15 et 20 m<sup>3</sup>/s. Dès le premier lâcher à 10 m<sup>3</sup>/s, près de 60% des sédiments fins avaient déjà été mobilisés et évacués sur la première station du tronçon court-circuité. Après le lâcher à 20 m<sup>3</sup>/s, la station était intégralement décolmatée.

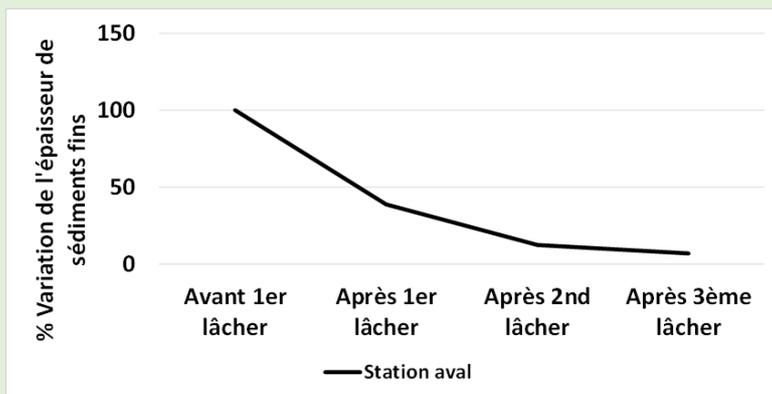


Figure 97 : évolution du colmatage dans le tronçon court-circuité de la Selves après les différents lâchers morphogènes testés (10, 15 et 20 m<sup>3</sup>/s, Loire et al., 2019).

### 3.1.9.1.8.M.A. : Favoriser la diversité des écoulements

- Rappel des objectifs visés :
  - augmenter les surfaces de faciès d'écoulement spécifiques.

L'objectif de ce type d'action est d'augmenter la diversité des faciès d'écoulement lorsque celle-ci a été diagnostiquée comme insuffisante. On peut aussi choisir de n'augmenter que la quantité de faciès d'un certain type que l'on considère comme essentiel dans le fonctionnement écologique du tronçon de cours d'eau.

Deux types d'action peuvent être envisagées, outre le « moyen d'action » déjà évoqué plus haut qui consiste à augmenter les apports solides grossiers. En effet, cette augmentation, si elle est suffisante et composée de sédiments de granulométrie adaptée, se traduira naturellement au fil des crues par la redistribution spatiale des sédiments grossiers sous forme de faciès particuliers (plats courants et radiers notamment, rapides si les apports solides sont vraiment très grossiers). Il pourrait être nécessaire, en accompagnement de cette mesure, d'augmenter la sinuosité du lit si celui-ci a été rectifié (voir ci-après) et/ou sa largeur, pour favoriser le dépôt de ces fractions granulométriques grossières (voir le moyen d'action « élargir le lit mineur »).

#### A. Supprimer les protections de berges pour favoriser la sinuosité et l'ajustement naturel de la géométrie en travers du lit mineur

Cette action rejoint celle présentée plus haut d'activation de l'érosion des berges mais dans un autre objectif qui est de permettre à la rivière d'augmenter naturellement sa sinuosité pour favoriser les processus d'érosion du fond du lit dans les concavités (et créer ainsi des mouilles) et les processus de dépôt sédimentaire au niveau des points d'inflexion entre deux sinuosités (et favoriser la création de radiers). Elle permet aussi au cours d'eau d'ajuster naturellement sa géométrie en travers.

#### B. Recréer mécaniquement un lit sinueux et les faciès associés

Ce type d'action s'apparente plus à une opération de restauration hydromorphologique qu'à une action de gestion sédimentaire. Elle consiste à recréer mécaniquement un lit sinueux et les faciès associés (mouilles, radiers, plats).

### 3.1.9.1.9. M.A. : Dévégétaliser la bande semi-active (voire la plaine d'inondation naissante)

**NB** : Ce moyen d'action peut déjà être considéré comme une action.

- Rappel des objectifs visés :
  - restaurer / augmenter la largeur de la bande active.

C'est une action qui s'apparente à celle de dévégétalisation des bancs alluviaux présentée plus haut mais l'objectif, et les modalités de mise en œuvre sont un peu différentes. L'action de dévégétalisation des bancs alluviaux a une vocation principale de permettre la remobilisation sédimentaire d'alluvions qui seraient trop « fixées » par de la végétation alluviale, herbacée, arbustive voire arborée. On vise principalement la recharge sédimentaire et cette action peut être localisée à quelques bancs. La dévégétalisation de la bande active, ou de la bande de tressage si on est sur une rivière en tresses, a également cet objectif d'améliorer la remobilisation des sédiments mais a aussi pour **vocation de recréer immédiatement, sur des espaces plus larges et des linéaires plus importants, les milieux alluviaux non végétalisés favorables à des nombreuses espèces ripicoles.**



**RAPPEL** : les actions de dévégétalisation sont aujourd'hui **controversées**, en particulier si la végétalisation de la bande active est naturelle (faible hydraulité pendant quelques années). En effet, comme les versants végétalisés (voir plus haut) et les bancs végétalisés, la bande semi-active et la plaine d'inondation naissante peuvent présenter une certaine **richesse écologique**, voire être classés au titre de la protection de la nature. Il est donc important de vérifier que l'action de dévégétalisation préconisée présentera suffisamment d'intérêt écologique pour justifier une perte éventuelle de biodiversité liée à la présence d'une végétation alluviale dans la bande autrefois active et est compatible avec le document de gestion du site classé s'il en existe. En outre, le succès de l'action est dépendant de l'hydrologie naturelle. En l'absence de crue morphogène la végétation va avoir tendance à se réimplanter, provoquant un retour à la situation initiale au bout de quelques années et la nécessité de réintervenir.

### RESTAURATION DE LA BANDE ACTIVE DE LA CHAISE DANS LA PLAINE DES BOSSONS (74) (MO HYDRETTUDES, 2023)

- Contexte** : la Chaise dans la plaine des Bossons (74) a fait l'objet de nombreuses interventions anthropiques depuis les années 70 : **extractions de matériaux alluvionnaires, rectification du tracé du lit mineur, remblaiement de certaines parties**, etc. conduisant à une **quasi-disparition de la bande active** de tressage avec fixation du lit en pied de versant. Cinq seuils de stabilisation ont été ensuite construits pour limiter l'incision du lit liée à ces différentes pressions. Ils ont été presque totalement détruits, notamment lors des dernières crues et l'érosion régressive a commencé à menacer une prise d'eau en amont. D'autre part, **le lit réduit augmentait la fréquence et la durée des débordements** vers le village de Saint-Ferréol. Ceux-ci auraient pu être encore aggravés en cas d'apports sédimentaires importants liés à la réactivation de glissements de terrain importants en amont. Il a donc été proposé par les diverses parties prenantes, de mettre en œuvre une démarche globale de restauration hydromorphologique, visant la protection contre les inondations, la gestion du transport solide, la restauration d'une plaine alluviale fonctionnelle, la restauration de la continuité écologique et enfin une amélioration globale des milieux naturels présents, tant aquatiques que terrestres.
- Portage** : Communauté de Communes des Sources du Lac d'Annecy (CCSLA) avec financement de l'AERMC et du Conseil Départemental de la Haute-Savoie.
- Parti d'aménagement retenu** : Restauration de la majeure partie de la bande active sur la plaine des Bossons (terrains communaux) en recréant un espace capable d'encaisser des apports solides potentiellement importants. Les différentes étapes de réalisation ont été les suivantes : défrichage, terrassement avec traitement de déchets, restauration d'une bande active (40 à 80 m de large), suppression des seuils, mise en place de seuils de calage (amont/aval) en assurant la continuité écologique. La pente du lit mineur a été calée à 1.6 % correspondant à la pente d'équilibre avant travaux). La restauration de la plaine permet de conserver une capacité hydraulique minimale même en cas de rehausse importante. Un mois après la fin des travaux, une crue morphogène (proche Q10) a permis de valider la restauration.
- Illustrations** :



Figure 98 : emprise des travaux



Figure 99 : vues drone avant a) et après b) travaux (Hydrétudes, 2023)

### 3.1.9.1.10.M.A. : Recreuser certains chenaux

- Rappel des objectifs visés :
  - restaurer / augmenter la fréquence de débordement et le niveau de la nappe alluviale ;
  - restaurer / augmenter le linéaire de chenaux secondaires (actifs) ;
  - restaurer / augmenter le linéaire d'annexes hydrauliques (non actives).

Il s'agit là encore plutôt d'une action de restauration hydromorphologique que de gestion sédimentaire. Cependant le creusement ou la réactivation de chenaux secondaires (actifs ou non), en particulier sur les rivières en tresses, peut aussi avoir comme effet de réactiver les processus d'érosion/transport dans des secteurs du lit qui se seraient figés de manière anormale. Cette action peut consister à ne (re)-creuser que les parties amont de ces chenaux et à laisser le cours d'eau faire le travail naturellement ensuite. On peut aussi creuser ces chenaux sur l'ensemble de leur linéaire.



Ce type d'action est souvent réalisés dans la bande semi-active de tressage ou dans la plaine d'inondation naissante dans un **but hydraulique** de réduction des écoulements dans une autre partie du lit (pour limiter les processus d'érosion de berge notamment). Cependant, ce type d'action peut parfois présenter le double intérêt de réduire des processus érosifs sur des zones considérées à enjeux ET d'améliorer ou préserver la fonctionnalité des milieux (comme dans l'exemple ci-dessous : préserver des chenaux multiples actifs, éviter le vieillissement de la végétation alluviale).



Figure 100 : exemple d'ouverture de chenaux secondaires sur le Buech à Mison (04)

### 3.1.9.2.MOYENS D'ACTION VIS-A-VIS DES AUTRES ENJEUX ET RECHERCHE DE SYNERGIES

Les enjeux et objectifs autres que ceux visés directement par le SDAGE peuvent nécessiter aussi la mise en œuvre de moyens d'action et actions qui leur sont associées. Deux possibilités sont envisageables :

- si ces enjeux et objectifs socio-économiques sont compatibles avec ceux du SDAGE, il n'y a *a priori* aucun problème. On peut même voir dans le Tableau 16 que certains moyens d'action et actions sont identiques à ceux visant des objectifs écologiques. Il faudra juste s'assurer de leur compatibilité spatiale avec les objectifs du SDAGE à l'échelle des tronçons, UHC et masses d'eau ainsi que de leur bon dimensionnement/localisation/phasage ;
- si ces enjeux et objectifs sont validés par les parties prenantes mais apparaissent de prime abord comme difficilement conciliables avec ceux du SDAGE, les moyens et actions doivent alors être adaptés pour que les effets restent compatibles avec les objectifs du SDAGE et de la DCE (notamment le **principe de non-dégradation de l'état écologique actuel**). Pour les types d'action associés à ces objectifs **d'ordre socio-économique**, nous proposons quelques préconisations à respecter pour qu'elles soient le plus compatible possible avec les objectifs de bon état écologique. Si malgré tout la compatibilité n'était pas atteignable, des arbitrages sur le niveau d'ambition des différents objectifs pourraient alors être nécessaires.

Les principaux moyens d'action et actions associées sont présentés dans le tableau de synthèse ci-dessous et détaillés plus loin.

Tableau 16 : tableau de synthèse des moyens d'action et actions pour les enjeux et objectifs autres que l'état écologique (en grisé, les actions déjà traitées plus haut dans le tableau, en bleu les actions communes avec celles visant des objectifs écologiques. Les autres couleurs ne servent qu'à distinguer les M.A.)

| Emboitement Enjeu/Objectif/Moyens d'action/Actions                    |   |   |  |   |  |  |
|---|---|---|--|---|--|--|
| Enjeu   | Objectif  | Sous-objectif niveau 1                                  | Sous-objectif niveau 2   | Moyen d'action  | Action   |  |
| Protection des biens et des personnes                                 | garantir la sécurité des biens et des personnes         | limiter les inondations                                 | conserver/restaurer une section d'écoulement suffisante                      | Réduire les apports solides   | Stabiliser les versants  |  |
|   |   |   |  | conserver/restaurer mécaniquement une                                   | Pièges à sédiments en amont  |  |
|   |   |   |  | Réduire les apports solides   | Curer jusqu'au profil d'objectif                                   |  |
|   |   | gérer les dépôts torrentiels en lit majeur              | gérer les dépôts torrentiels en lit majeur                                   | Curer les dépôts  | Curer les dépôts   |  |
|   |   |   |  | Augmenter les apports solides grossiers                                 |  |  |
|   |   | présérvier les digues                                   | Stabiliser l'incision  | Mettre en place des rampes sous fluviales                               |  |  |
|   |   |   |  | Elargir le lit mineur   |  |  |
|   |   |   |  | Créer / restaurer les protections                                       | Créer / restaurer les protections                                  |  |
|   |   | présérvier les protections de berges                    | Stabiliser l'incision  | Augmenter les apports solides grossiers                                 |  |  |
|   |   |   |  | Mettre en place des rampes sous fluviales                               |  |  |
|   |   |   |  | Elargir le lit mineur   |  |  |
|   |   |   |  | Réduire les dépôts sédimentaires favorisant l'érosion                   | Curer/aplanir les bancs latéraux                                   |  |
|   |   | protéger les infrastructures                            | protéger les infrastructures   | Créer / restaurer les protections                                       |  |  |
|   |   |   |  |   |  |  |
|   |   | présérvier les ponts                                    | Stabiliser l'incision  | Augmenter les apports solides grossiers                                 |  |  |
| Mettre en place des rampes sous fluviales                             |   |   |  |   |  |  |
| Elargir le lit mineur   |   |   |  |   |  |  |
| protéger les infrastructures  | protéger les infrastructures                            | Créer / restaurer les protections                       |  |   |  |  |
|   |   |   |  |   |  |  |
| réduire les érosions latérales des terrains en bordure de cours d'eau | réduire les processus érosifs                           | Réduire les dépôts sédimentaires favorisant l'érosion   |  |   |  |  |
|   |   | garantir le bon fonctionnement sur le long              | rectifier le tracé pour éviter les courants secondaires érosifs en concavité |   |  |  |
|   |   | Créer / restaurer les protections                       |  |   |  |  |
| protéger les berges   | protéger les berges                                     |   |  |   |  |  |
| Enjeu   | Objectif  | Sous-objectif niveau 1                                  | Sous-objectif niveau 2   | Moyen d'action  | Action   |  |
| Navigation fluviale   | Garantir les usages                                     | maintenir un chenal de navigation                       | maintenir un chenal de navigation  | Réduire les apports solides   |  |  |
|   |   |   |  | Entretien chenal navigable  | Mettre en place des structures d'autoentretien du chenal navigable |  |
|   |   | Curer jusqu'au profil d'objectif                        |  |   |  |  |
| maintenir l'accessibilité des ports et haltes fluviales               | maintenir l'accessibilité des ports et haltes fluviales | maintenir l'accessibilité des ports et haltes fluviales | maintenir l'accessibilité des ports et haltes fluviales                      | Réduire les apports solides   | Mettre en place des structures d'autoentretien de l'ouvrage        |  |
|   |   |   |  | Entretien l'ouvrage   | Curage   |  |
| Retenues à usage hydroélectrique, AEP, loisirs                        | Garantir les usages                                     | maintenir un volume utile                               | maintenir un volume utile  | Réduire les apports solides   |  |  |
|   |   |   |  | Entretien l'ouvrage   |  |  |
| Captages en nappe   | maintenir/restaurer la productivité des captages        | maintenir/restaurer le niveau de la nappe alluviale     | Stabiliser l'incision  | Augmenter les apports solides grossiers                                 |  |  |
|   |   |   |  | Mettre en place des rampes sous fluviales                               |  |  |
|   |   |   |  | Elargir le lit mineur   |  |  |
|   |   |   | Rehausser le fond alluvial   | Rehausser le fond alluvial  | Augmenter les apports solides grossiers                            |  |
|   |   |   |  |   | Mettre en place des seuils hauts                                   |  |
|   |   |   | Rehausser la cote de ligne d'eau   | Rehausser la cote de ligne d'eau  | Elargir le lit mineur  |  |
| Mettre en place des seuils hauts                                      |   |   |  |   |  |  |
| Deltas, estuaires, trait de côte                                      | Garantir le bon fonctionnement                          | garantir la continuité sédimentaire                     | garantir la continuité sédimentaire  | Rendre transparents le maximum de pièges à sédiments, fins et grossiers |  |  |

### 3.1.9.2.1. M.A. Réduire les apports solides

- Rappel des objectifs visés, qui recouvrent plusieurs types d'enjeu :
  - conserver/restaurer une section d'écoulement suffisante dans les zones à « enjeu inondation » ;
  - gérer les dépôts torrentiels en lit mineur/majeur ;
  - maintenir un chenal de navigation ;
  - maintenir l'accessibilité des ports et haltes fluviales ;
  - maintenir un volume utile des retenues de barrages ;
  - maintenir de bonnes conditions d'exploitation de retenues de barrages, notamment les prises d'eau.

Nous n'avons pas différencié ici les apports de sédiments fins ou grossiers. Selon les objectifs visés, on cherchera parfois à réduire les apports de grossiers (par exemple pour éviter les dépôts sédimentaires en traversée urbaine, à l'origine d'une augmentation de l'intensité ou de la fréquence des inondations), mais plus généralement les fins ET les grossiers (pour limiter le comblement des retenues, préserver la bonne exploitation des prises d'eau, gérer les dépôts torrentiels en lit majeur (laves notamment)).

Les actions associées rejoignent certaines de celles préconisées vis-à-vis des enjeux écologiques pour limiter les apports de sédiments :

- stabiliser les versants pour réduire « à la source » l'érosion des sols naturels productifs en grossiers et/ou en fines ;
- implanter des structures localisées de « gestion » sédimentaire (structures de « régulation » sédimentaire, avec ou sans curage des dépôts).



Ce type d'action, qui pourrait a priori être considéré comme incompatible avec les objectifs du SDAGE, est à ne proposer que sur les sites où ont été identifiés des enjeux forts et des aléas érosion/inondation justifiant une intervention à court ou moyen terme

#### A. Préconisations

Avant la mise en œuvre de ce type d'action, il est nécessaire d'évaluer l'état sédimentaire du cours d'eau et de vérifier que celui-ci n'est pas en déficit de sédiments grossiers et/ou fins dans le tronçon visé par les mesures et à son aval. S'il l'est, ce type d'action ne pourra a priori pas être mis en œuvre, sauf expertise prouvant sa **nécessité vis-à-vis d'enjeux socio-économiques forts et sa compatibilité avec les objectifs du SDAGE**.

### 3.1.9.2.2. M.A. Conserver/restaurer mécaniquement une section d'écoulement suffisante

- Rappel des objectifs visés :
  - conserver/restaurer une section d'écoulement suffisante pour limiter les inondations.

Il s'agit d'un mode de gestion « classique » visant généralement, sur une certaine largeur et un certain linéaire, à curer et souvent extraire, les matériaux alluvionnaires qui réduisent la section d'écoulement et favorisent la fréquence et parfois l'intensité des débordements.



Ce type d'action, qui pourrait a priori être considéré comme incompatible avec les objectifs du SDAGE, est à ne proposer que sur les sites où ont été identifiés des enjeux forts et des aléas érosion/inondation justifiant une intervention à court ou moyen terme

#### A. Préconisations

La mise en œuvre de ce type d'action doit s'inscrire dans la **démarche ERC**.

- **Eviter :**
  - réduction de la vulnérabilité des enjeux éventuellement menacés, voire déplacement de ceux-ci ;

- modification des ouvrages bloquants si ceux-ci sont à l'origine du problème d'alluvionnement (élargissement de pont, ponceau, buse, seuil générant un remous solide important, etc.) ;
- interventions plus en amont de réduction des apports solides, notamment grossiers (voir ci-dessus).

- **Réduire :**

La mise en œuvre de ce type d'action doit se faire de manière raisonnée, sur le linéaire le plus restreint possible. Un protocole détaillé pour la mise en œuvre de ce type d'action est présenté dans Malavoi et al., 2011. Il développe notamment les concepts de profil limites, profils d'alerte, profils à atteindre. Quatre types de profils seront déterminés pour tous les sites où des processus hydrosédimentaires menacent à court terme des enjeux forts et nécessitent une gestion par curage :

- des **profils (ou sections) limites** qui fixeront les cotes (ou sections d'écoulement) à ne pas dépasser pour garantir l'objectif de protection des enjeux identifiés ;
- des **profils (ou sections) d'alerte** qui fixeront les cotes (ou sections d'écoulement) à partir desquelles une intervention pourra être réalisée sur les atterrissements concernés, afin justement de ne pas atteindre ces valeurs limites ;
- des **profils (ou sections) à atteindre** qui donneront les caractéristiques des travaux à réaliser, avec une option « profil de sécurité » pour les rivières à fort transport solide ;
- et enfin, des cotes de préservation seront déterminées qui donneront les valeurs de cotes en dessous desquelles il ne faudra pas descendre pour préserver les éventuels autres enjeux de la zone concernée.

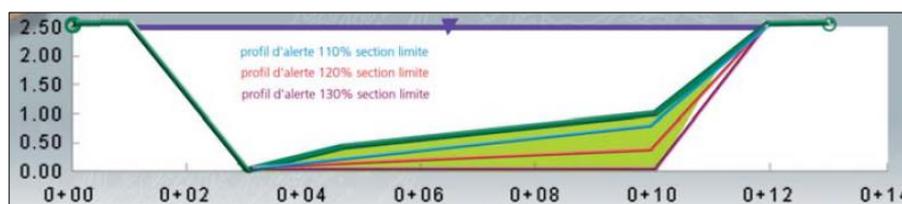


Figure 101 : Exemple de diverses possibilités de choix d'un profil d'alerte. Le choix le plus pertinent n'est possible que si l'on possède une bonne connaissance des apports solides moyens en ce point, et des probabilités d'alluvionnement en période de crue (in Malavoi et al., 2011)

- **Compenser :**

- par des actions permettant d'équilibrer les impacts associés aux travaux réalisés.

### 3.1.9.2.3.M.A. : Curer les dépôts

**NB** : ce moyen d'action est déjà une action.

- Rappel des objectifs visés :

- gérer les dépôts torrentiels en lit mineur et majeur.

Par rapport au type d'action précédent, celui-ci concerne principalement les problématiques de dépôt alluvionnaire massif, en lit mineur ou majeur, suite à des phénomènes de crues à fort charriage ou de laves. En lit mineur, c'est notamment le cas quand les apports torrentiels ne peuvent être repris rapidement par le cours d'eau collecteur et qu'il existe des enjeux socio-économiques forts dans la zone concernée, pouvant être menacés par des phénomènes d'inondation (parfois d'érosion) aggravés par ces dépôts massifs. Des curages limités sont alors parfois nécessaires, notamment pour « dégager » la confluence et amorcer une érosion régressive qui va évacuer ensuite les matériaux naturellement (dépendant de la configuration du site). En lit majeur, l'action vise principalement à nettoyer et aplanir le lit dans le secteur ayant été touché par les dépôts massifs.

#### A. Préconisations

Pas de préconisations particulières si ce n'est un contrôle et un suivi strict des travaux.

#### 3.1.9.2.4.M.A. : Augmenter les apports solides grossiers

Ce moyen d'action est partagé avec celui permettant d'atteindre certains objectifs liés aux enjeux de bon état écologique.

- Rappel des objectifs visés dans le cadre des enjeux autres :
  - stabiliser l'incision, pour limiter les risques de dégradation de divers types d'infrastructures (digues, ponts, protections de berges) et limiter l'abaissement de la nappe alluviale (pour les usages AEP notamment) ;
  - rehausser le fond alluvial : pour rehausser le niveau de la nappe alluviale et garantir les usages associés.

Les actions associées sont présentées au 3.1.9.1.1.

##### A. Préconisations

Pas de préconisations particulières si ce n'est les contraintes à prendre en compte (voir le 3.1.10).

#### 3.1.9.2.5. M.A. : Mettre en place des rampes sous-fluviales

Ce moyen d'action est aussi partagé avec les enjeux écologiques.

- Rappel des objectifs visés dans le cadre des enjeux autres : stabiliser l'incision, pour limiter les risques de dégradation de divers types d'infrastructures (digues, ponts, protections de berges) et limiter l'abaissement de la nappe alluviale (pour les usages AEP notamment).

Les actions associées sont présentées au 3.1.9.1.4.

##### A. Préconisations

Pas de préconisations particulières si ce n'est les contraintes à prendre en compte (voir le 3.1.10).

#### 3.1.9.2.6. M.A. : Elargir le lit mineur

Ce moyen d'action est aussi partagé avec les enjeux écologiques.

- Rappel des objectifs visés dans le cadre des enjeux autres :
  - stabiliser l'incision, pour limiter les risques de dégradation de divers types d'infrastructures (digues, ponts, protections de berges) et limiter l'abaissement de la nappe alluviale (pour les usages AEP notamment).

**NB** : l'élargissement ne sera évidemment pas envisageable si les deux berges sont occupées par des infrastructures importantes (digues, voies de communication majeures, etc.) ou protégées pour préserver des enjeux forts. Pour la réduction du risque de débordement, notons aussi la possibilité de créer des lits emboîtés pour un espace beaucoup plus large parcouru uniquement lors des crues moyennes à fortes.

##### A. Préconisations

Pas de préconisations particulières si ce n'est les contraintes à prendre en compte (voir le 3.1.10).

#### 3.1.9.2.7. Créer/restaurer les protections

- Rappel des objectifs visés :
  - protéger les infrastructures (digues, voies de communication, ponts, etc.) ;
  - protéger les berges sur lesquels sont développés des usages à enjeux forts.

##### A. Préconisations

Ce moyen d'action n'est pas à proprement parler une action de gestion sédimentaire. En revanche, sa mise en œuvre peut avoir des **incidences négatives sur le bon fonctionnement hydrosédimentaire** du site, voire du tronçon ou de l'UHC concernés (perte de recharge sédimentaire par érosion des berges).

Les préconisations principales consistent à mettre en œuvre la séquence ERC vis-à-vis de ces impacts sur le fonctionnement hydrosédimentaire :

- Eviter :
  - vérifier si les infrastructures doivent nécessairement être protégées ou si elles peuvent être déplacées.
- Réduire :
  - mettre en œuvre si possible des méthodes de génie écologique sur le linéaire le plus restreint possible.
- Compenser :
  - par des actions permettant d'équilibrer les impacts associés à la mise en place des protections.

#### 3.1.9.2.8. M.A. : Réduire les dépôts sédimentaires favorisant l'érosion

- Rappel des objectifs visés :
  - réduire les processus érosifs latéraux au droit de zones à enjeux

Ce moyen d'action vise à réduire les processus érosifs liés à (ou aggravés par) des dépôts alluvionnaires importants sur la rive opposée. Ceux-ci peuvent en effet favoriser la concentration et l'accélération de l'écoulement en crue.

##### A. Préconisations

La mise en œuvre de ce type d'action doit s'inscrire dans la **démarche ERC**.

- Eviter :
  - vérifier si les enjeux doivent nécessairement être protégés ou s'ils peuvent être déplacés.
- Réduire :
  - souvent réalisée par curage et évacuation des sédiments curés, il est préférable de réaliser cette opération par simple aplanissement et régalinge sur place de la masse alluviale activant l'érosion latérale.
- Compenser :
  - par des actions permettant d'équilibrer les impacts associés aux travaux.

#### 3.1.9.2.9.M.A. : Modifier la géométrie en plan

- Rappel des objectifs visés
  - réduire les processus érosifs latéraux au droit de zones à enjeux

Comme la précédente, cette action a pour vocation de réduire les phénomènes érosifs qui se produisent le long des rives du cours d'eau. Ici, l'action est guidée par le fait que la sinuosité du chenal favorise l'accélération des écoulements dans sa partie concave. Le fait de réduire la sinuosité du lit peut donc aider à diminuer l'intensité de l'érosion.



Ce type d'action, qui pourrait être incompatible avec les objectifs du SDAGE, est à ne proposer que sur les sites où ont été identifiés des enjeux forts et des aléas érosion/inondation justifiant une intervention à court ou moyen terme

##### A. Préconisations

La mise en œuvre de ce type d'action doit s'inscrire dans la **démarche ERC**.

- Eviter :

- vérifier si les enjeux doivent nécessairement être protégés ou s'ils peuvent être déplacés.
- Réduire :
  - réaliser l'intervention sur le linéaire le plus restreint possible.
- Compenser :
  - par des actions permettant d'équilibrer les impacts associés aux travaux.

#### 3.1.9.2.10. M.A. : Entretien un chenal navigable

- Rappel des objectifs visés :
  - usage navigation fluviale : maintenir un chenal de navigation dans sa largeur et sa profondeur.
- Deux types d'actions sont envisageables :
  - mettre en place des structures d'auto-entretien du chenal navigable, généralement des épis (exemples des épis Girardon sur le Rhône, chevrettes et dhuits sur la Loire) ;
  - curer le chenal jusqu'au profil type navigable.



Ce type **d'action, qui pourrait incompatible avec les objectifs du SDAGE**, est à ne proposer que sur les sites où ont été identifiés des enjeux forts et des aléas érosion/inondation justifiant une intervention à court ou moyen terme

##### A. Préconisations

La mise en œuvre de ce type d'action doit s'inscrire dans la **démarche ERC**.

- Eviter :
  - vérifier si le chenal navigable doit être préservé et pour quel gabarit.
- Réduire :
  - réaliser l'intervention sur le linéaire le plus restreint possible.
- Compenser :
  - par des actions permettant d'équilibrer les impacts associés aux travaux.

#### 3.1.9.2.11. M.A. : Entretien l'ouvrage

- Rappel des objectifs visés :
  - usage navigation fluviale : maintenir l'accessibilité des ports et haltes fluviales.
- Deux types d'actions sont envisageables :
  - mettre en place des structures d'auto-entretien de la zone ;
  - curer la zone jusqu'au profil type navigable.

##### A. Préconisations

Pas de préconisation hors la mise en œuvre de la **séquence ERC**.

- Eviter :
  - vérifier si le chenal navigable doit être préservé et pour quel gabarit.
- Réduire :
  - réaliser l'intervention sur le linéaire le plus restreint possible.

- Compenser :
  - par des actions permettant d'équilibrer les impacts associés aux travaux.

#### 3.1.9.2.12. M.A. : Mettre en place des seuils hauts

- Rappel des objectifs visés :

La construction de seuils hauts est un type d'action qui peut être proposé, avec beaucoup de précautions, pour relever rapidement le niveau de la nappe alluviale d'accompagnement :

- soit indirectement par la rehausse progressive du fond alluvial dans le remous solide créé par le seuil (s'il y a encore des apports solides grossiers suffisants) ;
- soit directement par une rehausse immédiate de la cote de la ligne d'eau sous l'effet du remous liquide créé par l'ouvrage.



**Attention de ne pas remplacer un dysfonctionnement (incision) par un autre (perte de continuité longitudinale).** En effet, même si le bénéfice pour la nappe alluviale et ses usages (AEP notamment), la création d'ouvrages hauts (seuils dénoyés même en crue notamment) peut entraîner de gros problèmes de **discontinuité écologique et sédimentaire**. Ce type d'action, qui est finalement plutôt une mesure de restauration hydromorphologique, est donc **à envisager avec prudence** et uniquement sur des **cours d'eau très incisés**. Lorsque c'est possible, on lui préférera des actions de réintroduction de bois mort en quantité importante (Wheaton, 2019)

#### A. Préconisations

Mise en œuvre de la **séquence ERC**.

- Eviter :
  - vérifier si la nappe doit absolument être relevée et s'il n'existe pas de solutions alternatives pour garantir les usages (approfondissement ou forages de nouveaux puits ailleurs, alimentation indirecte (exemple de Vichy)).
- Réduire :
  - Réaliser l'ouvrage le moins haut possible, en prévoyant des dispositifs de franchissements pour les poissons et les sédiments, et une gestion adaptée (transparence totale en crue par exemple)
- Compenser :
  - par des actions permettant d'équilibrer les impacts associés aux travaux

#### 3.1.9.2.13. M.A. : Rendre transparents le maximum de pièges à sédiments, fins et grossiers

- Rappel des objectifs visés :

Cette action s'inscrit dans le contexte d'atteinte du bon état écologique de la partie terminale des cours d'eau : leur estuaire ou leur delta, ainsi que le trait de côte. Toutes les actions qui seront menées sur leur bassin et leur cours amont pour garantir la continuité du transit des sédiments fins et grossiers seront à privilégier.

### 3.1.10. CHOIX DES MOYENS D'ACTION ET DES ACTIONS

**Les objectifs de niveau 2 ayant été quantifiés, localisés et validés en fin d'étape 2**, il s'agira de **choisir le moyen d'action** (ou la combinaison de moyens d'actions) puis **l'action** (ou la combinaison d'actions) les plus adaptés pour y parvenir, **puis de définir celle(s)-ci précisément**.



Cette phase de choix des moyens d'action et des actions qui leur sont associées, pourra, en fonction de la multiplicité des parties prenantes, des enjeux présents et des objectifs visés, être déclinée sous la forme de divers **scénarios qui seront présentés aux parties prenantes.**

### 3.1.10.1. CHOIX DU (DES) MOYEN(S) D'ACTION

La première étape technique consiste à choisir le ou les moyens d'action qui permettront de répondre aux objectifs définis. La démarche est simple.

Si l'on a par exemple pour objectif d'augmenter l'épaisseur alluviale, on peut choisir un ou plusieurs des moyens d'actions suivants :

- augmenter les apports solides grossiers ;
- mettre en place des micro-structures de piégeage ;
- élargir le lit mineur.

La détermination de l'emprise spatiale de la « zone d'objectif », réalisée lors de l'étape 2 permettra déjà d'orienter le moyen d'action. Ainsi, si la zone d'objectif présente un linéaire important, il faudra probablement s'orienter vers un moyen d'action à effet global, comme l'augmentation des apports solides grossiers. Si les zones d'objectifs sont plutôt localisées, on s'orientera alors vers des MA à portée locale (micro-structures, élargissement du lit mineur)

C'est la quantification plus précise de l'objectif qui permettra ensuite de choisir et définir la ou les actions les plus adaptées.

### 3.1.10.2. CHOIX DE(S) L'ACTION(S)

Plusieurs moyens d'actions ont été déclinés en actions, d'autres sont déjà des actions. Lorsque plusieurs actions sont possibles dans le cadre d'un même moyen d'action, il faut choisir celle(s) la (les) plus adaptée(s) à l'objectif visé. On peut s'aider pour cela du Tableau 15 présenté plus haut qui permet de distinguer les actions à vocation générique ou spécifique, les actions à portée globale ou locale, les actions à effet immédiat ou long terme et les actions à effets durables ou temporaires.

Là encore, plus les objectifs auront quantifiés et bien localisés, plus le choix de l'action ou de la combinaison d'actions sera facilité.

### 3.1.10.3. DEFINITION DE(S) L'ACTION(S)

On entend par **définition de l'action** le renseignement des caractéristiques suivantes :

- son dimensionnement
- sa localisation
- son phasage
- sa récurrence
- ses contraintes de mise en œuvre
- son coût



Ce guide étant avant tout un outil opérationnel de mise en œuvre des mesures de gestion sédimentaire préconisées par le SDAGE, (comprenant aussi parfois des mesures de restauration) ne seront détaillées ci-après que les actions visant l'**objectif global de Bon Etat écologique des eaux**. D'autre part, compte tenu de la complexité et du nombre d'actions potentiellement envisageables, il n'est pas possible de décliner les caractéristiques de définition pour chacune d'entre elles. A titre d'exemple, un guide OFB de 100 pages (Loire et al., 2021) est dédié à la seule action « lâchers morphogènes ». Un autre guide OFB est en cours de rédaction pour l'action « réinjection sédimentaire ». Ne seront donc proposées ci-après que quelques préconisations générales.

### 3.1.10.3.1. Dimensionnement

#### L'ampleur de l'action à mener sera très fortement fonction des objectifs fixés.

Si l'on prend comme exemple le moyen d'action « augmenter les apports solides grossiers », on conçoit bien que l'on ne va pas chercher à générer et/ou injecter les mêmes volumes d'alluvions (ni des mêmes granulométries) selon que l'objectif sera de recréer quelques centaines de m<sup>2</sup> de SGF dans un tronçon court-circuité ou de rehausser d'1 m sur 10 km le fond alluvial d'un cours d'eau. Ces volumes et granulométries devront donc être adaptés à l'objectif visé et évalués avec le plus de précision possible (par expertise, modélisation hydrosédimentaire, comparaison avec des tronçons non altérés, etc.).

### 3.1.10.3.2. Localisation

Les sites de mise en œuvre de l'action pour atteindre au mieux l'objectif seront notamment fonction de la zone d'objectif visé :

- dévégétalisation de versants : si possible au droit ou en amont immédiat de la zone d'objectif, en fonction de la faisabilité ;
- réinjection sédimentaire : immédiatement en aval de l'ouvrage bloquant s'il s'agit d'une action de rétablissement de la continuité sédimentaire au niveau d'un barrage (meilleure acceptabilité sociale), ou sinon au plus près de l'UHC cible ;
- sites de réactivation de l'érosion latérale : dans ou au plus près de l'UHC cible ;
- etc.



**Attention** à la cohérence des actions. Vérifier qu'il n'y a pas d'action à résultats antagonistes avec d'autres objectifs visés dans l'UHC ou d'autres UHC plus aval.

### 3.1.10.3.3. Phasage

Tous les objectifs à atteindre ne présenteront pas la même urgence sur l'ensemble du périmètre du PGS. Il conviendra donc de les prioriser, ce qui a dû être fait théoriquement au terme de l'étape 2 de la procédure (3.1.7).

Ensuite, pour un même objectif validé et priorisé, toutes les actions ne pourront (voire ne devront) pas être réalisées en même temps sur l'ensemble du linéaire de l'unité choisie (tronçon, UHC). Il conviendra de définir un phasage temporel par couple action/tronçon. Ce phasage pourra lui aussi être déterminé sur la base d'une priorisation de l'action, en se basant par exemple sur **l'efficacité, voire l'efficience probable** de telle ou telle action par rapport à une autre vis-à-vis de l'objectif visé. Ainsi, pour résoudre rapidement un dysfonctionnement écologique lié à un déficit en SGF, une réinjection sera plus efficace immédiatement qu'une redynamisation de l'érosion latérale dans le tronçon. Cependant, cette dernière devra peut-être aussi être mise en œuvre pour espérer une durabilité des résultats, mais éventuellement un peu plus tard.

### 3.1.10.3.4. Récurrence

Pour atteindre les objectifs fixés et les conserver sur une certaine durée, certaines actions pourront n'être réalisées qu'une seule fois tandis que d'autres devront être réitérées :

- actions « one shot » : construction de structures de piégeage/stabilisation d'alluvions pour créer des habitats, désenrochement de berges (peut nécessiter aussi un phasage : année 1 : 1 km sur une première zone, année 2 : 1 km sur une deuxième, etc.), dérasement de seuils, etc. ;
- action à reconduire dans le temps pour assurer une pérennité des fonctionnalités retrouvées : gestion par chasse des barrages piégeants, réinjections brutes ou chirurgicales, dévégétalisation/réactivation de bancs alluviaux, réactivation de la production primaire par dévégétalisation des versants, etc.

### 3.1.10.3.5. Contraintes

Pour chaque action proposée, on devra évaluer l'existence et l'intensité de 8 grands types de contraintes (exemples dans le Tableau 17) :

- techniques ;

- financières ;
- juridiques ;
- économiques ;
- hydrauliques ;
- environnementales ;
- sociales ;
- politiques.

 La découverte de contraintes trop fortes au moment du dimensionnement ou de la localisation précise des actions, peut nécessiter de revenir à l'étape 2 et redéfinir (souvent à la baisse...) les objectifs initiaux. Il peut aussi être décidé par les parties prenantes de **ne pas réaliser l'action prévue** mais sans revenir nécessairement à l'étape précédente, notamment si d'autres actions déclinant le moyen d'action envisagé sont réalisables. Il peut aussi être décidé de **ne réaliser l'action que partiellement** (par exemple, si seulement la moitié du linéaire de berge à désenrocher est réalisable, si seulement 50% de la superficie de la bande active est dévégétalisable, etc.). Il est possible dans ce cas que la plage cible d'objectif ne soit pas atteinte. L'analyse des résultats obtenus sera alors réalisée lors de l'étape 7.

Tableau 17 : exemple de contraintes pour différents types d'action

| Action   | Contraintes  |  |   |  |   |  |   |  |
|--|--|--|---|--|---|--|---|--|
|  | Techniques   | Financières (coûts)  | Juridiques  | Economiques (usages)   | Hydrauliques  | Environnementales  | Sociales  | Politiques   |
| App. externes : dévégétaliser les versants, éboulis etc.                     | * faisabilité technique des travaux (accès, conditions de circulation des engins, etc.)  | * coût des travaux   | * droit de propriété ?  | * perte de patrimoine, d'outil d'exploitation, etc   | NC  | * Enjeux milieux naturels du site  | * acceptabilité                                   | * portage politique d'une action a priori peu acceptée par les riverains |
| App. externes : reconnecter versants/lit                                     | * faisabilité technique des travaux (accès, conditions de circulation des engins, etc.)  | * coût des travaux<br>* coûts éventuels d'acquisition foncière des terrains pour la reconnexion  | * droit de propriété ?  | ?  | NC  | * Enjeux milieux naturels du site  | ?   | ?  |
| App. internes : activer l'érosion des berges                                 | * évaluer la teneur en sédiments grossiers des berges que l'on souhaite soumettre à l'érosion latérale. Certaines berges, trop sableuses ou limoneuses pourraient injecter des granulométries, au mieux inintéressantes vis à vis de objectifs visés, au pire contrares... A évaluer au cas par cas. | * coût éventuel des travaux de dé-protection<br>* coût éventuel de construction de structures d'accélération de l'érosion (épis, dépôts alluviaux en masse)<br>* coût éventuel de l'achat des terrains érodés ou de leur dédommagement | * possibilité de dé-protéger ?  | * risque économique pour les riverains concernés (perte de patrimoine, d'outil d'exploitation, etc.) | * Vérification de la non aggravation du risque inondation dans la zone d'érosion    | * Enjeux milieux naturels du site  | * acceptabilité                                   | * portage politique d'une action a priori peu acceptée par les riverains |
| App. internes : améliorer structurellement la continuité amont/aval ouvrages | * faisabilité technique  | * coût des travaux   | aspects sureté peut être ?  |  |   |  | NC  | NC   |
| App. internes : améliorer la gestion de la continuité amont/aval ouvrages    | * faisabilité technique (existence et bon dimensionnement d'organes de chasse)   | * coût de la gestion   | * soumis à arrêté préfectoral (toujours d'actu ?)                             |  | * Vérification de la non aggravation du risque inondation dans la zone aval ouvrage | * saisonnalité des chasses (Éviter périodes de reproduction et d'urgence)  | * acceptabilité                                   |  |
| App. internes : dévégétaliser les bancs                                      | * faisabilité technique des travaux (accès, conditions de circulation des engins, etc.)  | * coût des travaux   | *   |  |   | * Enjeux milieux naturels du site  |   |  |
| réinjection brute  | * source des matériaux: le volume disponible est il suffisant par rapport à l'objectif<br>* faisabilité technique des curages/dépôts (accès, ...)  | * coût des opérations curage/transport/dépôt<br>* coûts annexes (réfection ...)  | * dans la zone de prélèvement : autorisation/déclaration de curage. Rubriques | * Impacts sur d'autres usages économiques dans les zones concernée par les                           | * Vérification de la non aggravation du risque                                      | * Enjeux milieux naturels des sites de prélèvement et de réinjection : présence d'espèce protégée notamment<br>* saisonnalité des réinjections (ex: éviter périodes de reproduction ...) | * acceptation de la réinjection par les riverains | * portage politique d'une action a priori peu acceptée                   |

Si l'on prend l'exemple des réinjections sédimentaires, on peut identifier les contraintes suivantes :

- techniques : source des matériaux, volume disponible (est-il suffisant par rapport à l'objectif), faisabilité technique des curages/dépôts. Vérification de la non-aggravation du risque inondation, etc. ;
- financières : coût des opérations curage/transport/dépôt, coûts annexes (réfection des routes), etc. ;
- juridiques : cadre légal des actions (demandes d'autorisation/déclaration etc.), qualité des sédiments, cadre juridique particulier lié à la localisation (ex : arrêté de biotope dans la zone identifiée pour la réinjection) ;
- économiques : usages pouvant être plus ou moins fortement perturbés par l'action (ex : seuil de moulin en aval du site de réinjection qui pourrait être comblé rapidement), aggravation du risque inondation menaçant d'autres enjeux économiques, etc. ;
- environnementales : saisonnalité des réinjections (ex: éviter périodes de reproduction des poissons, oiseaux, etc.), bilan carbone, etc. ;
- sociales : acceptabilité de l'action par les riverains et autres parties prenantes (plutôt faible pour les réinjections), etc. ;
- politiques : acceptabilité de l'action par les « politiques » porteurs du PGS.

### 3.1.10.3.6. Coût de l'action

Pour chaque action individuelle, le **coût pour la phase initiale** devra être estimé (sur 1 à n années en fonction du phasage). Le cout global en fonction **de la récurrence** (si récurrence il y a) sera estimé lors d'une phase ultérieure, à un stade plus avancé d'élaboration du PGS (3.1.11.). **NB** : Cette analyse de coût reprend de manière plus précise le coût évalué dans le cadre de l'analyse des contraintes financières.

### 3.1.11. CHIFFRAGE DE L'ENSEMBLE DES ACTIONS A REALISER

Il s'agit de réaliser le chiffrage sommaire de chaque action ou combinaison d'actions, puis la synthèse par UHC. Ce chiffrage doit prendre en compte :

- les études complémentaires nécessaires à la mise en œuvre de l'action (recueil de données complémentaires, modélisations éventuelles, études d'avant-projet, etc.) ;
- le phasage et la récurrence de certaines actions (faire un chiffrage sur 10 ou 15 ans par exemple).



S'il a été jugé nécessaire de passer par la définition de plusieurs scénarios, ce chiffrage doit évidemment être réalisé pour chaque scénario proposé.

Au terme de cette dernière étape de la phase 3, les parties prenantes devront finaliser et valider le choix des actions à mettre en œuvre (ou du scénario retenu si les actions ont été regroupées de cette façon). Toutefois, le chiffrage final et global du PGS ne pourra être réalisé qu'après réalisation des études complémentaires.

## ETAPE 4 : CHIFFRAGE FINAL DU PGS

Ce chiffrage est un affinement du chiffrage par action réalisée en fin d'étape 3 après validation définitive des objectifs quantifiés et du dimensionnement des actions. Il s'agit en fait du chiffrage global de la mise en œuvre du Plan de Gestion Sédimentaire **sur n années**.

Il doit prendre en compte :

- l'ajustement des coûts par action ou combinaison d'action, après que les études complémentaires ont été réalisées ;
- le coût d'élaboration des avants projets de travaux ;
- le coût du suivi, du bilan global du PGS et de la suite des actions de concertation/validation.

**NB** : le coût d'entretien de certaines actions doit aussi être chiffré à ce stade. Par exemple, une dévégétalisation (mécanique, par pâturage etc.) des bancs alluviaux en l'absence de crue morphogène dans les 2 ans après travaux.

## ETAPE 5 : MISE EN ŒUVRE DU PGS

La phase de validation en fin d'étape 4 a permis de valider le PGS et de choisir les actions à mener, selon un certain phasage. La mise en œuvre du PGS est finalement l'étape la plus « facile » de la procédure. Elle passe par plusieurs phases : la réalisation des études d'avant-projet pour chacune des actions le nécessitant ; la passation des marchés de travaux ; la réalisation des travaux.



Pour faciliter sa mise en œuvre, les actions du PGS devront être déclinées en début de phase 5 sous la forme de **fiches opérationnelles par TGF et UHC** (Unités Hydrographiques Cohérentes) assorties de **cartographies adaptées et de tableaux récapitulatifs**. Ces fiches, cartes et tableaux reprendront au minimum :

- les éléments du diagnostic et en particulier les enjeux présents, les pressions passées et actuelles, les dysfonctionnements constatés et leurs causes ;
- les **sous-objectif de niveau 2** quantifiés, par catégorie d'enjeu : enjeux de bon état écologique ; autres enjeux socio-économiques.
- le niveau de priorisation et le phasage de la mise en œuvre des différentes actions.

## ETAPE 6 : SUIVI

Le suivi d'un certain nombre de paramètres associés aux divers compartiments de l'hydrosystème va permettre d'évaluer les effets du PGS.

Il va plus spécifiquement permettre :

- d'évaluer l'efficacité des actions menées par rapport aux objectifs visés (finalité de l'étape 7) ;
- d'ajuster éventuellement, y compris pendant l'étape de suivi et avant le bilan global de l'étape 7, les actions mises en œuvre pour en améliorer les effets (concept d'*adaptive management* ou gestion adaptative) ;
- d'évaluer, pour certains dysfonctionnements (colmatage par exemple) l'atteinte de seuils critiques nécessitant une action (lâcher morphogène de décolmatage par exemple) ;
- d'évaluer, pour certains enjeux (lutte contre les inondations par exemple) l'atteinte de profils critiques ou d'alerte nécessitant un curage.
- d'améliorer la connaissance des processus hydrosédimentaires et du fonctionnement écologique associé ;

**NB** : ce suivi doit être réalisé sur **au moins une dizaine d'années**, durée minimale sur un système aussi complexe et changeant que le système fluvial, pour lisser les variations dues notamment aux épisodes de crues successifs et distinguer des tendances suffisamment établies.

Un **guide de mise en œuvre de suivis** suite à des opérations de restauration hydromorphologiques a été publié par l'OFB (Rolan-Meynard et al., 2019). Il donne des éléments de méthodologie tout à fait applicables au suivi des effets d'un PGS.

### 3.1.12. CHOIX DES PARAMETRES A SUIVRE

Pour chacun des objectifs fixés, nous proposons de suivre un certain nombre de paramètres, hydromorphologiques mais aussi écologiques, qui seront utilisés comme indicateurs de résultat. Nous proposerons aussi des indicateurs de moyen qui permettront de quantifier de manière synthétique, l'ampleur des actions menées (tableau suivant).



Théoriquement (revoir 3.1.5) un certain nombre de paramètres qui ont été mesurés lors de l'étape de diagnostic de fonctionnement peuvent aussi servir pour bâtir une partie de **l'état initial** de cette phase de suivi. Si tel n'est pas le cas, il convient de réaliser à minima une première campagne de mesure avant mise en œuvre du PGS pour obtenir cet état initial. Un suivi avant est bien souvent insuffisant pour déterminer effectivement un effet morphologique ou écologique.

Tableau 18 : exemples d'indicateurs de moyen et de résultat pour les différents sous objectifs de niveau 2 et les actions associées (tableau complet en annexe)

| Emboitement Objectif/Moyens d'action/Actions   |   |  | Indicateurs   |   |   |
|--|---|--|---|---|---|
| Sous-objectif niveau 2   | Moyen d'action  | Action   | Indicateur de moyen                                     | Indicateur HyMo de résultat (proxy)   | Indicateur écologique de résultat   |
| Restaurer les SGF (Surfaces de Granulométrie Favorable) pour la reproduction         | Augmenter les apports solides grossiers                                   | App. externes : dévégétaliser les versants, éboulis etc.                     | superficies dévégétalisées                              | superficie de SGF   | - nb de 0+, 1+ de salmonidés  |
|  |   | App. externes : reconnecter versants/lit                                     | nombre ou linéaire de versants reconnectés              |   |   |
|  |   | App. internes : activer l'érosion des berges                                 | superficies érodées                                     |   |   |
|  |   | App. internes : améliorer structurellement la continuité amont/aval ouvrages | nombre d'ouvrages devenus structurellement transparents |   |   |
|  |   | App. internes : améliorer la gestion de la continuité amont/aval ouvrages    | nombre d'ouvrages gérés en transparence                 |   |   |
|  |   | App. internes : dévégétaliser les bancs                                      | superficie de bancs dévégétalisés                       |   |   |
|  |   | réinjection brute  | volumes réinjectés                                      |   |   |
|  | réinjection chirurgicale  | nombre et volume unitaire des réinjections                                   |   |   |   |
| Mettre en place des micro-structures pour piéger une partie des sédiments            | Implantation de petits seuils   | Nombre de petits seuils créés  |   |   |   |
|  | Implantation de déflecteurs divers  | Nombre de déflecteurs divers créés   |   |   |   |
| Augmenter l'épaisseur alluviale (globale ou sur certains types de faciès)            | Augmenter les apports solides grossiers                                   |  |   | superficie avec épaisseur alluviale > 25 cm (sur faciès types : PLA)  | -indicateurs invertébrés ?  |
|  | Mettre en place des micro-structures pour piéger une partie des sédiments |  |   |   |   |
|  | Elargir le lit mineur   | Elargir le lit mineur  | linéaire élargi et % d'augmentation de largeur          |   |   |
| Stabiliser l'incision  | Augmenter les apports solides grossiers                                   |  |   | ligne d'eau ou fond sur profils en long et en travers   |   |
|  | Mettre en place des rampes sous fluviales                                 | Mettre en place des rampes sous fluviales                                    | Nombre de rampes sous fluviales créées                  |   |   |
| Elargir le lit mineur  |   |  |   |   |   |
| Emboitement Objectif/Moyens d'action/Actions   |   |  | Indicateurs   |   |   |
| Sous-objectif niveau 2   | Moyen d'action  | Action   | Indicateur de moyen                                     | Indicateur HyMo de résultat (proxy)   | Indicateur écologique de résultat   |
| Résorber / atténuer le pavage  | Augmenter les apports solides grossiers                                   |  |   | superficies pavées  |   |
| Résorber / atténuer les affleurements du substratum                                  | Mettre en place des micro-structures pour piéger une partie des sédiments |  |   | superficies avec substratum affleurant  |   |
|  | Augmenter les apports solides grossiers                                   |  |   |   |   |
| Résorber/atténuer le colmatage   | Limiter les apports de sédiments fins                                     | Réduire l'érosion des sols naturels productifs en fines                      | Superficie protégée contre l'érosion                    | - colmatage superficiel : superficies colmatées sur faciès type RAD et/ou PLA (Protocole Archambaud)<br>- colm. intersiticiel. (Protocole Datry). | - indicateurs invertébrés ?   |
|  |   | Réduire l'érosion des sols agricoles   | Superficie protégée contre l'érosion                    |   |   |
|  |   | Planter des structures linéaires de rétention sédimentaire                   | Linéaire créé   |   |   |
|  |   | Planter des structures localisées de rétention sédimentaire                  | Nombre et volume des structures créées                  |   |   |
|  | Gérer les chasses et vidanges de barrages                                 | Nombre de chasses/vidanges "mal" gérées                                      |   |   |   |
| réaliser des lâchers morphogènes   | réaliser des lâchers morphogènes  | nombre de lâchers réalisés   |   |   |   |
| Augmenter la surface de faciès spécifiques   | Augmenter les apports solides grossiers                                   |  |   | % des faciès types visés  | - radier/plats : augmentation espèces rhéophiles<br>- mouilles : augmentations stades adultes de poissons |
|  | Favoriser la diversité des écoulement                                     | Supprimer les protections de berges (favorise sinuosité et faciès associés)  | Linéaire de berges "déprotégé"                          |   |   |
|  | Elargir le lit mineur   | Recréer mécaniquement un lit sinueux   | Linéaire recréé   |   |   |
| Restaurer / augmenter la largeur de la bande active ou de la bande de tressage       | Augmenter les apports solides grossiers                                   |  |   | - largeur bande active/bande tressage<br>- indice de banc<br>- épaisseur moyenne des bancs  | - espèces d'oiseaux, insectes etc. inféodés à la bande active   |
|  | Dévégétaliser mécaniquement la bande active                               | Dévégétaliser mécaniquement la bande active                                  | Superficie dévégétalisée                                |   |   |
|  | réaliser des lâchers morphogènes  |  |   |   |   |
| Elargir le lit mineur  |   |  |   |   |   |
| Emboitement Objectif/Moyens d'action/Actions   |   |  | Indicateurs   |   |   |
| Sous-objectif niveau 2   | Moyen d'action  | Action   | Indicateur de moyen                                     | Indicateur HyMo de résultat (proxy)   | Indicateur écologique de résultat   |
| Restaurer/augmenter le linéaire de chenaux secondaires                               | Augmenter les apports solides grossiers                                   |  |   | linéaire de CS  | - indicateurs invertébrés<br>- jeunes stades de salmonidés ?  |
|  | Elargir le lit mineur   |  |   |   |   |
| Restaurer / augmenter la fréquence de débordement et le niveau de la nappe alluviale | Recréer certains chenaux  | Recréer certains chenaux   | Linéaire de CS recréus                                  |   |   |
| Restaurer / augmenter la fréquence de débordement et le niveau de la nappe alluviale | Augmenter les apports solides grossiers                                   |  |   | fréquence de débordement  | - biocénoses des zones humides du lit majeur  |
|  | Mettre en place des seuils hauts  | Mettre en place des seuils hauts   | Nombre d'ouvrages créés                                 |   |   |
| Restaurer / augmenter le linéaire de chenaux secondaires                             | Recréer certains chenaux  |  |   | linéaire de chenaux secondaires   | - biocénoses des CS du lit majeur   |
| Restaurer / augmenter le linéaire d'annexes hydrauliques                             | Recréer certains chenaux  |  |   | linéaire d'annexes hydrauliques   | - biocénoses des annexes hydrauliques du lit majeur   |

Nous proposons aussi quelques paramètres à suivre pour les enjeux autres que le bon état écologique. Tableau 19 : Exemples d'indicateurs de moyen et de résultat pour les différents sous objectifs de niveau 2 autres qu'écologiques et les actions associées (tableau complet en annexe)

| Emboitement Enjeux/Objectif/Moyens d'action/Actions                   |   |  |   |   |  | Indicateurs  |  |                                  |
|---|---|--|---|---|--|--|--|----------------------------------|
| Enjeu   | Objectif  | Sous-objectif niveau 1                     | Sous-objectif niveau 2                                  | Moyen d'action  | Action   | Indicateur de moyen  | Indicateur HyMo de résultat (proxy)            |                                  |
| Protection des biens et des personnes                                 | garantir la sécurité des biens et des personnes | limiter les inondations                    | conserver/restaurer une section d'écoulement suffisante | Réduire les apports solides                           | Stabiliser les versants  | Superficie stabilisée  | section d'écoulement ou débit de pleins bords  |                                  |
|   |   |  |   | conserver/restaurer mécaniquement une                 | Pièges à sédiments en amont  | Nombre d'ouvrages créés et volume  |  |                                  |
|   |   | gérer les dépôts torrentiels en lit majeur | gérer les dépôts torrentiels en lit majeur              | Réduire les apports solides                           | Curer jusqu'au profil d'objectif   | Section curée  | superficiés occupée par des dépôts torrentiels |                                  |
|   |   |  |   | Curer les dépôts                                      | Gérer la végétation du lit mineur  | Superficie dévégétalisée   |  |                                  |
|   |   | présérvier les digues                      | Stabiliser l'incision                                   | Augmenter les apports solides grossiers               | Créer / restaurer les protections  | Créer / restaurer les protections  | Linéaire de protection créé                    | linéaire et état des protections |
|   |   |  |   | Mettre en place des rampes sous fluviales             |  |  |  |                                  |
|   |   |  |   | Elargir le lit mineur                                 |  |  |  |                                  |
|   |   | présérvier les protections de berges       | Stabiliser l'incision                                   | Augmenter les apports solides grossiers               | Curer/aplanir les bancs latéraux   | Curer/aplanir les bancs latéraux   | Superficie de bancs traitée                    | surfaces érodées / an            |
|   |   |  |   | Mettre en place des rampes sous fluviales             |  |  |  |                                  |
|   |   |  |   | Elargir le lit mineur                                 |  |  |  |                                  |
|   |   | réduire les processus érosifs              | réduire les processus érosifs                           | Réduire les dépôts sédimentaires favorisant l'érosion | rectifier le tracé pour éviter les courants secondaires érosifs en concavité | rectifier le tracé pour éviter les courants secondaires érosifs en concavité | Linéaire rectifié                              | linéaire et état des protections |
|   |   |  |   | Créer / restaurer les protections                     |  |  |  |                                  |
|   |   | présérvier les ponts                       | Stabiliser l'incision                                   | Augmenter les apports solides grossiers               | Créer / restaurer les protections  | Créer / restaurer les protections  | Linéaire rectifié                              | linéaire et état des protections |
|   |   |  |   | Mettre en place des rampes sous fluviales             |  |  |  |                                  |
| réduire les érosions latérales des terrains en bordure de cours d'eau | réduire les processus érosifs                   | Elargir le lit mineur                      | Créer / restaurer les protections                       | Créer / restaurer les protections                     | Linéaire rectifié  | linéaire et état des protections   |  |                                  |
|   |   | Créer / restaurer les protections          |   |   |  |  |  |                                  |
| protéger les infrastructures  | protéger les berges                             | Créer / restaurer les protections          | Créer / restaurer les protections                       | Créer / restaurer les protections                     | Linéaire rectifié  | linéaire et état des protections   |  |                                  |
|   |   | Créer / restaurer les protections          |   |   |  |  |  |                                  |

| Enjeu  | Objectif   | Sous-objectif niveau 1                                  | Sous-objectif niveau 2                                  | Moyen d'action  | Action   | Indicateur de moyen                   | Indicateur HyMo de résultat (proxy)                               |
|--|--|---|---|---|--|---------------------------------------|---|
| Navigation fluviale                            | Garantir les usages                              | maintenir un chenal de navigation                       | maintenir un chenal de navigation                       | Réduire les apports solides   | Mettre en place des structures d'autoentretien du chenal navigable | Nombre de structures créées           | linéaire non navigable  |
|  |  |   |   | Entretien du chenal navigable   |  |                                       |   |
|  |  | maintenir l'accessibilité des ports et haltes fluviales | maintenir l'accessibilité des ports et haltes fluviales | Réduire les apports solides   | Mettre en place des structures d'autoentretien de l'ouvrage        | Nombre de structures créées           | % ou nombre de points noirs                                       |
|  |  |   |   | Entretien l'ouvrage   |  |                                       |   |
| Retenues à usage hydroélectrique, AEP, loisirs | Garantir les usages                              | maintenir un volume utile                               | maintenir un volume utile                               | Réduire les apports solides   |  |                                       | Volume utile  |
|  |  |   |   | Réduire les apports solides   |  |                                       |   |
| Captages en nappe                              | maintenir/restaurer la productivité des captages | maintenir/restaurer le niveau de la nappe alluviale     | Stabiliser l'incision                                   | Augmenter les apports solides grossiers                                 |  |                                       | comparaison ligne d'eau ou fond sur profils en long et en travers |
|  |  |   |   | Mettre en place des rampes sous fluviales                               |  |                                       |   |
|  |  |   |   | Elargir le lit mineur   |  |                                       |   |
|  |  |   |   | Augmenter les apports solides grossiers                                 |  |                                       |   |
| Rehausser le fond alluvial                     |  |   |   | Mettre en place des seuils hauts  |  |                                       | niveau piézométrique et productivité ds puits                     |
|  |  |   |   | Elargir le lit mineur   |  |                                       |   |
| Rehausser la cote de ligne d'eau               |  |   |   | Mettre en place des seuils hauts  |  |                                       |   |
| Deltas, estuaires, trait de côte               | Garantir le bon fonctionnement                   | garantir la continuité sédimentaire                     | garantir la continuité sédimentaire                     | Rendre transparents le maximum de pièges à sédiments, fins et grossiers |  | Nombre d'ouvrages rendus transparents | Evolution du trait de côte, delta, estuaire                       |

### 3.1.13. STRATEGIE D'IMPLANTATION DES SITES DE SUIVI

#### 3.1.13.1. EVALUER LES EFFETS EN COMPARANT DES EVOLUTIONS/ETATS INTER-SITE ET INTER-DATE

La stratégie la plus robuste pour évaluer les effets d'une action est de type BACI (Before After Control Impact). On s'assure que le secteur d'intervention évolue différemment entre la situation avant et la situation après l'intervention. En géomorphologie, le suivi d'un seul état initial est bien souvent insuffisant pour être en capacité de mesurer un changement de fonctionnement mais il est possible de s'appuyer aussi sur le diagnostic préalable qui a été réalisé (voir Marteau et al., 2022).

Afin de juger des effets des actions mises en œuvre dans le cadre du PGS, il peut être intéressant de suivre **certaines métriques** dans un **tronçon** qui n'est a priori pas « impacté » par les actions réalisées. On utilise souvent le terme de **tronçon témoin ou de contrôle dont on compare l'évolution au tronçon impacté ou cible**. Il s'agit de distinguer la part des évolutions liées aux actions de celles liées au fonctionnement naturel du cours d'eau (crues, apports sédimentaires exceptionnels d'un sous-bassin versant, etc.).

Le choix d'un tronçon témoin n'est pas toujours évident ni même possible aussi n'est ce qu'une **proposition optionnelle**.

- Deux possibilités sont envisageables :
  - **le tronçon témoin se situe en amont de l'action réalisée** mais dans le même tronçon de contrôle géomorphologique (TCG) de cours d'eau, subissant ou ayant subi le même type de pressions ;
  - **le tronçon témoin est situé sur un cours d'eau de même type à proximité** subissant ou ayant subi le même type de pressions mais sans mise en œuvre d'actions de restauration. Cette solution reste néanmoins à choisir en dernier recours car l'extrapolation d'un cours d'eau à un autre est souvent difficile.

En matière de suivi, l'évaluation repose bien souvent sur une stratégie simplifiée, soit avant-après, soit contrôle-impact avec le risque dans les deux cas que des changements dans les conditions amont ne perturbent l'évaluation. Ainsi lorsque l'on ne dispose pas d'états avant suffisants, il est possible d'envisager un suivi de type contrôle-impact, les changements observés en post-intervention sur le seul secteur impacté par les actions rendant compte de l'effet de ces actions.

#### 3.1.13.2. DEUX APPROCHES POUR LE CHOIX DES SITES DE MESURE

Deux approches principales peuvent être mises en œuvre, soit indépendamment soit de manière complémentaire :

- une **approche linéaire globale**, où l'on décrira tout ou partie du linéaire du tronçon potentiellement impacté par l'action ou les actions (et éventuellement du sous-tronçon témoin) ;
- une **approche stationnelle**, visant à décrire au minimum **une station "représentative" par tronçon homogène**. Cette approche a l'avantage de pouvoir être corrélée plus facilement aux indicateurs biologiques qui sont le plus souvent mesurés aussi à l'échelle d'une station (notamment pour ce qui concerne les poissons).

On pourra utiliser l'une, l'autre ou les deux selon les besoins de l'étude, l'intensité probable des effets des actions et surtout...le budget disponible.

Toutefois, si l'une devait être **privilegiée, ce serait l'approche linéaire globale**, plus à même de rendre compte de modifications de processus hydrosédimentaires dont une seule station est rarement représentative. Il pourrait alors être envisagé d'adapter les protocoles de recueil de données biologiques à ce type d'approche (la méthode du *kick sampling* existe déjà pour les invertébrés benthiques).

Une description détaillée de ce type de démarche est présentée dans la note technique « **protocole de diagnostic de l'état sédimentaire en aval d'un barrage** » (EDF, Malavoi et al., 2015).

### 3.1.14. FREQUENCE DE MESURE

#### 3.1.14.1. METRIQUES HYDROMORPHOLOGIQUES ET MORPHOECOLOGIQUES

D'une manière générale, les campagnes de mesures de ces métriques devraient être mises en œuvre après tout évènement hydrologique influençant potentiellement les processus hydrosédimentaires, soit toute **crue morphogène**. Pour simplifier, nous pouvons considérer qu'elles doivent être réalisées **après chaque crue de fréquence au moins biennale** ou au minimum tous les deux ans si aucune crue biennale ne s'est produite.



Il est indispensable de réaliser a minima une « **campagne d'état initial** » (voire plusieurs pour certains indicateurs comme le colmatage superficiel et interstitiel) avant mise en œuvre des actions du PGS. Cet état initial peut éventuellement correspondre, pour certaines métriques, aux mesures réalisées dans le cadre de la phase de diagnostic de fonctionnement, si celle-ci n'est pas trop ancienne par rapport à la date de mise en œuvre des actions (et s'il n'y a pas eu de crue morphogène depuis). Il faut donc penser le suivi dès la phase de diagnostic pour certains paramètres et un monitoring multi-date est nécessaire avant intervention si l'évaluation porte sur un protocole BA.

#### 3.1.14.2. METRIQUES BIOLOGIQUES

Revoir 3.1.5.3.3.

### 3.1.15. RENDU DU SUIVI

Les résultats du suivi pour chaque métrique doivent être rendus sous forme cartographique (SIG) mais aussi sous forme de **trajectoire temporelle**, en indiquant la plage d'objectif visée ainsi qu'un certain nombre de plages en deçà de l'objectif qui permettront, lors de la phase 7, de réaliser le bilan d'efficacité par action et global du PGS.



Des bilans intermédiaires et partiels peuvent être réalisés avant le bilan global de l'étape 7, en vue d'ajuster notamment certaines actions pour en améliorer les effets (gestion adaptative).

A noter que les démarches BA permettent de mesurer un changement ou une différence mais on ne sait pas forcément si ce changement ou cette différence est suffisante pour considérer que c'est un succès. Sur un gradient de 0 à 20, on peut passer de 2 à 4/20, le changement est enregistré mais si le seuil de satisfaction est de 10 ou 12, on est encore loin du compte. Il est donc important de considérer ces seuils au-delà desquels on est satisfait (voir partie suivante sur le bilan). Dans le cas de l'approche CI, le contrôle sert de référence et l'atteindre d'une certaine manière permet de confirmer que l'objectif est atteint.

## ETAPE 7 : BILAN DU PGS

Le bilan du PGS est à réaliser au terme d'une période de mise en œuvre qui est à définir au cas par cas par les parties prenantes. Une durée de **10 ans** nous semble pertinente, même si des bilans intermédiaires partiels peuvent être réalisés lors de la phase de suivi.

Ce bilan passe par :

- l'évaluation, grâce au suivi présenté plus haut, du **niveau d'atteinte des objectifs** fixés lors de l'étape 2 et éventuellement revus lors des étapes suivantes. Cette analyse doit permettre, en particulier si les plages cibles fixées ne sont pas atteintes, d'évaluer quel est le niveau de satisfaction (voir l'exemple ci-dessous). C'est la phase d'évaluation de **l'efficacité des actions** ;
- l'évaluation, optionnelle, de la **contribution des différentes actions** mises en œuvre dans l'atteinte de ces objectifs ;
- l'analyse en parallèle, optionnelle elle aussi, de l'énergie dépensée par action (coût financier et humain) pour atteindre (ou non) ces objectifs. C'est la phase d'évaluation de **l'efficience des actions** ;

- l'évaluation des **causes de non atteinte des plages cibles** pour tout ou partie des objectifs visés, si cette situation se présente.

Il doit déboucher sur la dernière étape de concertation de la procédure et sur la décision de poursuivre « en routine » la mise en œuvre à long terme du PGS ou de repasser par les étapes 3 (choix des actions), voire 2 (définition des objectifs).

### 3.1.16. REALISATION DU BILAN DU PGS

#### 3.1.16.1. EVALUATION DU NIVEAU D'ATTEINTE DES OBJECTIFS

C'est la partie **incontournable** de cette étape de bilan. Le principe est de **réaliser cette évaluation objectif par objectif**. Il diffère selon que l'on aborde l'évaluation en BA ou en CI.

Dans le cas d'une approche de type BA, reprenons comme exemple la Figure 82 qui permet d'évaluer les résultats de la mise en œuvre d'actions diverses pour atteindre un **objectif « d'augmentation des SGF »** d'un tronçon à au moins 4% du lit mineur (seuil bas de la plage cible, contre 1% actuellement).

Nous y avons ajouté 4 plages inférieures à la plage cible.

Outre l'évaluation de l'atteinte de la plage cible, l'analyse de la trajectoire au moment du bilan d'efficacité des actions peut ainsi permettre, en concertation avec les différentes parties, d'**estimer un « degré de satisfaction »** par rapport à la plage cible initiale.

Dans l'exemple ci-dessous, il pourrait par exemple être décidé que malgré la non atteinte de la plage cible d'objectif par la courbe verte, le bilan est néanmoins assez satisfaisant. En revanche, il ne fait pas de doute qu'une trajectoire du type de celle de la courbe rouge nécessite de revoir très sérieusement les actions (elles ont peut-être été mal réalisées ou sont finalement totalement inadéquates) voire les objectifs (ils sont peut-être trop ambitieux).

**NB** : La définition des seuils des plages inférieures et du degré de satisfaction qu'elles représentent, peut être réalisée lors de cette étape mais aussi lors de l'étape 2, en même temps que la définition de la plage cible, en concertation avec diverses parties prenantes.

**RAPPEL** : il a été estimé par le comité technique de ce guide, que les objectifs écologiques, hors les indices IPR et I2M2 de bon état, ne pouvaient pas être quantifiés (pas de plage cible). En revanche, **l'analyse de la trajectoire de diverses métriques et indicateurs écologiques nous paraît indispensable.**

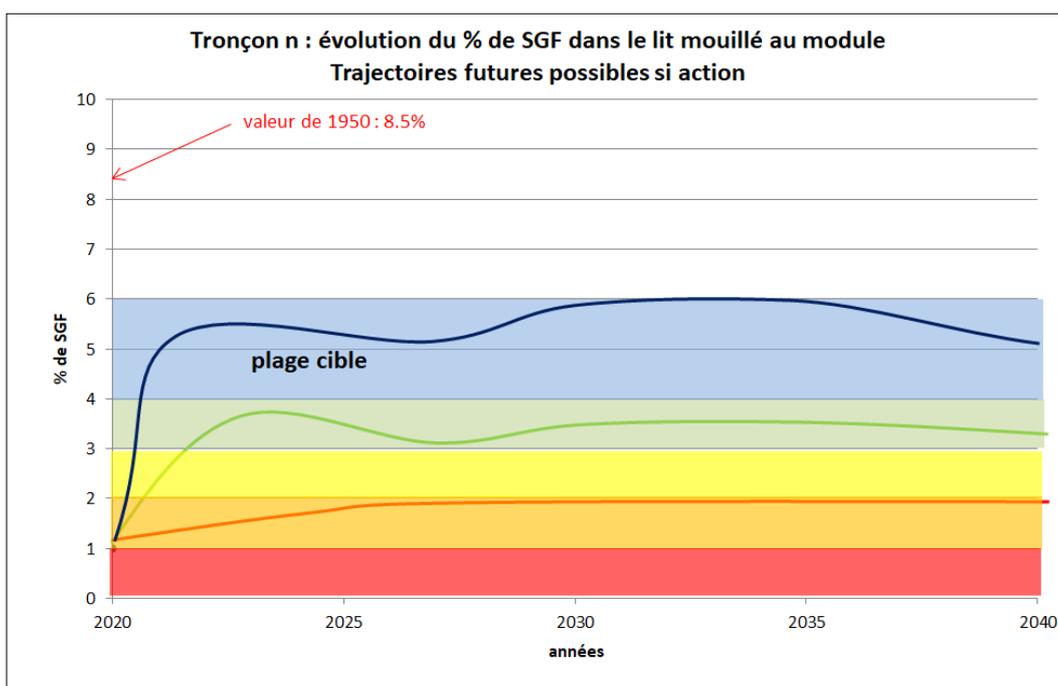


Figure 102 : résultat fictif du suivi sur 20 ans d'une métriques morphoécologique, la SGF. Les 3 courbes représentent 3 formes possibles d'évolution

Dans le cas d'un suivi de type CI, la réussite se traduit par le fait que les caractéristiques du tronçon impacté ne se différencient pas de celui de contrôle. On peut mesurer un écart et une évolution de cet écart entre les deux situations C et I.

### 3.1.16.2. EVALUATION DE LA CONTRIBUTION DES DIFFERENTES ACTIONS

**NB : Cette évaluation est optionnelle.**

L'exercice est difficile car il est probable que dans la plupart des PGS, plusieurs actions déclinant des moyens d'action, voire plusieurs moyens d'action, soient décidés pour atteindre un ou plusieurs objectifs.

En reprenant l'exemple des SGF ci-dessus, pour atteindre la plage cible visée, on a pu mettre en œuvre le moyen d'action « augmenter les apports solides grossiers » (décliné en au moins 8 actions) mais aussi « mettre en place des micro-structures pour piéger une partie des sédiments » (2 actions).

Si une seule action a été réalisée (réinjection sédimentaire de n milliers de m<sup>3</sup>), l'exercice semble évident. Si on a aussi réactivé l'érosion de berges en amont, cela devient plus complexe (quel volume et quelles granulométries y ont été mobilisés, la durée entre l'action et l'observation des résultats a-t-elle été suffisante pour que ces alluvions transitent jusqu'au site de mesure, etc.), à partir de 3 actions, le problème devient trop complexe.

### 3.1.16.3. EVALUATION DE L'EFFICIENCE DES ACTIONS VIS-A-VIS DES OBJECTIFS

**NB : Cette évaluation est optionnelle.**

L'enjeu de cette analyse est de croiser les résultats du PGS (l'atteinte ou non des différents objectifs) avec l'énergie (le coût mais aussi la concertation plus ou moins difficile) dépensée pour y parvenir. C'est une analyse d'efficacité.

Dans l'idéal, il faudrait pouvoir faire l'exercice action par action, sachant que la difficulté ici vient du fait que certaines actions (ou moyens d'action) peuvent contribuer à l'atteinte de divers objectifs. C'est particulièrement le cas du moyen d'action « augmenter les apports solides grossiers ».

Dans un cas fictif simple, on pourrait imaginer que la **réinjection brute** de 5000 m<sup>3</sup> de graviers en aval d'un barrage a coûté 50 000 euros et permis de créer 1000 m<sup>2</sup> de SGF (une très grosse partie du volume s'est diffusée dans le lit mineur sans vraiment créer de SGF). On a ainsi un coût de 50 euros/m<sup>2</sup> de SGF créé. La **réinjection chirurgicale** de seulement 1000 m<sup>3</sup> a aussi coûté 50 000 euros et permis de créer immédiatement 2000 m<sup>2</sup> de SGF, soit 25 euros/m<sup>2</sup> de SGF. La méthode chirurgicale a donc été 2 fois plus efficace que la méthode brute (NB : peut se poser aussi la question de la pérennité des résultats obtenus entre les 2 types d'action. Cela complexifie encore l'analyse).

Si la discrimination par action n'est pas possible, ce qui sera probablement le cas le plus fréquent, on pourra réaliser un simple bilan « coût global du PGS/résultats obtenus ».

### 3.1.16.4. EVALUATION DES CAUSES DE NON ATTEINTE DES OBJECTIFS DU PGS

Il est fondamental d'effectuer, pour les objectifs qui n'auront pas atteint leurs plages cibles, une analyse approfondie des causes de ces échecs. C'est en effet souvent des échecs que l'on apprend le plus.

Quelques causes possibles d'échec sont présentées ci-dessous mais il en existe probablement de nombreuses autres :

- action non ou partiellement réalisée du fait de contraintes n'ayant pu être levées ou qu'incomplètement (mauvaise acceptabilité sociale, limites foncières, difficultés techniques etc.) ce qui n'a pas permis la réalisation de l'action ou de sa totalité (par exemple volumes, linéaire ou superficie traités plus faibles que ceux prévus initialement) ;
- action imparfaitement réalisée (non dessouchage au moment de la dévégétalisation d'un banc, enrochements laissés en pied de berges, etc.) ;
- non récurrence de l'action alors qu'elle était nécessaire ;
- etc.

Cette analyse doit déboucher, lors de l'étape de concertation finale, sur des propositions d'amélioration.

### **3.1.17. PHASE DE CONCERTATION/VALIDATION N°5 : DECISION DE POURSUIVRE LA MISE EN ŒUVRE DU PGS OU DE REVENIR A DES ETAPES ANTERIEURES**

Cette étape de concertation finale doit aboutir à la décision de :

- poursuivre en routine (avec éventuellement quelques ajustements à la marge dans le cadre de la gestion adaptative) la mise en œuvre des actions du PGS ;
- ou au contraire de revenir à des étapes précédentes, en premier lieu à l'étape 3 de choix et dimensionnement des actions, voire dans un deuxième temps si nécessaire à la redéfinition de tout ou partie des objectifs (étape 2).

## 4. ORGANISATION DE LA CONDUITE DU PROJET

Ce chapitre est consacré à la conduite du projet avec les acteurs du territoire. Les rivières sont investies par les acteurs locaux ; ils ont des pratiques et des usages en lien avec elles. Tout au long du projet, il faudra donc veiller à les associer, afin que le projet prenne en compte leurs contraintes et leurs attentes, afin également que ces acteurs adaptent leurs pratiques et usages aux changements générés par les actions de gestion sédimentaire qui seront prévues, et afin que le projet se déroule dans de bonnes conditions, sans un conflit qui viendrait bloquer durablement toute action sur le territoire.

Dans ce chapitre nous parlerons donc, pour chacune des étapes évoquées dans le logigramme, **de gouvernance, de concertation, de validation**.

Nous proposons donc d'en donner ci-dessous les définitions :

- **la gouvernance** est ici entendue dans le sens de gouvernance de l'eau sur le territoire. Ce terme évoque donc les instances de débat et de dialogue autour de l'eau et des milieux aquatiques qui existent sur le territoire. Il peut s'agir d'une commission locale de l'eau, lorsqu'il existe un SAGE sur le territoire, il peut s'agir d'un comité de rivière, lorsqu'un contrat de rivière existe sur le territoire, mais il peut également s'agir du conseil communautaire de l'EPCI (Etablissement Public de Coopération Intercommunale) lorsque celui-ci a pris la compétence GEMAPI ;

- **la concertation** est ici entendue comme une invitation des acteurs concernés par le projet, ou des parties prenantes de celui-ci, à prendre part à un débat entre eux, autour du diagnostic, des enjeux, des objectifs et des actions fondant le projet. Il peut s'agir d'un processus de dialogue territorial au sens d'un processus de conduite concertée d'un projet environnemental, basé sur différentes étapes (diagnostic des enjeux nature-sociétés, entretiens avec les parties prenantes, animation de dispositifs de concertation, etc.).

Il ne s'agit pas dans ce guide de prôner la concertation systématique pour toute construction de plan de gestion sédimentaire, ni pour tous les territoires. **Dans certains cas, une concertation au sein des instances de gouvernance en place est suffisante**, dans d'autres contextes de rivières très appropriées et faisant l'objet de nombreux usages, la concertation est recommandée au-delà des instances de gouvernance en place.

La concertation s'articule généralement autour de 3 grandes étapes : écoute des acteurs du territoire - diagnostic partagé - construction des scénarios et/ou des actions. Dans certains projets, pour des rivières peu appropriées, **une consultation** sur les actions qui seront mises en place est suffisante. La consultation recouvre les moyens permettant d'écouter et recueillir les points de vue d'un public concerné par un projet. Si ces opinions peuvent à terme inspirer le projet, ce n'est pas une exigence de la consultation ; le porteur de projet conservant tout pouvoir sur ses décisions.

Par ailleurs, la concertation n'exclut pas des étapes de **négociation** avec certains acteurs, notamment ceux qui devront adapter fortement leur pratiques et usages, ou encore ceux pour lesquels le foncier est concerné. La négociation suppose un échange entre parties prenantes sur une décision formelle.

Enfin, lorsqu'un conflit émerge, une **médiation** peut être nécessaire. Elle repose sur un processus, des cadres d'intervention et des pratiques spécifiques, mobilisés le temps de résoudre le conflit en question.

- **La validation** est ici entendue comme une étape à laquelle il faut veiller tout particulièrement. La plupart des retours d'expériences montrent que la validation, et donc le processus de décision, n'est pas toujours clair. Dans ce cas, la démarche technique se déroule jusqu'à son terme mais les actions ne sont pas mises en œuvre. Il est donc important de définir dès le début du projet : qui va valider quoi ? sur quelles bases ? et à quel moment ?

Idéalement, si le comité de pilotage de la démarche peut réaliser une pré-validation, **la validation, elle, est une décision politique, et donc un vote**, dans les instances de gouvernance en place : commission locale de l'eau, comité de rivière, conseil communautaire... **Une validation est importante à chaque étape**, faute de quoi, on peut à tout moment revenir en arrière : si un diagnostic n'a pas été clairement validé par l'ensemble des acteurs concernés, la question des scénarios de gestion, ou des actions à mettre en œuvre, risque de « tourner en rond » du fait d'une remise en cause systématique du diagnostic. Attention également aux votes qui n'engagent pas assez les porteurs des actions à réaliser.



- **Clarifier**, et rendre lisible par tous, le **processus de concertation** mis en place pour construire et suivre le plan de gestion sédimentaire ;
- **Clarifier**, et rendre lisible par tous, le **processus de décision** propre à la construction et au suivi du plan de gestion sédimentaire ;
- S'assurer que ces 2 processus ont bien été **validés** dans les instances de gouvernance de l'eau et des milieux aquatiques.

## ETAPE PREALABLE : PRENDRE LE TEMPS D'UNE REFLEXION TERRITORIALE AVEC SES PARTENAIRES ET ORGANISER LA CONDUITE DU PROJET

Il s'agit d'une **phase préparatoire au lancement officiel de la démarche** d'élaboration du plan de gestion sédimentaire. Elle est menée en interne par le **maître d'ouvrage, qui sera le plus souvent la structure Gémapienne concernée (comme indiqué dans la disposition 6A-07 du SDAGE)**, qui consulte également ses partenaires locaux (collectivités), l'agence de l'eau, l'Office Français de la Biodiversité et les services de l'Etat, et en discute en CLE (commission locale de l'eau) lorsqu'il y en a une sur le territoire ou en comité de rivière. La construction du plan de gestion sédimentaire peut faire partie des actions prévues dans le SAGE (Schéma de Gestion et d'Aménagement de l'Eau) ou le contrat de rivière.

Cette réflexion préalable constitue un temps d'harmonisation entre partenaires, nécessaire avant de mettre tous les acteurs du territoire « dans la boucle ». Elle permet aussi de créer les bases d'une culture commune (éléments de langage, méthode de travail) garante du bon déroulement de la démarche. Elle peut se concrétiser par un document (compte-rendu de réunion ou document plus « communiquant ») qui décrira les objectifs visés par le projet d'élaboration d'un plan de gestion sédimentaire. Cette étape préalable s'achève par un **premier comité de pilotage**, démarrage officiel du travail avec les acteurs du territoire (qui commence en étape 1 dans le logigramme).

### 4.1.1. LES ENJEUX TERRITORIAUX

Pour animer cette réflexion préalable, outre les questions techniques évoquées plus haut dans ce guide dans la description des étapes techniques, les questions territoriales suivantes peuvent être intéressantes à débattre entre partenaires :

- quels sont les enjeux socio-économiques, actuels ou futurs du territoire, en lien avec la rivière ? (usages présents : hydroélectricité, pêche, canoë, mais aussi agriculture, pour des questions par exemple d'érosion de berges...)
- quels sont les bénéfices socio-économiques attendus de la restauration d'un bon fonctionnement sédimentaire de la rivière ? (protection d'ouvrages, d'infrastructures, stabilisations des berges, enjeux inondations...);
- quelle est la situation foncière le long de la rivière et notamment aux endroits où des actions pourraient être envisagées (nombreux propriétaires privés ? possibilités d'acquisition ? ...);
- existe-t-il une démarche de SCOT ou de PLUi menée en parallèle et programmée qui puisse s'approprier la démarche et intégrer les actions prévues au plan de gestion sédimentaire ? En tout cas se poser la question de l'intégration de certaines actions dans les documents de planification...

### 4.1.2. QUI ASSOCIER A LA DEMARCHE ? QUAND ET COMMENT ?

La première instance à associer est l'instance de gouvernance locale de l'eau, à savoir la commission locale de l'eau (CLE) ou le comité de milieux quand ils existent.

En dehors de ceux-ci, il faudra **s'assurer de l'invitation de l'ensemble des acteurs qui interviennent pour mettre en œuvre le plan de gestion sédimentaire sur le territoire** : élus et services de l'Etat, de la Région, du Département, d'autres collectivités, porteurs ou co-porteurs d'une stratégie locale de gestion des risques d'inondation (SLGRI), porteurs de programme d'actions de prévention des inondations (PAPI), conservatoires d'espaces naturels, acteurs économiques et non économiques (en particulier les représentants des agriculteurs, des pêcheurs, associations de protection de la nature, carriers, industriels, société d'aménagement, gestionnaire de réseaux, associations de sports et loisirs...), voire des représentants de citoyens, ou des citoyens eux-mêmes.

Il est aussi pertinent de **considérer les autres instances de concertation en place sur le territoire** : comité Natura 2000, instances de définition des politiques de l'aménagement du territoire (SCoT, PLU et PLUi, etc.), ceci afin de penser à l'articulation avec les projets portés par ces instances.

Les différentes façons d'associer les parties prenantes sont détaillées dans les paragraphes qui suivent :

- dans les instances de gouvernance locales en place sur le territoire (commission locale de l'eau, comité de rivière...);
- directement dans le pilotage du projet ;
- par des écoutes ciblées sur le territoire ;
- ou bien lors de groupes thématiques ou géographiques au stade de l'élaboration du diagnostic et au stade de l'élaboration des scénarios ou actions du plan de gestion sédimentaire.

#### 4.1.3. CONSTITUER UN BINOME POLITIQUE ET TECHNIQUE

L'élaboration d'un plan de gestion sédimentaire est une **démarche technique et politique** qui doit mobiliser les acteurs du territoire jusqu'au stade de la mise en œuvre des actions.

La **constitution d'un binôme politique et technique** est donc déterminante pour la réussite du projet. Un technicien ne peut travailler seul. L'implication d'un ou plusieurs élus moteurs de la structure porteuse de la démarche est déterminante dans la réussite de celle-ci. L' élu préside le comité de pilotage et à ce titre arbitre les débats au sein de celui-ci. Le technicien veille au bon déroulement des différentes étapes du projet et à une réflexion technique appropriée, y compris dans la prise en compte des enjeux socio-économiques. L' élu mobilise ses pairs, s'assure de la mobilisation des acteurs, veille à un portage politique plus large qu'à son seul niveau ainsi qu'à la cohérence avec les politiques et projets mis en œuvre sur le territoire.

#### 4.1.4. CLARIFIER LE PROCESSUS DE PILOTAGE, DE CONCERTATION ET DE DECISION DES LE LANCEMENT DU PROJET

Pour élaborer et mettre en œuvre un plan de gestion sédimentaire une articulation doit être prévue entre les instances de gouvernance, le maître d'ouvrage, le comité de pilotage, le comité technique, les bureaux d'études et les réunions de concertation :

- l'instance de gouvernance locale, de dialogue et de concertation (commission locale de l'eau - CLE, comités de milieux, comité de rivière), à l'échelle du/des bassins versants, validera in fine le plan de gestion sédimentaire. Elle donne un avis sur l'intérêt de la démarche, les grands objectifs qui la sous-tendent, la composition du comité de pilotage et la conduite du projet. Elle « encadre » ainsi la démarche de construction et de mise en œuvre du plan de gestion sédimentaire et en valide les actions. Le bureau de l'instance de concertation ou certains de ses membres peuvent intégrer le comité de pilotage du projet ;
- le comité de pilotage « COPIL » suit et valide les étapes de la démarche de construction du plan de gestion sédimentaire. Il valide le cahier des charges initial de l'étude (ou des études), le calendrier, les personnes à associer et la méthode de travail. Il s'assure de l'articulation entre les actions prévues au plan de gestion sédimentaire et les enjeux socio-économiques et politiques du territoire. Il veille à un diagnostic du territoire partagé, avec si besoin l'engagement d'études complémentaires (étude historique, éléments économiques, enquêtes...). Il a un rôle pédagogique et de transmission sur l'histoire du territoire et d'information sur le plan de gestion sédimentaire qui sera construit collectivement ;
- un comité technique « COTECH » prépare les étapes techniques de construction du plan de gestion sédimentaire à faire valider par le COPIL. Il donne son avis et échange avec le bureau d'étude sur les pistes techniques et/ou socio-économiques qui sont proposées en comité de pilotage ou en réunion de concertation s'il y en a ;
- la structure locale de gestion de l'eau par bassin versant (syndicats de bassin versant, établissements publics territoriaux de bassin-EPTB, établissements publics d'aménagement et de gestion de l'eau-EPAGE, communauté de communes, communauté d'agglomération), maître d'ouvrage compétent (GEMAPI), anime et porte le(s) étude(s) appuyant la construction du plan de gestion sédimentaire. Elle peut rédiger le cahier des charges et pourra être amenée à réaliser les travaux décidés (mais ceux-ci peuvent être réalisés par d'autres acteurs) ;
- le(s) bureau(x) d'études (hydromorphologie et gestion sédimentaire, socio-économique, concertation) répond au cahier des charges prévu par le maître d'ouvrage. Il apporte généralement son expertise technique pour analyser le contexte. En fonction des objectifs poursuivis par le maître d'ouvrage, il propose

un diagnostic du territoire, interroge et concerta les acteurs du territoire et établit des pistes de scénarios et des pistes d'actions ;

- les réunions de concertation géographiques et/ou thématiques : elles rassemblent les acteurs qui ne sont pas présents au comité de pilotage ni au comité technique mais sont concernés d'une façon ou d'une autre par le plan de gestion sédimentaire, soit parce qu'ils sont susceptibles de mettre en œuvre des actions, soit parce qu'ils sont propriétaires de parcelles où des actions sont susceptibles d'être réalisées, soit parce que leur usage risque d'être impacté par les actions sédimentaires à venir : communes, agriculteurs, pêcheurs, kayakistes, chasseurs, riverains, habitants...

Il est important de **clarifier le mandat de chaque comité (de pilotage et technique)** et de chaque réunion de concertation ainsi que le processus de décision, ceci afin d'éviter les malentendus et les frustrations. Les processus de pilotage, de concertation et de décision sont bien distincts et doivent être repérés comme tels par les participants. Généralement, le comité de pilotage pré-valide une proposition de plan de gestion sédimentaire qui sera ensuite votée en commission locale de l'eau ou en comité de rivière lorsque ces instances existent.

La synthèse de la réflexion préalable est présentée au premier comité de pilotage.

Elle inclut généralement :

- l'organisation et le déroulement de la démarche ;
- la composition du comité de pilotage et du comité technique ;
- la composition des groupes de concertation, s'il y en a de prévus (ce qui n'est pas obligatoire) ;
- le cahier des charges de l'étude technique ;
- le cas échéant, le cahier des charges de la démarche de concertation ;
- le cas échéant, le cahier des charges d'une étude socio-économique ou foncière.

En synthèse, la réflexion préalable croise les enjeux environnementaux, économiques et sociaux. Ce premier questionnement rapide doit permettre de mesurer la nécessité ou non de s'engager dans la construction d'un plan de gestion sédimentaire. Il est basé dans un premier temps sur les connaissances facilement mobilisables par le maître d'ouvrage et ses principaux partenaires.

Le lancement de la démarche de construction d'un plan de gestion sédimentaire est validé en CLE lorsqu'il y en a une sur le territoire, en comité de rivière, ou en conseil syndical du syndicat de rivière : ce lancement est validé par des élus et donc porté politiquement.



- **Lister les enjeux territoriaux et tous les acteurs concernés** par le futur plan de gestion sédimentaire, que ce soit parce qu'ils seront porteurs d'action, parce qu'ils seront affectés dans leurs pratiques et usages, ou parce qu'ils seront affectés sur le plan foncier ;
- **Composer un binôme politique et technique** : le portage par au moins un élu, ou une instance élue, est nécessaire pour légitimer le processus de décision. La compétence technique est indispensable pour piloter le bureau d'études qui mènera la réflexion et pour expliquer aux élus, aux acteurs concernés, voire aux citoyens, les choix techniques à arbitrer ;
- **Clarifier, faire voter en instances de gouvernance**, et rendre lisible par tous, **les processus de pilotage, de concertation et de décision** qui seront mis en œuvre pour construire, puis suivre, le plan de gestion sédimentaire.

**LE GUIERS (38) : UNE ASSOCIATION DES ACTEURS DU TERRITOIRE POUR CONSTRUIRE LE CONTRAT DE RIVIERE, QUI PREVOIT DES ACTIONS SEDIMENTAIRES**

Une étude stratégique globale sur le bassin versant a permis de définir toutes les actions du contrat de rivière. Le diagnostic comprenait une partie technique et une partie socio-territoriale.

Des ateliers de concertation ont été mis en place pour définir les objectifs du nouveau contrat de rivière. De nombreux acteurs du territoire ont participé à ces ateliers : le conservatoire des espaces naturels (CEN), le parc naturel régional de la Chartreuse (PNR Chartreuse), les communes concernées (élus et chargés de mission), la fédération de pêche, l'association de pêche locale (APPMA), les services de l'Etat (DREAL et DDT), l'office français pour la biodiversité (OFB), plusieurs associations.

Les fiches actions ont été rédigées avec ces acteurs début 2022. Le nouveau contrat a été signé en juillet 2022. L'une des fiches actions du contrat de rivière est centrée sur le rétablissement du transit sédimentaire du Guiers. Elle a donc été discutée et validée en comité de rivière.

La concertation a surtout été organisée pour construire le nouveau contrat de rivière, pas uniquement pour élaborer le plan de gestion sédimentaire. Il aurait été difficile de mobiliser les communes uniquement sur ce sujet. Il y a eu également beaucoup de concertation pour la construction du plan d'action pour la prévention contre les inondations (PAPI), ainsi que pour la réflexion sur l'espace de bon fonctionnement (EBF) de la rivière.

La concertation est maintenant mise en œuvre au moment de la réalisation des actions elles-mêmes. Les acteurs concernés sont associés. Pour les actions concernant la morphologie du Guiers, le SIAGA a décidé dorénavant d'associer plus étroitement les citoyens par la mise en place de démarches participatives.

**L'AIN (01) : UNE POLITIQUE DE PLUSIEURS ANNEES EN MATIERE DE GESTION SEDIMENTAIRE**

Le plan de gestion sédimentaire est issu d'une longue politique en matière de gestion sédimentaire sur le territoire depuis 20 ans. La structure porteuse de la politique de l'eau sur le territoire, qui a évolué au fil du temps pour devenir aujourd'hui le SR3A, réalise des travaux de gestion sédimentaire.

La rivière d'Ain est une rivière particulièrement étudiée du point de vue du transport solide. Il existe de nombreuses études sur ce sujet, et notamment une thèse, qui a analysé le fonctionnement sédimentaire de la rivière et a évoqué la nécessité d'une intervention anthropique. L'objectif de travaux de gestion sédimentaire a été intégré au SAGE grâce à un consensus des acteurs de la CLE (commission locale de l'eau) sur la question de la dynamique fluviale. Une commission thématique sur ce sujet a été créée au sein de la CLE.

Les acteurs associés – au-delà de ceux qui sont présents au sein de la CLE – au fil des 20 dernières années sur les questions de gestion sédimentaire ont été : les communes des secteurs concernés, la fédération de pêche, les naturalistes (site Natura 2000), la fédération de chasse, les clubs de canoë. Des rencontres ponctuelles ont eu lieu avec les randonneurs et les sportifs, surtout durant les périodes de travaux.

## PHASE DE CONCERTATION/VALIDATION N°1 : DIAGNOSTIC SOCIOTECHNIQUE PARTAGE

### 4.1.5. RECENSER ET RECUEILLIR LES ETUDES ET DONNEES MOBILISABLES SUR LA RIVIERE

#### 4.1.5.1. USAGES ET ACTIVITES SUR LA RIVIERE

Les données et études sur les usages et activités (agriculture, pêche, baignade, canoë-kayak, irrigation, hydroélectricité, extraction de graviers, etc.), ainsi que sur leur poids économique, sont intéressantes à rassembler à ce stade pour nourrir la réflexion. Elles pourront également être exploitées ultérieurement dans la phase de concertation. Afin de préciser le contexte économique, on pourra notamment regarder le type d'agriculture pratiqué et son importance dans l'économie locale, l'occupation des sols en bordure de rivière, l'importance de la production de granulats, de la production d'hydroélectricité (barrages, seuils) etc. **NB** : réaliser une étude historique de la rivière, de ses aménagements, des usages en place est utile pour appréhender l'évolution des usages au cours du temps et les interactions de ces usages avec le fonctionnement hydromorphologique et sédimentaire de l'hydrosystème.

#### 4.1.5.2. OUTILS REGLEMENTAIRES OU CONTRACTUELS EN PLACE

Les outils réglementaires ou de planification en place ou en cours d'élaboration ainsi que leur dispositif de mise en œuvre font l'objet d'une attention particulière. Ils peuvent être complémentaires au plan de gestion sédimentaire ou venir appuyer sa construction. Ainsi, on examinera le contenu des documents suivants :

- le schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE), le programme de mesures (PDM) ;
- les schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE), les contrats de milieux et les contrats territoriaux ;
- le plan de gestion du risque d'inondation (PGRI), les stratégies locales de gestion du risque inondation (SLGRI), les plans de prévention des risques inondations (PPRI) et les programmes d'actions de prévention contre les inondations (PAPI) ;
- les schémas de cohérence territoriale (SCoT), les plans locaux d'urbanisme (PLU) et plans locaux d'urbanisme intercommunaux (PLUi).

Tableau 20 : Les différents types d'approches socio-économiques et politiques pouvant être conduites au stade de l'état des lieux et du diagnostic (à mettre en œuvre selon les contextes)

| Type d'étude                                  | Qu'étudie-t-on ?  | Comment ?   | Auprès de qui ?   | Quel outil pour quelle ambition ?  |
|---|---|---|---|--|
| Etude sociologique                            | Perceptions du cours d'eau et attachements ou peurs générés par celui-ci  | Entretiens individuels  | Informateurs privilégiés  | Le choix de la méthode d'analyse et l'envergure de l'approche sociologique dépendent des usages présents sur le cours d'eau. Si celui-ci est peu investi par des usages ou par les riverains, quelques entretiens avec les informateurs privilégiés suffisent. S'il est très investi par de nombreux usages, l'approche peut être plus poussée.<br><b>Pour une analyse rapide : écoute des informateurs privilégiés.</b> |
|   | Usages (irrigation, hydroélectricité, pêche, canoë-kayak, etc.)<br>Usages discrets (promenades, baignades, pique-nique, siestes, etc.)<br>Pratiques riveraines  | Entretiens collectifs<br>Questionnaires<br>Micro-trottoir   | Usagers du cours d'eau<br>Acteurs du territoire<br>Grand public |  |
|   | Usages<br>Usages discrets<br>Pratiques riveraines   | Observation des usages<br>Observation des pratiques riveraines  | Usagers du cours d'eau<br>Acteurs du territoire<br>Grand public |  |
| Etude économique                              | Usages sur le cours d'eau et en lien avec le cours d'eau<br>Emplois, activités économiques, chiffres d'affaires, etc. générés par le cours d'eau lui-même ou sa présence sur le territoire  | Bibliographie<br>Recueil de données sur des sites de référence (INSEE, offices de tourisme, etc.)<br>Entretiens individuels | Informateurs privilégiés<br>Usagers du cours d'eau              | Le choix de la méthode d'analyse et l'envergure de l'approche économique dépendent des usages présents sur le cours d'eau, et surtout de l'enjeu économique qu'ils représentent pour le territoire. Plus l'enjeu économique est important pour le territoire, plus cela justifie de réaliser une étude économique poussée.   |
| Etude historique                              | Histoire du cours d'eau dans le territoire : les usages passés et présents, leur évolution au fil du temps, les choix d'aménagements, les événements marquants (crues, pollutions...)   | Bibliographie<br>Entretiens individuels ciblés<br>Consultation des archives   | Informateurs privilégiés  | Des entretiens individuels très ciblés peuvent généralement suffire à recueillir l'histoire du cours d'eau dans le territoire. Néanmoins, lorsqu'il y a un enjeu risque (inondations) ou un enjeu patrimonial fort (barrages, seuils dans le cours d'eau), une approche historique un peu plus poussée peut se justifier.<br><b>Pour une analyse rapide : écoute des informateurs privilégiés.</b>                       |
| Etude territoriale actuelle et/ou prospective | Connaître les projets territoriaux actuels ou à venir afin de repérer les articulations possibles avec eux et éventuellement associer leurs porteurs au comité de pilotage ou dans les réunions de concertation   | Entretiens individuels ou collectifs<br>Ateliers prospectifs  | Informateurs privilégiés<br>Acteurs du territoire               | Si des ateliers prospectifs ont été organisés dans le cadre de l'élaboration du SAGE (ou dans le cadre d'autres projets sur le territoire), il peut être intéressant de prendre connaissance des éléments produits.<br><b>Pour une analyse rapide : écoute des informateurs privilégiés.</b>   |
| Etude de faisabilité foncière                 | Prendre en compte dans le projet la difficulté à mobiliser ou acquérir des terrains : fort morcellement parcellaire, beaucoup de propriétaires ou de types de propriétaire (personne physique, morale, publique...), complexité des partages de droit de propriété (indivision, recherche d'héritier...), forte pression foncière (agricole, urbaine) | Enquête généralement soustraite à la SAFER ou à un EPFL   | Propriétaires fonciers des parcelles dans l'EBF                 | Une étude de faisabilité foncière se justifie s'il y a une forte pression foncière sur le territoire ou s'il y a un morcellement important des parcelles en bord de rivière.<br><b>Pour une analyse rapide : rencontre des propriétaires potentiellement concernés et/ou des représentants de professionnels (agence d'urbanisme, chambre d'agriculture, chambre du commerce et de l'industrie).</b>                     |

#### 4.1.6. ECOUTER LES ACTEURS DU TERRITOIRE POUR CERNER LEURS INTERETS ET LEURS BESOINS (ENQUETES DE TERRAIN, ENTRETIENS)

L'enjeu est d'approfondir le travail réalisé lors de la réflexion préalable sur la connaissance et la perception des acteurs favorables ou non au projet, et d'entendre les raisons qui pourraient les faire adhérer ou s'opposer au projet.

On privilégiera, dans un premier temps, les « informateurs privilégiés » que sont les membres du comité de pilotage. Puis, selon ce qui aura été recueilli dans ces entretiens, on jugera s'il est nécessaire ou non de conduire une écoute spécifique d'autres acteurs du territoire.

Une écoute préalable, en bilatéral, permet de recueillir les intérêts et besoins des acteurs à prendre en compte au mieux dans le projet. C'est aussi une occasion précieuse de « faire de la pédagogie autour du projet ». Il s'agit d'écouter non seulement leurs pratiques et leurs usages du cours d'eau, mais aussi leurs perceptions, leurs éventuels attachements - « c'est dans cette rivière que j'ai appris à nager » - « c'est dans cette rivière que je pêchais avec mon grand-père » - mais aussi leurs enjeux et attentes vis-à-vis du projet de plan de gestion sédimentaire.

Cette écoute préalable peut être réalisée lors d'entretiens individuels, d'entretiens collectifs, que ce soit hors site ou au contraire le long de la rivière. Une phase de questionnaires peut éventuellement être organisée. Comme déjà dit plus haut, cette phase d'écoute a pour effet « d'embarquer les interviewés dans le projet » et d'apporter des éléments en entrée de la phase de concertation. Selon la taille du territoire et l'ambition du projet, elle peut être limitée à quelques acteurs ou menée à plus grande échelle.

#### 4.1.7. PREPARER LE PROCESSUS DE CONCERTATION ET LE SITUER PAR RAPPORT A LA GOUVERNANCE EN PLACE ET AU COMITE DE PILOTAGE, AU COMITE TECHNIQUE

Elaborer le plan de gestion sédimentaire d'une rivière ne se résume pas à une étude environnementale centrée sur le cours d'eau et son fonctionnement. La démarche implique la prise en compte des enjeux territoriaux que sont notamment les ouvrages (barrages, seuils, etc.), mais aussi l'occupation des sols en bordure de rivière, les activités économiques ou récréatives, et les usages en place sur le cours d'eau lui-même.

Il est donc nécessaire de mener la réflexion en concertation avec les acteurs des territoires concernés. Il peut par exemple s'agir des élus des communes, des associations de pêche, des clubs de canoë-kayak, des hydroélectriciens ayant des barrages sur le cours d'eau, des agriculteurs qui ont une activité dans le lit majeur ou des seuils d'irrigation dans la rivière, des carriers qui extraient dans le lit majeur, etc. L'association de ces différents acteurs doit être prévue tout au long de la démarche, faute de quoi des réactions vives et des freins au projet peuvent émerger. Il s'agit bien de construire, en concertation avec eux, les orientations du plan de gestion sédimentaire et les grands objectifs que l'on souhaite atteindre. Leur implication dès le début de la réflexion – donc dès le diagnostic - leur permet de comprendre les services rendus par le cours d'eau, y compris pour leurs propres usages, et ouvre plus de chances à des actions de gestion sédimentaire ambitieuses et respectées par tous.

Le comité de pilotage clarifie la composition et le rôle des réunions de concertation – s'il est décidé d'en mettre en place - thématiques ou géographiques dans la construction du plan de gestion sédimentaire. Ces réunions de concertation rassemblent tous les acteurs intéressés et concernés par le projet : les élus (de l'eau mais aussi de l'environnement, de l'urbanisme, de l'aménagement du territoire) les usagers du cours d'eau et de ses berges (pêcheurs, kayakistes, carriers, hydroélectriciens, agriculteurs...) et éventuellement les habitants et les riverains.

##### 4.1.7.1. QUAND ELARGIR LA CONCERTATION ?

Le porteur du projet se pose la question d'élargir la concertation lorsque la rivière fait l'objet de nombreux usages ainsi que ses berges, et que les usagers concernés ne sont pas présents dans les instances de gouvernance, ni dans le comité de pilotage ou le comité technique.

Le porteur du projet se posera donc la question de qui associer au projet et de quelle façon ?... dans le comité de pilotage, le comité technique ou dans des réunions de concertation ?

#### 4.1.7.2. QUEL CADRE DE CONCERTATION ?

Lors de la préparation des réunions de concertation, le comité de pilotage définit l'objet et le cadre de la concertation. Il s'agit d'expliquer clairement aux participants à ces réunions la démarche dans laquelle ils s'engagent. Cet engagement peut se traduire par un mandat écrit qui précise :

- l'objet de la concertation : sur quoi porte-t-elle exactement ? Cela peut ne pas être sur la totalité du bassin versant, mais uniquement sur certains tronçons à enjeux. Qu'est-ce qui est discuté ? Qu'est-ce qui ne l'est pas ?
- le cadre de la concertation : qui est convié aux réunions de concertation ? Combien de temps va durer la concertation ? Combien de réunions va-t-on organiser ? Sur quel ordre du jour ? comment va-t-on travailler ? Comment sera pris en compte ce qui est dit dans ces réunions de concertation ?
- Il est souhaitable de dire précisément la production attendue de la réunion de concertation : un état des lieux, un diagnostic, des propositions d'actions, une évaluation de scénarios, etc. ;
- le processus de décision : quel statut est accordé à ce qui est dit dans les groupes de concertation ? Statut consultatif ? Ou co-construction ? Comment ce qui a été produit viendra-t-il alimenter le processus de décision ? S'agit-il de consulter les acteurs ? De construire ensemble des propositions ? De décider d'un scénario ? Qui tranchera et prendra les décisions au final ?

#### **LE BUËCH (05) : UNE PHASE D'ECOUTE ET DE DIAGNOSTIC ASSOCIANT, PAR SECTEUR, LES INSTITUTIONNELS, LES RIVERAINS, LES AGRICULTEURS**

La démarche a consisté en un premier temps à convier les acteurs du territoire et les habitants à des réunions publiques de lancement, largement ouvertes à toutes celles et ceux qui souhaitaient participer. Lors de ces réunions, les participants étaient invités à s'inscrire aux groupes de travail organisés par secteur (les 3 secteurs du Buëch : le grand Buëch à l'amont, le petit Buëch à l'amont également, et le Buëch aval après la commune de Serres).

Le comité de pilotage était composé des partenaires institutionnels et des communes du bassin versant : le SMIGIBA, les 4 EPCI membres du SMIGIBA, la DDT 05, l'agence de l'eau, la Région PACA, le Département 05, les communes traversées par la Buëch et ses principaux affluents inclus dans l'étude (20 communes), TOTAL et EDF, l'office français pour la biodiversité (OFB).

Le processus de concertation a alterné, pour la 1ère phase d'écoute et de diagnostic, des réunions du comité de pilotage et des groupes de travail organisés par secteur géographique. Les réunions étaient multi-acteurs et donc multi-enjeux. Chaque groupe de travail était composé de 15 participants : des institutionnels, des riverains, des agriculteurs.

#### 4.1.8. FAUT-IL FAIRE APPEL A UN PROFESSIONNEL DE LA CONCERTATION ?

L'appel à un professionnel de la concertation n'est pas à préconiser de façon systématique ; il dépend du contexte, de l'ampleur du projet et du nombre de parties prenantes, de la compétence du porteur de projet pour concevoir et animer le processus de concertation. Le retour d'expérience montre qu'une démarche concertée peut éventuellement être menée sans professionnel, cependant les témoignages a posteriori évoquent une situation qui aurait sans doute été plus confortable avec.

« Une démarche de concertation menée par un professionnel, donc extérieur au réseau d'acteurs du territoire, aurait permis de gagner du temps en évitant que des acteurs ne reviennent régulièrement – et ce jusqu'à la veille des travaux – sur des points déjà discutés » (un chargé de mission).

Recourir à un professionnel de la concertation n'est pas un gage absolu de réussite, néanmoins, mener une bonne concertation requiert un savoir-faire et de la technique, et nous le recommandons au minimum dans les cas complexes.

Un professionnel de la concertation s'engage à une posture de neutralité et à être garant du processus de concertation. Il se préoccupe du respect du périmètre de la concertation et veille à une prise de parole équilibrée entre les différentes parties prenantes. Il ne prend pas position sur le fond du sujet traité.

Le réflexe est souvent de faire appel à un professionnel lorsque la situation est déjà tendue, voire conflictuelle. Il est alors fait appel à un médiateur, qui aura, de la même façon, une posture de neutralité et de garant du processus de médiation. Dans ce cas, le médiateur peut se voir confier, en un premier temps, la mission de vérifier qu'il existe encore un espace minimal de concertation.

Lorsque le porteur du projet pense que celui-ci pourra générer des conflits locaux ou de fortes oppositions, il est alors souhaitable d'anticiper et de faire appel à un professionnel dès le lancement du projet.

#### 4.1.9. COMMENT ANIMER LA CONCERTATION AU STADE DU DIAGNOSTIC ?

##### 4.1.9.1. REALISER UN DIAGNOSTIC TERRITORIAL CONCERTÉ

Au stade du diagnostic, la concertation avec les usagers, voire les riverains et les habitants, permet d'établir un diagnostic social, économique et territorial. Les différentes dimensions listées ci-après peuvent faire l'objet d'un travail en réunions de concertation :

##### 4.1.9.2. AVOIR UNE VISION DES ENJEUX SOCIO-ECONOMIQUES PRESENTS

En pratique, comment décrire le paysage économique ?

A l'aide de descriptions qualitatives d'activités économiques, complétées par des indicateurs socio-économiques quantifiés représentatifs (un nombre de personnes, d'hectares, de visiteurs, etc.) ou monétarisés (chiffre d'affaires, emplois, valeur ajoutée, coûts ou pertes de revenu...), non nécessairement exhaustifs, trois types de relations milieux-usages peuvent ainsi être décrits :

- les secteurs et usages de l'eau qui peuvent être considérés comme exerçant des pressions sur les milieux aquatiques, notamment sur le transit sédimentaire, par exemple : urbanisation conduisant à des modifications de la morphologie des cours d'eau ;
- les secteurs et usages de l'eau qui bénéficient de ressources en eau et de services fournis par les écosystèmes aquatiques, par exemple le tourisme lié à la qualité des cours d'eau, la pêche ;
- les dommages et impacts négatifs sur certains secteurs et usages de l'eau qui résultent d'un état dégradé actuel des ressources en eau et des écosystèmes aquatiques, par exemple les coûts des inondations générées par un mauvais état morphologique des milieux aquatiques.

##### 4.1.9.3. CONNAITRE ET RESTITUER L'HISTOIRE DU COURS D'EAU DANS SON TERRITOIRE

Quelle évolution des perceptions, aménagements, pratiques et usages dans le cours d'eau et dans son voisinage ? Quels événements marquants (crues, pollutions, etc.) ? L'approche historique peut être abordée selon deux points de vue complémentaires :

- l'histoire du cours d'eau dans le territoire (la place qu'il occupe, les évolutions de son lit, de son tracé, de son bassin versant, etc.) ;
- l'histoire des usages, sur le cours d'eau et dans son voisinage.

Ces deux points de vue apportent des éléments de compréhension sur les choix d'aménagement qui ont été faits, et sur les pratiques et usages en place aujourd'hui. La connaissance des événements marquants comme les crues, les inondations, les sécheresses, les assècs et les pollutions est également importante : ceux-ci ont conditionné le rapport que les hommes entretiennent avec le cours d'eau. Recueillir l'histoire du cours d'eau dans son territoire, au-delà de la connaissance que ce travail apporte, permet de fédérer les acteurs du territoire eux-mêmes (collectivités, acteurs économiques, associations, riverains, habitants) autour d'une histoire commune et partagée. Cela peut constituer une entrée en matière pertinente lors des réunions de concertation.

#### 4.1.9.4. IDENTIFIER LES ENJEUX FUTURS DE GESTION DE L'EAU

Quels enjeux futurs de gestion de l'eau au regard des évolutions possibles des secteurs socio-économiques, de l'aménagement du territoire, de nouveaux projets structurants ?

En pratique, deux méthodes complémentaires sont proposées pour aborder la question du (ou des) futur(s) de la gestion de l'eau pour un territoire donné :

- la construction d'un scénario tendanciel permet d'estimer le futur probable du territoire si on ne fait rien de plus que ce qui est prévu, à partir :

a) d'évolutions passées des différents usages de l'eau, des aménagements sur la rivière, et de leurs pressions sur les milieux aquatiques ; b) de changements futurs (certains) des principales politiques sectorielles impactant les usages de l'eau et aménagements de la rivière ; c) des actions prévues (« dans les tuyaux ») pour l'amélioration de l'état des écosystèmes aquatiques.

Cette construction analytique mobilise des données socio-économiques sur une période récente (de 5 à 15 ans selon les secteurs et données disponibles), combinées avec des projections futures sectorielles ou territoriales existantes (issues de stratégies sectorielles ou schémas territoriaux de type SCOT) et de dires d'acteurs et d'experts du territoire.

- la mise en œuvre d'une démarche de prospective territoriale, permettant de coconstruire avec les acteurs du territoire différents futurs possibles de développement socio-économique local.

Ces futurs sont associés à différents modes d'organisation et de gestion des ressources en eau et des milieux aquatiques. Cette démarche permet d'identifier des alternatives de développement au scénario tendanciel pour le territoire. Une telle réflexion collective prend toute son importance dans un contexte de crise économique et écologique qui questionne les choix de développement des territoires et de la société en général. Une démarche prospective peut ainsi permettre d'organiser un débat stratégique sur l'avenir du territoire et de faire émerger des solutions non envisagées initialement.

Les évolutions possibles des usages de l'eau et de l'aménagement du territoire sont à traduire en termes d'évolution des pressions sur la qualité de la ressource et des milieux aquatiques, et sur le transit sédimentaire. Ces étapes permettront de caler le niveau d'ambition des acteurs et donc les objectifs à poursuivre dans le plan de gestion sédimentaire.

Concrètement, cet exercice de prospective est à réaliser en associant les acteurs de manière élargie et en combinant plusieurs formats de travail (entretiens individuels, travaux en petits groupes d'acteurs thématiques, ateliers de travail collectif). Il peut être réalisé lors des diagnostics ou lors des réunions de concertation dédiées à la construction du plan de gestion sédimentaire.

#### 4.1.9.5. ANIMER LES REUNIONS DE CONCERTATION

Au stade du diagnostic, la démarche de concertation peut prévoir 1 ou 2 réunions par type d'acteurs aux usages similaires ou proches ou par groupe géographique (mélangeant les acteurs). Le périmètre et le cadre de ces réunions de concertation doivent avoir été fixés et annoncés aux participants. Ces réunions peuvent être de différentes natures : les réunions « d'écoute » ; les réunions « état des lieux » ; les réunions « apports de connaissance ».

- Les réunions « d'écoute ». Objectif : établir un rapide pré-diagnostic.

Comme leur nom l'indique, ces réunions visent à ECOUTER les acteurs, afin d'établir avec eux un rapide pré-diagnostic. L'écoute peut être individuelle ou collective, comme c'est le cas dans ces réunions. Il s'agit par ailleurs de veiller à ne pas trop mélanger les acteurs afin d'éviter les effets parasites et/ou de censure. C'est la qualité du questionnement qui est déterminante. C'est aussi la volonté de ne pas trop induire les réponses, et donc

d'aborder les sujets par des questions larges et ouvertes, voire non centrées sur la rivière, mais plutôt axées sur le territoire et les usages.

- Les réunions « état des lieux ». Objectif : établir un diagnostic partagé

Une étude bibliographique et cartographique ainsi qu'une éventuelle enquête auprès des acteurs du territoire (entretiens ou questionnaires) aura permis de recueillir des éléments à aborder lors des réunions de concertation. Les bureaux d'études (techniques ou socio-économiques) qui ont généralement réalisé ce travail seront présents pour commenter tous ces éléments à l'oral.

Des analyses diachroniques, des cartes historiques, une analyse des usages, une restitution des enquêtes préalables réalisées auprès des acteurs pourront être mises sur la table comme base de discussion. L'objectif de ces réunions qui ont pour effet de « lancer le projet » est clairement d'établir un diagnostic partagé de la situation. Ces réunions peuvent utilement être accompagnées de visites de terrain.

Les méthodes d'animation de ces réunions sont prévues pour faciliter la prise de parole des participants et les échanges entre eux. Ces réunions visent à enrichir la matière recueillie lors de l'état des lieux et à partager le diagnostic entre tous. Elles permettent de créer les conditions favorables à la suite du travail qui portera sur les objectifs et les actions du plan de gestion sédimentaire.

- Les réunions « apport de connaissance ». Objectif : expliquer le fonctionnement d'un cours d'eau, les services qu'il rend et le rôle du transit sédimentaire

Certains porteurs de projet prévoient lors de la phase de concertation une réunion ou une partie de réunion consacrée à l'apport de connaissance sur le fonctionnement d'un cours d'eau. Il s'agit là de faire « gagner en compétences » les participants à la concertation, qui auront un autre regard sur le projet et seront plus à même de faire des propositions adaptées au regard des enjeux de gestion sédimentaire.

A l'issue de ces réunions de concertation, le maître d'ouvrage, accompagné par les bureaux d'études, peut finaliser un diagnostic sociotechnique qui sera présenté au comité de pilotage.

#### 4.1.10. VALIDER LE DIAGNOSTIC SOCIO-TECHNIQUE

**La validation de cette première étape est déterminante.** C'est généralement là que se joue un premier point d'accord entre les acteurs. C'est également à ce stade que se tissent les liens de confiance entre eux, ou de premières régulations, chacun en venant à connaître et comprendre les enjeux de l'autre. Cette étape est nécessaire pour qu'une construction collective d'objectifs et d'actions, généralement moins consensuelle, soit possible. La validation de cette phase, tout comme celle des étapes précédentes et des étapes suivantes, est préparée en comité de pilotage et ensuite votée en commission locale de l'eau ou en comité de rivière lorsque ces instances existent, sinon en conseil syndical, dans le cas où le projet est porté par un syndicat de rivière, ou en conseil d'intercommunalité le cas échéant. Comme évoqué plus haut, le plan de gestion peut être déjà prévu dans une fiche action du contrat de rivière, donc déjà validée en conseil syndical. Dans ce cas, c'est alors souvent le comité de pilotage du plan de gestion qui le valide.



- **Réaliser un état des lieux** des études et données existantes, que ce soit sur le plan **biophysique** ou sur le plan **socio-économique**, et le compléter avec une **phase d'écoute des acteurs** ;
- Veiller à **bien articuler les réunions de concertation avec la gouvernance** en place (articuler processus de concertation et processus de décision) et à « accuser réception » de chaque avis exprimé. Si nécessaire faire appel à un professionnel de la concertation ;
- Être particulièrement attentif au **processus de validation du diagnostic**.

## PHASE DE CONCERTATION/VALIDATION N°2 : DEFINITION CONCERTEE DES OBJECTIFS DU PLAN

Pour travailler cette étape, il peut être intéressant de prévoir une sensibilisation rapide et « vulgarisée » du fonctionnement sédimentaire d'une rivière ainsi que des conditions d'un bon fonctionnement sédimentaire. Quelques retours d'expériences d'autres territoires peuvent venir éclairer les débats et aider les participants, à comprendre les objectifs que l'on est en train de se fixer. Il s'agit ensuite, à partir du diagnostic partagé et de cette sensibilisation au fonctionnement sédimentaire de la rivière de se fixer des objectifs à atteindre. Ces objectifs sont construits et discutés au sein des réunions de concertation, qui à ce stade sont multi-acteurs, puis au sein du comité de pilotage. La réflexion est menée sur la base de l'étude technique qui aura prédéfini des secteurs à enjeux et/ou des secteurs à traiter prioritairement. Dans ces réunions et au sein du comité de pilotage, ont lieu des régulations entre acteurs, ainsi la présence d'acteurs ayant déjà une expérience sur un territoire voisin peut être intéressante.

### LE FIER (74) : UN COMITE DE PILOTAGE ASSOCIANT ELUS ET TECHNICIENS DU COMITE DE BASSIN DU FIER ET DU LAC D'ANNECY, ET S'APPUYANT SUR LE RETOUR D'EXPERIENCE D'UN TERRITOIRE VOISIN

Le comité de pilotage de l'étude conjointe espace de bon fonctionnement et plan de gestion sédimentaire portée par le Syndicat Mixte du Lac d'Annecy (SILA), était composé des membres du comité de bassin du Fier et du lac d'Annecy (élus et techniciens). Chaque EPCI concerné faisait donc partie du comité de pilotage.

L'étude technique (diagnostic) a été réalisée à l'échelle du bassin versant de mars 2019 à novembre 2019.

Dès décembre 2019 des réunions ont été organisées par EPCI avec pour ordre du jour : les objectifs du plan de gestion sédimentaire, la typologie des actions, le suivi. Le diagnostic global à l'échelle du bassin versant était présenté, ainsi que les actions pressenties. Un temps d'échanges et de discussions était prévu. Les élus référents et services référents des EPCI, le SILA et les bureaux d'études participaient à ces réunions. Les financeurs (Agence de l'Eau RMC et Département 74) et les services de l'Etat (DDT74) étaient également invités. Les 5 réunions au total ont été organisées par territoire. Le département 74 a assisté à la réunion du territoire de la CC des Vallées de Thônes, EDF à celle de Rumilly Terre de Savoie.

La présence des agents du territoire du Chéran (SMIAC) lors des COTECH et des COPIL, plus avancé sur les sujets de l'espace de bon fonctionnement et du transit sédimentaire, a été précieuse.

### LE GUIERS (38) : UNE ACTION SUR LE TRANSIT SEDIMENTAIRE REFLECHIE EN COHERENCE AVEC D'AUTRES OBJECTIFS DU CONTRAT DE RIVIERE

L'origine de l'élaboration du plan de gestion sédimentaire remonte à plusieurs années, notamment aux réflexions sur la prise de compétences GEMAPI. L'idée d'un plan de gestion sédimentaire était déjà actée avant le précédent contrat, dans lequel était notamment prévue la restauration de la continuité écologique de 7 ouvrages. Or dans continuité écologique il y a continuité sédimentaire.

Les actions de restauration de la morphologie du Guiers, notamment les actions sur l'espace de bon fonctionnement grâce au recul de digues, ont entre autres pour effet de remobiliser des sédiments.

Le SIAGA a souhaité avoir une vision globale de bassin et a lancé une étude stratégique à l'échelle de celui-ci. Cette étude a permis de définir toutes les actions du contrat de rivière. Elle a notamment permis de repérer des zones déficitaires et de définir des points précis pour de la recharge, sur l'amont du Guiers. Le plan de gestion sédimentaire a ensuite été construit en 2021 – 2022.

Les objectifs du plan de gestion sédimentaire ont donc été définis, non seulement, comme indiqué dans l'encart précédent, en concertation avec les acteurs du territoire, mais aussi en cohérence avec les autres actions du contrat de rivière. Une des fiches actions du contrat de rivière est centrée sur le rétablissement du transit sédimentaire du Guiers.

#### 4.1.11. REUNIONS MULTI-ACTEURS DE CONCERTATION POUR LA DEFINITION DES OBJECTIFS DU PLAN DE GESTION

Tableau 21 : Les différents types d'animation des réunions de concertation pour la définition des objectifs

| Méthode d'animation                     | Quel objectif ?  | Comment cela se passe ?  |
|---|--|--|
| <b>Cartographie des usages</b>          | Proposer une nouvelle organisation des usages tenant compte du transit sédimentaire<br>Identifier les usages à adapter, développer ou éviter   | Les participants positionnent des pictogrammes symbolisant les usages sur des fonds de cartes du territoire et du cours d'eau  |
| <b>Méta-plan ou méthode des post-it</b> | Répondre à une question précise concernant les actions proposées<br>Cette méthode permet de situer rapidement un groupe par rapport à une question précise<br>Elle est généralement utilisée ponctuellement dans une réunion | Les participants notent une idée par post-it et vont coller leurs post-it au tableau-papier<br>L'animateur regroupe les post-it par idée ou par thématique<br>L'animateur synthétise à l'oral ce que le groupe a produit |

#### 4.1.12. VALIDER LES OBJECTIFS DU PLAN DE GESTION SEDIMENTAIRE

Comme le montre les retours d'expériences, la construction, puis la validation, des objectifs du plan de gestion sédimentaire ne sont généralement pas identifiées comme une étape en tant que telle. Les objectifs sont traités parfois en conclusion du diagnostic, parfois en introduction au travail sur les actions à mettre en œuvre.

Or, **il est important d'en faire une étape à part** : les acteurs peuvent partager le diagnostic, mais ne pas être d'accord avec les objectifs... et cela, parfois, parce que cela remet trop en cause leur pratiques. Bien distinguer ces deux étapes permettra alors d'avoir un premier point d'accord sur le diagnostic partagé. Ce premier point d'accord est précieux. Le travail sur les objectifs pourra alors s'enclencher, généralement dans une réunion distincte, et souvent après avoir eu une sensibilisation au fonctionnement du cours d'eau.



- Bien **distinguer la phase d'élaboration des objectifs** des phases de diagnostic et de définition des actions,
- Prévoir **une sensibilisation au fonctionnement d'un cours d'eau**,
- Travailler les objectifs **en lien avec d'autres objectifs** : espace de bon fonctionnement, lutte contre les inondations...,
- Être particulièrement attentif, encore une fois, à la **validation de cette phase**.

## PHASES DE CONCERTATION/VALIDATION N°3 ET 4 : L'ELABORATION CONCERTEE DES ACTIONS A METTRE EN ŒUVRE ET LEUR CHIFFRAGE FINANCIER

### 4.1.13. REUNIONS MULTI-ACTEURS DE CONCERTATION POUR L'ELABORATION ET LE CHOIX DES ACTIONS

Objectif : élaborer le plan de gestion sédimentaire en considérant les enjeux socio-économiques

Ces réunions sont organisées par groupes mêlant les différents profils d'acteurs, le cas échéant représentatifs des secteurs géographiques des territoires.

Les grilles d'analyse multicritère constituent un support pertinent de comparaison des différentes actions. Les éclairages économiques et/ financiers peuvent également enrichir les débats lors des réunions de concertation. Certains porteurs de projet prévoient en début de réunion un temps consacré à l'apport de connaissances sur le fonctionnement sédimentaire d'un cours d'eau. Il s'agit là de faire « monter en compétences » les participants à la concertation, qui auront un autre regard sur le projet et seront plus à même de faire des propositions adaptées au regard des enjeux.

Afin d'aider à l'organisation de ces réunions portant sur l'élaboration des actions, le tableau ci-dessous présente des types d'animation possible.

Tableau 22 : Les différents types d'animation des réunions de concertation pour l'élaboration des actions

| Méthode d'animation  | Quel objectif ?  | Comment cela se passe ?   |
|--|--|---|
| <b>Analyses multicritères</b>  | Apporter des éléments d'éclairage sur les différentes actions afin d'aider à la prise de décisions<br><br>Prioriser les actions en fonction de critères de résultats écologiques et socio-économiques                            | Les participants remplissent la grille d'analyse en regardant plus précisément les effets des actions sur les usages, sur le foncier, sur le patrimoine...<br><br>Ils proposent éventuellement une pondération des critères en fonction des enjeux du territoire. |
| <b>Cartographie des usages</b>   | Proposer une nouvelle organisation des usages tenant compte du transit sédimentaire<br><br>Identifier les usages à adapter, développer ou éviter   | Les participants positionnent des pictogrammes symbolisant les usages sur des fonds de cartes du territoire et du cours d'eau   |
| <b>Construction d'un arbre avec des racines (besoins des participants) et des branches (solutions)</b> | Construire les actions en tenant compte des besoins des différents participants<br><br>Construire sur la base des besoins et non sur la base de positions ou d'opinions  | Dans cette deuxième réunion de concertation, la partie concernant les solutions est remplie   |
| <b>Méta-plan ou méthode des post-it</b>  | Répondre à une question précise concernant les actions proposées<br><br>Cette méthode permet de situer rapidement un groupe par rapport à une question précise<br>Elle est généralement utilisée ponctuellement dans une réunion | Les participants notent une idée par post-it et vont coller leurs post-it au tableau-papier<br><br>L'animateur regroupe les post-it par idée ou par thématique<br><br>L'animateur synthétise à l'oral ce que le groupe a produit                                  |

#### 4.1.14. FAIRE PRE-VALIDER PAR LE COMITE DE PILOTAGE, PUIS VALIDER PAR L'INSTANCE DE GOUVERNANCE LOCALE ET COMMUNIQUER SUR LE PLAN DE GESTION SEDIMENTAIRE



- **Associer dès le début de la démarche** (phase d'écoute) et à toutes les étapes, les acteurs susceptibles de porter une action de recharge et/ou de gestion sédimentaire ;
- Lors de la phase de travail des scénarios de gestion et/ou de définition des actions, **mettre les acteurs susceptibles de porter les actions en posture de responsabilité** : animation d'un groupe de travail et/ou rapporteur d'un groupe de travail ;
- Privilégier des méthodes d'animation qui **favorisent la créativité** (des actions peuvent être proposées) et qui **facilitent la prise de décision** (analyses multicritères par exemple).

##### LE FIER (74) : UN PROCESSUS DE CONCEPTION-VALIDATION DU PLAN QUI ANTICIPE LA MISE EN ŒUVRE DES ACTIONS

Le SILA a organisé des réunions avec chaque EPCI concerné par au moins une action, soit 4 réunions seulement sur les 5 EPCI présents sur le bassin versant, car à ce moment-là la ComCom Fier et Usse n'avait pas d'action prévue sur son territoire. Lors de ces réunions, il s'est agi de s'assurer que les actions inscrites au plan de gestion convenaient au territoire et étaient compatibles avec d'éventuels futurs projets.

**Le SILA a ainsi préparé la mise en œuvre effective des actions dès la conception de celles-ci.**

Voici le calendrier de déroulement des réunions associant les acteurs du territoire et les porteurs des actions :

- fin septembre 2020 : réunion du CoTech pour balayer le diagnostic, les objectifs et orientations du plan, les priorités établies pour les actions ;
- avril 2021 : le SILA fait une présentation de toutes les fiches actions aux financeurs (agence de l'eau RMC et Département 74) et discute du pourcentage de financement envisagé par chacun ;
- été 2021 : rédaction plus détaillée des fiches actions par les bureaux d'études puis envoi aux EPCI concernés pour validation ;
- décembre 2021 : Le comité de pilotage valide le programme d'actions : 24 fiches pour un budget de 14 à 16 M€ HT sur 10-15 ans.

**LA CEZE (30) : LE CHOIX DE TRAVAILLER PAR PETITS SECTEURS ET DE REALISER UN SUIVI REGULIER**

L'étude technique a été réalisée de l'amont à l'aval, sur la totalité du bassin versant de la Cèze, afin, notamment, de repérer les secteurs prioritaires. Elle a permis de réaliser un état des lieux, d'établir un diagnostic, et de fixer des orientations qui ont été déclinées dans un programme d'actions.

L'étude a été pilotée par un chargé de mission de l'ABCèze et suivie par un CoTech avec les partenaires techniques du syndicat : l'agence de l'eau RMC, le département, la région et les services de l'Etat. L'étude et le programme d'actions ont été présentés en comité syndical pour une validation politique par les élus, et en comité de rivière pour une validation technique par tous les partenaires.

Le syndicat, qui a fait le choix de travailler par « petits secteurs », explique :

- Les riverains ne comprennent pas toujours l'objectif des actions de gestion sédimentaire : la vision environnementale des habitants se situe à l'échelle de la parcelle et non à l'échelle du bassin versant. Les impacts amont – aval sont méconnus. Les exhaussements sont perçus négativement : les bancs de gravier ont une mauvaise image... une image de cours d'eau pas entretenu, un risque de rehausse de la ligne d'eau, de débordements sur les parcelles, de fixation de la végétation qui « pompe l'eau de la rivière ». Les graviers indiquent, pour les riverains, un comblement du lit, donc un manque d'eau. Ils s'expliquent les crues par un défaut de curage de la rivière ;
- Il est donc plus facile d'agir sur des petits secteurs...: En dehors d'un projet de moyenne envergure, le syndicat a fait le choix de mener des actions de gestion sédimentaire sur des « petits secteurs » : débroussaillage et scarification de bancs de graviers, poses de blocs dans la Cèze pour stabiliser le fond du lit, acquisitions foncières pour laisser la rivière éroder, déplacement de graviers (pour passer les obstacles), ...
- 3. ... tout en réalisant un suivi régulier et une amélioration de la connaissance : grâce à un suivi régulier, le syndicat améliore la connaissance du fonctionnement sédimentaire de la Cèze, la partage avec les élus, avec les riverains et les habitants, lors de réunions publiques. Le syndicat cherche aujourd'hui à synthétiser la connaissance sur le fonctionnement de ses cours d'eau dans des documents de communication, et à montrer l'exemple, au travers de petits projets, aussi bien pour les usagers que pour les élus. Des profils en travers sont régulièrement établis, ce qui permet entre autres de suivre les impacts des travaux réalisés. Un bilan sédimentaire plus global est prévu pour l'année prochaine.

## PHASES DE CONCERTATION/VALIDATION N°5 ET 6 : LA MISE EN ŒUVRE DU PLAN, LA COMMUNICATION PENDANT LA PHASE DE TRAVAUX, LE SUIVI CONCERTÉ DU PLAN

La mise en œuvre des actions peut être réalisée par différents maîtres d'ouvrage. Elles peuvent supposer d'associer des riverains, par exemple lorsque ceux-ci sont propriétaires fonciers des parcelles concernées par les travaux. Il est donc important d'anticiper cette phase de mise en œuvre des actions et/ou de travaux en associant, le plus en amont possible, les propriétaires riverains, et, plus largement, les acteurs qui peuvent être impactés par les travaux : agriculteurs, randonneurs, vététistes, kayakistes, etc.

Pour certains travaux (cours d'eau en traversée de ville ou de village) des réunions publiques peuvent être prévues, ainsi que des panneaux d'information en bord de rivière. Plus généralement, la communication en amont et pendant la phase des travaux (mais aussi après celle-ci) est à prévoir.

Pour suivre la réalisation des actions prévues au plan de gestion sédimentaire, il est conseillé de monter un comité de suivi. Celui-ci, en ayant une configuration identique ou proche du comité de pilotage qui a validé le plan de gestion, permet de soutenir la dynamique du projet, mais aussi et surtout de maintenir une « arène de débat » complémentaire, le cas échéant, à la commission locale de l'eau ou au comité de rivière, qui porte un regard plus spécifiquement sur la gestion sédimentaire de la rivière.

### L'ASSE (04) : UNE MISE EN ŒUVRE DES ACTIONS « A L'OPPORTUNITE »

Le plan de gestion sédimentaire de l'Asse a été rédigé au sein du comité technique, en parallèle de la démarche de définition de l'espace de bon fonctionnement.

Présenté en comité de pilotage, il comporte 20 actions qui se déclineront sur plusieurs années de travail.

Ces actions sont issues du diagnostic du bassin versant, qui a mis en avant des cours d'eau préservés présentant une richesse naturelle remarquable.

Le plan est donc bien basé sur une vision globale de bassin versant.

Les actions sont ainsi classées suivant 3 axes : La restauration et préservation de la bande active / L'élimination des perturbateurs hydromorphologiques / Le suivi pour comprendre et anticiper.

La planification initiale est faite en cohérence avec les priorités qui ont pu être définies.

Pour la mise en œuvre concrète, le Syndicat (en partenariat étroit avec les 3 intercommunalités du bassin versant) fait évoluer cette planification pluriannuelle, en fonction des opportunités, des nouveaux éléments de connaissance qui se présentent, et notamment en profitant de la volonté d'action des intervenants concernés.

### L'AIN (01) : UNE VALIDATION PREALABLE PAR LES ELUS ET UNE MISE EN ŒUVRE EN CONCERTATION AVEC LES ACTEURS CONCERNES

Les différents lieux possibles de **réinjection de sédiments** sur le territoire ont été présentés aux élus du conseil syndical et aux conseils municipaux concernés. Les scénarios et secteurs d'intervention ont également été présentés en CLE et en bureau de CLE. De façon générale, le syndicat a privilégié l'action là où il y existait du **foncier public**.

Des réunions par groupes d'acteurs ont eu lieu une fois que les secteurs étaient identifiés et validés par les élus. Selon les secteurs d'intervention, les acteurs, membres ou non de la CLE, étaient : les communes, les pêcheurs, les naturalistes (Natura 2000), les chasseurs, la fédération des clubs de canoë, EDF. Des rencontres ponctuelles avec d'autres acteurs, impactés par les travaux de défrichage, ont eu lieu : randonneurs, vététistes.

Le projet a ensuite été soumis à autorisation réglementaire en 2020. Des craintes ont été exprimées dans le cadre de l'enquête publique : crainte d'aggravation des inondations. Le syndicat a pu apporter des réponses

rapidement - y compris par voie de presse - car le plan de prévention des risques inondations (PPRI) était alors en cours de révision.

Pendant la réalisation des travaux fin 2021 – 2022, de grands panneaux de communication ont été mis en place sur les sites de réinjection pour expliquer la démarche. Ces travaux avaient pour objectif de remobiliser des matériaux : déboisement, restauration de lînes, réinjections.

Il y a peu de retours des habitants durant les travaux, même pendant la phase de défrichage. Le SR3A a veillé à ce que le moins d'arbres possible soient coupés et que ceux-ci soient valorisés par une entreprise locale.

Il a également veillé à réduire au maximum les trajets des camions qui ont transporté les sédiments afin d'avoir un bilan carbone le plus faible possible (les sédiments utilisés ont été prélevés à moins de 70 m de la zone de réinjection). Un sentier temporaire pour les randonneurs a été créé durant la durée des travaux.

Le SR3A a ensuite mis en place un comité de suivi des travaux et post travaux. Les suivis portent sur les espèces, la cartographie de la rivière, etc.



- **Anticiper sur la communication** qui sera mise en place pendant la phase de travaux ;
- **Mettre en place un comité de suivi**, qui maintiendra la dynamique du projet, coordonnera les actions mises en œuvre, réfléchira éventuellement à d'autres actions, et sera porteur de la globalité de la démarche.

## PHASE DE CONCERTATION/VALIDATION N°7 : BILAN CONCERTÉ DU PLAN DE GESTION SEDIMENTAIRE

Le comité de pilotage est rassemblé à nouveau pour un bilan du plan de gestion. Celui-ci travaillera sur la base d'un bilan technique, réalisé par un bureau d'études techniques, ainsi que d'un bilan territorial, qui décrira les porteurs d'actions et le système d'acteurs concerné par la gestion sédimentaire et évoquera les difficultés et leviers de mise en œuvre du plan.



- **Maintenir le comité de suivi pour la phase de bilan : il travaillera avec le comité de pilotage** et maintiendra avec lui la dynamique du projet, le portage de la globalité de la démarche, et le travail sur les premiers objectifs du plan de gestion sédimentaire suivant ;
- **Anticiper sur les indicateurs de bilan** dès la phase de conception des objectifs du plan de gestion sédimentaire.

# ANNEXES

## ANNEXE 1 : LA DCE ET LES CONCEPTS UTILISES

Les éléments ci-dessous expliquent et illustrent le document AQUAREF qui fait actuellement référence en France pour la mise en œuvre de la DCE et qui est disponible sur le lien : <https://hydrobio-dce.inrae.fr/quelques-definitions/>.

### Métrieque

D'après ce document, une **métrieque** est un **paramètre ou un ensemble de paramètres décrivant une fonctionnalité de l'écosystème**. Par exemple, le taux d'espèces détritviores, le nombre d'espèces exogènes, la richesse taxonomique, la diversité. **Une métrieque est donc un paramètre descriptif**.

Quelques exemples de **métrieques hydromorphologiques** :

- la largeur de la bande active ;
- le profil en long du talweg ou de la ligne d'eau ;
- le taux d'érosion des berges.

Pour chaque compartiment de l'hydrosystème (la bande active, les berges, le fond du lit alluvial, la ripisylve,...) peuvent être proposées de nombreuses métrieques. Il s'agira ici de proposer les plus pertinentes d'un point de vue opérationnel.

### Indicateur

Pour AQUAREF, un **indicateur biologique** ou bioindicateur est, dans le cadre de l'évaluation DCE, un organisme, un groupe d'organismes ou une fonction biologique de l'écosystème pris en compte pour évaluer l'état du système ou de certains paramètres de son fonctionnement. Il peut aussi s'agir du résultat chiffré issu d'un calcul et exprimant le niveau d'un paramètre descriptif (alors équivalent à un indice).

**Un indicateur est donc une métrieque plus complète qui est porteur d'une « indication » et permet ainsi l'évaluation de l'état ou du fonctionnement d'un hydrosystème.**

**Tous les indicateurs sont des métrieques mais toutes les métrieques ne sont pas des indicateurs.**

Quelques exemples d'**indicateurs hydromorphologiques** :

- la métrieque « largeur de la bande active » n'est pas un indicateur. Cette métrieque seule est en effet proportionnelle à la taille du cours d'eau et ne porte pas d'indication intrinsèque quant à un fonctionnement. Elle peut cependant devenir un **indicateur** de fonctionnement si elle est :
  - rapportée à la superficie du bassin versant (Bande Active Normalisée, Piegay et al. 2009). Elle peut alors indiquer une certaine dynamique/intensité du transport solide ;
  - analysée sous la forme de variations temporelles (entre 2 ou plusieurs dates). Elle peut indiquer une réactivation de la dynamique fluviale ou au contraire un ralentissement, dont il faudra ensuite déterminer la cause ;
  - analysée sous forme de variations spatiales (entre 2 ou plusieurs points le long du linéaire). Elle peut indiquer un changement de comportement morphodynamique dont il faudra ensuite déterminer la cause.
  - etc.
- le profil en long n'est pas un indicateur, pour le devenir, il doit être associé à un élément complémentaire de description : par exemple son évolution entre 2 ou plusieurs dates. Il permet alors d'identifier et de quantifier des **processus d'incision ou d'exhaussement** du lit au cours du temps.

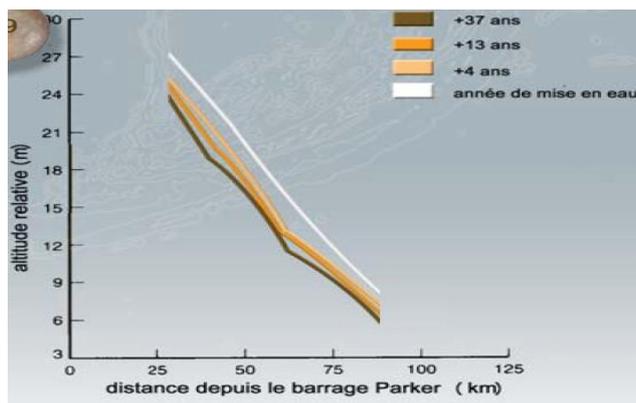


Figure 103 : exemple de métrique : le profil en long du cours d'eau, devenant un indicateur (ici d'un processus d'incision généralisé) lorsqu'il est analysé dans sa trajectoire temporelle

- le **taux d'érosion des berges**, associée à un élément complémentaire de description, sa valeur rapportée à la largeur moyenne du cours d'eau, devient un indicateur de « l'activité géodynamique » du cours d'eau (Malavoi et Bravard, 2010).

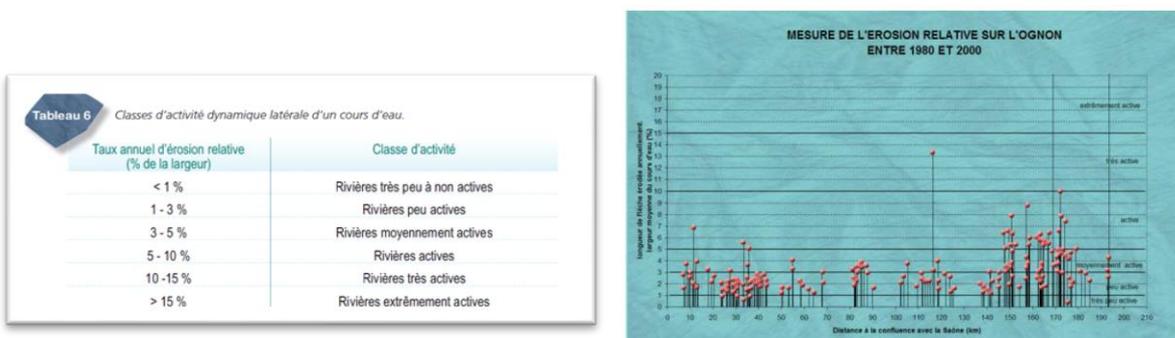


Figure 104 : le taux d'érosion latérale annuelle relatif (largeur érodée/largeur à pleins bords du cours d'eau). Un très bon indicateur de l'intensité des processus érosifs

### Élément de qualité

AQUAREF indique qu'un **élément de qualité biologique (EQB)** est un groupe biologique servant de support à l'évaluation de l'état. La DCE prescrit l'utilisation de 4 EQB pour évaluer l'état (combinaison ou pertinence selon les catégories de masses d'eau) : l'ichtyofaune, les macroinvertébrés benthiques, le phytoplancton et les macrophytes et phytobenthos. Un EQB est donc un « compartiment » au sein duquel des indicateurs permettent l'évaluation de l'état d'un hydrosystème.



La DCE ne prévoit pas que soit évalué un « état hydromorphologique » à l'image de ce qui est prévu pour l'état chimique et l'état écologique. Cependant, les éléments biologiques sont liés, à la fois aux éléments physico-chimiques et aux éléments hydromorphologiques et, dans les états des lieux des districts, les caractéristiques physiques sont souvent signalées comme limitantes pour l'atteinte du bon état écologique. La physico-chimie et l'hydromorphologie sont donc surtout des facteurs explicatifs à l'évaluation de l'état donnée par la biologie : ces deux notions, avec les valeurs qui leur sont associées, servent principalement à **identifier les actions à entreprendre dans le cadre des plans de gestion et des programmes de mesures**. De plus, l'hydromorphologie, non utilisée pour juger de l'atteinte du bon état, est requise pour classer les milieux aquatiques en très bon état.

La DCE préconise l'utilisation de **3 Éléments de Qualité Hydromorphologique (EQH)** qui soutiennent les **paramètres biologiques** : le régime hydrologique, la continuité de la rivière, les conditions morphologiques. Pour ces 3 EQH, il est fait mention d'un très bon état si leurs caractéristiques correspondent à des **conditions non (ou peu) perturbées** (sous-entendu par des activités humaines). Les états bon et moyen ne sont pas référencés mais doivent permettre d'atteindre les valeurs correspondantes (bonnes, moyennes) pour les EQB.

Tableau 23 : les éléments de qualité hydromorphologique

| Éléments de qualité hydromorphologique |   |  |  |
|--|---|--|--|
| Élément                                | Très bon état   | Bon état   | État moyen   |
| Régime hydrologique                    | La quantité et la dynamique du débit, et la connexion résultante aux eaux souterraines, correspondent totalement ou presque totalement aux conditions <b>non perturbées</b> .   | Conditions permettant d'atteindre les valeurs indiquées ci-dessus pour les éléments de qualité biologique. | Conditions permettant d'atteindre les valeurs indiquées ci-dessus pour les éléments de qualité biologique. |
| Continuité de la rivière               | La continuité de la rivière n'est pas perturbée par des activités anthropogéniques et permet une migration <b>non perturbée</b> des organismes aquatiques et le transport de sédiments.   | Conditions permettant d'atteindre les valeurs indiquées ci-dessus pour les éléments de qualité biologique. | Conditions permettant d'atteindre les valeurs indiquées ci-dessus pour les éléments de qualité biologique. |
| Conditions morphologiques              | Les types de chenaux, les variations de largeur et de profondeur, la vitesse d'écoulement, l'état du substrat et tant la structure que l'état des rives correspondent totalement ou presque totalement aux conditions <b>non perturbées</b> . | Conditions permettant d'atteindre les valeurs indiquées ci-dessus pour les éléments de qualité biologique. | Conditions permettant d'atteindre les valeurs indiquées ci-dessus pour les éléments de qualité biologique. |

Dans le cadre des programmes de mesures, lorsque celles-ci sont pertinentes pour le type de masse d'eau concerné, des actions doivent être engagées pour ces 3 EQH (extrait de la Circulaire DCE n° 2005-12 du 28/07/05. Nous avons mis en gras les aspects concernant directement la gestion sédimentaire) :

- pour le régime hydrologique :
  - respect/rétablissement de débits minimums d'étiage (en général, de l'ordre du dixième du module inter annuel) ;
  - maintien/restauration de **crues morphogènes** (débit de plein bord) à des fréquences de retour acceptables (de l'ordre de 1,5 à 2 ans) ;
  - maintien de la connexion avec les eaux souterraines.

**NB** : la problématique des éclusées n'est pas clairement évoquée dans cette circulaire mais nous serons amenés à l'intégrer en raison de certains effets hydrosédimentaires avérés (mobilité des substrats de fraie notamment)

- pour la continuité de la rivière :
  - rétablissement des possibilités de circulation (montaison et dévalaison) des organismes aquatiques à des échelles spatiales compatibles avec leur cycle de développement et de survie durable dans l'écosystème ;
  - **rétablissement des flux de sédiments nécessaires au maintien ou au recouvrement des conditions d'habitat des communautés correspondant au bon état.**
- pour les conditions morphologiques :
  - rétablissement/maintien d'un **tracé en plan** et de conditions de **connectivité latérales du cours d'eau avec ses milieux annexes** (prairies inondables, zones humides, bras morts,...) permettant d'assurer à ces communautés les conditions d'habitat nécessaires à leur développement et à leur survie durable (en particulier, **granulométrie des fonds**, vitesses de courant, hauteur d'eau) ;
  - rétablissement ou maintien d'un état des berges et de la végétation riveraine compatibles avec le développement et la survie des organismes correspondant au bon état écologique.

Le niveau d'intervention est à ajuster en fonction de ce qu'il est nécessaire d'entreprendre pour atteindre le bon état écologique, en particulier le bon état des éléments de qualité biologique. **Ces mesures peuvent se traduire par des actions aussi bien sur le milieu aquatique lui-même que sur son bassin-versant.**

## Indice

Un indice est un indicateur global d'évaluation de l'état du système. Il peut être calculé comme une métrique englobant toutes les fonctionnalités du système pour un groupe animal ou végétal donné (indice monométrique. Ex : IBD, IBMR, IBGN) ou comme la combinaison de plusieurs métriques, traduisant alors la synthèse des indications données individuellement par ces métriques (indice multimétrique. Ex : I2M2, IPR).

A ce jour, il n'existe que peu d'indices globaux d'état hydromorphologique d'un hydrosystème (MQI (Morphological Quality Index) de Rinaldi et al. (2013, 2014, 2016, 2017) ; IMG de Gob et al., 2021).

On trouve aussi dans la littérature des indices hydromorphologiques basés sur des calculs de caractéristiques de différentes métriques (l'indice de tressage, l'indice de banc, le coefficient de sinuosité, etc.), qui peuvent synthétiser certaines caractéristiques de formes ou de processus hydromorphologiques.

## Etat de référence

Aquaref définit l'**état de référence** d'un milieu aquatique comme l'état dans lequel il serait dans des conditions naturelles ou proches du naturel, c'est à dire **non impactées par les activités anthropiques** (revoir la grille des EQH ci-dessus). Cette référence peut être historique (état avant perturbation) ou géographique (secteur de contrôle). Cette notion est très différente de celle de biodiversité, puisqu'un milieu peut, par exemple, être naturellement pauvre, ou chargé en matières organiques et en azote, ou pauvre en oxygène. Cette référence est donc obligatoirement rapportée au type de milieu considéré. Sur le profil longitudinal d'un même hydrosystème les références pourront donc être très différentes entre les zones amont (ruisseaux, torrents), médianes (rivières moyennes de plaines ou de collines) et aval (grands cours d'eau). Certaines méthodes de bioindication intègrent la diversité des types écologiques dans leur construction.

Dans le domaine de l'hydromorphologie, comme dans bien d'autres domaines des sciences de la terre et de la nature, **il est difficile d'établir de manière certaine ce que seraient aujourd'hui l'état et le fonctionnement d'un cours d'eau (historique) en l'absence d'activités anthropiques.**

En effet, les modifications climatiques notamment, même légères, ont des effets sur les caractéristiques hydrologiques des cours d'eau (intensité, durée, fréquence des crues et des étiages notamment) et sur la végétalisation des sols des bassins versants. Ces effets, qui sont souvent cumulés à des aménagements ou des pratiques anthropiques, peuvent être très rapidement visibles sur les processus hydromorphologique (érosion des sols, transport solide en rivière, érosion des berges, etc.), les formes fluviales qui en résultent (bancs alluviaux, style fluvial (méandrage actif, tressage), etc.) et les biocénoses associées.

Faire la part de ce qui est d'origine naturelle ou anthropique dans le fonctionnement actuel des cours d'eau est donc très complexe, même si un inventaire précis des pressions humaines, actuelles et passées, sur un bassin versant et son réseau hydrographique est tout à fait réalisable.

C'est pourquoi nous prendrons ici le parti de travailler plutôt sur l'analyse de **trajectoires** et proposerons un certain nombre de métriques et indicateurs dont les caractéristiques pourront être positionnées le long d'un axe temporel, ce qui permettra de caractériser leur évolution au cours des décennies passées et de déceler d'éventuels **dysfonctionnements**. En effet, même si l'on s'abstrait du concept de référence historique, il sera tout de même nécessaire d'établir, pour un certain nombre de métriques et d'indicateurs, des **valeurs repère ou cible**, qui permettront de définir s'il est nécessaire ou non d'agir pour infléchir les trajectoires observées et leur évolution probable à moyen/long terme. Ces valeurs (ou plages de valeurs) pourront alors être considérées comme des objectifs à atteindre au moyen d'actions adaptées. Dans une démarche évaluative de type CI, la référence géographique (le contrôle) sera également intéressante pour évaluer le succès de nos actions.

## Etat écologique

L'**état écologique** est l'état du fonctionnement d'un écosystème aquatique comparé à un modèle théorique de référence, pour en déduire l'écart à cette référence. Ce sont les fonctionnalités qui doivent in fine être évaluées, et non la composition (bien que ce soit la composition taxonomique qui serve de base à cette évaluation des fonctionnalités, en tant que bioindicateur). L'état écologique comprend principalement l'évaluation biologique, mais également l'évaluation d'un certain nombre de paramètres physico-chimiques de qualité générale, conditionnant directement l'état biologique.

Dans la mesure où la DCE et les SDAGE qui guident sa mise en œuvre ont pour objectif l'atteinte du **bon état des masses d'eau**, nous nous attacherons dans ce guide à proposer, outre les indicateurs « classiques » d'état écologique, qu'il est souvent difficile de relier directement à des actions, des métriques et indicateurs d'état hydromorphologique et morphoécologique (concept d'habitat, voir plus loin) qui pourront être considérés comme des **proxys** de l'état écologique.

## Pression

Aquaref définit une **pression anthropique** comme une modification structurelle sur une unité hydrographique (un bassin, secteur de bassin ou sous bassin), due aux activités humaines, qui engendre directement ou indirectement une modification des paramètres environnementaux subie par les peuplements aquatiques. Par exemple : cultures intensives, rejets urbains ou industriels, aménagements morphologiques, prélèvements ou détournement d'eau, barrages.

Dans le cadre de ce guide, nous appellerons donc **pression** toute **intervention d'origine anthropique se traduisant par une modification des formes et des processus hydrosédimentaires naturels**.

## ANNEXE 2 : PRINCIPAUX TEXTES JURIDIQUES ENCADRANT LA GESTION SEDIMENTAIRE



Il s'agit des textes en vigueur à la date de publication du guide. Nous invitons le lecteur à s'informer des évolutions réglementaires qui auraient pu intervenir depuis.

- **Arrêté du 22 septembre 1994** relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières :
  - article 11. - 11.2. Extraction en nappe alluviale:
    - I. - **Les extractions de matériaux dans le lit mineur des cours d'eau et dans les plans d'eau traversés par des cours d'eau sont interdites.** Le lit mineur est le terrain recouvert par les eaux coulant à pleins bords avant tout débordement. Si des extractions sont nécessaires à l'entretien dûment justifié ou à l'aménagement d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau, elles sont alors considérées comme un **dragage**.
- **Arrêté du 24 janvier 2001** modifiant l'arrêté précédent :
  - article 1er. - Le deuxième alinéa du I du 11.2 de l'article 11 de l'arrêté du 22 septembre 1994 susvisé est ainsi modifié : «**Le lit mineur d'un cours d'eau est l'espace d'écoulement des eaux formé d'un chenal unique ou de plusieurs bras et de bancs de sables ou galets, recouvert par les eaux coulant à pleins bords avant débordement.**» ;
  - article 2. - Le II du 11.2 de l'article 11 de l'arrêté du 22 septembre 1994 susvisé est ainsi modifié : « II. - **Les exploitations de carrières en nappe alluviale dans le lit majeur ne doivent pas créer de risque de déplacement du lit mineur**, faire obstacle à l'écoulement des eaux superficielles ou aggraver les inondations. **Les exploitations de carrières de granulats sont interdites dans l'espace de mobilité du cours d'eau.** L'espace de mobilité du cours d'eau est défini comme l'espace du lit majeur à l'intérieur duquel le lit mineur peut se déplacer. L'espace de mobilité est évalué par l'étude d'impact en tenant compte de la connaissance de l'évolution historique du cours d'eau et de la présence des ouvrages et aménagements significatifs, à l'exception des ouvrages et aménagements à caractère provisoire, faisant obstacle à la mobilité du lit mineur. Cette évaluation de l'espace de mobilité est conduite sur un secteur représentatif du fonctionnement géomorphologique du cours d'eau en amont et en aval du site de la carrière, sur une longueur minimale totale de 5 kilomètres. L'arrêté d'autorisation fixe la distance minimale séparant les limites de l'extraction des limites du lit mineur des cours d'eau ou des plans d'eau traversés par un cours d'eau. Cette distance doit garantir la stabilité des berges. Elle ne peut être inférieure à 50 mètres vis-à-vis des cours d'eau ayant un lit mineur d'au moins 7,50 mètres de largeur. Elle ne peut être inférieure à 10 mètres vis-à-vis des autres cours d'eau. ».
- **Arrêté du 30 mai 2008** fixant les prescriptions générales applicables aux **opérations d'entretien de cours d'eau ou canaux soumis à autorisation ou à déclaration** en application des articles L. 214-1 à L. 214-6 du code de l'environnement et relevant de la rubrique 3.2.1.0 de la nomenclature annexée au tableau de l'article R. 214-1 du code de l'environnement.

Nous n'avons repris ci-dessous que les articles les plus importants vis-à-vis de notre problématique de gestion sédimentaire. L'arrêté complet est sur :  
<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000019061664/>

  - article 2 : [...] Lors de la réalisation de l'opération, le déclarant ne doit en aucun cas dépasser les seuils de déclaration ou d'autorisation des autres rubriques de la nomenclature sans en avoir fait au préalable la déclaration ou la demande d'autorisation et avoir obtenu le récépissé de déclaration ou l'autorisation, notamment en ce qui concerne la rubrique suivante : 3. 1. 2. 0 : installations, ouvrages, **travaux ou activités conduisant à modifier le profil en long ou le profil en travers du lit mineur d'un cours d'eau**, à l'exclusion de ceux visés à la rubrique 3. 1. 4. 0, ou conduisant à la dérivation d'un cours d'eau [...]

- article 3 : Les **extractions de matériaux dans le lit mineur ou dans l'espace de mobilité des cours d'eau ainsi que dans les plans d'eau traversés par des cours d'eau sont interdites**<sup>6</sup>. **Seuls peuvent être effectués les retraits ou déplacements de matériaux liés au curage d'un cours d'eau ou plan d'eau traversé par un cours d'eau répondant aux objectifs et aux conditions de réalisation fixés par le présent arrêté.** Le terme « curage » couvre toute opération en milieu aquatique impliquant la mobilisation de matériaux, même d'origine végétale, dans un canal ou dans le lit mineur ou l'espace de mobilité d'un cours d'eau.

Le **lit mineur** d'un cours d'eau est l'espace recouvert par les eaux coulant à pleins bords avant débordement. L'**espace de mobilité** du cours d'eau est défini comme l'espace du lit majeur à l'intérieur duquel le lit mineur peut se déplacer ;

- article 4 : Le programme intégré dans le dossier d'autorisation ou déclaration définit les interventions prévues sur la base d'un **diagnostic de l'état initial des milieux** et d'un **bilan sédimentaire faisant ressortir les déséquilibres**, en référence à l'**objectif de bon état ou de bon potentiel** fixé pour l'unité hydrographique concernée. Cet état initial des lieux comporte : un report des principales **zones de frayères** ; un **descriptif de la situation hydrobiologique, biologique et chimique** ; une **description hydromorphologique du secteur comprenant une délimitation des principales zones d'érosion et de dépôt de sédiments** ; un descriptif des désordres apparents et de leurs causes, notamment dans le fonctionnement hydromorphologique du cours d'eau ;

- article 5 : Le déclarant ou le bénéficiaire de l'autorisation doit **justifier l'éventuelle nécessité de recours au curage** au regard des objectifs mentionnés au II de l'article L. 215-15 du code de l'environnement ou pour le maintien et le rétablissement des caractéristiques des chenaux de navigation. **Le nombre, l'étendue, la durée et la fréquence des opérations de curage doivent être limités au strict nécessaire permettant d'atteindre l'objectif fixé, afin de minimiser les impacts négatifs sur l'environnement, y compris ceux relatifs aux aspects hydromorphologiques susceptibles d'entraîner une altération de l'état écologique.** En cas de nécessité de curage, **l'étude d'incidence doit étudier et conclure sur la faisabilité de la remise dans le cours d'eau des matériaux mobilisés**, notamment au regard de la contamination des sédiments, des effets sur les habitats aquatiques à l'aval et des conditions technico-économique [...].

Les données biologiques à acquérir in situ concernent à la fois la **faune et la flore aquatique**. Le choix des éléments biologiques à étudier doit être guidé par la représentativité de chacun d'entre eux dans l'hydrosystème et leur pertinence écologique par rapport au type de milieu concerné par les opérations de curage, au niveau des travaux ainsi qu'en aval proche.

En complément, il convient de rechercher la présence d'espèces protégées ou à forte valeur patrimoniale dans la zone des travaux et dans la zone qu'ils influencent, ainsi que tout **habitat remarquable pour son fonctionnement écologique (frayères...)**. Ces éléments peuvent influencer les modalités de mise en œuvre du chantier ;

- article 9 : **Les matériaux mobilisés dans une opération de curage doivent être remis dans le cours d'eau afin de ne pas remettre en cause le mécanisme de transport naturel des sédiments et le maintien du lit dans son profil d'équilibre, dans les conditions prescrites à l'article 8.** Lorsqu'ils ne peuvent être remis dans le cours d'eau, au regard des éléments fournis conformément à l'article 5 du présent arrêté, le maître d'ouvrage du curage est responsable du devenir des matériaux. [...];

- article 10 : **Un an après la fin des travaux** ou à mi-parcours dans le cas d'une autorisation pluriannuelle de plus de cinq ans, le déclarant ou le bénéficiaire de l'autorisation fournit au service chargé de la police de l'eau un **rapport évaluant les éventuels écarts avec les impacts mentionnés dans l'étude d'incidence initiale**. Cette évaluation peut nécessiter des prélèvements et analyses physico-chimiques et biologiques de même nature que ceux entrepris lors de l'étude préalable. Ce rapport inclut également un **bilan sur l'efficacité des travaux mis en œuvre**. Le déclarant ou le bénéficiaire de l'autorisation pluriannuelle informe le service chargé de la police de l'eau du moment, du lieu et du type d'intervention qu'il s'appête à réaliser chaque année dans le respect du programme déclaré ou autorisé. Il en est de même lorsqu'un événement hydraulique survient susceptible de remettre en cause les interventions programmées et que de nouvelles actions doivent être envisagées.

---

<sup>6</sup> Reprise des deux arrêtés présentés plus haut

- **Article L215-15 du Code de l'Environnement (CE)**

- I. – Les opérations groupées d'entretien régulier d'un cours d'eau, canal ou plan d'eau et celles qu'impose en montagne la sécurisation des torrents sont menées dans le cadre d'un **plan de gestion établi à l'échelle d'une unité hydrographique cohérente** et compatible avec les objectifs du schéma d'aménagement et de gestion des eaux lorsqu'il existe. Ce plan de gestion est approuvé par l'autorité administrative. Lorsque les opérations constituant le plan de gestion sont soumises à autorisation au titre de l'article L. 181-1 ou à déclaration au titre de l'article L. 214-3, l'autorisation environnementale ou la déclaration valent approbation du plan de gestion. Lorsque les collectivités territoriales, leurs groupements ou les syndicats mixtes créés en application de l'article L. 5721-2 du code général des collectivités territoriales prennent en charge cet entretien groupé en application de l'article L. 211-7 du présent code, la déclaration d'intérêt général est, dans ce cas, pluriannuelle, d'une durée adaptée à la prise en charge de l'entretien groupé. Lorsque les opérations constituant le plan de gestion sont soumises à autorisation environnementale au titre de l'article L. 181-1, l'enquête publique prévue pour la déclaration d'intérêt général est menée conjointement avec celle prévue à l'article L. 181-9.

**Le plan de gestion peut faire l'objet d'adaptations, en particulier pour prendre en compte des interventions ponctuelles non prévisibles rendues nécessaires à la suite d'une crue** ou de tout autre événement naturel majeur et des interventions destinées à garantir la sécurité des engins nautiques non motorisés ainsi que toute opération s'intégrant dans un plan d'action et de prévention des inondations. Ces adaptations sont approuvées par l'autorité administrative.

- II. – **Le plan de gestion mentionné au I peut comprendre une phase de restauration prévoyant des interventions ponctuelles telles que le curage**, si l'entretien visé à l'article L. 215-14 n'a pas été réalisé ou si celle-ci est nécessaire pour assurer la sécurisation des cours d'eau de montagne. Le recours au curage doit alors être limité aux objectifs suivants : remédier à un dysfonctionnement du transport naturel des sédiments de nature à remettre en cause les usages visés au II de l'article L. 211-1, à empêcher le libre écoulement des eaux ou à nuire au bon fonctionnement des milieux aquatiques ; lutter contre l'eutrophisation ; aménager une portion de cours d'eau, canal ou plan d'eau en vue de créer ou de rétablir un ouvrage ou de faire un aménagement.

- **Article L.214-17 I 2° du Code de l'Environnement (CE)** : Classements de cours d'eau en liste 2. L'alinéa 2° de cet article établit une liste de cours d'eau, parties de cours d'eau ou canaux dans lesquels il est **nécessaire d'assurer le transport suffisant des sédiments** et la circulation des poissons migrateurs. Ce texte s'applique aux ouvrages (seuils, barrages) situés sur ces cours d'eau classés.

Des précisions sont apportées dans la circulaire du 18 janvier 2013, notamment son annexe 2 :

- le transport suffisant doit « garantir la vie des biocénoses aquatiques dont les habitats sont inféodés au substrat alluvial. Assurer une **superficie, une épaisseur, une nature granulométrique du substrat alluvial** et sa mise en mouvement permettant la vie des espèces cibles ». Cela va au-delà de la « simple » préservation/restauration de frayères à poissons lithophiles ;
- le transport suffisant **s'applique aux sédiments grossiers**. On considère qu'il n'est plus suffisant à l'échelle d'un tronçon si l'altération de la continuité sédimentaire conduit à la **dégradation des habitats aquatiques et au bon fonctionnement des biocénoses**.

# ANNEXE 3 : TABLEAU DES ENJEUX / OBJECTIFS / MOYENS / ACTIONS

## Enjeux de bon état écologique

| Enjeu                                     | Objectif  | Emboîtement Enjeu/Objectif/Moyens d'action/Actions                        |   |   |  | Nature de l'effet   |              |                   |                    | Indicateurs   |  |   |   |   |                            |
|---|---|---|---|---|--|---|--------------|-------------------|--------------------|---|--|---|---|---|----------------------------|
|   |   | Sous-objectif niveau 1  | Sous-objectif niveau 2  | Moyen d'action                          | Action   | Générique/spécifique  | Global/local | Immédiat/lg terme | Durable/temporaire | Indicateur de moyen                                     | Indicateur HyMo de résultat (proxy)                                      | Indicateur écologique de résultat         |   |   |                            |
| Etat écologique de l'hydrosystème         | Restaurer le bon état écologique DCE ainsi que la biodiversité des rives et du lit majeur | Restaurer les habitats du lit mouillé                                     | Restaurer les SGF (Surfaces de Granulométrie Favorable) pour la reproduction des poissons lithophiles | Augmenter les apports solides grossiers | App. externes : reconnecter versants/lit                                     | G   | G            | I                 | D                  | nombre ou linéaire de versants reconnectés              | Superficie de SGF  | -nb/densité de 0+ de poissons lithophiles |   |   |                            |
|   |   |   |   |   | App. internes : activer l'érosion des berges                                 | G   | G            | I                 | D                  | surfaces érodées  |  |   |   |   |                            |
|   |   |   |   |   | App. internes : améliorer structurellement la continuité amont/aval ouvrages | G   | G            | I/L               | D/T                | nombre d'ouvrages devenus structurellement transparents |  |   |   |   |                            |
|   |   |   |   |   | App. internes : améliorer la gestion de la continuité amont/aval ouvrages    | G   | G            | I                 | T                  | nombre d'ouvrages gérés en transparence                 |  |   |   |   |                            |
|   |   |   |   |   | App. internes : dévégétaliser les berges                                     | G   | G            | I                 | T                  | superficie de berges dévégétalisées                     |  |   |   |   |                            |
|   |   |   |   |   | réinjection sédimentaire   | G   | G            | I                 | T                  | volumes réinjectés                                      |  |   |   |   |                            |
|   |   |   | Augmenter l'épaisseur alluviale (globale ou sur certains types de faciès)                             | Augmenter les apports solides grossiers | Mettre en place des micro-structures pour piéger une partie des sédiments    | S   | L            | I                 | D                  | Nombre de petits seuils créés                           | augmentation épaisseur alluviale sur certains types de faciès (ex : PLA) | -indicateurs invertébrés ?                |   |   |                            |
|   |   |   |   |   | Implantation de petits seuils  | S   | L            | I                 | D                  | Nombre de déflecteurs divers créés                      |  |   |   |   |                            |
|   |   |   |   |   | Implantation de déflecteurs divers   | S   | L            | I                 | D                  | Nombre de déflecteurs divers créés                      |  |   |   |   |                            |
|   |   |   |   |   | Elargir le lit mineur  | G   | L            | I                 | D                  | linéaire élargi et % d'augmentation de largeur          |  |   |   |   |                            |
|   |   |   |   |   | Augmenter directement l'épaisseur alluviale                                  | Recharger le lit mineur sur une certaine épaisseur (avec ou sans structures de stabilisation) |              |                   |                    |   |  |   | linéaire haussé et épaisseur de la recharge | - pérenité du linéaire haussé et de l'épaisseur de la recharge<br>- régulation de la thermie<br>- présence d'écoulement hyperbériques | -indicateurs invertébrés ? |
|   |   |   |   |   | Stabiliser l'incision  | Augmenter les apports solides grossiers   |              |                   |                    |   |  |   |   | ligne d'eau ou fond sur profils en long et en travers   |                            |
| Mettre en place des rampes sous fluviales | Mettre en place des rampes sous fluviales   | S   | G/L   | I                                       | D  | Nombre de rampes sous fluviales créées  |              |                   |                    |   |  |   |   |   |                            |
| Résorber / atténuer le pavage             | Augmenter les apports solides grossiers   | Mettre en place des micro-structures pour piéger une partie des sédiments | Augmenter les apports solides grossiers   |   |  |   |              |                   |                    | superficiés pavés                                       | -indicateurs invertébrés ?   |   |   |   |                            |
|   |   |   |   |   |  |   |              |                   |                    | superficiés avec substratum affleurant                  | -indicateurs invertébrés ?   |   |   |   |                            |

| Enjeu   | Objectif  | Emboîtement Enjeu/Objectif/Moyens d'action/Actions       |  |   |   | Nature de l'effet   |   |                   |                                 | Indicateurs  |  |                                   |                          |  |
|---|---|--|--|---|---|---|---|-------------------|---------------------------------|--|--|-----------------------------------|--------------------------|--|
|   |   | Sous-objectif niveau 1                                   | Sous-objectif niveau 2                           | Moyen d'action                          | Action  | Générique/spécifique  | Global/local  | Immédiat/lg terme | Durable/temporaire              | Indicateur de moyen  | Indicateur HyMo de résultat (proxy)  | Indicateur écologique de résultat |                          |  |
| Etat écologique de l'hydrosystème                                     | Restaurer le bon état écologique DCE ainsi que la biodiversité des rives et du lit majeur | Restaurer les habitats du lit mouillé                    | Résorber/atténuer le colmatage                   | Limiter les apports de sédiments fins   | Réduire l'érosion des sols naturels productifs en fines       | G   | G   | L                 | D                               | Superficie protégée contre l'érosion   | - colmatage superficiel : superficies colmatées sur faciès type RAD et/ou PLA (Protocole Archambaud)<br>- colm. intersittiel. (Protocole Datry). | -indicateurs invertébrés ?        |                          |  |
|   |   |  |  |   | Réduire l'érosion des sols agricoles                          | G   | G   | L                 | D                               | Superficie protégée contre l'érosion   |  |                                   |                          |  |
|   |   |  |  |   | Implanter des structures linéaires de rétention sédimentaire  | G   | G   | I                 | D                               | Linéaire créé  |  |                                   |                          |  |
|   |   |  |  |   | Implanter des structures localisées de rétention sédimentaire | G   | G   | I                 | D                               | Nb et volume des structures créées   |  |                                   |                          |  |
|   |   |  |  |   | Gérer les chasses et vidanges de barrages                     | G   | G   | I                 | T                               | Nb de chasses/vidanges "mal" gérées  |  |                                   |                          |  |
|   |   |  |  |   | réaliser des lâchers morphogènes                              | G   | G   | I                 | T                               | Nb de lâchers réalisés   |  |                                   |                          |  |
|   |   |  | Augmenter la surface de faciès spécifiques       | Augmenter les apports solides grossiers | Favoriser la diversité des écoulements                        | Supprimer les protections de berges (favorise sinuosité et faciès associés) | Elargir le lit mineur   |                   |                                 |  |  |                                   | % des faciès types visés | - radier/plats : augmentation espèces rhizophiles<br>- mouilles : augmentations stades adultes de poissons |
|   |   |  |  |   |   |   | Elargir le lit mineur   |                   |                                 |  |  |                                   |                          |  |
|   |   |  |  |   |   |   | Augmenter les apports solides grossiers                                     |                   |                                 |  |  |                                   |                          |  |
|   |   |  |  |   |   |   | Supprimer les protections de berges (favorise sinuosité et faciès associés) | G                 | L                               | I  | D  | Linéaire de berges "déprotégé"    |                          |  |
|   |   |  |  |   |   |   | Recréer mécaniquement un lit sinueux  | G                 | L                               | I  | D  | Linéaire recréé                   |                          |  |
|   |   |  |  |   |   |   | Elargir le lit mineur   |                   |                                 |  |  |                                   |                          |  |
| Restaurer les habitats de la bande active et semi-active              | Augmenter les apports solides grossiers   | Dévégétaliser mécaniquement la bande semi-active         | Dévégétaliser mécaniquement la bande semi-active | Elargir le lit mineur                   | G   | G/L   | I   | T                 | Superficie dévégétalisée        | - largeur bande active<br>- indice de banc<br>- épaisseur moyenne des bancs<br>- indice BRB ou BRP | - espèces d'oiseaux, insectes etc. inféodés à la bande active  |                                   |                          |  |
|   |   |  |  | Elargir le lit mineur                   |   |   |   |                   |                                 |  |  |                                   |                          |  |
|   |   |  |  | Elargir le lit mineur                   |   |   |   |                   |                                 |  |  |                                   |                          |  |
|   |   |  |  | Elargir le lit mineur                   |   |   |   |                   |                                 |  |  |                                   |                          |  |
|   |   |  |  | Elargir le lit mineur                   |   |   |   |                   |                                 |  |  |                                   |                          |  |
|   |   |  |  | Recréer certains chenaux                | S   | L   | I   | T                 | Linéaire de CS recréé           |  |  |                                   |                          |  |
| Restaurer les habitats du lit majeur et leur connexion au cours d'eau | Augmenter les apports solides grossiers   | Restaurer / augmenter le linéaire de chenaux secondaires | Recréer certains chenaux                         | Augmenter les apports solides grossiers |   |   |   |                   | fréquence de débordement        | biocénoses des zones humides du lit majeur   |  |                                   |                          |  |
|   |   |  |  | Recréer certains chenaux                |   |   |   |                   | linéaire de chenaux secondaires | biocénoses des CS du lit majeur  |  |                                   |                          |  |
|   |   |  |  | Recréer certains chenaux                |   |   |   |                   | linéaire d'annexes hydrauliques | biocénoses des annexes hydrauliques du lit majeur  |  |                                   |                          |  |

Autres enjeux

| Emboitement Enjeu/Objectif/Moyens d'action/Actions |   |   |   |   |   | Indicateurs  |   |   |
|--|---|---|---|---|---|--|---|---|
| Enjeu  | Objectif  | Sous-objectif niveau 1  | Sous-objectif niveau 2                                  | Moyen d'action  | Action  | Indicateur de moyen  | Indicateur HyMo de résultat (proxy)           |   |
| Protection des biens et des personnes              | garantir la sécurité des biens et des personnes | limiter les inondations   | conserver/restaurer une section d'écoulement suffisante | Réduire les apports solides                           | Stabiliser les versants                               | Superficie stabilisée  | section d'écoulement ou débit de pleins bords |   |
|  |   |   |   | conserver/restaurer mécaniquement une section         | Pièges à sédiments en amont                           | Nombre d'ouvrages créés et volume  |   |   |
|  |   | gérer les dépôts torrentiels en lit                                   | gérer les dépôts torrentiels en lit mineur/majeur       | Réduire les apports solides                           | Curer jusqu'au profil d'objectif                      | Section curée  | Superficie dévégétalisée                      | superficies occupées par des dépôts torrentiels                   |
|  |   |   |   | Curer les dépôts                                      | Gérer la végétation du lit mineur                     | Superficie dévégétalisée   |   |   |
|  |   | préserver les digues  | Stabiliser l'incision                                   | Augmenter les apports solides grossiers               | Mettre en place des rampes sous fluviales             | Curer les dépôts   | Volumes curés                                 | comparaison ligne d'eau ou fond sur profils en long et en travers |
|  |   |   |   |   | Elargir le lit mineur                                 |  |   |   |
|  |   |   |   |   | Créer / restaurer les protections                     |  |   |   |
|  |   | préserver les protections de berges                                   | Stabiliser l'incision                                   | Augmenter les apports solides grossiers               | Mettre en place des rampes sous fluviales             | Curer/aplanir les bancs latéraux   | Superficie de bancs traitée                   |   |
|  |   |   |   |   | Elargir le lit mineur                                 |  |   |   |
|  |   |   |   |   | Réduire les dépôts sédimentaires favorisant l'érosion |  |   |   |
|  |   | réduire les processus érosifs   | Créer / restaurer les protections                       |   |   |  |   |   |
|  |   | préserver les ponts   | Stabiliser l'incision                                   | Augmenter les apports solides grossiers               | Mettre en place des rampes sous fluviales             | rectifier le tracé pour éviter les courants secondaires érosifs en concavité | Superficie de bancs traitée                   | Linéaire rectifié   |
|  |   |   |   |   | Elargir le lit mineur                                 |  |   |   |
|  |   |   |   |   | Créer / restaurer les protections                     |  |   |   |
|  |   | réduire les érosions latérales des terrains en bordure de cours d'eau | réduire les processus érosifs                           | Réguler les dépôts sédimentaires favorisant l'érosion | garantir le bon fonctionnement sur le long            | rectifier le tracé pour éviter les courants secondaires érosifs en concavité | Superficie de bancs traitée                   | Linéaire rectifié   |
|  |   |   |   |   | Créer / restaurer les protections                     |  |   |   |
|  | protéger les berges                             |   |   |   |   | linéaire et état des protections   |   |   |

| Emboitement Enjeu/Objectif/Moyens d'action/Actions |  |   |                                     |   |  | Indicateurs                           |   |
|--|--|---|-------------------------------------|---|--|---------------------------------------|---|
| Enjeu  | Objectif   | Sous-objectif niveau 1                              | Sous-objectif niveau 2              | Moyen d'action  | Action   | Indicateur de moyen                   | Indicateur HyMo de résultat (proxy)                               |
| Navigation fluviale                                | Garantir les usages                              | maintenir un chenal de navigation                   | maintenir un chenal de navigation   | Réduire les apports solides   | Mettre en place des structures d'autoentretien du chenal navigable | Nombre de structures créées           | linéaire non navigable  |
|  |  |   |                                     | Entretien un chenal navigable   | Curer jusqu'au profil d'objectif                                   | Linéaire curé                         |   |
| Retenues à usage hydroélectrique, AEP, loisirs     | Garantir les usages                              | maintenir un volume utile                           | maintenir un volume utile           | Réduire les apports solides   | Mettre en place des structures d'autoentretien de l'ouvrage        | Nombre de structures créées           | % ou nombre de points noirs                                       |
|  |  |   |                                     | Entretien l'ouvrage   | Curage   | Nombre de sites et volumes curés      |   |
| Captages en nappe                                  | maintenir/restaurer la productivité des captages | maintenir/restaurer le niveau de la nappe alluviale | Stabiliser l'incision               | Augmenter les apports solides grossiers                                 | implantation de seuils hauts                                       |                                       | comparaison ligne d'eau ou fond sur profils en long et en travers |
|  |  |   |                                     | Mettre en place des rampes sous fluviales                               |  |                                       |   |
|  |  |   |                                     | Elargir le lit mineur   |  |                                       |   |
|  |  |   |                                     | Augmenter les apports solides grossiers                                 |  |                                       |   |
| Deltas, estuaires, trait de côte                   | Garantir le bon fonctionnement                   | garantir la continuité sédimentaire                 | garantir la continuité sédimentaire | Rendre transparents le maximum de pièges à sédiments, fins et grossiers |  | Nombre d'ouvrages rendus transparents | Evolution du trait de côte, delta, estuaire                       |
|  |  |   |                                     |   |  |                                       |   |

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

### Manuels, guides, notes techniques

AFB (2017) : Carhyce - Protocole de recueil de données hydromorphologiques à l'échelle de la station sur les cours d'eau prospectables à pied. Coll. Guides et protocoles.

André A., Malavoi J.R., Valette E., 2022 : Echantillonnage et mesures granulométriques des sédiments grossiers : objectifs, méthodes et contraintes. Note technique EDF-CIH.

Archambaud, G., Giordano, L., Dumont, B., 2005. Description du substrat minéral et du colmatage. Note technique. IRSTEA. Aix en Provence.

Datry T., Baudoin J.M., Thivin G. 2013 : Diagnostiquer le colmatage interstitiel du lit des cours d'eau. Synthèse des connaissances, principes méthodologiques et protocole standardisé d'évaluation de l'intensité du phénomène en rivière. Partenariat IRSTEA-ONEMA.

DREAL Aquitaine, 2018 : Document d'aide à la constitution d'un dossier réglementaire IOTA dans le cadre d'un plan de gestion pluriannuel des cours d'eau et des milieux aquatiques. [https://www.gesteau.fr/sites/default/files/gesteau/content\\_files/document/guide\\_dreal\\_dig.pdf](https://www.gesteau.fr/sites/default/files/gesteau/content_files/document/guide_dreal_dig.pdf)

Loire R., Kondolf G.M., Malavoi J.R., Melun G., Piégay H. 2021 : Lâchers d'eau morphogènes : guide de mise en oeuvre. Office français de la biodiversité (OFB), coll. Guides et protocoles. 102 p.

Malavoi J.R., Bravard J.P., 2010 : Eléments d'hydromorphologie fluviale. Coll. Comprendre pour agir. Editions ONEMA. 224 p.

Malavoi J.R., Garnier C.C., Landon N., Recking A., Baran P., 2011. Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière. Coll. Comprendre pour agir. Editions Onema. 216 p.

Malavoi J.R., Loire R., 2015 : Protocole de diagnostic d'état sédimentaire en aval d'un ouvrage. Note technique EDF-CIH.

Marteau B., Piégay H., Moatar F. 2023. L'infrarouge thermique aéroporté, un outil de connaissance des rivières face au changement climatique. Guide méthodologique et recommandations.

Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires (MTECT-DGPR), 2023 : Guide méthodologique pour l'élaboration des plans de prévention des risques d'inondation des cours d'eau torrentiels.

ONF-RTM-INRAE, 2022. Retour d'expérience technique de la crue du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Vésubie, volet torrentiel. Rapport d'expertise pour le compte du Ministère de la Transition Ecologique, Direction Départementales des Territoires et de la Mer, 300 pp.

Rolan-Meynard M., Vivier A., Reyjol Y., Boutet-Berry L., Bouchard J., Mangeot P., Navarro L., Melun G., Moreira-Pellet B., Bramard M., Le Bihan M., Magand C., Laurent T., Vigneron T., Cagnant M., Bourrain X., Morel A., Kreutzenberger K. 2019. Guide pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau. OFB. Coll. Guides et protocoles.

Valette L., Chandresis A., Mengin N., Malavoi J.R., Souchon Y., Wasson J.G., 2008 : Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau SYRAH CE. Principes et méthodes de la sectorisation hydromorphologique. Rapport Cemagref/Onema. 27p.

## Articles

Anderson SW. 2019. Uncertainty in quantitative analyses of topographic change: error propagation and the role of thresholding. *Earth Surface Processes and Landforms* 44: 1015-1033. DOI: 10.1002/esp.4551

Arnaud F, Piégay H, Béal D, Collery P, Vaudor L, Rollet AJ. 2017. Suivi gravel augmentation in a large regulated river and implications for process-based restoration. *Earth Surface Processes and Landforms* 42: 2147-2166. <https://doi.org/10.1002/esp.4161>

Bertrand M, Liébault F. 2019. Active channel width as a proxy of sediment supply from mining sites in New Caledonia. *Earth Surface Processes and Landforms* 44: 67-76. DOI: doi:10.1002/esp.4478

Bless R.(1992). *Einsichten in die Ökologie des Elritze Phoxinus phoxinus (L.)*. Praktische Grundlagen zum Schutz einer gefährdeten Fischart. Schriftenreihe für Landschaftspflege und naturschutz heft35.

Bless R.(1992). *Einsichten in die Ökologie des Elritze Phoxinus phoxinus (L.)*. Praktische Grundlagen zum Schutz einer gefährdeten Fischart. Schriftenreihe für Landschaftspflege und naturschutz heft35.

Blondel J., Ferry C., Frochot B. 1970. La méthode des indices ponctuels d'abondance (IPA) ou des relevés d'avifaune par « station d'écoute ». *Alauda* 38 : 55-71

Borrelli, P., Ballabio, C., Yang, J., Robinson, D., Panagos, P. 2022. GloSEM: High-resolution global estimates of present and future soil displacement in croplands by water erosion. *Scientific Data* (9), Article number: 406.

Borselli L, Cassi P, Torri D. 2008. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *CATENA* 75: 268-277

Boutault F. 2020. Etude de l'impact cumulé des facteurs d'anthropisation sur la Dordogne moyenne et préconisations en vue de la restauration écologique du cours d'eau. Unpublished PhD thesis, Université Jean Moulin Lyon 3, 215 pp.

Bradley DN. 2017. Direct observation of heavy-tailed storage times of bed load tracer particles causing anomalous superdiffusion. *Geophysical Research Letters* 44: 12,227-12,235. <https://doi.org/10.1002/2017GL075045>

Brousse G, Liébault F, Arnaud-Fassetta G, Breilh B, Tacon S. 2020b. Gravel replenishment and active-channel widening for braided-river restoration: The case of the Upper Drac River (France). *Science of The Total Environment*: 142517. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142517>

Brousse G., Arnaud-Fassetta G., Liébault F., Bertrand M., Melun G., Loire R. , Malavoi J.R., Fantino G., Borgniet L. (2019) : Channel response to sediment replenishment in a large gravel-bed river: The case of the Saint-Sauveur dam in the Buëch River (Southern Alps, France). *River Research and Applications*. Vol. 36 Issue 6, <https://doi.org/10.1002/rra.3527>

Burgeap (2017) : Opération de restauration physique du Gardon d'Anduze (30). Etude préliminaire hydromorphologique et propositions d'aménagement. (MOA : EPTB Gardons)

Cavalli M, Trevisani S, Comiti F, Marchi L. 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology* 188: 31-41

Cocchiglia L., Curran S., Hannigan E., Purcell P.J., Kelly-Quinn M. (2012) Evaluation of the effects of fine sediment inputs from stream culverts on brown trout egg survival through field and laboratory assessments, *Inland Waters*, 2:1, 47-58.

Coutaz J. 2021. Interactions entre le transport de sédiments, l'hydrologie et la morphologie dans une rivière en tresses à lit de galets: le Buëch (Alpes-de-Haute-Provence, France). Aix-Marseille Université: Marseille; 399.

Datry, T., Dole-Olivier, M., Marmonier, P., Claret, C., Perrin, J., Lafont, M., Breil, P. (2008). La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau. *Sciences Eaux & Territoires*, (54 Ingénieries-EAT), 03–18.

Datry, T., Dole-Olivier, M., Marmonier, P., Claret, C., Perrin, J., Lafont, M., Breil, P. (2008). La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau. *Sciences Eaux & Territoires*, (54 Ingénieries-EAT), 03–18.

- Datry, T., Lamouroux, N., Thivin, G., Descloux, S., Baudoin, J. M. 2015. Estimation of sediment hydraulic conductivity in river reaches and its potential use to evaluate streambed clogging. *River Research and Applications*, 31(7), 880-891.
- De Vries P. (1997) : Riverine salmonid egg burial depths: review of published data and implications for scour studies. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. Volume 54, Number 8.
- Dépret T. 2014. Fonctionnement morphodynamique actuel et historique des méandres du Cher. Unpublished PhD thesis, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, 530 pp.
- Descloux, S., 2011. Le colmatage minéral du lit des cours d'eau : méthode d'estimation et effets sur la composition et la structure des communautés d'invertébrés benthiques et hyporhéiques. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard Lyon 1.
- Duerregger A., Pander J., Palt M., Mueller M., Nagel C. & Geist J. (2018) The importance of stream interstitial conditions for the early-life-stage development of the European nase (*Chondrostoma nasus* L.). *Ecology of Freshwater Fish*, 27, 920-932.
- Ferguson R.I., Bloomer D.J., Hoey T.B., Werritty A. 2002. Mobility of river tracer pebbles over different timescales. *Water Resources Research* 38. <https://doi.org/10.1029/2001WR000254>
- Ferry C. et Frochot B. (1958). - Une méthode pour dénombrer les oiseaux nicheurs. *La Terre et la Vie*, 2 : 85-102
- Fryirs, K., Brierley, G. J. (2001). Variability in sediment delivery and storage along river courses in Bega catchment, NSW, Australia: implications for geomorphic river recovery. *Geomorphology*, 38, 237–265
- Gayraud, S.. (2001). Les sédiments du lit des cours d'eau : quantification de leur influence sur les peuplements de macro-invertébrés par une approche multi-sites. Thèse de doctorat. Université Lyon I.
- Gilet L, Gob F, Gautier E, Houbrechts G, Vermoux C, Thommeret N. 2020. Hydro-morphometric parameters controlling travel distance of pebbles and cobbles in three gravel bed streams. *Geomorphology* 358: 107117. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107117>
- Haschenburger JK. 2013. Tracing river gravels: Insights into dispersion from a long-term field experiment. *Geomorphology* 200: 121-131. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.03.033>
- Houbrechts G, Van Campenhout J, Levecq Y, Hallot E, Peeters A, Petit F. 2012. Comparison of methods for quantifying active layer dynamics and bedload discharge in armoured gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* 37: 1501-1517. <https://doi.org/10.1002/esp.3258>
- Lallias-Tacon S, Liébault F, Piégay H. 2014. Step by step error assessment in braided river sediment budget using airborne LiDAR data. *Geomorphology* 214: 307-323
- Lamb, H.H. 1963: On the nature of certain climatic epochs which differed from the modern (1900–39) normal. In *Changes of Climate (Proceedings of the WMO-UNESCO Rome 1961 Symposium on Changes of Climate)*, UNESCO Arid Zone Research Series XX, Paris: UNESCO, 125–50. Liébault F, Bellot H, Chapuis M, Klotz S, Deschâtres M. 2012. Bedload tracing in a high-sediment-load mountain stream. *Earth Surface Processes and Landforms* 37: 385-399. DOI: 10.1002/esp.2245
- Le Roy Ladurie E. 1967 : Histoire du climat depuis l'an mil. Editions Flammarion, Paris.
- Lespez L et al (2015), The anthropogenic nature of present-day low energy rivers in western France and implications for current restoration projects, *Geomorphology*, 251, 64–76.
- Liébault F, Deschâtres M, Borgniet L, Melun G. 2023. Granulométrie de surface des lits en tresses à partir d'images drone. *Sciences Eaux & Territoires*: 25-29. DOI: 10.20870/Revue-SET.2023.42.7267
- Liébault F, Piton G, Melun G, Chapuis M, Passy P, 2022. Channel change during catastrophic flood : example of the Alex storm in the Vésudie valley. 10th IAG International Conference on Geomorphology, Coimbra, Portugal, 12-16 September.
- Liébault F. 2003. Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massifs du Diois et des Baronnies). Thèse de Doctorat, Université Lumière Lyon 2; 358 p.

- Liébault F. 2017. Geomorphology and sediment transport of alpine fluvial systems: from steep-slope torrents to piedmont gravel-bed rivers. HDR Université Grenoble Alpes; 150 pp.
- Liébault F., Péteuil C., Rémaître A. 2010. Approches géomorphologiques de la production sédimentaire des torrents, *Revue Science Eaux & Territoires, Risques naturels en montagne*, numéro 02, p. 128-135, 08/09/2010. DOI : 10.14758/SET-REVUE.2010.2.15.
- Loye A. 2013. Budgeting rockfall and modeling sediment delivery in torrent systems. Thèse de doctorat *Institut de Géomatique et d'Analyse du Risque*. Université de Lausanne: Lausanne; 186.
- Malavoi J.R., Souchon Y., 1989 : Méthodologie de description et quantification des variables morphodynamiques d'un cours d'eau à fond caillouteux. *Revue de Géographie de Lyon*.
- Malavoi J.R., Souchon Y., 2002 : Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière. Clé de détermination qualitative et mesures physiques. *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture*.
- Malavoi, J.R., 1989: Typologie des faciès d'écoulement ou unités morphodynamiques des cours d'eau à haute énergie. *Bulletin Français de la Pêche et Pisciculture*
- Marmonier P., Delettre Y., Lefebvre S., Guyon J., Boulton A.J., 2004: A simple technique using wooden stakes to estimate vertical patterns of interstitial oxygenation in the bed of rivers. - *Archiv. Für Hydrobiologie*. 160: 133-143.
- Marteau B., Michel K., Piégay H. (2022) Can gravel augmentation restore thermal functions in gravel-bed rivers? A need to assess success within a trajectory-based before–after control–impact framework. *Hydrological Processes* 36, e14480
- Michler L, Brousse G, Arnaud-Fassetta G, Carozza JM. 2016. Dynamique de la charge de fond de l'Argent Double (affluent de rive gauche de l'Aude, France du Sud): approche croisée "technologie RFID/modélisation numérique du transport solide". *Bulletin de la Société Géographique de Liège* 67: 59-75.
- Nelva, A. & Persat, H. & Chessel, D. (1979). Une nouvelle méthode d'étude des peuplements ichtyologiques dans les grands cours d'eau par échantillonnage ponctuel d'abondance. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. 289. 1295-1298.
- Nicholas AP, Ashworth PJ, Kirkby MJ, Macklin MG, Murray T. 1995. Sediment slugs: large scale fluctuations in fluvial sediment transport rates and storage volumes. *Progress in Physical Geography* 19: 500-519
- Olinde L, Johnson JPL. 2015. Using RFID and accelerometer-embedded tracers to measure probabilities of bed load transport, step lengths, and rest times in a mountain stream. *Water Resources Research* 51: 7572-7589. <https://doi.org/10.1002/2014WR016120>
- Peteuil C, Liébault F, Marco O. 2012. ECSTREM, une approche pratique pour prédire la production sédimentaire des torrents des Alpes françaises. In *12th Congress Interpraevent 2012*, Koboltschnig G, Hübl J, Braun J (eds). International Research Society Interpraevent: Grenoble, France; 293-304.
- Peteuil C. 2010. Synthèse des données de production sédimentaire des bassins versants torrentiels des Alpes françaises. *Note Technique*. ONF-RTM38: Grenoble; 48 pp.
- Piégay H, Arnaud F, Cassel M, Dépret T, Alber A, Michel K, Rollet AJ, Vaudor L. 2016. Suivi par RFID de la mobilité des galets: retour sur 10 ans d'expérience en grandes rivières. *Bulletin de la Société Géographique de Liège* 67: 77-91
- Raleigh, R. F., L. D. Zuckerman, and P. C. Nelson. 1986. Habitat suitability index models and instream flow suitability curves: Brown trout, revised. *U.S. Fish Wildl. Servo Biol. Rep.* 82(10.124). 65 pp.
- Recking, A., D. Vázquez Tarrío, and G. Piton (2023), The contribution of grain sorting to the dynamics of the bedload active layer, *Earth Surface Processes and Landforms*, 1– 18, doi:<https://doi.org/10.1002/esp.5530>.
- Ribes A, Thao S, Vautard R, Dubuisson B, Somot S, Colin J, Planton S, Soubeyroux JM (2019), Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean. *Clim Dyn* 52:1095–1114
- Vázquez-Tarrío D., Tal M., Parrot E., Piégay H. (2022) : Can we incorrectly link armouring to damming? A need to promote hypothesis-driven rather than expert-based approaches in fluvial geomorphology. *Geomorphology*, 413 (2022), Article 108364, 10.1016/j.geomorph.2022.108364.

Vázquez-Tarrío D, Borgniet L, Liébault F, Recking A. 2017. Using UAS optical imagery and SfM photogrammetry to characterize the surface grain size of gravel bars in a braided river (Vénéon River, French Alps). *Geomorphology* **285**: 94-105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.039>.

Wheaton J.M., Brasington J., Darby S.E., Sear D.A. 2010. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms* **35**: 136-156

Wheaton J.M., Bennett S.N., Bouwes, N., Maestas J.D. and Shahverdian S.M. (Editors). 2019. *Low-Tech Process-Based Restoration of Riverscapes: Design Manual. Version 1.0*. Utah State University Restoration Consortium. Logan, UT. 286 pp. DOI: [10.13140/RG.2.2.19590.63049/2](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19590.63049/2).

Whitaker, A. C., et D. F. Potts (2007), Analysis of flow competence in an alluvial gravel bed stream, Dupuyer Creek, Montana, *Water Resources Research*, 43





## ÉLABORER ET METTRE EN ŒUVRE UN PLAN DE GESTION SÉDIMENTAIRE

Dans sa disposition 6A-07 « *mettre en œuvre une politique de gestion des sédiments* », le SDAGE Rhône-Méditerranée 2022-2027 invite les structures exerçant la compétence GEMAPI à établir puis mettre en œuvre un plan de gestion sédimentaire dans un cadre concerté, pour restaurer ou soutenir le bon état écologique des rivières.

Le présent guide propose des éléments de méthode pour l'élaboration et la mise en œuvre de ces plans de gestion sédimentaire. Son contenu s'appuie sur un état de l'art bibliographique très poussé de la connaissance du fonctionnement hydrosédimentaire des cours d'eau et de leurs bassins versants. Il explique pourquoi il peut être nécessaire d'envisager un tel plan au regard des enjeux écologiques et socio-économiques liés à la dynamique sédimentaire sur un territoire. Il présente les étapes pour établir un diagnostic sur ces enjeux, pour identifier et pour dimensionner les actions et pour mettre en place la gouvernance nécessaire sur des bases objectives et concertées. Il détaille ensuite comment engager ces différentes étapes et, enfin, comment organiser la concertation et la validation en associant l'ensemble des parties intéressées, élément essentiel de sa réussite. Ses recommandations visent à concilier la recherche d'un bon état et d'un bon fonctionnement des cours d'eau avec les enjeux socio-économiques, notamment la prévention des risques d'inondation, en appui à la mise en œuvre du PGRI.

Ce guide technique s'adresse principalement aux structures compétentes pour la gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations mais aussi aux bureaux d'étude et aux services de l'État et ses établissements publics dans le cadre de l'accompagnement qu'ils apportent aux gestionnaires.